

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών Μηχανικών
www.eee.uniwa.gr

Θηβών 250, Αθήνα-Αιγάλεω 12244
Τηλ. +30 210 538-1225, Fax. +30 210 538-1226



UNIVERSITY of WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
Department of Electrical & Electronics Engineering
www.eee.uniwa.gr

250, Thivon Str., Athens, GR-12244, Greece
Tel: +30 210 538-1225, Fax: +30 210 538-1226

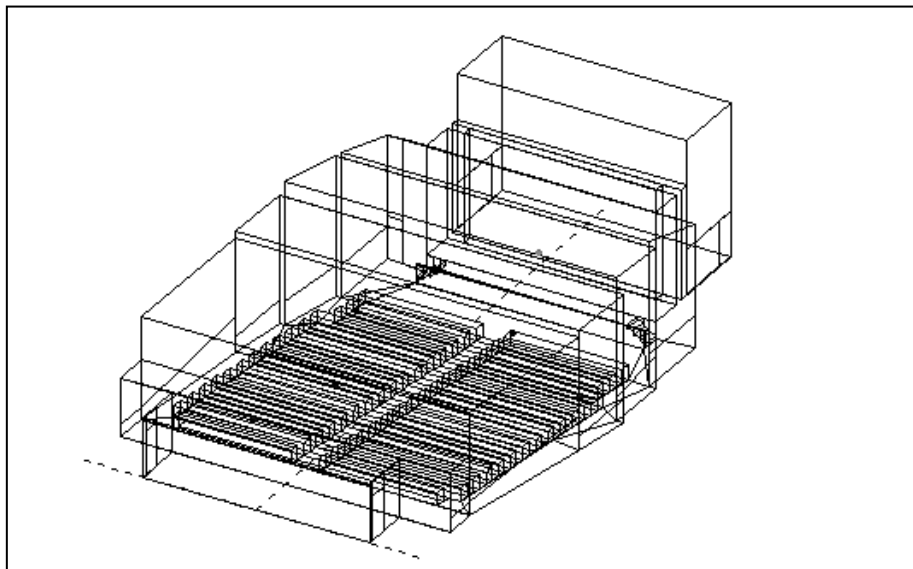
Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Τεχνολογίες Ήχου, Βίντεο και Μετάδοσης

Master of Science in
Audio, Video and Broadcasting Engineering

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τίτλος (ελληνικά):

Μελέτη ακουστικής / ηλεκτροακουστικής αμφιθεατρικού χώρου πολλαπλών χρήσεων.



Μεταπτυχιακή Φοιτήτρια: Τσιριγώτη Μαρία, AM MSCAVB-011

Επιβλέπων : Τάτλας Νικόλαος - Αλέξανδρος, Αναπληρωτής Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2022

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών Μηχανικών
www.eee.uniwa.gr

Θηβών 250, Αθήνα-Αιγάλεω 12244
Τηλ. +30 210 538-1225, Fax. +30 210 538-1226



UNIVERSITY of WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
Department of Electrical & Electronics Engineering
www.eee.uniwa.gr

250, Thivon Str., Athens, GR-12244, Greece
Tel:+30 210 538-1225, Fax:+30 210 538-1226

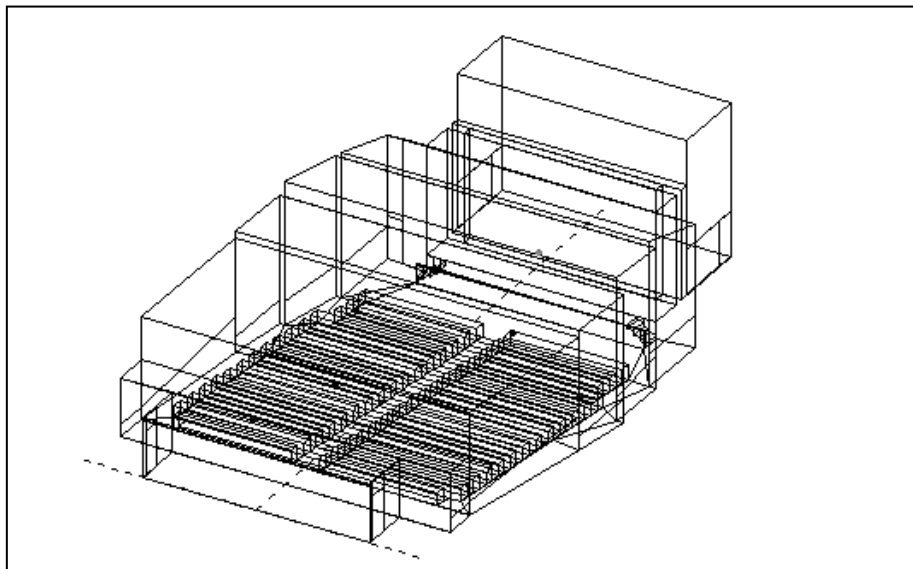
Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Τεχνολογίες Ήχου, Βίντεο και Μετάδοσης

Master of Science in
Audio, Video and Broadcasting Engineering

MSc Thesis

Title (in English):

Multipurpose Amphitheater acoustic / electroacoustic study.



Student: Tsirigoti Maria, Registration Number MSCAVB-011

MSc Thesis Supervisor: Tatlas, Nicolas - Alexander, Associate Professor

ATHENS-EGALEO, SEPTEMBER 2022

Η Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή, εξετάστηκε και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή εξεταστική επιτροπή:

Επιβλέπων	Μέλος	Μέλος
Τάτλας Νικόλαος - Αλέξανδρος	Ποτηράκης Στυλιανός	Καραμπέτσος Σωτήριος
Αναπληρωτής Καθηγητής	Καθηγητής	Αναπληρωτής Καθηγητής

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Τσιριγώτη Μαρία του Αντωνίου με αριθμό μητρώου MSCAVB-011 φοιτήτρια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Τεχνολογίες Ήχου, Βίντεο και Μετάδοση» του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο/Η Δηλών/ούσα

Τσιριγώτη Μαρία

(Υπογραφή)

(Ονοματεπώνυμο)

ΜΤσιριγώτη

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και (Τσιριγώτη Μαρία),

Σεπτέμβριος, 2022

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον/την συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος μέλους ΔΕΠ, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη διπλωματική εργασία παρουσιάζονται η μελέτη ακουστικής ενός αμφιθεατρικού χώρου πολλαπλών χρήσεων και οι τρόποι βελτιστοποίησής της. Σκοπός είναι να γίνει ο χώρος ακουστικά ευχάριστος σε όλο το φάσμα των εκδηλώσεων και για το μέγιστο αριθμό θέσεων. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε στο αμφιθέατρο «Κ2.Συνεδριακό κέντρο» στην Πανεπιστημιούπολη 1 του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Αφορμή αποτέλεσε το συγκεκριμένο αμφιθέατρο, το οποίο στην παρούσα κατάσταση δεν μπορεί να καλύψει επαρκώς όλες τις διαφορετικές χρήσεις που προκύπτουν από πλευράς ακουστικής. Για το χώρο πραγματοποιήθηκε ακουστική προσομοίωση με τη χρήση του λογισμικού CATT-Acoustic, στο οποίο έγινε μοντελοποίηση της αρχιτεκτονικής του χώρου με τα υλικά που διαθέτει αρχικά, καθώς και με τις τροποποιήσεις που προτείνονται. Στο χώρο πραγματοποιήθηκε επιπλέον ηλεκτροακουστική μελέτη, για προσθήκη ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης, καθώς αυτό κρίθηκε απαραίτητο για να επιτευχθεί το βέλτιστο ακουστικό αποτέλεσμα.

ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ: *(Ακουστική Μελέτη, Αμφιθέατρο πολλαπλών χρήσεων, Ηλεκτροακουστική Μελέτη, CATT-Acoustic.)*

ABSTRACT

The dissertation presents the acoustic study of a multipurpose amphitheater and the ways of acoustic optimization. The aim is to make the space acoustically pleasant for a range of events taking place and considering the maximum number of seats. The study was carried out in the amphitheater "K2.Conference Center" on Campus 1 of the University of West Attica. The focus of the study was the specific amphitheater, which in its current situation can not adequately cover all the different uses that arise in terms of acoustics. Acoustic simulation of the place was performed using the CATT-Acoustic software, in which the architecture of the place was modeled with the materials it initially has, as well as with the proposed modifications. An additional electroacoustic study was carried out at the site, to add an electroacoustic installation, as this was deemed necessary to achieve the optimal acoustic result.

KEYWORDS: (*Acoustic study, CATT-Acoustic, Electroacoustic study, Multipurpose amphitheater.*)

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Τάτλα Νικόλαο - Αλέξανδρο για την επιστημονική καθοδήγηση και τη συνεχή υποστήριξη.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τη μαμά μου και τον μπαμπά μου που με στηρίζουν πάντα, με κάθε μέσο.

Ευχαριστώ τον Θεοδωρή για τη συμπαράσταση και την κατανόηση που μου δείχνει σε κάθε μου εγχείρημα.

Ακόμα, ευχαριστώ τη Μαρία, τον Τάμιρ και τη Μιλού για τη βοήθειά τους, σε όλες τις γλώσσες και τον Νέστορα για την παρέα και την έμπνευση.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ:	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Ακουστικά Κριτήρια για μεγάλους κλειστούς χώρους	14
1.1 Διάχυτο Ακουστικό Πεδίο	14
1.2 Χρόνος Αντήχησης (Reverberation Time, RT60).....	15
1.3 Ανακλάσεις	19
1.4 Καταληπτότητα Ομιλίας	19
1.5 Ευκρίνεια (Clarity, C80 & C50)	21
1.6 Οικειότητα (Intimacy)	22
1.7 Διακριτότητα (Definition, D50)	22
1.8 Εξίσωση Hopkins-Stryker, Κρίσιμη απόσταση (Critical distance, D_c), Σταθερά δωματίου (R).....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Μέθοδοι προσομοίωσης ακουστικής κλειστών χώρων.....	25
2.1 Ray Tracing Method	25
2.2 Image Source Method	26
2.3 Hybrid Models.....	27
2.4 Μέθοδοι ακουστικής πρόβλεψης που χρησιμοποιεί το CATT-Acoustic	28
2.4.1 Ray-tracing	28
2.4.2 Randomised Tail-Corrected Cone-Tracing (RTC)	28
2.4.3 The Universal Cone Tracer (TUCT)	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Ακουστική Μελέτη.....	31
3.1 Αμφιθεατρικοί χώροι.....	31
3.2 Χώροι με ρυθμιζόμενη ακουστική	31
3.2.1 Κουρτίνες	31
3.2.2 Ακουστικά Panels.....	32
3.3 Αποτελέσματα	32
3.3.1 Ο χώρος στο CATT-Acoustic.....	33
3.3.2 Χρόνος Αντήχησης του χώρου	36
3.3.3 Αύξηση Ανακλάσεων	38
3.3.4 Ρυθμιζόμενη απορρόφηση με κουρτίνες	40
3.3.5 Ρυθμιζόμενη απορρόφηση με ακουστικά panels.....	42
3.3.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ηλεκτροακουστική Μελέτη	54

4.1 Επιλογή μικροφώνων	54
4.2 Ηλεκτρονικοί controllers	55
4.3 Επιλογή ηχείων	55
4.4 Ακουστική Ανάδραση (feedback)	56
4.5 Χρονική Καθυστέρηση (Delay)	56
4.6 Ρύθμιση αντήχησης	57
4.7 Θεωρητικός υπολογισμός ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης	57
4.7.1 Επίδραση της αντήχησης	60
4.7.2 Απαιτήσεις ηχητικής κάλυψης	61
4.7.3 Θεωρητικά αποτελέσματα.....	62
4.9 Ηλεκτροακουστική εγκατάσταση στο CATT-Acoustic	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Συμπεράσματα – Προτάσεις.....	70
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	73
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΗΓΕΣ.....	101

Ένας χώρος πολλαπλών χρήσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορες περιστάσεις όπως ομιλίες, μουσικές συναυλίες, θεατρικές παραστάσεις, ακόμα και για προβολές ταινιών. Η ακουστική πρέπει να προσαρμόζεται για να είναι ο χώρος λειτουργικός και όλοι οι παρευρισκόμενοι να έχουν άνετη ακρόαση. Ανάλογα με τη χρήση, τα ακουστικά κριτήρια είναι πιθανό να διαφέρουν και ο βέλτιστος χρόνος αντήχησης ενδέχεται να είναι διαφορετικός. Οπότε, θα χρειαστεί ο χώρος να έχει μεταβλητό χρόνο αντήχησης, να μπορεί δηλαδή να μεταβληθεί η απορρόφηση του χώρου ανάλογα με τον εκάστοτε σκοπό. Στους μεγάλους χώρους χρειάζεται και ηλεκτροακουστική εγκατάσταση για βέλτιστα αποτελέσματα.

Η παρούσα μελέτη σκοπεύει να δώσει λύσεις στο πρόβλημα της ακουστικής που υπάρχει στη συγκεκριμένη αίθουσα. Η μελέτη αυτή είναι απαραίτητη, διότι ο χώρος με την υπάρχουσα ακουστική του δεν μπορεί να υποστηρίξει βέλτιστα τις ανάγκες των εκάστοτε εκδηλώσεων. Για την βελτίωση της ακουστικής του χώρου ερευνήθηκαν τα ακουστικά κριτήρια που θεωρητικά πρέπει να πληρούνται σε μεγάλους κλειστούς χώρους και τεχνικές ακουστικής βελτίωσης, όπου προσαρμόστηκαν με βάση τις ανάγκες του συγκεκριμένου χώρου, για να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Για να αξιολογηθεί ακουστικά ο χώρος και να γίνουν προτάσεις βελτίωσης, έγινε προσομοίωση του χώρου στο λογισμικό CATT-Acoustic. Αναλύθηκαν οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της ακουστικής κλειστών χώρων και οι μέθοδοι που χρησιμοποιεί συγκεκριμένα το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την παρούσα μελέτη. Αρχικά, αποτυπώθηκε ο χώρος αναλυτικά και σχεδιάστηκε λεπτομερές μοντέλο στο λογισμικό. Κατόπιν της μοντελοποίησης του αμφιθεάτρου στο λογισμικό, προσομοιώθηκε η ακουστική συμπεριφορά και εξήχθησαν όλα τα απαραίτητα χαρακτηριστικά, έγιναν δοκιμές για βελτίωση της ακουστικής και δοκιμές για ρύθμιση της ακουστικής ανά περίπτωση. Παρουσιάζονται όλα τα αποτελέσματα για κάθε πρόταση βελτίωσης που πραγματοποιήθηκε και αναλύθηκε αν οι δοκιμές αυτές βελτίωσαν ή όχι την ακουστική του χώρου.

Μετά την ακουστική βελτίωση του χώρου, υπολογίστηκε θεωρητικά και πρακτικά μέσω του λογισμικού αν είναι απαραίτητη η προσθήκη ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης, ώστε ο ήχος να κατανέμεται το ίδιο σε όλα τα σημεία. Εφόσον αυτό κρίθηκε απαραίτητο, έγινε θεωρητικός υπολογισμός και προσομοίωση της ηλεκτροακουστικής μελέτης.

Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα, τα προβλήματα και τα ερωτήματα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της μελέτης, τρόποι διαφορετικής προσέγγισης της ακουστικής βελτίωσης και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:

Ακουστικά Κριτήρια για μεγάλους κλειστούς χώρους

Για κάθε χώρο υπάρχουν ακουστικά κριτήρια που πρέπει να πληρούνται για να θεωρηθεί πως έχει καλή ακουστική. Αρχικά, η ακουστική συμπεριφορά εξαρτάται από το αν ο χώρος είναι ανοικτός ή κλειστός. Στους κλειστούς χώρους αναπτύσσονται διαφορετικά ακουστικά φαινόμενα. Για να μελετηθεί η ακουστική συμπεριφορά ενός κλειστού χώρου, προσδιορίζεται με βάση τον όγκο του το αν θεωρείται μικρός, μεγάλος ή πολύ μεγάλος. Έτσι θα αποφασιστεί ο τρόπος προσέγγισης της ακουστικής μελέτης. Τα ακουστικά κριτήρια ενδέχεται να μεταβάλλονται ανάλογα και με την χρήση του. Ο χώρος που μελετήθηκε, προορίζεται για πολλαπλές χρήσεις. Είναι μία αίθουσα που ήδη χρησιμοποιείται για διάφορες εκδηλώσεις του πανεπιστημίου και με αυτό ως δεδομένο, στόχος είναι η ακουστική βελτίωση της.

Ο όγκος μίας αίθουσας, αλλά και το πως είναι δομημένο το σχήμα της, σχετίζονται άμεσα με την ακουστική της. Ακολουθώντας, κυρίαρχο ρόλο σε μία ακουστική μελέτη παίζουν τα υλικά που υπάρχουν στον χώρο. Από τα υλικά και τον όγκο που καταλαμβάνει κάθε ένα από αυτά στον χώρο, καθορίζονται οι ανακλάσεις και η απορρόφηση.

1.1 Διάχυτο Ακουστικό Πεδίο

Η ακουστική των κλειστών χώρων διαφέρει από την διάδοση του ήχου σε ελεύθερο πεδίο, αλλά διαφέρει και σε σχέση με το μέγεθος του χώρου. Οι κλειστοί χώροι, από ακουστικής πλευράς, χωρίζονται σε μεγάλους και μικρούς. Αν τοποθετηθεί σε έναν κλειστό χώρο μία ιστροπική πηγή, η πηγή εκπέμπει προς όλες τις διευθύνσεις. Τα ηχητικά κύματα προσπίπτουν στις εσωτερικές επιφάνειες και ένα μέρος της ενέργειας τους απορροφάται, ενώ το υπόλοιπο μέρος ανακλάται και αποδίδεται στο χώρο. Με τη διαδικασία αυτή παράγεται ένα μεγάλο πλήθος ανακλάσεων με ηχητικά κύματα που ταξιδεύουν πρακτικά προς οποιαδήποτε δυνατή κατεύθυνση και καλύπτουν όλον τον όγκο του χώρου. Αυτή η μορφή ηχητικού πεδίου ονομάζεται *διάχυτο ηχητικό πεδίο*. Πιο συγκεκριμένα, διάχυτο ηχητικό πεδίο ονομάζεται ο χώρος όπου η πίεση είναι ομοιόμορφη σε κάθε σημείο του χώρου και όπου κάθε κατεύθυνση διάδοσης είναι πιθανή.

Για να δημιουργηθεί ένα διάχυτο πεδίο πρέπει να συντελείται ένας μεγάλος αριθμός ανακλάσεων στη μονάδα του χρόνου. Αυτό προϋποθέτει δύο παράγοντες:

- α) Σχετικά χαμηλή απορρόφηση της ενέργειας από τις επιφάνειες του χώρου ώστε η ενέργεια να επιστρέφει στον χώρο.
- β) Μεγάλο όγκο ώστε η σύγκρουση των ηχητικών κυμάτων με τις επιφάνειες να μην γίνεται συχνά.

Η απορρόφηση μιας επιφάνειας καθορίζεται με βάση τον συντελεστή απορρόφησης που ορίζεται ως το ποσοστό της προσπίπτουσας ενέργειας που απορροφάται από τα υλικά. Γενικά, η ύπαρξη του διάχυτου ηχητικού πεδίου είναι δυνατή για τιμές του συντελεστή απορρόφησης α κάτω από 0.2 περίπου.

Ένας χώρος χαρακτηρίζεται από ακουστικής πλευράς ως μεγάλος ή μικρός από τον υπολογισμό μίας οριακής συχνότητας που αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως *συχνότητα Schroeder*, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$f_L = 2000 \sqrt{\frac{T_{60}}{V}} \quad (1)$$

Όπου V ο όγκος του χώρου και T_{60} ο χρόνος αντήχησης. Εμπειρικά έχει βρεθεί ότι ένας χώρος μπορεί να αντιμετωπιστεί ως μεγάλος, αν η συχνότητα f_L βρίσκεται κάτω από 80 Hz για ομιλία και 30 Hz για μουσική.

Η ακριβής περιγραφή του ήχου σε έναν μεγάλο χώρο με ακανόνιστες επιφάνειες είναι αδύνατη, οπότε χρησιμοποιούνται στατιστικά μεγέθη τα οποία έχουν σταθερή τιμή και επομένως είναι απολύτως αξιόπιστα. Σε ένα μεγάλο χώρο υπολογίζεται (ή μετράται) ένας γενικά σταθερός μέσος όρος που προκύπτει από τη δειγματοληψία της πίεσης σε αρκετά σημεία του χώρου. [5]

1.2 Χρόνος Αντήχησης (Reverberation Time, RT_{60})

Ως χρόνος αντήχησης (Reverberation Time, RT_{60}) ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται ώστε η στάθμη θορύβου σε κάποιο σημείο να ελαττωθεί κατά 60 dB, μετά τον μηδενισμό του εκπεμπόμενου θορύβου από την πηγή. [10]

Ο χρόνος αντήχησης ορίζεται θεωρητικά από τις παρακάτω σχέσεις:

- Σχέση *Norris-Eyring* όπου ο χρόνος αντήχησης είναι ανάλογος του όγκου και αντιστρόφως ανάλογος την απορρόφησης:

$$T_{60} = 0.16 \frac{V}{-S \ln(1-\bar{\alpha})} \quad (2)$$

Μέσος συντελεστής απορρόφησης $\bar{\alpha}$

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_N S_N}{S} \quad (3)$$

όπου α_i ο συντελεστής απορρόφησης και S_i η επιφάνεια που καταλαμβάνει το κάθε υλικό.

• Σχέση *Sabine* όπου ορίζεται ο χρόνος αντήχησης για σχετικά χαμηλή απορρόφηση και διάχυτο ηχητικό πεδίο.

Αν ο συντελεστής απορρόφησης έχει τιμή $\bar{\alpha} \leq 0.1$, τότε $\ln(1 - \bar{\alpha}) \approx -\bar{\alpha}$ τότε η σχέση (2) γίνεται:

$$T_{60} = 0.16 \frac{V}{\bar{\alpha}S} = 0.16 \frac{V}{A} \quad (4)$$

όπου $A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_N S_N$ η συνολική απορρόφηση σε m^2 . [5]

Με βάση τον όγκο και την χρήση κάθε χώρου, προκύπτει και ο αντίστοιχος χρόνος αντήχησης. Για να είναι καταληπτή η ομιλία είναι επιθυμητό ο χρόνος αντήχησης να είναι μικρός, ενώ για μουσική απαιτείται σχετικά μεγάλος χρόνος αντήχησης.

Σε ένα χώρο πολλαπλών χρήσεων ο βέλτιστος χρόνος αντήχησης θα πρέπει να προσαρμόζεται ανάλογα την περίπτωση.

Ο βέλτιστος χρόνος αντήχησης με βάση τον όγκο και τη χρήση ενός χώρου δίνεται από τη σχέση:

$$T_{60} = A \log V + B \quad (5)$$

Όπου A και B σταθερές που εξαρτώνται από τη χρήση του χώρου και V ο όγκος του χώρου.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων A και B , ανάλογα με τη χρήση διάφορων χώρων.

Πίνακας 1: Σταθερές για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης σε διάφορους χώρους.

Είδος Χώρου	A	B
Καθολικοί Ναοί – Αίθουσες Συνεδριάσεων	0.4	0.22
Ναοί διαμαρτυρόμενων	0.35	0.19
Ορθόδοξες εκκλησίες – Όπερες	0.3	0.16
Κινηματογράφοι – Αίθουσες Μουσικής (Music Hall)	0.22	0.11
Χώροι Διαλέξεων – Στούντιο	0.2	0.11
Χώροι ελέγχου	0.11	0.148

Στους παραπάνω χώρους ο όγκος αναφέρεται σε m^3 και αντιστοιχεί σε συχνότητα 500 Hz. [10]

Με βάση τα παραπάνω υπολογίστηκε θεωρητικά ο βέλτιστος χρόνος αντήχησης για την αίθουσα.

Η αίθουσα έχει όγκο περίπου 2168m^3 , όπως προέκυψε από το πρόγραμμα CATT-acoustic.

Εφόσον η αίθουσα προορίζεται για πολλαπλές χρήσεις θα οριστεί ένας ελάχιστος και ένας μέγιστος χρόνος αντήχησης, οπότε:

Για Χώρους Διαλέξεων: $A=0.2$ και $B=0.11$ για $V=2168\text{m}^3$

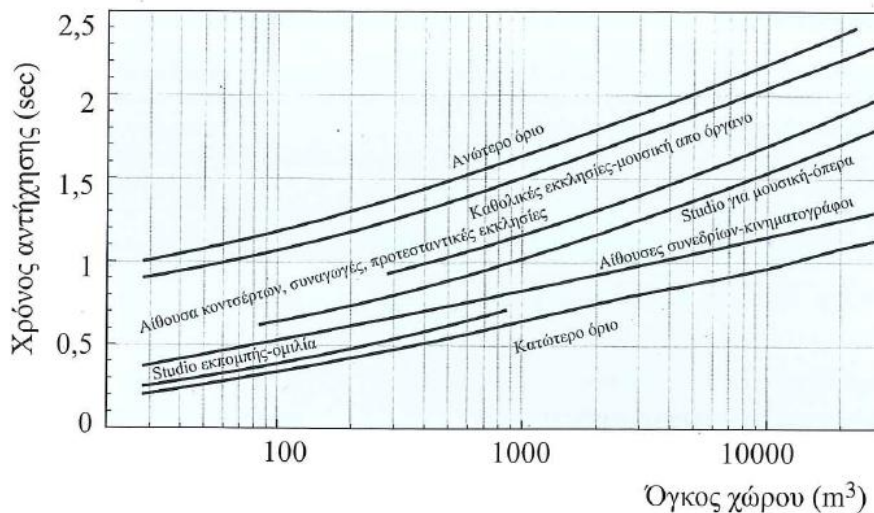
$T_{60} = 0.78\text{sec}$ (ελάχιστος χρόνος αντήχησης)

Για Αίθουσες Συνναυλιών: $A=0.4$ και $B=0.22$ για $V=2168\text{m}^3$

$T_{60} = 1.55\text{sec}$ (μέγιστος χρόνος αντήχησης)

Ακολούθως, υπάρχουν και διαγράμματα που περιγράφουν τον βέλτιστο χρόνο αντήχησης με βάση την χρήση και τον όγκο του κάθε χώρου.

Βέλτιστοι χρόνοι αντήχησης

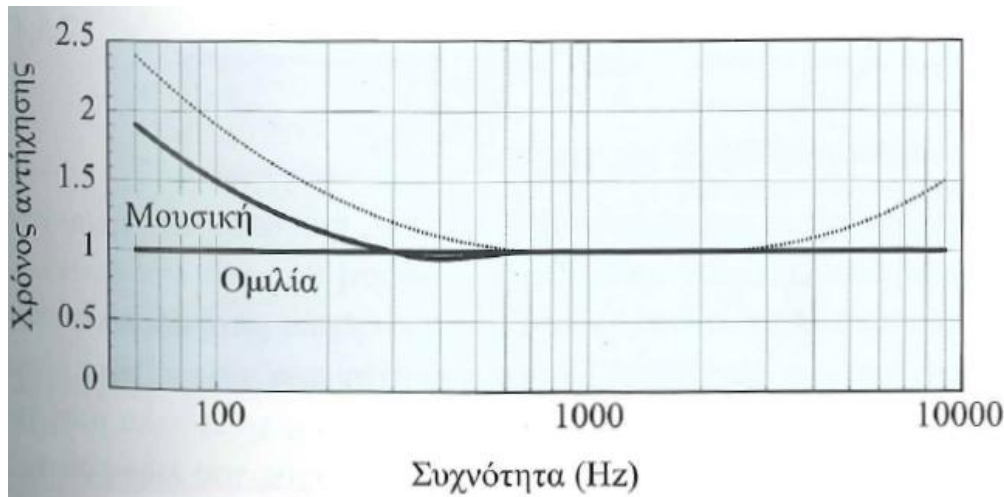


Σχήμα 1: Βέλτιστοι χρόνοι αντήχησης για διάφορους δημόσιους χώρους κατά τον Beranek. [10]

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα, ο βέλτιστος χρόνος αντήχησης για την αίθουσα κυμαίνεται από 0.8 sec μέχρι 1.6 sec.

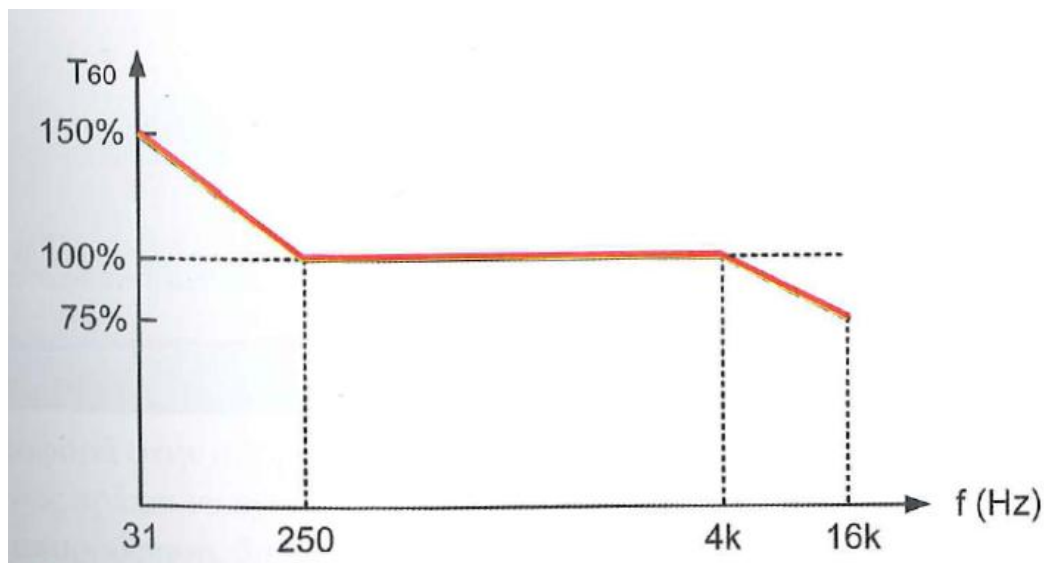
Ο χρόνος αντήχησης ενδέχεται να αποκλίνει με βάση τη συχνότητα. Τα παραπάνω αποτελέσματα αφορούν την συχνότητα των 500Hz. Για τις υπόλοιπες συχνότητες η απόκλιση ορίζεται και πάλι με βάση τη χρήση του χώρου.

Σχετικοί χρόνοι αντήχησης για διάφορες συχνότητες



Σχήμα 2: Χρόνοι αντήχησης για τις υπόλοιπες συχνότητες σε σχέση με τον χρόνο αντήχησης των 500Hz κατά τον Beranek. [10]

Για την ομιλία απαιτείται ένας, όσο πιο πολύ γίνεται, σταθερός χρόνος αντήχησης σε όλες τις συχνότητες, με ανώτερο όριο αύξησης 25% στις χαμηλές συχνότητες, ενώ στη μουσική ο χρόνος αντήχησης ενδείκνυται να είναι αρκετά υπερυψωμένος στις χαμηλές συχνότητες και ελαφρά αποκλίνων στις υψηλές συχνότητες.



Σχήμα 3: Επιτρεπτά όρια που μπορεί να αποκλίνει ο χρόνος αντήχησης στις χαμηλές και στις υψηλές συχνότητες. [6]

Οπότε, με βάση όλα τα παραπάνω, για τον χώρο θεωρητικά υπολογίζεται ο βέλτιστος χρόνος αντήχησης, κατά ελάχιστη και μέγιστη τιμή και ανά συχνότητα, όπως αναφέρεται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 2: Ελάχιστος βέλτιστος χρόνος αντήχησης ανά συχνότητα.

Συχνότητα(Hz)	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k
Reference/target RT (sec)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

Πίνακας 3: Μέγιστος βέλτιστος χρόνος αντήχησης ανά συχνότητα.

Συχνότητα(Hz)	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k
Reference/target RT (sec)	1.85	1.75	1.55	1.55	1.55	1.45	1.40	1.25

Οι τιμές αυτές θα οριστούν ως Reference/target RT στο CATT-acoustic. Σκοπός είναι, με τις τροποποιήσεις που θα προταθούν, ο χρόνος αντήχησης του χώρου να πλησιάζει όσο γίνεται περισσότερο τις παραπάνω θεωρητικά βέλτιστες τιμές.

Άλλη μία προσέγγιση για τους χώρους πολλαπλών χρήσεων, είναι η ρύθμιση του χρόνου αντήχησης σε ένα μέσο όρο των βέλτιστων τιμών για κάθε περίπτωση, η οποία προτιμάται σε περιπτώσεις που είναι ζητούμενο το χαμηλό κόστος και δεν υπάρχει δυνατότητα για εφαρμογή άλλων μεθόδων ρύθμισης της ακουστικής.

1.3 Ανακλάσεις

Σε μία αίθουσα οι ανακλάσεις που δημιουργούνται, όταν έχουν μικρή χρονική καθυστέρηση, είναι ωφέλιμες. Οι πρώτες ανακλάσεις που προκύπτουν από τα πλαϊνά της σκηνης ή το ταβάνι μπροστά από τη σκηνή, βοηθούν τους μουσικούς και την ενίσχυση του απευθείας σήματος αντίστοιχα. Στις μεγάλες αίθουσες, όπως αυτή, συνήθως όμως υπάρχουν και ανακλάσεις με μεγάλη χρονική καθυστέρηση, που μπορεί να οδηγήσουν σε ηχώ. Ηχώ χαρακτηρίζεται όποια ανάκλαση φτάνει σε ακροατή με καθυστέρηση μεγαλύτερη των 30ms, με αποτέλεσμα να διαφοροποιείται από το απευθείας σήμα και να αποτελεί ξεχωριστό ηχητικό γεγονός. Για τους λόγους αυτούς, στη σκηνή και στο μπροστινό μέρος της αίθουσας τοποθετούνται ανακλαστικά υλικά ενώ τα καθίσματα και το πίσω μέρος αποτελούνται από απορροφητικά υλικά. [2]

1.4 Καταληπτότητα Ομιλίας

Ο χώρος θα πρέπει να είναι κατάλληλος και για ομιλίες, οπότε σημαντικό είναι να ελεγχθεί και η καταληπτότητα της ομιλίας.

Ως κατανόηση της ομιλίας ορίζεται το ποσοστό των λέξεων ή συλλαβών που γίνονται κατανοητές κατά την εκφορά λόγου σε έναν κλειστό χώρο. [6]

Για την εκτίμηση της καταληπτότητας της ομιλίας χρησιμοποιείται το ποσοστό απώλειας κατανόησης συμφώνων (percentage articulation loss of consonants, %ALcons), το οποίο μπορεί να μετρηθεί προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$\%AL_{cons} = \frac{200 \cdot r^2 \cdot RT^2 \cdot (n+1)}{V \cdot Q} \quad (6)$$

όπου:

r = απόσταση πηγής/δέκτη σε m ,

V = όγκος αίθουσας σε m^3 ,

RT = χρόνος αντήχησης της αίθουσας σε sec ,

Q = κατευθυντικότητα πηγής,

και $n+1$ ο αριθμός όμοιων πηγών αν αυτές λειτουργούν ταυτόχρονα. [8]

Οι τιμές του $\%AL_{cons}$ συνδέονται με την καταληπτότητα ομιλίας, όπως περιγράφονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4: Τιμές $\%AL_{cons}$ για καταληπτότητα ομιλίας.

Υποκειμενική Καταληπτότητα	$\%AL_{cons}$
Ιδανική	$\leq 3\%$
Καλή	3-8%
Ικανοποιητική	8-11%
Χαμηλή	$> 11\%$
Ευτελής	$> 20\%$

Η οριακή τιμή είναι 15%.

Άλλες μέθοδοι εκτίμησης της καταληπτότητας ομιλίας περιλαμβάνουν τον δείκτη μετάδοσης ομιλίας (speech transmission index, STI), τον δείκτη καταληπτότητας ομιλίας (speech intelligibility index, SII) και τον δείκτη μετάδοσης ομιλίας ταχύτατης ακουστικής (rapid acoustic speech transmission index, RASTI). [2]

Για τον υπολογισμό του STI χρησιμοποιείται η σχέση:

$$STI = -0.1845 \cdot \ln(\%AL_{cons}) + 0.9482 \quad (7)$$

Για τον υπολογισμό του $\%AL_{cons}$ αν είναι γνωστό το STI (ή RASTI) χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\%AL_{cons} = 170.5405e^{-5.419 \cdot STI} \quad (8)$$

[10]

1.5 Ευκρίνεια (Clarity, C_{80} & C_{50})

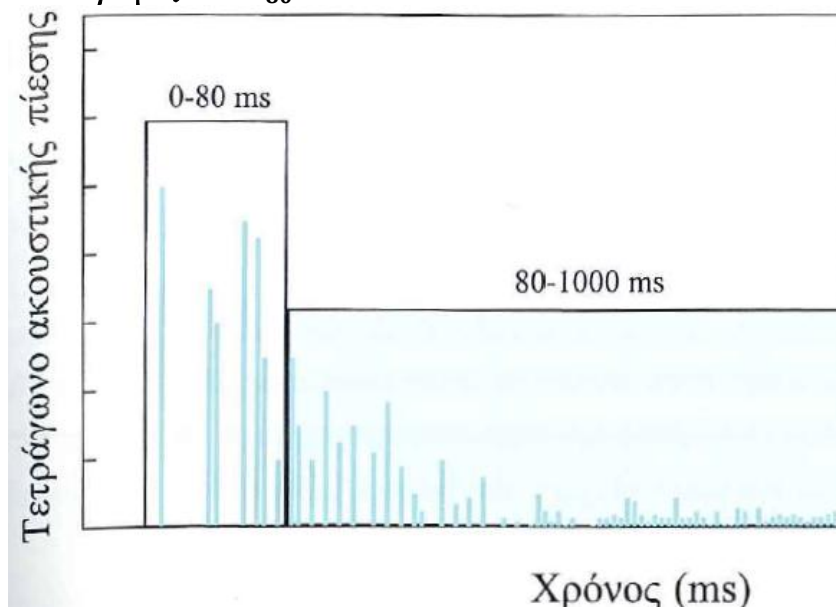
Η ευκρίνεια μετράται σε decibels και ορίζεται κάποιες φορές ως η διαφορά μεταξύ της ηχητικής ενέργειας στα πρώτα 80ms και της ενέργειας της μετέπειτα ανάκλασης που καταφθάνει μετά τα πρώτα 80ms. Αναφέρεται ορισμένες φορές ως C_{80} και σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιείται μια τιμή $C_{80}(3)$, η οποία λαμβάνει τη μέση ευκρίνεια στα 500, 1.000 και 2.000 Hz. Σε μεγάλες αίθουσες με καλή ευκρίνεια, η τιμή του $C_{80}(3)$ κυμαίνεται από -4 έως +1 dB. [2]

Ορίζεται ως εξής:

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80ms} \{g(t)^2\} dt}{\int_{80ms}^{\infty} \{g(t)^2\} dt} = 10 \log \frac{E_{0-80}}{E_{80-\infty}} \quad (9)$$

Όπου $g(t)$ η κρουστική απόκριση του χώρου και E_{0-80} , $E_{80-\infty}$ η ενέργεια που φτάνει στα πρώτα 80ms και μετά τα 80 ms αντίστοιχα. Η ευκρίνεια είναι ανάλογη με τον λογάριθμο του λόγου του ήχου που φτάνει τα πρώτα 80ms, προς αυτόν που φτάνει μετά τα 80ms. Όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος αυτός τόσο καλύτερη είναι η αντιληπτότητα της ομιλίας. Όταν ο χρόνος ολοκλήρωσης είναι 50 ms τότε συμβολίζεται με C_{50} . Η βέλτιστη τιμή του δείκτη C_{50} για αίθουσες όπου απαιτείται καλή αντιληπτότητα της ομιλίας είναι $C_{50} = +9dB$, ενώ η τιμή του $C_{50} = -3dB$ θεωρείται για τους ίδιους χώρους πολύ κακή. [10]

Υπολογισμός του C_{80}



Σχήμα 4: Υπολογισμός ευκρίνειας από την κρουστική απόκριση του χώρου.

$$C = 10 \log \left[e^{\frac{1.104}{T}} - 1 \right] \quad (10)$$

Όπου T ο χρόνος αντήχησης.

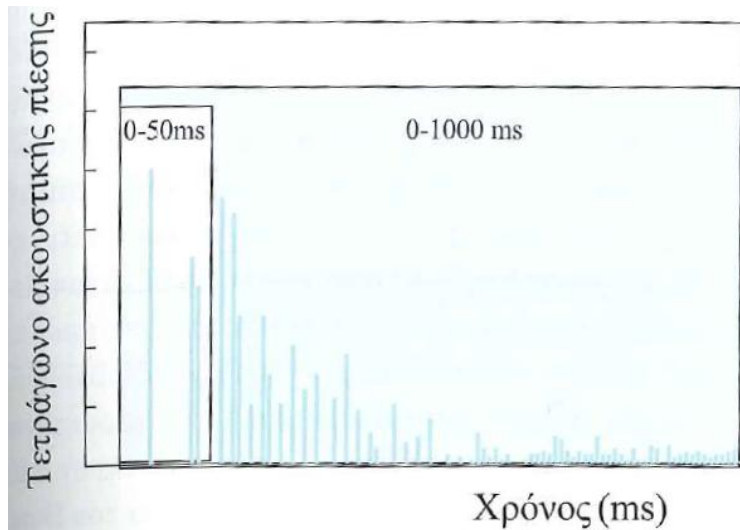
1.6 Οικειότητα (*Intimacy*)

Αυτή η παράμετρος είναι σημαντική για χώρους που προορίζονται για ομιλία όσο και για μουσική. Η τιμή της εξαρτάται από τον χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ της λήψης του απ' ευθείας ήχου και των πρώτων ανακλάσεων. Ο χρόνος αυτός δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 20ms (για όπερα 30ms). Η ποσότητα αυτή έχει να κάνει με την απόσταση των ανακλαστικών επιφανειών. Μία καθυστέρηση 20ms αντιστοιχεί σε διαφορά δρόμου (ανακλώμενης – απ' ευθείας διαδιδόμενης) 7 περίπου μέτρων. Αφίξεις μετά από ανακλάσεις σε πλευρές ενός κλειστού χώρου έχουν μεγαλύτερη σπουδαιότητα από αυτές της οροφής. Η οικειότητα των χώρων μουσικής πρέπει να είναι μικρότερη από 25ms. Κατά τον Beranek χώροι με χρόνο καθυστέρησης μεγαλύτερο από 45ms δεν παρουσιάζουν καμία οικειότητα. [10]

1.7 Διακριτότητα (*Definition, D₅₀*)

Ο πρωτογενής ήχος φτάνει στον ακροατή μαζί με χιλιάδες ανακλάσεις, για την ομιλία όμως μόνο αυτές που φθάνουν με χρονική καθυστέρηση μέχρι 50ms είναι χρήσιμες, διότι συμβάλουν με τον πρωτογενή ήχο και τον ενισχύουν. Μελέτες έχουν δείξει πως οι ανακλάσεις που καθυστερούν από 10 έως 20ms μπορεί να είναι μέχρι και 10dB ισχυρότερες από τον απευθείας ήχο. Συνεπώς είναι άκρως σημαντικές.

Υπολογισμός του D_{50}



Σχήμα 5: Κρουστική απόκριση χώρου διάρκειάς 1000ms. Στο σχήμα φαίνονται τα τμήματα της απόκρισης που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της διακριτότητας.

Ορίζεται από τη σχέση του Thiele:

$$D = \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} \{g(t)^2\} dt}{\int_0^{\infty} \{g(t)^2\} dt} 100\% = \frac{E_{0-50}}{E_{0-\infty}} 100\% \quad (11)$$

Όπου $g(t)$ η κρουστική απόκριση του χώρου στο σημείο λήψης. Το κάθε ολοκλήρωμα αντιστοιχεί στην πυκνότητα ενέργειας (E), του ήχου που καταφθάνει στο μικρόφωνο.

[10]

1.8 Εξίσωση Hopkins-Stryker, Κρίσιμη απόσταση (Critical distance, D_c), Σταθερά δωματίου (R)

Η εξίσωση Hopkins-Stryker δίνει τη συνολική στάθμη πίεσης σε απόσταση r από την πηγή λαμβάνοντας υπόψη τον απ' ευθείας και τον ανακλώμενο ήχο:

$$L_p = L_w + 10 \log_{10} \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (12)$$

Η ποσότητα $R = \frac{S\bar{\alpha}}{1-\bar{\alpha}}$ ονομάζεται *σταθερά δωματίου*. [5]

Σε πρακτικές εφαρμογές συνήθως χρησιμοποιείται η προσέγγιση: $R = S\bar{\alpha}$

Ή αν γνωρίζουμε τον χρόνο αντήχησης:

$$R = V / \left(\frac{T_{60}}{0.16} - \frac{V}{S} \right) \quad (13)$$

Όπου V = ο όγκος του χώρου και S = η συνολική του επιφάνεια. [9]

Σε κάποια συγκεκριμένη απόσταση από την πηγή ο απευθείας ήχος ισούται σε στάθμη με τον ανακλώμενο. Η απόσταση αυτή ονομάζεται *κρίσιμη απόσταση* και δίνεται από τη σχέση:

$$D_C = \sqrt{\frac{QR}{16\pi}} \quad (14)$$

Η κρίσιμη απόσταση δίνει μία ιδέα για τη συνιστώσα του ήχου που επικρατεί σε μία ορισμένη απόσταση από την πηγή. Για παράδειγμα, αν σε ένα μικρό θέατρο η κρίσιμη απόσταση είναι 2 m, τότε θα πρέπει τα μικρόφωνα να τοποθετηθούν σε μέγιστη απόσταση 2 m από τους ηθοποιούς, για να συλλέγουν ως επί το πλείστον τον απευθείας ήχο και όχι τις ανακλάσεις. [5]

Τέλος, σε μια μελέτη θα πρέπει να ληφθεί υπόψη αν υπάρχει εξωγενής θόρυβος, οπότε είναι σημαντική η σωστή ηχομόνωση. Επίσης, μπορεί να προκύψει θόρυβος από το σύστημα εξαερισμού και θα πρέπει να μελετηθούν και τυχών συντονισμοί που ενδέχεται να υπάρξουν. Η συγκεκριμένη αίθουσα δεν αντιμετωπίζει πρόβλημα εισερχόμενου θορύβου, ούτε με τον εξαερισμό και λόγω του σχήματός της δεν υπάρχουν συντονισμοί που να δημιουργούν πρόβλημα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:

Μέθοδοι προσομοίωσης ακουστικής κλειστών χώρων

Η προσπάθεια αποτύπωσης του σχήματος ενός χώρου με σκοπό την προσομοίωση της ακουστικής του ξεκίνησε με την κατασκευή μικρογραφιών των χώρων, όπως οι αρχιτεκτονικές μακέτες. Η μέθοδος αυτή παρόλο που εξελίχθηκε με τα χρόνια, απλοποιήθηκε με τη χρήση υπολογιστή. Οι μέθοδοι για την προσομοίωση της ακουστικής των χώρων στον υπολογιστή ποικίλουν ανάλογα το λογισμικό.

2.1 Ray Tracing Method

Η συνήθης μεθοδολογία είναι η δημιουργία ενός μοντέλου των επιφανειών ενός κλειστού χώρου χρησιμοποιώντας πολύγωνα ή άλλα σχήματα που αναπαρίστανται εύκολα. Ένα πλέγμα συνεχόμενων πολύγωνων σχηματίζεται και το καθένα περιγράφεται από μια λίστα κορυφών, που συνδέονται με ακμές. Μια επιφάνεια χαρακτηρίζεται από τις ακμές, τις κορυφές και τις ιδιότητες του υλικού, όπως η απορρόφηση και οι συντελεστές διάχυσης.

Οι ακτίνες εκπέμπονται από μια πηγή και διατηρούν τις ιδιότητες τους συμπεριλαμβανομένων της ισχύος, της τοποθεσίας και της κατευθυντικότητας της αρχικής πηγής, τη συνολική απόσταση από την πηγή και το συχνοτικό εύρος του σήματος. Εφόσον εκπέμπεται ένας πεπερασμένος αριθμός ακτινών, κάθε ακτίνα στην πραγματικότητα αντιπροσωπεύει μια δέσμη ενέργειας, που εκπέμπεται από την πηγή. Οι κατευθύνσεις των ακτινών μπορούν να επιλεγούν χρησιμοποιώντας ομοιόμορφη, τυχαία ή κατευθυνόμενη κατανομή. Είναι σημαντικό οι ακτίνες να φτάσουν σε κάθε άκρο του δωματίου και οι προσπτώσεις της ακτίνας στις επιφάνειες να μην θα υπολογιστούν διπλά. Μια ακτίνα είναι πιθανό να προσκρούσει σε μια επιφάνεια με εμβαδόν S σε χρόνο t , εάν το εμβαδόν της δέσμης των ακτινών δεν είναι μεγαλύτερο από $S/2$. Αυτό οδηγεί σε έναν ελάχιστο αριθμό ακτινών (Rindel, 2000, in [7]) που προσπίπτουν στην επιφάνεια:

$$N \geq \frac{8\pi c^2}{S} t^2 \quad (15)$$

Το αποτέλεσμα της ray-tracing μεθόδου περιλαμβάνει την κρουστική απόκριση του χώρου για έναν συγκεκριμένο δέκτη. Όταν η ακτίνα βρίσκει τον δέκτη, αποθηκεύονται ο χρόνος άφιξης, η κατευθυντικότητα και η συχνότητα της ακτίνας. Οι γωνίες πρόσπτωσης και το συχνοτικό εύρος των ακτινών επιτρέπουν την αναπαράσταση του ήχου (auralization) στον χώρο. Λόγο περιορισμών στην υπολογιστική δυνατότητα και στην αντίδραση των ανθρώπων στις καθυστερημένες ανακλάσεις, ορίζεται ένα χρονικό όριο στη διάδοση των ακτινών. Μετά το πέρας του ορισμένου χρόνου (ή απόστασης) η

εναπομένονσα ενέργεια της ακτίνας προσαρτάται στο διάχυτο αντηχητικό πεδίο ή εγκαταλείπεται τελείως. [7]

Στη μέθοδο Ray-Tracing, η ηχητική ενέργεια θεωρείται ότι ταξιδεύει από την πηγή στον δέκτη σαν δέσμη ή ακτίνα φωτός. Οι ανακλάσεις από κάθε επιφάνεια θεωρούνται κατοπτρικές. Μία πηγή τοποθετείται στον χώρο και οι ηχητικές ακτίνες σχεδιάζονται σε ίσα διαστήματα (συνήθως $5^\circ - 10^\circ$) προερχόμενες από το σημείο της πηγής. Όταν μια ακτίνα προσπίπτει σε μια επιφάνεια, κατασκευάζεται η ανακλώμενη ακτίνα μέχρι να βρει τον δέκτη. Με την αλλαγή των ανακλαστικών επιφανειών, διαφορετικά σχήματα και προσανατολισμοί μπορούν να δοκιμαστούν έως ότου οι ακτίνες κατανεμηθούν ομοιόμορφα σε όλο το κοινό. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για έναν αριθμό πιθανών τοποθεσιών της πηγής μέχρι να ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός. Κατά τη μοντελοποίηση των ανακλάσεων από μεμονωμένα ελεύθερα αναρτημένα panels, τα σημεία ανάκλασης που είναι πιο κοντά από ένα τέταρτο του μήκους κύματος από την άκρη του panel δεν πρέπει να θεωρούνται ότι παράγουν κατοπτρικές ανακλάσεις.

Υποκατηγορίες της Ray-Tracing μεθόδου:

- Ray-Plane
- Ray-Polygon
- Ray-Sphere
- Ray-Cylinder
- Ray-Quadric
- Ray-Cone
- Ray-Paraboloid [7]

2.2 Image Source Method

Η μέθοδος υπολογισμού της εικόνας της πηγής χρησιμοποιεί την κατοπτρική εικόνα της πηγής ως σημείο προέλευσης μιας νέας ακτίνας. Εικόνες των εικόνων σχεδιάζονται μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή τάξη ανάκλασης. Η κατασκευή είναι απλή για ένα απλό ορθογώνιο περίβλημα, αλλά γίνεται αρκετά περίπλοκη εάν το σχήμα του δωματίου είναι πολύπλοκο. Ο αριθμός των εικόνων της πηγής σε ένα δωμάτιο όγκου V για ακτίνα c t είναι:

$$N_{refl} \geq \frac{4\pi c^3}{3V} t^3 \quad (16)$$

Αυτός είναι περίπου ο αριθμός των κατοπτρικών ανακλάσεων που φτάνουν στον δέκτη για χρόνο t μετά την αρχική εκπομπή ήχου. Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά ακριβής, αλλά ο αριθμός των υπολογισμών που απαιτείται είναι πολύ μεγάλος. Για n επιφάνειες υπάρχουν n εικόνες πρώτης τάξης, καθεμία από τις οποίες μπορεί να έχει $n - 1$ εικόνες δεύτερης τάξης και ούτω καθεξής. Για ανακλάσεις τάξεως i , ο συνολικός αριθμός πηγών είναι:

$$N_{sou} = 1 + \frac{n}{(n-2)}((n-1)^i - 1) \cong (n-1)^i \quad (17)$$

(Rindel, 2000, in [7])

2.3 Hybrid Models

Ένα υβριδικό μοντέλο χωρίζει χρονικά τις ανακλάσεις ενός δωματίου σε μια πρώιμη περίοδο όπου υπολογίζονται οι μεμονωμένες ανακλάσεις και μια μεταγενέστερη περίοδο όπου παραμένει μόνο η στατιστική αντηχητική ουρά. Ο διαχωρισμός μπορεί να βασίζεται σε επιλογή της τάξης της ανάκλασης από τον χρήστη, μετά την οποία οι ανακλάσεις γίνονται διάχυτες ή με τη χρήση ενός συντελεστή διάχυσης ή και τα δύο. Η ένταση του ανακλώμενου ήχου μπορεί να βασίζεται σε ένα υποθετικό πρότυπο κατευθυντικότητας όπως ο νόμος του συνημίτονου του Lambert (Rindel, 2000, in [7]), όπου η ένταση της ανακλώμενης ενέργειας είναι ανάλογη με το συνημίτονο της γωνίας μεταξύ της εισερχόμενης ακτίνας και του διανύσματος του δέκτη, ή μπορεί απλά να κατανεμηθεί ομοιόμορφα (Farina, 2000, in [7]).

Η βέλτιστη μετάβαση μεταξύ των κατοπτρικών και των διάχυτων ανακλάσεων είναι σε όσον το δυνατόν υψηλότερη τάξη ανάκλασης, όμως αυτό αποδεικνύεται ότι δεν είναι πάντα το καλύτερο. Σε υψηλότερες τάξεις ανάκλασης, είναι πιο πιθανό να χαθούν εικόνες. Με περισσότερες χαμένες εικόνες η ακρίβεια του προγράμματος μειώνεται. [7]

Σε ένα υβριδικό μοντέλο μια χαμηλή τάξη ανάκλασης (2 έως 3) και ένας σχετικά μικρός αριθμός ακτινών (500 έως 1000) θα πρέπει να είναι αρκετός για να χαρακτηρίσει ένα τυπικό αμφιθέατρο. (Rindel, 2000, in [7])

Σε κάθε εφαρμογή της μεθόδου Ray Tracing πρέπει να αντιμετωπιστεί η μετάβαση από τις πρώιμες άμεσες ανακλάσεις στο αντηχητικό πεδίο και τα όρια που επιβάλλονται από τον υπολογιστικό χρόνο. Μερικά προγράμματα, που χρησιμοποιούν υβριδικά μοντέλα, χρησιμοποιούν συντελεστές ανάκλασης με κανονικό τρόπο για τις πρώτες δύο ή τρεις ανακλάσεις και μετά εγκαταλείπουν τις κατοπτρικές ανακλάσεις και αντιμετωπίζουν τις επόμενες ανακλάσεις ως διάχυτες. Η κατεύθυνση της διάχυτης ανάκλασης μπορεί να επιλεγεί τυχαία επιλέγοντας μια γωνία της οποίας η πιθανότητα βασίζεται στον νόμο του συνημίτονου του Lambert. Αυτό απλοποιεί τους απαιτούμενους υπολογισμούς και εξοικονομεί χρόνο, αλλά μπορεί να έχει απώλειες στις ανακλάσεις. Άλλα προγράμματα αφαιρούν ένα μέρος της διάχυτης ενέργειας σε κάθε ανάκλαση, προσθέτουν τη συνεισφορά της στον δέκτη και δεν την ακολουθούν περαιτέρω. Αυτή η απλοποίηση μειώνει την ενέργεια του διάχυτου πεδίου, η οποία μπορεί να συμμετέχει σε πολλαπλές ανακλάσεις μετά την αρχική, αλλά αντισταθμίζει την υπερεκτίμηση του υπολογισμού. Σε αυτό το σύστημα όλη η ενέργεια που απομένει σε μια δέσμη θεωρείται ότι ανακλάται από την επιφάνεια που χτυπά η κεντρική ακτίνα, ακόμα και όταν το εμβαδόν της δέσμης είναι πολύ μεγαλύτερο από την προσπίπτουσα

επιφάνεια. Το σφάλμα που εισάγεται από αυτή την υπόθεση αυξάνει την ποσότητα της ενέργειας που ανακλάται, αλλά μειώνει σημαντικά τον χρόνο υπολογισμού.

Όταν το εμβαδό της δέσμης είναι μεγαλύτερο από το εμβαδό της ανακλαστικής επιφάνειας, δεν προσπίπτει όλη η ενέργεια της ακτίνας στην επιφάνεια και πρέπει να αποφασιστεί πως θα χειριστεί η ανάκλαση. Μία προσέγγιση είναι να περικοπεί η δέσμη στα άκρα της περιοχής που προσπίπτει, δημιουργώντας νέες δέσμες, οι οποίες συνεχίζουν ξεχωριστά (Funkhouser et al., 1996, in [7]). Η προσέγγιση αυτή είναι αρκετά ακριβής, αλλά απαιτεί περισσότερη υπολογιστική ισχύ. Μία άλλη προσέγγιση είναι να ελαττωθεί το κέρδος της ανακλώμενης ενέργειας με βάση το εμβαδό της ανακλαστικής επιφάνειας προς το εμβαδό της δέσμης (όταν το εμβαδό της δέσμης είναι μεγαλύτερο από το εμβαδό της επιφάνειας). [7]

2.4 Μέθοδοι ακουστικής πρόβλεψης που χρησιμοποιεί το CATT-Acoustic

2.4.1 Ray-tracing

Η χαρτογράφηση της επιφάνειας του κοινού βασίζεται στην ray-tracing μέθοδο ορίζοντας τους ακροατές (receivers) ως σφαιρικά σχήματα σταθερού μεγέθους που τοποθετούνται πάνω από την περιοχή που έχει οριστεί ως περιοχή του κοινού. Οι διάχυτες ανακλάσεις που εξαρτώνται από τη συχνότητα και χρησιμοποιούν την κατανομή Lambert, λαμβάνονται υπ' όψιν τυχαιοποιώντας τις διευθύνσεις εκείνων των ακτινών που ορίστηκαν να ανακλούν διάχυτα από μία επιφάνεια (εξαρτώμενες από τους συντελεστές ανάκλασης). Μία εξαίρεση είναι ότι ο απευθείας ήχος αντιμετωπίζεται ντετερμινιστικά χωρίς ακτίνες. Όταν διάχυτες ανακλάσεις που εξαρτώνται από τη συχνότητα λαμβάνονται υπ' όψιν (και μόνο όταν λαμβάνονται υπ' όψιν) η μέθοδος ray-tracing είναι πολύ αξιόπιστη. Ωστόσο, η αναπαράσταση του ήχου στον χώρο (auralization) με αυτήν τη μέθοδο είναι δύσκολη, διότι με το πέρασμα του χρόνου αυξάνεται αφύσικα η πυκνότητα των ανακλάσεων. Ως εκ τούτου, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για να πραγματοποιηθούν μετρήσεις όπως η ευκρίνεια (C_{80}) αλλά όχι για auralization ή αναλυτικό echogram. Ωστόσο, οι ακουστικές μετρήσεις του χώρου που προβλέπει το CATT χρησιμοποιώντας αυτήν τη μέθοδο είναι εικονικά πανομοιότυπες με αυτές μίας πιο εξελιγμένης μεθόδου, της μεθόδου RTC. [3]

2.4.2 Randomised Tail-Corrected Cone-Tracing (RTC)

Η μέθοδος RTC αποτελεί έναν συνδυασμό τριών διαφορετικών μεθόδων, αντισταθμίζοντας και διορθώνοντας τις αδυναμίες της κάθε μεθόδου από αυτές. Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί συντελεστές ανάκλασης που συνήθως βασίζονται σε γενικούς κανόνες που ορίζονται από δεδομένα που εισάγει ο χρήστης, με τον ίδιο τρόπο όπως και με τους συντελεστές απορρόφησης, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και μία αυτόματη οριακή διάχυση. Για σκληρά λεία αντικείμενα όπως τραπέζια και ανακλαστικές, ένας συντελεστής ανάκλασης, βασισμένος στο μέγεθος και στη συχνότητα, υπολογίζεται προαιρετικά, αυτόματα από το πρόγραμμα.

1) Image Source Model (ISM) για κατοπτρικές ανακλάσεις 1^{ης} και 2^{ης} τάξης, για να συμπεριλαμβάνονται πάντα οι πιο σημαντικές πρώτες ανακλάσεις ανεξάρτητα με το πόσες ακτίνες χρησιμοποιούνται. Η αδυναμία της μεθόδου αυτής είναι πως είναι αναποτελεσματική σε ανακλάσεις μεγάλης τάξης, αλλά μέχρι την 2^η τάξη είναι πάντα γρήγορη και ακριβής.

2) Άμεση διάχυση σκέδασης για την 1^{ης} τάξης διάχυτη ανάκλαση. Πολλές μικρές διάχυτες επιφανειακές πηγές κατανέμονται σε όλη την ανακλαστική επιφάνεια. Από την αρχική πηγή του ήχου, σχηματίζονται διανύσματα προς κάθε διάχυτη επιφανειακή πηγή και από κάθε μία από αυτές προς τους δέκτες (υπολογίζοντας και τυχών εμπόδια). Για να αποδοθεί η μέγιστη γεωμετρική ακρίβεια, όπου αυτό είναι απαραίτητο, το νούμερο των επιφανειακών πηγών αυξάνεται για επιφάνειες με χαμηλούς συντελεστές απορρόφησης και υψηλούς συντελεστές ανάκλασης.

3) Τυχασιοποιημένη cone-tracing για μεγαλύτερης τάξης ανακλάσεις όπου οι κατευθύνσεις των ακτινών υπολογίζονται τυχαία όπως και στην μέθοδο ray-tracing οπότε, σε αντίθεση με την κατοπτρική μέθοδο cone-tracing, οι διάχυτες ανακλάσεις μπορούν να λαμβάνονται υπόψη.

Το ελάττωμα της ray-tracing μεθόδου είναι πως η σφαίρα που συμβολίζει τον ακροατή πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη οπότε το πρώιμο κομμάτι των ανακλάσεων δεν είναι πολύ λεπτομερές. Η χρήση της cone-tracing μεθόδου και της ISM αντισταθμίζουν την έλλειψη αυτή. Με την cone-tracing μέθοδο επίσης αυξάνεται η πυκνότητα των ανακλάσεων για t^2 (t =χρόνος) που καθιστά τα echograms ικανά για auralization φυσικών πηγών. Αντιθέτως, η μέθοδος αυτή υστερεί στην απώλεια των καθυστερημένων ανακλάσεων που βασίζονται στην πυκνότητα των ακτινών και αυτό διορθώνεται με αυτόματα αύξηση των ανακλάσεων κατά προσέγγιση. (Dalenbäck, 1996, in [3]). Ωστόσο, όσο περισσότερες/οι ακτίνες/κώνοι χρησιμοποιούνται τόσο ελαττώνεται η ανάγκη για κατά προσέγγιση υπολογισμούς. [3]

2.4.3 The Universal Cone Tracer (TUCT)

Η τελευταία έκδοση του CATT-Acoustic (V. 9.0) είναι δομημένη με τη μέθοδο TUCT. Οι προβλέψεις που βασίζονται στην RTC μέθοδο έχουν αφαιρεθεί. Η μέθοδος TUCT χρησιμοποιεί διαφορετικούς αλγόριθμους για πρόβλεψη, που εξαρτώνται από το εκάστοτε δωμάτιο που μελετάται. Επίσης, αντιμετωπίζει τις ελλείψεις τις RTC μεθόδου, ειδικά όσον αφορά ανοικτούς χώρους και χώρους με χωρίσματα. Η μέθοδος TUCT είναι πολύ καλή στην προσομοίωση auralization ανοικτών χώρων και δωματίων με πρόβλημα πολλαπλής ηχούς (flutter echo), καθώς και μεγάλων αιθουσών που διαθέτουν μεγάλη απορρόφηση. Για τέτοιους χώρους χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο που δεν βασίζεται στην τυχαία πρόβλεψη της διεύθυνσης των διάχυτων ανακλάσεων. Αντί αυτού, διαχωρίζει τις ακτίνες σε πολλές μικρότερες διάχυτες υπό-ακτίνες που συνεχίζουν να διαδίδονται στον χώρο. Ένας τέτοιος αλγόριθμος χρειάζεται τεράστιο υπολογιστικό χρόνο, αλλά ο Dalenbäck ανέπτυξε μία μέθοδο που μπορεί να εφαρμοστεί σε λογικό υπολογιστικό χρόνο. Η μέθοδος TUCT βασίζεται σε αυτόν τον αλγόριθμο

μετά από σημαντική εξέλιξη και διαμόρφωσή του. Η πλήρης αντηχητική ουρά χρησιμοποιείται για auralization χωρίς να χρειάζεται επιπλέον επεξεργασία. Επίσης, αποφεύγει έναν μακροχρόνιο περιορισμό των προγραμμάτων ακουστικής προσομοίωσης που βασίζονται στη γεωμετρική ακουστική, με μία προαιρετική επιλογή που περιλαμβάνει πρώιμη διάθλαση των ανακλάσεων στους υπολογισμούς του. Σε μερικές περιπτώσεις, αυτό αυξάνει την ακρίβεια των προβλέψεων (για παράδειγμα, ανακλάσεις από μικρές επιφάνειες, συμπεριλαμβανομένων των ανακλαστών ταβανιού). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί τα πλεονεκτήματα της ταχύτητας των πολυπύρινων επεξεργασιών και διαλέγει αυτόματα τον αριθμό των ακτινών ή αφήνει τον χρήστη να ορίσει πόσες θέλει να χρησιμοποιήσει. Τα φαινόμενα στο Speech Transmission Index (STI) για αλλαγή του θορύβου περιβάλλοντος, τη γενική ένταση και το EQ, και ο τύπος του STI μπορούν να μελετηθούν διαδραστικά, συμπεριλαμβανομένων των στατιστικών του χάρτη του χώρου. [3]

3.1 Αμφιθεατρικοί χώροι

Το αμφιθέατρο που πραγματοποιήθηκε η μελέτη, θα πρέπει να είναι κατάλληλο για όλα τα είδη των εκδηλώσεων που μπορεί να φιλοξενήσει ένα πανεπιστήμιο.

Το πάτωμα της αίθουσας έχει περίπου 10% κατηφορική κλίση. Η κλίση είναι απαραίτητη για να μην γίνεται διακοπή του απευθείας ήχου από τα μπροστινά καθίσματα. Αυτό είναι και το χαρακτηριστικό που προσδίδει στον χώρο αμφιθεατρικό ύψος, καθώς δεν έχει ημικυκλικό σχήμα, αλλά είναι παραλληλεπίπεδος (με μια ελαφριά κλίση των πλάγιων τοίχων προς τα μέσα). Στους κλειστούς χώρους αποφεύγονται τα αμφιθεατρικά ημικυκλικά σχήματα, διότι λόγω της γεωμετρίας τους μπορούν να δημιουργηθούν ηχητικές συγκεντρώσεις σε ορισμένα σημεία.

Σε τόσο μεγάλες αίθουσες είναι σύνηθες στο ταβάνι να υπάρχουν ανακλαστές ή διαβαθμισμένο ύψος οροφής, ώστε να διατηρηθεί το ποσοστό του απευθείας σήματος. Όταν η πηγή του σήματος από τον δέκτη έχει απόσταση μεγαλύτερη των 10 μέτρων η κατανόηση του ηχητικού σήματος φθίνει και κρίνεται απαραίτητη η ενίσχυση του με ηλεκτροακουστική εγκατάσταση. Επίσης, η μέγιστη απόσταση της σκηνής με τον θεατή ιδανικά θα πρέπει να είναι μικρότερη από 25 μέτρα για να μπορούν οι παρευρισκόμενοι να έχουν καλή οπτική επαφή με τον ομιλητή, μουσικό ή ηθοποιό. Στον χώρο που γίνεται η μελέτη η μέγιστη απόσταση που μπορεί να βρεθεί ένας ακροατής από την σκηνή είναι 19.4m.

3.2 Χώροι με ρυθμιζόμενη ακουστική

Στους χώρους που προορίζονται για πολλαπλές χρήσεις είναι απαραίτητο η απορρόφηση να είναι ρυθμιζόμενη. Για να επιτευχθεί βέλτιστη ακουστική το ιδανικό θα ήταν όταν γίνεται η αρχιτεκτονική μελέτη ενός χώρου να πραγματοποιείται και ακουστική μελέτη, αλλά αυτό πολλές δεν γίνεται, οπότε έχουν αναπτυχθεί πολλοί τρόποι ακουστικής βελτίωσης των ήδη υπάρχοντων χώρων. Οι τεχνικές ρυθμιζόμενης ακουστικής μπορούν να εφαρμοστούν είτε στην αρχική μελέτη ενός χώρου, είτε επικουρικά σε έναν ήδη διαμορφωμένο χώρο.

3.2.1 Κουρτίνες

Οι κουρτίνες αποτελούν μία σχετικά οικονομική λύση, οπότε είναι ευρέως διαδεδομένες. Υπάρχει πολύ μεγάλη ποικιλία σε υφάσματα, από πολύ ελαφριά, μέχρι πολύ βαριά, με φόδρα ή χωρίς, όπου στα υλικά φόδρας υπάρχει επίσης μεγάλη ποικιλία. Γενικά οι κουρτίνες παρέχουν απορρόφηση στις μεσαίες και στις υψηλές συχνότητες, αλλά αν

τοποθετηθούν σε απόσταση από τον τοίχο μπορεί να αυξηθεί η απορροφητικότητα τους και στις χαμηλές συχνότητες.

Παράδειγμα απορρόφησης δύο διαφορετικών ειδών κουρτινών με απόσταση από τον τοίχο και χωρίς:

Πίνακας 5: Τιμές απορρόφησης κουρτινών ανά συχνότητα.

Συχνότητα(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Κουρτίνες μπροστά από τοίχο	5	15	35	40	50	50
Κουρτίνες με 130mm απόσταση από τον τοίχο	30	45	65	56	59	71

Ποια υλικά θα υπάρχουν πίσω από τις κουρτίνες εξαρτάται από το προσδοκώμενο αποτέλεσμα.

3.2.2 Ακουστικά Panels

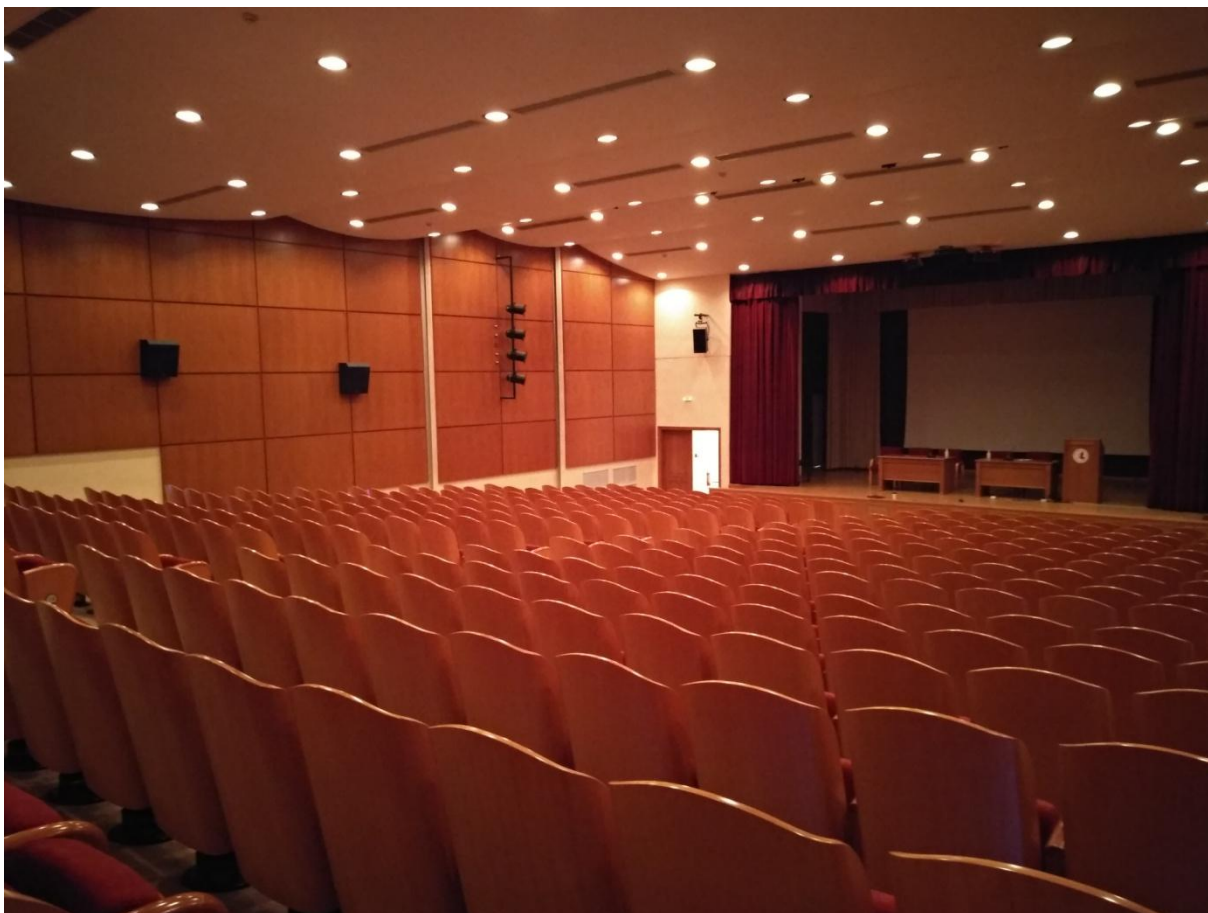
Μία ακόμα πολύ καλή λύση για ρύθμιση της ακουστικής είναι τα ακουστικά panels. Υπάρχουν φορητά ακουστικά panels απορρόφησης που τοποθετούνται όπου χρειάζεται μέσα στο χώρο και αν χρειαστεί μπορούν να αφαιρεθούν εντελώς. Τα panels μπορούν να είναι τοποθετημένα σε ράγες για να διευκολυνθεί η μετακίνησή τους, περιορίζοντας, όμως με αυτόν τον τρόπο, το που μπορούν να τοποθετηθούν μέσα στο χώρο. Υπάρχουν επίσης panels διπλής όψης, με επιλογή απορρόφησης ή ανάκλασης που μπορούν να περιστρέφονται είτε χειροκίνητα, είτε μπορούν να τοποθετηθούν σε βάσεις περιστροφής. Όπως και στην περίπτωση των κουρτινών, το ίδιο ισχύει και σε αυτήν την περίπτωση, αν τοποθετηθεί το panel σε απόσταση από τον τοίχο, ενισχύεται η απορρόφηση και στις χαμηλές συχνότητες. Με βάση και πάλι το επιθυμητό αποτέλεσμα προσδιορίζονται πόσα θα είναι τα panels, ποιες θα είναι οι διαστάσεις τους, από τι υλικά θα αποτελούνται, σε ποια σημεία θα τοποθετηθούν και ποιες μέθοδοι τοποθέτησης θα προτιμηθούν.

3.3 Αποτελέσματα

Για την προσομοίωση της ακουστικής του χώρου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό CATT-Acoustic, από το οποίο εξήχθησαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται.

3.3.1 Ο χώρος στο CATT-Acoustic

Αρχικό βήμα στην έναρξη της μελέτης είναι η μοντελοποίηση της αρχιτεκτονικής του χώρου με λεπτομερή καταγραφή των διαστάσεων του και των υλικών που τον απαρτίζουν.



Εικόνα 6: Η αίθουσα που πραγματοποιήθηκε η μελέτη με όψη προς τη σκηνή.

Περιγραφή του χώρου:

Το πάτωμα του αμφιθεάτρου έχει στην είσοδο γυαλιστερά πλακάκια. Από το σημείο που ξεκινούν τα καθίσματα, μέχρι την σκηνή, υπάρχει μοκέτα. Τα καθίσματα αποτελούνται από 16 σειρές και χωρίζονται από ένα διάδρομο κεντρικά της αίθουσας. Ξεκινώντας από την σκηνή και προς τα πίσω, οι πρώτες 3 σειρές καθώς και η 16^η σειρά, έχουν από 10 καθίσματα δεξιά και 10 αριστερά του διαδρόμου, ενώ όλες οι υπόλοιπες σειρές (4^η με 15^η), έχουν 11 καθίσματα από την κάθε πλευρά αντίστοιχα. Συνολικά ο χώρος έχει 344 καθίσματα.

Η σκηνή είναι υπερυψωμένη 0,9m και από παρκέ. Οι τοίχοι και το ταβάνι στην είσοδο και στην σκηνή είναι βαμμένοι με πλαστικό χρώμα. Οι τοίχοι στα πλάγια του ακροατηρίου έχουν ξύλινα panels.

Το ταβάνι είναι επίσης βαμμένο με πλαστικό χρώμα στην είσοδο και στην σκηνή, ενώ στο κεντρικό κομμάτι υπάρχει γυψοσανίδα με κυματισμούς.

Κατασκευαστικά ο χώρος δεν έχει περιορισμούς στο πόσες και τι παρεμβάσεις μπορούν να γίνουν για την βελτίωση της ακουστικής. Σημαντικό είναι να ληφθεί υπόψη το ύψος του χώρου και αν αυτό θα διατηρηθεί ή θα αλλάξει, αλλά και το κόστος. Όλες οι μετρήσεις των διαστάσεων του χώρου πραγματοποιήθηκαν με το αποστασιόμετρο UNI-T Laser Distance Meter LM100-1.



Εικόνα 7: Η αίθουσα που πραγματοποιήθηκε η μελέτη με όψη προς τη είσοδο.

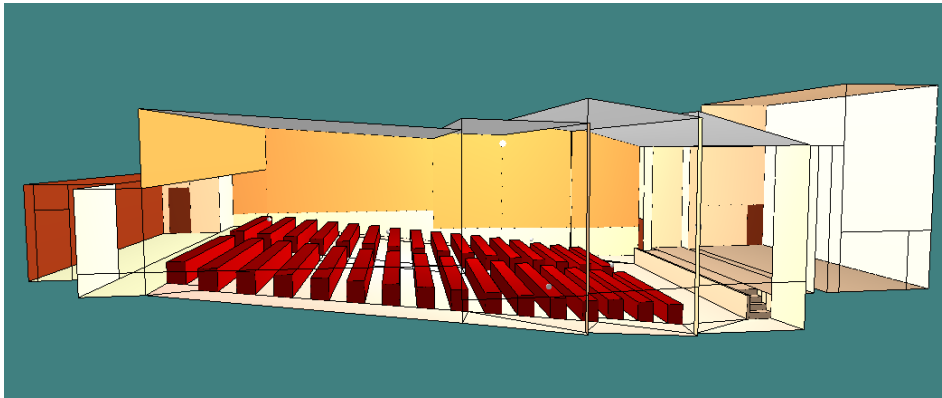
Προχωρώντας στο κομμάτι της εκτίμησης των υλικών που υπάρχουν ήδη στη αίθουσα, αναλύονται οι επιφάνειες μία προς μία. Είναι ζητούμενο το πάτωμα να είναι αρκετά απορροφητικό. Η μοκέτα που υπάρχει παρέχει απορρόφηση στις υψηλές συχνότητες και μικρότερη στις χαμηλές και τα καθίσματα, στο ίδιο μοτίβο υψηλών και χαμηλών συχνοτήτων, παρέχουν ακόμα μεγαλύτερη απορρόφηση. Είναι απαραίτητο τα καθίσματα να παρέχουν μεγάλη απορρόφηση ούτως ώστε να μην αλλάζει σημαντικά το ποσοστό απορρόφησης αν δεν είναι όλα κατειλημμένα. Ο προθάλαμος της αίθουσας, έχει πλακάκια στο πάτωμα και οι τοίχοι είναι βαμμένοι με πλαστικό χρώμα. Οι πόρτες όλες είναι ξύλινες ελαφριού τύπου.

Το υλικό που έχει το ταβάνι, παρέχει απορρόφηση κυρίως στις χαμηλές συχνότητες και λίγο στις υψηλές. Είναι ζητούμενο να υπάρχουν ανακλάσεις από το ταβάνι για να βοηθήσουν την μετάδοση του απευθείας σήματος στις πιο πίσω θέσεις. Η απορρόφηση των χαμηλών συχνοτήτων από το ταβάνι και τους πλευρικούς τοίχους βοηθούν στο να μην υπάρξουν συντονισμοί σε συγκεκριμένες συχνότητες.

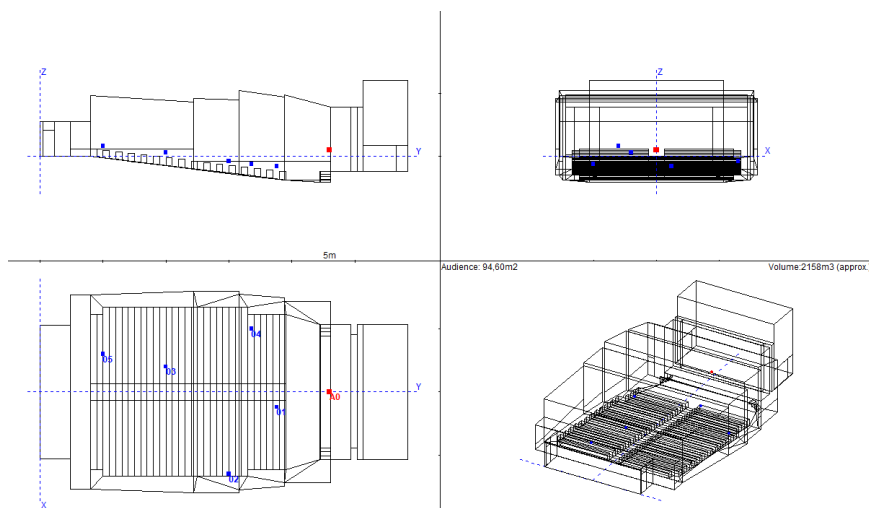
Οι τοίχοι που υπάρχουν δεξιά και αριστερά του ακροατηρίου αποτελούνται από ξύλινα panels, τα οποία διαθέτουν απορροφητικές ιδιότητες κυρίως των χαμηλών συχνοτήτων.

Θεωρητικά αυξάνοντας την απορρόφηση στους πλαϊνούς τοίχους όσο χρειάζεται κάθε φορά θα καλυφθεί το εύρος τιμών του RT_{60} που απαιτείται για τον χώρο. Οι επιφάνειες είναι αρκετά μεγάλες και ανάλογα με το ποσοστό που θα είναι καλυμμένο με απορροφητικό υλικό θα ρυθμίζεται η απορρόφηση.

Στην αίθουσα αυτή, που σκοπός είναι η ρυθμιζόμενη ακουστική, δηλαδή η διαμόρφωση της επιθυμητής ακουστικής ανά περίπτωση, τα υλικά θα πρέπει να μετακινούνται εύκολα και γρήγορα. Ανάλογα με το πώς εξυπηρετεί τη διαμόρφωση του χώρου, αλλά και την αισθητική του.



Εικόνα 8: Προσομοίωση χώρου στο CATT-Acoustic.



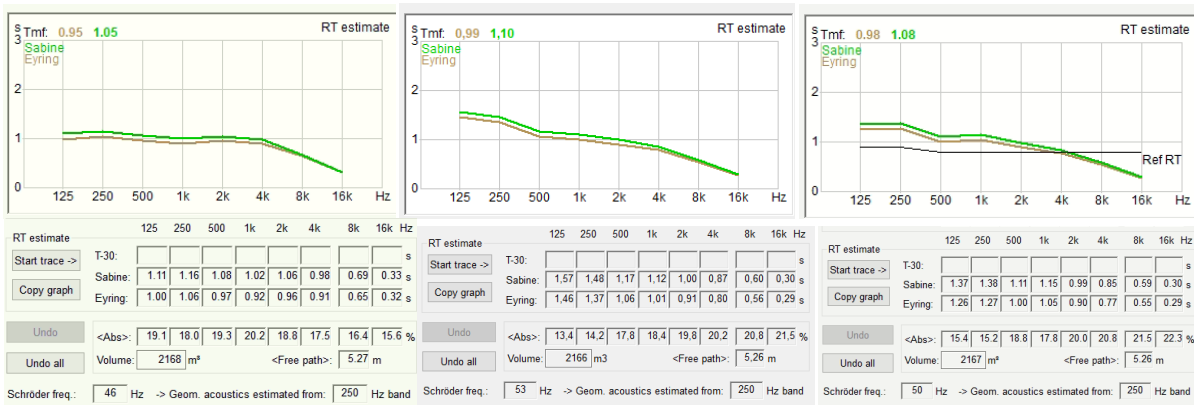
Εικόνα 9: Αποτύπωση χώρου στο CATT-Acoustic.

Πίνακας 6: Τιμές απορρόφησης των υλικών ανά συχνότητα.

Συχνότητα(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Μαρμάρινα πλακάκια (πάτωμα εισόδου 50.08m ²)	1	1	1	1	2	2
Μοκέτα (πάτωμα ακροατηρίου)	2	4	8	20	35	40
Παρκέ (σκηνή)	4	4	7	6	6	7
Βαμμένος τοίχος (τοίχοι και ταβάνι εισόδου και σκηνής)	1	1	1	2	2	2
Ξύλινα panels (τοίχοι ακροατηρίου)	42	21	10	8	6	6
Γυψοσανίδα (ταβάνι ακροατηρίου)	20	15	10	8	4	2
Καθίσματα	13	33	59	58	61	62
Wood Door (πόρτες)	30	25	15	10	10	7

Οι παραπάνω τιμές απορρόφησης έχουν παρθεί από την βιβλιογραφία, καθώς δεν υπάρχουν κάπου καταχωρημένα στοιχεία απορρόφησης των υλικών από την κατασκευή του χώρου, οπότε αποτελούν μία εκτίμηση κατά προσέγγιση. Για αυτόν τον λόγο έγιναν πολλές δοκιμές με διαφορετικές τιμές απορρόφησης στα υλικά, για να εξαχθεί ένα πιο ακριβές αποτέλεσμα. Η απορρόφηση των διάφορων υλικών ορίζεται ανά συχνότητα και με βάση το επιθυμητό αποτέλεσμα επιλέγονται τα καταλληλότερα για να τοποθετηθούν σε ένα χώρο. Υπάρχουν υλικά που παρέχουν στοχευμένη απορρόφηση σε συγκεκριμένες συχνότητες ή πιο γενικευμένη παρέχοντας απορρόφηση σε ένα πιο ευρύ φάσμα χαμηλών ή υψηλών συχνοτήτων. Για παράδειγμα, η απορρόφηση ενδέχεται να είναι διαφορετική ανάλογα με το είδος μιας μοκέτας και του υλικού που υπάρχει κάτω από αυτή, αλλά δεν παρουσιάζονται μεγάλες αποκλίσεις. Εφόσον μελετούνται ίδια υλικά, η απορρόφηση μπορεί να έχει μικρές διαφορές, αλλά η βασική ιδέα, δηλαδή αν ένα υλικό είναι πιο απορροφητικό στις υψηλές ή χαμηλές συχνότητες, παραμένει ίδια. Με γνώμονα τα παραπάνω, δοκιμάστηκαν διαφορετικές τιμές απορρόφησης για τα καθίσματα, τα ξύλινα panels των πλευρικών τοίχων και της γυψοσανίδας που υπάρχει στο ταβάνι.

3.3.2 Χρόνος Αντήησης του χώρου

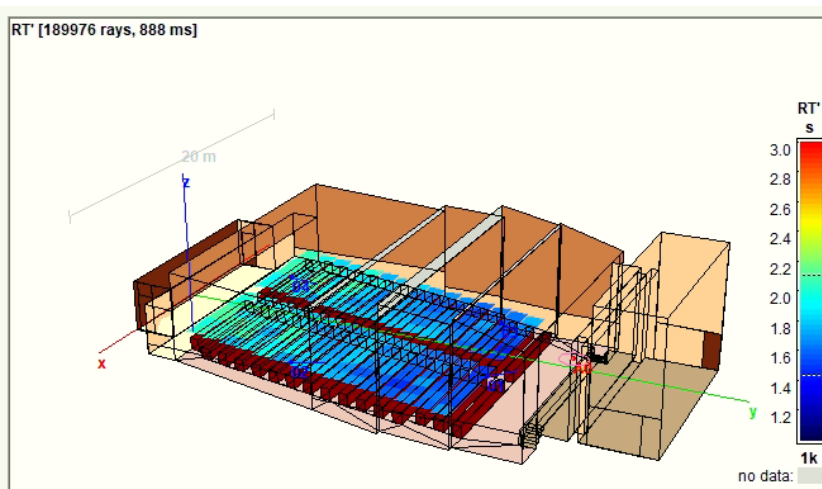


Εικόνα 10: Αρχικός Χρόνος Αντήρησης του χώρου.

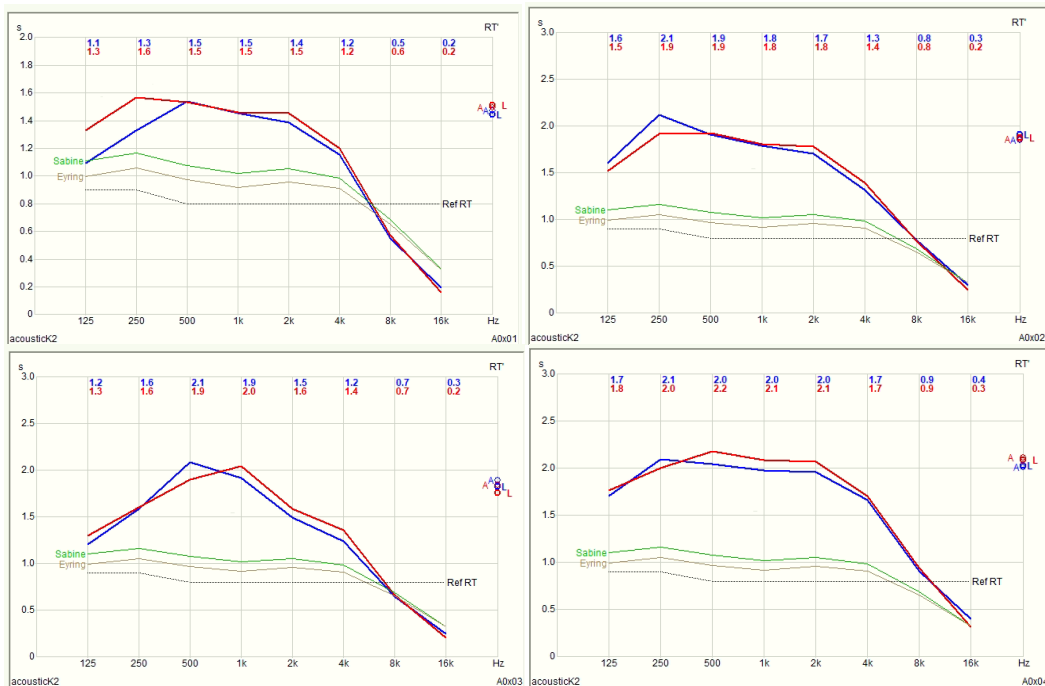
Πίνακας 7: Αρχικός Χρόνος Αντήρησης του χώρου ανά δοκιμή.

	Δοκιμή 1	Δοκιμή 2	Δοκιμή 3
Sabine	1.05	1.08	1.10
Eyring	0.95	0.98	0.99

Οι πολλαπλές δοκιμές έχουν σκοπό την ελαχιστοποίηση λάθους, εφόσον δεν υπήρχαν καταγεγραμμένοι οι συντελεστές απορρόφησης των υλικών του χώρου. Όπως φαίνεται παραπάνω ο γενικός χρόνος αντήρησης του χώρου δεν παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις ανά δοκιμή. Θα ήταν προτιμότερος ένας χρόνος αντήρησης πιο υψηλός, να πλησιάζει δηλαδή τις βέλτιστες τιμές που υπολογίστηκαν θεωρητικά για μουσική και με την κατάλληλη ρύθμιση της απορρόφησης να έφτανε στα θεωρητικά βέλτιστα αποτελέσματα για ομιλία. Ο γενικός χρόνος αντήρησης του χώρου που φαίνεται χαμηλός, δεν συνάδει με τις μετρήσεις που πάρθηκαν σε συγκεκριμένες θέσεις του κοινού, όπου φαίνεται είναι αρκετά πιο υψηλός από τον γενικό.



Εικόνα 11: Χρόνος Αντήρησης στο ακροατήριο.

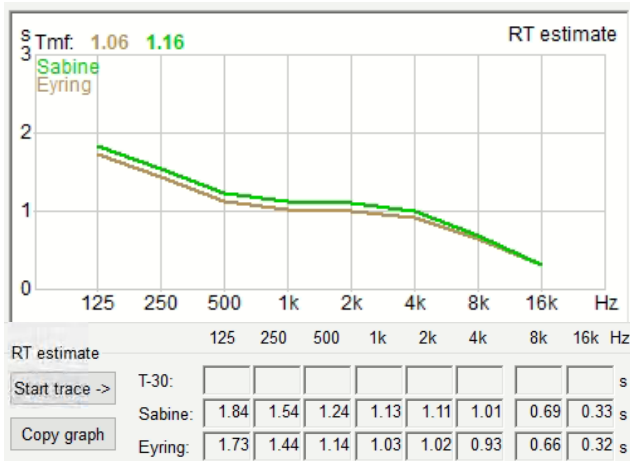


Εικόνα 12: Χρόνοι Αντήρησης ανά συχνότητα, σε διαφορετικές θέσεις στο ακροατήριο.

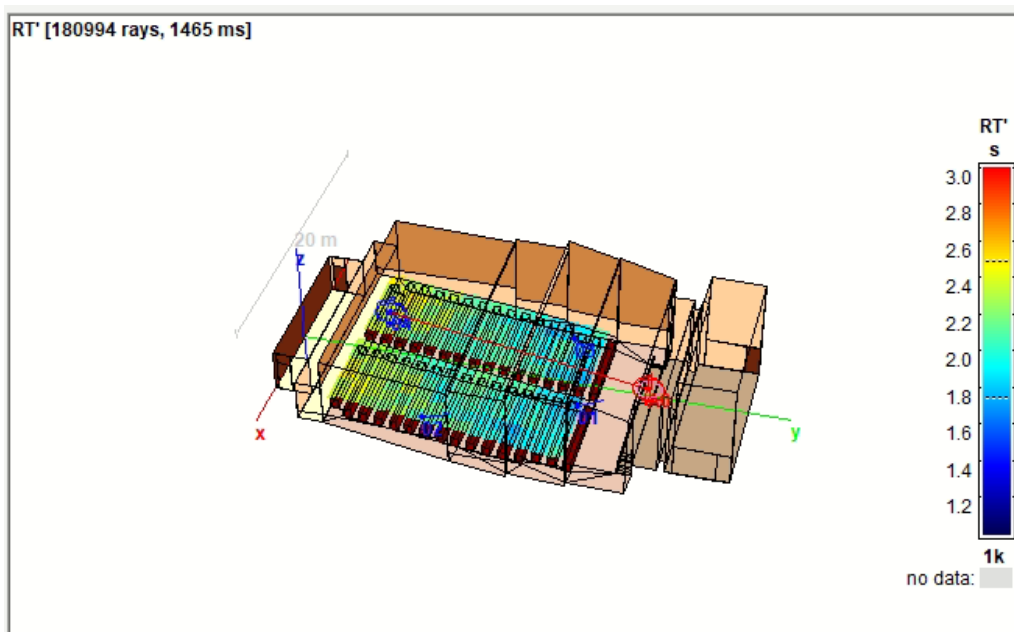
Ο χρόνος αντήρησης στις θέσεις του κοινού κυμαίνεται περίπου από 1.4sec μέχρι 2.1sec. Η μεταβολή αυτή που παρατηρείται λογικά προκύπτει από τις πλευρικές ανακλάσεις και από τις ανακλάσεις από το ταβάνι που φτάνουν, λόγω του σχήματος της αίθουσας, απευθείας στο κοινό. Όσο πιο απομακρυσμένες είναι οι θέσεις από την σκηνή, φαίνεται πως ο χρόνος αντήρησης αυξάνεται περισσότερο. Παρόλο λοιπόν που ο χώρος με βάση το γενικό RT είναι ξηρός, στις θέσεις του ακροατηρίου δεν παρατηρείται αυτό το φαινόμενο.

3.3.3 Αύξηση Ανακλάσεων

Πριν από περεταίρω παρεμβάσεις, πραγματοποιήθηκε μία δοκιμή αύξησης των ανακλάσεων από τα μόνιμα υλικά που υπάρχουν στον χώρο για να αυξηθεί ο γενικός χρόνος αντήρησης και μετά να προστεθούν τα μετακινούμενα υλικά ρύθμισης της απορρόφησης. Αυτή η ενέργεια όμως δεν έφερε κάποια βελτίωση στην ακουστική του χώρου. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο ταβάνι και στους πλαϊνούς τοίχους, από όπου είναι και ζητούμενο να έρχονται οι ανακλάσεις. Δοκιμάστηκαν υλικά που είναι πιο ανακλαστικά από τα ήδη υπάρχοντα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να αυξηθεί κάπως ο γενικός χρόνος αντήρησης σε τιμές πιο κοντά στις θεωρητικές βέλτιστες.



Εικόνα 13: Γενικός χρόνος αντήχησης μετά από αύξηση των ανακλαστικών υλικών.



Εικόνα 14: Τιμές χρόνου αντήχησης μετά από αύξηση των ανακλαστικών υλικών στο κοινό.

Πίνακας 8: Αρχικές τιμές ακουστικών παραμέτρων ανά θέση.

	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4
C_{80}	1.9	-0.6	-1.2	-2
RT	1.5	1.8	1.9	2
STI	0.51	0.44	0.47	0.40

Πίνακας 9: Τιμές ακουστικών παραμέτρων ανά θέση, μετά την αύξηση ανακλαστικών υλικών.

	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4
C_{80}	0.2	-1.5	-1.9	-2.6
RT	1.9	2.1	2.2	2.3
STI	0.48	0.41	0.45	0.39

Οι θεωρητικές βέλτιστες τιμές δεν πλησιάστηκαν ούτε με πλήρως ανακλαστικές επιφάνειες στους πλαϊνούς τοίχους και στο ταβάνι. Επίσης, η αύξηση αυτή, άλλαξε το πως ακούγεται ο ήχος στο χώρο και παραμόρφωσε ακόμα περισσότερη την ακουστική του. Οι τιμές του RT στις διάφορες θέσεις των ακροατών αυξήθηκαν παραπάνω (1.75sec – 2.5sec), ενώ ήταν ήδη αρκετά υψηλές και οι τιμές της ευκρίνειας και του STI είχαν μία μικρή μείωση, κάτι που συμβάλει αρνητικά στην ακουστική του χώρου. Οπότε, από τις μετρήσεις αυτές προκύπτει πως δεν υπάρχει λόγος να αλλάξουν τα μόνιμα υλικά του χώρου με άλλα πιο ανακλαστικά.

3.3.4 Ρυθμιζόμενη απορρόφηση με κουρτίνες

Προχωρώντας την μελέτη δοκιμάστηκαν κουρτίνες για ρύθμιση της απορρόφησης, οι οποίες θα μπορούν να μετακινούνται από το πίσω μέρος της αίθουσας προς τη σκηνή. Είναι σημαντικό να ξεκινάει η απορρόφηση από το πίσω μέρος της αίθουσας για να περιοριστούν οι καθυστερημένες ανακλάσεις και επειδή ο χρόνος αντήχησης παρουσιάζει αύξηση στις πίσω θέσεις. Δοκιμάστηκαν 4 είδη κουρτινών που με βάση το υλικό τους και την απόσταση που τοποθετούνται από τους τοίχους αλλάζουν και οι συντελεστές απορρόφησης τους. Τοποθετήθηκε ένα είδος κουρτινών ανά δοκιμή, αλλά και σε συνδυασμό.

Πίνακας 10: Απορρόφηση κουρτινών ανά συχνότητα.

Συχνότητα(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
1. Κουρτίνες με 130mm απόσταση από τον τοίχο.	30	45	65	56	59	71
2. Κουρτίνες βελούδινες.	14	35	55	72	70	65
3. Κουρτίνες βαμβακερές.	4	23	14	57	53	40
4. Κουρτίνες βελούδινες, μέτριου πάχους.	5	25	40	50	60	50

Οι κουρτίνες (1) δοκιμάστηκαν, αλλά δεν βοήθησαν στην ακουστική του χώρου γιατί παρέχουν μεγάλη απορρόφηση στις πολύ υψηλές συχνότητες, κάτι που δεν είναι επιθυμητό με βάση την υπάρχουσα ακουστική του χώρου. Οι κουρτίνες (3) δεν είχαν αρκετή απορρόφηση στη συχνότητα των 500Hz, με αποτέλεσμα να αφήνουν μία κορυφή στον χρόνο αντήχησης, που εμποδίζει την προσδοκώμενη επίπεδη απορρόφηση του χώρου. Οι δοκιμές που έγιναν με τις κουρτίνες (2) και (4) παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 11: Χρόνος Αντήχησης ανά δοκιμή με κουρτίνες και ανά θέση στο κοινό.

	Total RT	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4
Χωρίς προσθήκη απορρόφησης.	1.4 – 2.1	1.5	1.8	1.9	2.0
Με προσθήκη των κουρτινών (4) στο πίσω μέρος της αίθουσας και στους πλαϊνούς τοίχους μέχρι τη μέση του κοινού.	1.2 – 1.7	1.3	1.5	1.5	1.7
Με τις κουρτίνες (4) στο πίσω μέρος και στους πλαϊνούς τοίχους μέχρι τη μέση του κοινού με τις κουρτίνες (2).	1.2 – 1.6	1.3	1.4	1.4	1.7
Με προσθήκη των κουρτινών (2) στο πίσω μέρος της αίθουσας και στο ¼ των πλαϊνών τοίχων.	1.2 – 1.8	1.3	1.5	1.7	1.5
Με προσθήκη των κουρτινών (2) στο πίσω μέρος της αίθουσας και στους πλαϊνούς τοίχους μέχρι τη μέση του κοινού.	1 – 1.6	1.2	1.3	1.5	1.6
Με προσθήκη των κουρτινών (2) στο πίσω μέρος της αίθουσας και στα ¾ των πλαϊνών τοίχων.	1 – 1.4	1.1	1.2	1.5	1.5
Με προσθήκη των κουρτινών (2) στο πίσω μέρος της αίθουσας και στους πλαϊνούς τοίχους σε όλο το μήκος του κοινού.	0.8 – 1.4	1	1.2	1.3	1.3
Με προσθήκη των κουρτινών (2) στο πίσω μέρος της αίθουσας και στους πλαϊνούς τοίχους μέχρι τη σκηνή.	0.8-1.2	0.9	1.1	1.2	1.2

Συνοψίζοντας τα παραπάνω αποτελέσματα:

- Ο χώρος χρειάζεται περισσότερη απορρόφηση από τις κουρτίνες (4), για αυτόν τον λόγο οι δοκιμές με ποσοστό κάλυψης έγιναν με τις κουρτίνες (2).
- Όσο αυξάνεται το ποσοστό της κάλυψης των πλαϊνών τοίχων με κουρτίνες, ο χρόνος αντήχησης μειώνεται και πλησιάζει τον θεωρητικό βέλτιστο χρόνο αντήχησης.
- Ο χώρος χρειάζεται περισσότερη απορρόφηση και ειδικά στις πιο χαμηλές συχνότητες. Παρόλο που οι θεωρητικές τιμές πλησιάστηκαν, χρειάστηκε να καλυφθούν όλοι οι πλαϊνοί τοίχοι και το αποτέλεσμα δεν είναι το ιδανικό.
- Υπάρχουν κουρτίνες και τεχνικές τοποθέτησής τους που παρέχουν μεγαλύτερη απορρόφηση, αλλά η κατανομή της απορρόφησης που παρέχουν αυξάνεται ανά συχνότητα με αποτέλεσμα να αυξάνεται λίγο η απορρόφηση στις χαμηλές συχνότητες και πολύ στις υψηλές συχνότητες, κάτι που χειροτερεύει την ακουστική του συγκεκριμένου χώρου αντί να την βελτιώνει.

Πλεονεκτήματα:

Το κόστος για κάλυψη του χώρου με κουρτίνες είναι σχετικά χαμηλό, η εγκατάσταση είναι αρκετά απλή και η μετακίνηση των κουρτινών για ρύθμιση της απορρόφησης είναι πολύ εύκολη.

Μειονεκτήματα:

Η απορρόφηση από τις κουρτίνες μειώνει τον χρόνο αντήχησης και όντως πλησιάζει τις θεωρητικές τιμές, αλλά δεν είναι ομοιόμορφη για όλο το κοινό, με αποτέλεσμα οι πιο πίσω θέσεις να έχουν μεγάλη απόκλιση σε σχέση με τις πιο μπροστινές.

3.3.5 Ρυθμιζόμενη απορρόφηση με ακουστικά panels

Η ρύθμιση της απορρόφησης με panels ακολουθεί το ίδιο μοτίβο με τις κουρτίνες και με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα προτιμήθηκαν panels με απορρόφηση μεγαλύτερη των κουρτινών που δοκιμάστηκαν, αλλά με παρόμοια κατανομή ανά συχνότητα. Το ζητούμενο είναι μεγαλύτερη απορρόφηση στις χαμηλές συχνότητες με μείωση της απορρόφησης προς τις μεγαλύτερες. Οπότε επιλέχθηκαν για δοκιμή τα ακόλουθα panels και δοκιμάστηκαν στις ίδιες θέσεις με τις κουρτίνες.

Πίνακας 12: Απορρόφηση των panels ανά συχνότητα.

Συχνότητα(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Εύλινα panels (1).	21	44	65	64	54	47
Εύλινα panels (2).	8	57	71	40	20	18

Πίνακας 13: Χρόνος Αντήχησης ανά δοκιμή με panels, ανά θέση στο κοινό.

	Total RT	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4
Με προσθήκη των panels στο πίσω μέρος της αίθουσας.	1.2 – 1.8	1.3	1.6	1.6	1.9
Με προσθήκη των panels στο πίσω μέρος της αίθουσας και στο ¼ των πλαϊνών τοίχων.	1.2 – 1.7	1.2	1.5	1.5	1.7
Με panels στο πίσω μέρος και στους πλαϊνούς τοίχους μέχρι τη μέση του κοινού.	1.1 – 1.6	1.3	1.4	1.5	1.6
Με προσθήκη panels στο πίσω μέρος της αίθουσας και στο ¾ των πλαϊνών τοίχων.	1.1 – 1.5	1.2	1.3	1.4	1.6

Η απορρόφηση των panels είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τις κουρτίνες και αυτό συμβάλει θετικά στην ακουστική του χώρου.

Πλεονεκτήματα:

Με τα panels μπορούν να πλησιαστούν οι βέλτιστες θεωρητικές τιμές με μικρότερο ποσοστό κάλυψης σε σχέση με τις κουρτίνες. Επίσης, τα panels είναι περισσότερο απορροφητικά στις χαμηλές συχνότητες και λιγότερο στις υψηλές, συγκριτικά με τις κουρτίνες και αυτό εξυπηρετεί καλύτερα το ζητούμενο για τον συγκεκριμένο χώρο.

Μειονεκτήματα:

Η τοποθέτηση είναι αρκετά πιο πολύπλοκη από των κουρτινών και το κόστος είναι μεγαλύτερο. Επίσης, η αλλαγή των panels, είτε σε περίπτωση που χρειαστεί αλλαγή απορρόφησης, είτε σε περίπτωση που κάτι καταστραφεί και χρειαστεί αντικατάσταση, είναι αρκετά απαιτητική διαδικασία.

Ωστόσο, σε όλες τις δοκιμές οι πίσω θέσεις έχουν μεγαλύτερο χρόνο αντήχησης, με μεγαλύτερη αύξηση στις χαμηλές συχνότητες. Για να βελτιωθεί αυτή η συμπεριφορά θα πρέπει να αυξηθεί μόνιμα η απορρόφηση, ειδικότερα των χαμηλών συχνοτήτων, στο πίσω μέρος και μετά να προστεθούν τα μετακινούμενα μέρη.

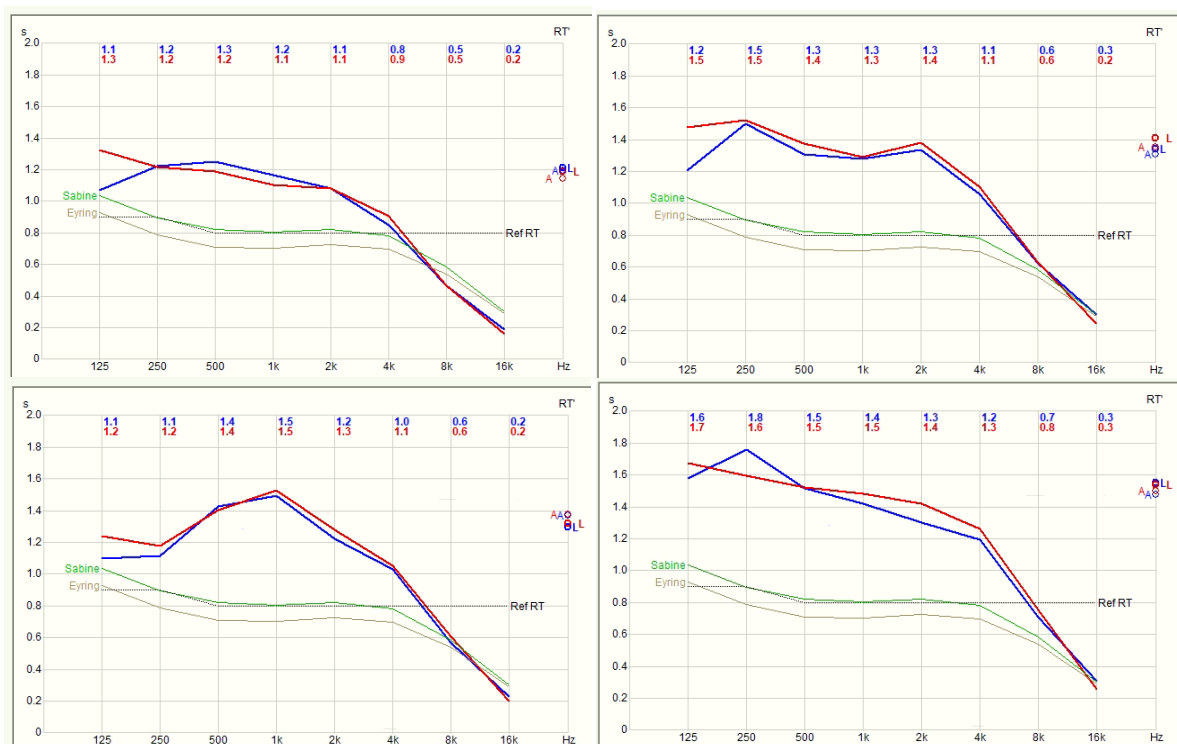
Για αυτόν τον λόγο δοκιμάστηκαν ακόμα πιο απορροφητικά panels και καλύφθηκε όλο το πίσω μέρος της αίθουσας.

Πίνακας 14: Απορρόφηση των panels ανά συχνότητα.

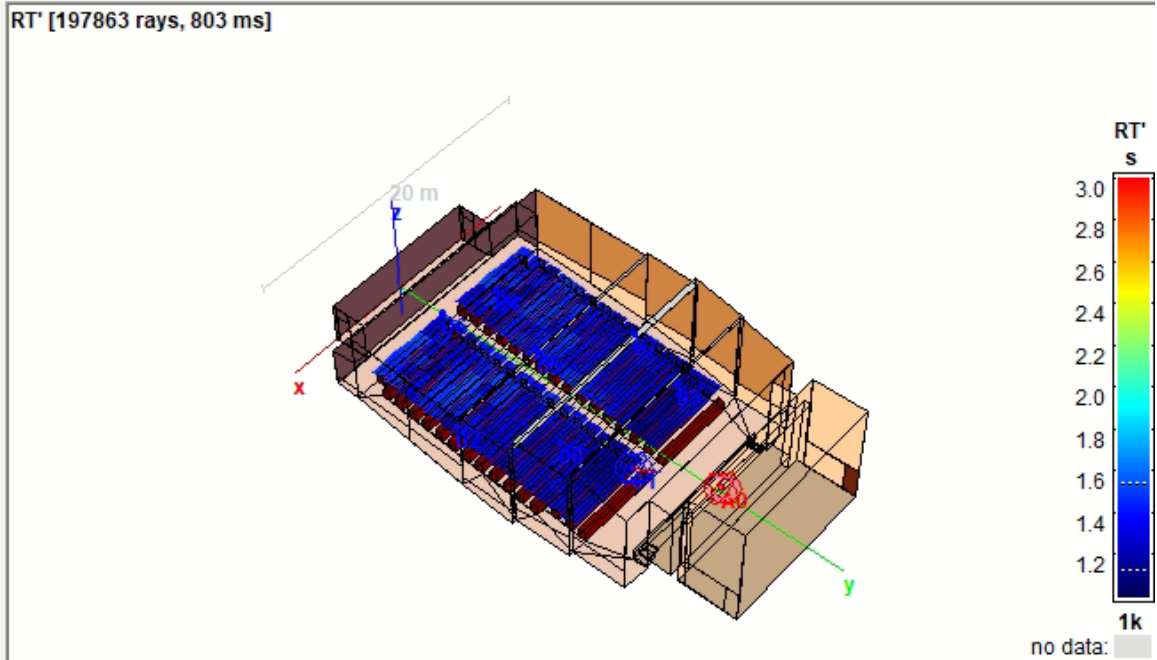
Συχνότητα(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
---------------	-----	-----	-----	------	------	------

Εύλινα panels (3).	58	28	8	4	5	1
Εύλινα panels (4).	40	35	20	15	5	5
Εύλινα panels (5).	34	95	98	82	87	86

Με τα panels (3) και (4) ο χρόνος αντήχησης δεν πλησίασε τα επιθυμητά αποτελέσματα. Με τα panels (5), τα οποία αν και απορροφούν λιγότερο στις πιο χαμηλές συχνότητες και παρόλο που το πρόβλημα εντοπίζεται κυρίως στις χαμηλές, επειδή παρέχουν μέγιστη απορρόφηση στις πιο υψηλές, μειώνουν τις ανακλάσεις και έτσι βοηθούν στην γενική απορρόφηση.

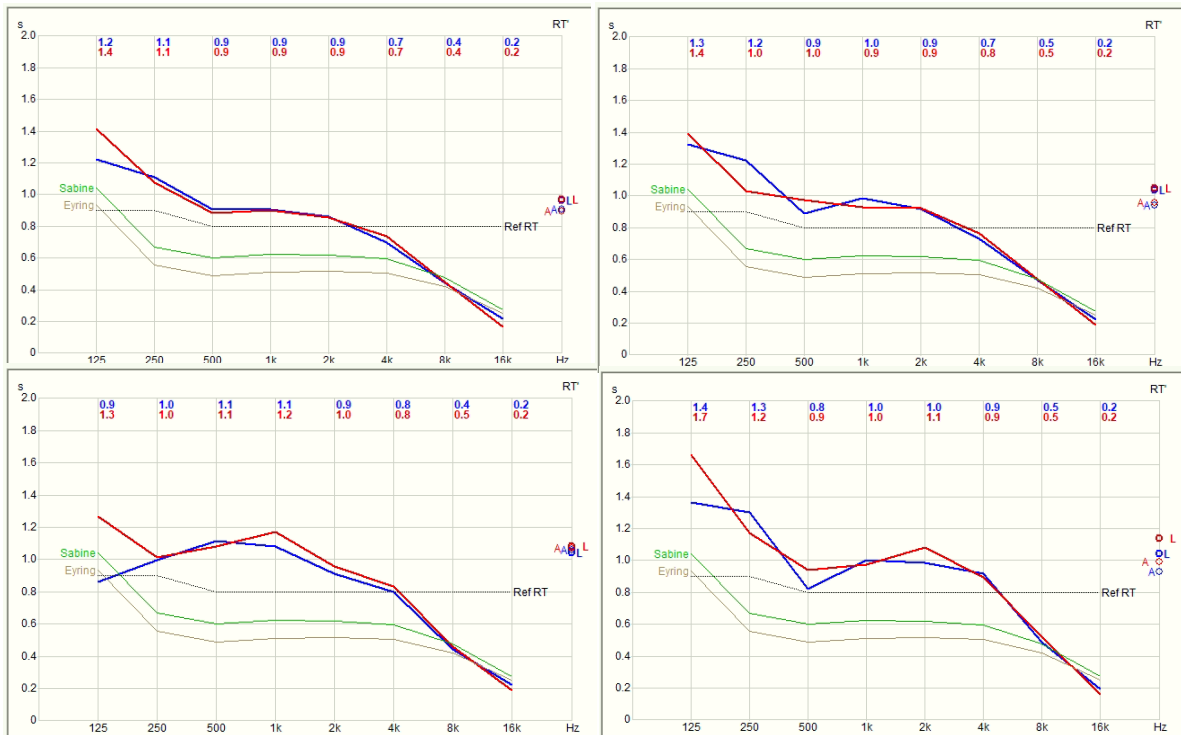


Εικόνα 15: Χρόνοι Αντήχησης ανά συχνότητα στις 4 θέσεις ακροατηρίου μετά από προσθήκη απορρόφησης σε όλο το πίσω μέρος της αίθουσας.

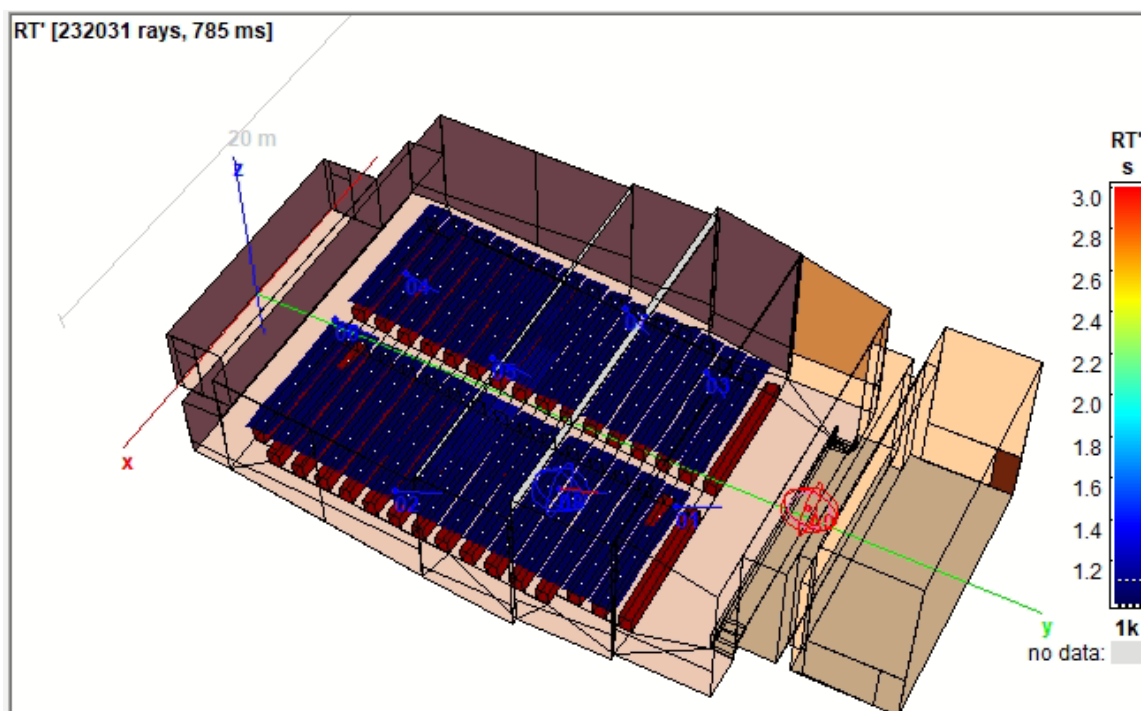


Εικόνα 16: Κατανομή χρόνου αντήχησης στο κοινό μετά από προσθήκη απορρόφησης σε όλο το πίσω μέρος της αίθουσας.

Η προσθήκη απορρόφησης στον προθάλαμο, δηλαδή στον χώρο που βρίσκεται πίσω από το κοινό, βελτιώνει την ακουστική σε σημείο που πλησιάζονται οι βέλτιστες θεωρητικές τιμές του μέγιστου προσδοκώμενου χρόνου αντήχησης χωρίς επιπλέον προσθήκες. Καλύπτοντας και τους πλαϊνούς τοίχους με τα ίδια panels, πλησιάζονται και οι θεωρητικές βέλτιστες τιμές του ελάχιστου χρόνου αντήχησης.



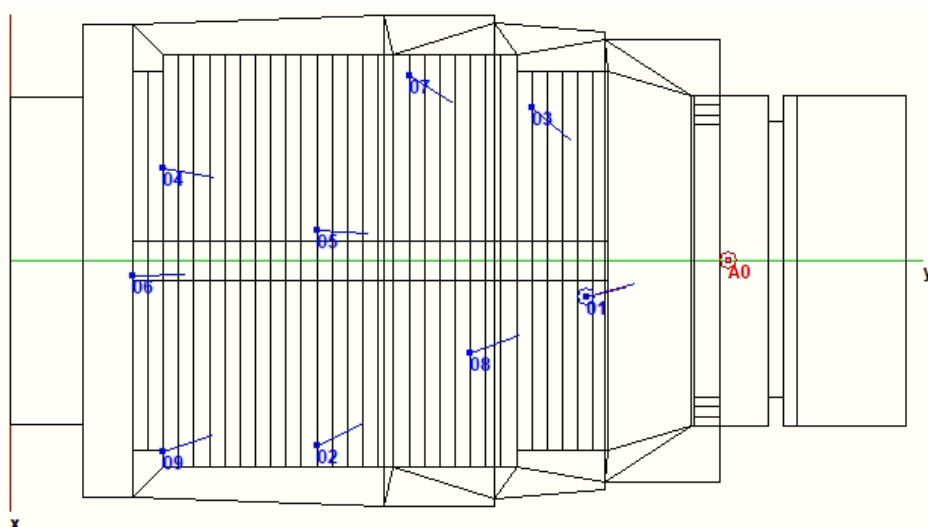
Εικόνα 17: Χρόνοι Αντήχησης ανά συχνότητα στις 4 θέσεις ακροατηρίου μετά από προσθήκη απορρόφησης σε όλο το πίσω μέρος της αίθουσας και στα $\frac{3}{4}$ των πλαϊνών τοίχων.



Εικόνα 18: Κατανομή χρόνου αντήχησης στο κοινό μετά την προσθήκη απορρόφησης σε όλο το πίσω μέρος της αίθουσας και στα $\frac{3}{4}$ των πλαϊνών τοίχων.

3.3.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για 9 θέσεις στο κοινό όπως φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 19: Θέσεις στο ακροατήριο που πάρθηκαν οι μετρήσεις.

Πίνακας 15: Μετρήσεις ακουστικών παραμέτρων με προσθήκη της μέγιστης απορρόφησης για ομιλία.

	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4	Θέση 5	Θέση 6	Θέση 7	Θέση 8	Θέση 9
C_{80}	4.8	2.4	1.9	1.6	1.9	4.5	3.5	3.2	3
RT	1	1.1	1.2	1.1	1.1	0.8	1	1	1
D_{50}	56	44.9	49	49	47.2	59.9	54.6	57.3	56

Πίνακας 16: Μετρήσεις ακουστικών παραμέτρων με προσθήκη απορρόφησης μόνο στο πίσω μέρος της αίθουσας για μουσική.

	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4	Θέση 5	Θέση 6	Θέση 7	Θέση 8	Θέση 9
C_{80}	1.9	0,8	1.3	0.2	1.3	1	1.7	1.8	0.2
RT	1.2	1.5	1.3	1.6	1.4	1.3	1.3	1.3	1.6
D_{50}	48.5	35.6	41.5	36.9	39.3	42.9	43.3	44.2	32

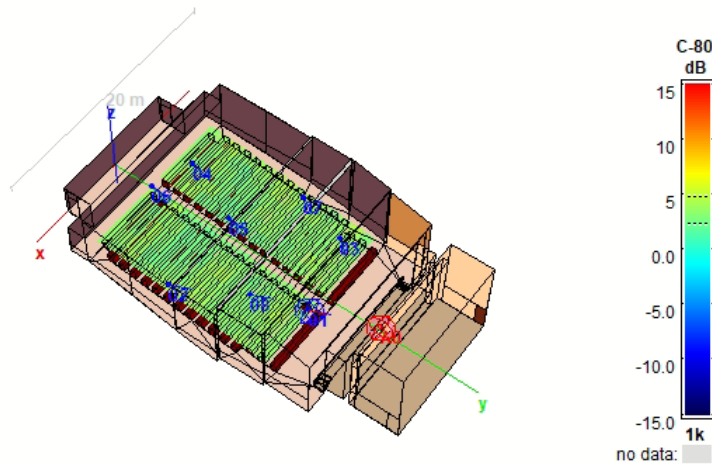
Πίνακας 17: Μετρήσεις ακουστικών παραμέτρων με τα αρχικά υλικά του χώρου.

	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4	Θέση 5	Θέση 6	Θέση 7	Θέση 8	Θέση 9
--	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

C_{80}	1.3	-0.1	-0.3	-2.8	-1.1	-1.1	0.3	-0.1	-1.8
RT	1.6	1.7	1.8	2.1	1.9	1.9	1.7	1.8	2.1
D_{50}	46	36.2	36.1	25	33.5	31	40	37	28

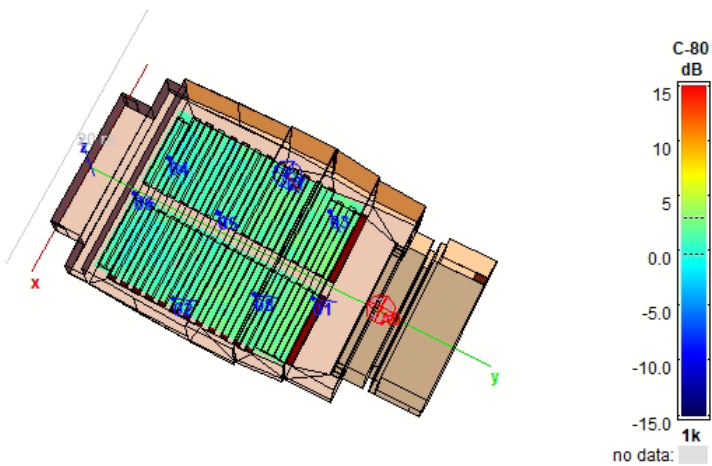
Κατανομή C_{80} στο ακροατήριο:

Clarity [232031 rays, 783 ms]

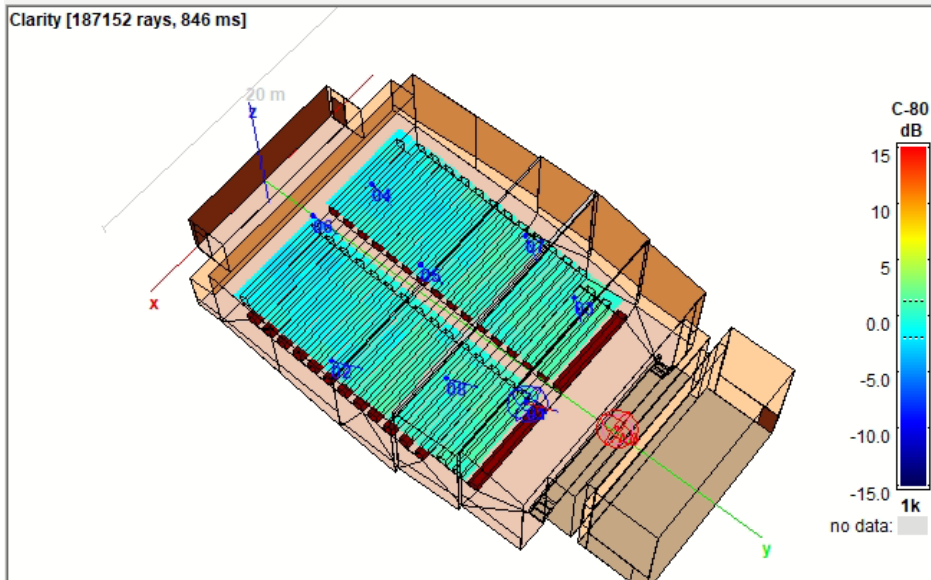


Εικόνα 20: Κατανομή C_{80} στο ακροατήριο με προσθήκη της μέγιστης απορρόφησης για ομιλία.

Clarity [197863 rays, 798 ms]

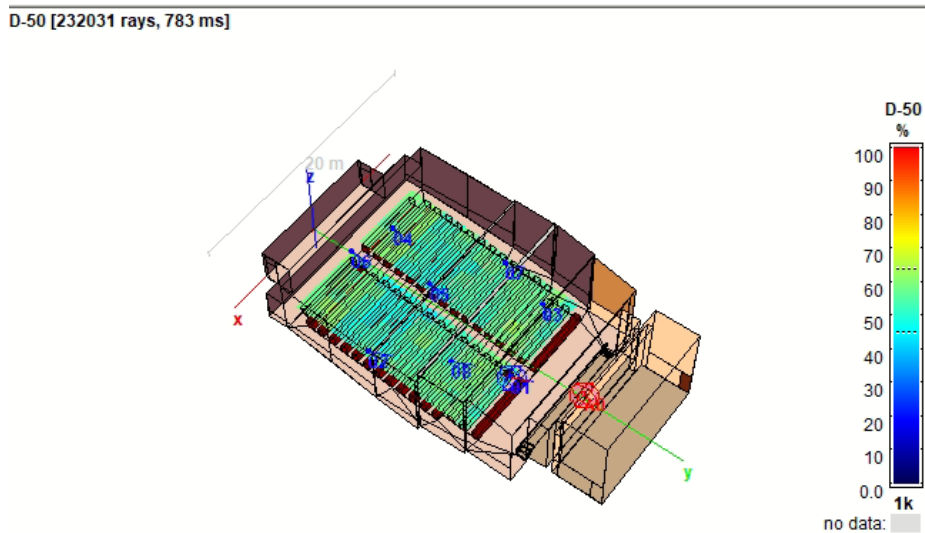


Εικόνα 21: Κατανομή C_{80} στο ακροατήριο με προσθήκη απορρόφησης μόνο στο πίσω μέρος της αίθουσας για μουσική.



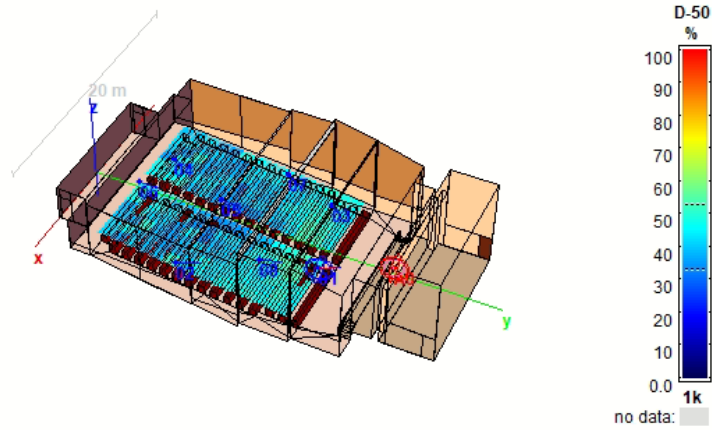
Εικόνα 22: Κατανομή C_{80} στο ακροατήριο αρχικά.

Κατανομή D_{50} στο ακροατήριο:



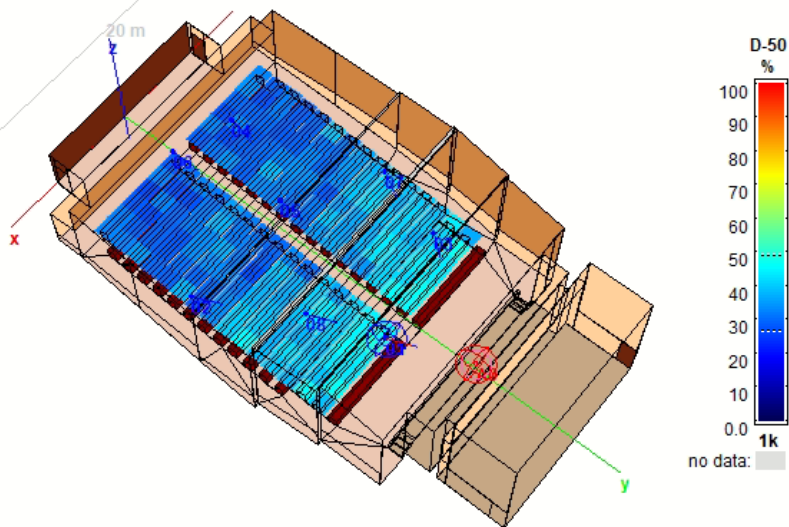
Εικόνα 23: Κατανομή D_{50} στο ακροατήριο με προσθήκη της μέγιστης απορρόφησης για ομιλία.

D-50 [197863 rays, 803 ms]



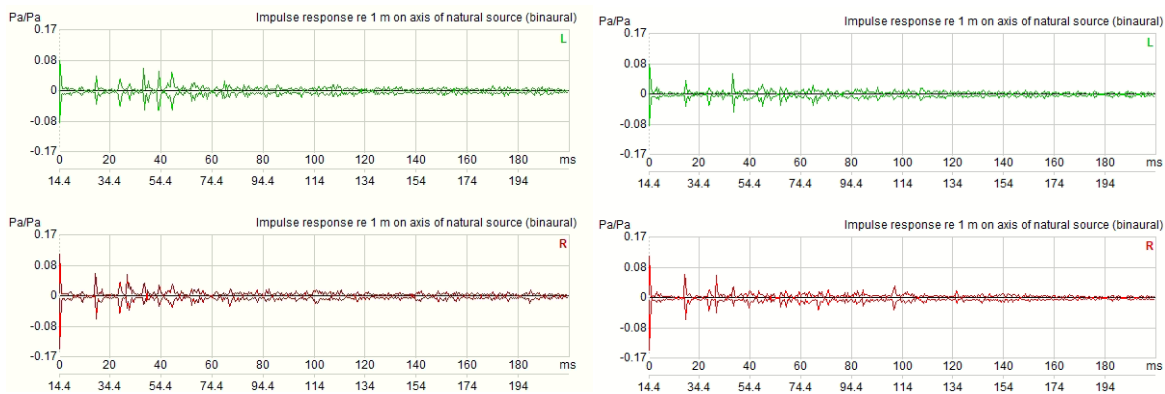
Εικόνα 24: Κατανομή D_{50} στο ακροατήριο με προσθήκη απορρόφησης μόνο στο πίσω μέρος της αίθουσας για μουσική.

D-50 [187152 rays, 846 ms]

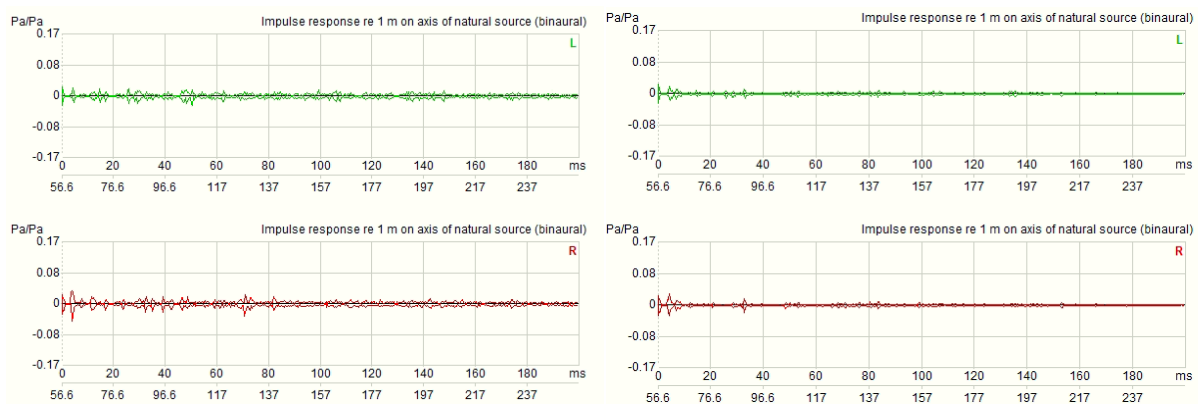


Εικόνα 25: Κατανομή D_{50} στο ακροατήριο αρχικά.

Σύγκριση Impulse Response σε θέσεις του ακροατηρίου:



Εικόνα 26: Impulse response στη θέση 1 πριν και μετά την προσθήκη απορρόφησης.

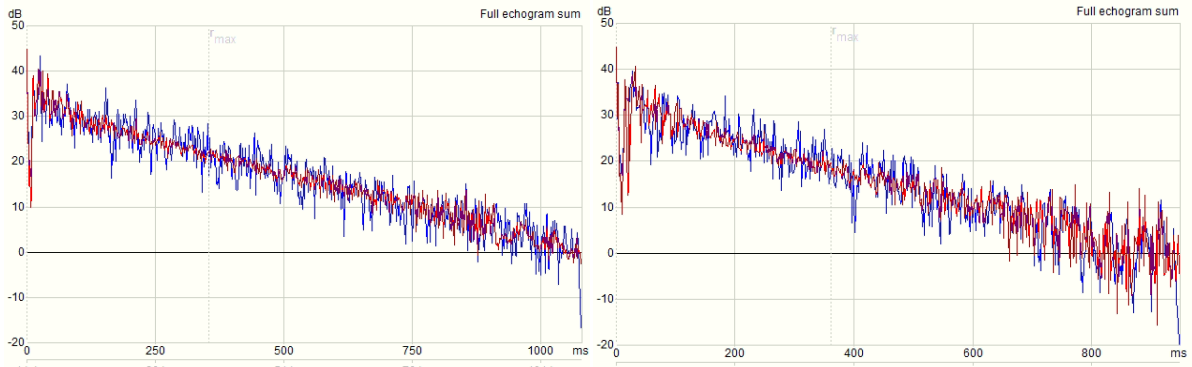


Εικόνα 27: Impulse response στη θέση 9 πριν και μετά την προσθήκη απορρόφησης.

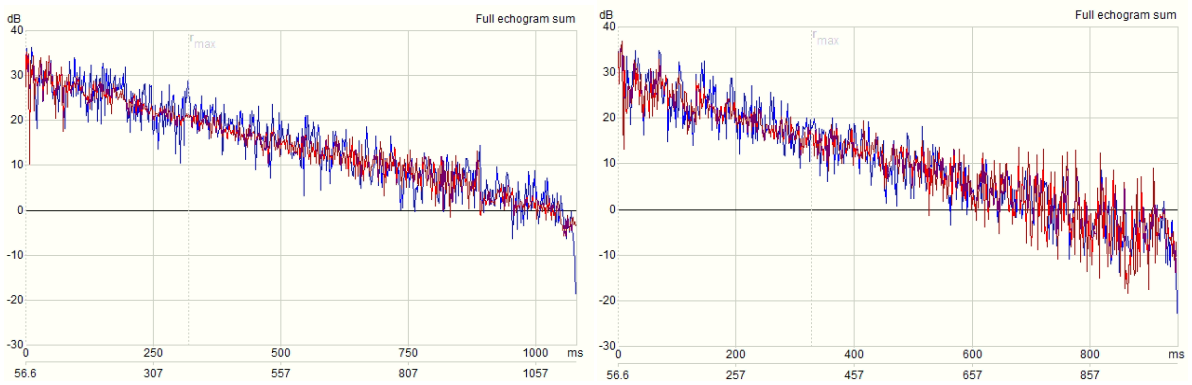
Η θέση 1 βρίσκεται στην πρώτη σειρά κεντρικά στην αίθουσα και η θέση 9 βρίσκεται στην προτελευταία σειρά και είναι η πιο γωνιακή θέση. Και στις δύο περιπτώσεις φαίνεται η θετική επίδραση της απορρόφησης τόσο για τις θέσεις που βρίσκονται κοντά σκηνή όσο και για τις πιο απομακρυσμένες.

Σύγκριση γενικού χρόνου αντήχησης ανά δοκιμή:

Από τις δοκιμές παρατηρείται πως ο γενικός χρόνος αντήχησης του χώρου μεταβάλλεται πολύ λιγότερο σε σχέση με την μεταβολή που παρουσιάζει στις θέσεις του κοινού και παρόλο που μειώθηκε σε επίπεδα χαμηλότερα των θεωρητικών ελαχίστων, η ακουστική του χώρου βελτιώθηκε και πλησίασε τα ιδανικά αποτελέσματα. Να σημειωθεί πως αυτό είναι κάτι που παρατηρήθηκε στον συγκεκριμένο χώρο.



Εικόνα 29: Ηχόγραμμα στη θέση 1 πριν και μετά την προσθήκη απορρόφησης.



Εικόνα 30: Ηχόγραμμα στη θέση 9 πριν και μετά την προσθήκη απορρόφησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ηλεκτροακουστική Μελέτη

Σκοπός της ενίσχυσης του χώρου με ηλεκτροακουστική εγκατάσταση είναι η ομοιόμορφη κατανομή του ήχου σε όλο το ακροατήριο. Ο χώρος που μελετήθηκε δεν αντιμετωπίζει πρόβλημα εισερχόμενου θορύβου (θόρυβος περιβάλλοντος της αίθουσας όπως προέκυψε από το CATT-Acoustic: 35.8 dBA), αλλά επειδή είναι μία αρκετά μεγάλη αίθουσα, η ενίσχυση είναι απαραίτητη. Λόγο της μεγάλης απόστασης του κοινού από την σκηνή, το ηχητικό σήμα δεν μπορεί να φτάσει με την ίδια ένταση σε όλες τις θέσεις του κοινού, ειδικότερα στις πιο απομακρυσμένες θέσεις. Τέλος, στόχος είναι η ηλεκτροακουστική εγκατάσταση να έχει πολύ χαμηλό επίπεδο θορύβου. Τα μεγάφωνα δεν πρέπει να είναι πολύ κατευθυντικά ώστε να δημιουργηθεί ένα ομοιόμορφα κατανομημένο ηχητικό πεδίο. Θα πρέπει να μελετηθεί επίσης η τοποθέτηση των μικροφώνων και των μεγαφώνων για να αποφευχθεί η ανατροφοδότηση. Τα μικρόφωνα θα πρέπει να τοποθετηθούν εκτός της περιοχής κάλυψης των μεγαφώνων.

Για να ενισχυθεί η ομιλία καλύτερη επιλογή είναι μία κεντρική συστοιχία ηχείων κεντρικά πάνω από την σκηνή. Η χρήση περισσότερων ηχείων σε διαφορετικά σημεία δυσκολεύει την κατανόηση του λόγου. Για μουσικές παραστάσεις, συμπληρωματικά με την παραπάνω συστοιχία, προτείνεται να προστεθούν και δύο συστοιχίες δεξιά και αριστερά από την σκηνή. Η τοποθέτηση των δύο αυτών συστοιχιών εξυπηρετεί στην απόδοση της στερεοφωνικής αίσθησης των όσων συμβαίνουν στη σκηνή με διαβάθμιση της σχετικής έντασης με την οποία αναπαράγεται κάθε πηγή από το δεξί και αριστερό κανάλι.

Για αίθουσες με παραλληλεπίπεδο σχήμα χρησιμοποιούνται πιο κατευθυντικά ηχεία. Η απαιτούμενη στάθμη εξαρτάται από το είδος της εκδήλωσης. Γενικά αν ο θόρυβος δεν υπερβαίνει τα 45 dB(A), μία στάθμη ίση με 90 dB με περιθώριο 10 dB είναι ικανοποιητική στην πλειοψηφία των περιπτώσεων. [5]

4.1 Επιλογή μικροφώνων

Στα συστήματα ηχητικών εγκαταστάσεων χρησιμοποιούνται μικρόφωνα κυρίως με καρδιοειδή και υπερκαρδιοειδή πολική απόκριση για τον περιορισμό της ακουστικής ανάδρασης. Η τυπική απόσταση τοποθέτησης των μικροφώνων από την πηγή είναι από 10 cm έως 1 m. Για ενίσχυση χορωδιακών συνόλων τα μικρόφωνα τοποθετούνται σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Σε αυτήν την περίπτωση ακολουθείται ο πρακτικός κανόνας όπου η απόσταση μεταξύ των μικροφώνων είναι περίπου τριπλάσια της απόστασης τους από την πηγή. Ανάλογα με την περίπτωση ορίζεται και η απόκριση συχνότητας που θα έχει το μικρόφωνο. Για ενίσχυση ομιλίας μια ικανοποιητική

απόκριση συχνότητας είναι 80 Hz έως 8 kHz και για μουσική ικανοποιητική απόκριση είναι 50 Hz έως 12 kHz. Επίσης, θα πρέπει να αποφασιστεί και η ευαισθησία του μικροφώνου. Η ευαισθησία είναι η τάση εξόδου για κάθε Pa πίεσης στο διάφραγμα και μετρείται χωρίς φορτίο στο μικρόφωνο. Μπορεί να προδιαγραφεται σε dBV σε αναφορά με την στάθμη 1 Pa/V, ή σε dBu με αναφορά το 1 Pa/0,775V. Τέλος, μπορεί να χρειαστούν αντικραδασμικές βάσεις, μικρόφωνα πέτου (lavaliere) και ασύρματα μικρόφωνα. [5]

4.2 Ηλεκτρονικοί controllers

Για την αύξηση του μεγέθους του ηλεκτρικού σήματος χρησιμοποιούνται ενισχυτές, για τη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας στα μεγάφωνα υψηλών και χαμηλών συχνοτήτων στο κατάλληλο επίπεδο και την κατάλληλη συχνότητα χρησιμοποιούνται τα δίκτυα crossover. Για την συγκέντρωση και τον έλεγχο όλων των σημάτων από όλες τις πηγές που υπάρχουν στο σύστημα χρησιμοποιούνται mixers και για να γίνει έλεγχος του τόνου για τη διαμόρφωση του σήματος χρησιμοποιούνται ισοσταθμιστές, ώστε να ταιριάζει η έξοδος του συστήματος με τις ακουστικές ιδιότητες του δωματίου και να αντισταθμίσει τα χαρακτηριστικά των μεγαφώνων που εξαρτώνται από τη συχνότητα. [1]

4.3 Επιλογή ηχείων

Τα ηχεία χωρίζονται με βάση την ονομαστική τους ευαισθησία σε dB/W/m, την ονομαστική τους αντίσταση που συνήθως είναι 4, 8, 16 Ω και τη μέγιστη συνεχή ισχύ που μπορούν να αντέξουν. Περισσότερα από ένα ηχεία μπορούν να συνδεθούν σε σειρά, παράλληλα ή σε συνδυασμό. Αποφεύγεται η τιμή της συνολικής αντίστασης να είναι μικρότερη των 4 Ω, επειδή οι απαιτήσεις σε ρεύμα από τον ενισχυτή αυξάνονται και ταυτόχρονα η τιμή του συντελεστή απόσβεσης ελαττώνεται. Για τη σύνδεση των ηχείων ορίζεται η ονομαστική αντίσταση και η ονομαστική ευαισθησία του συνδυασμού. [5]

Για αίθουσες με χρόνο αντήχησης μικρότερο των 2sec, η μέγιστη απόσταση d μεγαφώνου με ακροατή μπορεί να βρεθεί από τη σχέση:

$$d \approx 0.1 \sqrt{\frac{QV}{T}} \quad (18)$$

Όπου: d = μέγιστη απόσταση μεγαφώνου-ακροατή (ft)

Q = κατευθυντικότητα ηχείου

V = όγκος αίθουσας (ft^3)

T = χρόνος αντήχησης (sec)

Η απόσταση μεταξύ των ηχείων και του πιο απομακρυσμένου ακροατή μπορεί να είναι μεγαλύτερη για χώρους με χαμηλό χρόνο αντήχησης που διαθέτουν πολύ κατευθυντικά ηχεία.

Ένα κεντρικό σύστημα ηχείων βρίσκεται συνήθως 6 με 12 μέτρα πάνω και ελαφρώς πιο μπροστά από την πηγή του σήματος. Σκοπός αυτού του συστήματος είναι να παρέχει μέγιστο ρεαλισμό, καθώς ο ακροατής θα ακούει το ενισχυμένο σήμα από την κατεύθυνση της ηχητικής πηγής. Αυτό συμβαίνει γιατί τα ανθρώπινα αυτιά ξεχωρίζουν τους ήχους καλύτερα στον οριζόντιο άξονα, όπου βρίσκονται τα αυτιά, από τον κάθετο άξονα. Στα κεντρικά συστήματα ηχείων χρησιμοποιούνται κατευθυντικά ηχεία που στοχεύουν την ενέργεια του ενισχυμένου σήματος στο κοινό, το οποίο απορροφά τον ήχο και όχι σε ανακλαστικές επιφάνειες. Με αυτόν τον τρόπο τα ηλεκτρακουστικά συστήματα παρέχουν υψηλή ευκρίνεια αυξάνοντας το επίπεδο ηχητικής ενέργειας από την τοποθεσία του ομιλητή περισσότερο από όσο αυξάνουν την αντηχητική ηχητική ενέργεια.

Τέλος, θα πρέπει το κοινό να έχει ανεμπόδιστη οπτική επαφή με το σύστημα ηχείων επειδή ο ήχος στις υψηλές συχνότητες είναι πολύ κατευθυντικός. [1]

Η στάθμη του ενισχυμένου σήματος θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 10 dB περισσότερο από τον θόρυβο περιβάλλοντος. Σε κανονικές συνθήκες, για μετάδοση ομιλίας μία στάθμη των 70-75 dB είναι επαρκής. Για μουσική οι απαιτήσεις είναι της τάξης των 95-105 dB και εξαρτώνται από το είδος της μουσικής. [4]

4.4 Ακουστική Ανάδραση (feedback)

Η στάθμη του ήχου στο μεγάφωνο μπορεί να αυξηθεί μέχρι να επέλθει *ακουστική ανάδραση*. Ο ήχος από το μεγάφωνο συλλέγεται από το μικρόφωνο και ενισχύεται. Στη συνέχεια επανασυλλέγεται από το μικρόφωνο και ενισχύεται εκ νέου. Υπό ορισμένες συνθήκες αυτή η διαδικασία οδηγεί σε ένα ασταθές σύστημα και την μεγάλη αύξηση του πλάτους σε μία ορισμένη συχνότητα. Η ηχητική ανάδραση ακούγεται ως βουητό αν συμβαίνει σε συχνότητες κάτω από 500Hz και ως σφύριγμα για συχνότητες μεγαλύτερες του 1kHz. Για να επέλθει ακουστική ανάδραση πρέπει να η στάθμη του ήχου στο μικρόφωνο που προκαλείται από το ηχείο να είναι συγκρίσιμη με τη στάθμη που παράγει ο ομιλητής. [5]

4.5 Χρονική Καθυστέρηση (Delay)

Εκτός από το κεντρικό σύστημα ηχείων, ενδέχεται σε πολύ μεγάλους χώρους ή σε χώρους με εξώστη, να υπάρχει και ένα filler σύστημα που θα λειτουργεί βοηθητικά στο κεντρικό. Για το συμπληρωματικό σύστημα, λόγω μεγάλης απόστασης από την πηγή του απευθείας σήματος, ορίζεται ένα delay, ώστε να μην υπάρξει μετατόπιση της πηγής

για τους απομακρυσμένους ακροατές. Το delay που εφαρμόζεται στο σύστημα σε τέτοιες περιπτώσεις είναι περίπου 10-100 ms.

Ο ακροατής επωφελείται από το φαινόμενο της προτεραιότητας (precedence effect), το οποίο δημιουργεί την ψευδαίσθηση πως όλος ο ήχος παράγεται από την φυσική πηγή, σαν να μην υπάρχει ηλεκτρακουστικό σύστημα σε λειτουργία. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να διατηρηθεί ακόμα και αν η ένταση του σήματος του μεγαφώνου υπερβαίνει την ένταση του φυσικού σήματος κατά 5-10 dB, με την προϋπόθεση ότι το φυσικό σήμα προηγείται του σήματος του μεγαφώνου κατά περίπου 10-15 ms (φαινόμενο Hass). Η καθυστερημένη άφιξη του σήματος του μεγαφώνου στη θέση του ακροατή μπορεί να επιτευχθεί αν αυξηθεί η απόσταση ανάμεσα στο μεγάφωνο και το ακροατήριο. Αυτή η εφαρμογή μπορεί να είναι απλή, αλλά μπορεί να προκαλέσει feedback στο σύστημα. Ένας καλύτερος τρόπος είναι να εισαχθεί στην διαδρομή του σήματος μία συσκευή ηλεκτρονικού delay. [4]

Στο CATT-Acoustic το delay μπορεί να προστεθεί στον κώδικα για κάθε ηχείο ξεχωριστά και μετράται σε ms.

4.6 Ρύθμιση αντήχησης

Στην περίπτωση αιθουσών πολλαπλών χρήσεων, στη ρύθμιση της επιθυμητής ακουστικής ανά περίπτωση μπορεί να συνεισφέρει και το ηλεκτρακουστικό σύστημα.

Η ηλεκτροακουστική ενίσχυση του χρόνου αντήχησης μπορεί να επιτευχθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους. Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιεί την αναγέννηση της αντήχησης μέσα στο χώρο μέσω του ελεγχόμενου ακουστικού feedback. Με τη δεύτερη μέθοδο, η τεχνητή αντήχηση δημιουργείται μέσω εξωτερικού αντηχητή που εφαρμόζεται στο ηχητικό σήμα, η αντήχηση του οποίου πρόκειται να αυξηθεί. [4]

4.7 Θεωρητικός υπολογισμός ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης

- Επιθυμητή Στάθμη Πίεσης:

$$L_{pd} = L_N + 25dB \quad (19)$$

Όπου L_N είναι η στάθμη θορύβου.

- Η ισοδύναμη απόσταση για επιθυμητή στάθμη L_{pd} σε κάποια ενδιάμεση θέση του ακροατηρίου υπολογίζεται ως:

Ενεργός Ακουστική Απόσταση (EAD):

$$EAD = D_{ref} 10^{\frac{L_{pt} - L_{pd}}{20}} \quad (20)$$

Όπου L_{pt} η στάθμη που παράγει ένας ομιλητής σε μία απόσταση αναφοράς D_{ref} .

Η απόσταση αναφοράς D_{ref} συνήθως, αλλά και στο CATT-Acoustic, είναι 1m.

Η ισοδύναμη ακουστική απόσταση έχει την έννοια ότι για αποστάσεις μεγαλύτερες της EAD θα απαιτηθεί ενίσχυση της ομιλίας από ένα ηλεκτροακουστικό σύστημα για να είναι δυνατή η κατανόηση του λόγου. [5], [9]

• Για να υπολογιστεί πόση ηλεκτρική ισχύς απαιτείται για να επιτύχουμε την επιθυμητή στάθμη πίεσης στον πιο απομακρυσμένο ακροατή πρέπει να ληφθούν υπόψη:

- Η στάθμη του θορύβου
- Η στάθμη του σήματος
- Η ευαισθησία ενός ηχείου L_{sens} (σε $\text{dB}_{\text{SPL}} / \text{W} / \text{m}$)
- Η ευαισθησία του μικροφώνου (σε mV / Pa)
- Η ισχύς εξόδου του ενισχυτή
- Η ενίσχυση του ενισχυτή

Τα παραπάνω μεγέθη μιας ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης ορίζονται με βάση την ενεργειακή περιγραφή του σήματος, δηλαδή με βάση ενεργές (rms) τιμές του πλάτους και όχι με βάση τις μέγιστες (peak) τιμές του πλάτους.

Οι διάφορες κυματομορφές δεν έχουν την ίδια κατανομή τιμών πλάτους, με αποτέλεσμα κάποιες, όπως αυτές των σημάτων ήχου να απαιτούν μεγαλύτερο δυναμικό εύρος. Μέτρο του δυναμικού εύρους είναι ο *παράγοντας κορυφής (crest factor)*:

$$c = 20 \log \frac{|x_{reak}|}{x_{rms}} \text{ (dB)} \quad (21)$$

Για αυτό το λόγο πρέπει να ληφθεί υπόψη στη σχεδίαση επαρκές *περιθώριο κέρδους (H)* για να μην υπάρξει παραμόρφωση ψαλίδισης. Το απαιτούμενο περιθώριο κέρδους εξαρτάται από το είδος του σήματος και από το αν είναι επεξεργασμένο ή όχι.

Τυπικές τιμές ανεπεξέργαστου σήματος:

Φωνή 10-12 dB

Μουσική 18-20 dB

Όσο μεγαλύτερος είναι ο crest factor, τόσο μεγαλύτερο περιθώριο κέρδους απαιτείται.

Η ελάχιστη απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς **ERP** για έναν κλειστό χώρο είναι:

$$ERP_{room} = 10 \frac{L_{pd} + H - L_{sens} + \Delta D_2 - \Delta(1m)}{10} \quad (22)$$

Όπου: $\Delta_x = -10 \log \left(\frac{Q}{4\pi x^2} + \frac{4}{R} \right)$

Οπότε ο ενισχυτής πρέπει να είναι περισσότερα Watt από την ERP.

• Σύμφωνα με την εξίσωση Hopkins-Stryker (8) η μεταβολή πίεσης λόγω μεταβολής της απόστασης από την πηγή είναι:

$$\Delta L = L_{p@r_2} - L_{p@r_1} = 10 \log_{10} \left(\frac{Q}{4\pi r_2^2} + \frac{4}{R} \right) - 10 \log_{10} \left(\frac{Q}{4\pi r_1^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (23)$$

• Το απαιτούμενο ακουστικό κέρδος (*NAG*) υπολογίζεται από την σχέση:

$$NAG = 10 \log_{10} \left(\frac{Q}{4\pi EAD^2} + \frac{4}{R} \right) - 10 \log_{10} \left(\frac{Q}{4\pi D_0^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (24)$$

Όπου το *R* προκύπτει από τη σχέση (9) και η *κατευθυντικότητα του ηχείου Q* από την σχέση:

$$Q = \frac{180^\circ}{\sin^{-1} \left(\sin \left(\frac{\alpha}{2} \right) \cdot \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) \right)} \quad (25)$$

σε dB:

$$DI = 10 \log \left[\frac{180^\circ}{\sin^{-1} \left(\sin \left(\frac{\alpha}{2} \right) \cdot \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) \right)} \right] \quad (26)$$

α = ονομαστική γωνία οριζόντιας κάλυψης

β = ονομαστική γωνία κατακόρυφης κάλυψης

• Το μέγιστο θεωρητικό κέρδος λίγο πριν συμβεί ανάδραση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$PAG = 10 \log_{10} \left(\frac{Q}{4\pi D_s^2} + \frac{4}{R} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{Q}{4\pi D_2^2} + \frac{4}{R} \right) - 10 \log_{10} \left(\frac{Q}{4\pi D_0^2} + \frac{4}{R} \right) - 10 \log_{10} \left(\frac{Q}{4\pi D_1^2} + \frac{4}{R} \right) + L_{Lspol} + L_{Mpol} - 10 \log_{10} N_M - FSM \quad (27)$$

Η ακτινοβολία του ηχείου προς την κατεύθυνση του μικροφώνου είναι μειωμένη κατά μια στάθμη L_{LSpol} , η οποία εξαρτάται από την πολική του απόκριση και αυξάνει το περιθώριο κέρδους πριν συμβεί ταλάντωση (και συνεπώς το PAG) κατά ίσο ποσό.

Η ευαισθησία του μικροφώνου προς την κατεύθυνση του ηχείου είναι μειωμένη κατά μια στάθμη L_{Mpol} , που επιδρά αντίστοιχα στο PAG.

Αν οι πολικές αποκρίσεις των μικροφώνων/ ηχείων δεν είναι γνωστές ή αν για παράδειγμα τα μικρόφωνα μπορούν να περιστρέφονται (εύκαμπτοι βραχίονες στήριξης) τότε συνηθίζεται να θεωρείται $L_{LSpol} + L_{Mpol} \leq 6 \text{ dB}$

Αντίθετα, αν υπάρχουν περισσότερα από ένα μικρόφωνα (των οποίων γίνεται μίξη), αυξάνει το ποσό ανάδρασης, κατά μία στάθμη $10 \log_{10} N_M$, όπου N_M είναι ο αριθμός των μικροφώνων και συνεπώς μειώνει το PAG κατά ίσο ποσό.

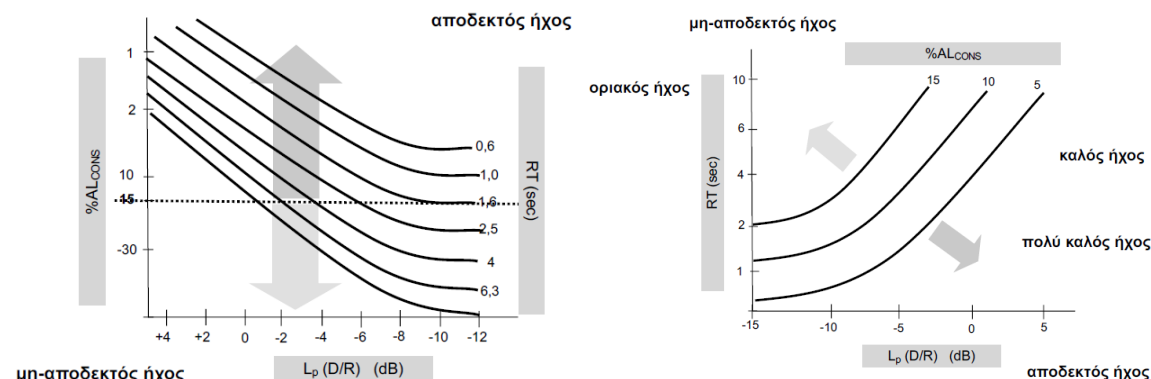
Επίσης, συνήθως εισάγεται ένα επιπλέον περιθώριο ευστάθειας (*feedback stability margin*) με την περεταίρω μείωση του PAG κατά μία στάθμη $FSM \geq 6 \text{ dB}$.

Το σύστημα είναι ευσταθές όταν ισχύει: **PAG > NAG**

[6], [10]

4.7.1 Επίδραση της αντήχησης

Όσες περισσότερες πηγές υπάρχουν αυξάνεται η κάλυψη, αλλά αυξάνουν και την αντήχηση, δυσκολεύοντας έτσι την κατανόηση του σήματος.



Εικόνα 31: Επίδραση της αντήχησης.

- Υπολογισμός απευθείας σήματος προς ανακλώμενο:

$$\frac{D}{R} = 10 \log \left(\frac{QR}{16\pi r^2} \right) \quad (28)$$

- Η ελάχιστη κατευθυντικότητα που είναι απαραίτητη ορίζεται από τη σχέση:

$$Q_{min} = \frac{200 \cdot D_{max}^2 \cdot RT^2 (n+1)}{15 \cdot V} \quad (29)$$

• Η μέγιστη απόσταση πηγής/ δέκτη σε m που είναι καταληπτή η ομιλία ορίζεται από τη σχέση:

$$r_{max} = \sqrt{\frac{15 \cdot VQ}{200 \cdot RT^2 (n+1)}} \quad (30)$$

Όπου n ο αριθμός των επιπλέον ηχείων. [9]

4.7.2 Απαιτήσεις ηχητικής κάλυψης

Για σωστό σχεδιασμό του ηλεκτροακουστικού συστήματος είναι απαραίτητο να ελεγχθούν τα ακόλουθα βήματα:

- Πλήρης ακουστικός χαρακτηρισμός του χώρου και έλεγχος αν χρειάζεται ενίσχυση από ηλεκτροακουστικό σύστημα.
- Θεωρητική προσέγγιση για βέλτιστη κάλυψη χώρου.
- Κατευθυντικότητα ηχείων για μέγιστη κάλυψη του κοινού.
- Χρήση FILL ηχείων, αν χρειάζεται, για κάλυψη σε άλλες θέσεις.
- Το μέγιστο θεωρητικό κέρδος να είναι μεγαλύτερο από το απαιτούμενο ακουστικό κέρδος **PAG > NAG**.
- Αφού το σύστημα είναι ευσταθές, να παρέχει και αρκετή στάθμη L_{pd} .

Ένα επιτυχημένο ηλεκτροακουστικό σύστημα πρέπει:

- 1) Να επιτυγχάνει επαρκή στάθμη για άνετη κατανόηση στη θέση και του πιο απομακρυσμένου ακροατή και ο ήχος να φτάνει χωρίς παραμόρφωση.
- 2) Να μην παρουσιάζει σε καμία περίπτωση ακουστική ανάδραση.

Οπότε πρέπει να σχεδιαστούν σωστά:

- 1) Τα κέρδη, ακουστικά και ηλεκτρικά.
- 2) Οι χρονικές καθυστερήσεις σε περίπτωση πολλαπλών ηχείων σε διαφορετικές αποστάσεις από τον ακροατή.

Στο αμφιθέατρο που πραγματοποιήθηκε η μελέτη δεν θα χρειαστεί να προστεθούν ηχεία σε διαφορετικές θέσεις με προσθήκη καθυστέρησης, καθώς ο χώρος δεν απαιτεί κάτι τέτοιο. Θα πρέπει όμως να ληφθούν υπόψη τα παρακάτω:

- Μεταξύ πρώτης και τελευταίας γραμμής του κοινού, η διαφορά στάθμης του σήματος δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 6 dB.

• Όταν η κατανόηση μουσικής και ομιλίας είναι εξίσου σημαντική, ιδανικό θεωρείται ένα στερεοφωνικό σύστημα με προσθήκη κεντρικού ηχείου.

• Η κλίση του μεγαφώνου προς το κοινό εστιάζει την ενέργειά του στο κοινό και βοηθάει στο να αποφευχθούν ανεπιθύμητες ανακλάσεις. Η συγκεκριμένη αίθουσα όμως διαθέτει κεκλιμένο επίπεδο, κάτι που πρέπει να συνυπολογιστεί στην κλίση των μεγαφώνων.

[9]

4.7.3 Θεωρητικά αποτελέσματα

Οπότε με βάση τα παραπάνω για την ηλεκτροακουστική εγκατάσταση στο αμφιθέατρο που πραγματοποιήθηκε η μελέτη, ισχύουν:

• Από τη σχέση (14): Η κρίσιμη απόσταση για ομιλία είναι $D_{speech} = 6.12 \text{ m}$ και για μουσική $D_{music} = 7.18 \text{ m}$

• Επιθυμητή Στάθμη Πίεσης, από τη σχέση (19): για $L_N = 35.8 \text{ dB}$, $L_{pd} = \mathbf{60.8 \text{ dB}}$.

Οι στάθμες ομιλίας στο πρόγραμμα αντιστοιχούν στις τιμές dB_A : 59.5 dB_A (φυσιολογική ομιλία), 66.5 dB_A (υψωμένη φωνή) και 73.6 dB_A (φωναχτή φωνή). [12]

• Ενεργός Ακουστική Απόσταση (EAD), από τη σχέση (20): για $L_{pt} = 65 \text{ dB}_A$ στο 1 m , $\mathbf{EAD} = \mathbf{1.62 \text{ m}}$

Η μέγιστη απόσταση από τη σκηνή που μπορεί να βρεθεί ακροατής είναι 19.4 m , οπότε είναι απαραίτητη η ηλεκτροακουστική εγκατάσταση.

• Από τη σχέση (29) υπολογίστηκε η ελάχιστη κατευθυντικότητα που είναι απαραίτητη: Για $D_{max} = 19.4 \text{ m}$, $V = 2168 \text{ m}^3$, για μέσο ελάχιστο $RT=0.9 \text{ sec}$ για ομιλία και $n=1$ για έναν ομιλητή και ένα κεντρικό ηχείο: $\mathbf{Q_{min} = 3.75}$

• Στο λογισμικό υπολογίστηκε $S \approx 1641 \text{ m}^2$

Από τη σχέση (13): $\mathbf{R = 503,6 \text{ m}^2}$

Οπότε απαιτούμενο ακουστικό κέρδος από τη σχέση (24): $\mathbf{NAG = 11.36 \text{ dB}}$

• Το μέγιστο θεωρητικό κέρδος υπολογίζεται από τη σχέση (27):

Για $D_0 = 19.4 \text{ m}$ (πιο απομακρυσμένος ακροατής από τον ομιλητή)

$D_s = 0.3 \text{ m}$ (απόσταση ομιλητή από το μικρόφωνο)

$D_1 = 4.4 \text{ m}$ (απόσταση μικροφώνου από το ηχείο)

$D_2 = 18.7 \text{ m}$ (απόσταση πιο απομακρυσμένου ακροατή από το ηχείο)

$\mathbf{PAG = 21.59 \text{ dB}}$

Άρα $\mathbf{PAG > NAG}$, οπότε το σύστημα είναι ευσταθές.

• Από τη σχέση (6) υπολογίστηκε η καταληπτότητα της ομιλίας για τον πιο απομακρυσμένο ακροατή:

$\%AL_{cons} = \mathbf{13.9\%}$

Η τιμή είναι αποδεκτή, οπότε σε όλο το ακροατήριο η καταληπτότητα της ομιλίας είναι σε αποδεκτά όρια.

Από τη σχέση (30), η μέγιστη απόσταση μεταξύ της πηγής και του δέκτη για να είναι καταληπτή η ομιλία είναι:

$$r_{max} = 19.4m$$

Η θεωρητική τιμή είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη απόσταση που μπορεί να βρεθεί ακροατής από το ηχείο και συμπίπτει με τη μέγιστη απόσταση που μπορεί να βρεθεί ακροατής από τον ομιλητή.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα από την *Εικόνα 26* φαίνεται πως ο ήχος είναι σε αποδεκτά επίπεδα.

Αν στο ηλεκτροακουστικό σύστημα αυξηθεί η κατευθυντικότητα, η μέγιστη απόσταση που γίνεται καταληπτή η ομιλία αυξάνεται.

- Για την ίδια αίθουσα, αλλά για μέσο μέγιστο $RT=1.4sec$ για μουσική και $n=3$ για μία πηγή σε ένα μικρόφωνο, ένα στερεοφωνικό σύστημα και ένα κεντρικό ηχείο, οι παραπάνω τιμές γίνονται:

$$Q_{min} = 8.89$$

$$R = 291.8m^2$$

$$NAG = 12.43dB$$

$$PAG = 21.97dB$$

Οπότε και στις 2 περιπτώσεις το σύστημα είναι ευσταθές.

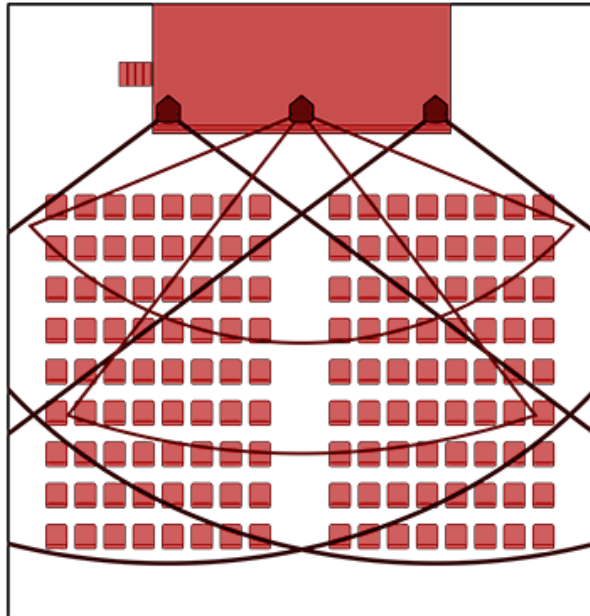
4.9 Ηλεκτροακουστική εγκατάσταση στο CATT-Acoustic

Για τον σχεδιασμό της ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό CATT-Acoustic και οι δοκιμές εφαρμόστηκαν στην προσομοίωση που σχεδιάστηκε για την ακουστική μελέτη που προηγήθηκε και μετά τις προτάσεις βελτίωσης της ακουστικής.

Οι πηγές ορίζονται ως φυσικές και ηλεκτροακουστικές. Φυσικές πηγές είναι για παράδειγμα ένας ομιλητής, ένας τραγουδιστής ή ένα μουσικό όργανο, όποια πηγή δηλαδή εκπέμπει φυσικά χωρίς ενίσχυση. Οι ηλεκτροακουστικές πηγές στο λογισμικό χωρίζονται σε πηγές που η είσοδός τους είναι σήμα από μικρόφωνο ($Lp1m_a$) ή line σήμα ($LvIn$). Για σήματα μικροφώνου υπάρχει η επιλογή να προστεθεί η ευαισθησία του μικροφώνου. Για κάθε πηγή ορίζεται η τοποθεσία της (POS), το που στοχεύει (AIMPOS/AIMANGLES), η ένταση που εκπέμπει (GAIN) και αν χρειάζεται μπορεί να οριστεί και η καθυστέρηση (DELAY).

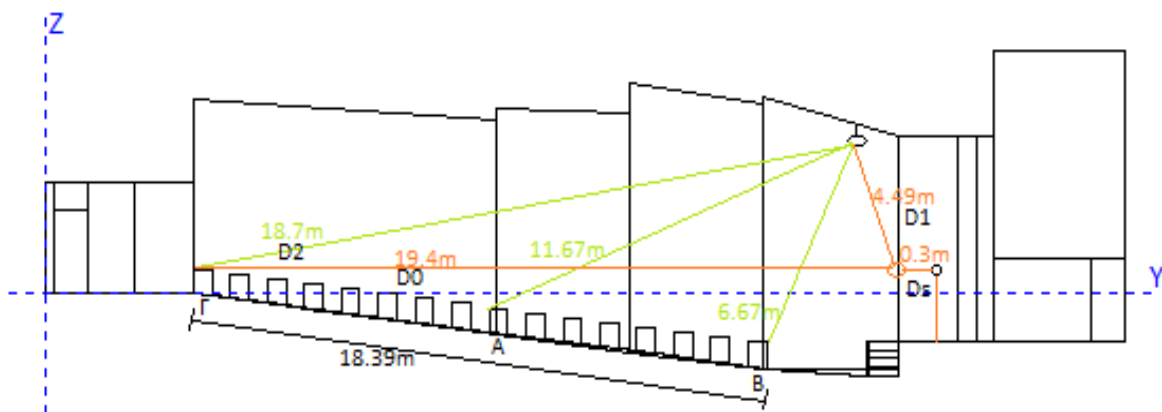
Για τον χώρο προβλέπεται ένα στερεοφωνικό σύστημα με προσθήκη από ένα ακόμα κεντρικό ηχείο τοποθετημένο ανάμεσα στα δύο ακριανά. Η διάταξη αυτή θεωρείται ιδανική σε περιπτώσεις χώρων που προορίζονται για πολλαπλές χρήσεις, καθώς μπορεί

να παρέχει περισσότερο έλεγχο της ηχητικής κάλυψης. Με το κεντρικό ηχείο μπορεί να ενισχυθεί ικανοποιητικά η ομιλία και με το στερεοφωνικό σύστημα μπορεί να προστεθεί η απαιτούμενη διαμοίραση του ήχου δεξιά και αριστερά (panning) για καλύτερο ηχητικό αποτέλεσμα.



LCR διάταξη ηχητικού συστήματος

Εικόνα 32: Ηχητικό σύστημα ήχου με διάταξη ηχείων Left-Center-Right (LCR). [14]



Εικόνα 33: Σημεία υπολογισμού τελικής στάθμης.

Μετά από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο λογισμικό, για την αίθουσα επιλέχθηκαν τα ηχεία V2-1264 12-Inch, two-way, full-range ($60^\circ \times 40^\circ$). [13]

Με βάση τα χαρακτηριστικά του ηχείου, ο θεωρητικός υπολογισμός πλησιάζει αρκετά τα πραγματικά αποτελέσματα.

Η κατευθυντικότητα των ηχείων είναι $Q= 11.76$. Είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη απαραίτητη κατευθυντικότητα που βρέθηκε θεωρητικά, οπότε καλύπτονται οι απαιτήσεις της αίθουσας.

Η εξασθένηση λόγω γωνίας (θ_k) προκύπτει από την κατακόρυφη πολική απόκριση του ηχείου.

Το πολικό διάγραμμα και η ευαισθησία του ηχείου περιέχονται στο data sheet που παρέχεται από τον κατασκευαστή. [13]

Ευαισθησία ηχείου: $L_{sens} = 98dB$

Τελική Στάθμη = $L_{sens} - 20\log r - (\theta_k)$

Από τη γεωμετρία της αίθουσας υπολογίζονται τα παρακάτω μεγέθη:

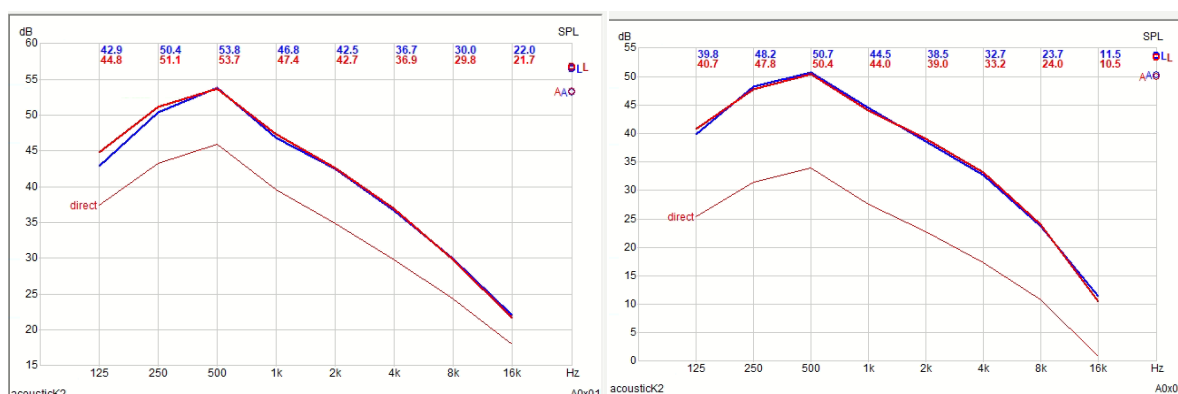
Πίνακας 18: Υπολογισμός Τελικής Στάθμης για Ισχύ 1W.

Σημείο	Οριζόντια απόσταση x	Απόσταση από ηχεία r	Γωνία θ	Εξασθένηση λόγω γωνίας (θ_k)	Εξασθένηση λόγω απόστασης	Τελική Στάθμη
A	10.2 m	11.67 m	0°	0 dB	-21.34 dB	76.66 dB
B	2.7 m	6.67 m	40°	-6 dB	-16.48 dB	75.52 dB
Γ	19.1 m	18.7 m	14°	-0.5 dB	-25.45 dB	72.05 dB

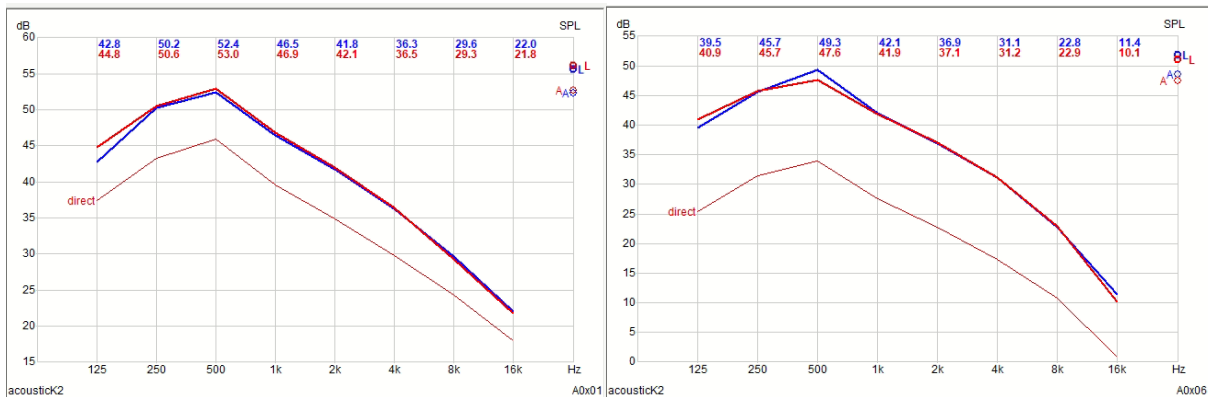
Η διακύμανση στάθμης επί του άξονα βρίσκεται στα ± 2.3 dB, οπότε η κάλυψη της αίθουσας θεωρείται ικανοποιητική.

Κατανομή στάθμης (dB SPL) στο χώρο:

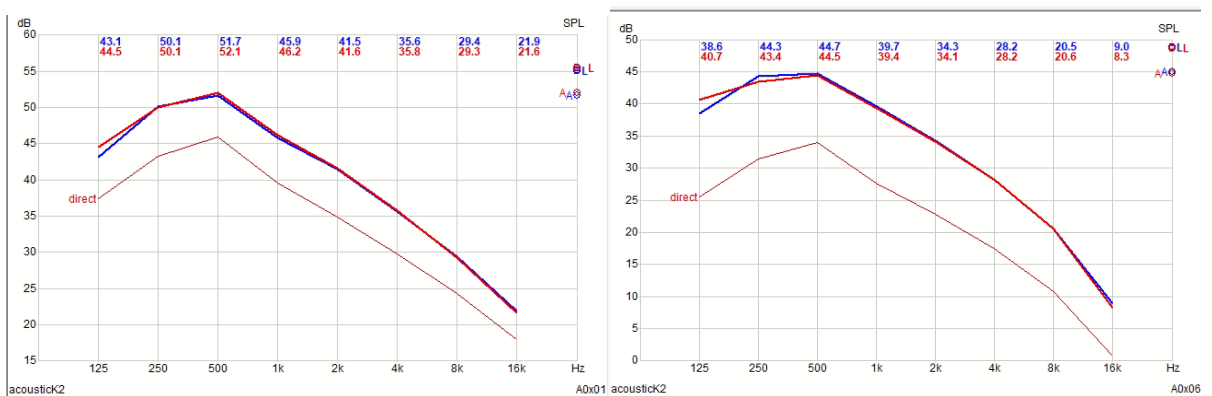
Τα παρακάτω αποτελέσματα αφορούν τις θέσεις 1 και 6 που βρίσκονται στην πρώτη και στην τελευταία σειρά του ακροατηρίου αντίστοιχα.



Εικόνα 34: Στάθμη στη θέση 1 και στη θέση 6 με τα αρχικά υλικά του χώρου.

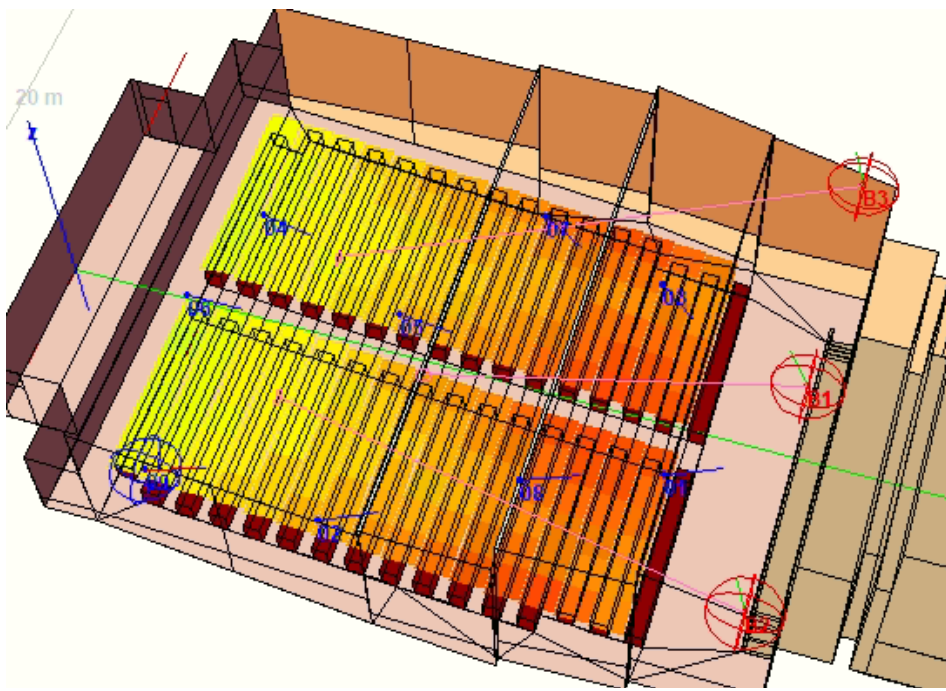


Εικόνα 35: Στάθμη στη θέση 1 και στη θέση 6 με προσθήκη απορρόφησης για μουσική.



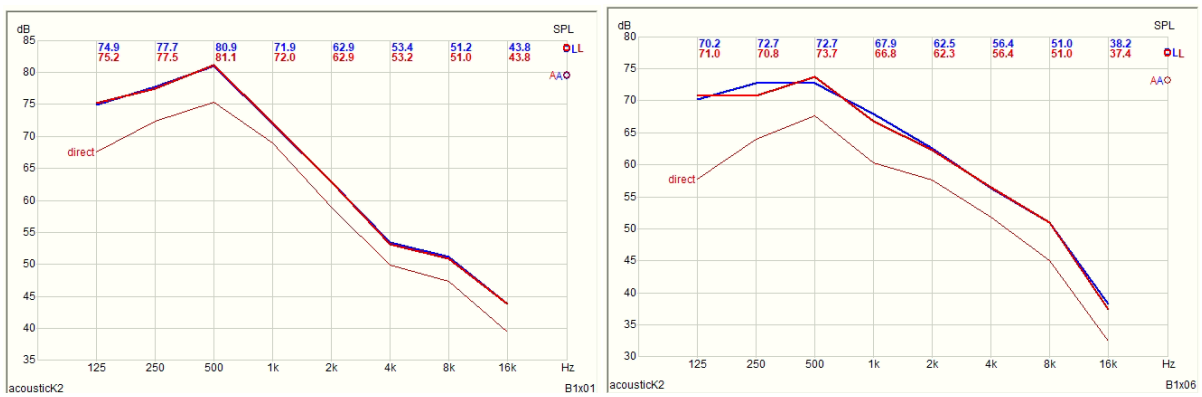
Εικόνα 36: Στάθμη στη θέση 1 και στη θέση 6 με προσθήκη μέγιστης απορρόφησης.

Η στάθμη του σήματος στις θέσεις του κοινού φαίνεται πως δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα με την προσθήκη απορρόφησης. Σε όλες τις θέσεις όμως είναι αρκετά χαμηλή, είτε μετά την προσθήκη της απορρόφησης, είτε πριν. Οπότε, είναι απαραίτητη η ηλεκτροακουστική ενίσχυση.

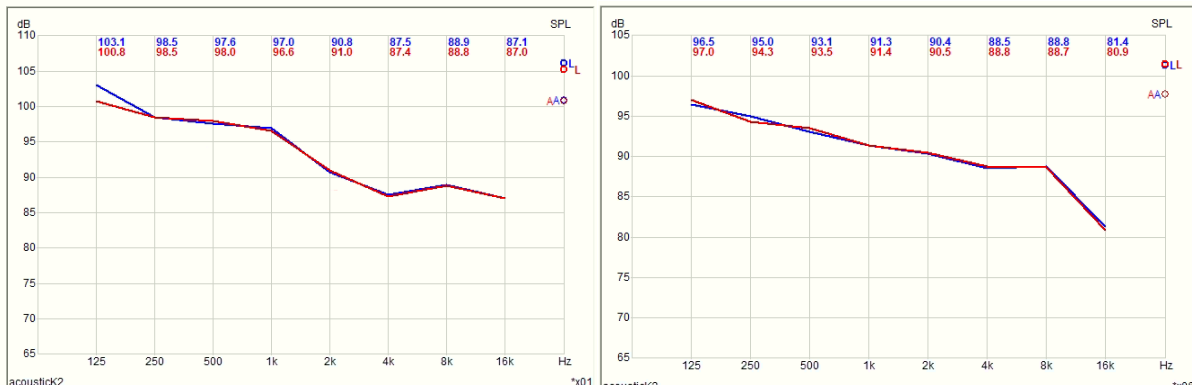


Εικόνα 37: Στάθμη στο ακροατήριο και θέσεις ηχείων.

Τα ηχεία στην αίθουσα τοποθετήθηκαν στις θέσεις που φαίνονται στην παραπάνω εικόνα. Οι θέσεις καθορίστηκαν μετά από δοκιμές για να έχουν την καλύτερη απόδοση. Σε δοκιμή τοποθέτησης του στερεοφωνικού συστήματος πιο χαμηλά, οι μπροστινές σειρές λάμβαναν περισσότερη ακτινοβολία, με αποτέλεσμα η διαφορά στάθμης με τις πίσω σειρές να είναι μεγάλη. Όπως φαίνεται και στην εικόνα, στις μπροστινές θέσεις η στάθμη εξακολουθεί είναι πιο υψηλή και πιο πίσω να μειώνεται, αυτό όμως είναι λογικό λόγω της απόστασης και η διαφορά στάθμης είναι σε αποδεκτά επίπεδα.



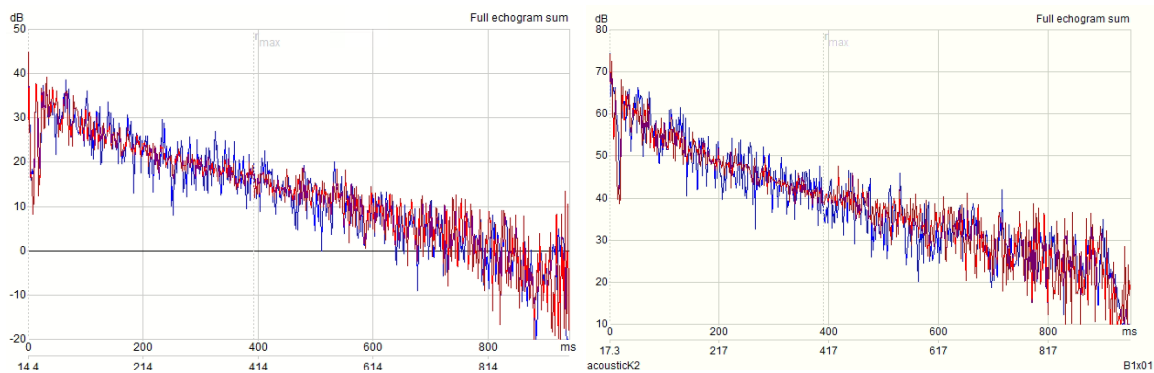
Εικόνα 38: Στάθμη στη θέση 1 και στη θέση 6 με προσθήκη ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης και μέγιστης απορρόφησης, για ομιλία.



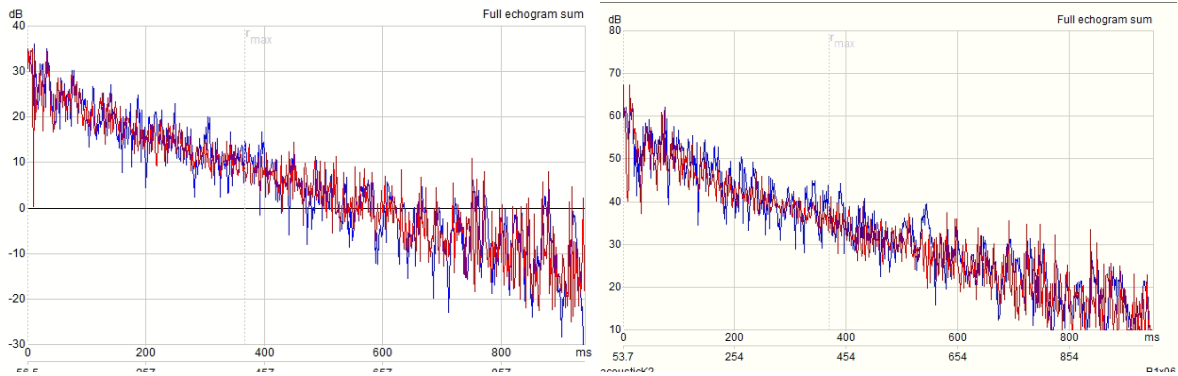
Εικόνα 39: Στάθμη στη θέση 1 και στη θέση 6 με προσθήκη ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης και απορρόφησης για μουσική.

Η προσθήκη της ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης αύξησε εμφανώς την στάθμη του ήχου σε όλο το ακροατήριο. Η στάθμη έφτασε τα επιθυμητά επίπεδα για ομιλία και μουσική αντίστοιχα. Η ένταση μπορεί να ρυθμιστεί ανάλογα με την περίπτωση, όπως στην πραγματική ηλεκτροακουστική εγκατάσταση, και στην προσομοίωση του λογισμικού CATT-Acoustic. Η μέγιστη διαφορά στάθμης μεταξύ των πρώτων και τελευταίων θέσεων δεν ξεπερνάει τα 5.7dB, όπως φαίνεται και στα παραπάνω διαγράμματα, οπότε η κάλυψη της αίθουσας είναι επαρκής.

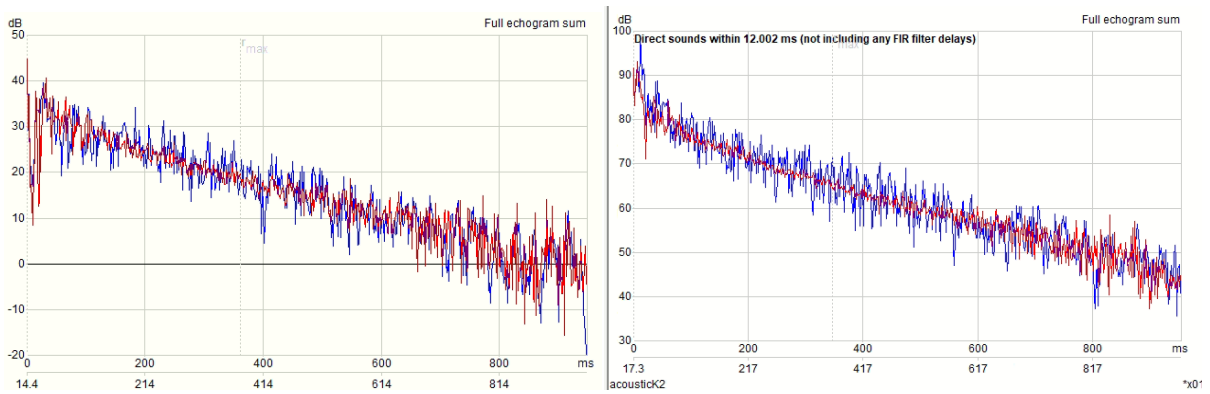
Ηχογράμματα ανά θέση στο ακροατήριο πριν και μετά την ηλεκτροακουστική εγκατάσταση:



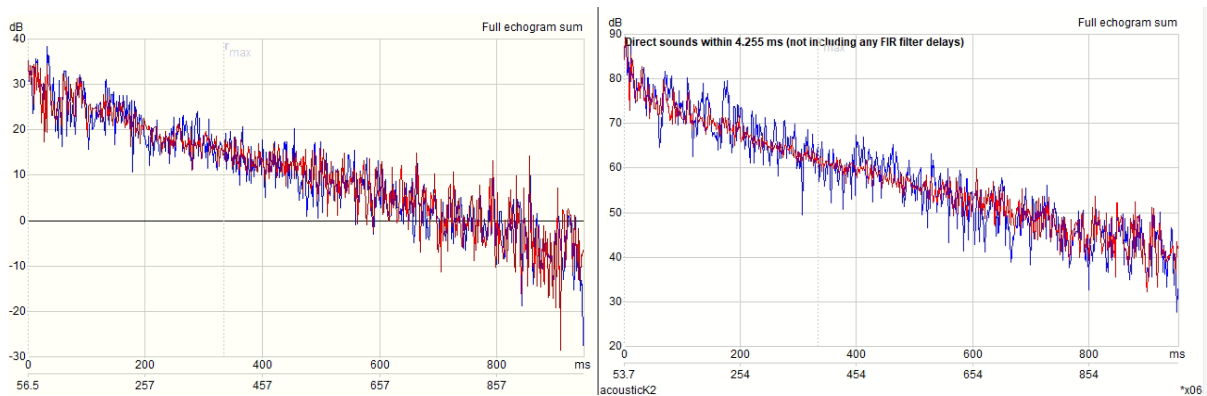
Εικόνα 40: Ηχογράμμα στη θέση 1 με προσθήκη απορρόφησης για ομιλία, πριν και μετά την ηλεκτροακουστική εγκατάσταση.



Εικόνα 41: Ηχόγραμμα στη θέση 6 με προσθήκη απορρόφησης για ομιλία, πριν και μετά την ηλεκτροακουστική εγκατάσταση.



Εικόνα 42: Ηχόγραμμα στη θέση 1 με προσθήκη απορρόφησης για μουσική, πριν και μετά την ηλεκτροακουστική εγκατάσταση.



Εικόνα 43: Ηχόγραμμα στη θέση 6 με προσθήκη απορρόφησης για μουσική, πριν και μετά την ηλεκτροακουστική εγκατάσταση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Συμπεράσματα – Προτάσεις

Με την ολοκλήρωση της ακουστικής και της ηλεκτροακουστικής μελέτης, από τα αποτελέσματα προκύπτει πως οι αλλαγές που προτείνονται βελτιώνουν σημαντικά την ακουστική του χώρου. Οι μετρήσεις με τα νέα υλικά πλησιάζουν πάρα πολύ τις βέλτιστες θεωρητικές τιμές που υπολογίστηκαν στην αρχή της μελέτης.

Η κατανομή του ήχου στο χώρο είναι ικανοποιητική και ακολουθεί τις βέλτιστες θεωρητικές τιμές σε όλο το ακροατήριο.

Αν ο όγκος του χώρου ήταν διαφορετικός, η προσέγγιση της μελέτης θα ήταν διαφορετική. Διαφορετική θα ήταν επίσης σε περίπτωση που η μελέτη γινόταν σε κάποιον ανοικτό χώρο.

Τα υλικά που δοκιμάστηκαν, παρόλο που δεν αποδείχτηκαν όλα κατάλληλα για τον χώρο αυτό, μπορεί να είναι πολύ χρήσιμα σε άλλους χώρους με διαφορετική δομή και διαφορετικές ανάγκες. Επίσης, κάποια από αυτά θα μπορούσαν να είναι χρήσιμα και για τον συγκεκριμένο χώρο, αν δεν προοριζόταν για πολλαπλές χρήσεις.

Στην μελέτη αυτή παρουσιάζεται ένας τρόπος πραγματοποίησης μίας ακουστικής μελέτης. Εναλλακτικά, θα μπορούσαν οι μετρήσεις στον χώρο να πραγματοποιηθούν με τη χρήση του κατάλληλου εξοπλισμού μέσα στην αίθουσα, είτε η προσομοίωση να γίνει σε κάποιο άλλο πρόγραμμα. Η μελέτη μπορεί να γίνει συνδυαστικά με μετρήσεις on site και με προσομοίωση.

Η μεγάλη απόκλιση που παρουσιάστηκε στην συγκεκριμένη αίθουσα ανάμεσα στον γενικό χρόνο αντήχησης και στον χρόνο αντήχησης στις θέσεις του κοινού, αποδεικνύει ότι πρέπει να δίνεται προσοχή σε όλα τα δεδομένα που μπορούν να αντληθούν από το πρόγραμμα και να αξιολογούνται ανάλογα. Ο γενικός χρόνος αντήχησης δίνει μία πολύ γενικευμένη άποψη για τον χώρο, ενώ μέσω της κρουστικής απόκρισης του χώρου τα αποτελέσματα έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια.

Η αίθουσα, στην οποία πραγματοποιήθηκε η μελέτη, εξ αρχής είχε έναν κατανεμημένο χρόνο αντήχησης χωρίς μεγάλες αποκλίσεις ανά συχνότητα. Αν όμως σε κάποια άλλη αίθουσα προκύψει πρόβλημα σε συγκεκριμένες συχνότητες, υπάρχουν υλικά που η απορρόφησή τους είναι στοχευμένη, οπότε ανάλογα με το πρόβλημα προσαρμόζεται και η λύση.

Σε περιπτώσεις αιθουσών που διαθέτουν, εκτός από την κύρια πλατεία για το κοινό, επιπλέον εξώστη ή/και θεωρεία είναι απαραίτητη η χρήση delay στα επιπλέον ηχεία που θα προστεθούν για να καλύψουν τις επιπλέον θέσεις, κάτι που στην παρούσα μελέτη δεν χρειάστηκε.

Η κατευθυντικότητα και η θέση των ηχείων στο χώρο είναι ιδιαίτερα σημαντικές. Η κατευθυντικότητα βοηθά στο να μην υπάρξουν καθυστερήσεις ανάμεσα στις πηγές. Η θέση παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμοίραση του ήχου στο κοινό.

Τα αποτελέσματα της μελέτης μπορούν να εφαρμοστούν ή να προσαρμοστούν και για χρήση σε άλλες αίθουσες με παρόμοια αρχιτεκτονική δομή. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάθε μεγάλο κλειστό χώρο που χρειάζεται ακουστική και ηλεκτροακουστική μελέτη.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο κώδικας για τη μοντελοποίηση της αρχιτεκτονικής του αμφιθεάτρου στο λογισμικό CATT-Acoustic.

Τα αρχεία τύπου CATT Modeling περιέχουν τον κώδικα της μοντελοποίησης της αρχιτεκτονικής (MASTER), τις θέσεις των πηγών (SRC) και τις θέσεις των ακροατών (REC).

1) Master αρχείο με την αρχική μοντελοποίηση του χώρου:

```
;MASTER.GEO
```

```
;PROJECT=acousticK2
```

```
LOCAL h = 2.77 ;ypos esoxi
```

```
LOCAL w = 10.6 ;esoxi width
```

```
LOCAL d = 2.4 ;esoxi depth
```

```
LOCAL wf = 15.4 ;width
```

```
LOCAL df = 4 ;depth
```

```
LOCAL ds =23.1 ;skini
```

```
LOCAL ws = 10.7 ;widthskini
```

```
;floor
```

```
ABS marbletiles = <1 1 1 1 2 2 > {255 255 204}
```

```
ABS Parquet = <4 4 7 6 6 7> {196 164 132}
```

```
ABS Carpet = <10 15 25 30 30 30> {235 200 178}
```

```
;seats
```

```
ABS Audseat = <35 45 57 61 59 55> L <30 40 50 60 70 70> {139 0 0}
```

```
;door
```

```
ABS Wooddoor = <30 25 15 10 10 7> {110 38 14}
```

```
;ceiling
```

```
ABS plastbceil = <20 15 10 8 4 2> {211 211 211}
```

```
;walls
```

```
ABS paintedwall = <1 1 1 1 2 2 2> {255 204 153}
```

```
ABS Plywoodpanels = <42 21 10 8 6 6 > {205 133 63}
```

```
ABS woodpanel2 = <58 28 8 4 5 1>
```

ABS woodpanel3 = <40 35 20 15 5 5>

ABS curtain2 = <14 35 55 72 70 60>

ABS curtain4 = <5 25 40 50 60 50>

ABS panelw2 = <8 57 71 40 20 18>

ABS panelw1 = <21 44 65 64 54 47>

ABS panelw3 = <34 95 98 82 87 86>

CORNERS

;floor

4 -w/2 0 0

3 -w/2 d 0

2 w/2 d 0

1 w/2 0 0

1001 w/2 0.25 0

2001 w/2 1.15 0

3001 w/2 1.15 2.05

4001 w/2 0.25 2.05

8 -wf/2 d 0

7 -wf/2 df 0

6 wf/2 df 0

5 wf/2 d 0

1004 -w/2 0.25 0

2004 -w/2 1.15 0

3004 -w/2 1.15 2.05

4004 -w/2 0.25 2.05

;seats

128 0.65 df 0.6

129 0.65 df+0.5 0.6

130 6.15 df 0.6

131 6.15 df+0.5 0.6

132 0.65 df+1 0.48

133 0.65 df+1.5 0.48

134 0.65 df+2 0.36

135 0.65 df+2.5 0.36

136 0.65 df+3 0.24
137 0.65 df+3.5 0.24
138 0.65 df+4 0.12
139 0.65 df+4.5 0.12
140 0.65 df+5 0
141 0.65 df+5.5 0
142 0.65 df+6 -0.12
143 0.65 df+6.5 -0.12
144 0.65 df+7 -0.24
145 0.65 df+7.5 -0.24
146 0.65 df+8 -0.36
147 0.65 df+8.5 -0.36
148 0.65 df+9 -0.48
149 0.65 df+9.5 -0.48
150 0.65 df+10 -0.6
151 0.65 df+10.5 -0.6
152 0.65 df+11 -0.72
153 0.65 df+11.5 -0.72
154 0.65 df+12 -0.84
155 0.65 df+12.5 -0.84
156 0.65 df+13 -0.96
157 0.65 df+13.5 -0.96
158 0.65 df+14 -1.08
159 0.65 df+14.5 -1.08
160 0.65 df+15 -1.2
161 0.65 df+15.5 -1.2

162 6.7 df+1 0.48
163 6.7 df+1.5 0.48
164 6.7 df+2 0.36
165 6.7 df+2.5 0.36
166 6.7 df+3 0.24
167 6.7 df+3.5 0.24
168 6.7 df+4 0.12
169 6.7 df+4.5 0.12
170 6.7 df+5 0

171 6.7 df+5.5 0
172 6.7 df+6 -0.12
173 6.7 df+6.5 -0.12
174 6.7 df+7 -0.24
175 6.7 df+7.5 -0.24
176 6.7 df+8 -0.36
177 6.7 df+8.5 -0.36
178 6.7 df+9 -0.48
179 6.7 df+9.5 -0.48
180 6.7 df+10 -0.6
181 6.7 df+10.5 -0.6
182 6.7 df+11 -0.72
183 6.7 df+11.5 -0.72
184 6.7 df+12 -0.84
185 6.7 df+12.5 -0.84
186 6.15 df+13 -0.96
187 6.15 df+13.5 -0.96
188 6.15 df+14 -1.08
189 6.15 df+14.5 -1.08
190 6.15 df+15 -1.2
191 6.15 df+15.5 -1.2

192 -0.65 df 0.6
193 -0.65 df+0.5 0.6
224 -6.15 df 0.6
225 -6.15 df+0.5 0.6
194 -0.65 df+1 0.48
195 -0.65 df+1.5 0.48
196 -0.65 df+2 0.36
197 -0.65 df+2.5 0.36
198 -0.65 df+3 0.24
199 -0.65 df+3.5 0.24
200 -0.65 df+4 0.12
201 -0.65 df+4.5 0.12
202 -0.65 df+5 0
203 -0.65 df+5.5 0

204 -0.65 df+6 -0.12
205 -0.65 df+6.5 -0.12
206 -0.65 df+7 -0.24
207 -0.65 df+7.5 -0.24
208 -0.65 df+8 -0.36
209 -0.65 df+8.5 -0.36
210 -0.65 df+9 -0.48
211 -0.65 df+9.5 -0.48
212 -0.65 df+10 -0.6
213 -0.65 df+10.5 -0.6
214 -0.65 df+11 -0.72
215 -0.65 df+11.5 -0.72
216 -0.65 df+12 -0.84
217 -0.65 df+12.5 -0.84
218 -0.65 df+13 -0.96
219 -0.65 df+13.5 -0.96
220 -0.65 df+14 -1.08
221 -0.65 df+14.5 -1.08
222 -0.65 df+15 -1.2
223 -0.65 df+15.5 -1.2

226 -6.7 df+1 0.48
227 -6.7 df+1.5 0.48
228 -6.7 df+2 0.36
229 -6.7 df+2.5 0.36
230 -6.7 df+3 0.24
231 -6.7 df+3.5 0.24
232 -6.7 df+4 0.12
233 -6.7 df+4.5 0.12
234 -6.7 df+5 0
235 -6.7 df+5.5 0
236 -6.7 df+6 -0.12
237 -6.7 df+6.5 -0.12
238 -6.7 df+7 -0.24
239 -6.7 df+7.5 -0.24
240 -6.7 df+8 -0.36

241 -6.7 df+8.5 -0.36
242 -6.7 df+9 -0.48
243 -6.7 df+9.5 -0.48
244 -6.7 df+10 -0.6
245 -6.7 df+10.5 -0.6
246 -6.7 df+11 -0.72
247 -6.7 df+11.5 -0.72
248 -6.7 df+12 -0.84
249 -6.7 df+12.5 -0.84
250 -6.15 df+13 -0.96
251 -6.15 df+13.5 -0.96
252 -6.15 df+14 -1.08
253 -6.15 df+14.5 -1.08
254 -6.15 df+15 -1.2
255 -6.15 df+15.5 -1.2

;seatmirrors

1128 0.65 df 0
1129 0.65 df+0.5 -0.06
1130 6.15 df 0
1131 6.15 df+0.5 -0.06
1132 0.65 df+1 -0.12
1133 0.65 df+1.5 -0.18
1134 0.65 df+2 -0.24
1135 0.65 df+2.5 -0.3
1136 0.65 df+3 -0.36
1137 0.65 df+3.5 -0.42
1138 0.65 df+4 -0.48
1139 0.65 df+4.5 -0.54
1140 0.65 df+5 -0.6
1141 0.65 df+5.5 -0.66
1142 0.65 df+6 -0.72
1143 0.65 df+6.5 -0.78
1144 0.65 df+7 -0.84
1145 0.65 df+7.5 -0.9
1146 0.65 df+8 -0.96

1147 0.65 df+8.5 -1.02
1148 0.65 df+9 -1.08
1149 0.65 df+9.5 -1.14
1150 0.65 df+10 -1.2
1151 0.65 df+10.5 -1.26
1152 0.65 df+11 -1.32
1153 0.65 df+11.5 -1.38
1154 0.65 df+12 -1.44
1155 0.65 df+12.5 -1.5
1156 0.65 df+13 -1.56
1157 0.65 df+13.5 -1.62
1158 0.65 df+14 -1.68
1159 0.65 df+14.5 -1.74
1160 0.65 df+15 -1.8
1161 0.65 df+15.5 -1.86

11162 6.15 df+1 -0.12
1162 6.7 df+1 -0.12
1163 6.7 df+1.5 -0.18
1164 6.7 df+2 -0.24
1165 6.7 df+2.5 -0.3
1166 6.7 df+3 -0.36
1167 6.7 df+3.5 -0.42
1168 6.7 df+4 -0.48
1169 6.7 df+4.5 -0,54
1170 6.7 df+5 -0.6
1171 6.7 df+5.5 -0.66
1172 6.7 df+6 -0.72
1173 6.7 df+6.5 -0.78
1174 6.7 df+7 -0.84
1175 6.7 df+7.5 -0.9
1176 6.7 df+8 -0.96
1177 6.7 df+8.5 -1.02
1178 6.7 df+9 -1.08
1179 6.7 df+9.5 -1.14
1180 6.7 df+10 -1.2

1181 6.7 df+10.5 -1.26
1182 6.7 df+11 -1.32
1183 6.7 df+11.5 -1.38
1184 6.7 df+12 -1.44
1185 6.7 df+12.5 -1.5
1186 6.15 df+13 -1.56
1187 6.15 df+13.5 -1.62
1188 6.15 df+14 -1.68
1189 6.15 df+14.5 -1.74
1190 6.15 df+15 -1.8
1191 6.15 df+15.5 -1.86
11185 6.15 df+12.5 -1.5

1192 -0.65 df 0
1193 -0.65 df+0.5 -0.06
1224 -6.15 df 0
1225 -6.15 df+0.5 -0.06
1194 -0.65 df+1 -0.12
1195 -0.65 df+1.5 -0.18
1196 -0.65 df+2 -0.24
1197 -0.65 df+2.5 -0.3
1198 -0.65 df+3 -0.36
1199 -0.65 df+3.5 -0.42
1200 -0.65 df+4 -0.48
1201 -0.65 df+4.5 -0.54
1202 -0.65 df+5 -0.6
1203 -0.65 df+5.5 -0.66
1204 -0.65 df+6 -0.72
1205 -0.65 df+6.5 -0.78
1206 -0.65 df+7 -0.84
1207 -0.65 df+7.5 -0.9
1208 -0.65 df+8 -0.96
1209 -0.65 df+8.5 -1.02
1210 -0.65 df+9 -1.08
1211 -0.65 df+9.5 -1.14
1212 -0.65 df+10 -1.2

1213 -0.65 df+10.5 -1.26
1214 -0.65 df+11 -1.32
1215 -0.65 df+11.5 -1.38
1216 -0.65 df+12 -1.44
1217 -0.65 df+12.5 -1.5
1218 -0.65 df+13 -1.56
1219 -0.65 df+13.5 -1.62
1220 -0.65 df+14 -1.68
1221 -0.65 df+14.5 -1.74
1222 -0.65 df+15 -1.8
1223 -0.65 df+15.5 -1.86

11226 -6.15 df+1 -0.12
1226 -6.7 df+1 -0.12
1227 -6.7 df+1.5 -0.18
1228 -6.7 df+2 -0.24
1229 -6.7 df+2.5 -0.3
1230 -6.7 df+3 -0.36
1231 -6.7 df+3.5 -0.42
1232 -6.7 df+4 -0.48
1233 -6.7 df+4.5 -0.54
1234 -6.7 df+5 -0.6
1235 -6.7 df+5.5 -0.66
1236 -6.7 df+6 -0.72
1237 -6.7 df+6.5 -0.78
1238 -6.7 df+7 -0.84
1239 -6.7 df+7.5 -0.9
1240 -6.7 df+8 -0.96
1241 -6.7 df+8.5 -1.02
1242 -6.7 df+9 -1.08
1243 -6.7 df+9.5 -1.14
1244 -6.7 df+10 -1.2
1245 -6.7 df+10.5 -1.26
1246 -6.7 df+11 -1.32
1247 -6.7 df+11.5 -1.38
1248 -6.7 df+12 -1.44

1249 -6.7 df+12.5 -1.5
1250 -6.15 df+13 -1.56
1251 -6.15 df+13.5 -1.62
1252 -6.15 df+14 -1.68
1253 -6.15 df+14.5 -1.74
1254 -6.15 df+15 -1.8
1255 -6.15 df+15.5 -1.86
11249 -6.15 df+12.5 -1.5

;ceiling

;ceiling1

14 -w/2 0 h

1014 -w/2 0.25 h

2014 -w/2 1.15 h

13 -w/2 d h

12 w/2 d h

11 w/2 0 h

1011 w/2 0.25 h

2011 w/2 1.15 h

;ceiling2

15 -wf/2 d h

16 -wf/2 df h

17 wf/2 df h

18 wf/2 d h

;ceiling3

19 -wf/2 df 4.8

20 -wf/2-0.3 df+8.2 4.3

21 wf/2+0.3 df+8.2 4.3

22 wf/2 df 4.8

;ceiling4

23 -wf/2-0.3 df+8.2 4.6

24 -wf/2-0.3 df+11.8 4.5

25 wf/2+0.3 df+11.8 4.5

26 wf/2+0.3 df+8.2 4.6

;ceiling5

27 $-wf/2-0.05$ $df+11.8$ 5.2
28 $-wf/2+0.25$ $df+15.4$ 4.7
29 $wf/2-0.25$ $df+15.4$ 4.7
30 $wf/2+0.05$ $df+11.8$ 5.2
;ceiling6
31 $-wf/2+0.5$ $df+15.4$ 4.9
32 $-wf/2+0.5$ $df+19.1$ 3.9
1032 -6.5 $df+19.1$ 3.9
33 $wf/2-0.5$ $df+19.1$ 3.9
34 $wf/2-0.5$ $df+15.4$ 4.9
;ceiling7
35 $-ws/2$ ds 3.9
36 $-ws/2$ $ds+1.6$ 3.9
37 $ws/2$ $ds+1.6$ 3.9
38 $ws/2$ ds 3.9
;ceiling8
39 $-ws/2+0.8$ $ds+1.6$ 3.9
40 $-ws/2+0.8$ $ds+2.1$ 3.9
41 $ws/2-0.9$ $ds+2.1$ 3.9
42 $ws/2-0.9$ $ds+1.6$ 3.9
;ceiling9
43 $-ws/2$ $ds+2.1$ 3.9
44 $-ws/2$ $ds+2.55$ 3.9
45 $ws/2$ $ds+2.55$ 3.9
46 $ws/2$ $ds+2.1$ 3.9
;filler
59 $-wf/2-0.05$ $df+11.8$ 4.5
60 $wf/2+0.05$ $df+11.8$ 4.5
61 $-wf/2+0.5$ $df+15.4$ 4.7
62 $wf/2-0.5$ $df+15.4$ 4.7
63 $-ws/2$ $ds+2.55$ 6
64 $ws/2$ $ds+2.55$ 6
65 $-ws/2$ $ds+6.1$ 6
66 $ws/2$ $ds+6.1$ 6

;wallsskini

47 $ws/2 ds+1.6 -1.2$
48 $ws/2 ds -1.2$
49 $-ws/2 ds -1.2$
50 $-ws/2 ds+1.6 -1.2$
51 $-ws/2+0.8 ds+1.6 -1.2$
52 $-ws/2+0.8 ds+2.1 -1.2$
53 $ws/2-0.9 ds+2.1 -1.2$
54 $ws/2-0.9 ds+1.6 -1.2$
55 $-ws/2 ds+2.1 -1.2$
56 $ws/2 ds+2.1 -1.2$
57 $ws/2 ds+6.1 -1.2$
58 $-ws/2 ds+6.1 -1.2$
1057 $ws/2 ds+6.1 0.9$
2057 $ws/2 ds+5.2 0.9$
3057 $ws/2 ds+5.2 -1.2$
1058 $-ws/2 ds+6.1 0.9$
2058 $-ws/2 ds+5.2 0.9$
3058 $-ws/2 ds+5.2 -1.2$

79 $ws/2 ds+2.55 -1.2$
1079 $ws/2 ds+2.55 0.9$
80 $-ws/2 ds+2.55 -1.2$
1080 $-ws/2 ds+2.55 0.9$

81 $ws/2-0.9 ds -1.2$
82 $-ws/2+0.9 ds -1.2$
83 $ws/2-0.9 ds-0.8 -1.2$
84 $-ws/2+0.9 ds-0.8 -1.2$

85 $ws/2 ds-0.8 -1.2$
86 $-ws/2 ds-0.8 -1.2$
87 $ws/2 ds-0.9 -1.2$
88 $-ws/2 ds-0.9 -1.2$
89 $ws/2 ds-0.9 -2.02$
90 $-ws/2 ds-0.9 -2.02$

;wallsceiling

67 wf/2+0.3 df+8.2 -1

68 -wf/2-0.3 df+8.2 -1

69 wf/2+0.3 df+11.8 -1.5

70 -wf/2-0.3 df+11.8 -1.5

71 wf/2-0.25 df+15.4 -1.86

72 -wf/2+0.25 df+15.4 -1.86

73 wf/2-0.5 df+19.1 -1.9

74 -wf/2+0.5 df+19.1 -1.9

75 wf/2+0.05 df+11.8 -1.5

76 -wf/2-0.05 df+11.8 -1.5

77 wf/2-0.5 df+15.4 -1.86

78 -wf/2+0.5 df+15.4 -1.86

91 ws/2 ds -2.02

1074 -6.5 df+19.1 -1.9

2074 -6.5 df+19.1 0.1

3074 -wf/2+0.5 df+19.1 0.1

;wallsc3

319 -wf/2 df 0.6

320 -wf/2-0.3 df+8.2 0.6

321 wf/2+0.3 df+8.2 0.6

322 wf/2 df 0.6

323 -wf/2-0.3 df+8.2 -0.36

324 -wf/2-0.3 df+11.8 -0.36

325 wf/2+0.3 df+11.8 -0.36

326 wf/2+0.3 df+8.2 -0.36

327 -wf/2-0.05 df+11.8 -0.36

328 -wf/2+0.25 df+15.4 -0.36

329 wf/2-0.25 df+15.4 -0.36

330 wf/2+0.05 df+11.8 -0.36

331 -wf/2+0.5 df+15.4 -0.36

332 -wf/2+0.5 df+19.1 -0.36

333 wf/2-0.5 df+19.1 -0.36

334 wf/2-0.5 df+15.4 -0.36

315 -wf/2 d 0.6
316 -wf/2 df 0.6
317 wf/2 df 0.6
318 wf/2 d 0.6

;stairs

92 -ws/2+0.9 ds -1.4
93 -ws/2+0.9 ds-0.8 -1.4
94 -ws/2+0.6 ds -1.4
95 -ws/2+0.6 ds-0.8 -1.4
96 -ws/2+0.6 ds -1.6
97 -ws/2+0.6 ds-0.8 -1.6
98 -ws/2+0.3 ds -1.6
99 -ws/2+0.3 ds-0.8 -1.6
100 -ws/2+0.3 ds -1.8
101 -ws/2+0.3 ds-0.8 -1.8
102 -ws/2 ds -1.8
103 -ws/2 ds-0.8 -1.8
104 -ws/2 ds -2.02
105 -ws/2 ds-0.8 -2.02
106 -ws/2+0.6 ds -1.2
107 -ws/2+0.3 ds -1.2
108 -ws/2+0.6 ds-0.8 -1.2
109 -ws/2+0.3 ds-0.8 -1.2

110 ws/2-0.9 ds -1.4
111 ws/2-0.9 ds-0.8 -1.4
112 ws/2-0.6 ds -1.4
113 ws/2-0.6 ds-0.8 -1.4
114 ws/2-0.6 ds -1.6
115 ws/2-0.6 ds-0.8 -1.6
116 ws/2-0.3 ds -1.6
117 ws/2-0.3 ds-0.8 -1.6
118 ws/2-0.3 ds -1.8
119 ws/2-0.3 ds-0.8 -1.8
120 ws/2 ds -1.8

121 ws/2 ds-0.8 -1.8
122 ws/2 ds -2.02
123 ws/2 ds-0.8 -2.02

124 ws/2-0.6 ds -1.2
125 ws/2-0.3 ds -1.2
126 ws/2-0.6 ds-0.8 -1.2
127 ws/2-0.3 ds-0.8 -1.2

419 -wf/2-0.15 df+4.1 4.55
421 wf/2+0.15 df+4.1 4.55
4319 -wf/2-0.15 df+4.1 0.6
4321 wf/2+0.15 df+4.1 0.6
407 -wf/2-0.15 df+4.1 -0.5
406 wf/2+0.15 df+4.1 -0.5

PLANES

[1 floor / 1 2 3 4 / marbletiles]

[2 floor2 / 5 6 7 8 / marbletiles]

[4 ceiling1 / 14 13 12 11 / paintedwall]

[5 ceiling2 / 15 16 17 18 / paintedwall]

[6 ceiling3 / 19 20 21 22 / plastbceil]

[7 ceiling4 / 23 24 25 26 / plastbceil]

[8 ceiling5 / 27 28 29 30 / plastbceil]

[9 ceiling6 / 31 32 33 34 / plastbceil]

[10 ceilingfiller1 / 16 19 22 17 / Plywoodpanels]

[11 ceilingfiller2 / 20 23 26 21 / plastbceil]

[12 ceilingfiller3 / 59 27 30 60 / plastbceil]

[13 ceilingfiller4 / 61 31 34 62 / plastbceil]

[14 ceiling7 / 35 36 37 38 / paintedwall]

[15 ceiling8 / 39 40 41 42 / paintedwall]

[16 ceiling9 / 43 44 45 46 / paintedwall]
[17 wall1s / 38 37 47 48 / paintedwall]
[18 wall2s / 36 35 49 50 / paintedwall]
[19 wall3s / 40 39 51 52 / paintedwall]
[20 wall4s / 42 41 53 54 / paintedwall]
[21 wall5s / 43 40 52 55 / paintedwall]
[22 wall6s / 39 36 50 51 / paintedwall]
[23 wall7s / 41 46 56 53 / paintedwall]
[24 wall8s / 37 42 54 47 / paintedwall]
[25 wallback / 66 65 58 57 / paintedwall]
[26 wall1e / 5 2 12 18 / paintedwall]
[27 wall2e / 3 8 15 13 / paintedwall]

[30 ceiling10 / 64 63 65 66 / paintedwall]
[31 ceilingfiller5 / 45 44 63 64 / paintedwall]

[40 wallf1c / 25 60 75 69 / paintedwall]
[41 wallf2c / 59 24 70 76 / paintedwall]
[42 wallf3c / 29 62 77 71 / paintedwall]
[43 wallf1c / 61 28 72 78 / paintedwall]
[44 wall9s / 56 46 45 79 / paintedwall]
[45 wall10s / 80 44 43 55 / paintedwall]
[46 floor1s / 57 58 55 56 / Parquet]
[47 floor2s / 53 52 51 54 / Parquet]
[48 floor3s / 47 50 49 48 / Parquet]
[49 floor4s / 83 81 82 84 / Parquet]
[50 floor5s / 87 85 86 88 / Parquet]
[51 floor6s / 88 90 89 87 / Parquet]
[52 wall9c / 33 38 91 73 / paintedwall]
[53 stairs1 / 82 92 93 84 / Parquet]
[54 stairs2 / 92 94 95 93 / Parquet]
[55 stairs3 / 94 96 97 95 / Parquet]
[56 stairs4 / 96 98 99 97 / Parquet]
[57 stairs5 / 98 100 101 99 / Parquet]
[58 stairs6 / 100 102 103 101 / Parquet]
[59 stairs7 / 102 104 105 103 / Parquet]

[60 stairs8 / 49 102 100 107 / Parquet]
[61 stairs9 / 107 98 96 106 / Parquet]
[62 stairs10 / 106 94 92 82 / Parquet]
[63 stairs11 / 103 86 109 101 / Parquet]
[64 stairs12 / 99 109 108 97 / Parquet]
[65 stairs13 / 95 108 84 93 / Parquet]
[66 stairs14 / 105 90 88 86 / Parquet]
[67 stairs15 / 81 83 111 110 / Parquet]
[68 stairs16 / 110 111 113 112 / Parquet]
[69 stairs17 / 112 113 115 114 / Parquet]
[70 stairs18 / 114 115 117 116 / Parquet]
[71 stairs19 / 116 117 119 118 / Parquet]
[72 stairs20 / 118 119 121 120 / Parquet]
[73 stairs21 / 120 121 123 122 / Parquet]
[74 stairs22 / 124 81 110 112 / Parquet]
[75 stairs23 / 125 124 114 116 / Parquet]
[76 stairs24 / 48 125 118 120 / Parquet]
[77 stairs25 / 113 111 83 126 / Parquet]
[78 stairs26 / 117 115 126 127 / Parquet]
[79 stairs27 / 121 119 127 85 / Parquet]
[80 stairs28 / 87 89 123 85 / Parquet]
[81 seat1 / 130 131 129 128 / Audseat]
[82 seat2 / 162 163 133 132 / Audseat]
[83 seat3 / 164 165 135 134 / Audseat]
[84 seat4 / 166 167 137 136 / Audseat]
[85 seat5 / 168 169 139 138 / Audseat]
[86 seat6 / 170 171 141 140 / Audseat]
[87 seat7 / 172 173 143 142 / Audseat]
[88 seat8 / 174 175 145 144 / Audseat]
[89 seat9 / 176 177 147 146 / Audseat]
[90 seat10 / 178 179 149 148 / Audseat]
[91 seat11 / 180 181 151 150 / Audseat]
[92 seat12 / 182 183 153 152 / Audseat]
[93 seat13 / 184 185 155 154 / Audseat]
[94 seat14 / 186 187 157 156 / Audseat]
[95 seat15 / 188 189 159 158 / Audseat]

[96 seat16 / 190 191 161 160 / Audseat]
[97 seat17 / 192 193 225 224 / Audseat]
[98 seat18 / 194 195 227 226 / Audseat]
[99 seat19 / 196 197 229 228 / Audseat]
[100 seat20 / 198 199 231 230 / Audseat]
[101 seat21 / 200 201 233 232/ Audseat]
[102 seat22 / 202 203 235 234 / Audseat]
[103 seat23 / 204 205 237 236 / Audseat]
[104 seat24 / 206 207 239 238 / Audseat]
[105 seat25 / 208 209 241 240 / Audseat]
[106 seat26 / 210 211 243 242 / Audseat]
[107 seat27 / 212 213 245 244 / Audseat]
[108 seat28 / 214 215 247 246 / Audseat]
[109 seat29 / 216 217 249 248 / Audseat]
[110 seat30 / 218 219 251 250 / Audseat]
[111 seat31 / 220 221 253 252 / Audseat]
[112 seat32 / 222 223 255 254 / Audseat]
[113 seatf1 / 130 128 1128 1130 / Audseat]
[114 seatf2 / 129 131 1131 1129 / Audseat]
[115 seatf3 / 162 132 1132 1162 / Audseat]
[116 seatf4 / 133 163 1163 1133 / Audseat]
[117 seatf5 / 164 134 1134 1164 / Audseat]
[118 seatf6 / 135 165 1165 1135 / Audseat]
[119 seatf7 / 166 136 1136 1166 / Audseat]
[120 seatf8 / 137 167 1167 1137 / Audseat]
[121 seatf9 / 168 138 1138 1168 / Audseat]
[122 seatf10 / 139 169 1169 1139 / Audseat]
[123 seatf11 / 170 140 1140 1170 / Audseat]
[124 seatf12 / 141 171 1171 1141 / Audseat]
[125 seatf13 / 172 142 1142 1172 / Audseat]
[126 seatf14 / 143 173 1173 1143 / Audseat]
[127 seatf15 / 174 144 1144 1174 / Audseat]
[128 seatf16 / 145 175 1175 1145 / Audseat]
[129 seatf17 / 176 146 1146 1176 / Audseat]
[130 seatf18 / 147 177 1177 1147 / Audseat]
[131 seatf19 / 178 148 1148 1178 / Audseat]

[132 seatf20 / 149 179 1179 1149 / Audseat]
[133 seatf21 / 180 150 1150 1180 / Audseat]
[134 seatf22 / 151 181 1181 1151 / Audseat]
[135 seatf23 / 182 152 1152 1182 / Audseat]
[136 seatf24 / 153 183 1183 1153 / Audseat]
[137 seatf25 / 184 154 1154 1184 / Audseat]
[138 seatf26 / 155 185 1185 1155 / Audseat]
[139 seatf27 / 186 156 1156 1186 / Audseat]
[140 seatf28 / 157 187 1187 1157 / Audseat]
[141 seatf29 / 188 158 1158 1188 / Audseat]
[142 seatf30 / 159 189 1189 1159 / Audseat]
[143 seatf31 / 190 160 1160 1190 / Audseat]
[144 seatf32 / 161 191 1191 1161 / Audseat]
[145 seatf33 / 192 224 1224 1192 / Audseat]
[146 seatf34 / 225 193 1193 1225 / Audseat]
[147 seatf35 / 194 226 1226 1194 / Audseat]
[148 seatf36 / 227 195 1195 1227 / Audseat]
[149 seatf37 / 196 228 1228 1196 / Audseat]
[150 seatf38 / 229 197 1197 1229 / Audseat]
[151 seatf39 / 198 230 1230 1198 / Audseat]
[152 seatf40 / 231 199 1199 1231 / Audseat]
[153 seatf41 / 200 232 1232 1200 / Audseat]
[154 seatf42 / 233 201 1201 1233 / Audseat]
[155 seatf43 / 202 234 1234 1202 / Audseat]
[156 seatf44 / 235 203 1203 1235 / Audseat]
[157 seatf45 / 204 236 1236 1204 / Audseat]
[158 seatf46 / 237 205 1205 1237 / Audseat]
[159 seatf47 / 206 238 1238 1206 / Audseat]
[160 seatf48 / 239 207 1207 1239 / Audseat]
[161 seatf49 / 208 240 1240 1208 / Audseat]
[162 seatf50 / 241 209 1209 1241 / Audseat]
[163 seatf51 / 210 242 1242 1210 / Audseat]
[164 seatf52 / 243 211 1211 1243 / Audseat]
[165 seatf53 / 212 244 1244 1212 / Audseat]
[166 seatf54 / 245 213 1213 1245 / Audseat]
[167 seatf55 / 214 246 1246 1214 / Audseat]

[168 seatf56 / 247 215 1215 1247 / Audseat]
[169 seatf57 / 216 248 1248 1216 / Audseat]
[170 seatf58 / 249 217 1217 1249 / Audseat]
[171 seatf59 / 218 250 1250 1218 / Audseat]
[172 seatf60 / 251 219 1219 1251 / Audseat]
[173 seatf61 / 220 252 1252 1220 / Audseat]
[174 seatf62 / 253 221 1221 1253 / Audseat]
[175 seatf63 / 222 254 1254 1222 / Audseat]
[176 seatf64 / 255 223 1223 1255 / Audseat]
[177 seatfs1 / 254 255 1255 1254 / Audseat]
[178 seatfs2 / 223 222 1222 1223 / Audseat]
[179 seatfs3 / 252 253 1253 1252 / Audseat]
[180 seatfs4 / 221 220 1220 1221 / Audseat]
[181 seatfs5 / 250 251 1251 1250 / Audseat]
[182 seatfs6 / 219 218 1218 1219 / Audseat]
[183 seatfs7 / 248 249 1249 1248 / Audseat]
[184 seatfs8 / 217 216 1216 1217 / Audseat]
[185 seatfs9 / 246 247 1247 1246 / Audseat]
[186 seatfs10 / 215 214 1214 1215 / Audseat]
[187 seatfs11 / 244 245 1245 1244 / Audseat]
[188 seatfs12 / 213 212 1212 1213 / Audseat]
[189 seatfs13 / 242 243 1243 1242 / Audseat]
[190 seatfs14 / 211 210 1210 1211 / Audseat]
[191 seatfs15 / 240 241 1241 1240 / Audseat]
[192 seatfs16 / 209 208 1208 1209 / Audseat]
[193 seatfs17 / 238 239 1239 1238 / Audseat]
[194 seatfs18 / 207 206 1206 1207 / Audseat]
[195 seatfs19 / 236 237 1237 1236 / Audseat]
[196 seatfs20 / 205 204 1204 1205 / Audseat]
[197 seatfs21 / 234 235 1235 1234 / Audseat]
[198 seatfs22 / 203 202 1202 1203 / Audseat]
[199 seatfs23 / 232 233 1233 1232 / Audseat]
[200 seatfs24 / 201 200 1200 1201 / Audseat]
[201 seatfs25 / 230 231 1231 1230 / Audseat]
[202 seatfs26 / 199 198 1198 1199 / Audseat]
[203 seatfs27 / 228 229 1229 1228 / Audseat]

[204 seatfs28 / 197 196 1196 1197 / Audseat]
[205 seatfs29 / 226 227 1227 1226 / Audseat]
[206 seatfs30 / 195 194 1194 1195 / Audseat]
[207 seatfs31 / 224 225 1225 1224 / Audseat]
[208 seatfs32 / 193 192 1192 1193 / Audseat]
[209 seatfs33 / 160 161 1161 1160 / Audseat]
[210 seatfs34 / 191 190 1190 1191 / Audseat]
[211 seatfs35 / 158 159 1159 1158 / Audseat]
[212 seatfs36 / 189 188 1188 1189 / Audseat]
[213 seatfs37 / 156 157 1157 1156 / Audseat]
[214 seatfs38 / 187 186 1186 1187 / Audseat]
[215 seatfs39 / 154 155 1155 1154 / Audseat]
[216 seatfs40 / 185 184 1184 1185 / Audseat]
[217 seatfs41 / 152 153 1153 1152 / Audseat]
[218 seatfs42 / 183 182 1182 1183 / Audseat]
[219 seatfs43 / 150 151 1151 1150 / Audseat]
[220 seatfs44 / 181 180 1180 1181 / Audseat]
[221 seatfs45 / 148 149 1149 1148 / Audseat]
[222 seatfs46 / 179 178 1178 1179 / Audseat]
[223 seatfs47 / 146 147 1147 1146 / Audseat]
[224 seatfs48 / 177 176 1176 1177 / Audseat]
[225 seatfs49 / 144 145 1145 1144 / Audseat]
[226 seatfs50 / 175 174 1174 1175 / Audseat]
[227 seatfs51 / 142 143 1143 1142 / Audseat]
[228 seatfs52 / 173 172 1172 1173 / Audseat]
[229 seatfs53 / 140 141 1141 1140 / Audseat]
[230 seatfs54 / 171 170 1170 1171 / Audseat]
[231 seatfs55 / 138 139 1139 1138 / Audseat]
[232 seatfs56 / 169 168 1168 1169 / Audseat]
[233 seatfs57 / 136 137 1137 1136 / Audseat]
[234 seatfs58 / 167 166 1166 1167 / Audseat]
[235 seatfs59 / 134 135 1135 1134 / Audseat]
[236 seatfs60 / 165 164 1164 1165 / Audseat]
[237 seatfs61 / 132 133 1133 1132 / Audseat]
[238 seatfs62 / 163 162 1162 1163 / Audseat]
[239 seatfs63 / 128 129 1129 1128 / Audseat]

[240 seatfs64 / 131 130 1130 1131 / Audseat]
[241 doors1 / 3057 2057 1057 57 / Wooddoor]
[242 wall11s / 1079 64 66 1057 / paintedwall]
[243 wall12s / 79 1079 2057 3057 / paintedwall]
[244 doors2 / 58 1058 2058 3058 / Wooddoor]
[245 wall13s / 1058 65 63 1080 / paintedwall]
[246 wall14s / 3058 2058 1080 80 / paintedwall]
[247 doore1 / 1004 2004 3004 4004 / Wooddoor]
[248 wall5e / 4 1004 1014 14 / paintedwall]
[249 wall6e / 1014 4004 3004 2014 / paintedwall]
[250 wall7e / 3 13 2014 2004 / paintedwall]
[251 doore2 / 1001 4001 3001 2001 / Wooddoor]
[252 wall8e / 1 11 1011 1001 / paintedwall]
[253 wall9e / 1011 2011 3001 4001 / paintedwall]
[254 wall10e / 2 2001 2011 12 / paintedwall]
[255 door / 4 14 11 1 / Wooddoor]
[256 doors3 / 74 1074 2074 3074 / Wooddoor]
[257 wall15s / 1032 32 3074 2074 / paintedwall]
[258 wall16s / 35 1032 1074 104 / paintedwall]

[259 floorf1 / 1254 1253 1221 1222 / Carpet]
[260 floorf2 / 1252 1251 1219 1220 / Carpet]
[261 floorf3 / 1248 1247 1215 1216 / Carpet]
[262 floorf4 / 1246 1245 1213 1214 / Carpet]
[263 floorf5 / 1244 1243 1211 1212 / Carpet]
[264 floorf6 / 1242 1241 1209 1210 / Carpet]
[265 floorf7 / 1240 1239 1207 1208 / Carpet]
[266 floorf8 / 1238 1237 1205 1206 / Carpet]
[267 floorf9 / 1236 1235 1203 1204 / Carpet]
[268 floorf10 / 1234 1233 1201 1202 / Carpet]
[269 floorf11 / 1232 1231 1199 1200 / Carpet]
[270 floorf12 / 1230 1229 1197 1198 / Carpet]
[271 floorf13 / 1228 1227 1195 1196 / Carpet]
[272 floorf14 / 1160 1159 1189 1190 / Carpet]
[273 floorf15 / 1158 1157 1187 1188 / Carpet]
[274 floorf16 / 1154 1153 1183 1184 / Carpet]

[275 floorf17 / 1152 1151 1181 1182 / Carpet]
[276 floorf18 / 1150 1149 1179 1180 / Carpet]
[277 floorf19 / 1148 1147 1177 1178 / Carpet]
[278 floorf20 / 1146 1145 1175 1176 / Carpet]
[279 floorf21 / 1144 1143 1173 1174 / Carpet]
[280 floorf22 / 1142 1141 1171 1172 / Carpet]
[281 floorf23 / 1140 1139 1169 1170 / Carpet]
[282 floorf24 / 1138 1137 1167 1168 / Carpet]
[283 floorf25 / 1136 1135 1165 1166 / Carpet]
[284 floorf26 / 1134 1133 1163 1164 / Carpet]
[285 floor4 / 90 1255 1191 89 / Carpet]
[286 floor5 / 90 104 74 78 / Carpet]
[287 floor6 / 90 78 1255 / Carpet]
[288 floor7 / 77 73 91 89 / Carpet]
[289 floor8 / 77 89 1191 / Carpet]
[290 floorf27 / 1250 11249 1217 1218 / Carpet]
[291 floor9 / 78 1249 11249 1255 / Carpet]
[292 floor10 / 78 72 76 1249 / Carpet]
[293 floorf28 / 1156 1155 11185 1186 / Carpet]
[294 floor11 / 1191 11185 1185 77 / Carpet]
[295 floor12 / 1185 75 71 77 / Carpet]
[296 floorf29 / 11226 1225 1193 1194 / Carpet]
[297 floorf30 / 1132 1129 1131 11162 / Carpet]
[298 floor13 / 1249 76 1241 / Carpet]
[299 floor14 / 76 70 68 1241 / Carpet]
[300 floor15 / 1185 1177 75 / Carpet]
[301 floor16 / 69 75 1177 67 / Carpet]
[302 floor17 / 68 7 1226 1241 / Carpet]
[303 floor18 / 1177 1162 6 67 / Carpet]
[304 floor19 / 7 1224 11226 1226 / Carpet]
[305 floor20 / 1162 11162 1130 6 / Carpet]

[306 floor21 / 1223 1222 1160 1161 / Carpet]
[307 floor22 / 1222 1221 1159 1160 / Carpet]
[308 floor23 / 1221 1220 1158 1159 / Carpet]
[309 floor24 / 1220 1219 1157 1158 / Carpet]

[310 floor25 / 1219 1218 1156 1157 / Carpet]
[311 floor26 / 1218 1217 1155 1156 / Carpet]
[312 floor27 / 1217 1216 1154 1155 / Carpet]
[313 floor28 / 1216 1215 1153 1154 / Carpet]
[314 floor29 / 1215 1214 1152 1153 / Carpet]
[315 floor30 / 1214 1213 1151 1152 / Carpet]
[316 floor31 / 1213 1212 1150 1151 / Carpet]
[317 floor32 / 1212 1211 1149 1150 / Carpet]
[318 floor33 / 1211 1210 1148 1149 / Carpet]
[319 floor34 / 1210 1209 1147 1148 / Carpet]
[320 floor35 / 1209 1208 1146 1147 / Carpet]
[321 floor36 / 1208 1207 1145 1146 / Carpet]
[322 floor37 / 1207 1206 1144 1145 / Carpet]
[323 floor38 / 1206 1205 1143 1144 / Carpet]
[324 floor39 / 1205 1204 1142 1143 / Carpet]
[325 floor40 / 1204 1203 1141 1142 / Carpet]
[326 floor41 / 1203 1202 1140 1141 / Carpet]
[327 floor42 / 1202 1201 1139 1140 / Carpet]
[328 floor43 / 1201 1200 1138 1139 / Carpet]
[329 floor44 / 1200 1199 1137 1138 / Carpet]
[330 floor45 / 1199 1198 1136 1137 / Carpet]
[331 floor46 / 1198 1197 1135 1136 / Carpet]
[332 floor47 / 1197 1196 1134 1135 / Carpet]
[333 floor48 / 1196 1195 1133 1134 / Carpet]
[334 floor49 / 1195 1194 1132 1133 / Carpet]
[335 floor50 / 1194 1193 1129 1132 / Carpet]
[336 floor51 / 1193 1192 1128 1129 / Carpet]

[339 ceilpnl2 / 25 325 326 26 / Plywoodpanels]
[340 ceilwll2 / 325 69 67 326 / paintedwall]
[341 ceilpnl3 / 29 329 330 30 / Plywoodpanels]
[342 ceilwll3 / 329 71 75 330 / paintedwall]
[343 ceilpnl4 / 33 333 334 34 / Plywoodpanels]
[344 ceilwll4 / 333 73 77 334 / paintedwall]

[347 ceilpnl6 / 23 323 324 24 / Plywoodpanels]

[348 ceilwll6 / 323 68 70 324 / paintedwall]
[349 ceilpnl7 / 27 327 328 28 / Plywoodpanels]
[350 ceilwll7 / 327 76 72 328 / paintedwall]
[351 ceilpnl8 / 31 331 332 32 / Plywoodpanels]
[352 ceilwll8 / 331 78 74 332 / paintedwall]

[353 ceilpnl9 / 15 315 316 16 / Plywoodpanels]
[354 ceilwll9 / 315 8 7 316 / paintedwall]
[355 ceilpnl10 / 17 317 318 18 / Plywoodpanels]
[356 ceilwll10 / 317 6 5 318 / paintedwall]

[357 curt1 / 19 319 4319 419/ Plywoodpanels]
[358 curt2 / 319 7 407 4319/ paintedwall]
[359 curt3 / 419 4319 320 20/ Plywoodpanels]
[360 curt4 / 4319 407 68 320/ paintedwall]

[361 curt5 / 21 321 4321 421/ Plywoodpanels]
[362 curt6 / 321 67 406 4321/ paintedwall]
[363 curt7 / 421 4321 322 22/ Plywoodpanels]
[364 curt8 / 4321 406 6 322/ paintedwall]

2) Master αρχείο με τις προτεινόμενες αλλαγές για προσθήκη μόνιμης απορρόφησης:

Για τις τροποποιήσεις που προτείνονται έγινε αλλαγή στα υλικά των επιφανειών, οπότε η μοντελοποίηση του χώρου παραμένει ίδια. Παραθέτονται μόνο οι αλλαγές στα υλικά των επιφανειών.

PLANES

[1 floor / 1 2 3 4 / Carpet]
[2 floor2 / 5 6 7 8 / Carpet]
[4 ceiling1 / 14 13 12 11 / plastbceil]
[5 ceiling2 / 15 16 17 18 / plastbceil]
[10 ceilingfiller1 / 16 19 22 17 / panelw3]
[26 wall1e / 5 2 12 18 / panelw3]
[27 wall2e / 3 8 15 13 / panelw3]
[247 doore1 / 1004 2004 3004 4004 / panelw3]

[248 wall5e / 4 1004 1014 14 / panelw3]
[249 wall6e / 1014 4004 3004 2014 / panelw3]
[250 wall7e / 3 13 2014 2004 / panelw3]
[251 doore2 / 1001 4001 3001 2001 / panelw3]
[252 wall8e / 1 11 1011 1001 / panelw3]
[253 wall9e / 1011 2011 3001 4001 / panelw3]
[254 wall10e / 2 2001 2011 12 / panelw3]
[255 door / 4 14 11 1 / panelw3]
[353 ceilpnl9 / 15 315 316 16 / panelw3]
[354 ceilwll9 / 315 8 7 316 / panelw3]
[355 ceilpnl10 / 17 317 318 18 / panelw3]
[356 ceilwll10 / 317 6 5 318 / panelw3]

3) Master αρχείο με τις προτεινόμενες αλλαγές για μέγιστη απορρόφηση:

Ομοίως με παραπάνω παραθέτονται μόνο οι επιπλέον επιφάνειες που έχουν αλλάξει τα υλικά.

[339 ceilpnl2 / 25 325 326 26 / panelw3]
[340 ceilwll2 / 325 69 67 326 / panelw3]
[341 ceilpnl3 / 29 329 330 30 / panelw3]
[342 ceilwll3 / 329 71 75 330 / panelw3]

[347 ceilpnl6 / 23 323 324 24 / panelw3]
[348 ceilwll6 / 323 68 70 324 / panelw3]
[349 ceilpnl7 / 27 327 328 28 / panelw3]
[350 ceilwll7 / 327 76 72 328 / panelw3]

[357 curt1 / 19 319 4319 419/ panelw3]
[358 curt2 / 319 7 407 4319/ panelw3]
[359 curt3 / 419 4319 320 20/ panelw3]
[360 curt4 / 4319 407 68 320/ panelw3]

[361 curt5 / 21 321 4321 421/ panelw3]
[362 curt6 / 321 67 406 4321/ panelw3]
[363 curt7 / 421 4321 322 22/ panelw3]
[364 curt8 / 4321 406 6 322/ panelw3]

4) REC αρχείο με τις συντεταγμένες των θέσεων των ακροατών:

```
;PROJECT=acousticK2
```

```
RECEIVERS
```

```
1 1.2 18.8 -0.8
```

```
2 6 10 0.3
```

```
3 -5 17 -0.6
```

```
4 -3 5 0.8
```

```
5 -1 10 0.5
```

```
6 0.5 4 1
```

```
7 -6 13 0
```

```
8 3 15 0
```

```
9 6.2 5 0.9
```

5) SRC αρχείο με τον ορισμό και τις συντεταγμένες των πηγών, φυσικών και ηλεκτροακουστικών.

```
;PROJECT=acousticK2
```

```
LOCAL g = 10 ;overall system gain
```

```
LOCAL s = 75
```

```
;natural source
```

```
SOURCE A0
```

```
DIRECTIVITY = "omni"
```

```
POS = 0 23.4 0.5
```

```
AIMANGLES = 0 0
```

```
Lp1m_a = Lp_voice_normal
```

```
END
```

```
;e-a source with mic input
```

```
SOURCE B1
```

```
DIRECTIVITY = "V2-1264.CF2"
```

```
POS = 0 22.2 3.9
```

```
AIMPOS = 0 13 0
```

```
;LvIn = Lv_pink 9
```

```
Lp1m_a = Lp_voice_normal ;speech mic input
MICSSENSITIVITY = -35 ;set as actual mc
GAIN = <s s s s s>
END
```

```
SOURCE B2
DIRECTIVITY = "V2-1264.CF2"
POS = 7 22.2 3.9
AIMPOS = 3 9 0.6
LvIn = Lv_pink 9
GAIN = <g g g g g>
END
```

```
SOURCE B3
DIRECTIVITY = "V2-1264.CF2"
POS = -7 22.2 3.9
AIMPOS = -3 9 0.6
LvIn = Lv_pink 9
GAIN = <g g g g g>
END
RETURN
```

- [1] Egan, M. D. (2007). *Architectural Acoustics*. U.S.A.: J. Ross Publishing
- [2] Everest, A. (2012). *Εγχειρίδιο Ακουστικής* (5^η έκδ.) (Γ. Μπότζιου, Μεταφρ.). Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, pp. 519
- [3] CATT-A v9.1f:1 (2020). User's Manual CATT-AcousticTM v9.1f:1
- [4] Kuttruff, H. (2007). *Room Acoustics*. Germany: CRC Press, pp. 273-283
- [5] Λουτρίδης, Σ. (2009). *Ηλεκτροακουστική & Ηχητικές Εγκαταστάσεις*. Αθήνα: Ίων
- [6] Λουτρίδης, Σ. (2015). *ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ Αρχές & Εφαρμογές*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, pp. 242-302
- [7] Long M. (2006). *Architectural Acoustics*. U.S.A.: Elsevier Academic Press, pp. 785-803
- [8] Ποτηράκης, Σ. , Τάτλας, Ν.-Α. (2019). *Εφαρμοσμένη Ακουστική* [πανεπιστημιακές σημειώσεις]. Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών Μηχανικών, Χειμερινό εξάμηνο 2019-2020. Αιγάλεω.
- [9] Ποτηράκης, Σ. (2020). *Ηλεκτροακουστική* [πανεπιστημιακές σημειώσεις]. Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών Μηχανικών, Εαρινό εξάμηνο 2019-2020. Αιγάλεω.
- [10] Σκαρλάτος, Δ. (2012). *Εφαρμοσμένη Ακουστική* (4^η έκδ.). Πάτρα: GOTSIS Εκδόσεις, pp. 139/188
- [11] Biamp data sheets, V2-1264 LOUDSPEAKER SYSTEM. Available on: https://downloads.biamp.com/assets/docs/default-source/discontinued/biamp_data_sheets_community_v2-1264_two-way_12-inch_loudspeaker_jun21.pdf?sfvrsn=5be96fcb_4 (Last accessed: 19/9/2022)
- [12] Honeycutt, R. (2014, May). Sound Control CATT-Acoustic. *audioXpress*, 32-37. Available on: <https://audioxpress.com/files/attachment/2674> (Last accessed: 19/9/2022)
- [13] James, A. , Dalenbäck, B.-I. , Naqvi A. (n.d.). Computer Modeling with CATT-Acoustic – Theory and Practice of Diffuse Reflection and Array Modeling. *Institute Of Acoustics Proceedings* Vol,23 Part 8. Available on: <https://www.adrianjamesacoustics.com/papers/cattacoustic.pdf> (Last accessed: 19/9/2022)
- [14] Χάλαρης, Γ. , (2014, Σεπτέμβριος). Οδηγός Ήχου: Διάταξη Ηχείων της Ηχητικής Εγκατάστασης. djshop. Available on: <https://www.djshop.gr/odigs-ichoy-diataxi-icheion-tis-ichitikis-eggatastasis> (Last accessed: 19/9/2022)