



Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών

Ακουστικός Σχεδιασμός και Ψηφιακός Ήχος

Διπλωματική Εργασία

Ακουστικός Σχεδιασμός Αμφιθεάτρου του
Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας

Αντωνόπουλος Νικόλαος

Επιβλέπουσα καθηγήτρια : Χουρμουζιάδου Καλλιόπη

Θεσσαλονίκη, Ιούνιος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Αντωνόπουλου Νικολάου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ’ οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



“Ακουστικός Σχεδιασμός Αμφιθεάτρου του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας”

Αντωνόπουλος Νικόλαος

Επιτροπή Επίβλεψης Πτυχιακής / Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:	Συν-Επιβλέπων καθηγητής :
Καλλιόπη Χουρμουζιάδου	Γεώργιος Καλλίρης

Πάτρα, Ιούνιος 2026

Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας αφορά τη μελέτη της ακουστικής του αμφιθεάτρου Α.Π-3.8 του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας. Το αμφιθέατρο βρίσκεται στη πανεπιστημιούπολη ΖΕΠ Κοζάνης και εγκαινιάστηκε τον Φεβρουάριο του 2023. Οι χρήσεις του χώρου αφορούν κυρίως διδασκαλία, εξετάσεις και εκδηλώσεις του Πανεπιστημίου. Αφού παρουσιαστεί το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο και αναλυθούν παραδείγματα ακουστικής άλλων αιθουσών παρόμοιας χρηστικότητας, στόχος είναι η διεξαγωγή επιτόπιων μετρήσεων προκειμένου να ληφθούν τα απαραίτητα στοιχεία για τη κατασκευή και τη βαθμονόμηση του μοντέλου προσομοίωσης του αμφιθεάτρου στο λογισμικό CATT- Acoustic. Τέλος, μετά την ανάλυση της ακουστικής συμπεριφοράς του χώρου θα ακολουθήσουν στοχευμένες προτάσεις βελτίωσης της ακουστικής του χώρου δοκιμασμένες στη προσομοίωση του CATT.

Λέξεις-κλειδιά

Ακουστικός σχεδιασμός, προσομοίωση ακουστικής, ακουστικές μετρήσεις, μεταβλητή ακουστική.

Abstract

The aim of the present thesis is to assess the auditorium AP3.8 at the University of Western Macedonia in terms of acoustics. The auditorium is located on the university campus in the Active Urban Planning Zone of Kozani (ZEP) and was inaugurated in February 2023. The auditorium is used for teaching, exams and university events. After the initial presentation of the necessary theoretical background and the analysis of the acoustics of auditoria with similar uses, on-site acoustic measurements will be conducted to obtain the data required for the construction and calibration of the simulation model of the auditorium, using CATT-Acoustic software. Finally, following the evaluation of the room's acoustic behaviour, targeted interventions and a variable- acoustics solution are proposed and assessed through computational simulations.

Keywords

Acoustic-design, acoustic simulation, acoustic measurements, variable acoustics

Περίληψη	3
Λέξεις-κλειδιά.....	4
Abstract	4
Keywords	5
Κεφάλαιο 1ο : Γενικά στοιχεία της εργασίας	8
1. Εισαγωγή.....	9
1.1 Αντικείμενο της εργασίας	9
1.2 Προσδοκώμενα Αποτελέσματα.....	9
1.3 Δομή της εργασίας	10
Κεφάλαιο 2ο : Θεωρητικές έννοιες ακουστικής.....	10
2. Εισαγωγή.....	11
2.1 Κυματικά φαινόμενα του ήχου.....	11
2.1.1 Συμβολή κυμάτων- Στάσιμα κύματα.....	12
2.1.2 Ηχώ- πολλαπλή ηχώ	12
2.2 Αντήχηση	12
2.3 Επισκόπηση δεικτών ακουστικής	13
2.3.1 Χρόνος αντήχησης RT60.....	13
2.3.2 Πρώτος Χρόνος Αντήχησης (EDT)	15
2.3.3 Χρόνοι T10 ,T20 ,T30	16
2.3.4 Ευκρίνεια	16
2.3.5 Διακριτότητα	16
2.3.6 Ακουστική απολαβή	17
2.3.7 Δείκτης Μετάδοσης Ομιλίας STI	17
2.3.8 Απώλεια συμφώνων AL	18
2.4 Συμπεράσματα.....	19
Κεφάλαιο 3ο : Ακουστική κλειστών χώρων.....	19
3. Εισαγωγή.....	20
3.1 Ηχητικά πεδία σε κλειστούς χώρους.....	20
3.2 Κρίσιμη απόσταση	21
3.3 Ακουστική Συμπεριφορά Αμφιθεάτρων	21
3.3.1 Θόρυβος υποβάθρου.....	22
3.3.2 Χρόνος Αντήχησης.....	22
3.4 Ακουστικός Σχεδιασμός Αμφιθεάτρου	23

3.5 Στάθμη ηχητικής πηγής.....	27
3.6 Τοποθέτηση και ηχόχρωμα πηγής.....	28
3.7 Συμπεράσματα.....	28
Κεφάλαιο 4ο : Παραδείγματα ακουστικής χώρων	28
4. Εισαγωγή.....	29
4.1 Ιστορική αναδρομή αιθουσών ακρόασης μουσικής.....	29
4.2 Σύγχρονες περιπτώσεις ακουστικής.....	32
4.2.1 Αμφιθέατρο Baldwin, Πανεπιστήμιο Duke.....	32
4.2.2 Αμφιθέατρο πύργου Intesa Sanpaolo	35
4.2.3 Dallas City Performance Hall.....	37
4.2.4 Daegu Opera House.....	38
4.2.5 Queens Hall	40
4.3 Εγχώριες περιπτώσεις ακουστικής αμφιθεάτρων	42
4.3.1 Αμφιθέατρο Μιλτιάδης Έβερτ, Τεχνόπολη Αθηναίων	42
4.3.2 Αμφιθέατρο Διαλέξεων Ιατρικής Σχολής ΑΠΘ	44
4.4 Συμπεράσματα.....	45
Κεφάλαιο 5ο : Ακουστικές Μετρήσεις.....	46
5.Εισαγωγή.....	47
5.1 Μετρήσεις κρουστικής απόκρισης του χώρου	47
5.2 Μέτρηση με κρουστικό παλμό	47
5.3 Μέτρηση με σήμα σταθερής κατάστασης.....	47
5.4 Διαδικασία μετρήσεων κρουστικής απόκρισης	48
5.5 Πρότυπα Μετρήσεων	48
5.6 Εξοπλισμός.....	50
5.7 Μεθοδολογία.....	50
5.8 Συμπεράσματα.....	50
Κεφάλαιο 6ο: Διεξαγωγή και αποτελέσματα ακουστικών μετρήσεων	51
6.Εισαγωγή.....	52
6.1 Παρουσίαση Αμφιθεάτρου.....	52
6.2 Υλοποίηση Μετρήσεων	53
6.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων.....	58
6.4 Συμπεράσματα.....	60
Κεφάλαιο 7ο : Προσομοίωση ακουστικής αμφιθεάτρου.....	60

7. Εισαγωγή.....	61
7.1: Μεθοδολογία μοντελοποίησης του αμφιθεάτρου	61
7.1.1 : Κατασκευή αρχείου GEO.....	61
7.1.2 : Κατασκευή αρχείων REC και SRC	62
7.2 Καλιμπράρισμα του μοντέλου για άδειο ακροατήριο.....	63
7.2.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης για άδειο ακροατήριο.....	65
7.3 Καλιμπράρισμα του μοντέλου για γεμάτο ακροατήριο	73
7.3.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης για γεμάτο ακροατήριο	74
7.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων και πιθανά προβλήματα	79
7.5 Προτάσεις μεταβολής της ακουστικής του αμφιθεάτρου	84
7.5.1 Αντηχητική διάταξη για χρήση μουσικής	85
7.5.2 Απορροφητική διάταξη για χρήση ομιλίας.....	91
7.6 : Συμπεράσματα	96
Κεφάλαιο 8ο : Τελικά Συμπεράσματα.....	97
Λίστα Βιβλιογραφικών αναφορών	100

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1 : Απεικόνιση φαινομένων Ανάκλασης, Απορρόφησης, Διάχυσης.....	16
Σχήμα 2.2 : Κατάλληλες τιμές χρόνου αντήχησης για κάθε χρήση και όγκο (Κοντομίχος κ.α.,2013)	19
Σχήμα 2.3 : Εμφάνιση χρόνου αντήχησης σε γράφημα κρουστικής απόκρισης χώρου (Σωτηροπούλου, 2015)	20
Σχήμα 3.1 : Ηχητικά πεδία (Rossing, 2007)	26
Σχήμα 3.2 : Σχέση απευθείας και αντηχητικού πεδίου σε εσωτερικό χώρο (Maishanu, 2017)	26
Σχήμα 3.3 : Προτεινόμενοι χρόνοι αντήχησης για Αμφιθέατρα ανάλογα τον όγκο τους (Eggenschwiler,2005)	27
Σχήμα 3.4 : Μέγιστη γωνία διάταξης ακροατηρίου ως προς τη πηγή σε αμφιθεατρική διάταξη (Σωτηροπούλου, 2015)	29
Σχήμα 3.5 : Τοποθέτηση κρεμασμένου ανακλαστήρα από την οροφή για κατεύθυνση του ήχου προς το ακροατήριο (Σωτηροπούλου, 2015)	30
Σχήμα 3.6 : Τοποθέτηση ανακλαστήρα εφαπτόμενου στην οροφή (Σωτηροπούλου, 2015)	30
Σχήμα 3.7 : Εγκάρσια τομή τοποθέτησης ανακλαστήρα εφαπτόμενου στην οροφή (Σωτηροπούλου, 2015)	31
Σχήμα 3.8 : Σχεδιάγραμμα τοποθέτησης ακουστικής ψευδοροφής από ανακλαστήρες (kineticsnoise.com, https://kineticsnoise.com/spaces/auditoriums-performing-arts/reflection)	31
Σχήμα 3.9 : Πρακτική εφαρμογή ακουστικής ψευδοροφής από ανακλαστήρες (kineticsnoise.com, https://kineticsnoise.com/spaces/auditoriums-performing-arts/reflection)	32
Σχήμα 3.10 : Κεντρικό αμφιθέατρο Triplex Center, Νέα Υόρκη, επενδυμένο με ακουστική ψευδοροφή από ανακλαστήρες 1984 (Σωτηροπούλου,2015)	32
Σχήμα 4.1 : Doges Palace, Venice (www.flickr.com , Jenny Mackness)	34
Σχήμα 4.2: Αίθουσα ακρόασης Altes Gewandhaus (Σωτηροπούλου,2015)	35
Σχήμα 4.3 : Musikvereinssaal Βιέννη,1870, 1700 άτομα χωρητικότητα (https://www.wiener-symphoniker.at/musikverein-wien)	35
Σχήμα 4.4 : Fogg Art Museum, Harvard University, 1898 (https://www.researchgate.net/figure/interior-photo-of-lecture-room-after-1898-Courtesy-of-Fogg-Art-Museum-Harvard-University_fig3_228954144)	36
Σχήμα 4.5 : Sander’s Theater, 1000 άτομα (https://bostonchambermusic.org/venues/sanders-theatre/)	36
Σχήμα 4.6 : Royal Festival Hall, 1951 (https://boroughphotos.org/lambeth/royal-festival-hall-south-bank-waterloo-2/)	37
Σχήμα 4.7 : Αμφιθέατρο Baldwin, πανεπιστήμιο Duke (Holden,2015)	38
Σχήμα 4.8 : Σύστημα αερισμού. (Holden,2015)	39
Σχήμα 4.9 : Ακουστική διαμόρφωση αμφιθέατρου Baldwin. (Holden,2015)	39
Σχήμα 4.10 : Ξύλινο κέλυφος σκηνής (Holden,2015)	40
Σχήμα 4.11 : Διάταξη καθισμάτων για συναυλίες και ομιλίες (Chang & Vercammen,2023)	41

Σχήμα 4.12 : Εσωτερικό αμφιθεάτρου Intesa Sanpaolo (Chang & Vercammen,2023)	42
Σχήμα 4.13 : Dallas City Performance Hall (Holden,2015)	43
Σχήμα 4.14 :κάτοψη Daegu Opera House, A: πλατφόρμα ανύψωσης ορχηστρικού λάκκου 1- επέκταση σκηνής, B: πλατφόρμα ανύψωσης ορχηστρικού λάκκου 2- επέκταση σκηνής, C: Τοίχος πλατείας, D: πλευρικός τοίχος κλίσης 7°, E: πίσω τοίχος, F: ακουστικές κουρτίνες (Holden,2015)	44
Σχήμα 4.15 : Daegu Opera House, θολωτή οροφή και ακροατήριο (Holden,2015)	44
Σχήμα 4.16 : Διάταξη ανακλαστικών επιφανειών για ακρόαση μουσικής (Gade & Mortensen, 1999)	45
Σχήμα 4.17 : Διαφορετική διάταξη σκηνής (Gade & Mortensen, 1999)	46
Σχήμα 4.18 : Διάταξη πίσω τοίχου (Gade & Mortensen, 1999)	46
Σχήμα 4.19 :Τοποθέτηση ανακλαστικών επιφανειών περιμετρικά των ομιλητών (Φωκάς,2021)	47
Σχήμα 4.20 :Διαγράμματα μεταβλητού χρόνου αντήχησης της αίθουσας (Gade & Mortensen, 1999)	47
Σχήμα 4.22 : Εσωτερικό αμφιθεάτρου Μιλτιάδης Έβερετ, Τεχνόπολη Αθηναίων (meandai.gr)	48
Σχήμα 4.23 : Διαγράμματα χρόνου αντήχησης για ομιλία, εκπαίδευση, προσομοίωση χώρου	49
Σχήμα 4.24 : Διάγραμμα προτεινόμενου χρόνου αντήχησης Knudsen and Harris ανάλογα τη χρήση και τον όγκο της αίθουσας, DIN 18041:2004-05	49
Σχήμα 4.25 : Διαγράμματα χρόνου αντήχησης. Κίτρινη γραμμή : Χρόνος αντήχησης πριν την εφαρμογή, Γαλάζια γραμμή : Επιλογή 1, Πράσινη Γραμμή : Επιλογή 2, Κόκκινες Γραμμές : Αποδεκτά όρια τιμών χρόνου αντήχησης. (Καλλίρης . et al. , 2024)	50
Σχήμα 6.1 : Κάτοψη Αμφιθεάτρου	57
Σχήμα 6.2 : Εσωτερικό αμφιθεάτρου	58
Σχήμα 6.3 : Εσωτερικό αμφιθεάτρου	58
Σχήμα 6.4 : Απόκριση συχνότητας κάρτας ήχου	59
Σχήμα 6.5 : Απόκριση συχνότητας ηχείο LD Iqoa 12a στο 1 μέτρο	59
Σχήμα 6.6 : Θέση μέτρησης συχνοτικής απόκρισης ηχείου	60
Σχήμα 6.7 : Θέσεις μετρήσεων	61
Σχήμα 6.8 : Πρώιμος χρόνος αντήχησης EDT: R1-R9	62
Σχήμα 6.9 : Χρόνος αντήχησης T30: R1-R9	62
Σχήμα 6.10 : Ευκρίνεια (50ms) : R1-R9	62
Σχήμα 6.11 : Ευκρίνεια (80ms) : R1-R9	63
Σχήμα 6.12: Διακριτότητα (50ms) : R1-R9	63
Σχήμα 6.13 : Δείκτης μετάδοσης ομιλίας STI :R1-R9	63
Σχήμα 6.14 : Παράγοντας στιβαρότητας πηγής g: R1-R9	63
Σχήμα 7.1 : Τρισδιάστατη απεικόνιση αμφιθεάτρου	67
Σχήμα 7.2 : Ορισμός κατευθυντικότητας ηχείου στο CATT	68
Σχήμα 7.3: Απεικόνιση αμφιθεάτρου, πηγής και δεκτών από διαφορετικές όψεις	68
Σχήμα 7.4 : χρόνος αντήχησης μέτρησης, προσομοίωσης για θέση 1	70
Σχήμα 7.5 : χρόνος αντήχησης μέτρησης, προσομοίωσης για θέση 2	70

Σχήμα 7.6 : χρόνος αντήχησης μέτρησης, προσομοίωσης για θέση 3	70
Σχήμα 7.7 : χρόνος αντήχησης μέτρησης, προσομοίωσης για θέση 4	71
Σχήμα 7.8 : χρόνος αντήχησης μέτρησης, προσομοίωσης για θέση 5	71
Σχήμα 7.9 : χρόνος αντήχησης μέτρησης, προσομοίωσης για θέση 6	71
Σχήμα 7.10 : χρόνος αντήχησης μέτρησης, προσομοίωσης για θέση 7	71
Σχήμα 7.11 : χρόνος αντήχησης μέτρησης, προσομοίωσης για θέση 8	71
Σχήμα 7.12 : χρόνος αντήχησης μέτρησης, προσομοίωσης για θέση 9	72
Σχήμα 7.13 : Σύγκριση τιμών interactive rt estimation, μέσου όρου θέσεων ανά συχνότητα για μετρήσεις και για προσομοίωση TUCT	72
Σχήμα 7.14 : Σύγκριση πρώιμου χρόνου αντήχησης μέτρησης-προσομοίωσης για θέση 2	73
Σχήμα 7.15 : Σύγκριση πρώιμου χρόνου αντήχησης μέτρησης-προσομοίωσης για θέση 4	73
Σχήμα 7.16 : Σύγκριση πρώιμου χρόνου αντήχησης μέτρησης-προσομοίωσης για θέση 7	74
Σχήμα 7.17 : Σύγκριση μέσου όρου πρώιμου χρόνου αντήχησης των 9 θέσεων ανάμεσα σε μετρήσεις και προσομοίωση	74
Σχήμα 7.18 : Αποτελέσματα χρωματικού χάρτη για δείκτη c50 500hz	75
Σχήμα 7.19 : Αποτελέσματα χρωματικού χάρτη για δείκτη c50 1000 hz	75
Σχήμα 7.20 : Αποτελέσματα χρωματικού χάρτη για δείκτη c80 500 Hz	76
Σχήμα 7.21 : Αποτελέσματα χρωματικού χάρτη για δείκτη c80 1000 Hz	76
Σχήμα 7.22 : Αποτελέσματα χρωματικού χάρτη για δείκτη D50 500 Hz	77
Σχήμα 7.23 : Αποτελέσματα χρωματικού χάρτη για δείκτη D50 1000 Hz	77
Σχήμα 7.24 : Αποτελέσματα μετρήσεων STI	78
Σχήμα 7.25 : Αποτελέσματα χρωματικού χάρτη για δείκτη STI	78
Σχήμα 7.26: T30 προσομοίωσης άδειου και γεμάτου ακροατηρίου	79
Σχήμα 7.27: T30 Interactive RT estimation άδειου και γεμάτου ακροατηρίου	80
Σχήμα 7.28 : Σύγκριση Interactive RT estimation, TUCT, προτεινόμενου χρόνου αντήχησης για ομιλία	80
Σχήμα 7.29 : Σύγκριση μέσου όρου τιμών EDT για γεμάτο και άδειο ακροατήριο	81
Σχήμα 7.30 : Χρωματικός χάρτης EDT για τα 500 Hz	81
Σχήμα 7.31 : Χρωματικός χάρτης C50, 1000Hz	82
Σχήμα 7.32 : Χρωματικός χάρτης c80, 1000 Hz	82
Σχήμα 7.33 : χρωματικός χάρτης D50, 1000 Hz	83
Σχήμα 7.34 : χρωματικός χάρτης STI	83
Σχήμα 7.35: χρωματικός χάρτης SPL direct, 1kHz	84
Σχήμα 7.36 : Ηχογράφημα θέσης 1	85
Σχήμα 7.37 : Ηχογράφημα θέσης 2	86
Σχήμα 7.38 : Ηχογράφημα θέσης 3	87
Σχήμα 7.39 : Ηχογράφημα θέσης 8	88
Σχήμα 7.40 : Ηχογράφημα θέσης 9	89
Σχήμα 7.41 : Σχετικοί χρόνοι αντήχησης (Σκαρλάτος, 2021)	90
Σχήμα 7.42 : Συντελεστές απορρόφησης λουστραρισμένου ξύλου και απορροφητή (ποσοστό) (https://www.acoustic-supplies.com/absorption-coefficient-chart/)	91
Σχήμα 7.43 : Χωρική αποτύπωση θέσεων στο αμφιθέατρο	91

Σχήμα 7.44 : Χρόνος αντήχησης ανακλαστικής διάταξης και ιδανικός χρόνος αντήχησης για χρήση μουσικής	92
Σχήμα 7.45 : Μέσος πρώιμος χρόνος αντήχησης και χρόνος αντήχησης	92
Σχήμα 7.46 : Σύγκριση τιμών EDT, RT για κάθε θέση για τη συχνότητα των 500 Hz	93
Σχήμα 7.47 : Σύγκριση τιμών EDT, RT για κάθε θέση για τη συχνότητα των 1000 Hz	93
Σχήμα 7.48 : Ηχητική στάθμη ανά θέση σταθμισμένη κατά A	93
Σχήμα 7.49 : Ηχητική στάθμη προς απόσταση από τη πηγή για τις θέσεις 1-4	94
Σχήμα 7.50 : Τιμές c_{80} ανά θέση για τις συχνότητες 500-1000 Hz	94
Σχήμα 7.51 : Ηχογράφημα θέσης 1	95
Σχήμα 7.52 : Ηχογράφημα θέσης 3	95
Σχήμα 7.53 : Ηχογράφημα θέσης 7	95
Σχήμα 7.54 : Διάταξη ομοιόμορφης κάλυψης	97
Σχήμα 7.55 : Διάταξη κάλυψης πίσω μέρους	97
Σχήμα 7.56 : Χρόνος αντήχησης απορροφητικής διάταξης και ιδανικός χρόνος αντήχησης για χρήση ομιλίας	97
Σχήμα 7.57 : Χρόνος αντήχησης 500,1000 Hz για κάθε θέση	98
Σχήμα 7.58 : Χρόνος αντήχησης και πρώιμος χρόνος αντήχησης αμφιθεάτρου	98
Σχήμα 7.59 : Σύγκριση τιμών EDT, RT για κάθε θέση για τη συχνότητα των 500 Hz	98
Σχήμα 7.60 : Τιμές C_{50} για όλες τις θέσεις για τις συχνότητες 500,1000,2000 Hz	99
Σχήμα 7.61 : Τιμές D_{50} για όλες τις θέσεις για τις συχνότητες 500,1000,2000 Hz	99
Σχήμα 7.62 : Τιμές STI για όλες τις θέσεις για τις συχνότητες 500,1000 Hz	100
Σχήμα 7.63 : Χρωματικός χάρτης ηχητικής κάλυψης ακροατηρίου στη διάταξη της ομιλίας	100

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2-1 : Τιμές STI για την καταληπτότητα της ομιλίας (Ballou,2008)	23
Πίνακας 2-2 : τιμές RASTI, %ALCONS για αξιολόγηση καταληπτότητας της ομιλίας (Κοντομίχος,2013)	24
Πίνακας 5-1 : Θέσεις και συχνότητα μετρήσεων (Κοντομίχος,2013)	54
Πίνακας 5-2 : Προτεινόμενος Αριθμός Μετρήσεων (Κοντομίχος,2013)	55
Πίνακας 6-1: Αποστάσεις θέσεων μέτρησης-πηγής	61

Πίνακας 7-1 : Βιβλιογραφικοί συντελεστές απορρόφησης, συντελεστές που χρησιμοποιήθηκαν, υπολογισμός διαφοράς	69
Πίνακας 7-2 : Τιμές μετρήσεων c_{50} για 500,1000 HZ	75
Πίνακας 7-3 : Τιμές ευκρίνειας C80 για όλες τις θέσεις για τις συχνότητες 500,1000 Hz	76
Πίνακας 7-4 : Τιμές μετρήσεων D50 για 500-1000 Hz	77
Πίνακας 7-5 : Μεταβολή απορροφήσεων για ακροατήριο (Long M., 2006)	79
Πίνακας 7-6 : Συντελεστές απορρόφησης διάτρητης μεταλλικής επιφάνειας (τεχνικό φυλλάδιο προϊόντος Ecophon)	96

Κεφάλαιο 1ο : Γενικά στοιχεία της εργασίας

1. Εισαγωγή

Η ποιότητα της επικοινωνίας αποτελεί μια βασική προϋπόθεση για τη σωστή λειτουργία των χώρων διδασκαλίας, όπως τα αμφιθέατρα. Προκειμένου η ποιότητα να παραμένει υψηλή, είναι απαραίτητη η μελέτη της ακουστικής του χώρου ώστε να αποφεύγονται ανεπιθύμητα φαινόμενα και συμπεριφορές του ήχου και να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή μετάδοση. Όσο καλύτερες συνθήκες ακουστικής επικρατούν σε έναν χώρο όπως το αμφιθέατρο, όπου φοιτητές και καθηγητές περνούν πολλές ώρες της ημέρας, τόσο αυξάνεται η κατανόηση της ομιλίας, μειώνεται η κούραση των ακροατών αλλά και των ομιλητών καθώς δεν χρειάζεται να καταβάλλουν ιδιαίτερη προσπάθεια για να γίνουν αντιληπτοί. Παράλληλα, ένα σύγχρονο αμφιθέατρο όπως και το εξεταζόμενο, μπορεί να φιλοξενήσει διάφορες δραστηριότητες του πανεπιστημίου καλύπτοντας τις ακουστικές απαιτήσεις τους κάθε φορά μέσω μικρών αλλαγών στην ακουστική διαμόρφωση. Η μεταβλητή ακουστική του χώρου μπορεί να βοηθήσει στην ευελιξία του, προκειμένου να καλύπτει μια μεγαλύτερη γκάμα εκδηλώσεων το ίδιο αποτελεσματικά. Στη παρούσα διπλωματική εργασία, μελετάται η ακουστική συμπεριφορά του αμφιθεάτρου μέσα από επιτόπιες μετρήσεις και αναλύσεις δεικτών όπως ο χρόνος αντήχησης (RT60), Early Decay Time (EDT) κτλ, προσομοίωση της ακουστικής συμπεριφοράς με χρήση κατάλληλου λογισμικού και τέλος πρόταση για βελτιστοποίηση των ακουστικών συνθηκών.

1.1 Αντικείμενο της εργασίας

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να πραγματοποιηθεί μια πλήρης ανάλυση της ακουστικής συμπεριφοράς του κεντρικού αμφιθεάτρου του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, ΑΠ3-8. Αφού πρώτα καταγραφούν μέσω βιβλιογραφίας οι απαραίτητοι δείκτες, οι κατάλληλες τιμές αυτών για τις χρήσεις του αμφιθεάτρου και η μεθοδολογία για την εκτέλεση των μετρήσεων, στη συνέχεια θα αναλυθούν τα στοιχεία του αμφιθεάτρου, δηλαδή δομικά στοιχεία της αίθουσας, διαστάσεις, υλικά κτλ. Ακόμα, εκτός των δεικτών που θα μετρηθούν, μέσω προσομοίωσης στο πρόγραμμα CATT-ACOUSTIC, θα αναλυθεί η συμπεριφορά του αμφιθεάτρου στην τρέχουσα κατάστασή του, και θα γίνουν στοχευμένες προτάσεις για τη βελτίωση της ακουστικής, οι οποίες θα δοκιμαστούν στην μοντελοποίηση.

1.2 Προσδοκώμενα Αποτελέσματα

Μετά το πέρας της μελέτης, αναμένεται να έχουν εξαχθεί στοιχεία που αποτελούν βασικά χαρακτηριστικά της ακουστικής του αμφιθεάτρου όπως ο χρόνος αντήχησης αλλά και δείκτες ευκρίνειας οι οποίοι καθορίζουν την ποιότητα της ομιλίας και τη καταλληλότητα του χώρου και για άλλες χρήσεις. Με το τρόπο αυτό, θα μπορεί να εξεταστεί κατά πόσο το αμφιθέατρο είναι κατάλληλο για τη βασική του χρήση, δηλαδή την ομιλία, αλλά και σε ποιους τομείς υστερεί συγκρίνοντας τις τιμές των δεικτών με τις κατάλληλες τιμές της βιβλιογραφίας. Ακόμα θα συσχετιστούν τα ακουστικά χαρακτηριστικά του αμφιθεάτρου με τη διάταξη του χώρου, τη γεωμετρία του και τα κατασκευαστικά του υλικά, προκειμένου να αναδειχθούν περισσότερο οι παράγοντες που επηρεάζουν την ακουστική συμπεριφορά. Τέλος μέσω της μοντελοποίησης

θα προκύψουν απτά αποτελέσματα για την ακουστική συμπεριφορά του χώρου στη τωρινή του κατάσταση αλλά και για την δράσεις βελτίωσης ή/και μεταβολής της ακουστικής του χώρου που θα προταθούν.

1.3 Δομή της εργασίας

Στο 2ο κεφάλαιο περιγράφονται βασικά φαινόμενα του ήχου και έννοιες όπως η αντήχηση αλλά και δείκτες οι οποίοι χαρακτηρίζουν την ακουστική ποιότητα των κλειστών χώρων. Στο 3ο κεφάλαιο αναλύεται η συμπεριφορά του ήχου στους εσωτερικούς χώρους και λεπτομέρειες για τον ακουστικό σχεδιασμό αμφιθεάτρων. Στο 4ο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια ιστορική ανασκόπηση της ακουστικής κλειστών χώρων με παραδείγματα από περιπτώσεις του 18ου αιώνα μέχρι σήμερα. Στο 5ο κεφάλαιο αναλύεται η μεθοδολογία των ακουστικών μετρήσεων που ακολούθησαν, τα πρότυπα στα οποία βασίστηκαν οι μετρήσεις, οι τεχνικές, καθώς και ο εξοπλισμός. Στο 6ο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μετρήσεις, τα αποτελέσματα και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων και στο 7ο η μοντελοποίηση του χώρου, η προσομοίωση της ακουστικής συμπεριφοράς του και οι προτάσεις για τη βελτίωσή της σύμφωνα με τις επιθυμητές χρήσεις του.

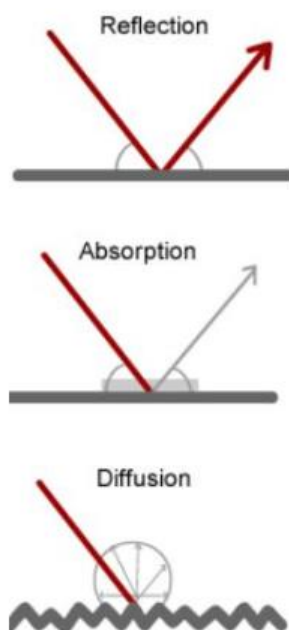
Κεφάλαιο 2ο : Θεωρητικές έννοιες ακουστικής

2. Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για τη κατανόηση των ακουστικών φαινομένων που συμβαίνουν σε ένα κλειστό χώρο. Εκτός αυτών, παρουσιάζονται επίσης οι βασικοί δείκτες ακουστικής όπως ο χρόνος αντήχησης, πρώιμος χρόνος αντήχησης, δείκτες ευκρίνειας κτλ. Προκειμένου να ακολουθήσει μια ορθή ερμηνεία στα αποτελέσματα των επιτόπιων μετρήσεων που θα ακολουθήσουν αλλά και της προσομοίωσης του χώρου στα επόμενα κεφάλαια.

2.1 Κυματικά φαινόμενα του ήχου

1. **Ανάκλαση** : Το φαινόμενο της ανάκλασης εμφανίζεται όταν κατά τη παραγωγή ενός ήχου από μια πηγή, τα ηχητικά κύματα συναντούν εμπόδια μεγαλύτερων διαστάσεων από τα μήκη των κυμάτων. Έτσι μετά τη πρόσκρουση σε επιφάνειες, τοίχους κτλ, η κατεύθυνση διάδοσης των κυμάτων αλλάζει (Everest,2001)
2. **Απορρόφηση** : Όταν τα ηχητικά κύματα προσπίπτουν σε μια επιφάνεια, η ηχητική τους ενέργεια μπορεί να διαπεράσει την επιφάνεια, να ανακλαστεί από αυτή και να απορροφηθεί. Τα παραπάνω μπορούν να συμβούν ταυτόχρονα σε επιφάνειες από πορώδη υλικά. Το μέρος της ενέργειας που απορροφάται από το υλικό, μετατρέπεται σε θερμότητα μέσω της τριβής (Everest, 2001)
3. **Διάχυση** : Όταν εμφανίζεται το φαινόμενο της διάχυσης, ηχητικά κύματα προσκρούουν σε τραχιές επιφάνειες και έτσι η διάδοσή τους γίνεται τυχαία. Κατά τη πρόσκρουσή τους, ένα μέρος της ενέργειας έχει απορροφηθεί και έτσι τα παραγόμενα κύματα μετά την εμφάνιση του φαινομένου έχουν μικρότερη ενέργεια (Τσινίκας, 1990).



Σχήμα 2.1 : Απεικόνιση φαινομένων Ανάκλασης, Απορρόφησης, Διάχυσης

4. **Διάθλαση** : Η διάθλαση παρατηρείται όταν εμφανίζονται διαφορές στη πυκνότητα του μέσου διάδοσης είτε αλλαγή μέσου διάδοσης. Για παράδειγμα όταν η διάδοση γίνεται στον αέρα και υπάρξει μεταβολή στη θερμοκρασία, αλλάζει και η πυκνότητα. Σε τέτοιες περιπτώσεις μεταβάλλεται η ταχύτητα της διάδοσης των ηχητικών κυμάτων και αλλάζει και η πορεία (Everest, 2001).
5. **Περίθλαση** : Στη περίπτωση όπου τα ηχητικά κύματα κατά τη διάδοσή τους συναντήσουν κάποιο εμπόδιο με διαστάσεις οι οποίες είναι μικρότερες ή παραπλήσιες με τα μήκη τους τότε η πορεία τους μεταβάλλεται και τα κύματα περιθλώνται γύρω από το εμπόδιο (Everest, 2001).

2.1.1 Συμβολή κυμάτων- Στάσιμα κύματα

Σε εσωτερικούς χώρους όπου υπάρχει παραγωγή ήχου από μια ηχητική πηγή εμφανίζονται τα φαινόμενα της συμβολής κυμάτων και των στάσιμων. Ειδικά σε μικρούς χώρους τα φαινόμενα της συμβολής εμφανίζονται εντονότερα, καθώς η ηχητική πίεση σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου είναι το άθροισμα της πίεσης που προκύπτει από τη πηγή απευθείας αλλά και της πίεσης που προέρχεται από τις ανακλάσεις που συμβαίνουν μέσα στο χώρο. Όσο για τα στάσιμα κύματα, αυτά εμφανίζονται στη περίπτωση που σε κάποιο σημείο του χώρου συναντηθούν δύο επίπεδα κύματα. Ο χαρακτηρισμός ενός χώρου ως μικρός, μεγάλος ή πολύ μεγάλος προκύπτει από τη μέγιστη διάσταση του χώρου σε σχέση με το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου ήχου. Αν η μεγαλύτερη διάσταση του χώρου είναι το λιγότερο διπλάσια από το μήκος κύματος του ήχου τότε ο χώρος χαρακτηρίζεται ως μεγάλος. Συνεπώς η κατηγοριοποίηση του χώρου αλλάζει ανά συχνότητα, δηλαδή ο ίδιος χώρος μπορεί να θεωρείται μικρός μέχρι μια συγκεκριμένη συχνοτική τιμή και μεγάλος για διαφορετικό συχνοτικό εύρος. (Σκαρλάτος, 2021).

2.1.2 Ηχώ- πολλαπλή ηχώ

Το φαινόμενο της ηχούς εμφανίζεται όταν σε έναν εσωτερικό χώρο έχουμε εκπομπή ήχου, και αμέσως μετά από την απευθείας εκπομπή του, γίνει αντιληπτό κάποιο ηχητικό σήμα που προέρχεται από ανάκλαση. Η ηχώ αποτελεί ένα φαινόμενο μη επιθυμητό κατά κανόνα, καθώς δυσκολεύει την επικοινωνία, αλλοιώνει τη μουσική και γενικά υποβαθμίζει την καλή ακουστική. Η πολλαπλή ηχώ (flutter echo) εμφανίζεται όταν στον χώρο έχουμε παράλληλες επιφάνειες, οι οποίες είναι πολύ ανακλαστικές και έτσι σύντομοι ήχοι παγιδεύονται ανάμεσα στις επιφάνειες και προκαλούν επαναλαμβανόμενη ηχώ.

2.2 Αντήχηση

Όπως προαναφέρθηκε, στους εσωτερικούς χώρους διάφορα κυματικά φαινόμενα λαμβάνουν χώρα κατά την εκπομπή ήχων. Εμφανίζονται ανακλάσεις από την πρόσκρουση ηχητικών κυμάτων σε επιφάνειες, απορρόφηση μέρους της ενέργειας κτλ. Όταν σταματήσει η εκπομπή ήχου από τη πηγή, η ηχητική ενέργεια δεν μηδενίζεται ακαριαία, αντίθετα διατηρείται στο χώρο για λίγο χρόνο φθίνοντας εκθετικά έως ότου εξαφανιστεί εντελώς. Το παραπάνω φαινόμενο ονομάζεται αντήχηση. Η αντήχηση αποτελεί ένα επιθυμητό χαρακτηριστικό στους

χώρους μέσω του οποίου μπορούμε να ελέγξουμε την ακουστική ποιότητα των χώρων (Σκαρλάτος, 2021).

2.3 Επισκόπηση δεικτών ακουστικής

Η ακουστική ποιότητα ενός χώρου χαρακτηρίζεται από τη μέτρηση ορισμένων δεικτών, οι οποίοι δείχνουν το πως συμπεριφέρεται ο ήχος και πως επηρεάζεται από τη γεωμετρία και τα υλικά του χώρου. Ειδικότερα, σε περιπτώσεις όπου οι χώροι χρησιμοποιούνται για κατανόηση ομιλίας, είναι απαραίτητη η μέτρηση συγκεκριμένων δεικτών οι οποίοι δίνουν στοιχεία για τις ανακλάσεις που συμβαίνουν μέσα στο χώρο και πως επηρεάζουν την υποκειμενική αντίληψη των ήχων μέσα στο συγκεκριμένο περιβάλλον. Παρακάτω παρατίθενται οι δείκτες που προαναφέρθηκαν, ο τρόπος υπολογισμού τους, και ενδεικτικές τιμές τους.

2.3.1 Χρόνος αντήχησης $RT60$

Ο χρόνος αντήχησης αποτελεί τον καθοριστικό παράγοντα που επηρεάζει την ακουστική ποιότητα ενός χώρου. Για παράδειγμα ένας χώρος με πολύ μικρό χρόνο αντήχησης δεν θα δημιουργούσε το αίσθημα ζωντάνιας στον ήχο και θα αφαιρούσε την αίσθηση φυσικότητας του ήχου, αντίθετα χώροι με πολύ μεγάλους χρόνους αντήχησης δημιουργούν δυσκολίες στην κατανόηση της ομιλίας, προβλήματα ηχούς και γενικότερα κακές ακουστικές συνθήκες. Χρόνο αντήχησης, $RT60$, ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται ώστε η στάθμη του ήχου σε ένα σημείο να μειωθεί κατά 60 dB αφού έχει σταματήσει η εκπομπή ήχου από τη πηγή (Σκαρλάτος 2021). Οι παράγοντες που επηρεάζουν τον χρόνο αντήχησης σε έναν εσωτερικό χώρο είναι η απορρόφηση και ο όγκος του χώρου. Το 1898 η έννοια του χρόνου αντήχησης προτάθηκε από τον W.C Sabine με τη σχέση υπολογισμού.

$$RT60 = 0,161 \cdot \frac{V}{A}$$

Όπου V (m^3) ο όγκος του κλειστού χώρου και A (m^2) η συνολική απορρόφηση του χώρου, η οποία υπολογίζεται από τον τύπο :

$$A = s \cdot \bar{\alpha}$$

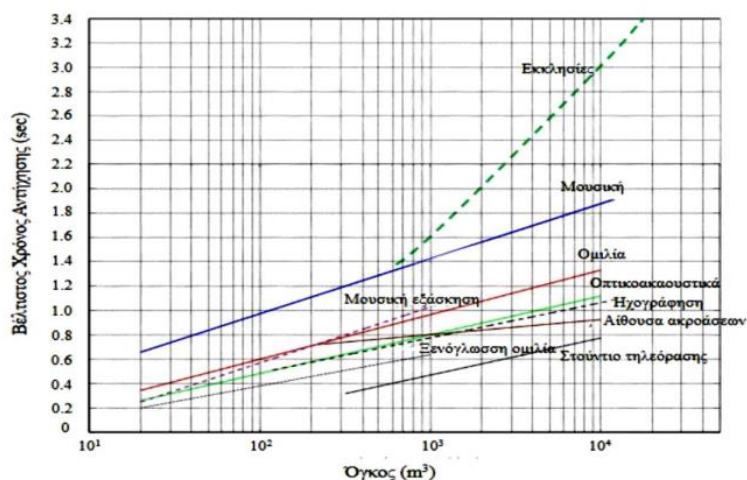
όπου s το σύνολο των επιφανειών και α ο συντελεστής απορρόφησης.

Για χώρους με συντελεστή απορρόφησης $\alpha > 0,3$ προτάθηκε η παρακάτω σχέση από τους Norris & Eyring

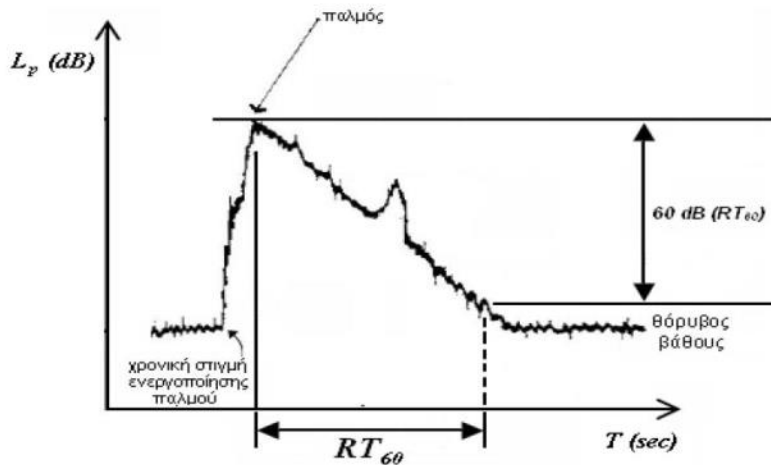
$$\text{Όπου } AN, S \cdot \ln \left(1 - \overline{(\alpha)} \right)^{-1}$$

με S το συνολικό εμβαδό των επιφανειών του χώρου (Κοντομίχος κ.α., 2013). Για τιμές απορρόφησης $\alpha \ll 1$ οι τιμές του χρόνου αντήχησης είναι όμοιες με τον τρόπο υπολογισμού του Sabine, όμως ο τρόπος υπολογισμού Norris & Eyring θεωρείται ότι προσφέρει ακριβέστερους χρόνους αντήχησης (Vigran, 2008).

Όπως προαναφέρθηκε, ο χρόνος αντήχησης παίζει κομβικό ρόλο στην ακουστική ποιότητα του χώρου και μπορεί να συμβάλλει θετικά στη χρήση μιας αίθουσας. Έχει παρατηρηθεί ότι ανάλογα τη χρήση για την οποία προορίζεται ένας χώρος, τα κατάλληλα χαρακτηριστικά αντήχησης μπορούν να καλυτερέψουν τις ακουστικές συνθήκες. Για παράδειγμα, μεγάλες τιμές του χρόνου αντήχησης σε χώρους, δίνουν την αίσθηση της ζωντάνιας στον ήχο καθώς από τις ανακλάσεις ενισχύεται ο όγκος της ηχητικής πληροφορίας και η διάρκειά της. Το παραπάνω χαρακτηριστικό που προσδίδουν οι μεγάλοι χρόνοι αντήχησης, είναι επιθυμητό σε χώρους όπως εκκλησίες, αίθουσες για συναυλίες, ακρόαση μουσικής κτλ. Ενώ σε χώρους όπου η προτεραιότητα είναι διαφορετική, όπως σε αίθουσες διδασκαλίας, απαιτούνται μικρότεροι χρόνοι αντήχησης καθώς πρέπει να εξασφαλιστεί η κατανόηση της ομιλίας. Οι μεγάλοι χρόνοι αντήχησης δημιουργούν επικαλύψεις στην ομιλία λόγω των ανακλάσεων και έτσι δεν γίνεται κατανοητή. Συνοψίζοντας, ο βέλτιστος χρόνος αντήχησης δεν είναι μια τιμή για όλες τις περιπτώσεις. Εξαρτάται από το στόχο για τον οποίο προορίζεται ο χώρος. Έτσι, από τη βιβλιογραφία έχουμε ανακτήσει εύρη τιμών για το χρόνο αντήχησης ανάλογα τα μεγέθη των χώρων και ανάλογα τη χρήση για την οποία προορίζονται.



Σχήμα 2.2 : Κατάλληλες τιμές χρόνου αντήχησης για κάθε χρήση και όγκο (Κοντομίχος κ.α., 2013)



Σχήμα 2.3 : Εμφάνιση χρόνου αντήχησης σε γράφημα κρουστικής απόκρισης χώρου (Σωτηροπούλου, 2015)

Εκτός του χρόνου αντήχησης RT_{60} , χρησιμοποιούνται και διαφορετικοί τύποι χρόνων αντήχησης. Ειδικότερα σε χώρους με ανομοιόμορφη απορρόφηση, σε χώρους όπου υπάρχουν παράλληλες επιφάνειες που ο ήχος δεν μπορεί να εξασθενήσει ομοιόμορφα προς το σύνολο του χώρου και δημιουργείται το φαινόμενο της πολλαπλής ηχούς (flutter echo) που προαναφέραμε. Σε αυτές τις περιπτώσεις όπου τα χαρακτηριστικά των χώρων επιδρούν στον ρυθμό της εξασθένησης του ήχου χρησιμοποιούνται άλλοι τύποι. Ακόμα, η ηχητική ενέργεια η οποία παίζει κύριο ρόλο στην ακουστική των χώρων, προέρχεται από τις αρχικές ανακλάσεις των ήχων. Οι ανακλάσεις οι οποίες ακολουθούν αργότερα έχουν χάσει μεγάλο μέρος της ηχητικής ενέργειας και έτσι δεν αλλάζουν κομβικά την ακουστική του χώρου. Έτσι, επειδή ο ρυθμός εξασθένησης του ήχου δεν είναι τελείως ομαλός, καθώς μιλάμε για εσωτερικούς χώρους και όχι για τελείως διάχυτο πεδίο, δεν χρησιμοποιούμε τον χρόνο αντήχησης RT_{60} αλλά διαφορετικούς χρόνους (Σκαρλάτος, 2021).

2.3.2 Πρώιμος Χρόνος Αντήχησης (EDT)

Ο πρώιμος χρόνος αντήχησης είναι 6 φορές ο χρόνος που χρειάζεται για να μειωθεί η αρχική ενέργεια του ήχου κατά 10 dB αμέσως μετά τη διακοπή της εκπομπής του ήχου. Αντιστοιχεί στο πως εξασθενείται η ηχητική ενέργεια των πρώιμων ανακλάσεων που φτάνει στον ακροατή (Rossing, 2007, Everest & Pohlmann, 2012). Ο πρώιμος χρόνος αντήχησης σχετίζεται με τον τρόπο με τον οποίο αντιλαμβανόμαστε υποκειμενικά την αντήχηση ενός χώρου για ομιλία, ακρόαση μουσικής κτλ, καθώς το σύστημα ακοής συνδυάζει το σήμα που προέρχεται απευθείας από τη πηγή με τις πρώιμες ανακλάσεις. Έτσι, υψηλές τιμές του πρώιμου χρόνου

αντήχησης δείχνουν ότι ο χώρος χαρακτηρίζεται από αυξημένη αντήχηση και λιγότερη ευκρίνεια (Κοντομίχος, 2013).

2.3.3 Χρόνοι T_{10} , T_{20} , T_{30}

Ο χρόνος T_{10} ορίζεται ως 6 φορές ο χρόνος που απαιτείται ώστε να ελαττωθεί από -5 έως -15 dB ο ήχος. Αντίστοιχα ο T_{20} 3 φορές ο χρόνος για μείωση από -5 έως -25, και T_{30} , 2 φορές ο χρόνος για μείωση από -5 έως -35 dB. Έτσι με την βοήθεια αυτών των χρόνων αντήχησης είμαστε σε θέση να έχουμε μια πιο ρεαλιστική μέτρηση με καλύτερα αποτελέσματα για την εξασθένιση της ηχητικής ενέργειας σε ένα χώρο καθώς η μέτρηση της εξασθένισης των 60 dB στη πράξη είναι συχνά δύσκολη.

2.3.4 Ευκρίνεια

Εκτός των χρόνων αντήχησης, υπάρχουν διάφορες παράμετροι οι οποίες λαμβάνονται υπόψιν κατά τον ακουστικό σχεδιασμό και κατά την ανάλυση της συμπεριφοράς των χώρων ανάλογα τη χρήση τους. Για να προσδιοριστούν αυτές οι ακουστικές παράμετροι η διαδικασία περιλαμβάνει τη μέτρηση της κρουστικής απόκρισης του χώρου. Έτσι, για τον όρο της ευκρίνειας χρησιμοποιείται ένα χρονικό όριο te στον υπολογισμό, το οποίο διαχωρίζει την ενέργεια που προέρχεται από τον απευθείας ήχο και τις πρώιμες ανακλάσεις, και την ενέργεια από τις καθυστερημένες ανακλάσεις λόγω αντήχησης. Οι μεγάλες τιμές της ευκρίνειας υποδηλώνουν ότι η κυρίαρχη ηχητική ενέργεια που φτάνει πρώτα στον ακροατή προέρχεται από το απευθείας σήμα και τις πρώιμες ανακλάσεις, άρα ο ήχος είναι πιο κατανοητός και λιγότερο θολός. Ο δείκτης της ευκρίνειας είναι πολύ σημαντικός, ιδιαίτερα όταν αναφερόμαστε σε χρήσεις χώρων για ομιλία, διδασκαλία, όπου η κατανόηση της ομιλίας και η καθαρότητα του ήχου είναι προτεραιότητα (Κοντομίχος, 2013). Οι τιμές που μπορεί να πάρει το χρονικό όριο te , είναι 50 και 80 ms, καθώς τα 50 ms χρησιμοποιούνται για την ευκρίνεια της ομιλίας ενώ τα 80 για σήματα μουσικής. Οι τύποι υπολογισμού της ευκρίνειας δίδονται παρακάτω :

$$c_{50} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\int_0^{50ms} |h(t)|^2 dt}{\int_{50ms}^{\infty} |h(t)|^2 dt} \right)$$
$$c_{80} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\int_0^{80ms} |h(t)|^2 dt}{\int_{80ms}^{\infty} |h(t)|^2 dt} \right)$$

2.3.5 Διακριτότητα

Ο όρος της διακριτότητας εκφράζει το λογαριθμικό λόγο της ηχητικής ενέργειας της κρουστικής απόκρισης πριν το χρονικό όριο te προς τη συνολική ηχητική ενέργεια. Οι τιμές που παίρνει το όριο είναι αντίστοιχες με την περίπτωση της ευκρίνειας, δηλαδή 50 και 80 ms για ομιλία και μουσική αντίστοιχα (Rosssing, 2007, Everest & Pohlmann, 2012). Και σε αυτή τη περίπτωση αξιολογείται η σημαντικότητα των πρώιμων ανακλάσεων καθώς συμβάλουν στην ενίσχυση του απευθείας ήχου. Ειδικότερα έχει παρατηρηθεί ότι οι πολύ πρώιμες

ανακλάσεις, οι οποίες συμβαίνουν από τα πρώτα 10-20 ms μπορεί να συμβάλλουν και κατά 10 dB περισσότερο από τον απευθείας ήχο της πηγής (Σκαρλάτος,2021).

$$d_{50} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\int_0^{50} |h(t)|^2 dt}{\int_0^{\infty} |h(t)|^2 dt} \right)$$

$$d_{80} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\int_0^{80} |h(t)|^2 dt}{\int_0^{\infty} |h(t)|^2 dt} \right)$$

2.3.6 Ακουστική απολαβή

Η ακουστική απολαβή G, μετρά τον λογαριθμικό λόγο της συνολικής ενέργειας της κρουστικής απόκρισης προς την ενέργεια που έχει ο απευθείας ήχος σε απόσταση 10 μέτρων από τη πηγή (Rossing,2007, Everest & Pohlmann,2012). Από τη παράμετρο της ακουστικής απολαβής όπου στην ουσία συγκρίνει τη στάθμη της ενέργειας που φτάνει από τον απευθείας ήχο με την ολική ενέργεια, μπορεί να προσδιοριστεί το κατά πόσο κερδίζουμε από ενισχύσεις λόγω ανακλάσεων στη συγκεκριμένη θέση μέτρησης. Η ακουστική απολαβή, δηλαδή η ενίσχυση της στάθμης σε ένα σημείο σε σύγκριση με τον απευθείας ήχο, μεταβάλλεται από τη δομή και τη γεωμετρία του χώρου, τα υλικά από τα οποία αποτελείται και την απορρόφησή τους.

Όπου t_{dir} το χρονικό όριο που καθορίζεται από το πόσο διαρκεί το σήμα της πηγής (Κοντομίχος,2013).

2.3.7 Δείκτης Μετάδοσης Ομιλίας STI

Ο δείκτης STI μετρά το κατά πόσο ένα μέσο είναι ικανό να μεταδίδει ήχο ομιλίας χωρίς να αλλοιώνει τα χαρακτηριστικά της. Ως σημείο αναφοράς έχουμε την πηγή του ήχου αυτούσια ενώ λαμβάνονται υπόψιν οι διαφορές στην ομιλία καθώς ο ήχος μεταδίδεται. Ο δείκτης STI συνυπολογίζει το θόρυβο αλλά και το αντηχητικό περιβάλλον στο χώρο, οι τιμές που παίρνει είναι ανάμεσα στο 0 και το 1, ενώ όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του δείκτη τόσο καλύτερη είναι η κατανόηση της ομιλίας (Ballou, 2008). Ο δείκτης STI αποτελεί έναν αντικειμενικό τρόπο αξιολόγησης της κατανόησης ομιλίας σε εσωτερικούς χώρους (Rossing,2007). Ένας τρόπος με τον οποίο μπορεί να υπολογιστεί πιο απλά ο δείκτης STI, είναι ο υπολογισμός του δείκτη RASTI (Rapid Speech Transmission Index), ο οποίος χρησιμοποιεί κατάλληλα διαμορφωμένα σήματα θορύβου σε καθορισμένες συχνότητες. Για τον υπολογισμό χρησιμοποιείται η συνάρτηση MTF, δηλαδή ο μετασχηματισμός Fourier του τετραγώνου της κρουστικής απόκρισης $h(t)$ προς τη συνολική ενέργεια της κρουστικής (Κοντομίχος, 2013).

$$MTF = \frac{F\{h^2(t)\}}{\int_0^\infty |h(t)|^2 dt}$$

Subjective Intelligibility	STI Value
unsatisfactory	0.00–0.30
poor	0.30–0.45
satisfactory	0.45–0.60
good	0.60–0.75
excellent	0.75–1.00

Πίνακας 2-1 : Τιμές STI για την καταληπτότητα της ομιλίας (Ballou,2008)

2.3.8 Απώλεια συμφώνων AL

Ο δείκτης %ALcons αναπτύχθηκε από τον Peutz τη δεκαετία του 1970 και εκφράζει το πως επιδρά ένα αντηχητικό πεδίο στη κατανόηση της ομιλίας και συγκεκριμένα μας δίνει το ποσοστό απώλειας των συμφώνων. Χαμηλές τιμές του δείκτη μας δείχνουν ότι ο χώρος χαρακτηρίζεται από υψηλή καταληπτότητα της ομιλίας ενώ υψηλές τιμές, ότι το αντηχητικό πεδίο παρεμβαίνει σημαντικά στη κατανόηση του λόγου. Μεγάλες τιμές του δείκτη σχετίζονται με υψηλό θόρυβο υποβάθρου και αντήχηση. Ο Peutz χρησιμοποίησε ως κεντρική συχνότητα υπολογισμού τα 2 kHz, ωστόσο οι τιμές των 1000 Hz φαίνεται να παρουσιάζουν μεγαλύτερη απώλεια καταληπτότητας από τα 2000Hz (Ballou,2008) . Για τον υπολογισμό των %ALcons μέσω του δείκτη STI χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος.

$$ALcons = 170.5405 \cdot e^{-5.419 \cdot STI}$$

RASTI	%ALcons	Καταληπτότητα
0-0,3	>15	Κακή
0,3-0,45	15-12	Ικανοποιητική
0,45-0,6	12-8	Καλή
0,6-0,75	8-4	Πολύ καλή
0,75-1	<4	Τέλεια

Πίνακας 2-2 : τιμές RASTI, %ALCONS για αξιολόγηση καταληπτότητας της ομιλίας (Κοντομίχος,2013)

Τα χαρακτηριστικά τα οποία επιδρούν στην κατανόηση της ομιλίας και επηρεάζουν τους δείκτες που προαναφέρθηκαν, αφορούν τη πηγή και το μέσο στο οποίο γίνεται η αναπαραγωγή του ήχου. Πιο συγκεκριμένα:

- 1) Η ικανοποιητική συχνοτική απόκριση του μέσου
- 2) Οι τιμές χρόνου αντήχησης οι οποίες συμβάλλουν θετικά στη μετάδοση της ομιλίας

- 3) Η Ικανοποιητική στάθμη από τη πηγή ώστε να φτάνει στον ακροατή
- 4) Η Ηχώ, δηλαδή ανακλάσεις που επικαλύπτουν τον ήχο ο οποίος προέρχεται από τη πηγή
- 5) Ικανότητα του μέσου να αναπαράγει ποιοτικά τον ήχο
- 6) Θόρυβος υποβάθρου
- 7) Φαινόμενα επικάλυψης του ήχου, δηλαδή η αίσθηση απουσίας της ηχητικής πληροφορίας λόγω ανταγωνιστικών συχνοτήτων

2.4 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύθηκε το θεωρητικό μέρος το οποίο είναι απαραίτητο για τη κατανόηση της ακουστικής ενός χώρου. Μετά τη παρουσίαση των κυματικών φαινομένων του ήχου, εξετάστηκαν οι σημαντικότεροι ακουστικοί δείκτες : ο χρόνος αντήχησης RT και ο πρώιμος χρόνος αντήχησης, οι οποίοι περιγράφουν τη παρουσία και την εξασθένιση της ηχητικής ενέργειας σε ένα χώρο, οι δείκτες ευκρίνειας και διακριτότητας που εκφράζουν τη σχέση πρώιμης και όψιμης ενέργειας σε ένα χώρο, και τέλος η ακουστική απολαβή G και δείκτης μετάδοσης ομιλίας STI και Απώλειας Συμφώνων. Με τη συνδυαστική εξέταση των δεικτών της αντήχησης, της κατανομής της ενέργειας, ευκρίνειας και καταληπτότητας, θα υπάρξει η δυνατότητα να αξιολογηθεί η ακουστική συμπεριφορά του αμφιθεάτρου στα επόμενα κεφάλαια σε συνάρτηση με τον όγκο, τη γεωμετρία τα υλικά και τη χρήση του.

Κεφάλαιο 3ο : Ακουστική κλειστών χώρων

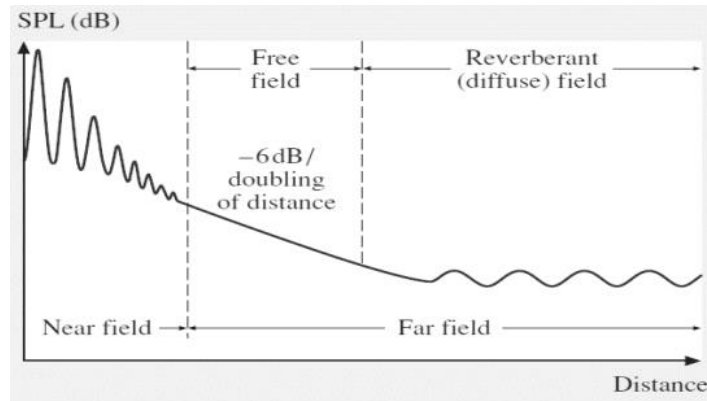
3. Εισαγωγή

Στους εσωτερικούς χώρους ο ήχος συμπεριφέρεται διαφορετικά από ότι στους εξωτερικούς. Λόγω των φαινομένων που παρατηρούνται, η ακουστική ποιότητα καθορίζεται από διαφορετικούς παράγοντες και χαρακτηριστικά του χώρου. Στη μελέτη της συμπεριφοράς του ήχου στους κλειστούς χώρους λαμβάνονται υπόψη φαινόμενα όπως η ανάκλαση, η απορρόφηση, καθώς μεταβάλλουν τις τιμές των δεικτών ακουστικής ποιότητας. Κατά την σχεδίαση, στόχος είναι η πρόβλεψη της συμπεριφοράς του ήχου μέσα στο συγκεκριμένο περιβάλλον και η επιλογή κατάλληλων υλικών και διαστάσεων ώστε να ελεγχθούν οι συνθήκες και να μεγιστοποιηθεί η ακουστική άνεση.

3.1 Ηχητικά πεδία σε κλειστούς χώρους

Στους κλειστούς χώρους η στάθμη του ηχητικού πεδίου εξαρτάται από την ενέργεια του απευθείας ήχου από τη πηγή αλλά και από τις στάθμες που φτάνουν στον ακροατή λόγω ανακλάσεων, δηλαδή από το αντηχητικό πεδίο του χώρου. Αν η διάδοση του ήχου γινόταν σε περιβάλλον στο οποίο δεν υπήρχαν εμπόδια και δεν συνέβαιναν ανακλάσεις, τότε το ηχητικό πεδίο θα ονομαζόταν ελεύθερο πεδίο. Στην περίπτωση των εσωτερικών χώρων ωστόσο, ένα μέρος της ηχητικής ενέργειας απορροφάται από τις επιφάνειες και έτσι το πεδίο που επικρατεί σε αυτούς τους χώρους ονομάζεται ημιαντηχητικό και χωρίζεται σε τρεις περιοχές (Σκαρλάτος, 2008).

- 1) Στο κοντινό πεδίο, το οποίο αφορά τη περιοχή εκείνη η οποία εκτείνεται μέχρι δύο μήκη κύματος απόσταση του εκπεμπόμενου ήχου από τη πηγή, στη περίπτωση που αυτή είναι σφαιρική και ισότροπη.
- 2) Στο μακρινό πεδίο, όπου εκεί η στάθμη της ηχητικής πίεσης μειώνεται κατά 6 dB σε κάθε διπλασιασμό της απόστασης
- 3) Στο αντηχητικό πεδίο, δηλαδή σε αποστάσεις μεγαλύτερες του μακρινού πεδίου, όπου πλέον η ηχητική στάθμη δεν επηρεάζεται από την απόσταση καθώς κυριαρχεί ο ήχος που προέρχεται από τις ανακλάσεις σε σχέση με το σήμα της πηγής.

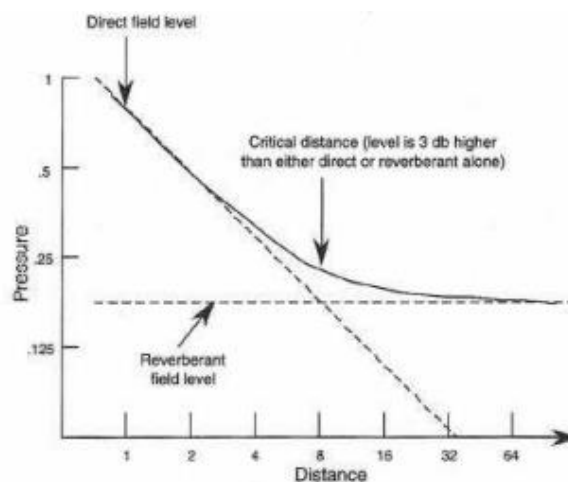


Σχήμα 3.1 : Ηχητικά πεδία (Rossing, 2007)

3.2 Κρίσιμη απόσταση

Το σημείο εκείνο στο οποίο το μακρινό πεδίο σταματά και ξεκινά το αντηχητικό πεδίο ονομάζεται κρίσιμη απόσταση από τη πηγή του ήχου. Πιο συγκεκριμένα, αποτελεί το σημείο εκείνο όπου η στάθμη η οποία προέρχεται από τη πηγή είναι ίση με τη στάθμη που προέρχεται από τις ανακλάσεις. Η κρίσιμη απόσταση d_c υπολογίζεται από τον τύπο : $d_c = \sqrt{\left(\frac{R \cdot Q}{16 \cdot \pi}\right)}$

Όπου R , η σταθερά του δωματίου και Q η κατευθυντικότητα της ηχητικής πηγής (Κοντομίχος, 2013).



Σχήμα 3.2 : Σχέση απευθείας και αντηχητικού πεδίου σε εσωτερικό χώρο (Maishanu, 2017)

3.3 Ακουστική Συμπεριφορά Αμφιθεάτρων

Σε κλειστούς χώρους όπως αμφιθέατρα τα ακουστικά κριτήρια που πρέπει να πληρούνται για να επιτευχθεί υψηλή ποιότητα είναι τα εξής. Ο θόρυβος υποβάθρου από εσωτερικές ή και από εξωτερικές πηγές θορύβου να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα. Σε περίπτωση όπου αυτό είναι αναγκαίο, να υπάρχει δυνατότητα ενίσχυσης του ήχου της πηγής, δηλαδή να υπάρχει επαρκής ηχητική στάθμη ώστε ο ήχος να γίνεται αντιληπτός και η ομιλία κατανοητή. Ο χρόνος

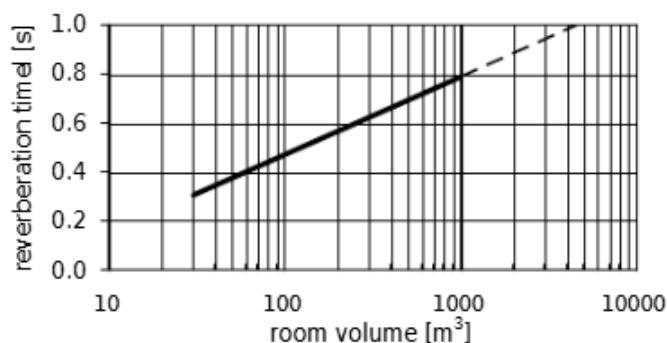
αντήχησης να είναι κατάλληλος ώστε να εξυπηρετεί κατάλληλα το σκοπό του αμφιθέατρου. Να αποφεύγονται ανεπιθύμητα φαινόμενα τα οποία υποβαθμίζουν την ακουστική ποιότητα του χώρου όπως η ηχώ.

3.3.1 Θόρυβος υποβάθρου

Ο θόρυβος υποβάθρου στα αμφιθέατρα προέρχεται από εξωτερικές πηγές θορύβου, όπως κίνηση αυτοκινήτων, αεροπλάνα κτλ. είτε από εσωτερικές όπως συστήματα θέρμανσης, κλιματισμού, ανεμιστήρες κτλ. Τα κριτήρια για υψηλή ακουστική ποιότητα απαιτούν χαμηλό θόρυβο υποβάθρου. Συγκεκριμένα όπως αναφέρεται στην Γερμανική οδηγία DIN 18041, ο θόρυβος υποβάθρου για υψηλές απαιτήσεις δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα 30 dB(A), ενώ σύμφωνα με το American National Standards Institute, στην οδηγία ANSI/ASA S12.60, για χώρους εκπαίδευσης που δεν ξεπερνούν τα 566m³ σε όγκο ο θόρυβος υποβάθρου δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα 35 dB αν και συνήθως ο θόρυβος μέσα στην αίθουσα φτάνει μέχρι τα 50-60 dB ή και περισσότερο. Επίσης στην οδηγία ANSI S12.60 αναφέρεται ότι ο θόρυβος υποβάθρου θα πρέπει να διατηρείται όσο πιο σταθερός γίνεται, με τη διαφορά του ισχυρότερου από τον πιο αδύναμο ήχο να είναι μέχρι 3 dB (Eggenschwiler,2005, ANSI/ASA S12.60/PART1-2010).

3.3.2 Χρόνος Αντήχησης

Ο χρόνος αντήχησης, εφόσον η χρήση που προορίζεται το αμφιθέατρο είναι για ομιλία, θα πρέπει να παίρνει χαμηλές τιμές προκειμένου να αποφευχθούν προβλήματα στην κατανόηση της ομιλίας λόγω ανακλάσεων. Σύμφωνα με την οδηγία DIN 18041 οι προτεινόμενοι χρόνοι αντήχησης για χώρους μέχρι 10000 m³ παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.3 : Προτεινόμενοι χρόνοι αντήχησης για Αμφιθέατρα ανάλογα τον όγκο τους (Eggenschwiler,2005)

3.4 Ακουστικός Σχεδιασμός Αμφιθεάτρου

Ο όγκος και η γεωμετρία του αμφιθεάτρου θα πρέπει να ευνοούν την καλή ακουστική και να μη δημιουργούν προβλήματα τα οποία καλούμαστε στη συνέχεια να λύσουμε. Αναλυτικότερα, ανάλογα τη χρήση για την οποία προορίζουμε τον χώρο, θα πρέπει να τηρούνται ορισμένες οδηγίες όπως οι τιμές του όγκου/ άτομο. Για παράδειγμα σύμφωνα με τον Σκαρλάτο (2021), σε χώρους στους οποίους ο όγκος ανά άτομο είναι μικρότερος από 4 m^3 , η ακουστική επηρεάζεται έντονα από τη πληρότητα του ακροατηρίου, ενώ σε χώρους όπου ο όγκος ανά άτομο είναι μεγαλύτερος από 10 m^3 η επίδραση είναι αμελητέα. Επίσης οι ιδανικές τιμές όγκου/άτομο αλλάζουν ανάλογα τη χρήση της αίθουσας. Για χρήση ομιλίας ιδανικές τιμές είναι τα $3\text{-}5 \text{ m}^3$, ενώ για μουσικές εκδηλώσεις $6\text{-}9 \text{ m}^3$. Ακόμα, θα πρέπει να ευνοείται η ομοιόμορφη διάδοση του ήχου, η αποφυγή στάσιμων κυμάτων και η παγίδευση του ήχου σε συγκεκριμένα σημεία.

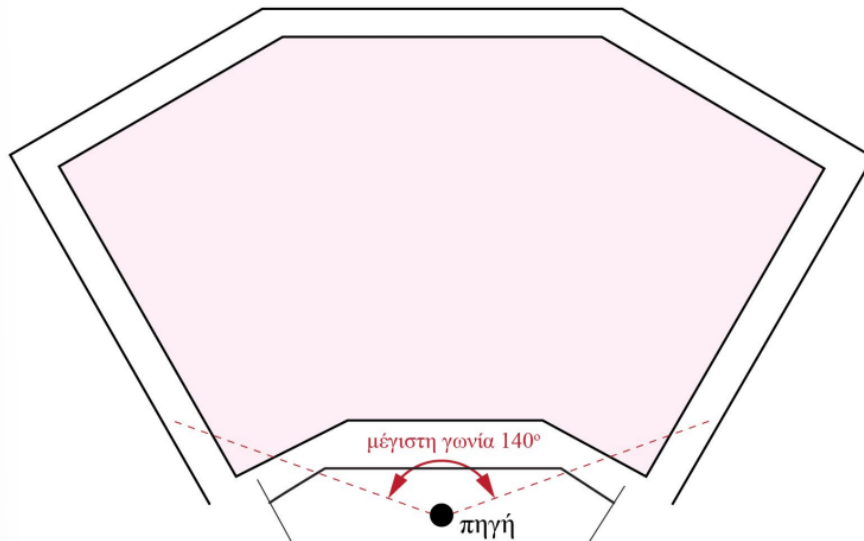
Όταν ένας μηχανικός παρεμβαίνει στο χώρο για να βελτιωθεί η ακουστική επίδοση, καλείται να σχεδιάσει τις επιφάνειες του αμφιθεάτρου έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα ακουστικό περιβάλλον το οποίο ευνοεί την καταληπτότητα της ομιλίας στους ακροατές σε όποια θέση και να βρίσκονται μέσα στο χώρο, ακόμα και χρησιμοποιώντας συστήματα ενίσχυσης τα οποία υποβοηθούν την ακουστική. Χρησιμοποιώντας μικρόφωνα, ενισχυτές και ηχεία τα οποία είναι τοποθετημένα στα κατάλληλα σημεία ώστε ο ήχος που φτάνει στους ακροατές να είναι καθαρός και κατανοητός μπορεί να επιτευχθεί ένα αξιοπρεπές αποτέλεσμα που επιτελεί επαρκώς το σκοπό του ενώ ταυτόχρονα αντιμετωπίζουμε τα υπόλοιπα προβλήματα της αίθουσας. Ακολουθώντας οδηγίες και πρότυπα, ο μηχανικός με τη χρήση ηχοαπορροφητικών και ανακλαστικών υλικών τροποποιεί τον χρόνο αντήχησης και τη διασπορά του ήχου μέσα στο αμφιθέατρο. Για να αποφευχθούν φαινόμενα ηχούς η χρονική διαφορά ανάμεσα στον απευθείας και τον ήχο που προέρχεται από ανακλάσεις δεν πρέπει να ξεπερνά τα 30 ms . Οι τοίχοι του αμφιθεάτρου θα πρέπει να χαρακτηρίζονται από δείκτη ηχομείωσης (STC) πάνω από 50, ενώ η επιφάνεια του πίσω και των πλευρικών τοίχων θα πρέπει να είναι τραχιά. Οι τοίχοι μπορούν να επενδυθούν με τα κατάλληλα ηχοαπορροφητικά υλικά τα οποία μπορεί να καλύπτουν από το 50 έως το 100% της συνολικής επιφάνειας. Η οροφή θα πρέπει να μην καλύπτεται με ηχοαπορροφητικά υπερβολικά, δηλαδή πάνω από το 50% της επιφάνειας και αν υπάρχουν προβλήματα διάδοσης του ήχου σε κάποιο σημείο του ακροατηρίου θα πρέπει να τροποποιηθεί η γεωμετρία της οροφής ή να υποβοηθηθεί η ακουστική με τη χρήση κάποιου συστήματος. Στο δάπεδο συχνά χρησιμοποιείται μοκέτα για τη κάλυψη, η οποία θα πρέπει να συνυπολογίζεται μαζί με τα καθίσματα και την επένδυση τους κατά τον ακουστικό σχεδιασμό, και για κενές αλλά και για κατειλημμένες θέσεις.

Σε γενικές γραμμές στη γεωμετρία θα πρέπει να αποφεύγονται παράλληλοι τοίχοι ενώ οι πλευρικοί θα πρέπει να έχουν τη κατάλληλη κλίση προκειμένου η κατεύθυνση του ήχου να ευνοείται προς τις πίσω θέσεις. Όσον αφορά τον το πίσω τοίχο, και εκείνος θα πρέπει να είναι σε μικρή κλίση προκειμένου να μην είναι εντελώς παράλληλος με το μπροστά τοίχο και να μην υπάρχουν ανακλάσεις οι οποίες προκαλούν επιστροφή στον ομιλητή. Τέλος Η οροφή θα

πρέπει να είναι είτε κλιμακωτή είτε με κλίση, έτσι ώστε να ευνοούνται η ανακλάσεις προς το ακροατήριο (Pazara, et.al., 2019).

Οι ελάχιστες απαιτήσεις για αίθουσες που προορίζονται για ομιλία σύμφωνα με τον Eggenschwiler (2005) είναι οι παρακάτω. Η τιμή του δείκτη μετάδοσης ομιλίας STI θα πρέπει να είναι > 0.56 , η τιμή της Διακριτότητας $D_{50} > 0$ dB και ο δείκτης απώλειας συμφώνων $\%ALcons < 8\%$.

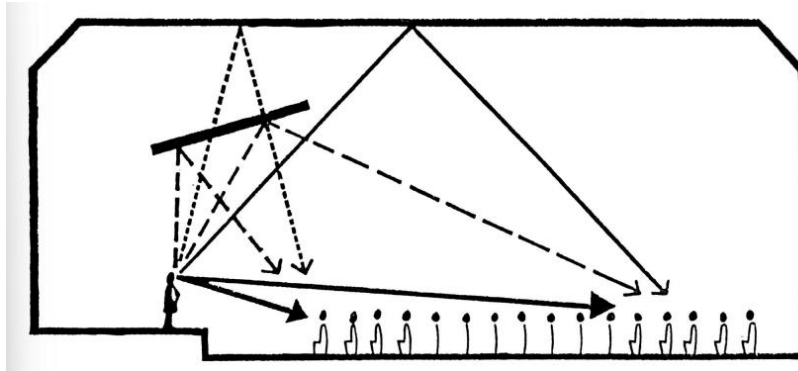
Εξασφαλίζοντας τις βέλτιστες ακουστικές συνθήκες για τα αμφιθέατρα, πρέπει να είμαστε σε θέση να τηρούμε ορισμένα κριτήρια κατά το σχεδιασμό. Σύμφωνα με τη Σωτηροπούλου (2010), καίριας σημασίας είναι η βελτιστοποίηση του απευθείας ήχου, της εξασφάλισης όσο περισσότερων πρώιμων ανακλάσεων, διατήρηση χαμηλών επιπέδου θορύβου και βελτιστοποίηση του χρόνου αντήχησης με τεχνικές που προαναφέρθηκαν. Το σχήμα βεντάλιας του αμφιθεάτρου και η διάταξη του ακροατηρίου σε κλίση φαίνεται να προσφέρει καλύτερες ακουστικές συνθήκες έναντι σε αίθουσες ορθογωνικής κάτοψης με το ακροατήριο σε ευθεία καθώς εξασφαλίζεται καλύτερα η πορεία του ήχου από τον πομπό στον δέκτη χωρίς εμπόδια. Συνεπώς η μείωση της χωρητικότητας μιας αίθουσας αποτελεί τεχνική σχεδιασμού καθώς επίσης και η χρήση εξωστών για να αυξηθεί η πληρότητα του χώρου χωρίς όμως να αυξάνονται οι αποστάσεις πηγής-ακροατή. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται διατάξεις αμφιθεατρικής ή και κυκλικής διάταξης. Στην αμφιθεατρική διάταξη, η γωνία του ακροατηρίου ως προς τον ακροατή βρίσκεται μέχρι 140° καθώς μετά από αυτή τη τιμή η κατευθυντικότητα μειώνεται.



Σχήμα 3.4 : Μέγιστη γωνία διάταξης ακροατηρίου ως προς τη πηγή σε αμφιθεατρική διάταξη (Σωτηροπούλου, 2015)

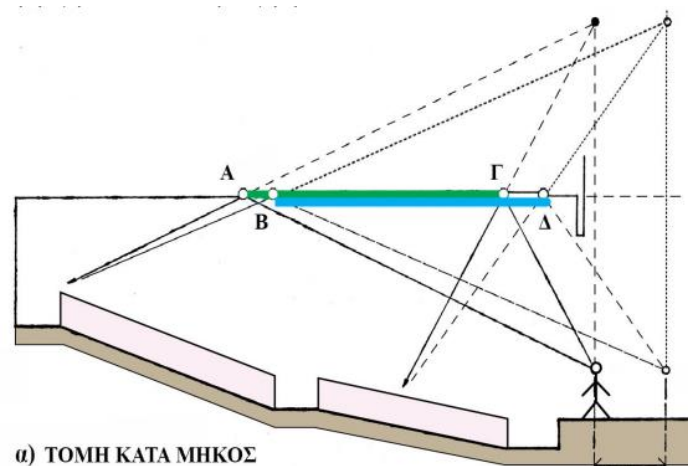
Όσον αφορά την εξασφάλιση των πρώιμων ανακλάσεων, η οποία αποτελεί πολύ σημαντικό φαινόμενο κατά το σχεδιασμό αμφιθεάτρων, χρησιμοποιούνται ανακλαστικές επιφάνειες είτε πάνω από τον ομιλητή, είτε στην οροφή είτε στις πλευρικές επιφάνειες ανά περίπτωση. Οι διαστάσεις των ανακλαστικών υλικών θα πρέπει να είναι μεγαλύτερες από το μήκος κύματος του ήχου που μας ενδιαφέρει να μεταδώσουμε και το υλικό κατασκευής θα πρέπει να είναι

άκαμπτο με λείο τελείωμα (πχ γυψοσανίδες, πλεξιγκλας κτλ). Για παράδειγμα σε αμφιθέατρα με υψηλή οροφή μπορεί να τοποθετηθεί ανακλαστήρας ακριβώς πάνω από τον ομιλητή σε κλίση προς το ακροατήριο.

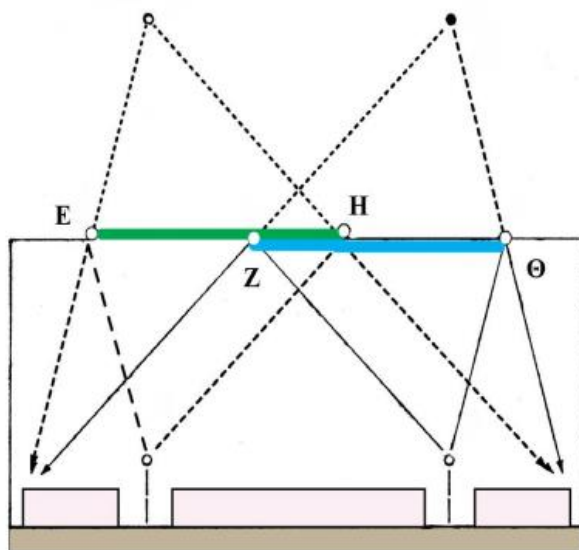


Σχήμα 3.5 : Τοποθέτηση κρεμασμένου ανακλαστήρα από την οροφή για κατεύθυνση του ήχου προς το ακροατήριο (Σωτηροπούλου, 2015)

Ενώ σε αίθουσες με χαμηλή οροφή ο ανακλαστήρας τοποθετείται εφαπτόμενος στην οροφή όπως στις παρακάτω εφαρμογές.

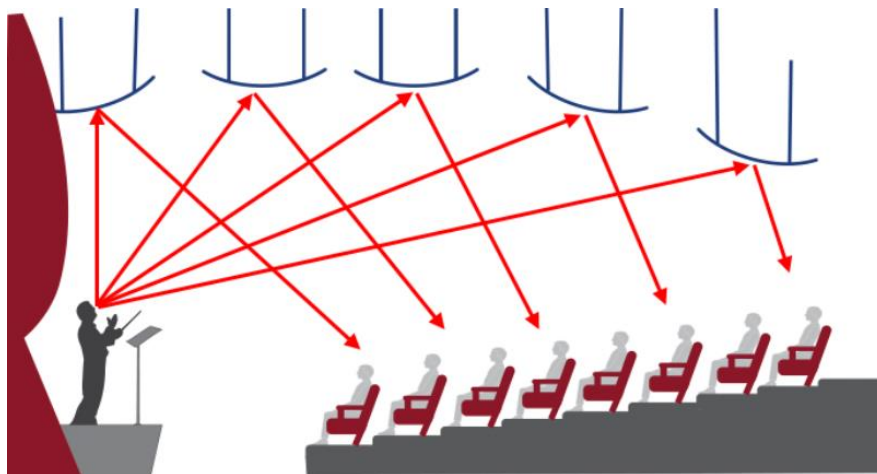


Σχήμα 3.6 : Τοποθέτηση ανακλαστήρα εφαπτόμενου στην οροφή (Σωτηροπούλου, 2015)



Σχήμα 3.7 : Εγκάρσια τομή τοποθέτησης ανακλαστήρα εφαπτόμενου στην οροφή (Σωτηροπούλου, 2015)

Αν και η παραπάνω τοποθέτηση ανακλαστήρα οφείλει συγκριτικά με τη μη τοποθέτησή του, ένα μειονέκτημα αποτελεί η μη εκμετάλλευση ολόκληρης της οροφής, συνεπώς δεν παράγονται έτσι χρήσιμες ανακλάσεις προς το ακροατήριο. Για αυτό το λόγο πολλές φορές χρησιμοποιείται ακουστική ψευδοροφή η οποία κατασκευάζεται με ανακλαστήρες οι οποίοι τοποθετούνται στην οροφή, προβάλλοντας τον παραγόμενο ήχο προς το ακροατήριο και ιδιαίτερα στοχεύοντας στις πίσω θέσεις όπου ο ήχος είναι δύσκολο να φτάσει.



Σχήμα 3.8 : Σχεδιάγραμμα τοποθέτησης ακουστικής ψευδοροφής από ανακλαστήρες (kineticsnoise.com, <https://kineticsnoise.com/spaces/auditoriums-performing-arts/reflection>)



Σχήμα 3.9 : Πρακτική εφαρμογή ακουστικής ψευδοροφής από ανακλαστήρες (kineticsnoise.com, <https://kineticsnoise.com/spaces/auditoriums-performing-arts/reflection>)



Σχήμα 3.10 : Κεντρικό αμφιθέατρο Triplex Center, Νέα Υόρκη, επενδυμένο με ακουστική ψευδοροφή από ανακλαστήρες 1984 (Σωτηροπούλου,2015)

3.5 Στάθμη ηχητικής πηγής

Η στάθμη της ηχητικής πηγής που απαιτείται προκειμένου να επιτύχουμε τις ελάχιστες τιμές της καταληπτότητας της ομιλίας σε περιπτώσεις όπου ο χώρος χαρακτηρίζεται από χαμηλό

θόρυβο υποβάθρου είναι τουλάχιστον 65-75 dB(A) σε όλες τις θέσεις του χώρου. Οι διαφορές σε ηχητική στάθμη ανάμεσα στις θέσεις δεν θα πρέπει να υπερβαίνουν τα 6 dB (A).

3.6 Τοποθέτηση και ηχόχρωμα πηγής

Εναλλακτικοί παράγοντες οι οποίοι μπορούν να βελτιώσουν τη καταληπτότητα της ομιλίας, εάν και δεν αποτελούν τους κύριους, είναι η σωστή αποτύπωση του ηχοχρώματος της πηγής και η τοποθέτηση σε σχέση με τον ακροατή. Η σωστή τοποθέτηση της πηγής απαιτεί τη κατάλληλη χρονική καθυστέρηση των ηχείων προκειμένου να υπάρχει φυσικότητα στο ακουστικό περιβάλλον και έτσι να μην αποπροσανατολίζεται ο ακροατής. Επίσης το σύστημα των ηχείων θα πρέπει να είναι σε θέση να αναπαράγει τον ήχο της φωνής του ομιλητή όσο πιο φυσικά γίνεται, χωρίς να χρωματίζει ανεπιθύμητες συχνότητες. Αντίθετα, θα πρέπει να μειώνονται οι χαμηλές συχνότητες ιδιαίτερα σε περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται μικρόφωνα τα οποία τις ενισχύουν. Το μικρόφωνο που χρησιμοποιείται παίζει κομβικό ρόλο επίσης στην καταληπτότητα της ομιλίας. Ιδανικά ένα ασύρματο μικρόφωνο κεφαλής μπορεί να δώσει αξιοπρεπή αποτελέσματα καθώς διατηρεί σταθερή την απόσταση ανάμεσα στο μικρόφωνο και τα χείλη του ομιλητή, χωρίς έτσι να υπάρχουν ενισχύσεις και μειώσεις στη στάθμη του ήχου που μεταφέρεται στους ακροατές (Eggenschwiler, 2005).

3.7 Συμπεράσματα

Σε αντίθεση με τους εξωτερικούς χώρους, η ακουστική των εσωτερικών χώρων, όπως τα αμφιθέατρα, καθορίζεται από τις ανακλάσεις που λαμβάνουν χώρα και την απορρόφηση των υλικών από τα οποία αποτελείται. Η γεωμετρία, ο όγκος και η επιλογή των υλικών των επιφανειών επηρεάζει άμεσα την ακουστική συμπεριφορά του χώρου καθώς μεταβάλλουν δείκτες όπως ο χρόνος αντήχησης, ο οποίος αποτελεί έναν κύριο παράγοντα ένδειξης της ακουστικής ποιότητας του χώρου. Ταυτόχρονα, η επιλογή των υλικών και η διαμόρφωση των επιφανειών του χώρου επηρεάζουν και άλλες μεταβλητές εξίσου σημαντικές, όπως η αποφυγή δυσάρεστων φαινομένων ηχούς, ανακλάσεις οι οποίες δεν συνεισφέρουν ουσιαστικά στην καλή ακουστική, επαρκή στάθμη απευθείας ήχου και χαμηλά επίπεδα θορύβου υποβάθρου. Από τη βιβλιογραφία, είναι γνωστό ότι παρεμβάσεις όπως η κεκλιμένη διάταξη στο ακροατήριο, η αποφυγή παράλληλων τοίχων και η χρήση κατάλληλων επιφανειών από ανακλαστικά και απορροφητικά υλικά μπορούν να βελτιώσουν την καταληπτότητα της ομιλίας. Τέλος δεν πρέπει να παραλειφθεί η επίδραση του ακροατηρίου στην ακουστική επίδοση του χώρου, καθώς ο ρόλος του είναι κομβικός και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό.

Κεφάλαιο 4ο : Παραδείγματα ακουστικής χώρων

4. Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή στις πρώτες αίθουσες οι οποίες κατασκευάστηκαν για ακρόαση μουσικής, κλασσικούς χώρους συναυλιών, οι πρώτες επιστημονικά τεκμηριωμένες αίθουσες και τέλος σύγχρονες περιπτώσεις από χώρους κατασκευασμένους για ομιλία, μουσική ή και για πολλαπλές χρήσεις μέσω μεταβλητής ακουστικής.

4.1 Ιστορική αναδρομή αιθουσών ακρόασης μουσικής.

Οι πρώτες αίθουσες οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για ακρόαση μουσικής, ήταν τα σαλόνια των ευγενών. Οι καλά επιπλωμένοι χώροι και ο μικρός τους όγκος περιόριζαν τις αντηχήσεις και επικρατούσαν γρήγοροι χρόνοι αντήχησης. Έτσι γεννήθηκε η μουσική δωματίου όπως η μουσική Baroque.



Σχήμα 4.1 : Doges Palace, Venice (www.flickr.com, Jenny Mackness)

Αργότερα, όπου η αστική τάξη απέκτησε ισχύ, η μουσική σταμάτησε να είναι προνόμιο λίγων και δημιουργήθηκε η ανάγκη για κατασκευή μεγαλύτερων χώρων που θα φιλοξενούσαν περισσότερο κόσμο. Έτσι δημιουργήθηκαν οι πρώτες αίθουσες συναυλιών, όπως η αίθουσα Altes Gewandhaus. Η συγκεκριμένη αίθουσα κατασκευάστηκε το 1781, χωρούσε περίπου 500 άτομα στο ακροατήριο, το οποίο ήταν διαταγμένο αντικρυστά και πρωτοπαρουσίασε έργα από συνθέτες όπως ο Beethoven, Mozart και Schumann.



Σχήμα 4.2: Αίθουσα ακρόασης Altes Gewandhaus (Σωτηροπούλου, 2015)

Με το πέρασμα των χρόνων συνεχίστηκε η κατασκευή αιθουσών συναυλιών για όλο και περισσότερο κόσμο, ενώ επικράτησε η τάση αντιγραφής στο σχεδιασμό τους. Συνεπώς τα χαρακτηριστικά των αιθουσών εκείνη την εποχή αποτελούνταν από το ορθογωνικό σχήμα, πλούσιο διάκοσμο από ανάγλυφα στοιχεία αγάλματα κτλ, και αβαθείς εξώστες.



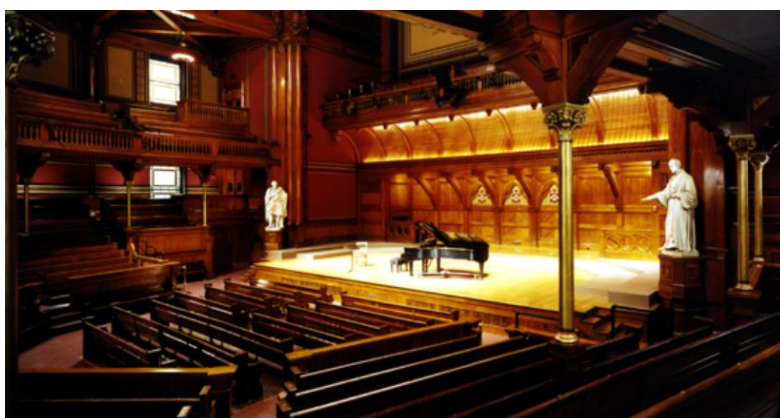
Σχήμα 4.3 : Musikvereinssaal Βιέννη, 1870, 1700 άτομα χωρητικότητα (
<https://www.wiener-symphoniker.at/musikverein-wien>)

Σε περιπτώσεις όπου δεν ακολουθήθηκε το μοντέλο κατασκευής των αιθουσών που προαναφέρθηκε, τα αποτελέσματα δεν ήταν θετικά. Περιπτώσεις όπως το Royal Albert Hall

(1871), το οποίο κατασκευάστηκε σε ελλειψοειδές σχήμα με τρούλο, εμφάνιζαν προβλήματα όπως ανεξέλεγκτες αντηχήσεις και σημεία συγκέντρωσης του ήχου. Έτσι αργότερα, αφορμή αποτέλεσε για επιστημονική διερεύνηση της ακουστικής, η αίθουσα διαλέξεων Fogg Art στο Cambridge. Στην αίθουσα λόγω της θολωτής οροφής, υπήρχαν ανακλάσεις οι οποίες δημιουργούσαν ανεξέλεγκτη ηχώ η οποία καθιστούσε μη δυνατή τη καταληπτότητα της ομιλίας. Η βελτίωση της ακουστικής συμπεριφοράς της, ανατέθηκε στον καθηγητή W.C Sabine ο οποίος πειραματίστηκε στο Sander’s Theater το οποίο ο ίδιος είχε παρατηρήσει ότι είχε καλή ακουστική χωρίς παχιά μαξιλάρια των εδράνων. Έτσι αναπτύχθηκε η θεωρία της αντήχησης η οποία εξακολουθεί να αποτελεί τη βάση της ακουστικής των κλειστών χώρων μέχρι και σήμερα.



Σχήμα 4.4 : Fogg Art Museum, Harvard University, 1898 (https://www.researchgate.net/figure/nterior-photo-of-lecture-room-after-1898-Courtesy-of-Fogg-Art-Museum-Harvard-University_fig3_228954144)



Σχήμα 4.5 : Sander’s Theater, 1000 άτομα (<https://bostonchambermusic.org/venues/sanders-theatre/>)

Έπειτα, στα μέσα του 20ού αιώνα, μετά τον Sabine και την θεωρία του για την αντήχηση, οι ειδικοί επικεντρώθηκαν εσφαλμένα στο χρόνο αντήχησης ως μοναδικό ακουστικό κριτήριο

κατά το σχεδιασμό χώρων. Αυτός ο συλλογισμός οδήγησε στη δημιουργία αιθουσών με πρωτοποριακό σχεδιασμό οι οποίες εμφάνιζαν ακουστικά προβλήματα. Για παράδειγμα το Royal Festival Hall, στο Λονδίνο, το οποίο κατασκευάστηκε το 1951 με χωρητικότητα 3000 άτομα. Στον συγκεκριμένο χώρο η αντήχηση μειώθηκε υπερβολικά λόγω της μορφοποιημένης οροφής και ο χρόνος αντήχησης που προέκυψε ήταν πιο βραχύς από τον προβλεπόμενο. Επίσης το μεγάλο πλάτος της αίθουσας στέρησε τις πρώιμες πλευρικές ανακλάσεις και ο ήχος δεν ήταν ζωντανός στο κέντρο του ακροατηρίου (Σωτηροπούλου,2015).



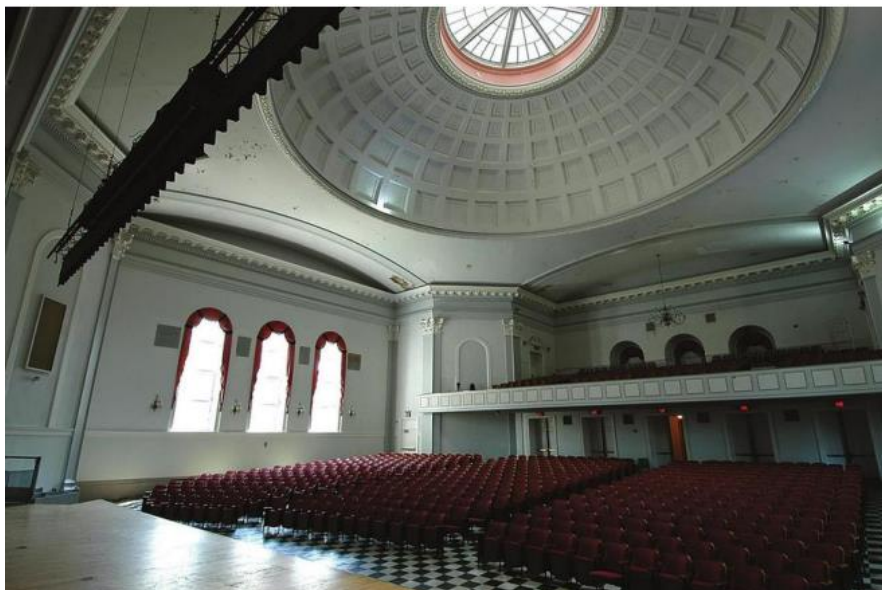
Σχήμα 4.6 : Royal Festival Hall, 1951 (<https://boroughphotos.org/lambeth/royal-festival-hall-south-bank-waterloo-2/>)

4.2 Σύγχρονες περιπτώσεις ακουστικής

4.2.1 Αμφιθέατρο Baldwin, Πανεπιστήμιο Duke

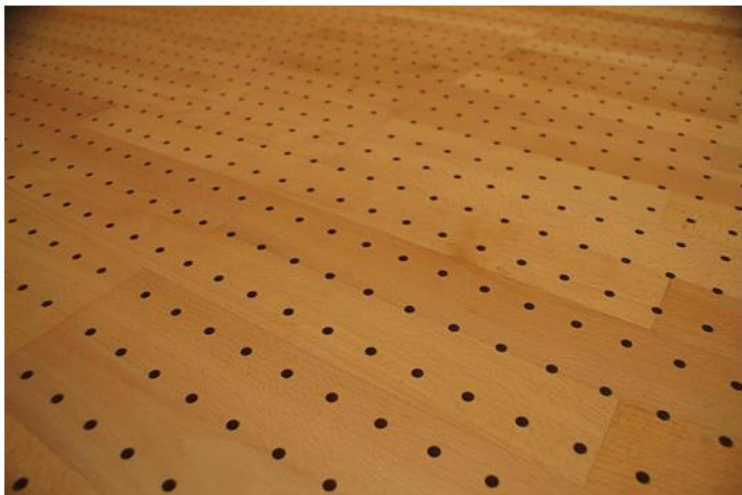
Το αμφιθέατρο του πανεπιστημίου Duke αποτελούσε έναν χώρο ο οποίος εμφάνιζε προβλήματα στην ακουστική του συμπεριφορά καθώς χαρακτηριζόταν από μικρό χρόνο αντήχησης ($<1,5$ sec) στις μεσαίες συχνότητες, ανεπιθύμητο θόρυβο από τον κλιματισμό ο οποίος αναγκαστικά απενεργοποιούνταν και ανομοιόμορφη ακουστική λόγω του πολύ μεγαλύτερου πλάτους από το βάθος. Εμποδίζονταν οι πρώιμες πλευρικές ανακλάσεις υποβαθμίζοντας έτσι την ποιότητα του ήχου, ενώ εμφανίζονταν προβλήματα εξωτερικού

θορύβου από τα παράθυρα. Ακόμα, ο θόλος στην αίθουσα ευθύνονταν για την εστίαση του ήχου σε συγκεκριμένα σημεία και ανομοιόμορφη διασπορά.



Σχήμα 4.7 : Αμφιθέατρο Baldiwn, πανεπιστήμιο Duke (Holden,2015)

Κατά τον ακουστικό σχεδιασμό του αμφιθεάτρου, στόχος ήταν η μετατροπή του σε χώρο που προορίζεται για διάφορες χρήσεις όπως ομιλίες, συναυλίες κτλ. Με έμφαση να δίνεται στη χρήση για μουσική. Η κύρια πρόκληση όπως αναφέρει ο Holden (2015) ήταν να διατηρηθεί ο ιστορικός θόλος της αίθουσας βελτιώνοντας παράλληλα τις ακουστικές συνθήκες για το σύνολο των χρήσεων που προοριζόταν. Οι λύσεις που ακολούθησαν περιλάμβαναν τη μείωση της χωρητικότητας ώστε να μπορεί να ελεγχθεί ο όγκος της αίθουσας και οι ανακλάσεις της. Έγινε στένωση του αμφιθεάτρου με καινούργια πλευρικά τοιχώματα τα οποία ενίσχυαν τις πλευρικές ανακλάσεις, και δημιουργία περιμετρικού εξώστη ο οποίος κατεύθυνε τον ήχο προς το κοινό. Ο θόλος επίσης, αξιοποιήθηκε με χρήση διαχυτικών υλικών στην θέση των ακουστικών πάνελ που προϋπήρχαν. Ακόμα, στη σκηνή τοποθετήθηκε ξύλινος ανακλαστήρας ο οποίος μετέδιδε τον ήχο προς τη κατεύθυνση του κοινού εμποδίζοντάς τον έτσι από το να κατευθυνθεί προς τον θόλο. Κατασκευάστηκε ξύλινος κέλυφος περιμετρικά της σκηνής με την κατάλληλη διάχυση και γεωμετρία για τη σωστή μετάδοση του ήχου. Ακόμα η αίθουσα αποτελείται από διάφορα στοιχεία τα οποία μεταβάλλουν την ακουστική της συμπεριφορά, όπως κουρτίνες, banners κτλ, για διαφορετικές χρήσεις. Τέλος, το σύστημα αερισμού επιτεύχθηκε με μικρές οπές στο δάπεδο έτσι ώστε να αποφευχθεί επιπλέον θόρυβος.



Σχήμα 4.8 : Σύστημα αερισμού. (Holden,2015)

Ο χρόνος αντήχησης μετά τις ακουστικές επεμβάσεις αυξήθηκε στις μεσαίες συχνότητες στα 2.1 δευτερόλεπτα, ενώ τα banners προσφέρουν μείωση κατά 0,6 δευτερόλεπτα όταν αυτά εφαρμόζονται. Επίσης ανάλογα την πληρότητα του αμφιθεάτρου ο χρόνος αντήχησης μεταβάλλεται κατά περίπου 0,2 δευτερόλεπτα λόγω της απορρόφησης των ακροατών. Η μείωση του πλάτους του αμφιθεάτρου, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, βελτίωσε την ποιότητα του ήχου μέσω των πρώιμων πλευρικών ανακλάσεων (αυξημένη τιμή C80).



Σχήμα 4.9 : Ακουστική διαμόρφωση αμφιθεάτρου Baldwin. (Holden,2015)



Σχήμα 4.10 : Ξύλινο κέλυφος σκηνής (Holden,2015)

4.2.2 Αμφιθέατρο πύργου *Intesa Sanpaolo*

Το αμφιθέατρο του πύργου Intesa Sanpaolo που βρίσκεται στο Τορίνο αποτελεί ένα χώρο 336 – 364 θέσεων ο οποίος κατασκευάστηκε με σκοπό να φιλοξενεί δραστηριότητες όπως συνέδρια, συνεντεύξεις εκθέσεις και συναυλίες. Στα 7 χρόνια λειτουργίας του, το 70% των εκδηλώσεων περιλάμβαναν συνέδρια, συνεντεύξεις και αναγνώσεις ενώ το υπόλοιπο 30% ενισχυόμενες και μη συναυλίες. Έτσι ο στόχος κατά τον ακουστικό σχεδιασμό του αμφιθεάτρου ήταν η δημιουργία μιας αίθουσας με μεγάλη ευκρίνεια αλλά και ζωντανής αίσθησης για συναυλίες. Για να συνδυαστούν οι δύο διαφορετικές αυτές απαιτήσεις επιλέχθηκε διάταξη μεταβλητής ακουστικής στην οποία για χρήσεις μουσικής το ακροατήριο διατάσσεται επίπεδα στην αίθουσα, ενώ για χρήσεις ομιλιών διατάσσεται κεκλιμένα.



Σχήμα 4.11 : Διάταξη καθισμάτων για συναντήσεις και ομιλίες (Chang & Vercammen,2023)

Με αυτό το τρόπο ο όγκος του χώρου μειώνεται, υπάρχει οπτική επαφή των ακροατών με τη πηγή, μειώνονται οι ανακλάσεις από τον πίσω τοίχο και σε συνδυασμό με τη χρήση απορροφητικών πάνελ μειώνεται ο χρόνος αντήχησης. Στη διαμόρφωση για χρήσεις ομιλιών, ο χρόνος αντήχησης κυμαίνεται στα 1,1 δευτερόλεπτα ενώ το STI στο 0,61 και $c80 +3$ dB δείχνοντας ότι επικρατεί η πρώιμη ηχητική ενέργεια από άμεσο ήχο και πρώιμες ανακλάσεις συγκριτικά με την όψιμη. Στη διάταξη για συνανλία, το ακροατήριο διατάσσεται επίπεδα στον χώρο ενώ τα πάνελς τοποθετούνται από την ανακλαστική τους όψη, δημιουργώντας πλευρικές ανακλάσεις που δίνουν αίσθηση ζωντάνιας στο χώρο. Ο χρόνος αντήχησης αυξάνεται στα 1,6 δευτερόλεπτα στις μεσαίες συχνότητες, ο C80 πέφτει στα -0,6 dB και ο STI ισούται με 0,53. Έτσι, για τη χρήση συνανλιών η καταληπτότητα παραμένει σε μέτρια επίπεδα ενώ ταυτόχρονα το ακουστικό περιβάλλον γίνεται πιο ζωντανό με την όψιμη ηχητική ενέργεια να επικρατεί συγκριτικά με τη χρήση για ομιλίες.

Τα κινούμενα πάνελς που χρησιμοποιούνται για την μεταβολή της ακουστικής του χώρου βρίσκονται στους τοίχους των περιμετρικών διαδρόμων. Η μια τους πλευρά είναι απορροφητική ενώ η άλλη ανακλαστική/διαχυτική. Στο πίσω μέρος της ανακλαστικής πλευράς υπάρχουν μεταλλικά στοιχεία κυρτά τα οποία διαχέουν την ενέργεια ενώ στη πίσω τους πλευρά υπάρχει μεμβράνη η οποία αποτρέπει το συντονισμό των μεταλλικών στοιχείων.

Όσον αφορά την οροφή, πρόκειται για μια ανακλαστική διαχυτική επιφάνεια με ξύλινο φινίρισμα και κυματοειδή μορφή. Έτσι διασκορπίζεται η ανακλώμενη ηχητική ενέργεια και μειώνονται ορισμένες κατακόρυφες ανακλάσεις (Chang & Vercammen,2023).



Σχήμα 4.12 : Εσωτερικό αμφιθεάτρου Intesa Sanpaolo (Chang & Vercammen, 2023)

4.2.3 Dallas City Performance Hall

Ο χώρος παραστατικών τεχνών του Dallas City, αποτελεί μια αίθουσα 750 θέσεων η οποία σχεδιάστηκε για παραστάσεις μουσικής, όπερας, χορωδία, θέατρο κτλ. Η αίθουσα, η οποία ολοκληρώθηκε το 2012, στόχευε σε ένα ακουστικό αποτέλεσμα το οποίο θα επαρκούσε για όλες τις χρήσεις για τις οποίες προοριζόταν, χρησιμοποιώντας υλικά που θα έδιναν μια ζεστασία στον ήχο και αρκετή διάχυση. Πρόκληση κατά το σχεδιασμό αποτέλεσε ο περιορισμός της στάθμης του ήχου, καθώς για τον συγκεκριμένο όγκο ήταν υπερβολική. Για αυτό το λόγο, ο όγκος αυξήθηκε και η οροφή ανυψώθηκε έτσι ώστε να επιτευχθεί μια ισορροπία ανάμεσα στον απευθείας ήχο και την αντήχηση. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το σκυρόδεμα, βασικό για τη κατασκευή των τοίχων προσφέροντας υψηλή ανακλαστικότητα αλλά και ενίσχυση στις χαμηλές συχνότητες, ξύλο λευκής δρυός το οποίο εφαρμόστηκε σε ανακλαστήρες στην οροφή αλλά και διαδρόμους για να επιτευχθεί διάχυση και συγκεκριμένο ηχόχρωμα. Οι ανακλαστήρες που τοποθετήθηκαν στην οροφή χαρακτηρίζονταν από συγκεκριμένη γωνία, ύψος τοποθέτησης και καμπυλότητα ώστε να ενισχύουν επιθυμητές συχνότητες και να αυξάνεται η ευκρίνεια του ήχου, η σωστή κατεύθυνση του ήχου προς το ακροατήριο και η βέλτιστη επικοινωνία ανάμεσα στους μουσικούς. Τα μπαλκόνια δεν εφάπτονταν στους τοίχους, αντίθετα εμφανίζουν κενό. Έτσι ο ήχος μπορεί να περνά προς τα κάτω χωρίς να δημιουργούνται ακουστικά προβλήματα στις κάτω θέσεις. Όσον αφορά το κέλυφος της σκηνής, κατασκευάστηκε από ξύλο ώστε το μεγαλύτερο ποσοστό της ηχητικής ενέργειας να μεταδίδεται προς το ακροατήριο, και να επιτυγχάνεται καλή ακουστική στους ίδιους τους μουσικούς. Από ρυθμιζόμενα συστήματα χρησιμοποιήθηκαν 13 ακουστικά banners, τα οποία αποτελούνταν από διπλή στρώση μάλλινου υφάσματος (serge), τα οποία απορροφούν ήχο και μειώνουν τον χρόνο αντήχησης του χώρου. Ο επιθυμητός χρόνος αντήχησης κατά το σχεδιασμό κυμαινόταν ανάμεσα στα 1,4-2,8 δευτερόλεπτα. Τα αποτελέσματα έδειξαν 3,5 δευτερόλεπτα για άδειο χώρο χωρίς τη

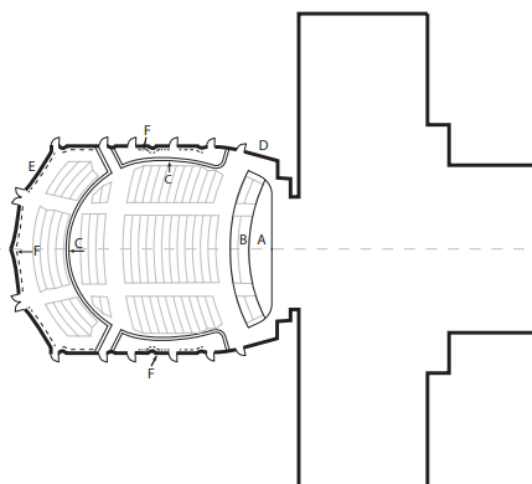
προσθήκη banners, 1.75 με τα banners και 1,4 με banners και ακροατήριο. Αυτό καθιστά το χώρο κατάλληλο για μεγάλη γκάμα χρήσεων και εξαιρετικά ευέλικτο (Holden,2015).



Σχήμα 4.13 : Dallas City Performance Hall (Holden,2015)

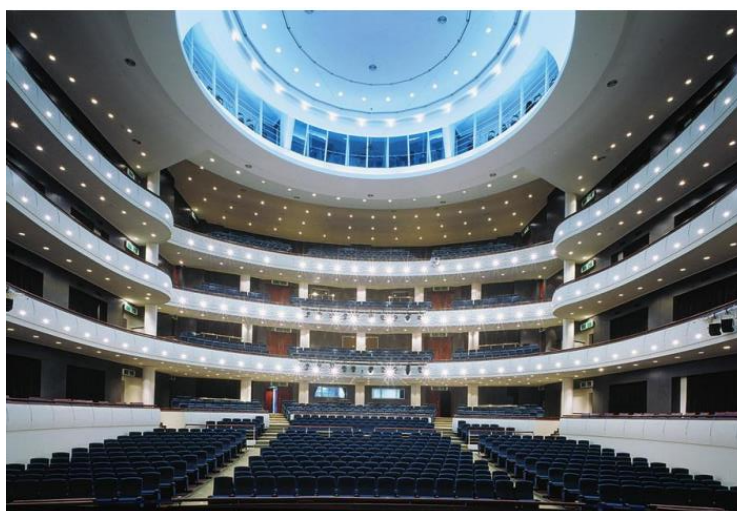
4.2.4 Daegu Opera House

Το Daegu Opera House αποτελεί ένα αμφιθέατρο πολλαπλών χρήσεων το οποίο κατασκευάστηκε στη πόλη Daegu για να εξυπηρετεί μεγάλη ποικιλία παραστάσεων. Η αίθουσα σχεδιάστηκε το 2004, με χωρητικότητα 1500 θέσεων, ενώ επιλέχθηκε μια παραδοσιακή διάταξη τύπου “horseshoe” η οποία περιλάμβανε τρία επίπεδα εξωστών οι οποίοι θα βρίσκονταν στους πλευρικούς τοίχους. Η πρόκληση στην επιλογή μιας τέτοιας διάταξης ήταν η ανάπτυξη αντήχησης που θα προέκυπτε από τους πλευρικούς τοίχους καθώς αυτοί θα καλύπτονταν από το κοινό. Λαμβάνοντας υπόψιν τη χωρητικότητα και την γκάμα των χρήσεων της αίθουσας, συμφωνήθηκε ένα εύρος ανάμεσα στα 1,2-1,6 δευτερόλεπτα για τον χρόνο αντήχησης.



Σχήμα 4.14 :κάτοψη Daegu Opera House, A: πλατφόρμα ανύψωσης ορχηστρικού λάκκου 1- επέκταση σκηνής, B: πλατφόρμα ανύψωσης ορχηστρικού λάκκου 2- επέκταση σκηνής, C: Τοίχος πλατείας, D: πλευρικός τοίχος κλίσης 7°, E: πίσω τοίχος, F: ακουστικές κουρτίνες (Holden,2015)

Για το σχεδιασμό του μπροστινού τμήματος της σκηνής και τον ορχηστρικό λάκκο επιλέχθηκε σταθερή οροφή αντί για κινητό στοιχείο προκειμένου να περιοριστεί το κόστος και να απλοποιηθεί η διαδικασία του ακουστικού σχεδιασμού. Έτσι, η οροφή τοποθετήθηκε στο κατάλληλο ύψος ώστε να δημιουργούνται οι κατάλληλες ανακλάσεις για τους μουσικούς αλλά και να ανακλάται ο παραγόμενος ήχος προς τις θέσεις του ακροατηρίου. Ο χρόνος αντήχησης ορίστηκε στα 1,6 δευτερόλεπτα με τα πρόσθετα συστήματα να είναι ανενεργά, καθώς ο στόχος ήταν να μην διαμορφωθεί ο χρόνος αντήχησης με χρήση μόνιμων απορροφητικών υλικών. Για την οροφή του χώρου, προτάθηκε ένας θόλος στον οποίο όμως θα εστιαζόταν ο ήχος. Έτσι στον θόλο τοποθετήθηκαν μηχανοκίνητα ακουστικά banners.



Σχήμα 4.15 : Daegu Opera House, θολωτή οροφή και ακροατήριο (Holden,2015)

Η πεταλοειδής διάταξη στη πλατεία του χώρου εξασφαλίζει τις πρώιμες πλευρικές ανακλάσεις αλλά και ενισχυμένη ευκρίνεια στις κεντρικές θέσεις, ενώ η τοποθέτηση κουρτινών κατά μήκος των πλευρικών τοίχων βοηθά στον έλεγχο του χρόνου αντήχησης. Πλεονέκτημα στη χρήση των συγκεκριμένων κουρτινών είναι ότι ανοιγοκλείνουν χειροκίνητα όποτε αυτό είναι

επιθυμητό. Η διαμόρφωση των πίσω τοίχων έγινε έτσι ώστε να μην προκαλούν εστίαση του ήχου, με πρόσθετες επιφάνειες διάχυσης να είναι τα κουτιά των banners και τα κυρτά μέτωπα των εξωστών. Τέλος όσον αφορά τις πλατφόρμες της ορχήστρας, μπορούν να κατέβουν ως το υπόγειο για μεταφορά των σκηνικών και να ανυψωθούν πίσω στο επίπεδο της σκηνής.

Το εύρος του χρόνου αντήχησης, το οποίο κυμαίνεται ανάμεσα στα 1.2-1.6 δευτερόλεπτα προσδίδει μια καθαρή ακουστική αίσθηση στους ακροατές με εξαιρετικά ζεστό και ευκρινή ήχο. Το παραπάνω αποτέλεσμα αποδίδεται στον καλό σχεδιασμό του ορχηστρικού λάκκου, στον σχεδιασμό των πλευρικών τοίχων που ενισχύουν τις πρώιμες ανακλάσεις και στον σωστό όγκο της αίθουσας. Εκτός των παραπάνω, ο χώρος χαρακτηρίζεται από σύστημα εξαερισμού χαμηλού θορύβου και από κέλυφος που προσφέρει ισχυρή προστασία από εξωτερικούς θορύβους (Holden,2015).

4.2.5 *Queens Hall*

Η αίθουσα Queens hall είναι η συναλιακή αίθουσα η οποία περιλαμβάνεται στην επέκταση των 25.000 m² της Βασιλικής Βιβλιοθήκης της Κοπεγχάγης. Η αίθουσα επιφανείας 530 m² σχεδιάστηκε ώστε να μπορεί να φιλοξενήσει έως 600 άτομα και να εξυπηρετήσει διαφορετικές εκδηλώσεις όπως συναυλίες, συνέδρια και διαλέξεις το ίδιο αποτελεσματικά. Η μεταβλητή ακουστική της αίθουσας περιλαμβάνει μεταβλητή σκηνή και ανακλαστήρες προκειμένου να μπορούν να πραγματοποιηθούν και πρόβες ορχήστρας από το Βασιλικό Ωδείο της Κοπεγχάγης.



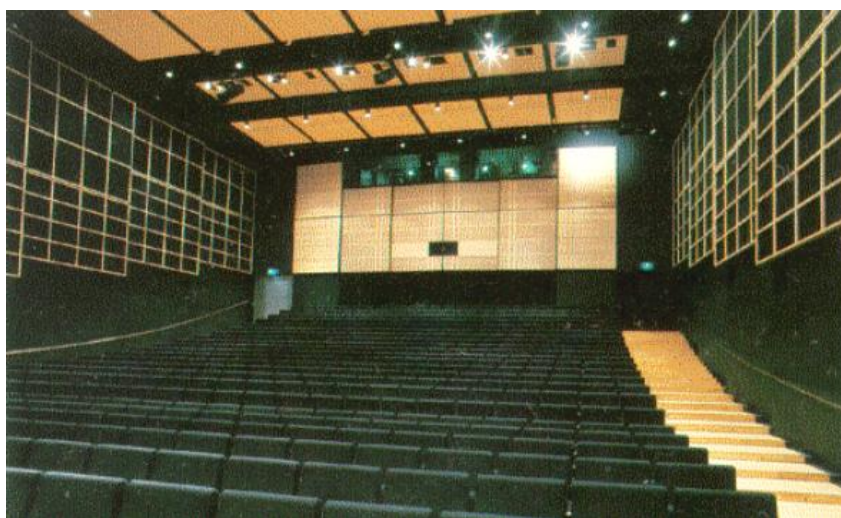
Σχήμα 4.16 : Διάταξη ανακλαστικών επιφανειών για ακρόαση μουσικής (Gade & Mortensen, 1999)

Η ορθογωνική κάτοψη της αίθουσας (σχήμα shoebox) αλλά και οι πλευρικοί τοίχοι της, οι οποίοι αποτελούνται από μεγάλα διαχυτικά πάνελ, βοηθούν στον περιορισμό εμφάνισης φαινομένων όπως η πολλαπλή ηχώ (flutter echo) ενώ αυξάνονται οι πρώιμες ανακλάσεις που φθάνουν στον ακροατή. Οι ξύλινοι διαχυτές τύπου Schroeder, οι οποίοι έχουν τοποθετηθεί μπροστά από τη σκηνή, μεταβάλλουν τον προσανατολισμό του ήχου σε συγκεκριμένες περιοχές του ακροατηρίου, βοηθώντας έτσι να αποφευχθεί εστίαση της ηχητικής ενέργειας σε αυτές τις περιοχές.



Σχήμα 4.17 : Διαφορετική διάταξη σκηνής (Gade & Mortensen, 1999)

Καθώς ο χώρος δεν περιλαμβάνει εξώστες, στις διαθέσιμες επιφάνειες πραγματοποιήθηκε εγκατάσταση στοιχείων μεταβλητής απορρόφησης. Δηλαδή απορροφητικά πάνελ από ορυκτοβάμβακα τα οποία μπορούν να αποκρύπτονται σε εσοχές στους πλευρικούς τοίχους όταν δεν χρησιμοποιούνται. Εκτός αυτών, έχει πραγματοποιηθεί εγκατάσταση ακουστικών κουρτινών 150 m² στους μπροστά και πίσω τοίχους. Λόγω της συνολικής επιφάνειας των 400 m² των απορροφητικών, ο χρόνος αντήχησης κυμαίνεται για τις μεσαίες συχνότητες από 1,1 έως 1,9 δευτερόλεπτα.



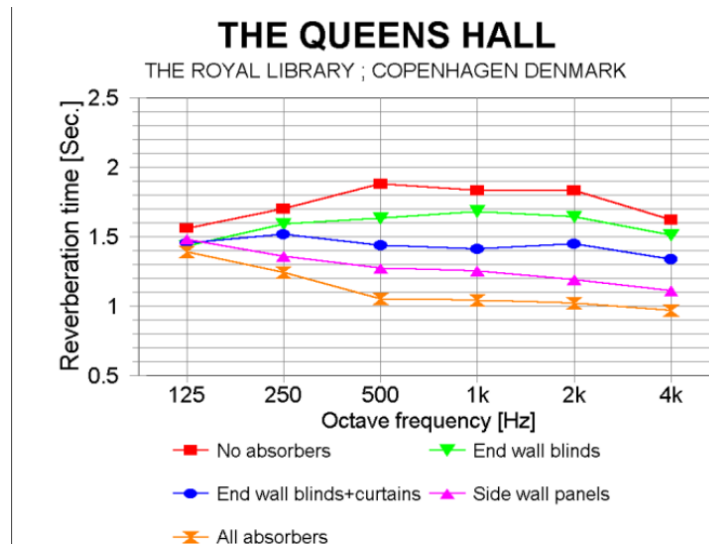
Σχήμα 4.18 : Διάταξη πίσω τοίχου (Gade & Mortensen, 1999)

Έτσι σε περιπτώσεις όπως ομιλίες και διαλέξεις, οι τοίχοι καλύπτονται από τα απορροφητικά μειώνοντας έτσι τον χρόνο αντήχησης, και περιμετρικά των ομιλητών τοποθετούνται ανακλαστικές επιφάνειες προκειμένου ο ήχος να κατευθυνθεί αποτελεσματικά προς το ακροατήριο.



Σχήμα 4.19 :Τοποθέτηση ανακλαστικών επιφανειών περιμετρικά των ομιλητών (Φωκάς,2021)

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα του χρόνου αντήχησης ανά συχνότητα ανάλογα τη χρήση των απορροφητικών υλικών της αίθουσας (Gade & Mortensen, 1999)



Σχήμα 4.20 :Διαγράμματα μεταβλητού χρόνου αντήχησης της αίθουσας (Gade & Mortensen, 1999)

4.3 Εγχώριες περιπτώσεις ακουστικής αμφιθεάτρων

4.3.1 Αμφιθέατρο Μιλτιάδης Έβερτ, Τεχνόπολη Αθηναίων

Ο ακουστικός σχεδιασμός του αμφιθεάτρου βασίστηκε σε αποτελέσματα ακουστικών μετρήσεων σύμφωνα με διεθνή πρότυπα (ISO 3382-2) και στη μοντελοποίηση σε πρόγραμμα ακουστικής προσομοίωσης, στο οποίο εξετάστηκαν παράμετροι όπως ο χρόνος αντήχησης (RT60), πρώιμος χρόνος αντήχησης(EDT), Ευκρίνεια (Clarity C80) και Διακριτότητα (Definition D50). Ο όγκος του αμφιθεάτρου είναι 1840 m³ , με συνολική επιφάνεια 675m². Ο χώρος ανακαινίστηκε έχοντας ως στόχο πολλαπλές χρήσεις, όπως διοργάνωση θεατρικών παραστάσεων, μουσικών παραστάσεων αλλά κυρίως διεξαγωγή συνεδρίων.

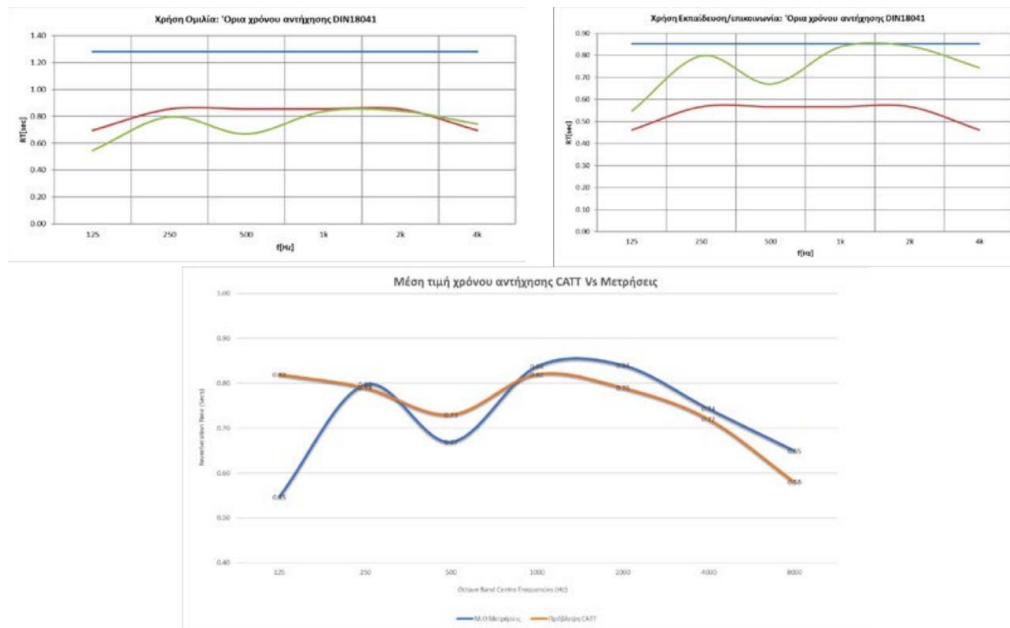
Η οροφή του χώρου αποτελείται από δρύινες επιφάνειες οι οποίες σχηματίζουν πρισματικές πυραμίδες και δρουν ως ανακλαστήρες και απορροφητές. Οι επιφάνειες οι οποίες σχηματίζουν την οροφή συνδυάζοντας 564 κομμάτια, προσφέρουν την απαιτούμενη στάθμη στους

ακροατές ενώ παρέχεται ισορροπία ανάμεσα στις ανακλαστικές και τις ηχοαπορροφητικές επιφάνειες. Στη πλάτη της αίθουσας, στο κοίλο του αμφιθεάτρου, η κατασκευή αποτελείται από διάτρητα ξύλινα ηχοαπορροφητικά πάνελ, ενώ η οροφή αποτελείται από ηχοανακλαστικές ξύλινες πλάκες. Πίσω από τα καθίσματα, στον περιμετρικό διάδρομο κυκλοφορίας, η ψευδοροφή αν και αποτελείται από τον ίδιο σχεδιασμό, προσφέρει ηχοαπορροφητικές ιδιότητες στο φάσμα των χαμηλών και μεσαίων συχνοτήτων. Ο σχεδιασμός της οροφής αποτελείται από γεωμετρικά σχήματα όπως τρίγωνα, εξάγωνα κτλ. Η σκηνή αποτελείται από ξύλινο πάτωμα ενώ το σύνολο του δαπέδου είναι επιστρωμένο με μοκέτα.



Σχήμα 4.22 : Εσωτερικό αμφιθεάτρου Μιλτιάδης Έβερετ, Τεχνόπολη Αθηναίων (meandai.gr)

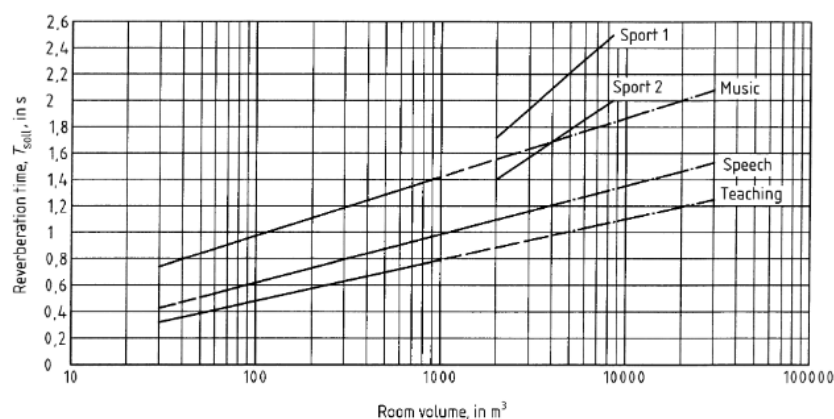
Μετά από τη μέτρηση των δεικτών, την εξαγωγή διαγραμμάτων και τη μοντελοποίηση, διαπιστώθηκε ότι ο χρόνος αντήχησης κυμαινόταν σε ικανοποιητικά επίπεδα για τη καταληπτότητα της ομιλίας με τιμές μέσου όρου 0,76 στη περιοχή 63-250 Hz, 0,78 στη περιοχή 500-2000Hz και 0,65 στη περιοχή 4000-16000 Hz. Επίσης οι δείκτες ευκρίνειας-διακριτότητας έδειξαν να καλύπτουν επίσης τις απαιτήσεις από το πρότυπο DIN 18041. Στα διαγράμματα κρουστικών αποκρίσεων φαίνεται η αποδοτικότητα στη διάχυση που προσφέρει η οροφή και η ομοιόμορφη κατανομή ηχητικής ενέργειας χωρίς να παρατηρούνται δυσάρεστα φαινόμενα (Χατζηγεωργίου, 2022).



Σχήμα 4.23 : Διαγράμματα χρόνου αντήχησης για ομιλία, εκπαίδευση, προσομοίωση χώρου.

4.3.2 Αμφιθέατρο Διαλέξεων Ιατρικής Σχολής ΑΠΘ

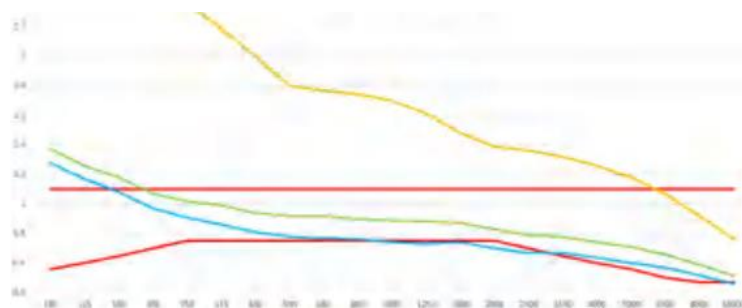
Πρόκειται για το αμφιθέατρο -Α της Ιατρικής Σχολής του ΑΠΘ χωρητικότητας 500 θέσεων στο οποίο πραγματοποιήθηκε αποτύπωση των διαστάσεων, ηλεκτροακουστικές μετρήσεις της αρχικής κατάστασης και προσομοίωση της ακουστικής σε τρισδιάστατο μοντέλο. Η χρήση του αμφιθεάτρου προοριζόταν για χρήσεις ομιλιών, διαλέξεων κτλ, με στόχο τις βέλτιστες ακουστικές συνθήκες όσον αφορά τη καταληπτότητα της ομιλίας αλλά και την ακρόαση μουσικής. Η διαδικασία της ακουστικής μελέτης ξεκίνησε με την αποτύπωση των διαστάσεων και τις απαιτήσεις για τον επιθυμητό χρόνο αντήχησης σύμφωνα με το διάγραμμα Knudsen-Harris από το πρότυπο DIN 18041.



Σχήμα 4.24 : Διάγραμμα προτεινόμενου χρόνου αντήχησης Knudsen and Harris ανάλογα τη χρήση και τον όγκο της αίθουσας, DIN 18041:2004-05.

Μετά τη διεξαγωγή των μετρήσεων, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι τιμές του χρόνου αντήχησης ήταν υψηλές συγκριτικά με τις επιθυμητές τιμές, δηλαδή κυμαινόταν από 2-1,8 δευτερόλεπτα ενώ η επιθυμητή τιμή ήταν 0.9 δευτερόλεπτα. Ακόμα οι τιμές του δείκτη STI

κυμαίνονταν από 0.48-0.52 ενώ οι ελάχιστες απαιτήσεις ανέφεραν τιμές 0,6. Αντίστοιχα μη επιθυμητές ήταν και οι τιμές της παραμέτρου C50. Στη προσομοίωση του χώρου όπου και σχεδιάστηκαν οι προτάσεις των ακουστικών παρεμβάσεων, επιλέχθηκαν απορροφητικά πάνελ και προτάθηκαν δύο επιλογές στις θέσεις τοποθέτησης, έτσι ώστε να μειωθούν οι μακρινές ανακλάσεις και οι χρήσιμες πρώιμες να μείνουν ανεπηρέαστες. Για να απορροφηθούν οι χαμηλές συχνότητες τοποθετήθηκαν απορροφητές μεμβράνης στο πίσω μέρος των πάνελ έτσι ώστε να εκτιμηθεί η επίδρασή τους στη προσομοίωση. Η τοποθέτηση έγινε σε απόσταση 100mm από τον τοίχο. Στη πρώτη επιλογή, η τοποθέτηση των πάνελ δοκιμάστηκε στον πίσω τοίχο από το ακροατήριο και στους δύο πλευρικούς σε ύψος 2 μέτρων μέχρι την οροφή. Σε αυτή τη προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε συνολικό εμβαδό 344 m² ενώ ο δείκτης STI βελτιώθηκε σε εύρος τιμών 0,66-0,72. Στη δεύτερη επιλογή η τοποθέτηση έγινε σε ύψος 1.2 μέτρα μέχρι την οροφή στον τοίχο πίσω από το ακροατήριο και στο πίσω μέρος των πλευρικών τοίχων. Χρησιμοποιήθηκε συνολικό εμβαδό 230 m² και ο δείκτης STI βελτιώθηκε σε εύρος τιμών 0.63-0.68. Όσον αφορά το χρόνο αντήχησης και στις 2 επιλογές οι τιμές που προκύπτουν είναι αποδεκτές με την επιλογή 2 να υπερέχει της πρώτης ενώ οι τιμές του δείκτη C50 κυμαίνονταν από 1.5-4.51 στην επιλογή 1 και από 0.35-4.58 στην επιλογή 2 (Καλλίρης . et al., 2024).



Σχήμα 4.25 : Διαγράμματα χρόνου αντήχησης. Κίτρινη γραμμή : Χρόνος αντήχησης πριν την εφαρμογή, Γαλάζια γραμμή : Επιλογή 1, Πράσινη Γραμμή : Επιλογή 2, Κόκκινες Γραμμές : Αποδεκτά όρια τιμών χρόνου αντήχησης. (Καλλίρης . et al. , 2024)

4.4 Συμπεράσματα

Μετά από την ανάλυση της ακουστικής συμπεριφοράς χώρων ιστορικών αλλά και σύγχρονων, παρατηρείται ότι ορισμένα χαρακτηριστικά των χώρων επιδρούν σημαντικά παρά τις διαφορετικές χρήσεις τους, τη περίοδο που κατασκευάστηκαν ή τη χωρητικότητα που μπορούσαν να υποστηρίξουν. Αναλυτικότερα, η γεωμετρία παίζει κομβικό ρόλο. Σε πολλές περιπτώσεις που αναλύθηκαν προηγουμένως, παρατηρήθηκαν προκλήσεις οι οποίες έπρεπε να αντιμετωπιστούν, όσον αφορά τη γεωμετρία. Δηλαδή χώροι με υπερβολικά μεγάλη διάσταση στο χώρο, θολωτές επιφάνειες οι οποίες συγκέντρωναν τον ήχο και ακατάλληλη γεωμετρία η οποία διένεμε ανομοιόμορφα την ηχητική ενέργεια στο ακροατήριο. Από την άλλη, οι καλύτερες ακουστικές συνθήκες επιτυγχάνονται όταν εξασφαλίζονται οι πρώιμες πλευρικές ανακλάσεις και όταν υπάρχει καλή οπτική επαφή ανάμεσα στη πηγή και τον ακροατή, αυξάνοντας έτσι τη καταληπτότητα και την ευκρίνεια στο χώρο. Για να ενισχυθούν οι πρώιμες ανακλάσεις και να κατευθυνθεί ο ήχος όσο γίνεται προς το ακροατήριο, σημαντικό ρόλο παίζουν οι πλευρικοί τοίχοι του χώρου, οι ανακλαστικές επιφάνειες που τοποθετούνται στην

οροφή αλλά και οι εξώστες. Έτσι ως στρατηγική σχεδιασμού, η ενίσχυση των πρώιμων ανακλάσεων αποτελεί έναν σημαντικό τομέα. Ακόμα, μέσα από τα παραδείγματα των χώρων παρατηρείται η σημαντικότητα στην ισορροπία ανάμεσα σε απορροφητικές και ανακλαστικές-διαχυτικές επιφάνειες. Κάθε επιφάνεια παίζει το ρόλο της στη διαμόρφωση του ακουστικού προφίλ, με τις απορροφητικές επιφάνειες να μειώνουν τις ανακλάσεις ώστε να ελεγχθεί ο χρόνος αντήχησης, τις ανακλαστικές να συμβάλλουν στη μεταφορά του ήχου προς το ακροατήριο και τις διαχυτικές οι οποίες εξασφαλίζουν την ομοιομορφία στο χώρο και την αποφυγή δυσάρεστων φαινομένων συγκέντρωσης του ήχου. Τέλος εκτός από τις παραπάνω αρχές σχεδιασμού, καίριας σημασίας αποτελεί ο έλεγχος του θορύβου από μηχανολογικές εγκαταστάσεις και από πηγές του εξωτερικού περιβάλλοντος.

Κεφάλαιο 5ο : Ακουστικές Μετρήσεις

5.Εισαγωγή

Προκειμένου να προκύψουν ορθά αποτελέσματα από τις μετρήσεις και συνεπώς ακριβείς λύσεις και προτάσεις βελτιστοποίησης των ακουστικών συνθηκών, είναι απαραίτητη η σωστή διεξαγωγή επιτόπιων μετρήσεων, βασιζόμενες σε οδηγίες και πρότυπα. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο ακολουθούν : Οι τεχνικές για τη διεξαγωγή των μετρήσεων, οι οδηγίες από τα πρότυπα προκειμένου να εξαχθούν σωστά αποτελέσματα, η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί καθώς και ο εξοπλισμός ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί.

5.1 Μετρήσεις κρουστικής απόκρισης του χώρου

Οι μετρήσεις της κρουστικής απόκρισης ενός χώρου βοηθούν να αποτυπώσουμε το πως αποδίδει ο χώρος οποιοδήποτε ηχητικό σήμα σε μια συγκεκριμένη θέση για συγκεκριμένες συνθήκες. Για την εκτίμηση της κρουστικής απόκρισης των χώρων έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι ανά τα χρόνια, με κοινό τους στοιχείο να αποτελεί η διέγερση του χώρου με ένα σήμα το οποίο περιλαμβάνει όλες τις συχνότητες που βρίσκονται στο ακουστό φάσμα. Παραδοσιακά, για τη μέτρηση της κρουστικής απόκρισης χρησιμοποιούνταν ένα σήμα κρουστικού παλμού υψηλής ηχητικής ενέργειας όπως ένας πυροβολισμός ή σκάσιμο μπαλονιού. Μετά από τη παραγωγή του σήματος γινόταν καταγραφή σε ένα μέσο ώστε να αναλυθεί παραπάνω. Η καταγραφή γινόταν είτε ως προς το χρόνο που διαρκούσε το ηχητικό σήμα είτε προς το συχνοτικό φάσμα. Ακόμα και σήμερα χρησιμοποιείται η μέθοδος του κρουστικού παλμού, με την καταγραφή του σήματος να γίνεται σε ψηφιακό σήμα. Πλέον, ανάλογα το είδος του ήχου που χρησιμοποιούμε για να διεγείρουμε τον χώρο, κατηγοριοποιούμε τις μεθόδους.

5.2 Μέτρηση με κρουστικό παλμό

Η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελεί τη πιο απλή ψηφιακή διαδικασία η οποία περιλαμβάνει τη διέγερση του χώρου με ψηφιακή κρουστική απόκριση, δηλαδή ήχους ισχυρών κρότων των οποίων η στάθμη τους μηδενίζεται απότομα. Αν και θεωρητικά η μέθοδος αυτή δείχνει να είναι ακριβής, στη πράξη λόγω χαμηλού λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR) παρουσιάζονται προβλήματα καθώς η ηχητική ενέργεια συγκεντρώνεται σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Λόγω της πολύ μικρής διάρκειας του κρουστικού παλμού, είναι δύσκολη η αναπαραγωγή από οποιοδήποτε σύστημα με επαρκή στάθμη πάνω από το θόρυβο υποβάθρου του χώρου. Επίσης αν χρησιμοποιηθεί αναλογικός κρουστικός ήχος δεν μπορούμε να είμαστε σίγουροι ότι περιέχει σωστή κατανομή ηχητικής ενέργειας σε κάθε συχνότητα .

5.3 Μέτρηση με σήμα σταθερής κατάστασης

Σε αντίθεση με τη μέτρηση με κρουστικό παλμό, στην περίπτωση αυτή η μέτρηση γίνεται με διέγερση του χώρου από σταθερό σήμα για προκαθορισμένη διάρκεια. Το σταθερό σήμα δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα αν και πάντα υπάρχει θόρυβος ο οποίος επηρεάζει αρνητικά τη μέτρηση. Χρησιμοποιώντας όμως σήματα μεγάλης ηχητικής στάθμης ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) γίνεται επαρκής στο φάσμα που μετράμε. Τέτοια σήματα σταθερής κατάστασης είναι ο λευκός και ο ροζ θόρυβος τα οποία κατανέμουν ομοιόμορφα τον ήχο στο συχνοτικό

φάσμα. Ακόμα, χρησιμοποιείται ένα διαφορετικό σήμα σταθερής κατάστασης εκτός του λευκού και του ροζ θορύβου, το οποίο έχει ίδια χαρακτηριστικά με τυχαίο σήμα λευκού θορύβου, το σήμα Ακολουθίας Μέγιστου Μήκους (MLS). Το πλεονέκτημα της χρήσης αυτού του σήματος είναι το ότι η διέγερση του χώρου γίνεται σε όλο το ακουστικό συχνοτικό φάσμα ενώ η κρουστική απόκριση του χώρου υπολογίζεται εύκολα. Επίσης σε περιβάλλοντα που χαρακτηρίζονται από υψηλό θόρυβο βάθους, οι μετρήσεις με τη μέθοδο MLS, εμφανίζουν πολύ καλύτερο λόγο SNR (σήμα προς θόρυβο), χαρακτηριστικό το οποίο συνέβαλε στη μεγάλη δημοφιλία της μεθόδου. Εναλλακτική μέθοδος σταθερού σήματος για τη διέγερση του χώρου χρησιμοποιεί το σήμα Σάρωσης Ημιτόνου (swept sine). Η κατηγορία στην οποία ανήκει αυτή η μέθοδος ονομάζεται chirp, η οποία περιλαμβάνει σήματα που χαρακτηρίζονται από συχνότητα η οποία μεταβάλλεται στο πεδίο του χρόνου ενώ το πλάτος τους μένει σταθερό (Ποτηράκης, 2010). Στις μετρήσεις συχνά χρησιμοποιείται το σήμα λογαριθμικής σάρωσης ημιτόνου. Το συγκεκριμένο σήμα ενισχύει τις χαμηλές συχνότητες, μειώνοντας τη στάθμη 3 dB ανά οκτάβα όσο αυξάνεται η συχνότητα. Έτσι ο λόγος SNR αυξάνεται, συνεπώς και η ποιότητα της κρουστικής απόκρισης, όταν ο θόρυβος βάθους είναι ισχυρός ειδικά στις χαμηλές συχνότητες.

5.4 Διαδικασία μετρήσεων κρουστικής απόκρισης

Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων της κρουστικής απόκρισης του χώρου ενδιαφέροντος είναι απαραίτητη είτε μια γεννήτρια είτε υπολογιστής με κατάλληλο λογισμικό (REW) και κάρτα ήχου, μέσα από τον οποίο γίνεται η παραγωγή των σημάτων που έχουμε επιλέξει για τη κρουστική απόκριση του χώρου, για παράδειγμα σήματα τύπου chirp. Η παραγωγή του σήματος γίνεται μέσα από μεγάφωνο ενώ η καταγραφή του από μικρόφωνο το οποίο είναι τοποθετημένο σε προκαθορισμένες θέσεις, στο ύψος στο οποίο βρίσκονται τα αυτιά των ακροατών. Τα μεγάφωνα τα οποία χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους μετρήσεις θα πρέπει να είναι παντοκατευθυντικά, δηλαδή ο ήχος που παράγουν να εκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις. Έτσι, αποφεύγονται φαινόμενα τα οποία μπορούν να επηρεάσουν τη πιστότητα των μετρήσεων, όπως συγκέντρωση της ηχητικής ενέργειας σε ορισμένα σημεία. Επίσης, το μικρόφωνο το οποίο πρέπει να χρησιμοποιείται, θα πρέπει και αυτό να είναι παντοκατευθυντικό προκειμένου να καταγράφονται ομοιόμορφα οι ήχοι οι οποίοι προκύπτουν από διαφορετικές γωνίες λόγω ανακλάσεων. Εκτός από τα συστήματα που χρησιμοποιούμε για τη διεξαγωγή των μετρήσεων, τα οποία μπορεί να είναι από τον υπολογιστή, κάρτα ήχου και μικρόφωνο μέχρι εμπορικά συστήματα μέτρησης που παρέχουν κάρτες ήχου με λογισμικό μέτρησης, τα αποτελέσματα των κρουστικών αποκρίσεων μπορούν να μεταβληθούν και από τις συνθήκες που επικρατούν στο χώρο και από τη θέση των μετρήσεων.

5.5 Πρότυπα Μετρήσεων

Λόγω της πολυπλοκότητας στη διαδικασία των μετρήσεων, έχουν θεσπιστεί πρότυπα από επιτροπές προκειμένου να τεθούν κανόνες για τις συνθήκες των μετρήσεων, τις μονάδες και

τον τρόπο των μετρήσεων. Συγκεκριμένα, η διεθνής τεχνική επιτροπή (ISO) έχει προτείνει πρότυπα για τις ακουστικές μετρήσεις τα οποία λαμβάνονται υπόψη από χώρες για τη ρύθμιση της νομοθεσίας. Στα πρότυπα αυτά, περιλαμβάνονται οδηγίες για τα όργανα που χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις, οι οποίες διαχωρίζονται σε υποκατηγορίες ανάλογα με την ακρίβεια που προσφέρουν.

Οι μετρήσεις συνήθως γίνονται στο συχνотικό εύρος των 100-3150 Hz, ενώ τα όργανα με τα οποία διεξάγονται οι μετρήσεις θα πρέπει να προσφέρουν μεγάλη ακρίβεια προκειμένου να αποφεύγονται εσφαλμένα αποτελέσματα. Υπάρχουν προδιαγραφές για το μέγιστο σφάλμα που μπορεί να εμφανίζει ένα ηχόμετρο προκειμένου να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ακουστικές μετρήσεις (πχ. IEC-179).

Ο υπολογισμός για έναν από τους βασικότερους δείκτες που μετράμε σε ένα χώρο, τον χρόνο αντήχησης, μπορεί να γίνει είτε με τη κρουστική διέγερση είτε με τη διακοπτόμενη διέγερση. Όποια μέθοδος και να χρησιμοποιείται πρέπει να ελέγχουμε το λόγο σήματος/ θόρυβο (SNR), ο οποίος πρέπει να είναι τουλάχιστον 35 dB για χρόνο T20, και 45 για T30. Επίσης κομβικό ρόλο παίζουν οι θέσεις και ο αριθμός των μετρήσεων, ο οποίος παρουσιάζεται στο παρακάτω πίνακα.

	Μετρήσεις εκτίμησης	Μετρήσεις Μέτριας Ακρίβειας	Μετρήσεις ακρίβειας
Συνδυασμοί πηγή-μικρόφωνο	2	6	12
Θέσεις πηγής	>1	>2	>2
Θέσεις μικροφώνου	>2	>2	>3
Αριθμός μετρήσεων σε κάθε θέση (διακοπτόμενη διέγερση)	1	2	3
Συχνотικό εύρος	250-2000 Hz	125-4000 Hz	100-5000 Hz

Πίνακας 5-1 : Θέσεις και συχνότητα μετρήσεων (Κοντομίχος,2013)

Για τη μέτρηση παραμέτρων όπως ο χρόνος αντήχησης, EDT κτλ. Η πιο απλή μέθοδος είναι αυτή της κρουστικής διέγερσης του χώρου. Όπως προαναφέρθηκε αυτή συμβαίνει με θόρυβο ο οποίος χαρακτηρίζεται από απότομη αύξηση της ηχητικής ενέργειας και ακαριαίο μηδενισμό (πχ πυροβολισμός). Γίνεται καταγραφή της απόκρισης του χώρου και από τη κλίση που παρουσιάζεται στο γράφημα υπολογίζονται οι παράμετροι που προαναφέρθηκαν. Σύμφωνα με το πρότυπο ISO-3382-2008, προκειμένου να μετρηθεί ο χρόνος αντήχησης είναι απαραίτητη

η χρήση μη κατευθυντικής πηγής και η τροφοδότηση μέσω φίλτρου 1/3 οκτάβας. Για τη μέθοδο της διακοπτόμενης διέγερσης, δηλαδή με χρήση λευκού, ροζ θορύβου ή με σάρωση ημιτόνου, η διάρκεια του σήματος θα πρέπει να είναι η μισή ή και παραπάνω από τον χρόνο αντήχησης του χώρου που μελετάμε.

Για τον υπολογισμό των υπόλοιπων δεικτών ακουστικής ποιότητας που προαναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2, χρησιμοποιούνται ίδιες μέθοδοι με τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης, όπως αναφέρεται στην οδηγία ISO 3382-1(2009). Για τον ελάχιστο αριθμό μετρήσεων ανάλογα τη χωρητικότητα του χώρου αντλούμε στοιχεία από τον παρακάτω πίνακα.

Μέγεθος χώρου σε αριθμό θέσεων	Ελάχιστος αριθμός σημείων μέτρησης
500	6
1000	8
2000	10

Πίνακας 5-2 : Προτεινόμενος Αριθμός Μετρήσεων (Κοντομίχος,2013)

5.6 Εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός που θα χρησιμοποιηθεί για τη διεξαγωγή των μετρήσεων αποτελείται από ηλεκτρονικό υπολογιστή (Laptop) εξοπλισμένο με κατάλληλο λογισμικό αναπαραγωγής και επεξεργασίας των ηχητικών σημάτων που θα χρησιμοποιηθούν (REW), κάρτα ήχου Focusrite Solo 2nd gen, από την οποία θα περνάει το σήμα από τον υπολογιστή προς το ηχείο και το καταγραφόμενο σήμα από το μικρόφωνο στον υπολογιστή, μετρητικό πανκατευθυντικό μικρόφωνο DBX RTA το οποίο θα καταγράφει το σήμα, ηχείο αυτοενισχυόμενο LD Iqora 12a για την παραγωγή των σημάτων, βάσεις μικροφώνου και ηχείου, διασυνδετικά καλώδια : 1) RCA-->XLR, 2) XLR male -->XLR female, 3)RCA--> TRS, αποστασιόμετρο

5.7 Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί για τη διεξαγωγή των μετρήσεων περιλαμβάνει αρχικά το στήσιμο του ηχείου και του μικροφώνου στο χώρο, τοποθετημένα στο κατάλληλο ύψος στις βάσεις τους. Έπειτα θα ακολουθήσει σύνδεση με τη κάρτα ήχου και τον υπολογιστή και έλεγχος στη παραγωγή και καταγραφή των σημάτων. Στη συνέχεια, η βαθμονόμηση της κάρτας ήχου, καθορισμός στάθμης του μικροφώνου, μέτρηση συχνοτικής απόκρισης του ηχείου, μέτρηση θορύβου υποβάθρου και τέλος οι μετρήσεις κρουστικής απόκρισης του χώρου με παραγωγή σημάτων σάρωσης ημιτόνου (Κοντομίχος,2013· Φωκάς,2021).

5.8 Συμπεράσματα

Η σωστή μεθοδολογία για τη μέτρηση της κρουστικής απόκρισης του χώρου αποτελεί σημαντική προϋπόθεση κατά τον έλεγχο των ακουστικών συνθηκών. Μέσω μετρήσεων οι οποίες ακολουθούν τα διεθνή πρότυπα, είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε τους πιο

σημαντικούς δείκτες ακουστικής ποιότητας, όπως ο χρόνος αντήχησης RT , ο πρώιμος χρόνος αντήχησης EDT , δείκτες ευκρίνειας, διακριτότητας και καταληπτότητας της ομιλίας. Η μέθοδος σάρωσης ημιτόνου, αποτελεί μια αξιόπιστη μέθοδο για τη μέτρηση της κρουστικής απόκρισης του χώρου καθώς προσφέρει υψηλό λόγο σήματος προς θόρυβο χωρίς να επηρεάζεται πολύ από εξωτερικές παρεμβολές. Επίσης, η επιλογή του εξοπλισμού επηρεάζει κατά πολύ την αποτύπωση του χώρου, με τις παντοκατευθυντικές πηγές και μικρόφωνα να προσφέρουν καλύτερα αποτελέσματα. Τέλος εξίσου σημαντική είναι η τήρηση των διεθνών προτύπων τα οποία προσφέρουν προτάσεις για τον αριθμό, τη θέση των μετρήσεων, αλλά και την εξασφάλιση κατάλληλου λόγου σήματος προς θόρυβο.

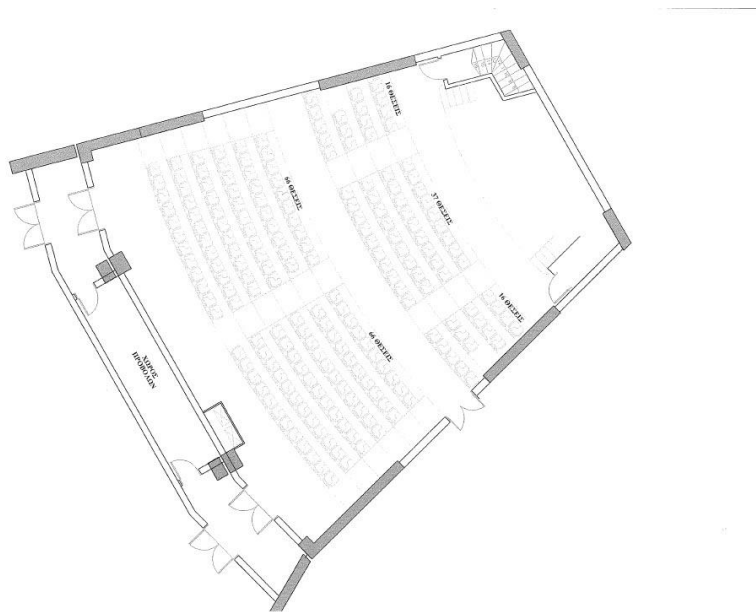
Κεφάλαιο 6ο: Διεξαγωγή και αποτελέσματα ακουστικών μετρήσεων

6.Εισαγωγή

Στο 6ο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας παρουσιάζεται το εξεταζόμενο αμφιθέατρο του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας καθώς και η διαδικασία διεξαγωγής των επιτόπιων μετρήσεων, τα αποτελέσματά τους και τέλος ο σχολιασμός με βάση την επιθυμητή χρήση, και τις οδηγίες για τις κατάλληλες τιμές των αντικειμενικών δεικτών ακουστικής

6.1 Παρουσίαση Αμφιθεάτρου

Το αμφιθέατρο που θα εξεταστεί βρίσκεται στη κεντρική Πανεπιστημιούπολη του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας στη περιοχή ΖΕΠ Κοζάνης. Πρόκειται για το αμφιθέατρο ΑΠ-3.8, του 1ου κτιρίου από τα 3 της Πανεπιστημιούπολης, χωρητικότητας 201 θέσεων και όγκου 1120 m^3 , το οποίο χρησιμοποιείται διδασκαλία- ομιλίες από το τμήμα των Χημικών Μηχανικών. Ο όγκος του αμφιθεάτρου αντιστοιχεί σε $5,6 \text{ m}^3/\text{άτομο}$, τιμή η οποία ξεπερνά ελάχιστα το άνω όριο των συνιστώμενων τιμών για χρήση ομιλίας ενώ δεν φτάνει το επιθυμητό εύρος $6-9 \text{ m}^3$ για χρήση μουσικής, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.



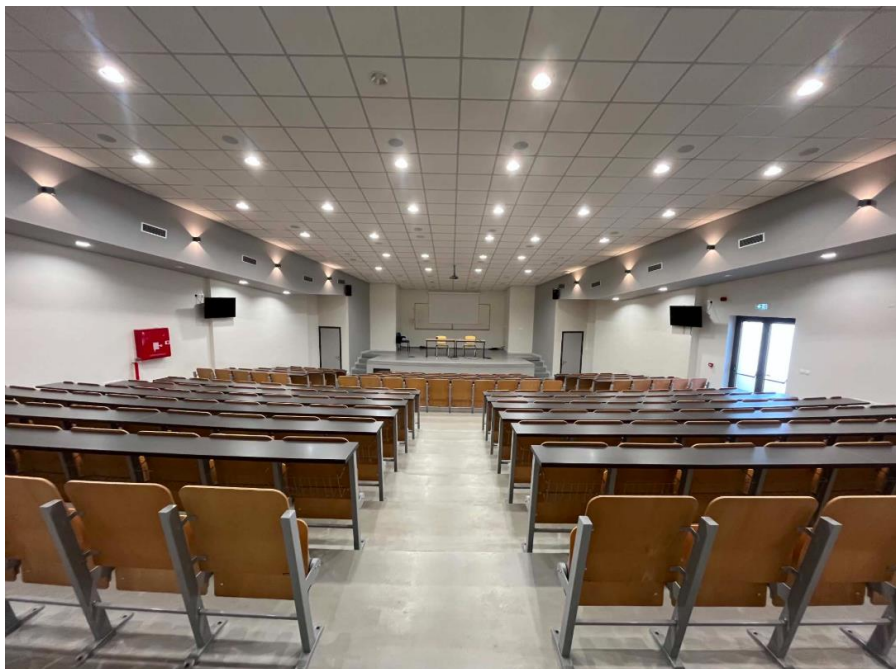
Σχήμα 6.1 : Κάτοψη Αμφιθεάτρου

Το κέλυφος του αμφιθεάτρου αποτελείται από σκληρές, κυρίως ανακλαστικές επιφάνειες, με εξαίρεση την οροφή. Αναλυτικότερα, οι περιμετρικοί τοίχοι είναι λείες συμπαγείς βαμμένες επιφάνειες από τσιμέντο με χαμηλή απορροφηση. Το δάπεδο αποτελείται από επίστρωση linoleum πάνω σε σκυρόδεμα όπως και η σκηνή. Η οροφή, η οποία είναι και η πιο απορροφητική επιφάνεια του χώρου, αποτελείται από διάτρητες απορροφητικές πλάκες ορυκτών ινών. Ο χώρος επίσης περιλαμβάνει και κατασκευές για τον φωτισμό και τον αερισμό

του αμφιθεάτρου από γυψοσανίδα αλλά και τα ξύλινα καθίσματα του ακροατηρίου με μεταλλικό σκελετό.



Σχήμα 6.2 : Εσωτερικό αμφιθεάτρου

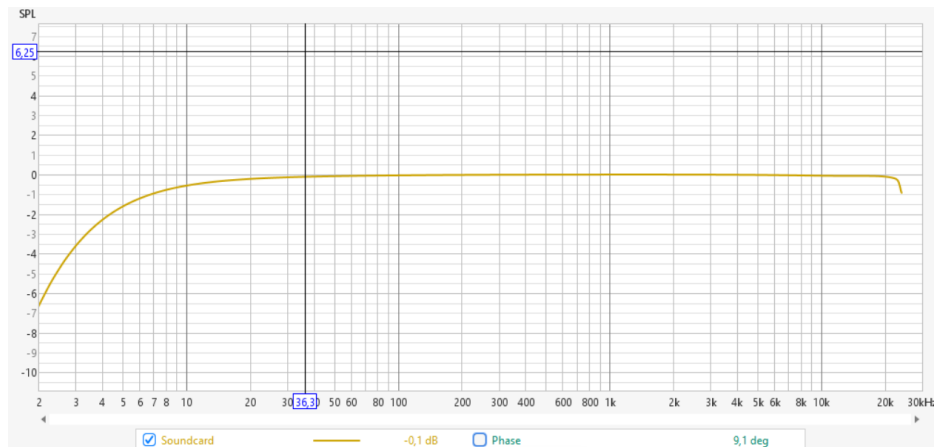


Σχήμα 6.3 : Εσωτερικό αμφιθεάτρου

6.2 Υλοποίηση Μετρήσεων

Για τη σωστή διεξαγωγή των μετρήσεων προηγήθηκε η βαθμονόμηση της κάρτας ήχου με τη χρήση καλωδίου loopback (RCA-->TRS) από την έξοδο στην είσοδο της κάρτας,

ακολουθώντας τις οδηγίες του REW. Για τη βαθμονόμηση του μικροφώνου δεν υπήρχε σχετικός επίσημος φάκελος calibration, παρά μόνο custom φάκελοι στο διαδίκτυο. Έτσι δεν δηλώθηκε κάποιο αρχείο για τη βαθμονόμηση του μικροφώνου.



Σχήμα 6.4 : Απόκριση συχνότητας κάρτας ήχου

Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων ακολουθήθηκαν οδηγίες από το ISO 3382, σύμφωνα με το οποίο τοποθετήθηκε η πηγή σε ύψος 1,5 μέτρου στο κέντρο της σκηνής και το μικρόφωνο στο ύψος των ακροατών, 1,2 μέτρα. Το σήμα που χρησιμοποιήθηκε από το REW ήταν σήμα σάρωσης ημιτόνου διάρκειας 5,5 δευτερολέπτων. Πραγματοποιήθηκαν 10 μετρήσεις εκ των οποίων οι 9, στο ακροατήριο και 1 σε απόσταση 1 μέτρου μακριά από το ηχείο, πάνω στη σκηνή, έτσι ώστε να βρεθεί η συχνοτική απόκριση του ηχείου.



Σχήμα 6.5 : Απόκριση συχνότητας ηχείο LD Iqoa 12a στο 1 μέτρο



Σχήμα 6.6 : Θέση μέτρησης συχνотικής απόκρισης ηχείου

Μετρήθηκε ο θόρυβος υποβάθρου σε τρεις θέσεις του αμφιθεάτρου, στα 33,8 33,9 και 34 dBA. Οι μετρήσεις έγιναν Κυριακή πρωί όπου το κτίριο ήταν εντελώς άδειο, με απενεργοποιημένες συσκευές εξαερισμού και κλειστές πόρτες. Το παραγόμενο σήμα από το ηχείο έπρεπε να ξεπερνά τον θόρυβο υποβάθρου κατά 45 dB σύμφωνα με το ISO3382, έτσι παράχθηκε ροζ θόρυβος ο οποίος μετρήθηκε από το μικρόφωνο στο 1 μέτρο στα 80 dB. Παρακάτω αποτυπώνονται στη κάτοψη οι θέσεις των μετρήσεων και οι αποστάσεις από τη πηγή. Οι θέσεις του μικροφώνου είναι στο 1,2 μέτρα ύψος και τουλάχιστον 3 μέτρα μακριά από πλευρικούς τοίχους.



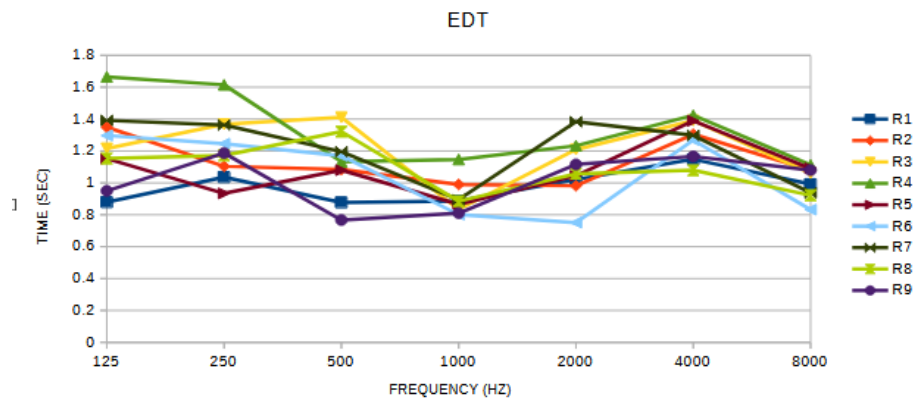
Σχήμα 6.7 : Θέσεις μετρήσεων

R1	4,98m
R2	8,2m
R3	11m
R4	14,8m
R5	13,4m
R6	8,3m
R7	14,7m
R8	8,6m
R9	5,6m

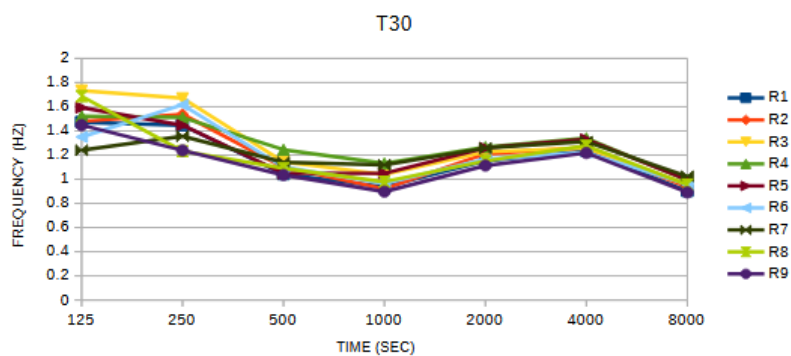
Πίνακας 6-1: Αποστάσεις θέσεων μέτρησης-πηγής

Για τη μέτρηση του χρόνου αντήχησης επιλέχθηκε ο δείκτης T30, αντί του T60 καθώς ο δεύτερος απαιτούσε μεγάλη αναλογία σήματος προς θόρυβο (75dB). Αντίθετα ο δείκτης T30 μπορεί να μετρηθεί με αναλογία της τάξης των 35 dB, η οποία επιτεύχθηκε κατά τις μετρήσεις. Μετά τις μετρήσεις των κρουστικών αποκρίσεων σε κάθε θέση και την εξαγωγή των δεικτών, έγινε αποθήκευση για κάθε θέση ξεχωριστά στο λογισμικό REW. Για την εξαγωγή των δεικτών STI, g, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Audacity και τα plugins Aurora. Στη συνέχεια ακολούθησε εξαγωγή των τιμών των δεικτών σε λογισμικό υπολογιστικών φύλλων. Οι μετρήσεις για τους δείκτες T30, EDT, C50, C80, D50, STI, G έγιναν σε ζώνες 1/3 της οκτάβας (από 53-10000 Hz), ωστόσο η κατασκευή των διαγραμμάτων έγινε στις κεντρικές συχνότητες των ζωνών οκτάβας (125,250,500,1000,2000,4000,8000 Hz) σύμφωνα με το πρότυπο ISO

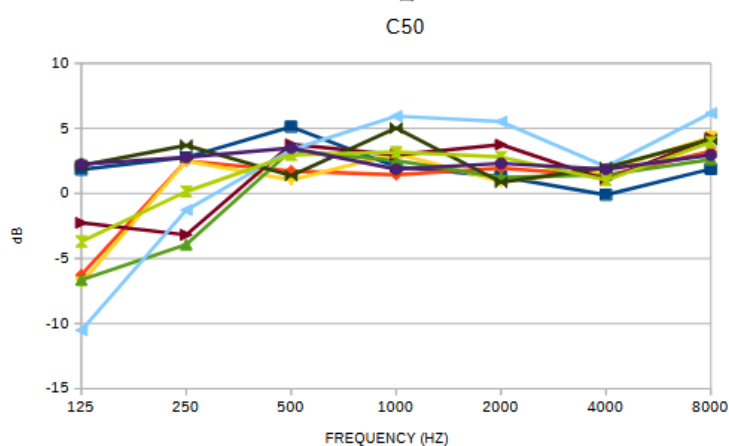
3382. Παρακάτω εμφανίζονται τα διαγράμματα για κάθε δείκτη στις συχνότητες που προαναφέρθηκαν, για τις μετρήσεις των θέσεων του ακροατηρίου, R1-R9.



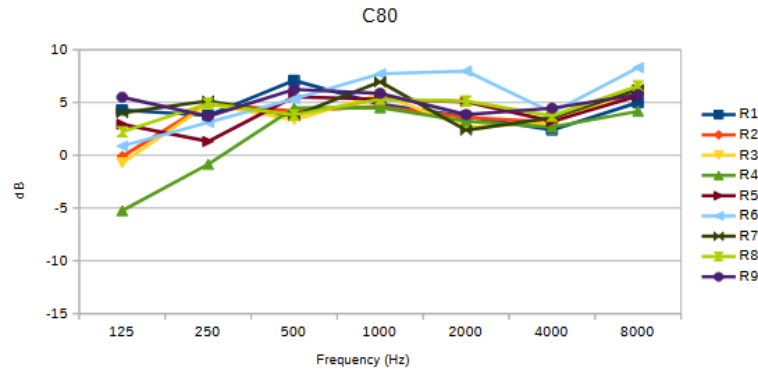
Σχήμα 6.8 : Πρώμος χρόνος αντήχησης EDT: R1-R9



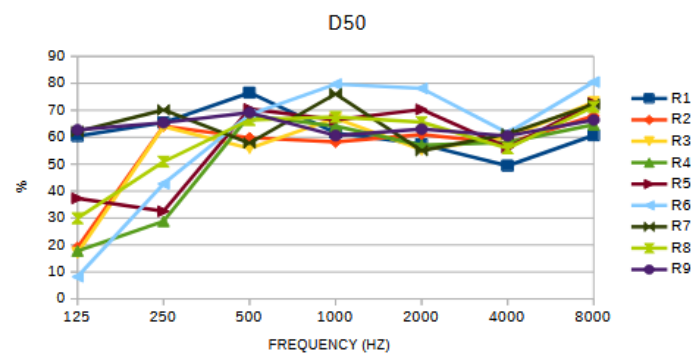
Σχήμα 6.9 : Χρόνος αντήχησης T30: R1-R9



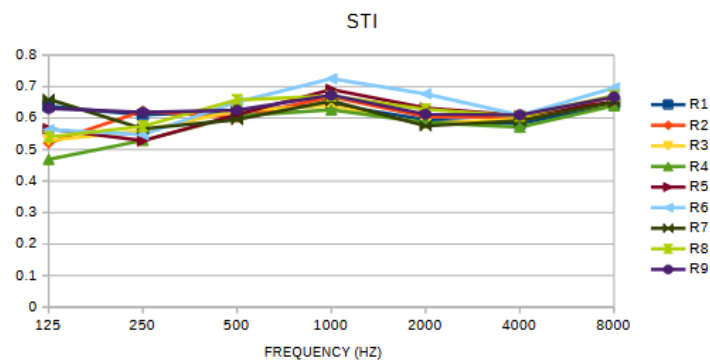
Σχήμα 6.10 : Ευκρίνεια (50ms) : R1-R9



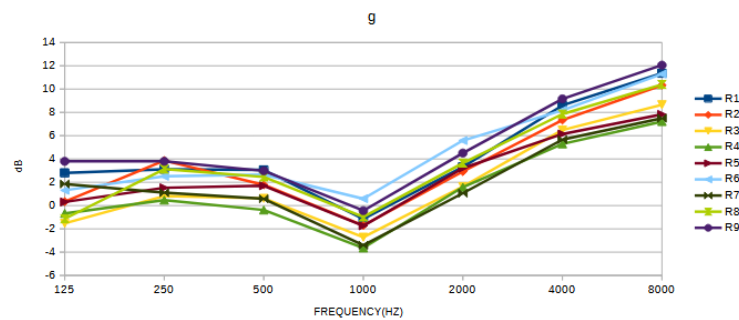
Σχήμα 6.11 : Ευκρίνεια (80ms) : R1-R9



Σχήμα 6.12: Διακριτότητα (50ms) : R1-R9



Σχήμα 6.13 : Δείκτης μετάδοσης ομιλίας STI :R1-R9



Σχήμα 6.14 : Παράγοντας στιβαρότητας πηγής g: R1-R9

6.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Δεδομένου του όγκου (1120 m^3) και της χρήσης (ομιλία) του αμφιθεάτρου, ο προβλεπόμενος χρόνος αντήχησης κυμαίνεται στο κοντά στο 1 δευτερόλεπτο (βλ. Σχήμα 2.2). Επίσης οι τιμές που παίρνει ο χρόνος αντήχησης θα πρέπει να είναι παρόμοιες όσο αυτό είναι δυνατόν σε όλες τις συχνότητες. Στις μετρήσεις του δείκτη T30, παρατηρείται ότι ο χώρος διατηρεί περισσότερο τις χαμηλές συχνότητες (125,250 Hz) ενώ στη συνέχεια οι τιμές εξισορροπούνται ανάμεσα στα 0,8-1,2 δευτερόλεπτα για τις συχνότητες των 500-2000 Hz, εύρος κρίσιμο για τη καταληπτότητα της ομιλίας. Επιπλέον, ο χρόνος αντήχησης του αμφιθεάτρου χαρακτηρίζει το χώρο ως ζωντανό καθώς οι τιμές δεν είναι χαμηλές αλλά ούτε απαγορευτικές για τη χρήση ομιλίας, με εξαίρεση τις χαμηλές συχνότητες οι οποίες σύμφωνα με τον Kuttruff (2001) συμβάλλουν λιγότερο στη καταληπτότητα του λόγου. Συνεπώς η αντήχηση στο αμφιθέατρο κυμαίνεται στα επιθυμητά όρια για τη τωρινή του χρήση. Ακόμα αξιολογώντας και τις τιμές του πρώιμου χρόνου αντήχησης EDT, παρατηρούμε ότι σε όλες τις θέσεις υπάρχει σχετικά καλή ομοιομορφία, καθώς τουλάχιστον για συχνότητες μεγαλύτερες των 500 Hz, η διακύμανση στις τιμές EDT δεν είναι μεγάλη. Από αυτές τις τιμές συμπεραίνουμε ότι η αντήχηση στον χώρο δεν είναι υπερβολική και το αμφιθέατρο βρίσκεται σε καλά επίπεδα όσον αφορά την ακουστική του επίδοση, αναμένοντας έτσι καλές τιμές στη καταληπτότητα της ομιλίας.

Προχωρώντας στην αξιολόγηση των δεικτών C50,D50, C80, γνωρίζουμε σύμφωνα με τον Σκαρλάτο (2021) ότι για αίθουσες οι οποίες προορίζονται για ομιλία, τιμές C50=+9 dB είναι οι βέλτιστες ενώ -3 dB θεωρούνται κακές. Εξαιρώντας πάλι τις χαμηλές συχνότητες, όπου δεν υπάρχει καλή ευκρίνεια για τις περισσότερες θέσεις, το συχνотικό εύρος μετά τη περιοχή των 500 Hz είναι καλό καθώς οι τιμές του δείκτη κυμαίνονται από 0-6 dB. Οι τιμές της διακριτότητας D50 επίσης παρατηρούμε ότι είναι καλές καθώς ανάλογα τη θέση κυμαίνονται ανάμεσα στο 60-80 %, που σημαίνει ότι μεγάλο μέρος της ηχητικής πληροφορίας της φωνής φτάνει έγκαιρα στον ακροατή. Οι τιμές για το C80 είναι αντίστοιχα ικανοποιητικές, ελαφρώς καλύτερες από αυτές του c50. Συνεπώς και για τη ακρόαση μουσικής, καθώς ο δείκτης c80 εφαρμόζεται σε σήματα μουσικής, η ευκρίνεια είναι ικανοποιητική. Όσον αφορά τις τιμές του δείκτη STI, ο οποίος συνυπολογίζει το θόρυβο βάθους και την αντήχηση, είναι ικανοποιητικές καθώς κυμαίνονται από 0,5-0,7 ανάλογα τη συχνότητα και τη θέση. Τέλος η ακουστική απολαβή G, υποδηλώνει την ενίσχυση της στάθμης λόγω χαρακτηριστικών του χώρου σε σχέση με τη στάθμη που φτάνει από τον απευθείας ήχο. Οι τιμές της φτάνουν στο ελάχιστο στο εύρος των 1000 Hz που σημαίνει ότι ο χώρος δεν ενισχύει αυτή τη συχνότητα ιδιαίτερα. Αντίθετα οι τιμές αυξάνονται ιδιαίτερα στις υψηλές συχνότητες των 8kHz. Κάτι τέτοιο μπορεί να οφείλεται στη κατευθυντικότητα της πηγής και στην ικανότητα του χώρου να διατηρεί την ενέργεια υψηλών συχνοτήτων ενώ ταυτόχρονα δεν επηρεάζεται η καταληπτότητα της ομιλίας αρνητικά. Επιπλέον παρατηρείται ότι οι τιμές αλλάζουν ανά θέση. Θέσεις κοντά στη πηγή (R1,R6, R9) έχουν τις μεγαλύτερες τιμές g στα 8kHz, γεγονός λογικό καθώς η R6 βρίσκεται ακριβώς απέναντι από τη πηγή άρα αυτή η τιμή οφείλεται στη κατευθυντικότητα της πηγής,

ενώ οι θέσεις R1,R9 βρίσκονται κοντά στη πηγή αλλά και σε σχετικά κοντινή απόσταση από τοίχο. Επομένως η ανάκλαση από τη συγκεκριμένη επιφάνεια συσσωρεύει ηχητική πληροφορία στο συγκεκριμένο συχνοτικό εύρος.

Η κατανομή στις τιμές των δεικτών έχει ενδιαφέρον ως προς το πως αλλάζει ανά θέση. Παρατηρείται ότι η θέση R6 εμφανίζει τη καλύτερη καταληπτότητα σε όλους τους δείκτες ενώ η αντήχηση σε αυτή τη θέση είναι περιορισμένη, καθώς δεν βρίσκεται κοντά σε κάποια επιφάνεια έτσι ώστε να εμφανίζει ενισχυμένες πλευρικές ανακλάσεις και η μετάδοση του ήχου οφείλεται στη πηγή. Επίσης, οι περισσότεροι δείκτες δεν εμφανίζουν μεγάλη διακύμανση στις τιμές ανά θέση με εξαίρεση μερικές τιμές δεικτών στις χαμηλές συχνότητες, και τον πρώιμο χρόνο αντήχησης. Γεγονός λογικό καθώς δεν βρίσκονται όλες οι θέσεις μετρήσεων κοντά σε επιφάνειες ώστε να υπάρχει ομοιομορφία στο χρόνο από τις πρώιμες ανακλάσεις. Το παραπάνω οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο χώρος χαρακτηρίζεται από συνέπεια στην ακουστική του συμπεριφορά σε όλες τις θέσεις, καλή καταληπτότητα και χρήσιμη αντήχηση που βελτιώνει την ακουστική εμπειρία χωρίς να την υποβαθμίζει.

6.4 Συμπεράσματα

Μετά τα αποτελέσματα των ακουστικών μετρήσεων, η ακουστική συμπεριφορά του αμφιθεάτρου χαρακτηρίζεται ως αρκετά ικανοποιητική. Οι τιμές των δεικτών ακουστικής ποιότητας βρίσκονται εντός ορίων, όπως οι τιμές του χρόνου αντήχησης αφού η χρήση της αίθουσας για διδασκαλία αποτελεί προτεραιότητα. Επίσης δείκτες ευκρίνειας, διακριτότητας και καταληπτότητας της ομιλίας εμφανίζουν εξίσου λογικές και αποδεκτές τιμές. Η ομοιομορφία του χώρου φαίνεται επίσης ικανοποιητική, καθώς παρατηρείται ότι η διακύμανση μεταξύ των θέσεων ανήκει σε λογικά πλαίσια, χωρίς να εμφανίζονται προβλήματα εστίασης του ήχου σε συγκεκριμένα σημεία είτε καθυστερημένες ανακλάσεις. Από τα αποτελέσματα των δεικτών παρατηρείται μόνο μια απόκλιση στα χαμηλά συχνοτικά εύρη η οποία κρίνεται ως αποδεκτή καθώς δεν επηρεάζει υπερβολικά τη καταληπτότητα. Παρόλα αυτά, οι μετρήσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σε άδειο αμφιθέατρο δεν μπορούν να μας δώσουν στοιχεία για το πως συμπεριφέρεται ο χώρος με πλήρες ακροατήριο. Οι ακροατές αναμένεται ότι θα επηρεάσουν την απορρόφηση του χώρου και θα μεταβάλλει τη συμπεριφορά της αίθουσας. Για αυτό το λόγο, η ανάπτυξη του μοντέλου προσομοίωσης της ακουστικής του χώρου κρίνεται απαραίτητη, προκειμένου να εξεταστεί η συμπεριφορά του χώρου σε διαφορετικές συνθήκες και στη συνέχεια να προταθούν οι κατάλληλες ακουστικές παρεμβάσεις οι οποίες θα βελτιστοποιήσουν την απόδοση.

Κεφάλαιο 7ο : Προσομοίωση ακουστικής αμφιθεάτρου

7. Εισαγωγή

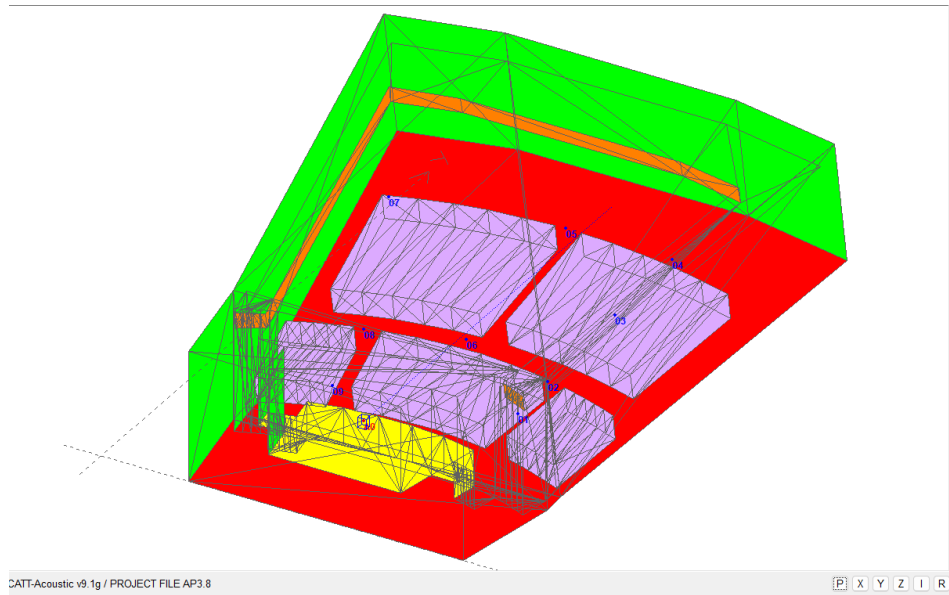
Στο 7ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μοντελοποίηση του χώρου στο λογισμικό Catt- Acoustics. Ο σχεδιασμός που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει την ακουστική προσομοίωση του χώρου στις συνθήκες που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις ώστε να καλιμπραριστεί το μοντέλο. Στη συνέχεια η προσομοίωση του χώρου σε συνθήκες γεμάτου ακροατηρίου ώστε να εξεταστεί η συμπεριφορά του χώρου σε αυτή τη κατάσταση και τέλος τη προσομοίωση του χώρου μετά τις προτεινόμενες ακουστικές παρεμβάσεις. Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί επίσης η διαδικασία για τη κατασκευή του μοντέλου και τα παραγόμενα αποτελέσματα.

7.1: Μεθοδολογία μοντελοποίησης του αμφιθεάτρου

Για να πραγματοποιηθεί η ακουστική προσομοίωση της συμπεριφοράς του αμφιθεάτρου ακολουθήθηκαν τα εξής στάδια. Αρχικά η υλοποίηση του σχεδίου του χώρου και η εξαγωγή του σε αρχείο GEO προκειμένου να μπορεί να ανοιχτεί και να γίνει η επεξεργασία του στο λογισμικό προσομοίωσης CATT. Έπειτα ακολούθησε η κατασκευή δύο αρχείων. Το πρώτο αρχείο (REC) που περιλαμβάνει τους ακροατές και τις θέσεις τους, δηλαδή τις θέσεις των μετρήσεων. Και το δεύτερο αρχείο (SRC) το οποίο περιλαμβάνει τη πηγή που χρησιμοποιήθηκε και τη θέση της. Από το αρχείο του σχεδίου που μετατράπηκε στη συνέχεια σε GEO, υπήρχε διαχωρισμός των επιφανειών του χώρου προκειμένου να περαστεί για κάθε επιφάνεια ο συντελεστής απορρόφησης / διάχυσης για κάθε συχνότητα και στη συνέχεια να ακολουθήσει το καλιμπράρισμα του μοντέλου ώστε τα αποτελέσματα των δεικτών που θα προκύψουν να συμφωνούν με τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

7.1.1 : Κατασκευή αρχείου GEO

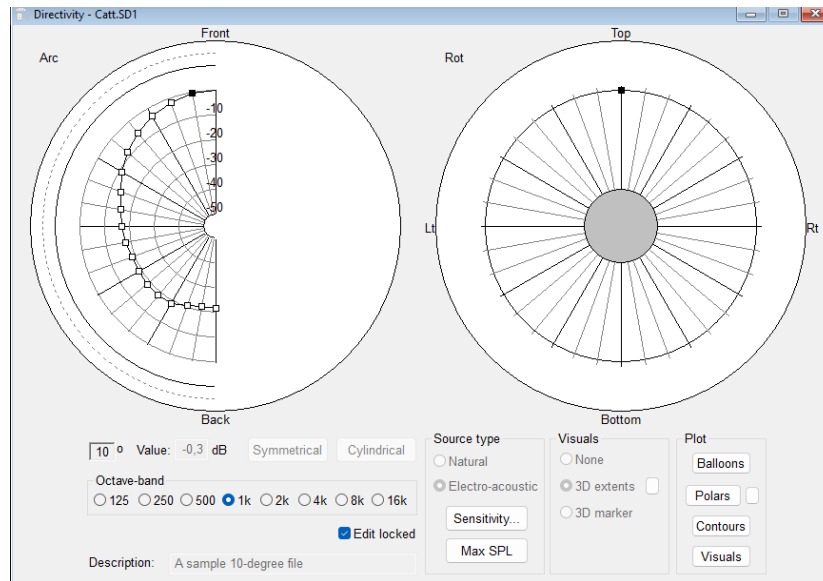
Η κατασκευή του αρχείου προέκυψε αρχικά από τη μετατροπή του αρχείου DXF του σχεδίου σε αρχείο συντεταγμένων GEO που το αναγνωρίζει το CATT. Το αρχείο που προέκυψε πέρασε από αρκετή επεξεργασία προκειμένου να φτάσει στη τελική του μορφή καθώς είχαν δημιουργηθεί προβλήματα ανοιχτών επιφανειών, επιφανειών γυρισμένων ανάποδα, προβληματικών όγκων κτλ. Τελικά, λύνοντας τα παραπάνω προβλήματα προέκυψε η τελική γεωμετρία του χώρου, αποτελούμενη από το δάπεδο, τους τοίχους, την οροφή, το ακροατήριο, τη σκηνή και τέλος κατασκευές κιβωτίων γυψοσανίδας για φωτισμό και Η/Μ εγκαταστάσεις. Ο σχεδιασμός του ακροατηρίου έγινε σε κουτιά στα οποία περάστηκε διαφορετική απορρόφηση για κάθε περίπτωση έτσι ώστε να μην γίνει πιο περίπλοκος ο σχεδιασμός. Κάθε κατηγορία επιφανειών χαρακτηρίστηκε με διαφορετικό χρώμα και έτσι προέκυψε η τελική γεωμετρία όπως φαίνεται και στην σχήμα 7.1.



Σχήμα 7.1 : Τρισδιάστατη απεικόνιση αμφιθεάτρου.

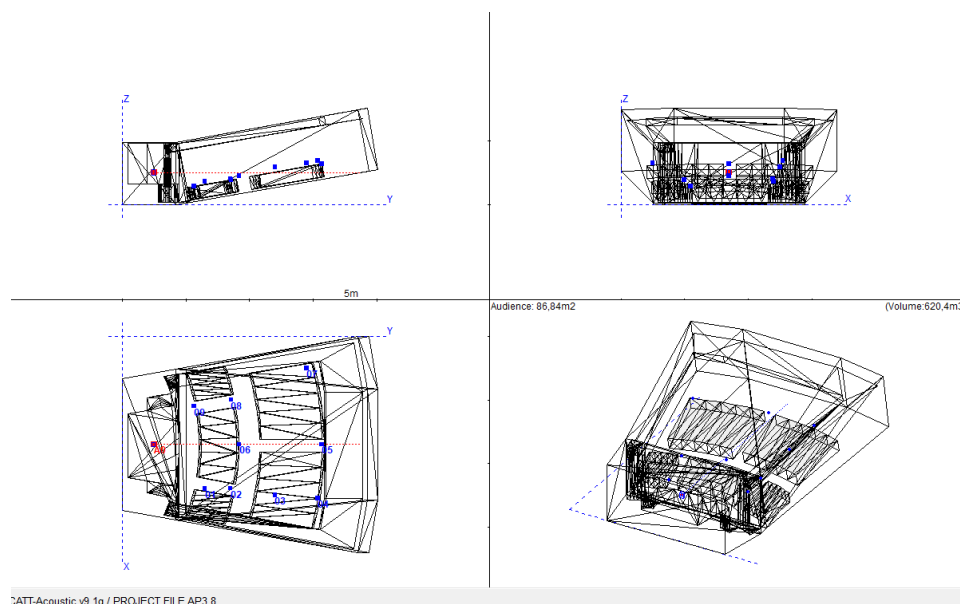
7.1.2 : Κατασκευή αρχείων REC και SRC

Για τη κατασκευή του αρχείου με τις θέσεις των ακροατών χρειάστηκαν οι μόνοι οι συντεταγμένες για κάθε θέση οι οποίες βρέθηκαν σύμφωνα με τις αποστάσεις από τη πηγή που είχαν μετρηθεί στις κανονικές μετρήσεις και από τις συντεταγμένες κοντινών σημείων. Το ύψος επίσης για κάθε θέση μέτρησης δεν ήταν σταθερό καθώς το δάπεδο είναι κεκλιμένο. Για τη κατασκευή του αρχείου της πηγής, εκτός από τις συντεταγμένες της θέσης του ηχείου, το οποίο ήταν στο κέντρο της σκηνής, χρειάστηκε να οριστεί και η κατευθυντικότητα του ηχείου στο πρόγραμμα ώστε να χρησιμοποιηθεί η ίδια πηγή. Για αυτό το λόγο, βρέθηκε από βάση δεδομένων του λογισμικού EASE 5 αρχείο για το ηχείο που χρησιμοποιήθηκε, έγινε εξαγωγή των δεδομένων μέσω λογισμικού προβολής glt αρχείων και στη συνέχεια κατασκευάστηκε νέα κατευθυντικότητα στο CATT με τις τιμές του ηχείου Icoa 12a (<https://www.afmg.eu/en/ease-loudspeaker-database>).



Σχήμα 7.2 : Ορισμός κατευθυντικότητας ηχείου στο CATT.

Έπειτα, αφού ορίστηκε αρχείο sd.1 με τη κατευθυντικότητα του ηχείου που χρησιμοποιήθηκε, κατασκευάστηκε το αρχείο της πηγής στο οποίο το λογισμικό χρησιμοποιούσε το συγκεκριμένο ηχείο, στις συντεταγμένες της θέσης που είχε τοποθετηθεί και στις μετρήσεις, στοχεύοντας ευθεία προς το κέντρο του ακροατηρίου. Οι θέσεις πηγής και δεκτών επιβεβαιώθηκαν και από τη προβολή του CATT.



Σχήμα 7.3: Απεικόνιση αμφιθεάτρου, πηγής και δεκτών από διαφορετικές όψεις

7.2 Καλιμπράρισμα του μοντέλου για άδειο ακροατήριο

Αφού κατασκευάστηκε η γεωμετρία, τα αρχεία πηγής και δεκτών και χωρίστηκαν οι επιφάνειες, ακολούθησε το καλιμπράρισμα του μοντέλου με βάση τον χρόνο αντήχησης που είχαμε από τις μετρήσεις σε κάθε θέση αλλά και κατά μέσο όρο. Ο στόχος κατά τη διαδικασία ήταν να εισαχθούν οι απορροφήσεις από τα υλικά που αποτελείται η κάθε επιφάνεια και με συνεχόμενες δοκιμές να παρατηρείται η συμπεριφορά του μοντέλου. Αφού επιλέχθηκαν τα κατάλληλα υλικά, οι απορροφήσεις τους έπρεπε να μεταβληθούν σε λογικά πλαίσια ώστε και να πληρούν τις απαιτήσεις των μετρήσεων αλλά και να μη ξεφεύγουν από τις αναμενόμενες τιμές της βιβλιογραφίας. Για αυτό το λόγο κατασκευάστηκε ένας πίνακας σε υπολογιστικό φύλλο στον οποίο περάστηκε η ονομασία του υλικού που χρησιμοποιήθηκε, η βιβλιογραφική του τιμή απορρόφησης για κάθε συχνότητα (Long M., 2006, acoustic-supplies.com), η τιμή που εν τέλει χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο και ο υπολογισμός της απόκλισης ανάμεσα στις δυο τιμές. Σε κάθε περίπτωση το σφάλμα κρινόταν από το κατά πόσο είναι λογικό η τιμή να αποκλίνει από τη βιβλιογραφική τιμή για κάθε υλικό, από την επίδραση που είχε συνολικά στο χώρο με βάση το εμβαδό της επιφάνειας και όχι αυστηρά από το αποτέλεσμα του σφάλματος. Τα υλικά που επιλέχθηκαν και η μεταβολή στους συντελεστές απορρόφησης τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-1. Οι τιμές της απορρόφησης παρουσιάζονται σε μορφή ποσοστού όπως γράφτηκαν και στο λογισμικό.

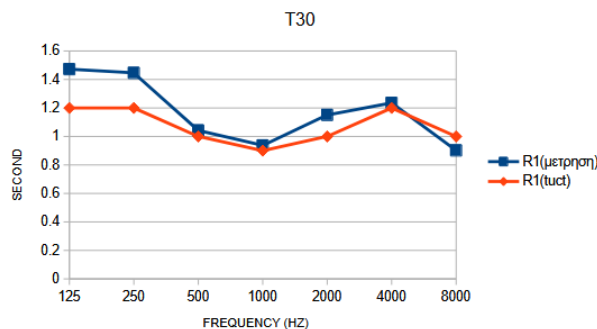
		ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ					
σκληρή	Floor concrete or terazzo	1	1	1.5	2	2	2
σκληρή	χρησιμοποιήθηκε	1	1	1.5	2	2	1.5
ΔΙΑΦΟΡΑ		0	0	0	0	0	0.5
ΔΑΠΕΔΟ	Floor linoleum, vinyl on concrete	2	3	3	3	3	2
ΔΑΠΕΔΟ	χρησιμοποιήθηκε	2	3	3	3	2	1.5
ΔΙΑΦΟΡΑ		0	0	0	0	1	0.5
ΟΡΟΦΗ	FILM FIBERGLAS S 2"	52	82	88	91	75	55
ΟΡΟΦΗ	χρησιμοποιήθηκε	52	82	83	86	82	55
ΔΙΑΦΟΡΑ		0	0	5	5	-7	0
αεραγωγοί		30	25	20	17	15	10
αεραγωγοί	χρησιμοποιήθηκε	30	25	27	24	15	7
ΔΙΑΦΟΡΑ		0	0	-7	-7	0	3
ακροατήριο	Theatre seats (wood, empty)	3	4	5	7	8	8
ακροατήριο	χρησιμοποιήθηκε	3	4	15	14	8	5.5
ΔΙΑΦΟΡΑ		0	0	-10	-7	0	2.5
ΤΟΙΧΟΙ	CONCRETE	10	5	6	7	9	8
χρησιμοποιήθηκε		10	5	14	14	9	5
ΔΙΑΦΟΡΑ		0	0	-8	-7	0	3

Πίνακας 7-1 : Βιβλιογραφικοί συντελεστές απορρόφησης, συντελεστές που χρησιμοποιήθηκαν, υπολογισμός διαφοράς

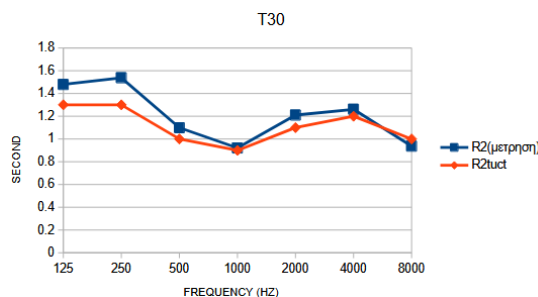
Λόγω της χρήσης περιορισμένου αριθμού ακτινών κατά τη προσομοίωση οι τιμές στον υπολογισμό κάθε δείκτη έβγαιναν ελαφρώς διαφορετικές κάθε φορά. Για αυτό ο στόχος κατά το καλιμπράρισμα δεν ήταν να επιτευχθούν απαραίτητα ακριβώς ίδιες τιμές με τις μετρήσεις αλλά η τάση να είναι ίδια.

7.2.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης για άδειο ακροατήριο

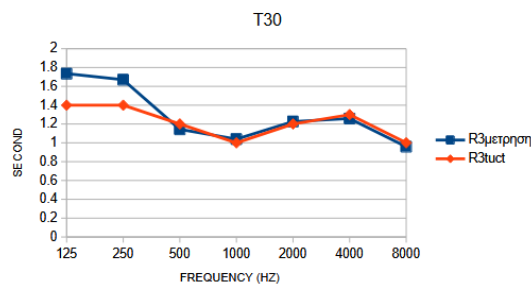
Μετά από πολλές δοκιμές, προσαρμόζοντας κάθε φορά το χρόνο αντήχησης, προέκυψαν οι χρόνοι T30 για κάθε θέση μέτρησης. Οι χρόνοι περάστηκαν σε υπολογιστικό φύλλο, συγκρίθηκαν με τους χρόνους των μετρήσεων, υπολογίστηκε η διαφορά τους και δημιουργήθηκε γράφημα σύγκρισης ανάμεσα σε κανονική μέτρηση και προσομοίωση (TUCT). Στα διαγράμματα που παρουσιάζονται παρακάτω, παρατηρούμε ταύτιση ανάμεσα στις τιμές των μετρήσεων και στις τιμές της προσομοίωσης για τις περισσότερες συχνότητες. Όπως προαναφέρθηκε κύριος στόχος ήταν να διαμορφωθεί η τάση στις τιμές ώστε να ταιριάζει με τις μετρήσεις, καθώς τα αποτελέσματα άλλαζαν ακόμα και με επανάληψη της προσομοίωσης με ίδιες παραμέτρους.



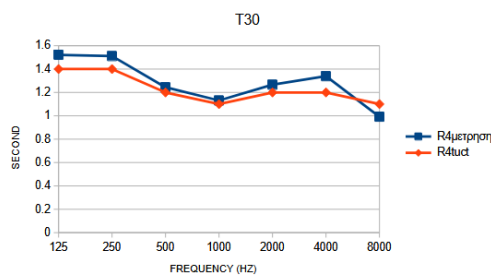
Σχήμα 7.4 : χρόνος αντήχησης μέτρησης, προσομοίωσης για θέση 1



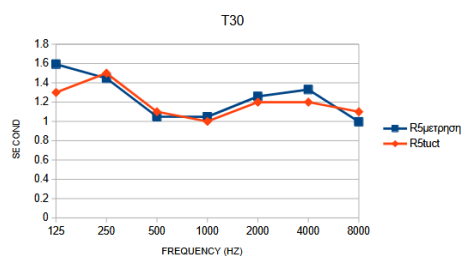
Σχήμα 7.5 : χρόνος αντήχησης μέτρησης, προσομοίωσης για θέση 2



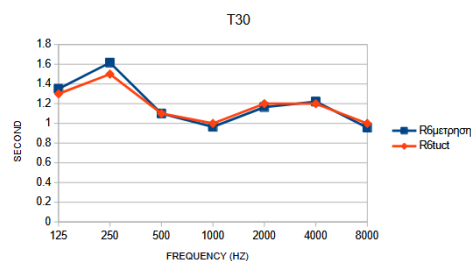
Σχήμα 7.6 : χρόνος αντήχησης μέτρησης, προσομοίωσης για θέση 3



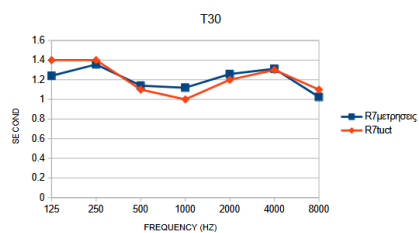
Σχήμα 7.7 : χρόνος αντήχησης μέτρησης, προσομοίωσης για θέση 4



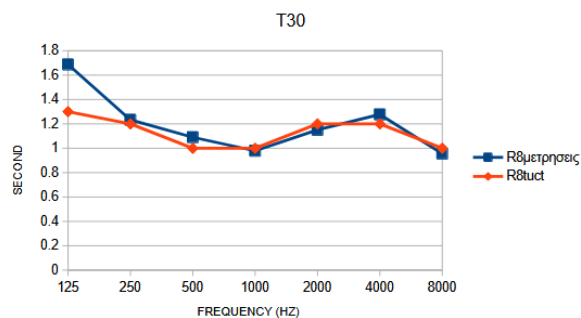
Σχήμα 7.8 : χρόνος αντήχησης μέτρησης, προσομοίωσης για θέση 5



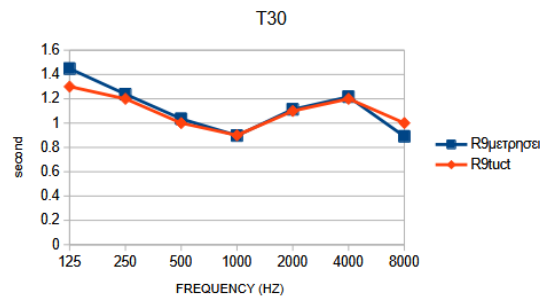
Σχήμα 7.9 : χρόνος αντήχησης μέτρησης, προσομοίωσης για θέση 6



Σχήμα 7.10 : χρόνος αντήχησης μέτρησης, προσομοίωσης για θέση 7

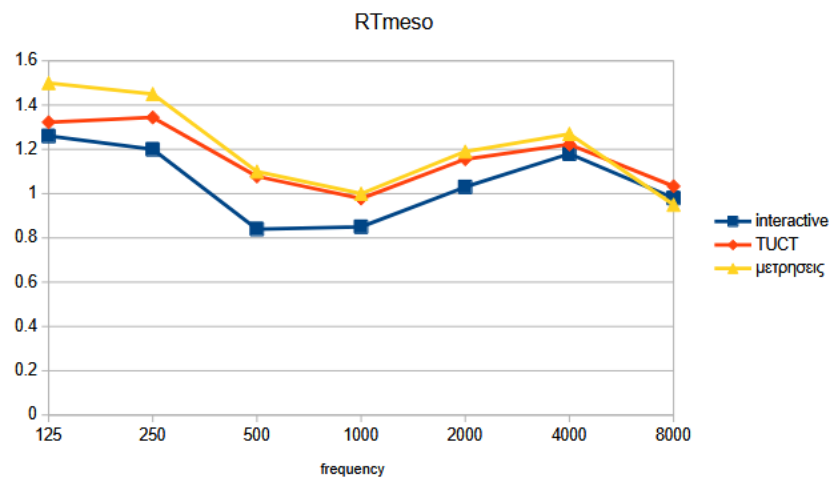


Σχήμα 7.11 : χρόνος αντήχησης μέτρησης, προσομοίωσης για θέση 8



Σχήμα 7.12 : χρόνος αντήχησης μέτρησης, προσομοίωσης για θέση 9

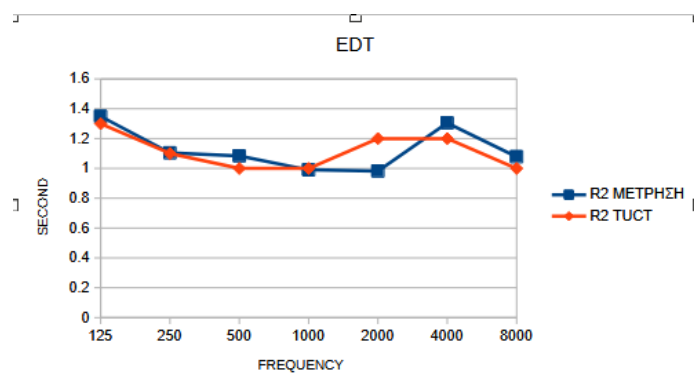
Στο σχήμα 7.13 παρουσιάζεται ένα γράφημα με το μέσο όρο των τιμών για όλες τις θέσεις σε κάθε συχνότητα για τις μετρήσεις, την προσομοίωση TUCT, η οποία προσομοιώνει τις διαδρομές των ακτινών ήχου που παράγεται από τη πηγή που έχουμε ορίσει, και τις τιμές Interactive RT estimation. Δηλαδή, μια γρήγορη εκτίμηση του λογισμικού για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης της αίθουσας και όχι ανά θέση. Οι τιμές του Interactive RT estimation χρησιμοποιήθηκαν για το αρχικό καλιμπράρισμα του μοντέλου ώστε να πλησιαστούν οι γενικές τιμές και στη συνέχεια τελειοποιήθηκε με βάση τις τιμές ανά θέση ακροατή.



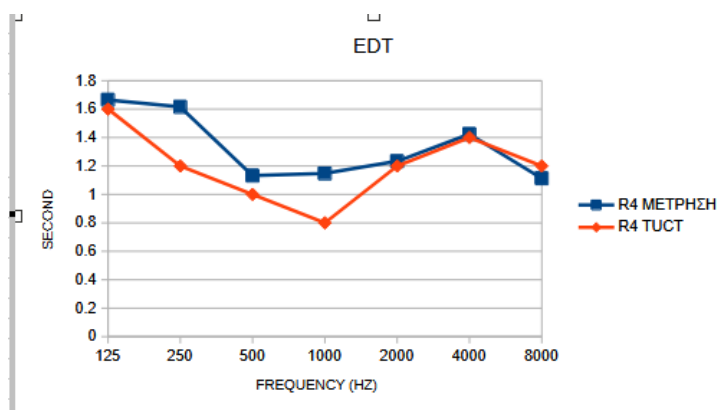
Σχήμα 7.13 : Σύγκριση τιμών interactive rt estimation, μέσου όρου θέσεων ανά συχνότητα για μετρήσεις και για προσομοίωση TUCT

Αφού ολοκληρώθηκε το καλιμπράρισμα των απορροφήσεων με βάση τις τιμές του χρόνου αντήχησης και κατασκευάστηκαν τα γραφήματα ανάμεσα σε κανονικές μετρήσεις και προσομοίωση, ακολούθησε και η εξαγωγή τιμών για τον πρώιμο χρόνο αντήχησης EDT. Στον πρώιμο χρόνο αντήχησης οι τιμές ανάμεσα σε μετρήσεις και προσομοίωση εμφάνισαν μεγαλύτερη απόκλιση από ότι οι τιμές του χρόνου αντήχησης, γεγονός λογικό καθώς δεν ήταν η πρώτη προτεραιότητα για το καλιμπράρισμα του μοντέλου. Για να μειωθούν ωστόσο οι

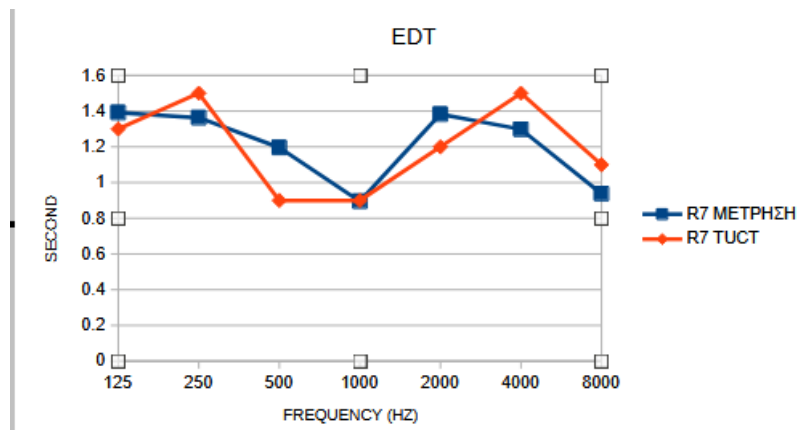
διαφορές έγινε εισαγωγή από συντελεστές διάχυσης για τα υλικά καθώς το λογισμικό χρησιμοποιούσε default τιμές 10%. Χρησιμοποιήθηκε συντελεστής διάχυσης $s=0.4$ για τα ξύλινα καθίσματα ενώ για δάπεδο, τοίχους κτλ. Χρησιμοποιήθηκε default τιμή 10% που χρησιμοποιείται για μεγάλες λείες σχετικά επιφάνειες (Lannace et. Al, 2019, Christensen & Rindel, 2005). Επειδή οι διαφορετικές τιμές συντελεστή διάχυσης επηρέαζαν και τους χρόνους αντήχησης, αποφασίστηκε η συμφωνία του χρόνου αντήχησης ανάμεσα σε μετρήσεις και προσομοίωση να τεθεί σε προτεραιότητα. Παρακάτω παρουσιάζονται γραφήματα ανάμεσα σε προσομοίωση και μέτρηση για ορισμένες θέσεις για τον πρώιμο χρόνο αντήχησης, όπως επίσης και γραφήματα με το μέσο όρο των τιμών για όλες τις θέσεις για κάθε συχνότητα ανάμεσα σε μετρήσεις και προσομοίωση.



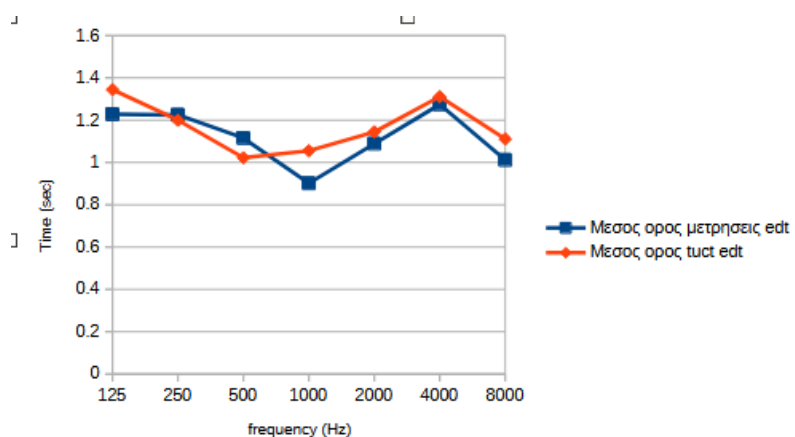
Σχήμα 7.14 : Σύγκριση πρώιμου χρόνου αντήχησης μέτρησης-προσομοίωσης για θέση 2



Σχήμα 7.15 : Σύγκριση πρώιμου χρόνου αντήχησης μέτρησης-προσομοίωσης για θέση 4



Σχήμα 7.16 : Σύγκριση πρώιμου χρόνου αντήχησης μέτρησης-προσομοίωσης για θέση 7



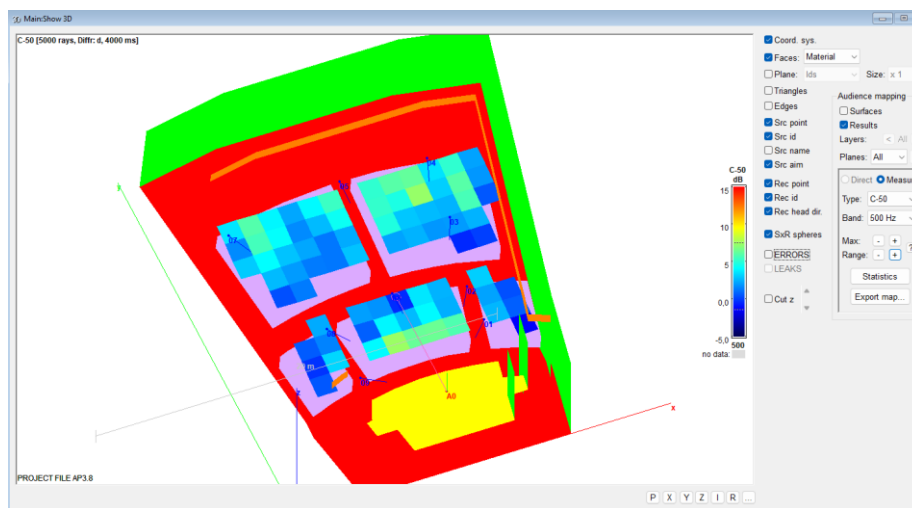
Σχήμα 7.17 : Σύγκριση μέσου όρου πρώιμου χρόνου αντήχησης των 9 θέσεων ανάμεσα σε μετρήσεις και προσομοίωση

Συνεχίζοντας στην εξαγωγή των υπολοίπων δεικτών, παρακάτω παρουσιάζεται χρωματικός χάρτης για τις τιμές του δείκτη C50 για τα 500 και τα 1000 Hz, ως αντιπροσωπευτικές ζώνες συχνοτήτων της σημαντικότερης περιοχής συχνοτήτων για την αξιολόγηση της ομιλίας. Οι τιμές των μετρήσεων για τις συγκεκριμένες συχνότητες, οι οποίες παρουσιάζονται πίνακα 7-2, κυμαίνονταν από +1,44 έως +5,94 dB. Συγκρίνοντας τις τιμές των 500 hz με το χρωματικό χάρτη του σχήματος 7.18 βλέπουμε ότι υπάρχει συμφωνία ανάμεσα σε μετρήσεις και προσομοίωση. Επίσης συγκρίνοντας τις τιμές των μετρήσεων για τα 1000 Hz πάλι παρατηρούμε καλή αντιστοιχία, καθώς οι θέσεις 6,7 έχουν τις μεγαλύτερες τιμές και στον χρωματικό χάρτη όπως και στις μετρήσεις, δηλαδή κοντά στα +6 dB. Όμως, παρατηρούμε αντιστοιχία και στις υπόλοιπες θέσεις μετρήσεων που συμπίπτουν με το ακροατήριο (R1-R4). Τέλος, όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.19, για τα 1000 hz οι μεγαλύτερες τιμές του δείκτη είναι στις μπροστινές θέσεις, που σημαίνει ότι η ευκρίνεια είναι μεγαλύτερη εκεί λόγω του

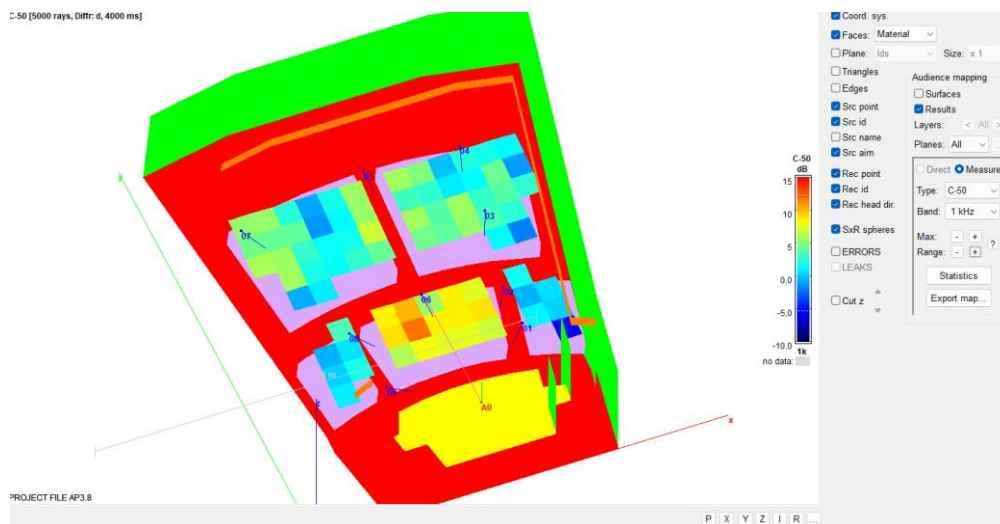
απευθείας ήχου και των πρώιμων ανακλάσεων, ενώ ακόμα και σε απομακρυσμένες θέσεις οι τιμές του δείκτη παραμένουν θετικές .

frequency	R1	R2	R3	R4	C50	R6	R7	R8	R9
500	5.12	1.73	1.03	3.3	3.77	3.35	1.37	2.96	3.5
1000	2.05	1.44	3.07	2.53	2.96	5.94	5.02	3.18	1.86

Πίνακας 7-2 : Τιμές μετρήσεων c50 για 500,1000 HZ



Σχήμα 7.18 : Αποτελέσματα χρωματικού χάρτη για δείκτη c50 500hz



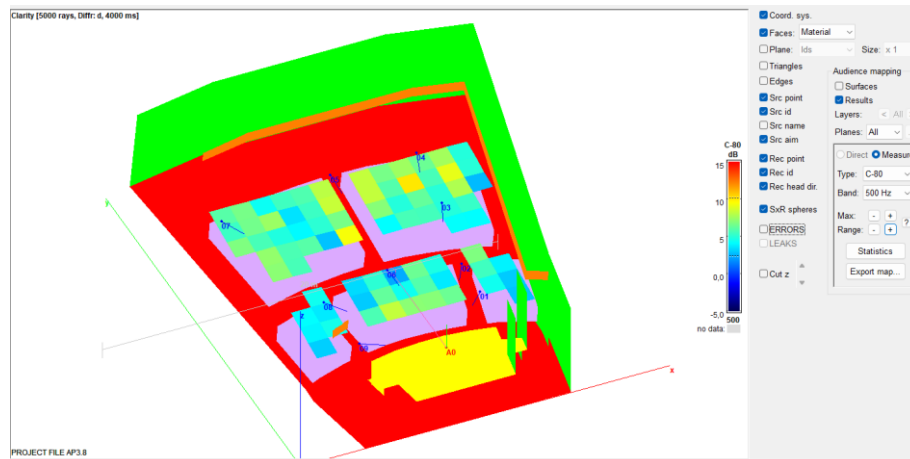
Σχήμα 7.19 : Αποτελέσματα χρωματικού χάρτη για δείκτη c50 1000 hz

Όσον αφορά τον δείκτη c80, παρατηρούμε στα παρακάτω σχήματα ότι για τις περισσότερες θέσεις υπάρχει ταύτιση των τιμών καθώς η διαφορά κυμαίνεται κοντά στο 1 dB με εξαίρεση τη θέση 6 όπου φαίνεται να υπάρχει μια διαφορά 3 dB για τα 500 hz. Στα 1000 Hz παρατηρείται

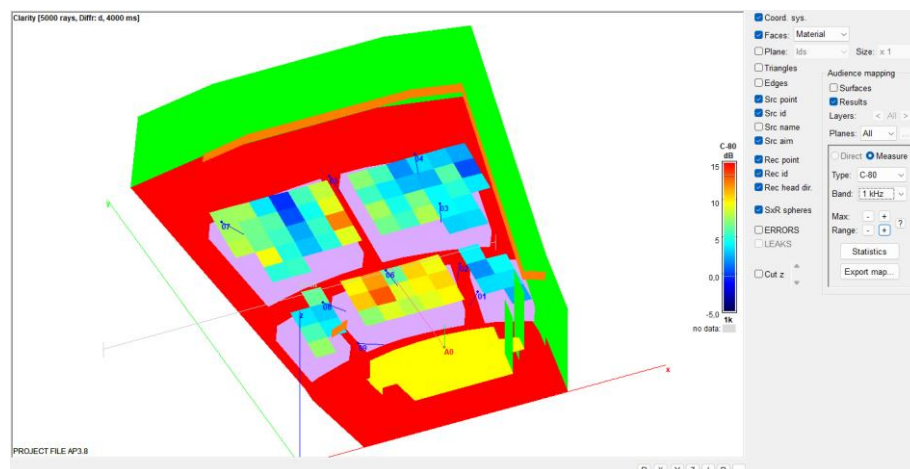
ακόμα πιο μεγάλη ταύτιση ανάμεσα στις τιμές σε όλες τις θέσεις, γεγονός που μας δείχνει ότι το μοντέλο συμπεριφέρεται αρκετά κοντά με τις πραγματικές συνθήκες.

					C80				
FREQUENCY	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
500	7.08	4.18	3.36	4.48	5.54	5.35	3.73	3.83	6.24
1000	4.84	4.63	5.77	4.51	5.32	7.72	6.96	5.3	5.87

Πίνακας 7-3 : Τιμές ευκρίνειας C80 για όλες τις θέσεις για τις συχνότητες 500,1000 Hz.



Σχήμα 7.20 : Αποτελέσματα χρωματικού χάρτη για δείκτη c80 500 Hz

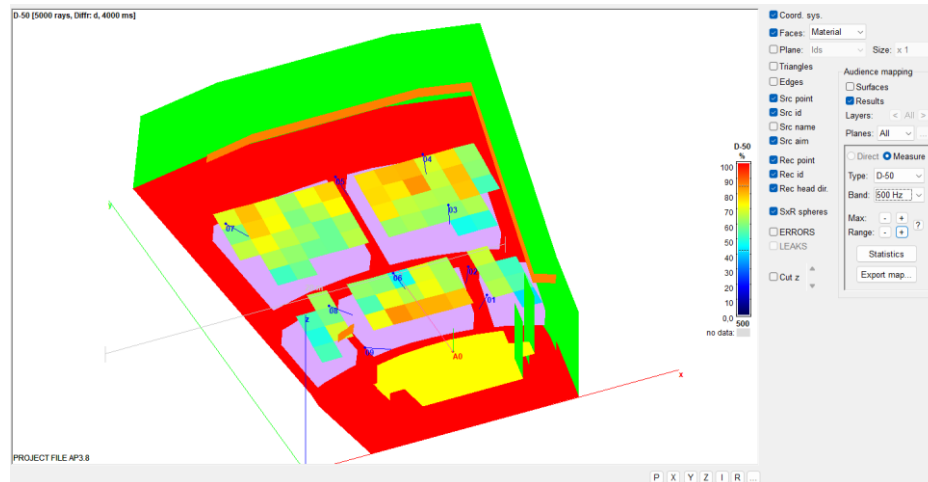


Σχήμα 7.21 : Αποτελέσματα χρωματικού χάρτη για δείκτη c80 1000 Hz

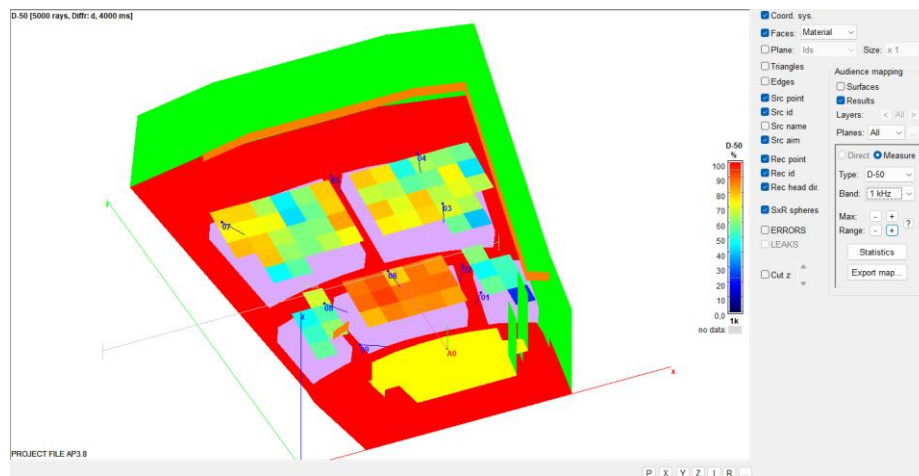
Για τις τιμές της διακριτότητας D50 πάλι παρατηρείται καλή συμφωνία ειδικότερα στη συχνότητα των 1000 Hz. Στα 500 Hz πάλι η μεγαλύτερη απόκλιση εμφανίζεται στη θέση 6. Η απόκλιση που εμφανίζεται στη συγκεκριμένη θέση στους δείκτες C80,D50 και για τις δύο συχνότητες, μας δείχνει ότι υποεκτιμά τη πρώιμη ενέργεια. Δηλαδή, με βάση τον ορισμό του D50 το μοντέλο υπολογίζει λιγότερη ενέργεια στα πρώτα 50 ms, ή περισσότερη ενέργεια μετά τα 50 ms (βλ. Κεφάλαιο 2.4.5). Όμως η καλή συμφωνία ανάμεσα σε μέτρηση και προσομοίωση για τον χρόνο αντήχησης δείχνει ότι υποεκτιμάται ο πρώιμος ήχος και όχι η ενέργεια μετά τα 50 ms. Η υποεκτίμηση του πρώιμου ανακλώμενου ήχου για ορισμένες θέσεις μπορεί να σχετίζεται με τους συντελεστές διάχυσης για ορισμένες επιφάνειες.

					D50				
FREQUENCY	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
500		76.5	59.8	55.9	68.1	70.5	68.4	57.8	66.4
1000		61.6	58.2	67	64.1	66.4	79.7	76.1	67.5

Πίνακας 7-4 : Τιμές μετρήσεων D50 για 500-1000 Hz

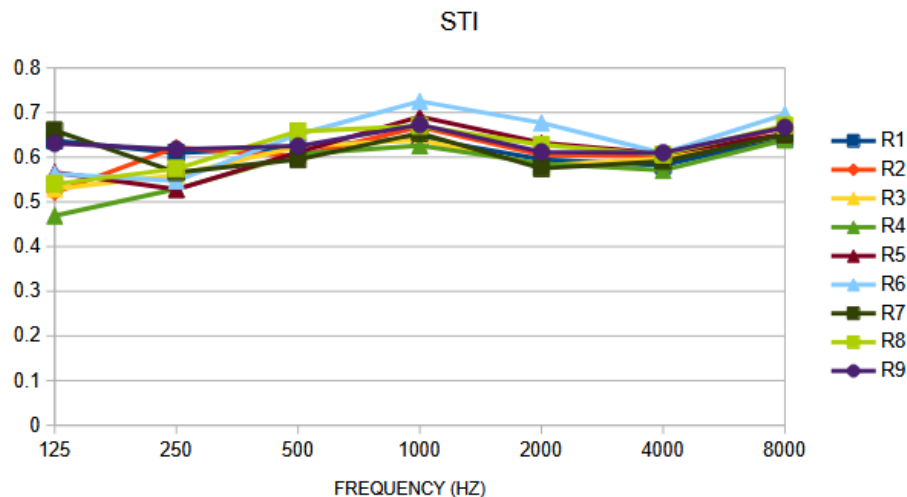


Σχήμα 7.22 : Αποτελέσματα χρωματικού χάρτη για δείκτη D50 500 Hz

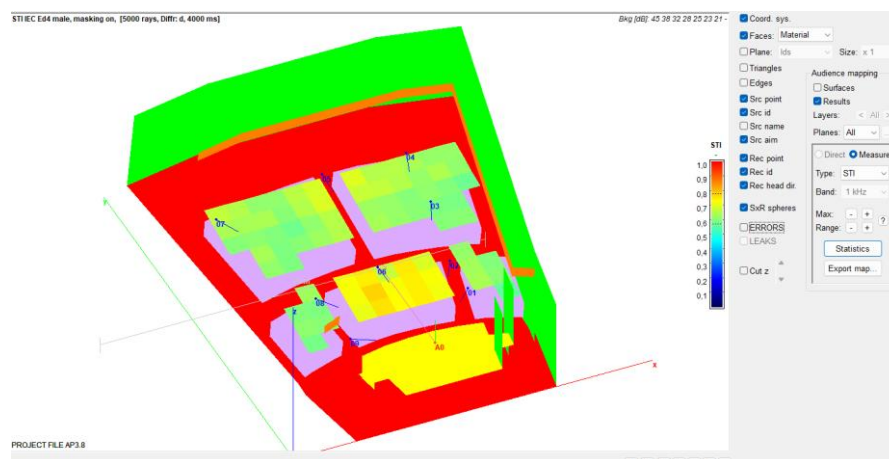


Σχήμα 7.23 : Αποτελέσματα χρωματικού χάρτη για δείκτη D50 1000 Hz

Τέλος συγκρίνοντας τον δείκτη STI για μετρήσεις και προσομοίωση παρατηρείται μεγάλη ταύτιση καθώς στις θέσεις των μετρήσεων οι τιμές κυμαίνονταν ανάμεσα στο 0.6-0.8 όπως και στη προσομοίωση για τα 1000 hz.



Σχήμα 7.24 : Αποτελέσματα μετρήσεων STI



Σχήμα 7.25 : Αποτελέσματα χρωματικού χάρτη για δείκτη STI

7.3 Καλιμπράρισμα του μοντέλου για γεμάτο ακροατήριο

Αφού ολοκληρώθηκε η βαθμονόμηση του μοντέλου σύμφωνα με τις συνθήκες που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, στη συνέχεια έπρεπε να εξεταστεί η συμπεριφορά του αμφιθεάτρου σε κανονικές συνθήκες. Δηλαδή πως μεταβάλλονται οι δείκτες που εξετάστηκαν και νωρίτερα όταν το ακροατήριο είναι πλήρες. Η συμπεριφορά της αίθουσας αναμένεται να αλλάξει καθώς το γεμάτο ακροατήριο θα προσθέσει απορρόφηση και η ηχητική ενέργεια θα φθίνει γρηγορότερα. Μένει να δούμε πόσο θα μεταβληθούν οι τιμές του χρόνου αντήχησης και των υπολοίπων δεικτών καθώς και αν η αίθουσα γίνεται υπερβολικά “στεγνή” για τη χρήση που προορίζεται και για τις προτεινόμενες τιμές από τη βιβλιογραφία.

Η μόνη αλλαγή που έγινε για την προσομοίωση του γεμάτου ακροατηρίου, ήταν η μεταβολή στις απορροφήσεις του ακροατηρίου. Οι υπόλοιπες επιφάνειες παραμένουν όπως ακριβώς ήταν και στη κατάσταση άδειου ακροατηρίου. Καταγράφηκαν οι τιμές της βιβλιογραφίας για

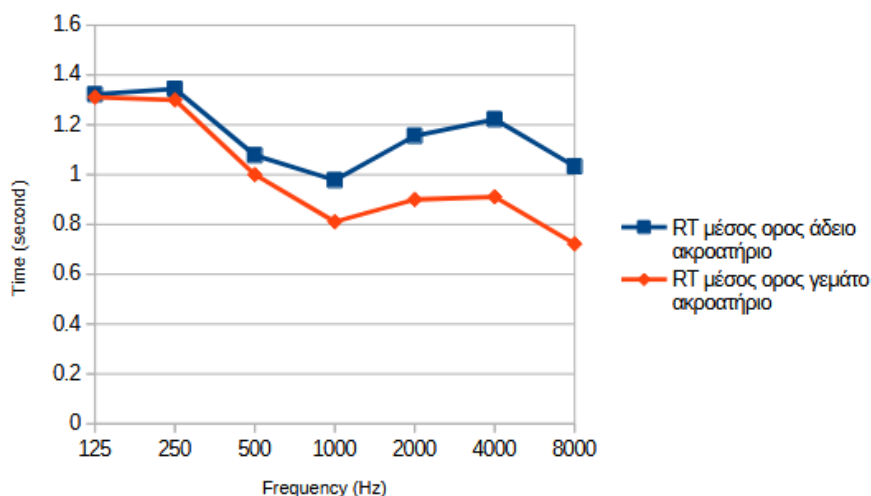
γεμάτο ακροατήριο και έτσι τα ποσοστά απορρόφησης άλλαξαν όπως φαίνεται και στο Πίνακα 7-5

Theatre seats (wood, empty)	3	4	15	14	8	8
Theatre seats (wood, fully occupied)	50	30	40	76	80	76

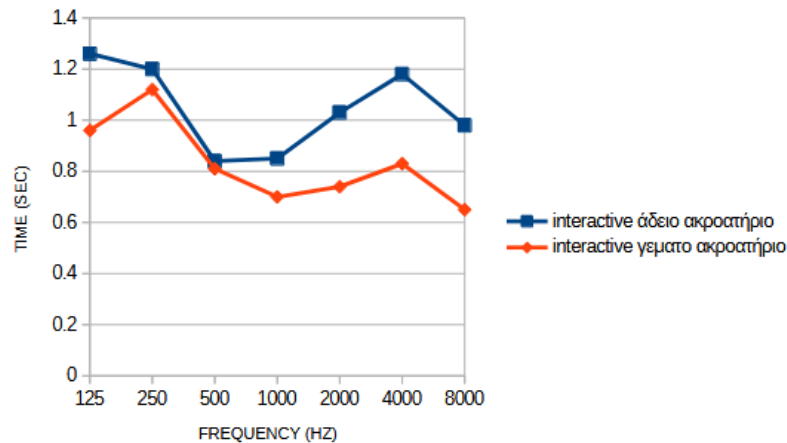
Πίνακας 7-5 : Μεταβολή απορροφήσεων για ακροατήριο (Long M., 2006)

7.3.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης για γεμάτο ακροατήριο

Για να εξεταστεί η μεταβολή στο χρόνο αντήχησης με την αύξηση της απορρόφησης στο ακροατήριο, έγινε εξαγωγή των τιμών T30 ανά θέση και υπολογίστηκε ο μέσος όρος για κάθε συχνότητα. Στη συνέχεια έγινε κατασκευή διαγράμματος του μέσου όρου των θέσεων για άδειο ακροατήριο και του μέσου όρου για γεμάτο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 7.26. Παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη μεταβολή εντοπίζεται σε συχνότητες μεγαλύτερες των 1000 Hz, ωστόσο σύμφωνα με τις μεταβολές που είχαμε στην απορρόφηση ακόμα και στις χαμηλές συχνότητες, και σύμφωνα με το εμβαδό που καταλαμβάνεται από το ακροατήριο οι τιμές θα έπρεπε να μειωθούν και στα 125-250 Hz. Κάτι τέτοιο μπορεί να οφείλεται στο χαμηλό αριθμό ακτίνων που χρησιμοποιεί το λογισμικό καθώς το όριό του αναγράφεται στις 5000 ακτίνες, ενώ η πρόταση για τη συγκεκριμένη γεωμετρία είναι στις 41.000 ακτίνες. Για αυτό το λόγο έγινε εξαγωγή και σύγκριση του Interactive RT estimation του λογισμικού που υπολογίζει θεωρητικά το χρόνο T30. Όπως παρατηρείται στο σχήμα 7.27, ο T30 των 125 hz παρουσιάζει διαφορά ανάμεσα σε άδειο και γεμάτο ακροατήριο.

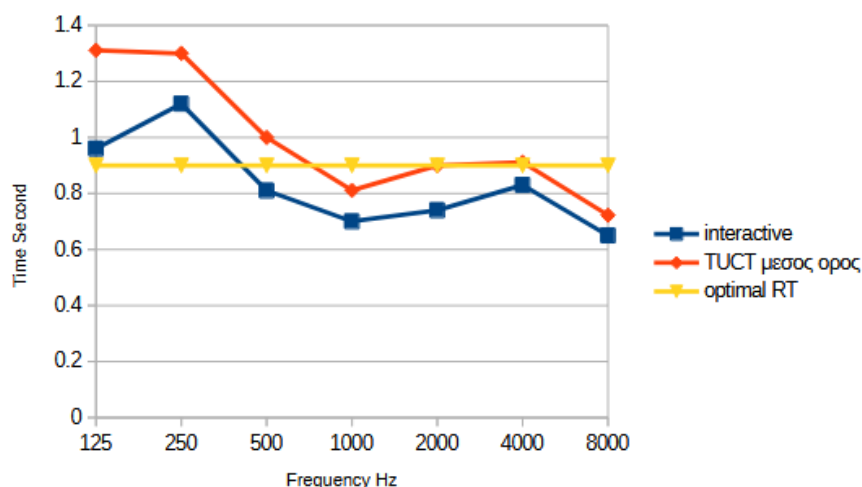


Σχήμα 7.26: T30 προσομοίωσης άδειου και γεμάτου ακροατηρίου.



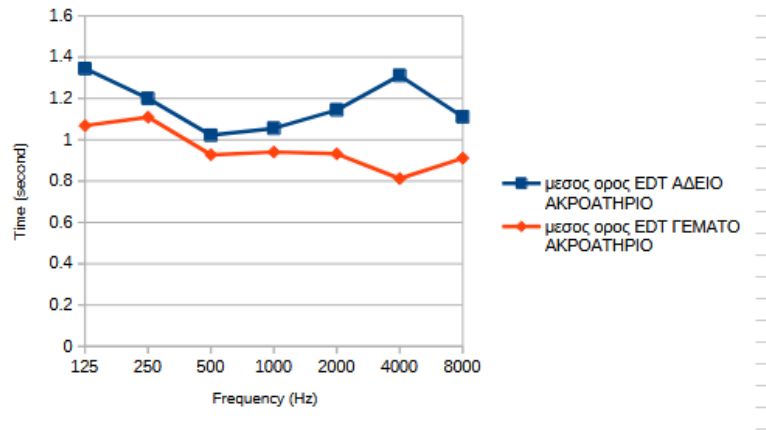
Σχήμα 7.27: T30 Interactive RT estimation άδειου και γεμάτου ακροατηρίου.

Το συμπέρασμα από τα παραπάνω διαγράμματα είναι ότι η μεταβολή ανάμεσα στις δύο συνθήκες είναι αξιοσημείωτη και σίγουρα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν. Στο σχήμα 7.28 παρουσιάζεται σε γράφημα οι τιμές του μέσου όρου των θέσεων για τη προσομοίωση με ακτίνες, για τον θεωρητικό υπολογισμό, και για τη προτεινόμενη τιμή του χρόνου αντήχησης που για τη χρήση του αμφιθεάτρου πρέπει να είναι κοντά στα 0.9 δευτερόλεπτα σε όλες τις συχνότητες όσον αυτό είναι δυνατό.



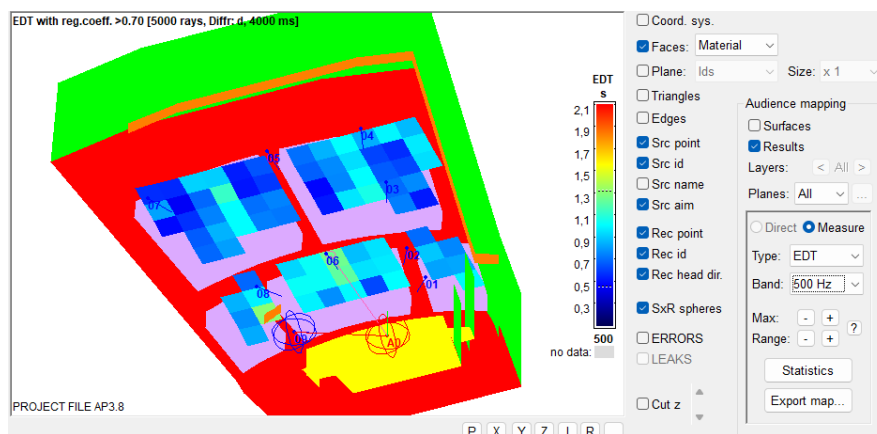
Σχήμα 7.28 : Σύγκριση Interactive RT estimation, TUCT, προτεινόμενου χρόνου αντήχησης για ομιλία.

Στη συνέχεια, εξετάζοντας τον πρώιμο χρόνο αντήχησης EDT για γεμάτο ακροατήριο, οι τιμές όπως είναι λογικό έχουν μειωθεί αισθητά. Επίσης υπάρχει μείωση και στα 125 Hz παρά τη σχεδόν μηδενική μεταβολή του δείκτη T30 στη συγκεκριμένη συχνότητα. Η μεγάλη αύξηση στην απορρόφηση του ακροατηρίου, ειδικά για τις υψηλές συχνότητες φαίνεται ότι επηρεάζει τον μέσο όρο των τιμών του πρώιμου χρόνου αντήχησης για τις 9 θέσεις. Η διαφοροποίηση που παρατηρούμε στη μεταβολή των δύο δεικτών (EDT, T30) οφείλεται στο ότι ο EDT υπολογίζεται από την πρώιμη εξασθένιση του ήχου ενώ ο χρόνος αντήχησης εξετάζει μεγαλύτερο τμήμα της εξασθένισης.



Σχήμα 7.29 : Σύγκριση μέσου όρου τιμών EDT για γεμάτο και άδειο ακροατήριο.

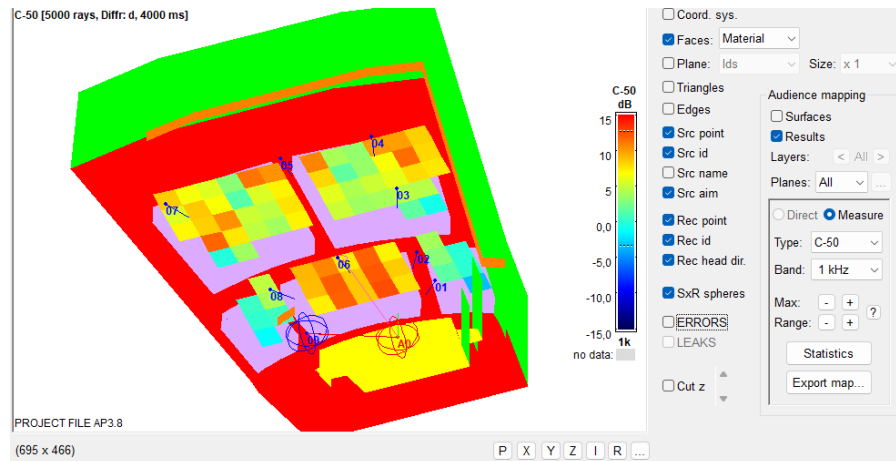
Εκτός από τον μέσο όρο των θέσεων που δείχνει τη γενική τάση του πρώιμου χρόνου αντήχησης, πραγματοποιήθηκε και εξαγωγή του χρωματικού χάρτη του ακροατηρίου προκειμένου να κριθούν οι τιμές ανά θέση και το γενικότερο εύρος τιμών. Από το σχήμα 7.30, προκύπτει αρκετά μεγάλη διακύμανση στις τιμές του EDT για τη συγκεκριμένη συχνότητα, από τα 0.5-1.4 δευτερόλεπτα. Επίσης οι μεγαλύτερες τιμές βρίσκονται στο ακροατήριο ακριβώς μπροστά στη σκηνή που σημαίνει ότι η ηχητική ενέργεια που προέρχεται από τις πρώιμες ανακλάσεις διατηρείται περισσότερο χρόνο στα πρώτα 10 dB της εξασθένησης. Αυτό μπορεί να οφείλεται στις ανακλάσεις των τοίχων γύρω από τη σκηνή, στο δάπεδο κτλ. Ενώ στις πίσω θέσεις η εξασθένηση των πρώιμων ανακλάσεων συμβαίνει γρηγορότερα μετά την αλληλεπίδραση του ήχου με τις απορροφητικές επιφάνειες.



Σχήμα 7.30 : Χρωματικός χάρτης EDT για τα 500 Hz

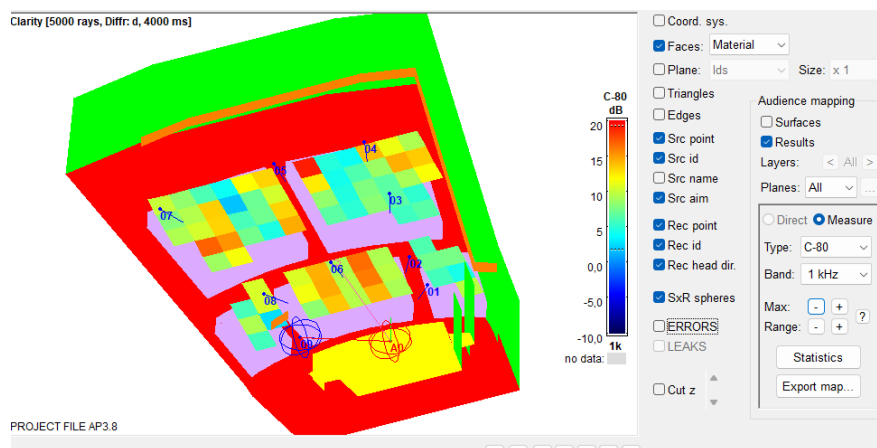
Αφού εξετάστηκαν οι διαφορές ανάμεσα σε συνθήκες άδειου και γεμάτου ακροατηρίου για τους χρόνους T30, EDT, ακολουθεί η εξέταση και των υπολοίπων δεικτών οι οποίοι είναι εξίσου σημαντικοί ειδικά όταν στοχεύουμε στη καταληπτότητα της ομιλίας. Στο σχήμα 7.31 παρατηρείται ο χρωματικός χάρτης για τη συχνότητα των 1000 Hz ως συχνότητα αναφοράς για τον δείκτη C50. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν παρατηρώντας τη διακύμανση του δείκτη ανά θέση ακροατηρίου, είναι ότι οι θέσεις μπροστά στη σκηνή χαρακτηρίζονται από τις

βέλτιστες τιμές ευκρίνειας. Δηλαδή η ενέργεια του ήχου που φτάνει στις θέσεις πριν από τα 50 ms είναι μεγαλύτερη από την όψιμη ενέργεια. Επίσης εκτός από τις μπροστά θέσεις και οι πίσω εξασφαλίζουν καλή ευκρίνεια με εξαίρεση τις πλαϊνές θέσεις δεξιά και αριστερά του ομιλητή. Εκείνες οι θέσεις χαρακτηρίζονται από ελαφρώς αρνητική τιμή ευκρίνειας (περίπου -1 dB) κάτι που μπορεί να οφείλεται σε σκίαση λόγω γεωμετρίας και χειρότερη κατανομή των πρώτων ανακλάσεων. Ωστόσο συνολικά, οι τιμές για το ακροατήριο φαίνονται ικανοποιητικές.



Σχήμα 7.31 : Χρωματικός χάρτης C50, 1000Hz.

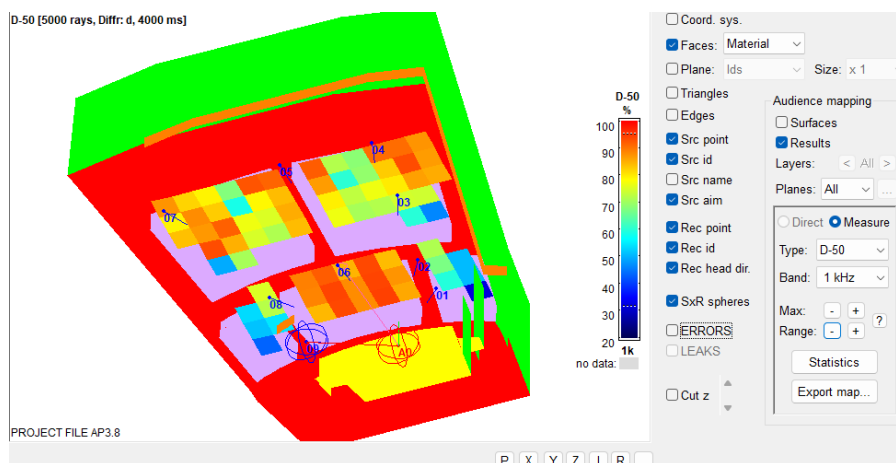
Για το χρωματικό χάρτη της ευκρίνειας των 80 ms για τα 1000Hz, ενώ υπάρχει σχετική ανομοιομορφία ανάμεσα στις θέσεις του ακροατηρίου, ο χώρος χαρακτηρίζεται από υψηλή πρώιμη ηχητική ενέργεια και λιγότερο όψιμη. Αυτό το γεγονός συμβαδίζει με τα αποτελέσματα που είχαμε στις μετρήσεις ανάμεσα στα παρόμοια αποτελέσματα T30 και EDT, τα οποία υποδηλώνουν ομαλή εξασθένιση.



Σχήμα 7.32 : Χρωματικός χάρτης c80, 1000 Hz

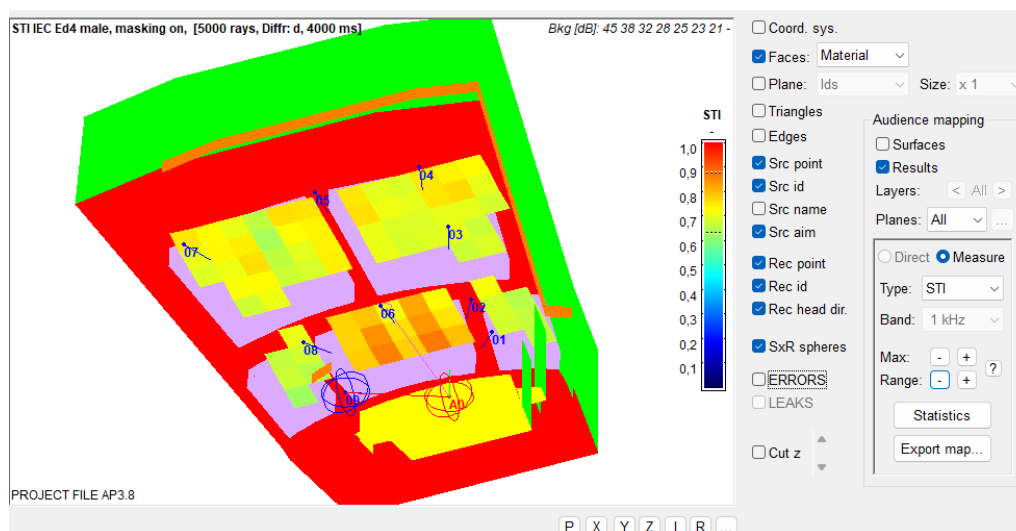
Όσον αφορά τη διακριτότητα D50, το μεγαλύτερο μέρος των θέσεων του ακροατηρίου εμφανίζει υψηλές τιμές. Ιδιαίτερως στο μπροστινό τμήμα των θέσεων όπου το μεγαλύτερο μέρος του ήχου προέρχεται από τον άμεσο ήχο και τις πρώιμες ανακλάσεις. Οι τιμές γενικά είναι πολύ υψηλές που σημαίνει ότι είναι ευνοϊκές για την ομιλία, με εξαίρεση πάλι τις πλάγιες

θέσεις στο μπροστινό αριστερό και δεξί τμήμα του ακροατηρίου και τις πρώτες θέσεις δεξιά και αριστερά στα πίσω τμήματα του ακροατηρίου. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως αυτό μπορεί να σχετίζεται με τη γεωμετρία του χώρου, τη κατανομή των πρώιμων ανακλάσεων και τη κατευθυντικότητα της πηγής. Επιλέχθηκαν πάλι τα 1000 Hz για απεικόνιση του χάρτη ως συχνότητα αναφοράς για τη χρήση της ομιλίας.



Σχήμα 7.33 : χρωματικός χάρτης D50, 1000 Hz

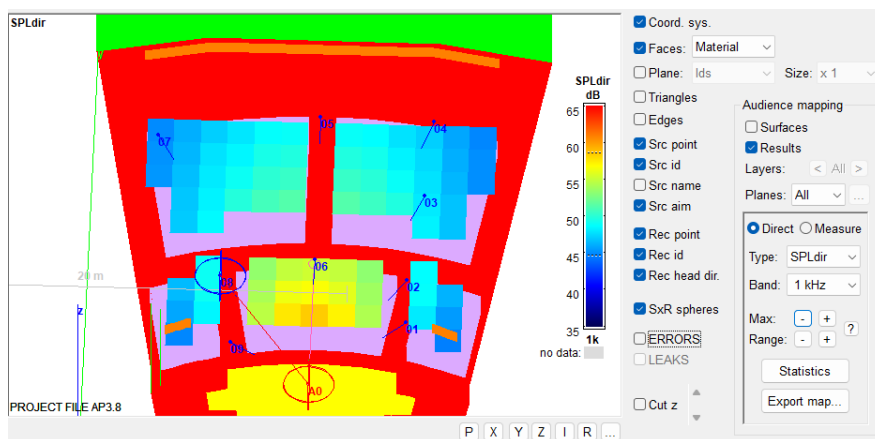
Τέλος όσον αφορά τα αποτελέσματα του δείκτη μετάδοσης ομιλίας STI οι τιμές για το πίσω τμήμα του ακροατηρίου κυμαίνονται στο 0,7 γεγονός το οποίο υποδεικνύει καλή καταληπτότητα. Το μπροστινό τμήμα εμφανίζει πάλι τις μεγαλύτερες τιμές, ενώ οι πλάγιες θέσεις που είχαν εμφανίσει χαμηλές τιμές ευκρίνειας και διακριτότητας, δίνουν τιμές STI κοντά στο 0,55-0,6 που είναι ικανοποιητικό. Δείχνοντας έτσι ότι οι χαμηλότερες τιμές D50, δεν υποδεικνύουν σοβαρή μείωση στη καταληπτότητα της ομιλίας.



Σχήμα 7.34 : χρωματικός χάρτης STI

Για να μπορούν να σχολιαστούν τα αποτελέσματα των παραπάνω δεικτών και να εντοπιστούν αιτίες και λύσεις για πιθανά προβλήματα που προκύπτουν, ακολουθεί ο παρακάτω χρωματικός

χάρτης του σχήματος 7.35 με την κάλυψη του ακροατηρίου από απευθείας ήχο. Παρατηρείται ότι, όπως είναι λογικό, οι μπροστινές θέσεις του ακροατηρίου καλύπτονται με 60 dB ενώ υπάρχει μια διαφορά περίπου 15 dB με τις πλάγιες θέσεις όπου η κάλυψη από απευθείας ήχο πέφτει στα 45 dB.



Σχήμα 7.35: χρωματικός χάρτης SPL direct, 1kHz

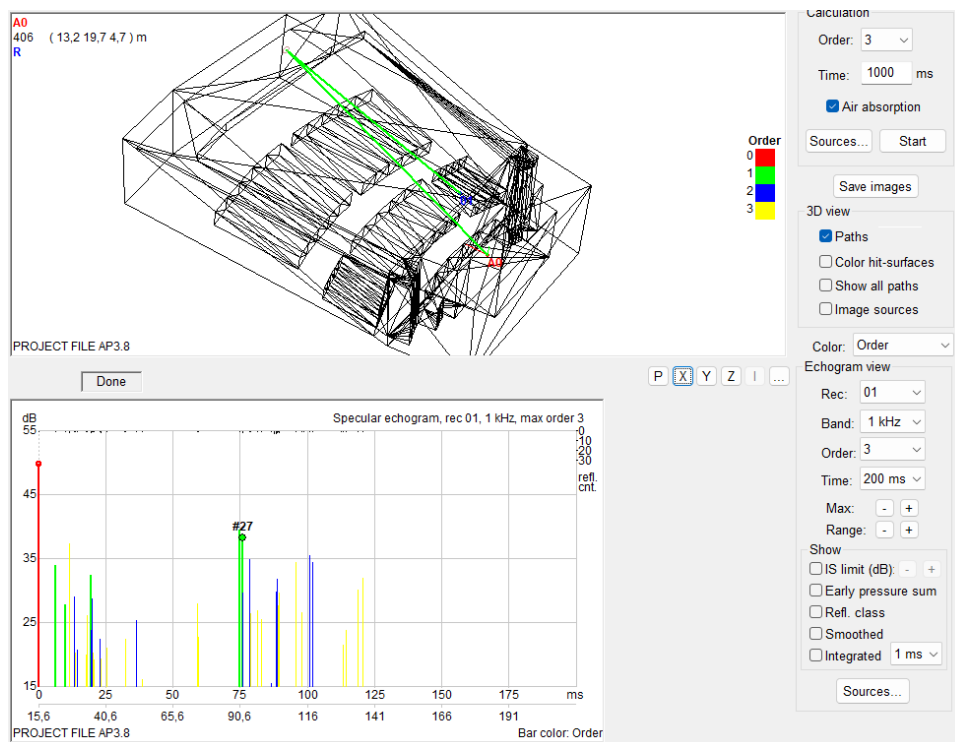
7.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων και πιθανά προβλήματα

Μετά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων για γεμάτο ακροατήριο διαπιστώνεται ότι ο χώρος χαρακτηρίζεται από καλή ακουστική ωστόσο εμφανίζει ορισμένα μεμονωμένα προβλήματα τα οποία μπορούν να βελτιωθούν. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι ο χρόνος αντήχησης κυμαίνεται στα κατάλληλα όρια ειδικά στις υψηλές συχνότητες. Το ιδανικό όπως είναι γνωστό από τη βιβλιογραφία, είναι όλες οι συχνότητες να έχουν την ίδια τιμή χρόνου αντήχησης σε όλες τις θέσεις. Σαν γενική τάση σε όλες τις θέσεις οι χαμηλές συχνότητες έχουν ανεβασμένες τιμές χρόνου αντήχησης (125-250) κάτι που μπορεί να δημιουργήσει μια αίσθηση πιο γεμάτης/βαριάς χροιάς, μειωμένη φυσικότητα στη χροιά της φωνής του ομιλητή από τον χρωματισμό, και ενδεχομένως κούραση των ακροατών μετά από πολύωρες ομιλίες. Ωστόσο, εφόσον οι τιμές του STI παραμένουν ικανοποιητικές, ο χρωματισμός σε αυτές τις συχνότητες δεν υποδηλώνει απαραίτητα μείωση στη καταληπτότητα ή κάποιο σοβαρό ακουστικό πρόβλημα. Επίσης, εμφανίζεται μεγάλη διακύμανση στις τιμές του πρώιμου χρόνου αντήχησης EDT ανά θέση για τις συχνότητες 500, 1000, 2000 Hz. Αυτό δείχνει ότι ο χώρος δεν κατανέμει ομοιόμορφα τις πρώιμες ανακλάσεις. Συνδυαστικά με τις τιμές του χρόνου αντήχησης T30 αλλά και των δεικτών C50, D50 κρίνεται αν οι αυξημένες τιμές EDT δημιουργούν ουσιαστικό πρόβλημα. Αν οι τιμές ευκρίνειας και χρόνου αντήχησης είναι οι επιθυμητές, τότε η μεγάλη διακύμανση στους χρόνους EDT ανά θέση δημιουργούν μια διαφορετική αντίληψη του χώρου για κάθε ακροατή, όπου χαμηλές τιμές EDT δίνουν την αντίληψη ενός στεγνού χώρου και τιμές υψηλές την αντίληψη ενός ζωντανού χώρου. Από τις τιμές του δείκτη C50 επιβεβαιώνεται ότι η διαύγεια του ήχου είναι υψηλή καθώς οι τιμές είναι θετικές σε όλες τις θέσεις εκτός από τις δύο πλάγιες θέσεις όπου οι τιμές είναι ελαφρώς αρνητικές για τα 1000

Hz. Το πρόβλημα που εμφανίζεται και στον δείκτη C50 είναι η ανομοιομορφία στις τιμές ανά θέση καθώς ορισμένες θέσεις λαμβάνουν πολύ περισσότερη πρώιμη ενέργεια και άλλες περισσότερη όψιμη, μετά τα 50 ms. Επομένως στόχος θα πρέπει να είναι πιο ομοιόμορφες τιμές στους δείκτες C50, EDT ενώ παράλληλα διατηρείται στις επιθυμητές τιμές ο χρόνος αντήχησης και ο STI.

Για να εντοπιστεί η αιτία στις μεταβολές των δεικτών για ορισμένες θέσεις ακρόασης, θα πρέπει να εξαχθεί το ηχογράφημα (echogram) για κάθε θέση, να απεικονιστούν οι ανακλάσεις που καταγράφονται εκεί και στη συνέχεια αφού βρεθεί η επιφάνεια από την οποία προέρχεται η ανάκλαση, η τάξη, η ηχητική στάθμη της και ο χρόνος που χρειάζεται για να φτάσει στη θέση, μπορεί να αποφασιστεί αν επηρεάζει αρνητικά τις τιμές των δεικτών.

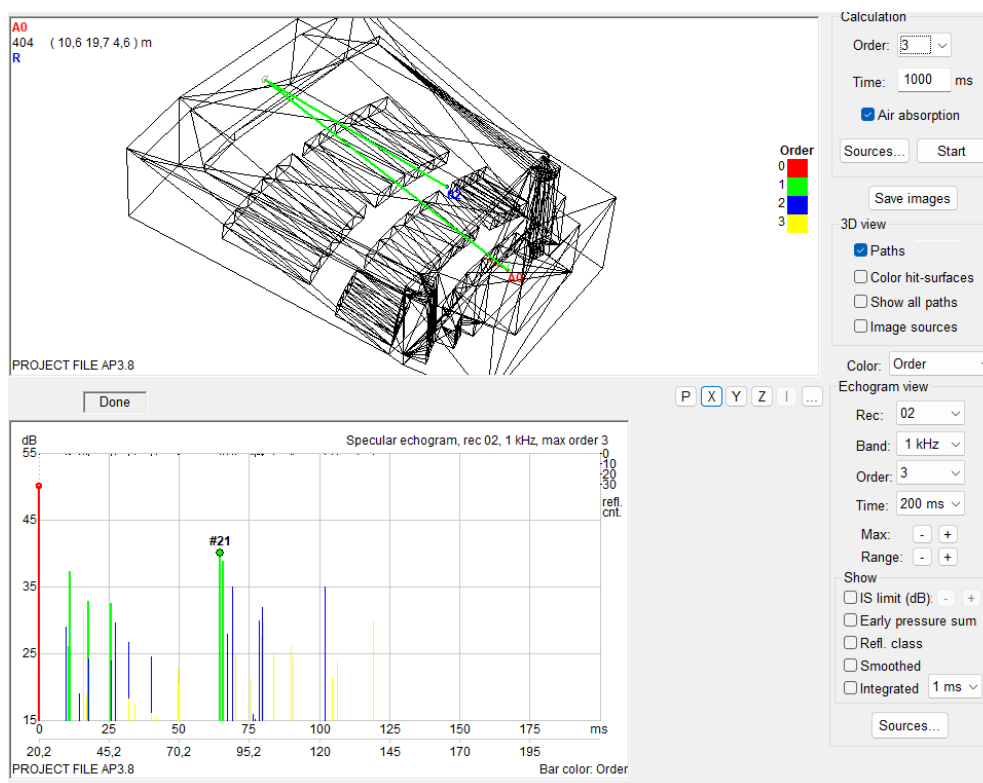
Σύμφωνα με τον Σκαρλάτο (2021), ανεπιθύμητα προβλήματα ηχούς δημιουργούνται όταν εμφανίζονται ισχυρές ανακλάσεις. Τέτοια προβλήματα εμφανίζονται όταν υπάρχουν καθυστερημένες ισχυρές ανακλάσεις μικρής τάξης σε χρονικό διάστημα μετά τα 50 ms , δηλαδή που δεν προσδίδουν στην καθαρότητα της ομιλίας. Το φαινόμενο της ηχούς εμφανίζεται σίγουρα όταν η διαφορά δρόμων του απευθείας και ανακλώμενου ήχου είναι μεγαλύτερη από τα 17 μέτρα και με καθυστέρηση πάνω από 100ms.



Σχήμα 7.36 : Ηχογράφημα θέσης 1

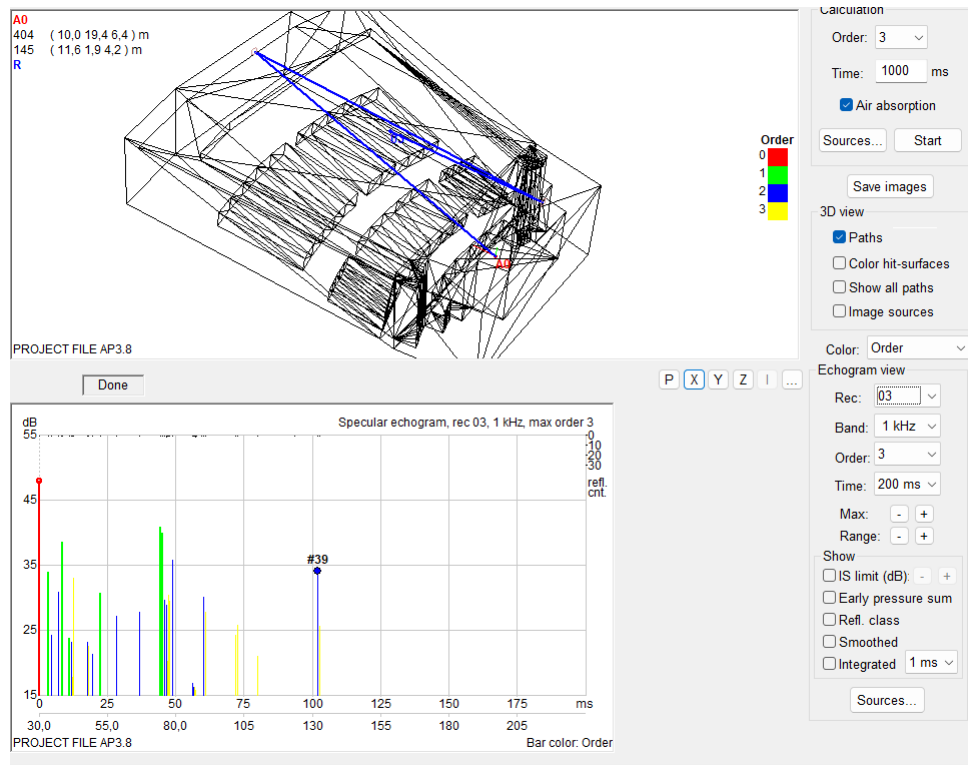
Στη πρώτη θέση από τις 9 των μετρήσεων παρατηρήθηκε σχετικά χαμηλή τιμή c50 για τα 1000 Hz αν και θετική. Η τιμή ήταν +1,3 dB. Ο χρόνος αντήχησης για τη συγκεκριμένη θέση στα 1000 Hz ήταν στα 0,7 δευτερόλεπτα ενώ ο πρώιμος χρόνος αντήχησης 1.8 δευτερόλεπτα. Συνδυαστικά οι παραπάνω τιμές δείχνουν ότι η αρχική ενέργεια διατηρείται αρκετά ενώ η συνολική αντήχηση είναι περιορισμένη. Ταυτόχρονα το χαμηλό c50 δείχνει ότι είτε η ενέργεια πριν τα 50 ms είναι περιορισμένη, είτε υπάρχει όψιμη ενέργεια από ανακλάσεις

μεταγενέστερες που μειώνουν τον δείκτη. Αν κρίνουμε από την αποτύπωση των ανακλάσεων στην εικόνα 7-36, στα 75 ms βρίσκεται η ανάκλαση με αριθμό #27 η οποία είναι πρώτης τάξης και βρίσκεται σε στάθμη περίπου 12 dB κάτω από τον απευθείας ήχο. Δεδομένου του χρονικού διαστήματος που εμφανίζεται, συμβάλει στην όψιμη ενέργεια και όχι στην πρώιμη. Επίσης οι επόμενες ανακλάσεις κοντά στην ανάκλαση #27 προέρχονται και αυτές από αρχική ανάκλαση στον πίσω τοίχο και συμβάλλουν παρά τη χαμηλότερή τους στάθμη. Αυτές οι ανακλάσεις μπορεί να οφείλονται στον υψηλότερο πρώιμο χρόνο αντήχησης EDT και στο σχετικά χαμηλό C50.



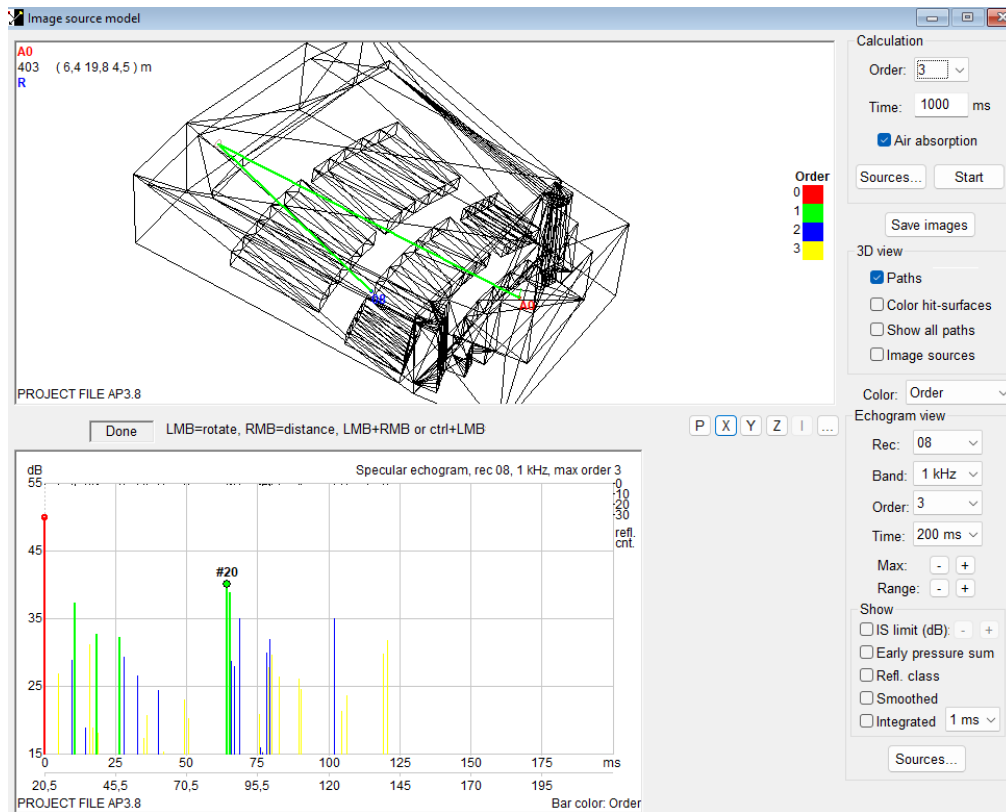
Σχήμα 7.37 : Ηχογράφημα θέσης 2

Αντίστοιχα και στη θέση 2 εντοπίζεται μια καθυστερημένη ανάκλαση υψηλής στάθμης 1ης τάξης η οποία απέχει μόλις 9 dB από τη στάθμη του απευθείας ήχου. Ωστόσο συμβαίνει λίγο πιο νωρίς από ότι η ανάκλαση της θέσης 1 που προαναφέρθηκε. Σε συνδυασμό με τις κοντινές ανακλάσεις που συμβαίνουν σχεδόν ταυτόχρονα επηρεάζεται ο δείκτης c50 εμφανίζοντας τη τιμή 2,4.



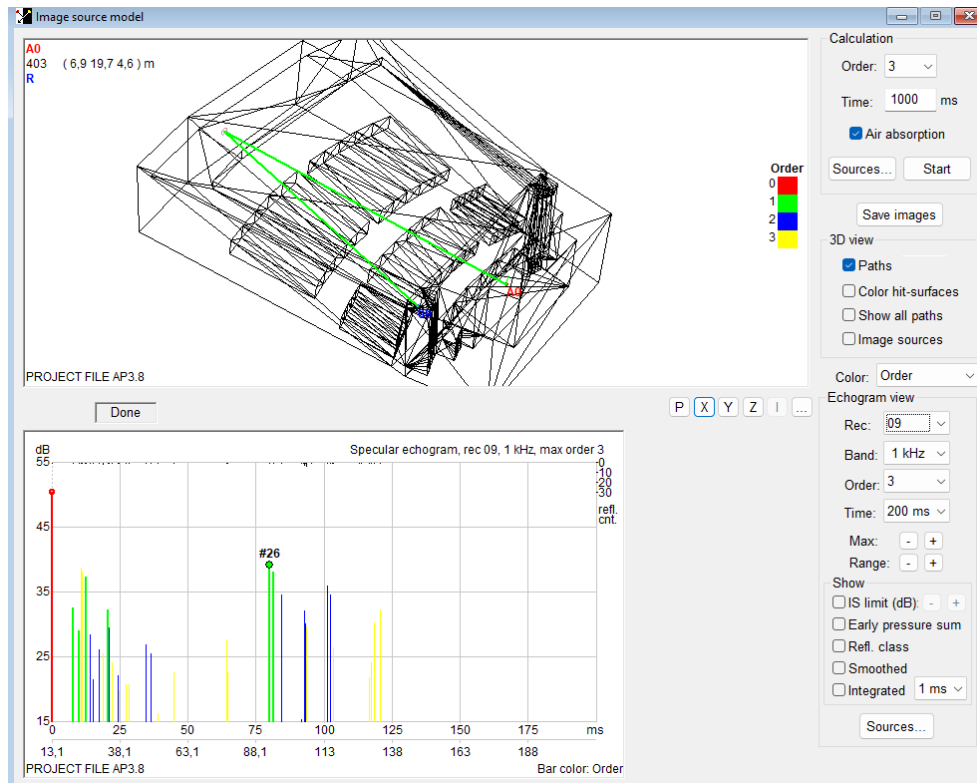
Σχήμα 7.38 : Ηχογράφημα θέσης 3

Για τη θέση 3, οι ισχυρές ανακλάσεις συμβαίνουν πριν τα 50 ms, γεγονός που συμβάλει στην αύξηση της τιμής του C50 στα +5dB. Εκτός αυτού εμφανίζεται μια μεμονωμένη ανάκλαση στα 100 ms η οποία είναι δεύτερης τάξης και απέχει 14 dB από την απευθείας στάθμη, ωστόσο λόγω της καθυστερημένης άφιξής της ενδέχεται να δημιουργεί πρόβλημα διακριτής ηχούς.



Σχήμα 7.39 : Ηχογράφημα θέσης 8

Για τη θέση 8 πάλι εντοπίζεται μια ισχυρή ανάκλαση 1ης τάξης μετά τα 60ms, από τον πίσω τοίχο η οποία διαφέρει 10 dB από τον απευθείας ήχο. Αυτή η ανάκλαση μπορεί να ευθύνεται στην αυξημένη τιμή EDT για τη συγκεκριμένη συχνότητα στα 1.5 second. Παρόλα αυτά ο χρόνος T30 είναι στα 0.8 δευτερόλεπτα και ο δείκτης C50 στα +5 dB



Σχήμα 7.40 : Ηχογράφημα θέσης 9

Τέλος, στη θέση 9 εμφανίζεται πάλι μια ισχυρή ανάκλαση υψηλής στάθμης 1ης τάξης η οποία συνοδεύεται με πρώιμο χρόνο αντήχησης 1.3 δευτερόλεπτα και C50 +6 dB. Η ανάκλαση πάλι προέρχεται από τον πίσω τοίχο.

Οι περιπτώσεις των καθυστερημένων ανακλάσεων που αναφέρθηκαν προηγουμένως ενδεχομένως να είναι προβληματικές. Παρόλα αυτά δεν μπορούμε να είμαστε σίγουροι για όλες τις περιπτώσεις καθώς η στάθμη της ανάκλασης, το χρονικό διάστημα εμφάνισης και η τάξη της μας δίνουν μόνο ενδείξεις. Κάθε περίπτωση κρίνεται ξεχωριστά και με βάση τις τιμές των υπόλοιπων δεικτών. Επίσης ειδικά όσον αφορά τον δείκτη C50, οι τιμές του δεν καθορίζονται μόνο από τις καθυστερημένες ανακλάσεις και την ενέργειά τους μετά τα 50ms, αλλά και από την κάλυψη του απευθείας ήχου. Στο σχήμα 7.35 παρατηρείται ότι η απευθείας κάλυψη στις πλάγιες θέσεις είναι ελλιπής σε σχέση με τις μπροστινές καθώς φτάνουν 45 dB SPL σε σχέση με τα μέγιστα 60, οπότε είναι λογικό οι τιμές της ευκρίνειας να είναι μικρότερες εκεί.

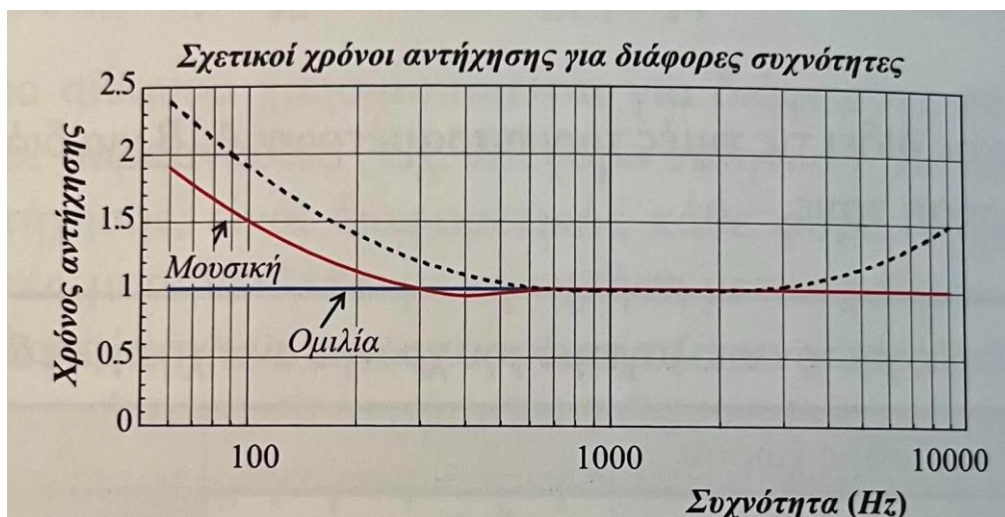
7.5 Προτάσεις μεταβολής της ακουστικής του αμφιθεάτρου

Οι ακουστικές παρεμβάσεις οι οποίες αποφασίστηκε να προταθούν, αποσκοπούν στη καλύτερη ακουστική επίδοση του χώρου και σε χρήσεις πέραν της διδασκαλίας, ώστε το αμφιθέατρο να μετατραπεί σε έναν ευέλικτο χώρο του πανεπιστημίου στον οποίο θα φιλοξενούνται διαφορετικές εκδηλώσεις. Έτσι με χρήση αποσπώμενων ηχοαπορροφητικών

πάνελ, το αμφιθέατρο θα γίνεται κατάλληλο για ομιλία μειώνοντας το χρόνο αντήχησης, ενώ με την αφαίρεσή τους ο χώρος θα γίνεται πιο αντηχητικός δημιουργώντας έτσι ένα πιο ζωντανό ακουστικό περιβάλλον. Παράλληλα, εκτός της μεταβλητής απορρόφησης του αμφιθεάτρου, προτείνεται και η μεταβολή στη διάταξη της απορρόφησης στο χώρο. Όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, η απορρόφηση προτείνεται να αφαιρεθεί από την οροφή προκειμένου να αξιοποιηθούν οι πρώιμες ανακλάσεις της και να μεταφερθεί στον πίσω και στους πλάγιους τοίχους.

7.5.1 Αντηχητική διάταξη για χρήση μουσικής

Σύμφωνα με το σχήμα 2.2 (κεφάλαιο 2), αν θέλουμε να μετατρέψουμε το αμφιθέατρο για χρήση μουσικής θα πρέπει ιδανικά να επιτευχθεί χρόνος αντήχησης 1.4 δευτερόλεπτα στα 500 Hz. Όταν αναφερόμαστε σε μουσική, αντίθετα από την ομιλία, ο χρόνος δεν θα πρέπει να είναι σταθερός σε όλες τις συχνότητες. Στο διάγραμμα του σχήματος 7.41, αποτυπώνεται ο σχετικός χρόνος αντήχησης για τις υπόλοιπες συχνότητες σε σχέση με το χρόνο των 500 Hz. Συνεπώς στη δική μας περίπτωση όπου ο βέλτιστος χρόνος των 500 Hz θα πρέπει να είναι 1.4, στις χαμηλότερες συχνότητες θα πρέπει να είναι ελαφρώς πιο ανεβασμένος, ενώ στις υψηλότερες κοντά στο 1.4 sec.



Σχήμα 7.41 : Σχετικοί χρόνοι αντήχησης (Σκαρλάτος, 2021)

Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο στο συγκεκριμένο αμφιθέατρο θα πρέπει ο χώρος να γίνει πιο ανακλαστικός, δηλαδή να αφαιρεθεί απορρόφηση. Η μόνη απορροφητική επιφάνεια του αμφιθεάτρου είναι η οροφή η οποία παρουσιάζει πολύ υψηλούς συντελεστές απορρόφησης στα 250-4kHz ($\alpha=0.8$). Παρά την υψηλή απορρόφηση της οροφής, ο χρόνος αντήχησης κυρίως σε συχνότητες > 1000 Hz ελέγχεται κατά πολύ από την απορρόφηση του ακροατηρίου. Συνεπώς η εξ ολοκλήρου αφαίρεση της απορροφητικής οροφής επηρεάζει περισσότερο τις χαμηλές συχνότητες παρά τις υψηλές. Έτσι ο στόχος κατά το σχεδιασμό ήταν να αφαιρεθεί η απορροφητική οροφή και να αντικατασταθεί από μια πολύ ανακλαστική επιφάνεια η οποία θα συμβάλει στην αξιοποίηση πρώιμων ανακλάσεων προς το ακροατήριο. Η επιφάνεια που επιλέχθηκε είναι το λουστραρισμένο ξύλο το οποίο είναι πολύ ανακλαστικό σε όλες τις συχνότητες. Ο χρόνος αντήχησης με την αντικατάσταση της οροφής, και πλέον με μοναδική

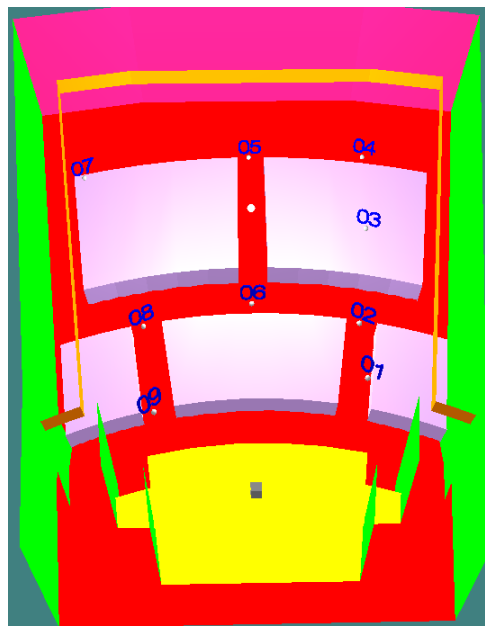
απορροφητική επιφάνεια στο χώρο να είναι το ακροατήριο, αυξήθηκε σε επιθυμητό βαθμό σε όλες τις συχνότητες εκτός από τις χαμηλές όπου αυξήθηκε υπερβολικά. Έτσι αποφασίστηκε η εφαρμογή χαμηλοσυχνοτικής απορρόφησης στον πίσω τοίχο. Το υλικό αφορά σύνθετη κατασκευή κόντρα πλακέ πάχους 5 χιλιοστών, με υαλοβάμβακα 25 χιλιοστών σε διάκενο αέρα 50 χιλιοστών. Το συγκεκριμένο υλικό επηρεάζει κυρίως το χρόνο αντήχησης των 125-500 Hz ο οποίος με την αντικατάσταση της οροφής αυξήθηκε κατά πολύ. Οι συντελεστές της νέας οροφής και του απορροφητή του πίσω τοίχου προέρχονται από πίνακα της εταιρίας Acoustic-supplies και παρουσιάζονται παρακάτω.

ABS REFLECTOR = <5 4 3 3 3 3 > {255 2 255}; layer:OROFH
ABS ABSORBER= <42 36 19 10 8 5 > {200 25 100 }layer:TOIXOI

Σχήμα 7.42 : Συντελεστές απορρόφησης λουστραρισμένου ξύλου και απορροφητή (ποσοστό)

((<https://www.acoustic-supplies.com/absorption-coefficient-chart/>))

Μετά την εφαρμογή των υλικών υπολογίστηκε ο χρόνος αντήχησης για κάθε θέση (R1-R9) σε κάθε συχνότητα.

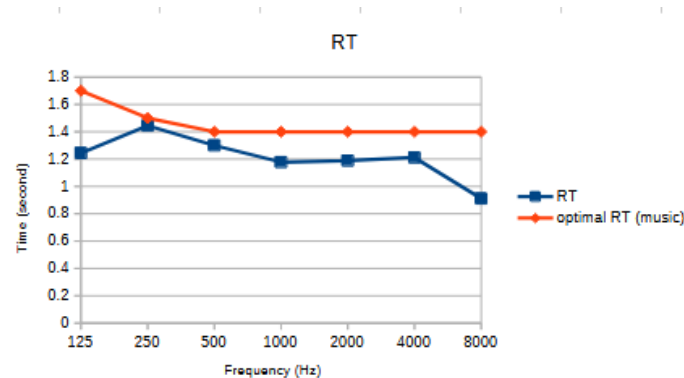


Σχήμα 7.43 : Χωρική αποτύπωση θέσεων στο αμφιθέατρο

Υπολογίστηκε ο μέσος όρος του παραγόμενου χρόνου αντήχησης ο οποίος παρουσιάζεται στο παρακάτω γράφημα σε σύγκριση με τον ιδανικό χρόνο αντήχησης για χρήση μουσικής ο οποίος προκύπτει από όσα προαναφέρθηκαν.

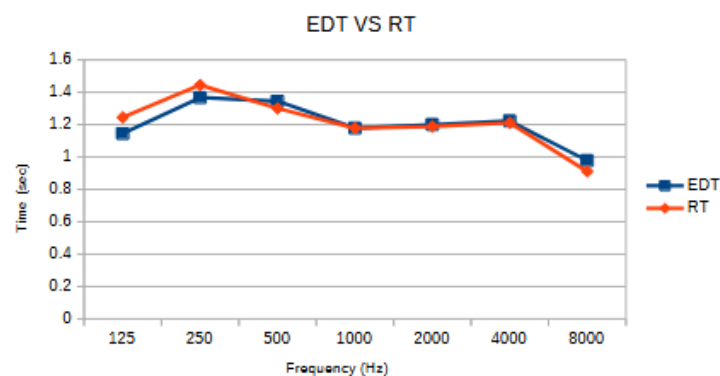
Παρά τη χαμηλή απορροφητικότητα της ανακλαστικής οροφής και του απορροφητή του πίσω τοίχου, η απορρόφηση του ακροατηρίου δεν επιτρέπει τη περεταίρω αύξηση του χρόνου αντήχησης προς τις ιδανικές τιμές μετά τα 500 Hz. Παρά τη μικρή απόκλιση των τιμών του χρόνου αντήχησης, ο χώρος φαίνεται να παρουσιάζει ομαλή συμπεριφορά στο συχνотικό φάσμα. Το αντηχητικό περιβάλλον μετά την ακουστική διαμόρφωση κρίνεται αποδεκτό ως ένας χώρος πολλαπλών χρήσεων που περιλαμβάνει και την ακρόαση μουσικής και όχι ως

αίθουσα που προορίζεται αποκλειστικά για συναυλίες. Τέλος αξίζει να αναφερθεί ότι ο χρόνος αντήχησης παρουσιάζει μεγάλη ομοιομορφία ανά θέση με μέγιστη απόκλιση θέσεων 0.2 δευτερόλεπτα.

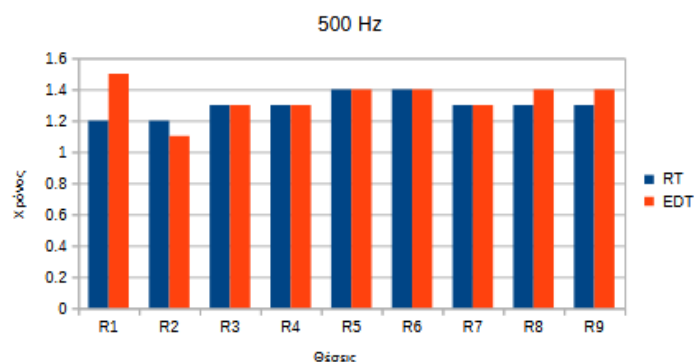


Σχήμα 7.44 : Χρόνος αντήχησης ανακλαστικής διάταξης και ιδανικός χρόνος αντήχησης για χρήση μουσικής

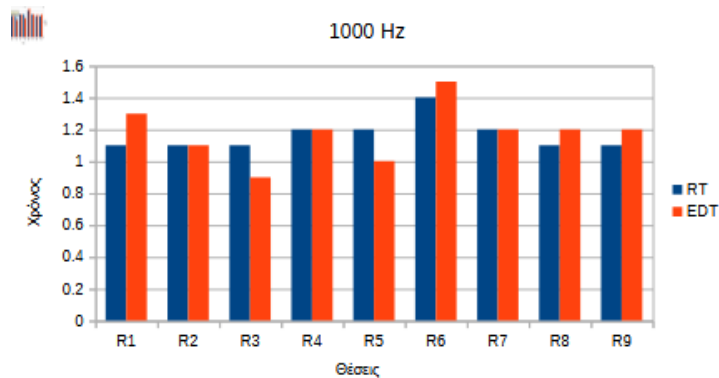
Όσον αφορά το πρώιμο χρόνο αντήχησης EDT, οι τιμές του παρουσιάζουν πολύ καλή συμφωνία με το χρόνο αντήχησης T30. Αναλυτικότερα, συγκρίνοντας τον μέσο όρο των τιμών EDT με τον μέσο όρο T30, ο λόγος είναι πολύ κοντά στη μονάδα που σημαίνει ότι η καμπύλη απόσβεσης είναι ομαλή. Αλλά και οι τιμές του δείκτη ανά θέση παρουσιάζουν φυσιολογική διακύμανση χωρίς ακραία αποτελέσματα.



Σχήμα 7.45 : Μέσος πρώιμος χρόνος αντήχησης και χρόνος αντήχησης

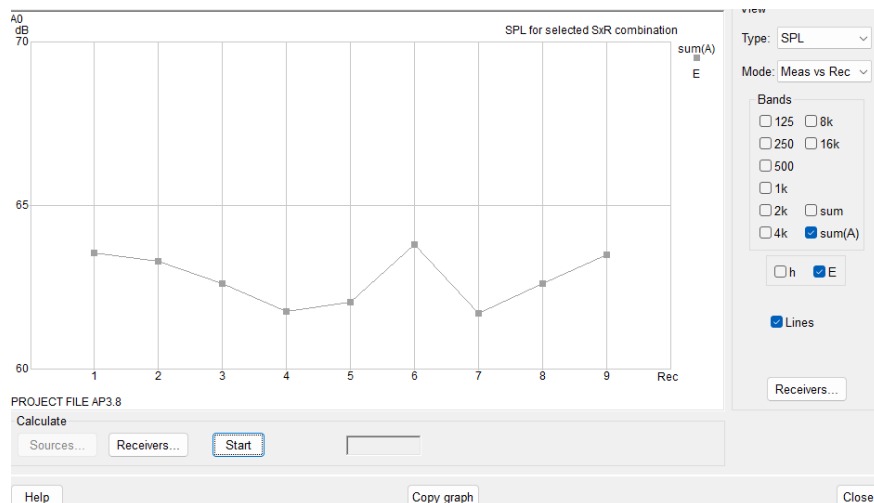


Σχήμα 7.46 : Σύγκριση τιμών EDT, RT για κάθε θέση για τη συχνότητα των 500 Hz



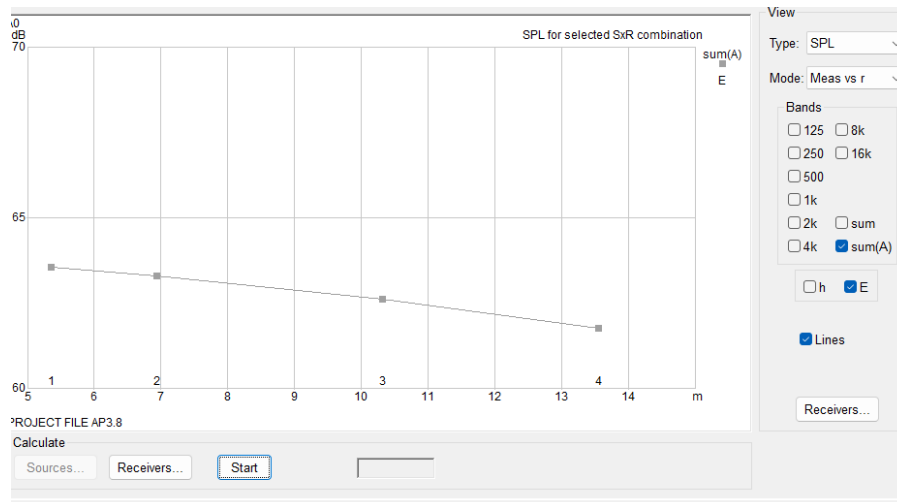
Σχήμα 7.47 : Σύγκριση τιμών EDT, RT για κάθε θέση για τη συχνότητα των 1000 Hz

Επαρκής επίσης παρουσιάζεται η ηχητική κάλυψη του ακροατηρίου καθώς όλες οι θέσεις λαμβάνουν ηχητική ενέργεια, απευθείας αλλά και συνολική. Εκτός από τη πρόσληψη ηχητικής ενέργειας σε κάθε θέση του ακροατηρίου, παρατηρούμε ότι παρουσιάζεται και μεγάλη ομοιομορφία στην ηχητική κάλυψη του ακροατηρίου. Όπως αποτυπώνεται στο σχήμα 7.48, η θέση 6 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή στα 63.8 dB κυρίως λόγω της απευθείας ηχητικής ενέργειας που δέχεται, ενώ οι πιο απομακρυσμένες θέσεις 4, 7 εμφανίζουν τιμές 61.8 dB. Η μέγιστη διαφορά των 2 dB σε ολόκληρο το ακροατήριο μεταφράζεται σε πολύ ομοιόμορφη κάλυψη.



Σχήμα 7.48 : Ηχητική στάθμη ανά θέση σταθμισμένη κατά A

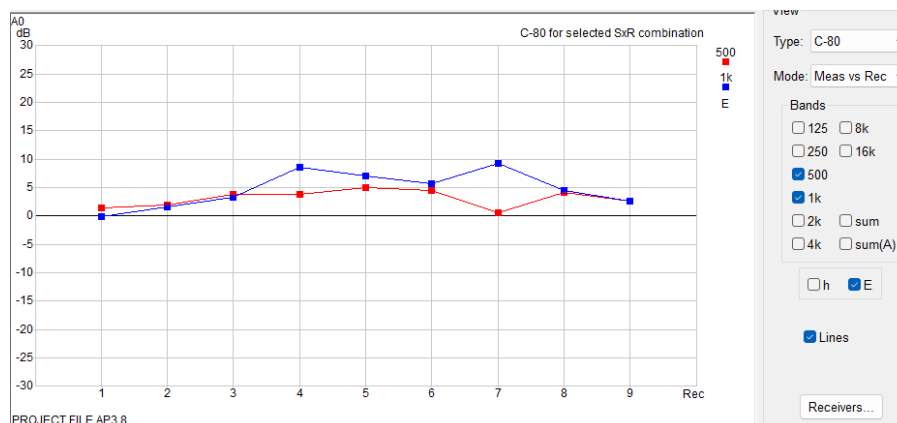
Ακόμα συγκρίνοντας τις θέσεις 1,2,3,4 παρατηρούμε και το ρυθμό μείωσης της ηχητικής στάθμης με την απόσταση καθώς οι θέσεις βρίσκονται η μια πίσω από την άλλη.



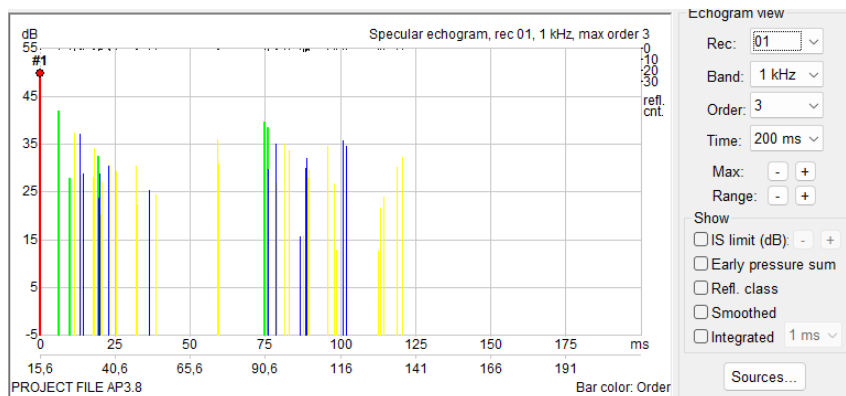
Σχήμα 7.49 : Ηχητική στάθμη προς απόσταση από τη πηγή για τις θέσεις 1-4

Συνεπώς η επιλεγμένη διάταξη με την ανακλαστική οροφή, τους πλάγιους τοίχους κενούς και την διάταξη των καθισμάτων σε σχέση με τη πηγή, εξασφαλίζει επαρκή κάλυψη ηχητικής ενέργειας σε όλο το ακροατήριο ισόποσα.

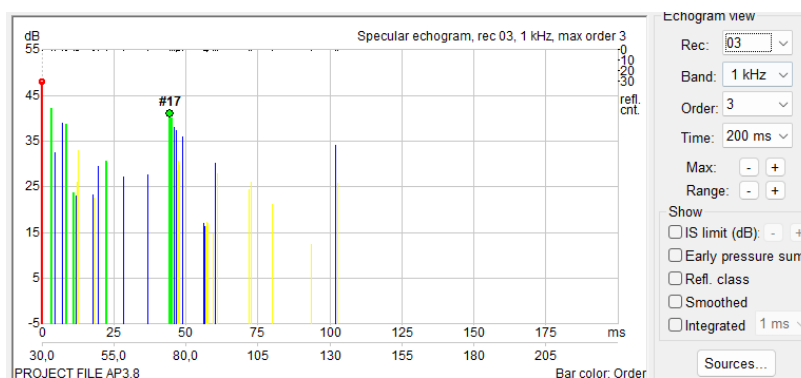
Τέλος όσον αφορά τον δείκτη ευκρίνειας για μουσική C80, οι τιμές κυμαίνονται από 0-9 για τα 1000 Hz και από 1.5-5 dB για τα 500 Hz. Οι μεγαλύτερες τιμές του δείκτη παρατηρούνται στις θέσεις 4 & 7. Αυτές οι θέσεις παρουσιάζουν ισχυρές πρώιμες ανακλάσεις από την οροφή και το πίσω τοίχο και απουσία όψιμης ενέργειας. Η θέση 4 εμφανίζει ορισμένες καθυστερημένες ανακλάσεις 3ης τάξης ενώ η θέση 7 δεν εμφανίζει ανακλάσεις μετά τα 80 ms όπως αποτυπώνεται και στα παρακάτω ηχογραφήματα.



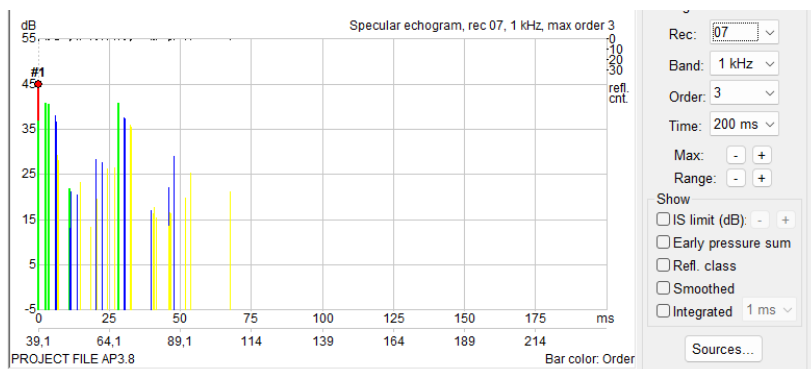
Σχήμα 7.50 : Τιμές c80 ανά θέση για τις συχνότητες 500-1000 Hz.



Σχήμα 7.51 : Ηχογράφημα θέσης 1



Σχήμα 7.52 : Ηχογράφημα θέσης 3



Σχήμα 7.53 : Ηχογράφημα θέσης 7

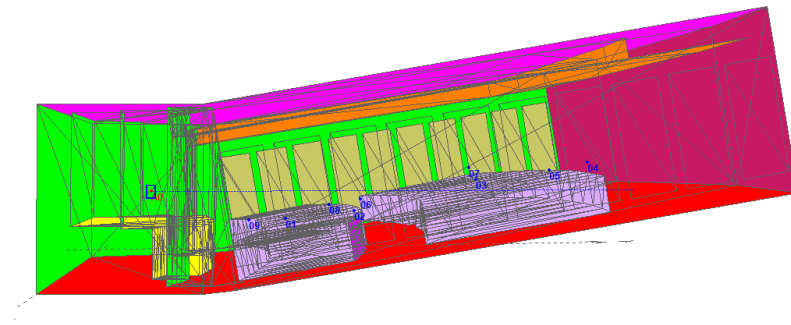
Συμπερασματικά, η διάταξη του αμφιθεάτρου με την ανακλαστική οροφή και την εφαρμογή χαμηλοσυχνοτικής απορρόφησης στο πίσω τοίχο, συμπεριφέρεται ικανοποιητικά για χρήσεις που απαιτούν ένα πιο αντηχητικό περιβάλλον όπως η ακρόαση μουσικής. Ο χρόνος αντήχησης του αμφιθεάτρου δεν λαμβάνει τις βέλτιστες τιμές ενός χώρου ιδανικού για μουσική, ωστόσο πλησιάζει ικανοποιητικά για ένα χώρο με ακουστική ευελιξία. Ο πρώιμος χρόνος αντήχησης EDT λαμβάνει επιθυμητές τιμές, σε αντιστοιχία με τον T30 και με ομαλή διακύμανση ανάμεσα στις θέσεις του ακροατηρίου εξασφαλίζοντας ομοιόμορφη αντίληψη του χώρου. Η στάθμη του ήχου παρουσιάζει ομοιομορφία συγκριτικά με την απόσταση των θέσεων από τη πηγή χωρίς μεγάλες διακυμάνσεις, ενώ ο δείκτης ευκρίνειας c80 εμφανίζει ελαφρώς αυξημένες τιμές μειώνοντας έτσι την αίσθηση μουσικής αντήχησης.

7.5.2 Απορροφητική διάταξη για χρήση ομιλίας

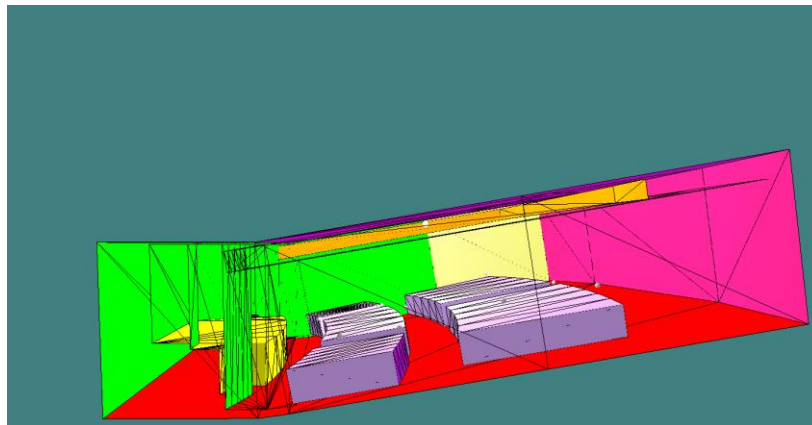
Για την απορροφητική διάταξη, αποφασίστηκε η εφαρμογή αποσπώμενων πάνελ τα οποία θα εφαρμόζονται στους πλάγιους τοίχους σε συνδυασμό με τη μόνιμη απορρόφηση στο πίσω τοίχο, για τη χρήση μουσικής. Για την πτώση του χρόνου αντήχησης, στόχος ήταν τα 0.3 δευτερόλεπτα περίπου στις συχνότητες μετά τα 500 Hz και το 0.5 δευτερόλεπτο στη συχνότητα των 250 Hz. Το υλικό που επιλέχθηκε είναι το ηχοαπορροφητικό πάνελ από υαλοβάμβακα 40 χιλιοστών : Ecophon Hygiene Wall. Έπειτα από δοκιμές, η βέλτιστη επιφάνεια κάλυψης των πλάγιων τοίχων από το ηχοαπορροφητικό υλικό, προέκυψε στα 72 m². Έγιναν δύο δοκιμές στις οποίες εφαρμόστηκαν τα πάνελ στους δύο τοίχους ομοιόμορφα. Στη πρώτη δοκιμή εφαρμόστηκαν 36 m² υλικού σε κάθε τοίχο χωρισμένα σε 10 πάνελ τοποθετημένα ομοιόμορφα και στη δεύτερη, 36 m² υλικού τοποθετημένα στο πίσω μέρος των πλάγιων τοίχων. Η πρώτη διάταξη εμφάνισε καλή ομοιομορφία στις τιμές των δεικτών. Η δεύτερη ενώ παρουσίασε λίγο μεγαλύτερη διακύμανση στις τιμές ανά θέση, παρουσίασε αυξημένες τιμές ευκρίνειας καθώς οι ελεύθερες επιφάνειες των πλάγιων τοίχων κοντά στη πηγή επιτρέπουν χρήσιμες ανακλάσεις. Έτσι η προτιμώμενη διάταξη των ηχοαπορροφητικών πάνελ είναι η δεύτερη, όπου τα πάνελ συγκεντρώνονται στο πίσω μέρος των τοίχων.

125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
0.40	0.80	0.95	0.95	0.95	0.90

Πίνακας 7-6 : Συντελεστές απορρόφησης διάτρητης μεταλλικής επιφάνειας (τεχνικό φυλλάδιο προϊόντος Ecophon)

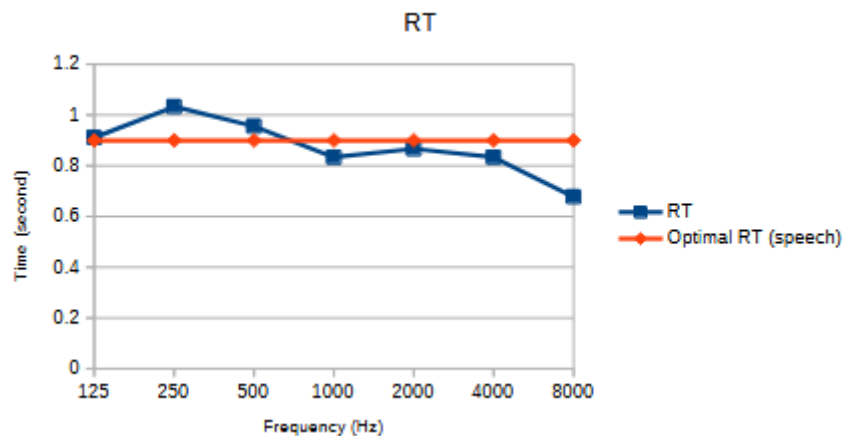


Σχήμα 7.54 : Διάταξη ομοιόμορφης κάλυψης

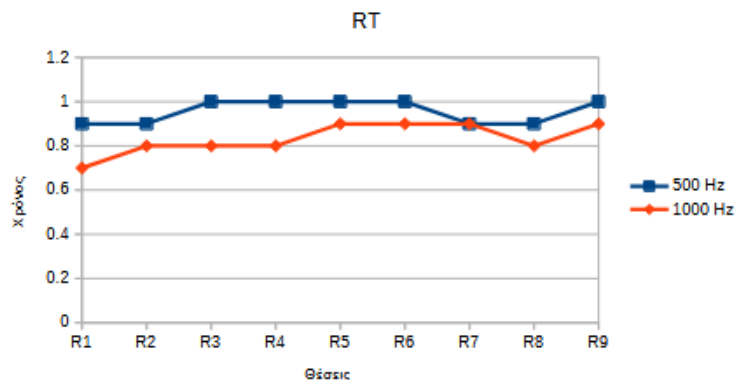


Σχήμα 7.55 : Διάταξη κάλυψης πίσω μέρους

Ο χρόνος αντήχησης στα 1000 Hz εμφάνισε τιμές στο εύρος των 0.7-0.9 δευτερόλεπτα. Η χαμηλότερη τιμή των 0.7 δευτερολέπτων εμφανίστηκε μόνο στη θέση 1 ενώ οι υπόλοιπες εμφάνισαν τιμές 0.8-0.9 δευτερόλεπτα. Συνολικά ο χρόνος αντήχησης, όπως παρατηρούμε και στην εικόνα 7-60, παρουσιάζει πολύ καλές τιμές ιδιαίτερα στο εύρος 500-4000 που είναι σημαντικό για ομιλία, αλλά και στις χαμηλές συχνότητες όπου η μόνιμη χαμηλοσυχνοτική απορρόφηση για τη χρήση μουσικής συνεισφέρει σημαντικά. Η μέγιστη απόκλιση του μέσου όρου από τις ιδανικές τιμές, είναι 0.1 δευτερόλεπτα στη συχνότητα των 250 Hz.

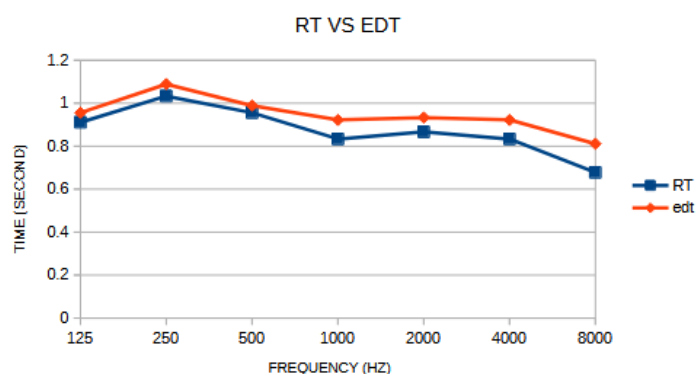


Σχήμα 7.56 : Χρόνος αντήχησης απορροφητικής διάταξης και ιδανικός χρόνος αντήχησης για χρήση ομιλίας

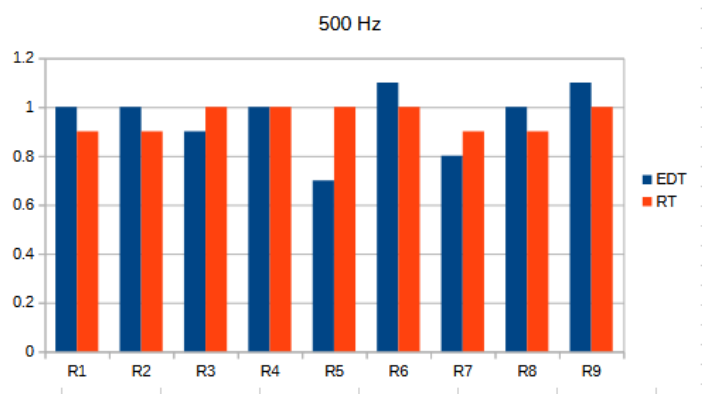


Σχήμα 7.57 : Χρόνος αντήρησης 500,1000 Hz για κάθε θέση

Ο Πρώιμος χρόνος αντήρησης εμφανίζει και σε αυτή τη διάταξη συμφωνία με το χρόνο αντήρησης. Όπως παρατηρείται στο σχήμα 7.58 οι μέσοι όροι των τιμών του EDT είναι σχεδόν ίδιοι με τον T30 με μέγιστη απόκλιση τάξης 0.09 δευτερολέπτων να εμφανίζεται στα 1000 Hz. Αν και η διαφορά είναι ελάχιστη, οι τιμές EDT είναι υψηλότερες από του χρόνου αντήρησης σε όλες τις συχνότητες, γεγονός που υποδεικνύει ότι ο χώρος ακούγεται ελαφρώς πιο ζωντανός αρχικά και ότι η πρώιμη ενέργεια διατηρείται λίγο περισσότερο. Ωστόσο οι διαφορές που υπάρχουν δεν υποδηλώνουν ανησυχία και δεν επηρεάζουν την καθαρότητα της ομιλίας.

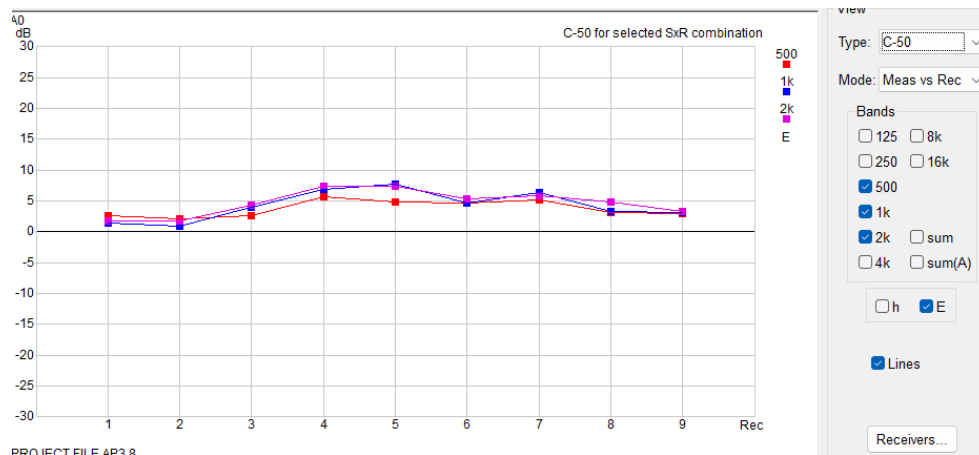


Σχήμα 7.58 : Χρόνος αντήρησης και πρώιμος χρόνος αντήρησης αμφιθεάτρου



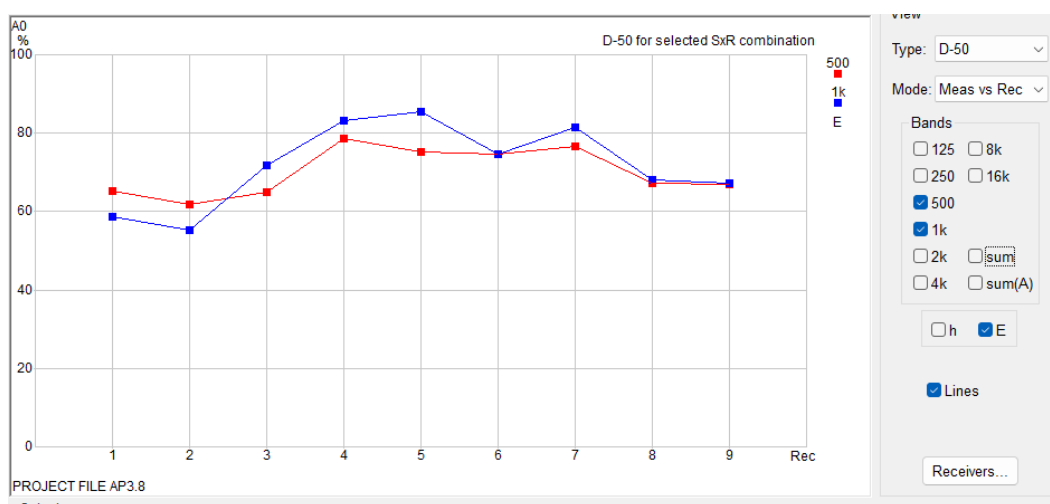
Σχήμα 7.59 : Σύγκριση τιμών EDT, RT για κάθε θέση για τη συχνότητα των 500 Hz

Ο δείκτης ευκρίνειας για την ομιλία, C50, κυμαίνεται από 2.6-4.5 dB στις συχνότητες 500-2kHz. Επειδή η απορρόφηση έχει εφαρμοστεί στον πίσω τοίχο και στους πίσω μέρους των πλαγιών τοίχων, οι τιμές των πίσω θέσεων (R4-R7) είναι μεγαλύτερες καθώς εκεί κυριαρχεί η πρόωμη ηχητική ενέργεια. Ενώ στις μπροστινές θέσεις καταφθάνουν καθυστερημένες ανακλάσεις από το πίσω τοίχο, αυξάνοντας έτσι την όψιμη ενέργεια και μειώνοντας τις τιμές του δείκτη.



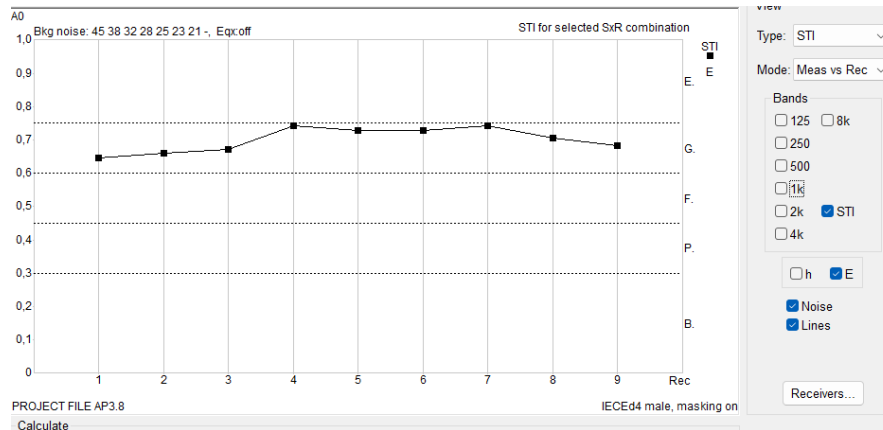
Σχήμα 7.60 : Τιμές C50 για όλες τις θέσεις για τις συχνότητες 500,1000,2000 Hz.

Εξετάζοντας τον δείκτη της διακριτότητας για να υπάρχει πιο αντιπροσωπευτική εικόνα για τη σχέση πρόωμης και όψιμης ενέργειας, παρατηρείται στο παρακάτω σχήμα ότι όλες οι τιμές βρίσκονται πάνω από 50%. Στις θέσεις 4-7 η διακριτότητα μπορεί να φτάσει και 85% για τα 1000 Hz ενώ στις μπροστινές θέσεις 1,2,3 η τιμή πέφτει ωστόσο ποτέ κάτω από το επιτρεπτό όριο. Επίσης τα 500 Hz εμφανίζουν περισσότερη ομοιομορφία σε σχέση με τα 1000 όπου η διαφοροποίηση είναι εντονότερη.



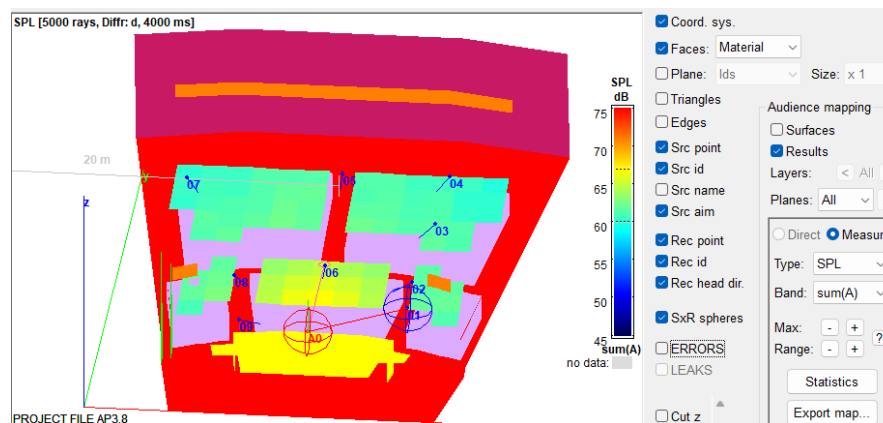
Σχήμα 7.61 : Τιμές D50 για όλες τις θέσεις για τις συχνότητες 500,1000,2000 Hz.

Όσον αφορά το δείκτη μετάδοσης ομιλίας STI, οι τιμές που παίρνει κυμαίνονται ανάμεσα στο 0.65-0.8. Οι τιμές χαρακτηρίζονται πολύ καλές (βλ. Σχήμα 2.4). οι υψηλότερες τιμές του δείκτη εμφανίζονται πάλι στις πίσω θέσεις όπου έχει εφαρμοστεί και η απορρόφηση και οι χαμηλότερες στις θέσεις 1,2,3. Συνδυαστικά με το δείκτη C50, και το χρόνο αντήχησης/EDT, τα αποτελέσματα παρουσιάζουν μια ικανοποιητική διάταξη για χρήση ομιλίας.



Σχήμα 7.62 : Τιμές STI για όλες τις θέσεις για τις συχνότητες 500,1000 Hz.

Τέλος, και η συνολική κάλυψη ηχητικής στάθμης του ακροατηρίου χαρακτηρίζεται ως ομοιόμορφη και ικανοποιητική. Όπως και στη διάταξη της μουσικής, έτσι και σε αυτή τη διάταξη, το μπροστινό τμήμα του ακροατηρίου εκτίθεται περισσότερο στον απευθείας ήχο σε κοντινή απόσταση από τη πηγή παρουσιάζοντας έτσι αυξημένες τιμές όπως μπορεί να παρατηρηθεί και στο χρωματικό χάρτη του σχήματος 7.63. Ωστόσο ακόμα και αυτό το τμήμα του ακροατηρίου εμφανίζει τιμές περίπου 3 dB πάνω από το υπόλοιπο ακροατήριο το οποίο δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις.



Σχήμα 7.63 : Χρωματικός χάρτης ηχητικής κάλυψης ακροατηρίου στη διάταξη της ομιλίας.

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα των δεικτών για τη διάταξη των πρόσθετων απορροφητικών πάνελ για τη χρήση ομιλίας, προκύπτει ότι το αμφιθέατρο παρουσιάζει την επιθυμητή ακουστική συμπεριφορά και μπορεί να υποστηρίξει τις βασικές εκδηλώσεις του πανεπιστημίου. Ο σημαντικότερος δείκτης, ο χρόνος αντήχησης, παρουσιάζει τις ιδανικές

τιμές δεδομένου του όγκου του αμφιθεάτρου για τις κρίσιμες συχνότητες για την ομιλία, ενώ ταυτόχρονα είναι σταθερός σε όλο το συχνοτικό φάσμα όσο αυτό είναι δυνατό. Η μόνιμη χαμηλοσυχνοτική απορρόφηση στο πίσω τοίχο έχει συμβάλει σημαντικά στον έλεγχο του χρόνου αντήχησης για τις συχνότητες των 125,250 Hz ενώ η πρόσθετη μεταβλητή απορρόφηση εξομαλύνει το υπόλοιπο συχνοτικό εύρος δημιουργώντας ένα επιθυμητό αντηχητικό περιβάλλον. Επιπρόσθετα, ο πρώτος χρόνος αντήχησης έρχεται σε αντιστοιχία με το χρόνο αντήχησης του χώρου ενώ τόσο οι δείκτες ευκρίνειας και διακριτότητας όσο και η ηχητική κάλυψη του ακροατηρίου, υποδηλώνουν ένα ομαλό ακουστικό περιβάλλον χωρίς θέσεις με προβλήματα. Η ανακλαστική οροφή συμβάλει στις πρώιμες ανακλάσεις του χώρου και στην επαρκή μετάδοση της χρήσιμης ηχητικής ενέργειας της πηγής.

7.6 : Συμπεράσματα

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η ακουστική προσομοίωση του αμφιθεάτρου έτσι ώστε να αποτυπωθεί όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά η ακουστική συμπεριφορά της υφιστάμενης κατάστασης του χώρου και στη συνέχεια να διερευνηθούν οι παρεμβάσεις για τη βελτίωση - μεταβολή του. Αρχικά, με βάση τα αποτελέσματα των επιτόπιων μετρήσεων που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση του μοντέλου. Μέσα από διαδοχικές προσαρμογές στους συντελεστές των υλικών από τα οποία αποτελείται ο χώρος, κατασκευάστηκε ένα μοντέλο στο οποίο οι τιμές των δεικτών του έρχονται σε συμφωνία σε πολύ μεγάλο βαθμό με τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Έτσι, αφού κατασκευάστηκε η βάση για τις επόμενες διατάξεις, δημιουργήθηκε η προσομοίωση του αμφιθεάτρου με γεμάτο ακροατήριο. Σε αυτή τη διάταξη, η απορρόφηση του ακροατηρίου μετέβαλε σημαντικά τα αποτελέσματα των δεικτών μειώνοντας το χρόνο αντήχησης κυρίως στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες. Τα αποτελέσματα αν και έδειξαν ότι το αμφιθέατρο συμπεριφέρεται ικανοποιητικά για τη χρήση διδασκαλίας, ιδιαίτερα στις συχνότητες καίριας σημασίας, ήταν εμφανές ότι το ακουστικό περιβάλλον του χώρου δεν ήταν κατάλληλο για να εξυπηρετήσει και άλλες εκδηλώσεις. Έτσι προκειμένου ο χώρος να καταστεί πιο ευέλικτος και να υπάρξει δυνατότητα και για την επαρκή κάλυψη και άλλων χρήσεων, προτάθηκε η μεταβλητή ακουστική με αλλαγή στη διάταξη των απορροφητικών επιφανειών.

Για την μεταβολή της ακουστικής προτάθηκε η αντικατάσταση της απορροφητικής οροφής από ανακλαστικό υλικό, δηλαδή λουστραρισμένο ξύλο. Έτσι αυξάνονται οι πρώιμες ανακλάσεις και εξασφαλίζεται ένα ομοιόμορφο ακουστικό περιβάλλον στο χώρο. Η απορρόφηση της οροφής μετακινήθηκε στο πίσω τοίχο, για την διαμόρφωση της μουσικής, και αντικαταστάθηκε από χαμηλοσυχνοτική απορρόφηση η οποία αφήνει ανεπηρέαστες τις συχνότητες μεγαλύτερες των 1000Hz. Έτσι ο χρόνος αντήχησης μένει όσο το δυνατό υψηλός για να υποστηριχτεί μια τέτοια εκδήλωση.

Στην διαμόρφωση της ομιλίας, τα αποσπώμενα ηχοαπορροφητικά πάνελ τοποθετούνται στο πίσω μέρος των πλάγιων τοίχων αυξάνοντας τη συνολική απορρόφηση του χώρου. Τα πάνελ που επιλέχθηκαν επηρεάζουν τις συχνοτικές περιοχές έτσι ώστε οι τιμές του χρόνου αντήχησης να συμπίπτουν με τον επιθυμητό στόχο των 0,9 δευτερολέπτων. Εκτός αυτού, οι δείκτες ευκρίνειας, διακριτότητας κτλ επιβεβαιώνουν τη καταλληλότητα της διάταξης για τη χρήση ομιλίας.

Τέλος, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η μεταβλητή ακουστική του χώρου μπορεί να υποστηρίξει εξίσου αποτελεσματικά τη προηγούμενη χρήση, της διδασκαλίας. Παράλληλα όμως μπορεί να διευρύνει τις δυνατότητες του χώρου και να εξασφαλίσει ένα ζωντανό ακουστικό περιβάλλον στο οποίο θα πραγματοποιούνται διάφορες εκδηλώσεις του πανεπιστημίου. Η τελική πρόταση στοχεύει να βελτιώσει τη προσαρμοστικότητα του αμφιθεάτρου προσφέροντας αξιοπρεπείς ακουστικές επιδόσεις ανεξάρτητα της φύσης της εκδήλωσης ενώ παράλληλα παραμένει σταθερά αποτελεσματική στη βασική χρήση της διδασκαλίας.

Κεφάλαιο 8ο : Τελικά Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία είχε ως στόχο τη παρουσίαση την αξιολόγηση και τη βελτίωση της ακουστικής συμπεριφοράς του αμφιθεάτρου Α.Π-3.8 του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, ώστε οι προτεινόμενες παρεμβάσεις να διευρύνουν τις δυνατότητες της χρήσης του. Αφού αρχικά καλύφθηκε το απαιτούμενο θεωρητικό πλαίσιο για τη συμπεριφορά του ήχου στους κλειστούς χώρους και για τους δείκτες αξιολόγησης της ακουστικής μιας αίθουσας, παρουσιάστηκαν παραδείγματα αιθουσών τα οποία αποτέλεσαν βάση και για τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στη συνέχεια για τη μεταβολή της ακουστικής του χώρου.

Οι επιτόπιες μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο αμφιθέατρο, βασίστηκαν σε διεθνή πρότυπα και οδηγίες προκειμένου να προκύψει μια αντικειμενική αξιολόγηση. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδωσαν στοιχεία για τους ακουστικούς δείκτες του χώρου όπως ο χρόνος αντήχησης, δείκτες ευκρίνειας και καταληπτότητας της ομιλίας προκειμένου να κατασκευαστεί το μοντέλο της προσομοίωσης του αμφιθεάτρου. Αξιοποιώντας τα σχέδια του χώρου και τα αποτελέσματα των δεικτών για τη βαθμονόμηση του μοντέλου, κατασκευάστηκε η προσομοίωση του χώρου στο λογισμικό Catt-Acoustic. Έχοντας ως στόχο την επίτευξη των τιμών των δεικτών που προέκυψαν από τις μετρήσεις, προσαρμόστηκαν οι τιμές της απορρόφησης των υλικών των επιφανειών του χώρου. Με αυτό το τρόπο, το μοντέλο που δημιουργήθηκε θα μπορούσε να αναπαραστήσει ικανοποιητικά τη ρεαλιστική συμπεριφορά του χώρου στα εξεταζόμενα σενάρια.

Αυτά τα σενάρια που ακολούθησαν στη προσομοίωση του χώρου αφορούσαν το χώρο με γεμάτο ακροατήριο ώστε να εξεταστεί η τωρινή συμπεριφορά του, σε κανονικές συνθήκες. Τα εξαγόμενα συμπεράσματα έδειξαν ότι ο χώρος είχε τον επιθυμητό χρόνο αντήχησης, τουλάχιστον για τις σημαντικότερες συχνότητες για χρήση ομιλίας. Επίσης οι τιμές ευκρίνειας και διακριτότητας ήταν ικανοποιητικές ως επί το πλείστον με εξαίρεση κάποιες πλάγιες θέσεις του ακροατηρίου οι οποίες εμφάνιζαν αρνητικές τιμές οι οποίες οφείλονταν κυρίως στην έλλειψη πρώιμων ανακλάσεων όπως φάνηκε και στη συνέχεια.

Οι προτάσεις που ακολούθησαν στη συνέχεια, είχαν ως στόχο τη μετατροπή του αμφιθεάτρου σε ένα χώρο ευέλικτο που θα μπορούσε να υποστηρίξει ακουστικά διάφορες εκδηλώσεις. Για αυτό προτάθηκε η μεταβλητή ακουστική. Δύο διατάξεις εκ των οποίων η μία πιο αντηχητική ώστε να υποστηρίζονται εκδηλώσεις όπως ακρόαση μουσικής, και μια πιο απορροφητική ώστε η χρήση διδασκαλίας να υποστηρίζεται ικανοποιητικά. Παράλληλα προτάθηκε η μόνιμη απορρόφηση μειώθηκε, ώστε να μετατραπεί σε πιο αντηχητική η αίθουσα και μετακινήθηκε στον πίσω τοίχο. Η οροφή μετατράπηκε σε ανακλαστική, εξασφαλίζοντας έτσι πρώιμες ανακλάσεις σε ολόκληρο το ακροατήριο. Δεδομένου του όγκου της αίθουσας και της μεγάλης επιρροής του ακροατηρίου στο χρόνο αντήχησης, τα αποτελέσματα για τη διάταξη της μουσικής πλησίασαν τις συνιστώμενες τιμές δεικτών χωρίς ωστόσο να τις πετύχουν. Η διάταξη της ομιλίας, στην οποία εφαρμόστηκε πρόσθετη απορρόφηση στους πίσω πλάγιους τοίχους, εμφάνισε τις ιδανικές τιμές για το χρόνο αντήχησης στις σημαντικότερες συχνότητες αλλά και στις χαμηλές. Επίσης δείκτες όπως ο πρώιμος χρόνος αντήχησης, δείκτες ευκρίνειας,

διακριτότητας και καταληπτότητας της ομιλίας, έδειξαν ότι ο ήχος συμπεριφέρεται ομαλά σε όλο το ακροατήριο χωρίς να δημιουργούνται ιδιαίτερα προβληματικά ακουστικά φαινόμενα.

Λίστα Βιβλιογραφικών αναφορών

Κοντομίχος Φ., Ζαρούχας Θ., Χατζηαντωνίου Π., (2013). “Βασικές Αρχές και Σύγχρονες Εξελίξεις στη Κτιριακή Ακουστική”. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο- Πάτρα

Μπαξεβάνης Κ., Καλλίρης Μ., Καλλίρης Γ., (2024). “Ακουστική & Ηλεκτροακουστική αναβάθμιση Αμφιθεάτρου διαλέξεων στην Ιατρική σχολή του Α.Π.Θ”. Πρακτικά 12^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου “Ακουστική 2024”, helina.gr - Ρέθυμνο

Σκαρλάτος Δ., (2021). “Εφαρμοσμένη Ακουστική - Ηχοπροστασία”. GOTSIS-Πάτρα

Σωτηροπούλου Α.. (2015), “Ακουστικός Σχεδιασμός Αιθουσών Ακροατηρίου”.

<https://www.openbook.gr/akoustikos-sxediasmos-aitouswn-akroatiriou/>

Τσινίκας Ν., (1990). “Ακουστικός Σχεδιασμός Χώρων”. University Studio Press - Θεσσαλονίκη

Φωκάς Δ., (2021). “ Ακουστική μελέτη και σχεδιασμός μεταβλητής ακουστικής του αμφιθεάτρου του Πνευματικού Κέντρου Γιαννιτσών για εκδηλώσεις ομιλίας και μουσικής” .

Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Apothesis Ear,

<https://apothesis.eap.gr/home>

Χατζηγεωργίου Γ, (2022). “Ακουστικός σχεδιασμός, ακουστική προσομοίωση, πρότυπες μετρήσεις και ανάλυση της ακουστικής του νέου Αμφιθεάτρου “Μιλτιάδης Έβερτ” στην Τεχνόπολη Δήμου Αθηναίων”. Πρακτικά 11^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου “Ακουστική 2022”, helina.gr - Θεσσαλονίκη

Acoustic Supplies.. “Absorption coefficients of common building materials and finishes ”.

Ανακτήθηκε 6 Σεπτεμβρίου 2026, από: <https://www.acoustic-supplies.com/absorption-coefficient-chart/>

American National Standard : ANSI/ASA S12.60-Part1, 2010, —Acoustical

Performance Criteria, Design Requirements and Guidelines for Schools: Permanent Schools

https://successforkidswithhearingloss.com/wp-content/uploads/2012/01/ANSI-ASA_S12.60-2010_PART_1_with_2011_sponsor_page.pdf

Alibaba H.Z., Benjamin A.O., 2019. “Achieving Acoustic Comfort in the Architectural Design of a Lecture Hall”. https://www.researchgate.net/profile/Halil-Alibaba/publication/330205114_Achieving_Acoustic_Comfort_in_the_Architectural_Design_of_a_Lecture_Hall/links/5c33b0a0a6fdccd6b599de79/Achieving-Acoustic-Comfort-in-the-Architectural-Design-of-a-Lecture-Hall.pdf

AFMG Technologies.. *EASE 5 loudspeaker database*. Ανακτήθηκε 5 Ιουνίου 2026 από : <https://www.afmg.eu/en/ease-loudspeaker-database>

Ballou, 2008. “Handbook for Sound Engineers”. Elsevier, Focal Press - Oxford

Chang D., Vercammen R. ,2023 “Variable Acoustics of the Intesa Sanpaolo Tower's Auditorium”. Genova, Italy.

Deutsches Institut fur Normung : Din 18041, 2018. ““Acoustic quality in small and middle-size rooms”. https://www.euronoise2018.eu/docs/papers/176_Euronoise2018.pdf

Deutsches Institut fur Normung : Din 18041, 2004. ““Acoustic quality in small and middle-size rooms”, <https://pdfcoffee.com/din-18041-2004-eng-pdf-free.html>

Eggenschwiler,(2005). “Lecture Halls - Room Acoustics and Sound Reinforcement”. https://www.researchgate.net/publication/238114069_Lecture_Halls_-_Room_Acoustics_and_Sound_Reinforcement

Everest A. , (2001). “Master Handbook of Acoustics”. McGraw-Hill Book Company -USA

Gade & Mortensen,(2013), “The Queen’s Hall: The Royal Library, Copenhagen, Denmark” <https://www.yumpu.com/en/document/view/21079053/acoustics-consultant-gade-mortensen-akustik-a-s>

Holden M., (2016). “ Acoustics of Multi-Use Performing Arts Centers”. CRC Press

Lannace, G., Berardi, U., De Rossi, F., Mazza, S., Trematerra, A., & Ciaburro, G. (2019). “Acoustic enhancement of a modern church. *Buildings*”, ανακτήθηκε από : <https://www.mdpi.com/2075-5309/9/4/83>

International Organization for Standardization : ISO 3382- Part 1, 2009, —

“Acoustics-Measurement of Room Acoustic Parameters”, <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/40979/b0e9f87f3d9f4df6b18f767e3439bfb6/ISO-3382-1-2009.pdf>

International Organization for Standardization : ISO 3382- Part 2, 2008, —

Acoustics-Measurement of Room Acoustic Parameters, <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/36201/4a4d0dc848ac4d40bfe46e36c531afb5/ISO-3382-2-2008.pdf>

Kuttruff H, (1973). “Room Acoustics”. Elsevier Science Publishers LTD

Long M., (2006). “Architectural Acoustics”. Elsevier Academic Press

Maishanu K., Alibaba H. Z., (2017). “Auditorium Acoustics from Past to Present”.

https://www.researchgate.net/publication/313036067_Auditorium_Acoustics_From_Past_to_Present

Pazara T., Vasiliu P., Novac G., Deliu F.,(2017), “Aspects regarding the acoustics of a lecture hall”, <https://www.proquest.com/openview/12dbe16e064edc3472fa514c6cebc60d/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2036237>

Rossing T.D. (2007). “Springer Handbook of Acoustics”. Stanford University

Vigran T.E., (2008). “Building Acoustics”. Taylor and Francis -London & New York

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

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