

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

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



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

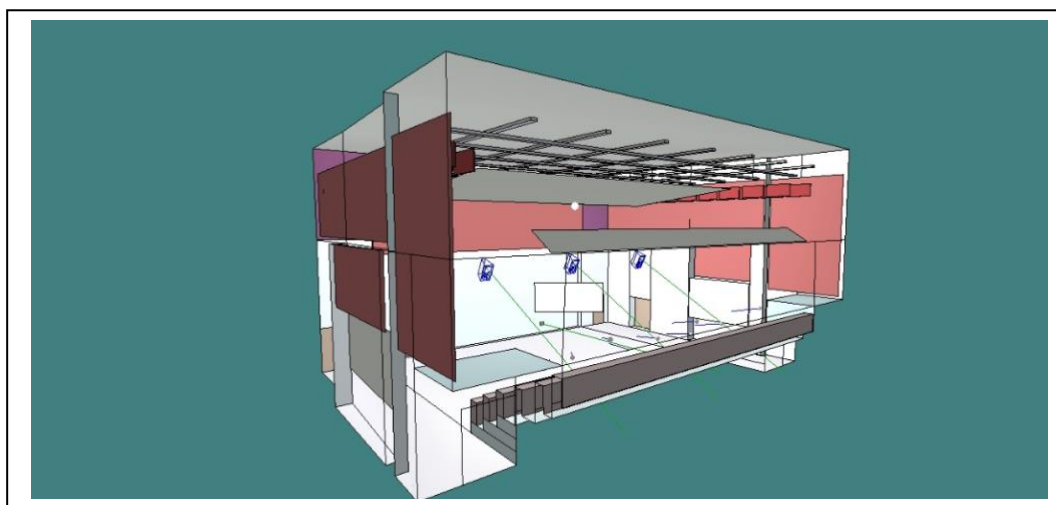
250, Thivon Str., Athens, GR-12244, Greece
Tel:+30 210 538-1225, Fax:+30 210 538-1226

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Τεχνολογίες Ήχου, Βίντεο και Μετάδοσης

Master of Science in
Audio, Video and Broadcasting
Engineering

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη ακουστικής / ηλεκτρακουστικής χώρου εκδηλώσεων πολλαπλών χρήσεων



Μεταπτυχιακός Φοιτητής: Μπεκ-Γυφτάκης Αλέξανδρος-Μιχαήλ, MSCAVB-03
Επιβλέπων: Στυλιανός Ποτηράκης, Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΗΣ 2023

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

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



UNIVERSITY of WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
Department of Electrical & Electronics Engineering

www.eee.uniwa.gr

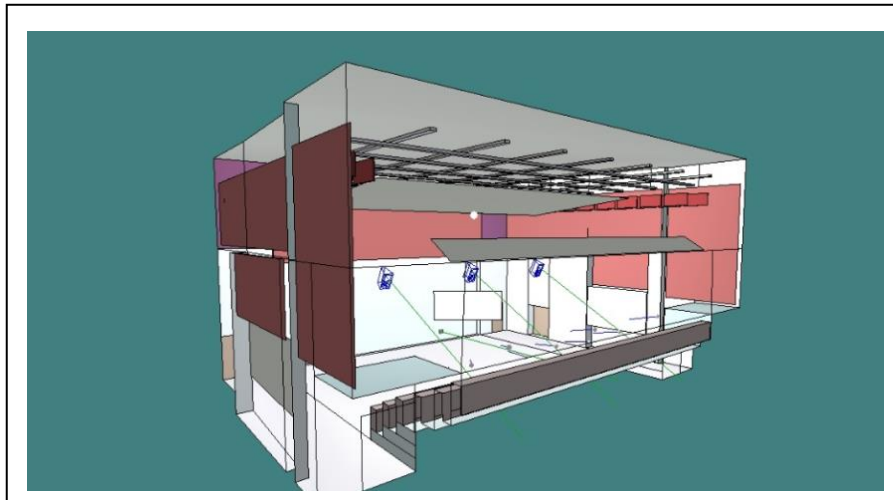
250, Thivon Str., Athens, GR-12244, Greece
Tel:+30 210 538-1225, Fax:+30 210 538-1226

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Τεχνολογίες Ήχου, Βίντεο και Μετάδοσης

Master of Science in
Audio, Video and Broadcasting
Engineering

MSc Thesis

Multipurpose event space acoustic / electroacoustic study



Student: Beck-Gyftakis Alexandros-Michail, MSCAVB-03

MSc Thesis Supervisor: Stylianos Potirakis, Professor

ATHENS-EGALEO, SEPTEMBER 2023

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

Επιβλέπων

Μέλος

Μέλος

Στυλιανός Ποτηράκης
Καθηγητής

Νικόλαος-Αλέξανδρος Τάτλας
Αναπληρωτής Καθηγητής

Οδυσσέας Τσακιρίδης
Επίκουρος Καθηγητής

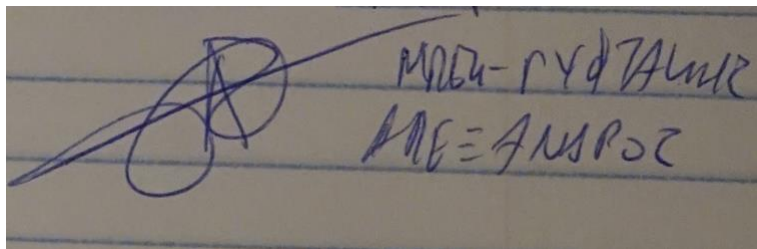
ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθεν υπογεγραμμένος Μπεκ-Γυφτάκης Αλέξανδρος-Μιχαήλ του Λάρς-Μίχαελ, με αριθμό μητρώου MSCAVB-003 φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Τεχνολογίες Ήχου, Βίντεο και Μετάδοσης» του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

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

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

Ο Δηλών



Γυφτάκης-Μπεκ Αλέξανδρος-Μιχαήλ

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. Allrightsreserved.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Γυφτάκη-Μπεκ Αλέξανδρου-Μιχαήλ,

Σεπτέμβριος, 2023

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας επιχειρείται, μέσω ακουστικών μετρήσεων, η ανάδειξη των ελαττωματικών χαρακτηριστικών της μικρής αίθουσας του Μεγάρου Χορού Καλαμάτας, γνωστής και ως Αίθουσα Studio, καθώς και τρόποι βελτίωσης αυτών. Η αίθουσα χρησιμοποιείται σε πληθώρα εκδηλώσεων διαφορετικής φύσης, με τις απαιτήσεις ως προς τα ιδανικά ακουστικά χαρακτηριστικά να διαφέρουν αισθητά ανά περίπτωση, αυξάνοντας την πολυπλοκότητα της ακουστικής μελέτης. Προτείνεται η χρήση μεταβλητών ακουστικών διατάξεων, σε συγκεκριμένα σημεία, που εστιάζουν στον έλεγχο της απορρόφησης και των ανακλάσεων του ήχου στα επιθυμητά επίπεδα, διαμορφώνοντας κατάλληλα τα ακουστικά χαρακτηριστικά της αίθουσας ανά περίπτωση (μουσική, ομιλία). Η χρήση ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης ωφελεί τα παραπάνω σε κάθε περίπτωση, ειδικά για ομιλίες, χωρίς όμως να αποκλείεται η χρήση της αίθουσας σε ορισμένες εκδηλώσεις (μουσικής) δίχως αυτήν. Τέλος σημειώνεται η αλληλεπίδραση ορισμένων στοιχείων σε διαφορετικούς ακουστικές παραμέτρους και πως ορισμένες ωφελούνται περισσότερο από άλλους.

ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ: Ακουστική μελέτη, μελέτη ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης, ακουστικός σχεδιασμός, αίθουσα πολλαπλών χρήσεων, μεταβλητή ακουστική, χρόνος αντήχησης, απορρόφηση, ανακλάσεις, καταληπτότητα λόγου, μεγάφωνα, CATT-Acoustic.

ABSTRACT

In the context of this specific thesis, an attempt is made to highlight the defective characteristics, through acoustic measurements, of Kalamata's Dance Hall small venue, also known Studio venue, as well as ways to improve the overall acoustics. The hall is used for various events of different nature, with the ideal acoustics requirements for each varying significantly, from case to case, increasing thus the complexity of this particular acoustic study. The use of variable acoustic mechanisms is recommended, at specific points, which focus on controlling sound absorption and reflections at the desired levels, shaping appropriately the acoustic characteristics of the room on a case-by-case basis (music, speech). The use of an electro-acoustic installation benefits the above in any case, especially for speeches, without excluding the use of the venue for certain events (music) without sound reinforcement. Finally, the interaction of certain proposed elements in different acoustic parameters is noted and how some benefit more than others.

KEYWORDS: Acoustic study, electroacoustic installation study, acoustic design, multi-purpose room, variable acoustics, reverberation time, absorption, reflections, speech intelligibility, loudspeakers, CATT-Acoustic.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στην Μάρα, στον Σωτήρη, στον Θεοφύλακτο και στον Γιάννη για την βοήθεια τους στη διπλωματική.

Στον καθηγητή μου Ποτηράκη Στυλιανό για την καθοδήγηση και την βοήθεια.

Στην μητέρα μου, Κατερίνα που πάντα ατενίζει το μέλλον με φως.

Στον πατέρα μου, Lars που γελά από ψηλά.

Στην Ιωάννα μου, για την κατανόηση, την στήριξη, τη φροντίδα, την αγάπη και χίλιους ακόμη λόγους.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:.....	15
1.1 Ορισμός ήχου.....	15
1.2 Ανάλυση ήχου ως ημιτονοειδούς κυματομορφής, RMS και PEAK τιμές.....	16
1.3 Κυματική εξίσωση.....	17
1.4 Ταχύτητα ήχου στον αέρα.....	17
1.5 Συχνότητα, μήκος κύματος και περίοδος.....	18
1.6 Μετασχηματισμός Fourier.....	19
1.7 Οκτάβες και Τριτοκτάβες (1/3 οκτάβες).....	20
1.8 Ηχητική Ένταση.....	21
1.9 Ηχητική ισχύς.....	21
1.10 Ηχητική πίεση.....	22
1.11 Πρόσθεση στάθμεων.....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:.....	23
2.1 Γενικά περί ψυχοακουστικής.....	23
2.2 Καμπύλες ίσης ακουστότητας Fletcher Munson.....	23
2.3 Φίλτρα σταθμισμένων υπολογισμών.....	24
2.4 Νόμος του πρώτου μετώπου κύματος.....	25
2.5 Φαινόμενο Haas.....	25
2.6 Αμφιωτική ακοή, εντοπισμός της θέσης της πηγής.....	27
2.6.1 Διαφορές στάθμης (Interaural Level Difference), ILD.....	27
2.6.2 Χρονικές διαφορές (Interaural Time Difference), ITD.....	27
2.6.3 Ο ρόλος του κεφαλιού στην αντίληψη προέλευσης του ήχου.....	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Διάδοση του ήχου και ακουστικά φαινόμενα.....	30
3.1 Διάδοση του ήχου.....	30
3.1.1 Σημειακή πηγή σε ελεύθερο πεδίο.....	30
3.1.2 Ο νόμος του αντιστρόφου τετραγώνου.....	31
3.1.3 Σημειακή πηγή σε κλειστό χώρο και σταθερά δωματίου R.....	32
3.1.4 Κρίσιμη απόσταση, Dc	32
3.1.5 Στάσιμα κύματα.....	33
3.1.6 Συχνότητα αποκοπής κλειστού χώρου.....	34
3.2 Ανακλάσεις.....	35
3.2.1 Γενικά περί ανακλάσεων.....	35
3.2.2 Μελέτη ανακλάσεων με τη μέθοδο ειδώλων της πηγής.....	36
3.2.3 Ανακλάσεις σε κυρτές επιφάνειες.....	36
3.2.4 Ανακλάσεις σε κοίλες επιφάνειες.....	36
3.2.5 Ηχητική σκιά.....	37
3.2.6 Ηχώ, ψυχοακουστική και πλαταγισμός ηχούς (Flutter echo).....	38
3.2.7 Ανακλάσεις και ακουστικός σχεδιασμός.....	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:.....	42
4.1 Απορρόφηση.....	42
4.1.1 Απορρόφηση ήχου και συντελεστής απορρόφησης.....	42
4.1.2 Απορροφητικές διατάξεις.....	46
4.1.3 Απορρόφηση από ανθρώπους.....	50
4.1.4 Απορρόφηση του αέρα.....	51
4.1.5 Ακουστική επιφάνεια καθισμάτων.....	51
4.2 Διάχυση και διαχυτές.....	51
4.2.1 Ορισμός διάχυσης και διαχυτών.....	52
4.2.2 Μετρήσεις διάχυσης επιφανειών.....	52

4.2.3	Δείκτης διάχυσης επιφανειών (SDI).....	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:.....		53
5.1	Χρόνος αντήχησης	53
5.1.1	Απευθείας ήχος και αντηχητικό πεδίο.....	53
5.1.2	Χρόνος αντήχησης - ορισμός	53
5.1.3	Decay rate	55
5.1.4	Διαφορές ανά συχνότητα.....	55
5.1.5	Παρατηρήσεις περί χρόνου αντήχησης.....	55
5.1.6	Μέτρηση χρόνου αντήχησης	56
5.1.7	Έλεγχος χρόνου αντήχησης.....	56
5.1.8	Χρήση μη-επιστημονικών όρων για την περιγραφή του υποκειμενικού αισθήματος ακρόασης.....	57
5.1.9	Επίδραση χρόνου αντήχησης στην καταληπτότητα του λόγου.....	58
5.1.10	Υπολογισμός χρόνου αντήχησης κατά Sabine	59
5.1.11	Παραδοχές τύπου Sabine.....	59
5.1.12	Όγκος αίθουσας και χρόνος αντήχησης.....	60
5.1.13	Επίδραση αέρα, υγρασίας και θερμοκρασίας στον χρόνο αντήχησης.....	60
5.1.14	Συχνότητα αποκοπής.....	61
5.1.15	Υπολογισμός χρόνου αντήχησης κατά Eyring	61
5.1.16	Κατά Sabine ή κατά Eyring;.....	62
5.1.17	Επαρκεί ο χρόνος αντήχησης;.....	62
5.1.18	Μειονεκτήματα RT60.....	63
5.2	Επιπλέον δείκτες ακουστικής ποιότητας ενός χώρου.....	63
5.2.1	T30, T15, EDT.....	63
5.2.2	Ανάλυση του EDT.....	64
5.2.3	Bass ratio και Treble ratio	64
5.3	Κριτήρια Καθαρότητας, Ευκρίνειας και καταληπτότητας του ήχου.....	64
5.3.1	Δείκτης Ευκρίνειας (Definition Coefficient) D50.....	65
5.3.2	Δείκτες διαύγειας (Clarity Coefficient) C50 και C80	65
5.3.3	Χρονικό Κέντρο Βάρους (Center Time) TS.....	66
5.3.4	Καταληπτότητα της ομιλίας	66
5.3.5	Καταληπτότητα της ομιλίας (Speech Transmission Index) STI.....	67
5.3.6	Απώλεια συμφώνων (Articulation Loss) %ALcons.....	67
5.3.7	Συνοψίζοντας περί ευκρίνειας και καταληπτότητας του ήχου.....	68
5.3.8	Δείκτης διωπτικής ακρόασης (Interaural correlation coefficient) IACC	68
5.3.9	Δείκτης πλευρικών ανακλάσεων (Lateral Energy Fraction) (LEF ή LF)	69
5.3.10	Απολαβή Δωματίου (Room Gain ή Strength Factor) G.....	70
5.3.11	Ακουστικές παράμετροι δωματίου (Room Acoustic Parameters) RAP.....	70
5.4	Χρήση Λογισμικών	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συσχετισμός ακουστικών παραμέτρων, κριτήρια ιεράρχησης και ιδανικές τιμές		73
6.1	Στοιχεία καλής ακουστικής ενός χώρου	73
6.2	Αίσθηση χώρου.....	73
6.3	Συσχετισμός ακουστικών παραμέτρων, κριτήρια ιεράρχησης και ιδανικές τιμές	74
6.4	Ιδανικές τιμές ακουστικών παραμέτρων για χώρους ομιλιών.....	74
6.4.1	Αίθουσες ομιλιών.....	74
6.4.2	Αίθουσες μουσικής γενικής χρήσης	76
6.4.3	Αίθουσες μουσικής δωματίου.....	79
6.4.4	Επιπλέον τύπος υπολογισμού ιδανικού χρόνου αντήχησης αναλόγως του όγκου και της χρήσης.....	80
6.4.5	Βιβλιογραφική αναζήτηση ιδανικού χρόνου αντήχησης	80
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Το Studio (Black Box) του Μεγάρου Χορού Καλαμάτας. Μετρήσεις και σχεδιασμός στο CATT-Acoustic		83

7.1	Γνωριμία με το χώρο	83
7.2	Γεωμετρία του χώρου.....	84
7.3	Ανάλυση επιφανειών του χώρου.....	87
7.4	Μέτρηση χρόνου αντήχησης του χώρου.....	90
7.4.1	Με έκρηξη μπαλονιού.....	90
7.4.2	Με σήμα παλμού (Impulse).....	92
7.4.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων των δύο μετρήσεων.....	94
7.4.4	Μέσω exponential Swept Tone στο λογισμικό REW.....	96
7.5	Μέσος χρόνος αντήχησης T30 των 3 τρόπων μέτρησης.....	106
7.6	Σχεδιασμός του χώρου σε λογισμικό ακουστικού σχεδιασμού και εύρεση συντελεστών απορρόφησης επιφανειών.....	108
7.7	Αποτελέσματα λογισμικού.....	111
7.7.1	RT60, T30 για αίθουσα άδεια από κοινό.....	112
7.7.2	RT60, T30 για αίθουσα πλήρη κοινού.....	113
7.8	Ανάλυση και σύγκριση αποτελεσμάτων πραγματικών μετρήσεων με αποτελέσματα λογισμικού προσομοίωσης.....	114
7.8.1	T30.....	116
7.8.2	T20.....	117
7.8.3	EDT.....	118
7.8.4	TS.....	119
7.8.5	C50.....	120
7.8.6	C80.....	121
7.8.7	D50.....	122
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : Προτάσεις για ακουστική βελτίωση της αίθουσας.....		124
8.1	Αύξηση πρώτων ανακλάσεων.....	124
8.2	Εύρεση ιδανικών χρόνων αντήχησης αναλόγως τη χρήση.....	139
8.3	Υλικά απορρόφησης για δημιουργία ιδανικού μέγιστου χρόνου αντήχησης (μουσικής/πολυχώρου).....	141
8.4	Υλικά απορρόφησης για δημιουργία ιδανικού ελάχιστου χρόνου αντήχησης (ομιλίες).....	144
8.5	Παρουσίαση αποτελεσμάτων για κάθε περίπτωση.....	148
8.5.1	D50.....	149
8.5.2	C50.....	150
8.5.3	C80.....	151
8.5.4	TS.....	153
8.5.5	RT'.....	154
8.5.6	EDT.....	155
8.5.7	T20.....	156
8.5.8	T30.....	157
8.5.9	J-LF.....	158
8.5.10	L-J.....	159
8.5.11	G.....	160
8.5.12	STI.....	161
8.5.13	AI.....	162
8.5.14	IACC.....	163
8.5.15	Υπολογισμός λόγου EDT/RT'.....	164
8.5.16	Υπολογισμός BR.....	165
8.5.17	Υπολογισμός μέσου όρου λόγου EDT/RT' και BR.....	166
8.5.18	Ηχογράμματα θέση A1.....	167
8.5.19	Ηχογράμματα θέση A5.....	168
8.5.20	Ηχογράμματα θέση A9.....	170
8.5.21	Κρουστικές αποκρίσεις θέση A1.....	172

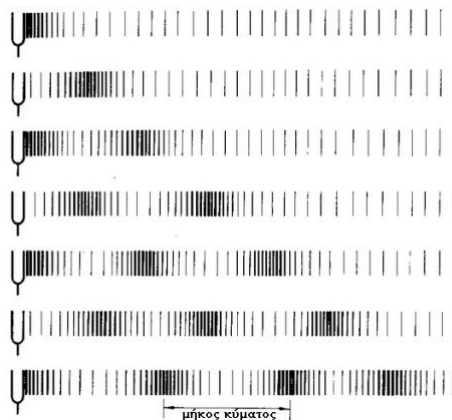
8.5.22	Κρουστικές αποκρίσεις θέση A5	174
8.5.23	Κρουστικές αποκρίσεις θέση A9	176
8.5.24	Διαγράμματα Schroeder θέση A1	178
8.5.25	Διαγράμματα Schroeder θέση A5	180
8.5.26	Διαγράμματα Schroeder θέση A9	182
8.6	Ανάλυση και συμπεράσματα ακουστικής μελέτης	183
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: Μελέτη ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης.....		191
9.1	Θεωρητικό υπόβαθρο	191
9.1.1	Ορισμός βασικών αποστάσεων μελέτης.....	191
9.1.2	Λόγος ωφέλιμου σήματος προς θόρυβο.....	192
9.1.3	Ισοδύναμη ακουστική απόσταση (EAD).....	192
9.1.4	Κατευθυντικότητα και αριθμός μικροφώνων και ηχείων	193
9.1.5	Ακουστικοί δείκτες ηλεκτροακουστικής μελέτης.....	193
9.1.6	Εναισθησία μεγάφωνου και απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς.....	194
9.1.7	Δυνητικό ακουστικό κέρδος (Potential Acoustical Gain) - PAG.....	194
9.1.8	Απαιτούμενο ακουστικό κέρδος (Needed Acoustical Gain) - NAG.....	195
9.1.9	Σχέση PAG και NAG.....	196
9.1.10	Καταληπτότητα και κατανόηση ομιλίας	196
9.1.11	Υπολογισμός στάθμης ηχητικής πίεσης σε συγκεκριμένη απόσταση.....	196
9.2	Θέσεις ομιλητή, ηχείων και σημείων ακρόασης - επιλογή ηχείων.....	197
9.3	Υλοποίηση βασικών υπολογισμών	198
9.4	Παρουσίαση θεωρητικών αποτελεσμάτων σε κάθε θέση ακροατή.....	200
9.4.1	Για άδεια αίθουσα.....	200
9.4.1	Για γεμάτη αίθουσα	204
9.5	Εισαγωγή ηχείων στο CATT-Acoustic και εξαγωγή αποτελεσμάτων.....	209
9.5.1	Παρουσίαση αποτελεσμάτων αίθουσας άδειας από κοινό.....	210
9.5.2	Παρουσίαση αποτελεσμάτων αίθουσας γεμάτης από κοινό	215
9.6	Ανάλυση αποτελεσμάτων.....	221
9.7	Επιπλέον εξοπλισμός.....	222
9.8	Ρύθμιση Καθυστέρησης Συστήματος.....	223
ΣΥΝΟΨΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....		224
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΗΓΕΣ.....		225

Η προσέγγιση της παρούσας ακουστικής μελέτης για την αίθουσα Studio του Μεγάλου Χορού Καλαμάτας ξεκίνησε με την ανάλυση της αίθουσας στην τωρινή της μορφή. Η γεωμετρία της και τα υλικά που την απαρτίζουν εξετάστηκαν από τα αρχιτεκτονικά της σχέδια παράλληλα με μετρήσεις και παρατηρήσεις εντός του χώρου. Επιχειρήθηκε η μέτρηση των ακουστικών χαρακτηριστικών της με τρεις τρόπους για την ασφαλέστερη και πιο αξιόπιστη εξαγωγή μέσων όρων και συμπερασμάτων, τα οποία βοήθησαν στον πιστότερο και καλύτερο σχεδιασμό μοντέλου της αίθουσας στο λογισμικό ακουστικών προσομοιώσεων CATT-Acoustic. Έπειτα από μελέτη των ιδανικών τιμών των διάφορων ακουστικών παραμέτρων (Room Acoustic Parameters – RAP) όπως αυτές εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία (στη συνέχεια του κειμένου κάποιες αναφέρονται και ως «δείκτες»), έγινε προσπάθεια τοποθέτησης απορροφητικών και ανακλαστικών διατάξεων με μηχανισμούς τέτοιους που να επιτρέπουν τη μεταβολή των ακουστικών παραμέτρων κατά βούληση, αναλόγως την εκδήλωση που φιλοξενείται στην αίθουσα. Τα αποτελέσματα ικανοποίησαν σε μεγάλο βαθμό τις προσδοκίες. Τέλος, προτάθηκε η τοποθέτηση τριών ηχείων σε συγκεκριμένα σημεία που βοηθούν στην ομοιόμορφη κάλυψη όλου του ακροατηρίου σε περιπτώσεις μεμονωμένων μουσικών εκδηλώσεων ή ομιλιών. Η χρήση τους κρίνεται απαραίτητη για εκδηλώσεις που σχετίζονται με το χορό λόγω αναπαραγωγής προηχογραφημένης μουσικής σε υψηλές στάθμες. Όλοι οι υπολογισμοί, πλην του θεωρητικού μέρους της ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης, πραγματοποιήθηκαν μέσω του CATT-Acoustic και παρουσιάζονται αναλυτικά, για διαφορετικά «στησίματα» των προτεινόμενων ακουστικών διατάξεων, για τρεις θέσεις στη περιοχή του ακροατηρίου. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν σε κάθε περίπτωση για γεμάτη και για άδεια αίθουσα καθώς η απορρόφηση από το κοινό μεταβάλλει έντονα τις ακουστικές παραμέτρους και δεν είναι σπάνιο να πραγματοποιούνται εκδηλώσεις με σχετικά μικρό ή και καθόλου κοινό.

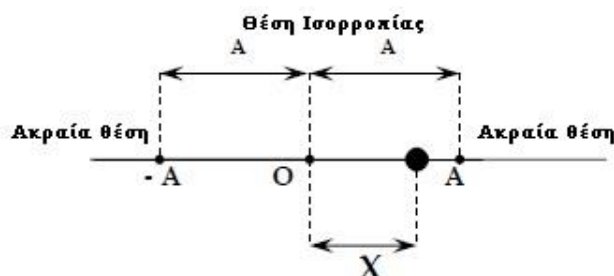
Βασικές έννοιες ήχου και ηχητικά κύματα

1.1 Ορισμός ήχου

Ο ήχος είναι μια μηχανική διαταραχή, η οποία διαδίδεται διά μέσου ενός στερεού (με κάποια σχετική ελαστικότητα), υγρού ή αέριου μέσου με τη μορφή κυμάτων και διεγείρει την ανθρώπινη ακοή [1][2] (Εικόνα 1). Ένα ηχητικό κύμα θα δημιουργηθεί σε ένα ταλαντευόμενο μέσο, με την ταλάντωση να συμβαίνει γύρω από μια θέση ισορροπίας (Εικόνα 2). Η κίνηση μεταδίδεται στα γειτονικά «μόρια» του μέσου και στη συνέχεια απλώνεται σε ολόκληρο το μέσο, προς όλες τις κατευθύνσεις, υπό τη μορφή κυμάτων. Έχουμε μια μεταφορά ενέργειας δίχως όμως και την μεταφορά της μάζας του ταλαντευόμενου μέσου.



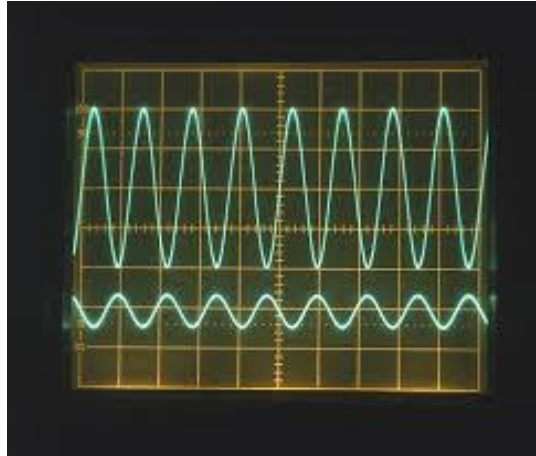
Εικόνα 1: Μηχανική διαταραχή των «μορίων» του αέρα από διαπασών. Η ταλάντωση που προκαλεί η δόνηση ενός διαπασών πλησιάζει αυτή της απλής αρμονικής ταλάντωσης [51].



Εικόνα 2: Απεικόνιση της μετατόπισης γύρω από μια σταθερή θέση ισορροπίας με ισόποσες τιμές πλάτους στις ακραίες θέσεις με διαφορετικό όμως πρόσημο [52].

1.2 Ανάλυση ήχου ως ημιτονοειδούς κυματομορφής, RMS και PEAK τιμές

Αναλύοντας έναν ήχο στην απλούστερη του μορφή (απλή αρμονική ταλάντωση, δηλ. ημιτονοειδής κυματομορφή) σε έναν παλμογράφο παρατηρούμε κάτι αντίστοιχο με την Εικόνα 3.



Εικόνα 3: Απεικόνιση δυο ημιτονοειδών κυματομορφών σε παλμογράφο, ίδιας συχνότητας, διαφορετικού πλάτους και φάσης [53].

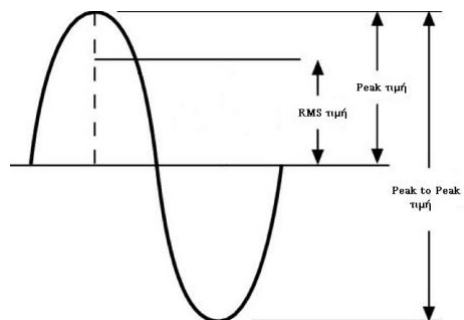
Καθώς η μέση τιμή πλάτους μιας ημιτονοειδούς συνάρτησης ισούται με το μηδέν, συνηθίζεται να χρησιμοποιούμε την ενεργό τιμή (root mean square – RMS) ή οποία για ημιτονοειδή συνάρτηση υπολογίζεται ως:

$$RMS = \frac{Peak}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot Peak, \quad (1)$$

όπου Peak η μέγιστη τιμή πλάτους της ημιτονοειδούς κυματομορφής. Γνωρίζοντας τη ενεργό τιμή ισχύει πως:

$$Peak = \sqrt{2} \cdot (RMS) = 1,414 \cdot RMS \quad (2)$$

Η Εικόνα 4 απεικονίζει τις τιμές RMS, Peak και Peak to peak.



Εικόνα 4: Αντιστοιχία τιμών RMS, Peak και Peak to Peak απλής ημιτονοειδούς κυματομορφής [54].

1.3 Κυματική εξίσωση

Τα μεγέθη που εκφράζουν το ηχητικό πεδίο μπορεί να μελετηθούν αναλύοντάς τον σε ημιτονοειδείς συνιστώσες, με τη θεώρηση πως τα φαινόμενα εμφανίζουν γραμμικότητα, πράγμα που όμως δεν ισχύει πάντα. Το βασικό χαρακτηριστικό του ήχου είναι η πίεση (p) (ακουστική πίεση). Η ταχύτητα των μεταβολών πίεσης που προκαλούν τα ηχητικά κύματα είναι τόσο γρήγορες ώστε δεν παρατηρούνται ανταλλαγές θερμότητας μεταξύ των γειτονικών στοιχείων όγκου, οπότε μπορούμε να θεωρήσουμε ότι έχουμε αδιαβατικές μεταβολές. Τα επίπεδα αρμονικά κύματα αποτελούν την απλούστερη μορφή κύματος, με τη διαταραχή πίεσης (ήχος) να διαδίδεται σε μία διάσταση και τις άλλες δυο να παραμένουν σταθερές. Η μονοδιάστατη κυματική εξίσωση γράφεται ως εξής:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}. \quad (3)$$

Η γενική λύση της παραπάνω εξίσωσης έχει τη μορφή:

$$p(x, t) = p_{01} e^{j(\omega t - kx)} + p_{02} e^{j(\omega t + kx)}, \quad (4)$$

όπου $p(t)$ η στιγμιαία πίεση του ηχητικού κύματος, p_{01} , p_{02} οι μέγιστες τιμές της ακουστικής πίεσης (πλάτος) στο μέσο διάδοσης, $\omega = 2\pi f$ η κυκλική συχνότητα, $k = 2\pi$ ο κυματάρθμος, x η απόσταση με το πρόσημο να υποδηλώνει την διεύθυνση διάδοσης.

Η παραπάνω σχέση αποδεικνύει πως ο ήχος διαδίδεται με τη μορφή κυμάτων και μάλιστα δυο κυμάτων που διαδίδονται σε αντίθετες κατευθύνσεις. Οποιαδήποτε παρατηρήσιμη ποσότητα είναι πάντα πραγματική. Το πραγματικό μέρος της παραπάνω εξίσωσης της παραπάνω λύσης (για το κύμα που διαδίδεται στην $+x$ κατεύθυνση) είναι:

$$p(x, t) = \text{Re}\{p_0 e^{j(\omega t - kx)}\} = p_0 \cos(\omega t - kx) \quad (5)$$

1.4 Ταχύτητα ήχου στον αέρα

Η ταχύτητα διάδοσης των ηχητικών κυμάτων στον αέρα, που συμβολίζεται με το λατινικό c , ουσιαστικά περιγράφει την ταχύτητα διάδοσης της προαναφερθείσας διαταραχής. Δεν πρέπει να συγχέεται με την σωματιδιακή ταχύτητα. Είναι ανεξάρτητη από το μήκος κύματος για διαφορετικές συχνότητες ηχητικών κυμάτων και εξαρτάται από την ακαμψία D και την πυκνότητα ρ του μέσου. Για την ταχύτητα του ήχου στον αέρα και έπειτα από τις εξής παραδοχές:

- μικρή επίδραση του βαρυτικού πεδίου
- θεώρηση αερίων ως ισότροπο ιδανικό, ομοιογενές και ελαστικό μέσο διάδοσης
- αμελητέο ιξώδες
- αδιαβατική ηχητική διαταραχή με μικρό εύρος

, καταλήγουμε στον εξής τύπο υπολογισμού της ταχύτητας του αέρα:

$$c = 331.5 + 0,6\theta, \quad (6)$$

, όπου θ η θερμοκρασία σε $^{\circ}\text{C}$ και $[c] = \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

1.5 Συχνότητα, μήκος κύματος και περίοδος

Ήχος λοιπόν είναι ένα κύμα που αναπτύσσεται χάρις στην κίνηση των «μορίων» ενός ελαστικού μέσου η οποία εμφανίζει μια περιοδικότητα, της οποίας η συχνότητα μετριέται σε Hz (περιοδικές επαναλήψεις ανά δευτερόλεπτο) και συμβολίζεται με το λατινικό f (από την αγγλική λέξη frequency).

Μήκος κύματος (συμβολίζεται με το ελληνικό λ) είναι η απόσταση που διανύει ένα ηχητικό κύμα στο χρόνο που απαιτείται για να συμπληρωθεί μια πλήρης περίοδος του, με μονάδα τα μέτρα (m). Όταν μιλάμε για μια περιοδική ημιτονοειδή κυματομορφή τότε μετριέται μεταξύ δυο διαδοχικών μεγίστων ή ελαχίστων του.

Η συχνότητα, το μήκος κύματος μια ημιτονοειδούς ταλάντωσης και η ταχύτητα του ήχου συνδέονται μέσω της παρακάτω σχέσης:

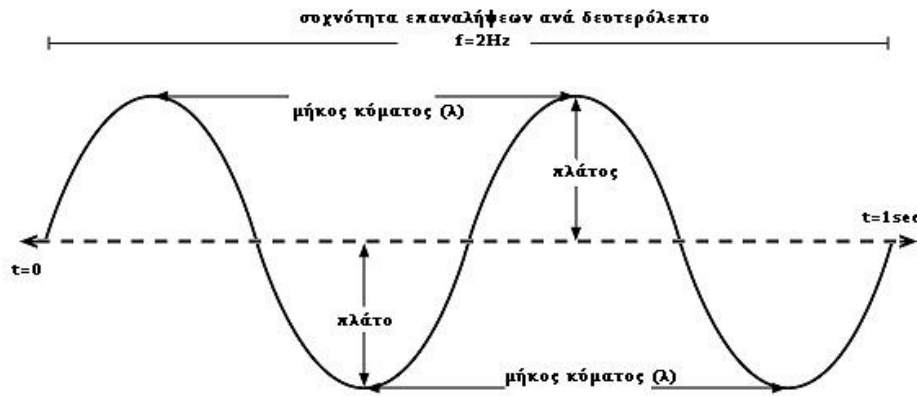
$$\text{Μήκος κύματος } \lambda \text{ (m)} = \frac{\text{ταχύτητα του ήχου } c \text{ (m/s)}}{\text{Συχνότητα } f \text{ (Hz)}}. \quad (7)$$

Η συχνότητα της ταλάντωσης δίδεται από τον τύπο:

$$f = \frac{1}{T}, \quad (8)$$

όπου T η περίοδος της ταλάντωσης, ισχύει δε ότι $\omega = 2\pi f$, οπότε για το μήκος κύματος ισχύει:

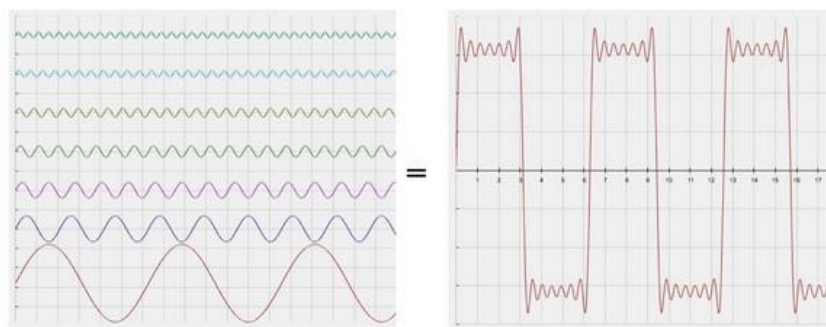
$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{2\pi c}{\omega} = c \cdot T. \quad (9)$$



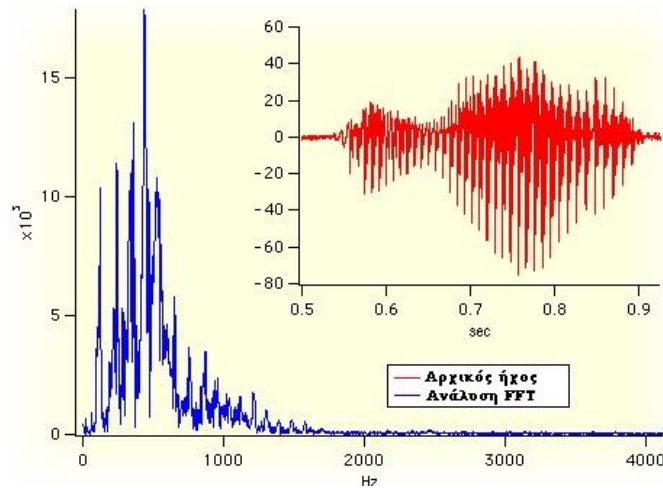
Εικόνα 5: Πλάτος, μήκος κύματος και συχνότητα ημιτονοειδούς κυματομορφής [55].

1.6 Μετασχηματισμός Fourier

Όλοι οι ήχοι ακόμη και μη περιοδικοί μπορούν να αναλυθούν σε άθροισμα επιμέρους συχνοτήτων (Εικόνες 6 & 7). Η μετάβαση από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων πραγματοποιείται μέσω του μετασχηματισμού Fourier. Μέσω αυτού δύναται να γίνει μια αποτύπωση όλων των συχνοτήτων, σε διαγράμματα πλάτους προς συχνότητα, οι οποίες απαρτίζουν τον τελικό ήχο. Οι σχέσεις μεταξύ αυτών των συχνοτήτων μπορούν να έχουν διαφορετικές κατανομές πλάτους για κάθε συχνότητα αλλά και διαφορετικές χρονικές σχέσεις μεταξύ τους που ονομάζονται διαφορές φάσης. Το ηχόχρωμα ενός μουσικού οργάνου για παράδειγμα εμφανίζει «αρμονικές σχέσεις» μεταξύ των συχνοτήτων (θεμελιώδης συχνότητα: f , και οι αρμονικές τις: $2f, 3f, 4f, 5f \dots nf$) σε αντίθεση με τις ακανόνιστες σχέσεις συχνοτήτων που εμφανίζουν άλλοι ήχοι όπως θόρυβοι και κρουστικοί ήχοι. Μέσω του μετασχηματισμού Fourier μπορεί να απεικονιστούν οι σχέσεις πλάτους των επιμέρους συχνοτικών συνιστωσών που απαρτίζουν οποιοδήποτε ηχητικό σήμα (Εικόνα 7).



Εικόνα 6: Δημιουργία περιοδικής κυματομορφής ως άθροισμα επιμέρους απλών αρμονικών κυματομορφών συγκεκριμένου πλάτους [56].



Εικόνα 7: Ανάλυση Fourier τυχαίου ηχητικού σήματος (με κόκκινο χρώμα). Απεικονίζονται οι συχνοτικές συνιστώσες που το απαρτίζουν καθώς και τα πλάτη αυτών (μπλε χρώμα) [57].

1.7 Οκτάβες και Τριτοκτάβες (1/3 οκτάβες)

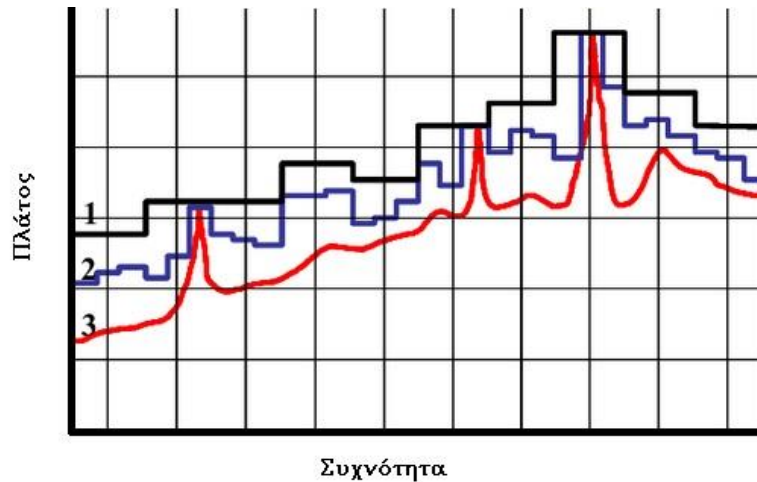
Για την καλύτερη και πιο "φιλική" προς την ανθρώπινη αντίληψη του ήχου, παρακολούθηση και ανάλυση των αποτελεσμάτων του μετασχηματισμού, χωρίζουμε το ακουστικό φάσμα σε ζώνες, χρησιμοποιώντας λογαριθμική κλίμακα. Το φάσμα που μας ενδιαφέρει είναι αυτό της ανθρώπινης ακοής που εκτείνεται από τα 20 Hz μέχρις τα 20 kHz.

$$n = \log_2 \left(\frac{f_2}{f_1} \right), \quad (10)$$

όπου n είναι ο συντελεστής που δείχνει το εύρος της ζώνης, \log_2 είναι ο λογάριθμος με βάση το 2, f_1 η συχνότητα που υποδηλώνει το κάτω όριο της ζώνης και f_2 συχνότητα που υποδηλώνει το πάνω όριο της ζώνης. Κάθε ζώνη έχει μια κεντρική συχνότητα (f_0) η οποία είναι ο γεωμετρικός μέσος της ζώνης.

Συνηθίζεται να μελετάμε τις αναλύσεις του μετασχηματισμού Fourier στις εξής ζώνες (Εικόνα 8):

- ζώνες οκτάβας, όπου $n = 1$ και $f_2 = 2 * f_1$
- ζώνες «τριτοκτάβας» (1/3 οκτάβας) όπου $n = 1/3$ και $f_2 = 1,26 * f_1$



Εικόνα 8: Απεικόνιση διαφορετικών αναλύσεων του ίδιου σήματος. 1 (μαύρο) ανάλυση ανά ζώνη οκτάβας, 2 (μπλε) ανάλυση 1/3 οκτάβας, 3 (κόκκινο) ανάλυση Fourier [58].

1.8 Ηχητική Ένταση

Η ηχητική ένταση (I) για δεδομένη στιγμή και δεδομένο σημείο ισούται με τη πυκνότητα της ισχύος προς μια επιφάνεια γύρω από το συγκεκριμένο σημείο και κάθετο ως προς το διάνυσμα της ταχύτητας των σωματιδίων στο σημείο αυτό. Πρόκειται ουσιαστικά για το λόγο ισχύς προς εμβαδό. Είναι ένα διανυσματικό μέγεθος και αποτελεί ένα μέτρο του ρυθμού μετάδοσης της ισχύος σε ένα μέσον, μέσω ενός κύματος δια μιας επιφάνειας κάθετης προς το διάνυσμα της έντασης. Μονάδα μέτρησης είναι το W/m^2 και χρησιμοποιείται ο λόγος $\frac{I}{I_0}$, όπου $I_0 = 10^{-12} W/m^2$ που είναι το κατώφλι της ελάχιστης αντιληπτής έντασης η οποία μπορεί να προκαλέσει ακουστικό ερέθισμα. Για τη μέτρηση της ηχητικής έντασης χρησιμοποιούμε τη σχέση:

$$L_{SIL} = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right), \quad (11)$$

με μονάδα το decibel (dB_{SIL}) (*Sound Intensity Level*).

1.9 Ηχητική ισχύς

Όπως προαναφέρθηκε, η διάδοση ηχητικών κυμάτων συνεπάγεται μεταφοράς ισχύος της οποίας η πυκνότητα της ροής εκφράζεται από την ένταση. Προσοχή καθώς η ηχητική ισχύς μιας πηγής (W) δεν εκπέμπει πάντα σφαιρικά και ομοιόμορφα, λόγω κατευθυντικότητας σε πολλές περιπτώσεις. Εάν η πηγή

εκπέμπει ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις η ηχητική ισχύς δίδεται από τη σχέση:

$$W = 4\pi r^2 I, \quad (12)$$

όπου r η απόσταση από τη πηγή και μονάδα μέτρησης το W . Για τον υπολογισμό σε decibel (dB), αντίστοιχα με την ένταση, χρησιμοποιείται ο λόγος $\frac{W}{W_0}$, όπου W_0 η ισχύς αναφοράς που σχετίζεται με την αντίστοιχη της έντασης I_0 και ισούται με $W_0 = 10^{-12}$ W. Δίδεται από τον τύπο:

$$L_w = 10 \log_{10} \left(\frac{W}{W_0} \right). \quad (13)$$

1.10 Ηχητική πίεση

Από τις σχέσεις έντασης και ισχύος προκύπτει η σχέση:

$$L_p = 20 \log_{10} \left(\frac{p_1}{p_0} \right), \quad (14)$$

όπου p_0 η πίεση αναφοράς που ισούται με $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ N/m² = 20 μPa με μονάδα το decibel (dB_{SPL}) (*Sound Pressure Level*).

1.11 Πρόσθεση στάθμεων

Πολύ συχνά στις μελέτες μας χρειάζεται να αθροίσουμε στάθμες, είτε για να υπολογίζουμε τη συνολική στάθμη γνωρίζοντας τη στάθμη ανά φασματική περιοχή, είτε για να υπολογίσουμε τη συνολική γνωρίζοντας τη στάθμη από διαφορετικές πηγές ή από την ίδια πηγή και των ανακλάσεων της. Ο τύπος που χρησιμοποιείται για την πρόσθεση στάθμεων είναι ο εξής:

$$L_{ολικό} = 10 \log_{10} \left(\sum_i 10^{L_i/10} \right). \quad (15)$$

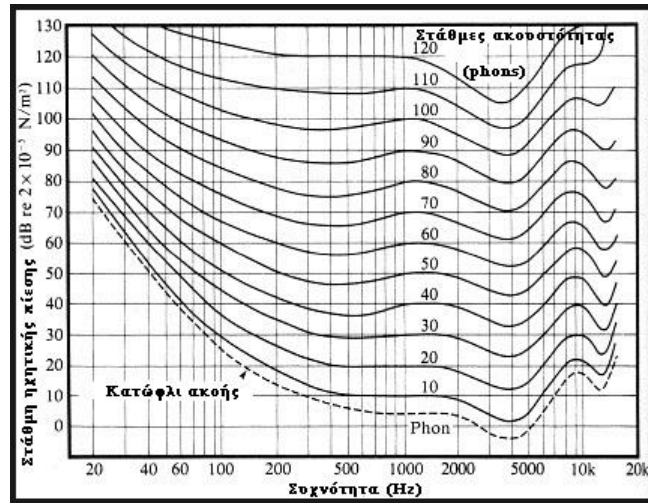
Ψυχοακουστική και ανθρώπινη αντίληψη

2.1 Γενικά περί ψυχοακουστικής

Σημαντικό ρόλο σε μια μελέτη ακουστικής, αλλά και οποιουδήποτε τομέα σχετίζεται με τις επιστήμες του ήχου, παίζει η ψυχοακουστική, που ασχολείται με το πως αντιλαμβάνεται τον ήχο ο ανθρώπινος εγκέφαλος, με δεδομένο και τον τρόπο που λειτουργούν τα όργανα ακοής μας (ώτα, αυτιά). Η ακοή μας εμφανίζει περισσότερη ευαισθησία σε ορισμένες συχνότητες σε σχέση με άλλες και πολλές φορές ο εγκέφαλός μας μπορεί να εστιάζει σε ήχους οι οποίοι είναι στη πραγματικότητα χαμηλότερης στάθμης από άλλους. Οι μηχανισμοί αυτοί εμφανίζουν μια έντονη μη-γραμμικότητα και μετριοούνται κατά βάση μέσω πειραματικών διαδικασιών σε πολλά υποκείμενα (ανθρώπους/ακροατές), καταλήγοντας σε μέσους όρους και γενικούς κανόνες που αφορούν την πλειοψηφία των ανθρώπων δίχως να αποκλείονται πάντα υποπεριπτώσεις, καθώς ο κάθε άνθρωπος αποτελεί ένα ξεχωριστό όν.

2.2 Καμπύλες ίσης ακουστότητας Fletcher Munson

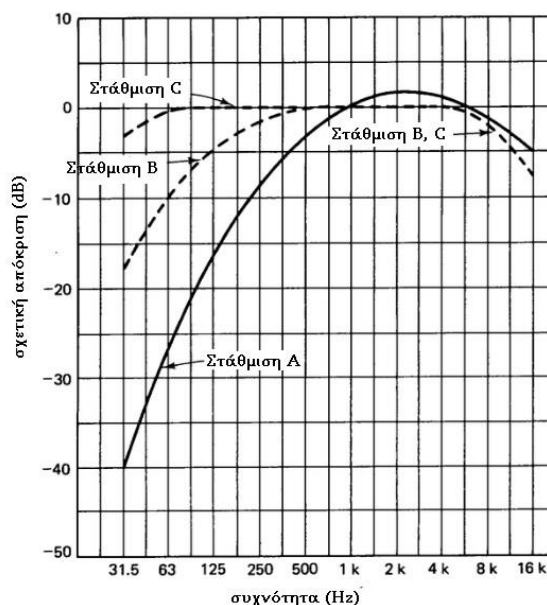
Οι καμπύλες ίσης ακουστότητας (Εικόνα 9), που δημιουργήθηκαν από τους Fletcher και Munson και στη συνέχεια αναθεωρήθηκαν από πληθώρα άλλων ερευνητών, παρουσιάζουν με τον καλύτερο τρόπο την ανθρώπινη αντίληψη της έντασης συναρτήσει της συχνότητας. Παρατηρούμε τις συχνοτικές περιοχές στις οποίες η ανθρώπινη ακοή εμφανίζει ευαισθησία και αυτές στις οποίες απαιτούνται μεγαλύτερες στάθμες έτσι ώστε το ακουστικό ερέθισμα να ισούται με αυτό των πιο ευαίσθητων περιοχών. Η χρήση αυτών των καμπυλών είναι πολύ συχνή σε διάφορων τύπων μετρήσεις, με επαγγελματικά μετρητικά ηχόμετρα, με στόχο την καλύτερη αναγωγή των αποτελεσμάτων τους στον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί η ανθρώπινη ακοή.



Εικόνα 9: Καμπύλες ίσης ακουστότητας Fletcher Munson [59].

2.3 Φίλτρα σταθμισμένων υπολογισμών

Με βάση τις καμπύλες Fletcher και Munson έχουν οριστεί τυποποιημένα φίλτρα που εξασθενούν τον θόρυβο στις διάφορες συχνότητες ανάλογα με την ευαισθησία του ανθρώπινου αυτιού, τα φίλτρα αυτά λέγονται φίλτρα βάρους A, ή συναρτήσεις βάρους A, ή άπλα φίλτρα A (Εικόνα 10) και χρησιμοποιούνται για να ανάγουν τα αποτελέσματα μετρήσεων ηχητικής στάθμης σε τιμές που προσομοιάζουν καλύτερα το πως ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται τον ήχο. Επίσης, υπάρχουν και άλλες επιλογές φασματικής στάθμησης, όπως τα φίλτρα B, C, D, ενώ ως φίλτρο βάρους Z νοείται η ισότιμη αντιμετώπιση σε όλες τις φασματικές ζώνες (βάρος 0 dB σε όλες τις συχνότητες).



Εικόνα 10: Συναρτήσεις βάρους των φίλτρων A, B και C [60].

2.4 Νόμος του πρώτου μετώπου κύματος

Η ακουστική αντίληψη της προέλευσης του ήχου εξαρτάται από την κατεύθυνση του απευθείας ήχου (του ήχου που φτάνει πρώτος στα αυτιά μας). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται νόμος του πρώτου μετώπου κύματος. Οι πρώιμες ανακλάσεις (early reflections) που καταφθάνουν στη συνέχεια μας δίνουν πληροφορίες σχετικά με την ακουστική του χώρου.

2.5 Φαινόμενο Haas

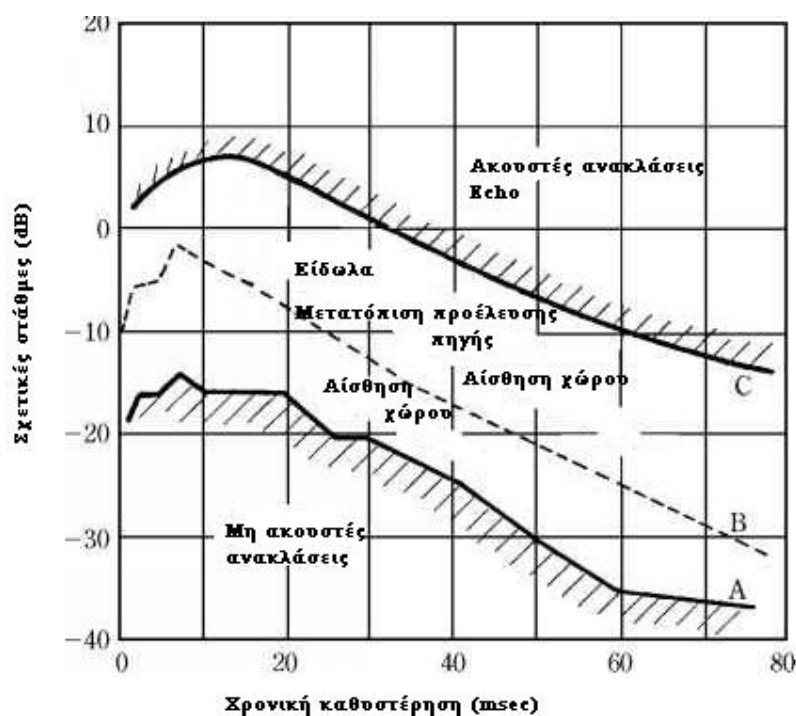
Σύμφωνα με το φαινόμενο Haas, αντίγραφα ενός ήχου που καταφθάνουν στα αυτιά μας με τιμές καθυστέρησης λιγότερο από περίπου 35 ms [1], αν και σε πολλές πηγές αναφέρονται συντομότεροι χρόνοι όπως τα 30 ms [2] και με πλάτη μικρότερα ή ίσα του αρχικού, δε γίνονται αντιληπτά ως ξεχωριστοί ήχοι αλλά ως συνέχεια του αρχικού, προσδίδοντας μια "αίσθηση χώρου" ή [2] "μια ευχάριστη τροποποίηση της εντύπωσης του ήχου με την έννοια ότι πλαταίνουν την πηγή του πρωτεύοντα ήχου ενώ η πηγή της ηχούς (επανάληψη λόγω ανάκλασης) δεν γίνεται αντιληπτή από ακουστικής πλευράς". Το φαινόμενο είναι έντονο και κυριαρχεί για χρονικές καθυστερήσεις μικρότερες των 30 ms~35 ms . Για κρουστικούς ήχους το όριο αυτό κατεβαίνει περίπου στα 25 ms ενώ για μακρόσυρτους ανεβαίνει [1]. Τα αντίγραφα αυτά συνήθως είναι ανακλάσεις που φθάνουν στα αυτιά μας με κάποια καθυστέρηση και προκαλούν τη δημιουργία φαινομένων φίλτρου χτένας (comb filtering) (Εικόνα 12). Ακόμη και εντός του χρονικού ορίου των 35 ms, σε περίπτωση που ο καθυστερημένος ήχος είναι κατά 10 dB υψηλότερης στάθμης από τον αρχικό μπορεί να ακουστεί ως ξεχωριστή επανάληψη (ηχώ). Για μεγαλύτερες χρονικές καθυστερήσεις μέχρι και 80 ms~100 ms ξεκινά μια διακριτότητα των ήχων (αντίληψη διακριτών επαναλήψεων), που δύναται όμως να αντιλαμβανόμαστε ως ηχώ ή ως "τραχύτητα" ή "σκληράδα" που εξαρτάται από το συχνοτικό περιεχόμενο τους, την περιβάλλουσα πλάτους τους (σύντομος ή μακρόσυρτος ήχος) και τα επίπεδα στάθμης τους σε σχέση με το αρχικό.

Όπως προαναφέρθηκε, τα χρονικά όρια του φαινομένου μπορεί να ποικίλουν ελαφρώς. Αυτό οφείλεται στη δυσκολία μέτρησης του ψυχοακουστικού φαινομένου αυτού καθώς απαιτούνται πολλές πειραματικές μετρήσεις σε διαφορετικά ανθρώπινα υποκείμενα.

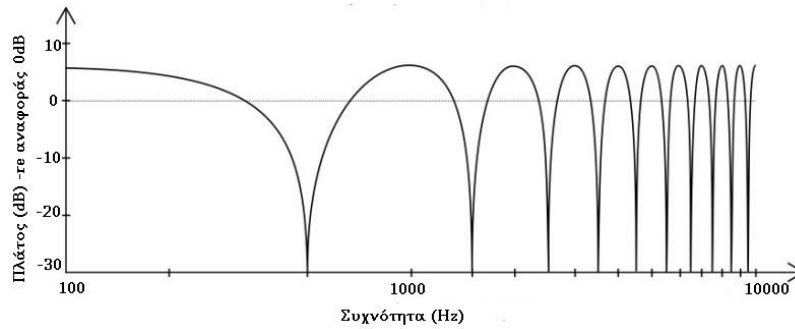
Το παραπάνω φαινόμενο, γνωστό και ως φαινόμενο προτεραιότητας, μας απασχολεί ιδιαίτερα σε μια ακουστική μελέτη στο σχεδιασμό των ανακλάσεων

όπως θα δούμε παρακάτω. Γενικά, αν ο καθυστερημένος ήχος φτάσει μέχρι και 5 ms μετά τον αρχικό είναι πολύ πιθανό (εξαρτάται από τη σχετική στάθμη) να οδηγήσει σε μετατόπιση της εικόνας της πηγής, αν φτάσει μετά από 35 ms πολύ πιθανά εκλαμβάνεται ως ηχώ, αν ο αρχικός ήχος προηγείται κατά 10 – 20 ms ο καθυστερημένος πολύ πιθανά εκλαμβάνεται ως ενίσχυση του αρχικού και όχι ως διακριτή πηγή.

Έχει μελετηθεί [2] πως ανακλάσεις συγκεκριμένης στάθμης, παρότι καθυστερημένες μπορούν να προσδώσουν είτε μια αίσθηση "ευρυχωρίας" στον απευθείας ήχο είτε να ακουστούν ως ξεχωριστά είδωλα του (Εικόνα 11). Οι παράγοντες που καθορίζουν τί είδους φαινόμενο θα προκαλέσει μια τέτοια ανάκλαση είναι η κατεύθυνση της, η τιμή καθυστέρησης και η στάθμη της. Ανακλάσεις κάτω από το κατώφλι ακουστότητας των ανακλάσεων δεν γίνονται αντιληπτές ως ξεχωριστοί ήχοι, όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα της ψυχοακουστικής.



Εικόνα 11: Κατώφλι ακουστότητας διακριτών ανακλάσεων σε σχέση με την στάθμη τους ως προς τον αρχικό ήχο [2].



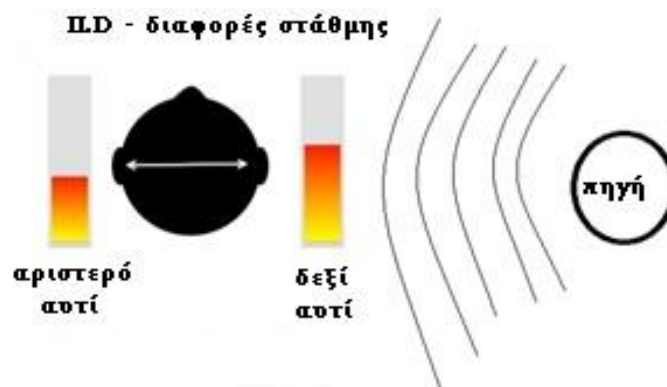
Εικόνα 12: Παράδειγμα φίλτρου χτένας για σήμα αναφοράς 0 dB με σταθερή ενέργεια σε όλο το συχνοτικό φάσμα [61].

2.6 Αμφιωτική ακοή, εντοπισμός της θέσης της πηγής

Το σύστημα της ακοής μας πραγματοποιεί συγκρίσεις των ήχων που φτάνουν και στα δυο μας αυτιά, δημιουργώντας όμως ένα μοναδικό και ενιαίο τελικό ακουστικό αίσθημα που αναφέρεται ως αμφιωτική ακοή. Οι δυο βασικές παράμετροι τις οποίες συγκρίνει ο εγκέφαλος μας είναι οι διαφορές στάθμης και οι χρονικές διαφορές (διαφορά φάσης) των δυο ήχων που φτάνουν αντίστοιχα στα δυο αυτιά, οι οποίες τελικά του επιτρέπουν τον εντοπισμό της θέσης της πηγής.

2.6.1 Διαφορές στάθμης (Interaural Level Difference), ILD

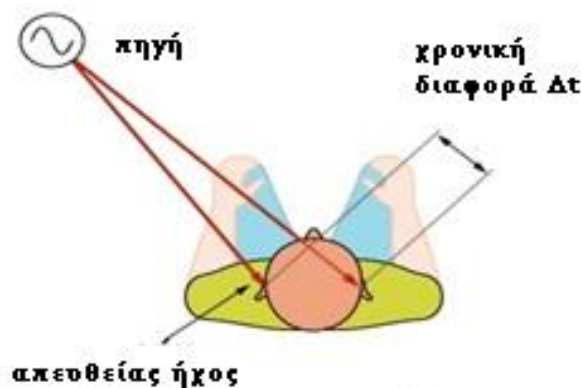
Σύγκριση των ήχων που φτάνουν στα δυο μας αυτιά ως προς τη μεταξύ τους στάθμη. Κυρίαρχο ρόλο στον εντοπισμό της θέσης της πηγής παίζει ο ισχυρότερος ήχος (Εικόνες 13, 16).



Εικόνα 13: Διαφορές στάθμης [6].

2.6.2 Χρονικές διαφορές (Interaural Time Difference), ITD

Σύγκριση των ήχων που φτάνουν στα δυο αυτιά μας, ως προς το χρόνο άφιξης. Ακόμη και ελάχιστες χρονικές διαφορές φάσης παίζουν καθοριστικό ρόλο. Κυρίαρχο ρόλο στον εντοπισμό της θέσης της πηγής παίζει ο ήχος που καταφθάνει πρώτος (Εικόνες 14, 16).



Εικόνα 14: Χρονικές διαφορές [8].

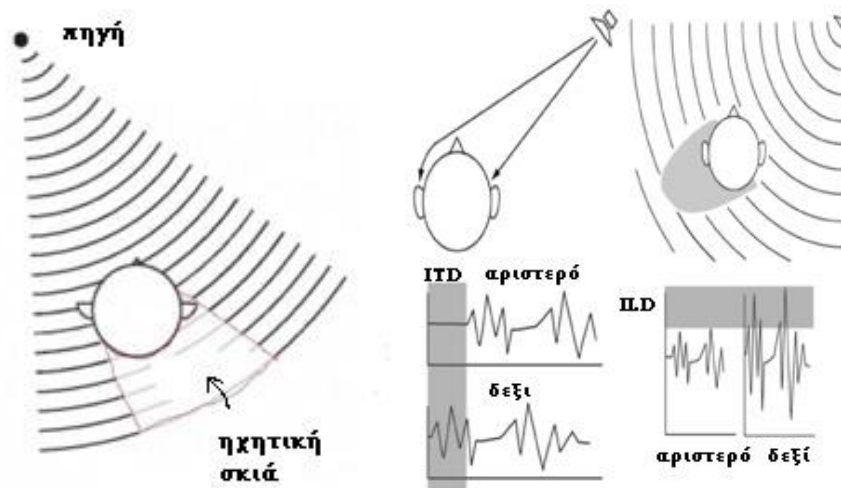
2.6.3 Ο ρόλος του κεφαλιού στην αντίληψη προέλευσης του ήχου

Το σημαντικότερο εμπόδιο στην ταυτόχρονη άφιξη ενός ηχητικού κύματος και στα δυο αυτιά μας είναι το ίδιο μας το κεφάλι. Ανάλογα με τη γωνία άφιξης του ήχου ως προς το κεφάλι (0 μοίρες ή on axis θεωρούμε πάντα την ευθεία μπροστά μας όπως κοιτάμε), στην αντίθετη πλευρά δημιουργείται μια ηχητική σκιά (Εικόνες 15, 16).

Όλοι οι μηχανισμοί της ακοής είναι άμεσα εξαρτώμενοι από τη συχνότητα. Η επίδραση του κεφαλιού στη διάδοση του ήχου μεταξύ των αυτιών μας εξαρτάται άμεσα από το μήκος κύματος. Η απόσταση μεταξύ των τυμπάνων των αυτιών είναι περίπου 17~20 cm. Για ταχύτητα ήχου 340 m/s, η συχνότητα που έχει μήκος κύματος 0,20 m είναι τα 1700 Hz.

Σε γενικές γραμμές ισχύει πως:

- Όσο μεγαλώνει η συχνότητα τόσο περισσότερο λειτουργούν οι διαφορές σε ένταση, *ILD*.
- Όσο πιο χαμηλές συχνότητες λειτουργούν περισσότερο οι χρονικές (φασικές) διαφορές, *ITD*.
- Το φαινόμενο της ηχητικής σκιάς ξεκινά από τα 500 Hz περίπου και κορυφώνεται από τα 2 kHz και πάνω.



Εικόνα 15 (αριστερά): Ηχητική σκιά στο πίσω μέρος του κεφαλιού [9].

Εικόνα 16 (δεξιά): Παράδειγμα που απεικονίζει ITD, ILD και ηχητική σκιά [9].

Έχουν εισαχθεί ορισμένοι δείκτες οι οποίοι μετρούνται σε συγκεκριμένο χώρο με τη χρήση δωδεκάεδρης (παγκατευθυντικής) πηγής και δύο μικροφώνων τοποθετημένων στη θέση των αυτιών ενός ακροατή ή μιας ανδρικής κεφαλής-κορμού που συγκρίνουν τον απευθείας ήχο, τις πρώιμες και τις καθυστερημένες ανακλάσεις σε κάθε αυτί. Έπειτα από επεξεργασία εξάγουν τιμές που αποτυπώνουν τα ακουστικά χαρακτηριστικά του χώρου. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται για πολλές θέσεις της πηγής και πολλές διαφορετικές θέσεις ακρόασης. Βασικές εξ' αυτών είναι ο δείκτης διωτικής ακρόασης (Interaural correlation coefficient ή *IACC*) και ο δείκτης πλευρικών ανακλάσεων (Lateral Energy Fraction ή *LEF* ή *LF*) [1], τους οποίους θα αναλύσουμε παρακάτω.

Ο τομέας γύρω από την αντίληψη της προέλευσης του ήχου από τον άνθρωπο μελετάται ακόμη στις μέρες μας και προκύπτουν νέες μέθοδοι μέτρησης της [7].

Διάδοση του ήχου και ακουστικά φαινόμενα

3.1 Διάδοση του ήχου

Στην ενότητα αυτή εξετάζονται οι βασικές αρχές διάδοσης του ήχου σε ανοιχτό και κλειστό χώρο.

3.1.1 Σημειακή πηγή σε ελεύθερο πεδίο

Μια πηγή αντιμετωπίζεται ως σημειακή όταν το σημείο μέτρησης απέχει πολύ περισσότερο (10 φορές) από τη μεγαλύτερη διάσταση της πηγής, αλλά και ως προς το μήκος κύματος τις χαμηλότερης συχνότητας που εξετάζουμε. Από μια τέτοια πηγή τα ηχητικά κύματα διαδίδονται σφαιρικά προς όλες τις κατευθύνσεις. Σημειακές πηγές μπορούμε να θεωρήσουμε ηχεία και ομιλητές αλλά όχι για πολύ κοντινά σημεία ή για τις μέσες / υψηλές συχνότητες όταν η πηγή παρουσιάζει κατευθυντικότητα.

Στον ελεύθερο χώρο, δηλαδή σε χώρο στον οποίο δεν παρεμβάλλονται εμπόδια και δεν έχουμε συμβολή από άλλα κύματα όπως ανακλάσεις, η στάθμη ηχητικής πίεσης πηγής σφαιρικής συμμετρίας (χωρίς κατευθυντικότητα) στο σημείο μέτρησης θα δίδεται από τον τύπο:

$$L_p \approx L_w - 20 \log_{10} r - 11 \text{ (dB)}, \quad (16)$$

όπου όπως είπαμε L_w η στάθμη (ηχητικής) ισχύος της πηγής και r η απόσταση από τη πηγή.

Στη πράξη όμως, όπως προαναφέρθηκε, οι περισσότερες πηγές δεν εκπέμπουν ήχο ομοιόμορφα προς κάθε κατεύθυνση. Τα ηχεία για παράδειγμα εμφανίζουν υψηλή (στενή) κατευθυντικότητα ειδικά όσο ανεβαίνουμε σε συχνότητα. Επίσης, μπορεί η τοποθέτηση της πηγής να δημιουργεί κατευθυντικότητα, π.χ. μια σημειακή πηγή που τοποθετείται επί ανακλαστικής επιφάνειας αναγκάζεται να εκπέμπει μόνο στο μισό του χώρου, ενώ αν τοποθετηθεί επί της ακμής δυο κάθετων ανακλαστικών επιφανειών αναγκάζεται να εκπέμπει μόνο στο 1/4 του χώρου. Στην πράξη αυτό σημαίνει αλλαγή του εμβαδού της επιφάνειας εκπομπής η οποία από $S = 4\pi r^2$ μετατρέπεται σε $S = 2\pi r^2$ και $S = \pi r^2$ αντίστοιχα.

Για το λόγο αυτό, στον παραπάνω τύπο προστίθεται ο παράγοντας κατευθυντικότητας της πηγής Q (Directivity), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος κατευθυντικότητας της εκπομπή ηχητικής έντασης μιας πηγής προς μια συγκεκριμένη διεύθυνση και συγκεκριμένη απόσταση, ως προς την μέση εκπομπή προς όλες τις διευθύνσεις, στην ίδια απόσταση. Από αυτόν τον λόγο προκύπτει ο δείκτης κατευθυντικότητας DI (Directivity Index) που ισούται με:

$$DI = 10 \log_{10} Q. \quad (17)$$

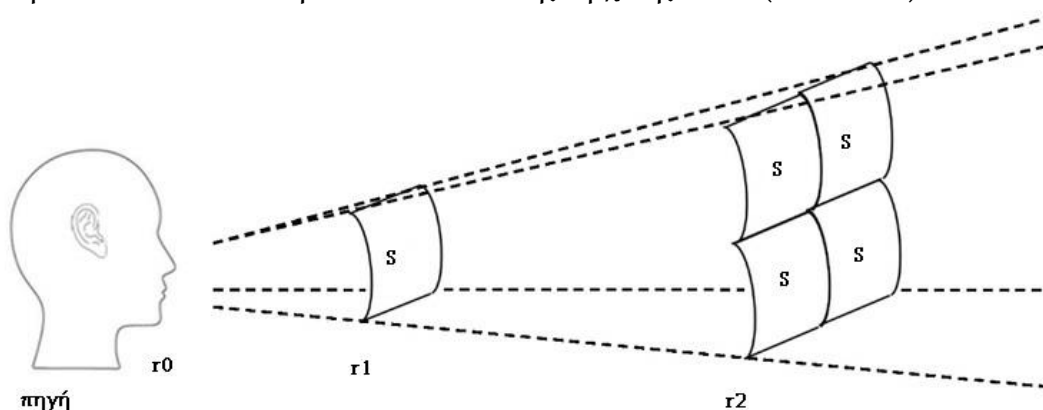
Εμπερικλείοντας την κατευθυντικότητα, ο υπολογισμός της στάθμης ηχητικής πίεσης σε ένα σημείο του χώρου προκύπτει από τον τύπο:

$$L_p \approx L_w - 20 \log_{10} r - 11 + DI \text{ (dB)}. \quad (18)$$

Έτσι, π.χ. αν η πηγή αναγκαστεί να εκπέμπει μόνο στο μισό του χώρου ή στο 1/4 του χώρου τότε ο σταθερός όρος από -11 dB γίνεται -8 dB ($= -11 \text{ dB} + 10 \log_{10} 2$) και -5 dB ($= -11 \text{ dB} + 10 \log_{10} 4$), αντίστοιχα.

3.1.2 Ο νόμος του αντιστρόφου τετραγώνου

Σε ελεύθερο πεδίο (π.χ. στον αέρα που γενικά θεωρείται ισότροπο μέσο) ο ήχος ελαττώνεται ομοιόμορφα καθώς απομακρύνεται από παγκατευθυντική πηγή. Ισχύει ότι η ένταση του ήχου σε ελεύθερο πεδίο είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το τετράγωνο της απόστασης (r) από τη πηγή. Πράγμα που σημαίνει πως για διπλάσια απόσταση, η στάθμη ελαττώνεται στο ένα τέταρτο της αρχικής, για σε τριπλάσια απόσταση στο ένα ένατο της αρχικής κ.ο.κ (Εικόνα 17).



Εικόνα 17: Κατανομή της ίδιας έντασης ήχου σε τετραπλάσια επιφάνεια ανά διπλασιασμό της απόστασης [62].

3.1.3 Σημειακή πηγή σε κλειστό χώρο και σταθερά δωματίου R

Σε κλειστό χώρο έχουμε την προσθήκη επιπλέον ηχητικής πίεσης να καταφθάνει στο σημείο μέτρησης, προερχόμενη από τις ανακλάσεις του αρχικού ήχου στις διάφορες επιφάνειες του χώρου. Οι επιφάνειες αυτές χαρακτηρίζονται από ένα συντελεστή απορρόφησης (α) του ήχου, που ποικίλλει ανά συχνότητα και λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό της τελικής στάθμης ηχητικής πίεσης. Η συνεισφορά των ανακλάσεων στην τελική στάθμη είναι αισθητή και εξαρτάται από τις διαστάσεις του χώρου, των υλικών που τον απαρτίζουν και τη θέση μέτρησης σε σχέση με την πηγή.

Ο τύπος υπολογισμού της στάθμης ηχητικής πίεσης σε κλειστό χώρο δίδεται από την εξίσωση Hopkins-Stryker:

$$L_p \approx L_w + 10 \log_{10}[Q/(4\pi r^2) + 4/R], \quad (19)$$

όπου και εδώ r είναι η απόσταση από τη πηγή, Q ο παράγοντας κατευθυντικότητας της πηγής, ενώ R είναι τη σταθερά δωματίου που ορίζεται ως:

$$R = \frac{S\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}, \quad (20)$$

με S είναι το συνολικό εμβαδό του χώρου, και $\bar{\alpha}$ το μέσο συντελεστής απορρόφησης του δωματίου.

Το ποσοστό της ενέργειας που ανακλάται από τις επιφάνειες εκφράζεται από τη σχέση $1 - \bar{\alpha}$.

Υπάρχουν και άλλου τύπου πηγές όπως οι γραμμικές με τις οποίες μελετάμε μεγάλες πηγές ήχου όπως ένας αυτοκινητόδρομος αλλά και μεγάλες συστοιχίες ηχείων line array. Στη παρούσα εργασία δεν θα γίνει αναφορά σε τέτοιου είδους πηγές.

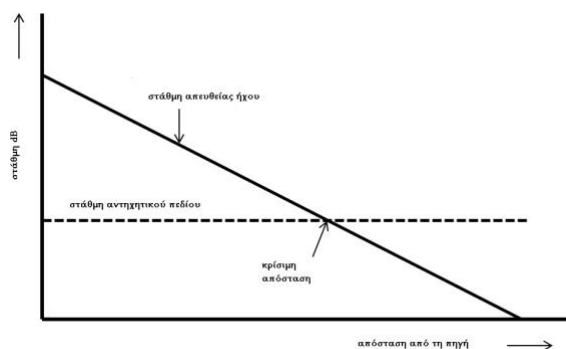
3.1.4 Κρίσιμη απόσταση, D_c

Κρίσιμη απόσταση ονομάζουμε την απόσταση από την πηγή στην οποία η στάθμη ηχητικής πίεσης από τη πηγή (απευθείας ήχος) ισούται με τη στάθμη ηχητικής πίεσης του αντηχητικού (ή διάχυτου) πεδίου (Εικόνα 18). Αποτελεί μια ακουστική παράμετρο που προσφέρει μια χονδρική μονοδιάστατη περιγραφή της ακουστικής ενός χώρου [2]. Γίνεται κατανοητό πως όσο μεγαλύτερη είναι η κρίσιμη απόσταση, τόσο μικρότερη η συνεισφορά του αντηχητικού πεδίου και το αντίστροφο. Η κρίσιμη απόσταση υπολογίζεται από τον την εξίσωση Hopkins-

Stryker (Εξίσωση (21)), εξισώνοντας τους δυο όρους που αποτελούν το όρισμα του λογαρίθμου και λύνοντας ως προς την απόσταση:

$$D_c = \sqrt{\frac{QR}{16\pi}}, \quad (22)$$

όπου R η σταθερά δωματίου και Q ο παράγοντας κατευθυντικότητας της πηγής.



Εικόνα 18: Κρίσιμη απόσταση, το όριο μεταξύ κυριαρχίας απευθείας ήχου ως προς τη στάθμη του αντηχητικού πεδίου [63].

3.1.5 Στάσιμα κύματα

Όλοι οι χώροι εμφανίζουν σημεία στο χώρο τα οποία η ηχητική πίεση παρουσιάζει μέγιστη στάθμη (κοιλίες) καθώς και άλλα που δύναται να εξαφανιστεί εντελώς (δεσμοί), λόγω στάσιμων κυμάτων. Αυτό κυρίως προκύπτει αν ο ήχος ανακλάται μεταξύ παράλληλων επιφανειών του χώρου χωρίς σοβαρές απώλειες λόγω απορρόφησης. Στα όρια των τοίχων αναμένουμε κοιλίες και μηδενική ταχύτητα. Για ορθογώνιους παραλληλεπίπεδους (“shoebox”) χώρους με διαστάσεις w, d, h (πλάτος, μήκος και ύψος αντίστοιχα), από τον τύπο της κυματικής εξίσωσης προκύπτει πως οι ιδιοσυχνότητες στις οποίες αναμένουμε τέτοιου είδους φαινόμενα δίδονται από τον τύπο:

$$f_{i,k,l} = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{i}{w} + \frac{k}{d} + \frac{l}{h}}, \quad (23)$$

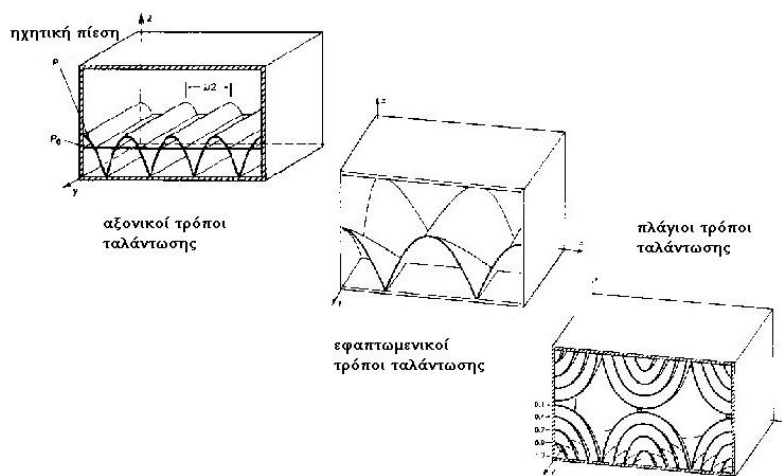
όπου $i, k, l = 0, 1, 2, 3, \dots$

Κατά τον ακουστικό σχεδιασμό ενός υπάρχοντος χώρου, η γνώση αυτών των ιδιοσυχνοτήτων των στάσιμων κυμάτων, είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς μπορούν να προκαλέσουν ανομοιόμορφη κατανομή της ηχητικής πίεσης σε διαφορετικά σημεία εντός του, ειδικά στις χαμηλές συχνότητες όπου το φαινόμενο είναι εντονότερο, παραμορφώνοντας τη χροιά του ήχου και δημιουργώντας

αίσθηση "βόμβου", που συχνά επικαλύπτει τις μεσαίες και υψηλές συχνότητες. Οι τρεις βασικοί τύποι στάσιμων κυμάτων είναι οι εξής (Εικόνα 19):

- **Αξονικοί**, που προκαλούνται από 1 εκ των 3 συντελεστών i, k, l διάφορο του μηδενός. Δημιουργούνται μεταξύ παράλληλων επιφανειών, σε 2 τοίχους, που είναι κάθετοι προς τον αντίστοιχο άξονα.
- **Εφαπτομενικοί**, που αντιστοιχούν σε 2 εκ των 3 συντελεστών i, k, l διάφορους του μηδενός, με ανάκλαση μεταξύ 4 τοίχων.
- **Πλάγιοι**, σε συνδυασμούς που είναι όλοι οι συντελεστές διάφοροι του μηδενός, με ανάκλαση μεταξύ και των 6 τοίχων.

Κάθε αξονικός τρόπος ταλάντωσης εξασθενεί με τη δική του ταχύτητα που διαμορφώνεται από την απορρόφηση (α) και την απόσταση μεταξύ των τοίχων στους οποίους εμφανίζεται. Οι εφαπτομενικοί και πλάγιοι τρόποι ταλάντωσης εξασθενούν με ταχύτητα που διαμορφώνεται από τις διαδρομές, το πλήθος των επιφανειών και τη μεταβολή του συντελεστή απορρόφησης (α) των επιφανειών ως προς τη γωνία πρόσπτωσης σε αυτές. Η εξασθένιση των κανονικών τρόπων ταλάντωσης διαμορφώνει σε σημαντικό βαθμό το αντηχητικό πεδίο του χώρου [2].



Εικόνα 19: Απεικόνιση των τριών τρόπων ταλάντωσης σε ορθογώνιο δωμάτιο [64].

3.1.6 Συχνότητα αποκοπής κλειστού χώρου

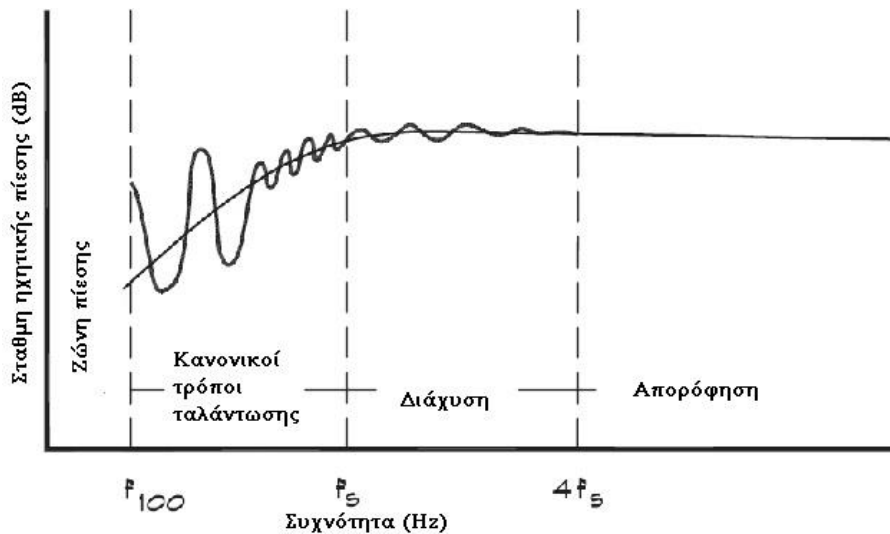
Η συχνότητα αποκοπής ή συχνότητα Schroeder ενός χώρου μας επιτρέπει να υπολογίσουμε την συχνότητα κάτω από την οποία η δημιουργία τέτοιων κυμάτων θα εμφανίζει ισχυρή παρουσία (Εικόνα 20). Δίδεται από τον τύπο:

$$f_c = 2000 \sqrt{\frac{RT}{V}}, \quad (24)$$

όπου RT ο χρόνος αντήχησης της αίθουσας και V ο όγκος της. Αντικαθιστώντας το RT από τον τύπο του Sabine (Παράγρ. 5.1.10, Εξίσωση (25)), η συχνότητα αποκοπής δύναται να υπολογιστεί και από τον τύπο:

$$f_c \approx \frac{800}{\sqrt{A}}, \quad (26)$$

όπου A η απορρόφηση του χώρου, που εξαρτάται από τη συχνότητα.



Εικόνα 20: Συχνότητα Schroeder και φασματικός διαχωρισμός σε κλειστό χώρο ως προς τους τρόπους ταλάντωσης [64].

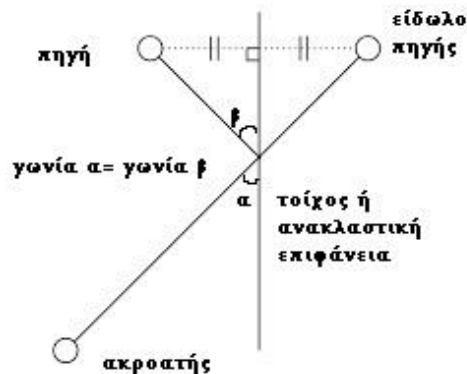
3.2 Ανακλάσεις

3.2.1 Γενικά περί ανακλάσεων

Όταν ένα ηχητικό κύμα προσπίπτει σε μια επιφάνεια ένα μέρος της ενέργειας του διαδίδεται δια μέσου της επιφάνειας, ένα άλλο απορροφάται και ένα άλλο ανακλάται. Έτσι, μετά από κάθε ανάκλαση, η ενέργεια του κύματος γενικά μειώνεται λόγω απορρόφησης. Η ενέργεια των πρώτων ανακλάσεων θα είναι αισθητά μεγαλύτερη από αυτή των μετέπειτα ανακλάσεων και ως ακόλουθο, η μελέτη και ο έλεγχος τους έχει μεγάλη σημασία στην επίτευξη μιας ποιοτικής ακουστικής σε ένα χώρο.

3.2.2 Μελέτη ανακλάσεων με τη μέθοδο ειδώλων της πηγής

Τα ηχητικά κύματα κατά την πρόσπτωση τους σε μια επίπεδη επιφάνεια υπό γωνία A θα ανακλαστούν συμμετρικά ως προς την κάθετη προς την επιφάνεια, κατά την ίδια γωνία A , ομοίως με ένα κύμα φωτός. Κατά τον ακουστικό σχεδιασμό συνηθίζεται η ανάλυση με τη βοήθεια ειδώλων της πηγής ως προς τις συγκεκριμένες επιφάνειες από όπου προέρχονται οι ανακλάσεις (Εικόνα 21).



Εικόνα 21: Ανάκλαση σε επίπεδη επιφάνεια, ισοδυναμία με τη δημιουργία ειδώλου της πηγής.

Αν η επιφάνεια είναι καμπύλη τότε η ανάκλαση είναι συμμετρική ως προς την κάθετο στο σημείο αυτό (προς το εφαπτόμενο της επιφάνειας επίπεδο). Σε μια τέτοια περίπτωση, απεικονίζεται το είδωλο μόνο για το συγκεκριμένο σημείο της, ως προς το εφαπτόμενο της καμπύλης επίπεδο στο σημείο αυτό .

Τα "είδωλα" μελετιούνται μέσω της γεωμετρικής κυματικής θεωρίας. Κοίλες επιφάνειες μπορούν να εστιάσουν τα ηχητικά κύματα προς μια κατεύθυνση ενώ κυρτές επιφάνειες να προκαλέσουν διάχυση του ήχου.

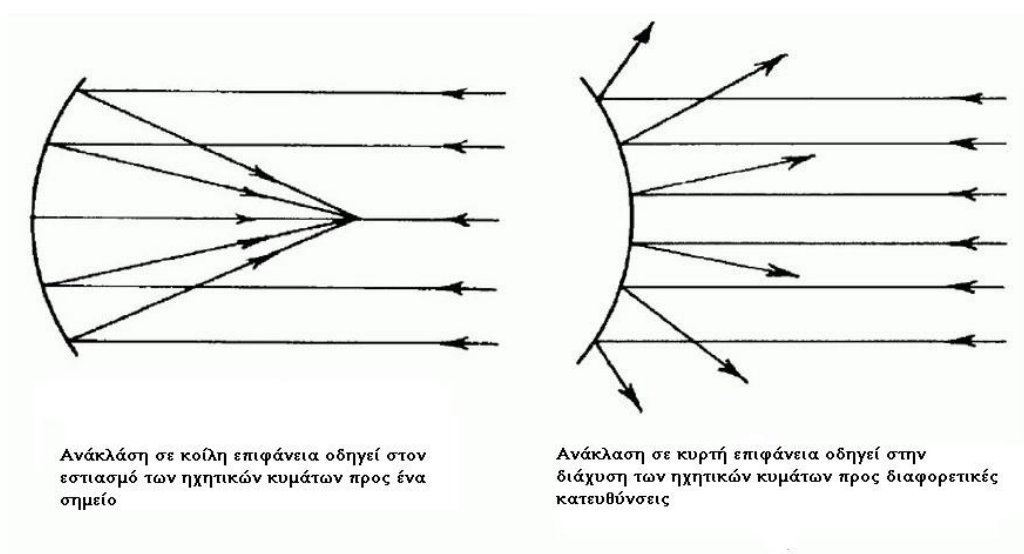
3.2.3 Ανακλάσεις σε κυρτές επιφάνειες

Η ανάκλαση ηχητικών κυμάτων από στερεές κυρτές επιφάνειες οδηγεί στη εκτροπή προς πολλές κατευθύνσεις. Το φαινόμενο ονομάζεται διάχυση και συνεισφέρει θετικά στη δημιουργία ενός ομοιόμορφου αντηχητικού πεδίου σε έναν κλειστό χώρο, προσδίδοντας μεγαλύτερη αίσθηση "λαμπρότητας" και διαύγειας (Εικόνα 22).

3.2.4 Ανακλάσεις σε κοίλες επιφάνειες

Εντυπωσιακά αλλά συνήθως ανεπιθύμητα φαινόμενα μπορούν να παρουσιαστούν κατά την πρόσπτωση του ήχου σε κοίλες επιφάνειες. Οι κοίλες

επιφάνειες μπορούν να προκαλέσουν συγκέντρωση της ηχητικής ενέργειας προς ένα σημείο στο χώρο με αποτέλεσμα την ενίσχυση του ήχου προς συγκεκριμένη κατεύθυνση και σημείο. Τέτοιου είδους κοίλες επιφάνειες χρησιμοποιούνται συχνά κατά τον ακουστικό σχεδιασμό αιθουσών που η "πλούσια" ακουστική είναι ζητούμενο. Η χρήση μια μεγάλης κοίλης επιφάνειας στην οροφή μπορεί να πετύχει μια σταδιακή αύξηση της πυκνότητας της ανακλώμενης από την οροφή ισχύος από την αρχή προς το τέλος της αίθουσας, αντίθετα από μια ευθεία επιφάνεια που θα ήταν παράλληλη προς το ακροατήριο (Εικόνα 22).



Εικόνα 22: Ανακλάσεις σε κοίλες και κυρτές επιφάνειες [2].

3.2.5 Ηχητική σκιά

Σε περίπτωση που στην πορεία ενός ηχητικού κύματος παρεμβάλλεται ένα φυσικό αντικείμενο που λειτουργεί ως εμπόδιο τότε, αντίστοιχα με το κεφάλι μας στη περίπτωση της ψυχοακουστικής, στο πίσω μέρος του θα δημιουργηθεί μια ηχητική σκιά η οποία θα είναι όλο και πιο έντονη όσο μικραίνει το μήκος του ηχητικού κύματος (όσο αυξάνεται η συχνότητα). Το φαινόμενο της ηχητικής σκιάς τείνει να εξασθενεί τελικά όσο απομακρυνόμαστε από το εμπόδιο λόγω της περίθλασης. Για περιπτώσεις μικρών αντικειμένων η επίδραση του είναι μικρή, ειδικά όσο αυξάνεται η απόσταση από αυτό. Όσο όμως μεγαλύτερο όγκο ή επιφάνεια έχουν τα εμπόδια ανάμεσα στην ελεύθερη διάδοση των ηχητικών κυμάτων και τον ακροατή τόσο πιο έντονη γίνεται η μείωση της στάθμης που καταφθάνει σε αυτόν.

3.2.6 Ηχώ, ψυχοακουστική και πλαταγισμός ηχούς (*Flutter echo*)

Σε ένα σημείο μέτρησης ή ακρόασης σε έναν χώρο, πρώτος καταφθάνει ο απευθείας από τη πηγή ήχος (*direct sound*) και στη συνέχεια μια μεγάλη ακολουθία από ανακλάσεις. Ο απευθείας ήχος από την πηγή καταφθάνει σε χρόνο που αντιστοιχεί στην απόσταση πηγής-ακροατή. Οι ανακλάσεις με τη σειρά τους καταφθάνουν σε χρόνο που θα προκύπτει από τη συνολική απόσταση που διένυσαν εντός του χώρου, έπειτα από πρόσκρουση και ανάκλαση από τις διάφορες επιφάνειες, μέχρι να φθάσουν και αυτές στο σημείο ακρόασης. Ο συνολικός δρόμος δηλαδή που χρειάστηκε να διανύσουν θα είναι πάντα μεγαλύτερος από αυτόν του απευθείας ήχου. Αντίστοιχα, η ένταση της καθεμιάς τους θα είναι εξασθενημένη κατά ένα ποσοστό, μικρότερο ή μεγαλύτερο, που θα εξαρτάται από τους συντελεστές απορρόφησης των υλικών των επιφανιών στα οποία ανακλάστηκαν. Σε μεγάλους ή πολύ μεγάλους χώρους υπάρχει σημαντική πιθανότητα επιστροφής ισχυρής ανάκλασης σε χρόνο όπου ο απευθείας ήχος και οι πρώτες ανακλάσεις θα έχουν παρέλθει (χρονικά) με αποτέλεσμα να γίνουν πιο εύκολα αντιληπτές με τη μορφή ηχούς.

Για καλύτερη κατανόηση, επιστρέφουμε στην ψυχοακουστική που μας εξηγεί πως το ανθρώπινο σύστημα της ακοής δεν μπορεί να αντιληφθεί ως επανάληψη έναν ήχο που καταφθάνει σε λιγότερο από 35 msec από τον αρχικό (φαινόμενο *Haas*), αναλόγως βέβαια τη στάθμη του. Θα τον αντιληφθεί περισσότερο ως συνέχεια του πρώτου και ως μια αίσθηση "χώρου" λειτουργώντας προσθετικά στην ακουστική εντύπωση, παρά ως μια διακριτή επανάληψη. Καθώς η χρονική καθυστέρηση αυξάνεται πέραν των 35 msec (π.χ. τείνοντας στα 50 msec) το φαινόμενο αλλάζει και αρχίζει σταδιακά να γίνεται διακριτή η επανάληψη την οποία αντιλαμβανόμαστε ως ηχώ. Το ίδιο συμβαίνει και μεταξύ κάθε ανάκλασης και αυτών που έπονται.

Πρέπει να σημειωθεί πως η αίσθηση ηχούς αλλάζει κατά πολύ αναλόγως των χαρακτηριστικών του αρχικού ήχου. Ήχοι "κοφτοί", απότομοι, σύντομης διάρκειας είναι πολύ πιο εύκολο να παραμορφωθούν λόγω του φαινομένου της ηχούς, αντίθετα από μακρόσυρτους ήχοι μεγάλης διάρκειας που το όριο μέχρι τη διακριτή επανάληψη αυξάνει.

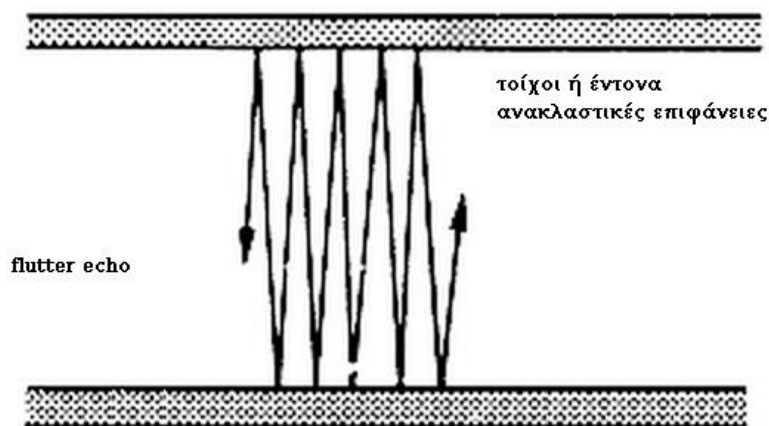
Παρατηρείται επίσης μια σχέση με το μήκος κύματος της συχνότητας όπου όσο ανεβαίνουμε σε συχνότητα τόσο πιο ευδιάκριτες είναι οι επαναλήψεις. Τα 50 msec αντιστοιχούν περίπου σε 17 m απόστασης, μεγαλύτερης απόστασης δηλαδή σε σχέση με την απόσταση πηγής και του ίδιου σημείου.

$$\text{Καθυστέρηση ανάκλασης (s)} = \frac{\text{διαδρομή ανάκλασης (m)} - \text{διαδρομή απευθείας ήχου (m)}}{\text{ταχύτητα του ήχου } c \text{ (m/s)}}$$

Οι ανακλάσεις αυτές βέβαια είναι μεγάλες σε αριθμό και καταφθάνουν σε πολλές και διαφορετικές χρονικές στιγμές υπερκαλύπτοντας έτσι τις περισσότερες φορές ανακλάσεις με χρονικές καθυστερήσεις μεγαλύτερες από τα προαναφερθέντα όρια. Αν δεν γινόταν αυτό τότε μια εκκλησιά με χρόνο αντήχησης 2,5 sec ή περισσότερο, θα δημιουργούσε ένα συνεχόμενο επαναλαμβανόμενο μοτίβο οποιουδήποτε ήχου αναπαράγονταν εντός της.

Το φαινόμενο *flutter echo* οφείλεται σε διαδοχικές ανακλάσεις μεταξύ δυο λειών και παράλληλων επιφανειών με μικρές τιμές απορρόφησης που δεν "αφήνουν" τον ήχο να "σβήσει" ομαλά. Παρατηρείται συνήθως σε μέρη όπου οι υπόλοιπες επιφάνειες δεν εμφανίζουν μεγάλη ανακλαστικότητα ή διάχυση ή είναι έντονα απορροφητικές (Εικόνα 23).

Με τον ακροατή στο κέντρο, τα δυο κύματα από τις ανακλάσεις των παράλληλων επιφανειών μετά τη 2η ανάκλαση θα έχουν διανύσει ίση απόσταση και θα έχουν την ίδια φάση οπότε θα προστίθενται. Ο ακροατής θα ακούει συνεχώς αυξομειώσεις του ανακλώμενου ήχου.



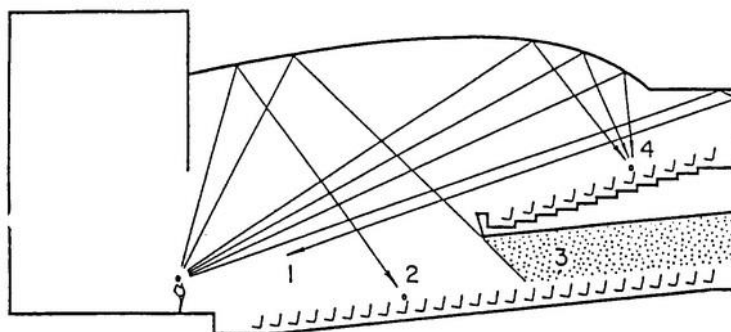
Εικόνα 23: Παράδειγμα *flutter echo* ή καταιγισμού ήχους [65].

3.2.7 Ανακλάσεις και ακουστικός σχεδιασμός

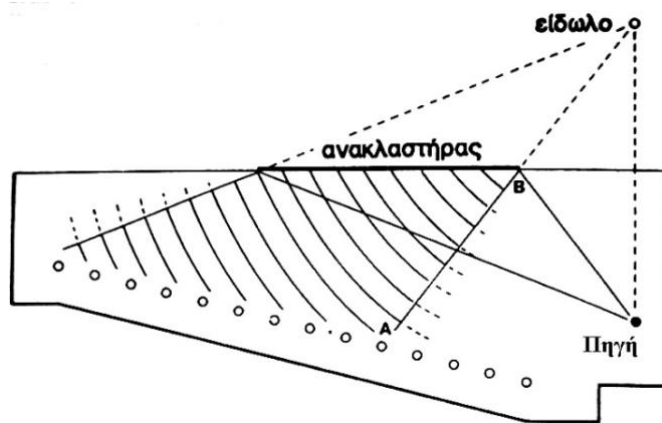
Κατά τον σχεδιασμό ενός συναυλιακού χώρου ή χώρου που προορίζεται για ομιλίες, ένας τέτοιος υπολογισμός των πρώιμων ανακλάσεων (*early reflections*) μπορεί να δημιουργήσει μια ζωτικής σημασίας ενίσχυση της "αίσθησης" του απευθείας ήχου (λόγω μικρών χρονικών διαφορών) και να τονώσει την αίσθηση της κατευθυντικότητας της προέλευσης του ήχου στο ακροατήριο (απευθείας από τη σκηνή και όχι από πλευρικούς τοίχους ή την οροφή από όπου πιθανώς προέρχονται οι ανακλάσεις αυτές). Η αύξηση των πρώιμων ανακλάσεων βελτιώνει τις τιμές των ακουστικών παραμέτρων που σχετίζονται με την ευκρίνεια, την διαύγεια και την καταληπτότητα της ομιλίας και

της μουσικής. Ισχυρές όμως ανακλάσεις μπορούν επίσης να οδηγήσουν σε μετατόπιση της εικόνας της πηγής (αν ο καθυστερημένος ήχος φτάσει στο σημείο ακρόασης μέχρι και 5 ms μετά τον απευθείας ήχο) επιδρώντας αρνητικά στην τελική ακουστική ποιότητα της αίθουσας. Η μελέτη κατά την κατασκευή του χώρου, των κλήσεων, των υλικών και των γωνιών των επιφανειών μπορούν να δημιουργήσουν τα επιθυμητά αποτελέσματα αποφεύγοντας στην πορεία λύσεις "ανάγκης" για διόρθωσης χαρακτηριστικών κακής ακουστικής. Γίνεται με λίγα λόγια μια προσπάθεια τοποθέτησης επιφανειών σε συγκεκριμένα σημεία έτσι ώστε να στέλνουμε την ανακλώμενη ηχητική ενέργεια προς τις κατευθύνσεις που εμείς θέλουμε και δεν τις αφήνουμε να απλώνουν "τυχαία" δημιουργώντας πιθανώς ανεπιθύμητα αποτελέσματα. Ήδη προαναφέρθηκαν μερικά στοιχεία που επιδρούν αρνητικά στη συμπεριφορά και διάχυση του ήχου στο χώρο (στάσιμα κύματα, ηχώ, flutter echo) και γίνεται κατανοητό πως η αποφυγή χρήσης παράλληλων επίπεδων ανακλαστικών επιφανειών αποτελεί ένα βασικό σημείο.

Κατά τον ακουστικό σχεδιασμό συνηθίζεται η χάραξη των ειδώλων της πηγής που αναμένεται να δημιουργηθούν στις κατόψεις και πλάγιες όψεις των αρχιτεκτονικών σχεδίων. Με το τρόπο αυτό γίνεται μια οπτική απεικόνιση τους και κατά συνέπεια υποβοηθείται ο σχεδιασμός των ανακλαστικών επιφανειών (Εικόνες 24, 25).



Εικόνα 24: Χάραξη βασικών ανακλάσεων σε αίθουσα μουσικής [4].



Εικόνα 25: Σχεδίαση επίπεδου ανακλαστήρα οροφής με χάραξη ειδώλου που περιγράφει την ανάκλαση από την οροφή σε κατά μήκος τομή αίθουσας [4].

4.1 Απορρόφηση

4.1.1 Απορρόφηση ήχου και συντελεστής απορρόφησης

Ένα ηχητικό κύμα διαδιδόμενο στον αέρα κατά την πρόσκρουση του στην επιφάνεια κάποιου υλικού πεπερασμένου πάχους, κατά ένα μέρος της ενέργειάς του θα ανακλαστεί, μέρος της ενέργειας του θα απορροφηθεί από το υλικό, αλλά και μέρος της ενέργειας του ηχητικού κύματος διαδίδεται (διαθλάται) εντός του υλικού, ενώ αφού διανύσει όλο το πάχος του υλικού ακολουθεί εκ νέου ανάκλαση, διάθλαση-απορρόφηση στη νέα διεπιφάνεια με το επόμενο μέσο κλπ.

Για την απλή περίπτωση συντελεστής απορρόφησης του υλικού υπολογίζεται ως [1]:

$$\alpha = \frac{\text{(προσπίπτουσα ενέργεια - ανακλώμενη ενέργεια)}}{\text{προσπίπτουσα ενέργεια}} \quad (27)$$

Αντίστοιχα ο συντελεστής ανάκλασης θα αποδίδεται από το λόγο:

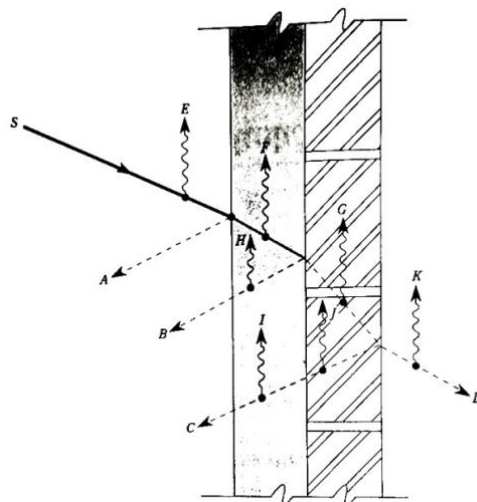
$$\Gamma = \frac{\text{ανακλώμενη ενέργεια}}{\text{προσπίπτουσα ενέργεια}} \quad (28)$$

Άρα $\alpha + \Gamma = 1$.

Στην Εικόνα 26 φαίνεται με λεπτομέρεια η πολυπλοκότητα των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά την πρόσπτωση ηχητικού κύματος, το οποίο αρχικά διαδίδεται στον αέρα, στην επιφάνεια πορώδους απορροφητικού υλικού, το οποίο είναι στερεωμένο σε τοίχο από τούβλα, που με τη σειρά του εφάπτεται τοιχίου μπετόν, πίσω από το οποίο υπάρχει αέρας. Οι όροι που αναγράφονται αντιστοιχούν στα εξής:

- S ένα επίπεδο ηχητικό κύμα,
- E η απώλεια στο αέρα πριν την πρόσκρουση στην επιφάνεια του πορώδους απορροφητικού υλικού (για μικρούς χώρους αμελητέα)
- A το ποσοστό ενέργειας που ανακλάται κατά την πρόσκρουση στην επιφάνεια του ηχοαπορροφητικού υλικού.

- F η απορρόφηση του πορώδους ηχοαπορροφητικού υλικού (μετατροπή κυματικής ενέργειας σε θερμότητα εξαιτίας της αντίστασης τριβής του υλικού κατά την ταλάντωση των μορίων του αέρα εντός του),
- B το ανακλώμενο κύμα από τη διεπιφάνεια ηχοαπορροφητικού υλικού-τούβλων (που στη συνέχεια διαθλάται στον αέρα)
- G η απορρόφηση από τα τούβλα
- C το ανακλώμενο κύμα λόγω της διεπιφάνειας μπετόν-αέρα (το οποίο διαθλάται μέσα στα τούβλα, στη συνέχεια στο πορώδες ηχοαπορροφητικό υλικό και τέλος πάλι στον αέρα)
- D το διαθλωμένο κύμα λόγω της διεπιφάνειας τούβλου-μπετόν
- H, (I, J) και K η απώλεια θερμότητας που υφίστανται τα κύματα B, C, και D, αντίστοιχα.



Εικόνα 26: Φαινόμενα που παρατηρούνται κατά την πρόσπτωση ηχητικού κύματος σε απορροφητική επιφάνεια [2].

Όπως σημειώνεται στη βιβλιογραφία [2]: "Ευτυχώς, όλες αυτές οι λεπτομέρειες δεν εισέρχονται στα πρακτικά προβλήματα της απορρόφησης του ήχου", όταν μιλάμε για ακουστικό σχεδιασμό, συμπληρώνουμε, διότι σε περιπτώσεις μελέτης και κατασκευής ηχοαπορροφητικών διατάξεων η εξέταση των παραπάνω φαινομένων είναι ουσιώδης.

Ο συντελεστής απορρόφησης α ενός υλικού εκφράζει το ποσοστό της ενέργειας που δεν επιστρέφει στην αίθουσα έπειτα από την ανάκλαση του ήχου στη συγκεκριμένη επιφάνεια. Εξαρτάται σημαντικά από την γωνία πρόσπτωσης στην επιφάνεια (για παράδειγμα, στις κοίλες επιφάνειες, μικρή γωνία πρόσπτωσης επιφέρει χαμηλή απορρόφηση). Σημαντικό ρόλο επίσης παίζει η τοποθέτηση τους στο χώρο που μπορεί να επιφέρει σημαντικές αποκλίσεις στους πραγματικούς

συντελεστές απορρόφησης εντός της αίθουσας έναντι των εργαστηριακών μετρήσεων. Παρόλες τις αποκλίσεις, η γνώση και ο κατάλληλος χειρισμός και τοποθέτηση επιφανειών με συγκεκριμένες τιμές απορρόφησης σε συγκεκριμένα σημεία του χώρου είναι το καλύτερο εργαλείο που έχουμε στα χέρια μας για τον έλεγχο του χρόνου αντήχησης μιας αίθουσας. Όπως αναφέρεται στο [1], γίνεται χρήση του όρου a ενώ στη πραγματικότητα χρησιμοποιούμε τον όρο \tilde{a} ο οποίος αναφέρεται στην μέση τιμή του συντελεστή απορρόφησης για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης, συνήθως ανά συχνοτική ζώνη (π.χ. οκτάβα). Το a είναι αδιάστατο μέγεθος και όπως είπαμε εκφράζει ένα λόγο. Συχνά χρησιμοποιείται το γινόμενο $S \cdot a$, που εκφράζει την απορρόφηση (όχι συντελεστή απορρόφησης) της επιφάνειας με εμβαδόν S και συντελεστή απορρόφησης a , και μιας και το a είναι αδιάστατο, η απορρόφηση έχει μονάδες εμβαδού (m^2). Ορίζεται επίσης ο συντελεστής απορρόφησης κατά Sabine, που υπολογίζεται με τοποθέτηση των προς μέτρηση υλικών σε ένα χώρο με υψηλή απορροφητικότητα όπου το πεδίο είναι σχεδόν 100% διάχυτο. Μια επιφάνεια με εμβαδόν $1 m^2$ έχει απορροφητική ικανότητα 1 Sabine αν ο συντελεστής απορρόφησης της είναι 1.

Σε ένα κλειστό χώρο ο μέσος συντελεστής απορρόφησης ορίζεται ως:

$$\tilde{a} = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 + \dots + \alpha_n S_n}{S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n}, \quad (29)$$

όπου α_n ο συντελεστής απορρόφησης μιας επιφάνειας συγκεκριμένου υλικού σε συγκεκριμένη συχνότητα (συχνοτική ζώνη) και S_n το εμβαδόν της, ενώ ο αριθμητής:

$$A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 + \dots + \alpha_n S_n, \quad (30)$$

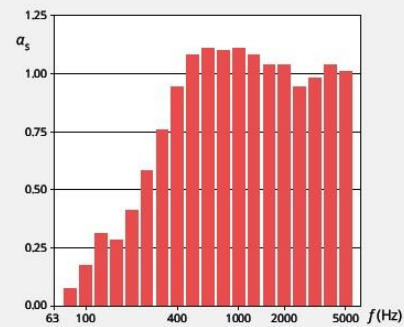
εκφράζει τη συνολική απορρόφηση από όλες τις επιφάνειες του χώρου και μπορεί να περιέχει και άλλους προσθετέους που εκφράζουν την απορρόφηση από άλλες ηχοαπορροφητικές δομές εντός του χώρου, όπως π.χ. ανθρώπους, έπιπλα κ.λπ.

Η απορρόφηση ενός υλικού συνήθως δεν εμφανίζει ομοιομορφία ως προς τη συχνότητα. Η απορρόφηση στις υψηλές συχνότητες είναι αρκετά πιο εύκολη υπόθεση, καθώς υπάρχουν πολλά πορώδη ηχοαπορροφητικά που την επιτυγχάνουν. Οι τιμές του συντελεστή a συνηθίζεται να αναγράφονται από τους κατασκευαστές των υλικών, στα αντίστοιχα εγχειρίδια χρήσης, ανά ζώνη οκτάβας με τιμή για την κεντρική συχνότητα της ζώνης, δίχως όμως να αποκλείεται η αναγραφεί του ανά ζώνες 1/3 οκτάβας. Στη περίπτωση αυτή πρέπει να χρησιμοποιείται η τιμή της ζώνης με την αντίστοιχη κεντρική συχνότητα (Εικόνα 27).

ABSORPTION COEFFICIENT

f (Hz)	α_s
80	0.07
100	0.17
125	0.31
160	0.28
200	0.41
250	0.58
315	0.76
400	0.94
500	1.08
630	1.11
800	1.10
1000	1.11
1250	1.08
1600	1.04
2000	1.04
2500	0.94
3150	0.98
4000	1.04
5000	1.01

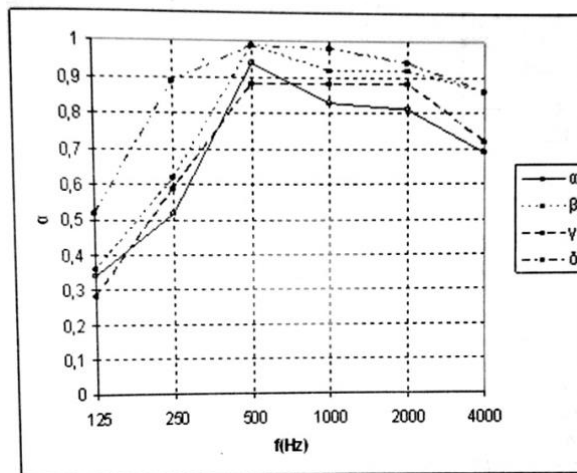
The measurement was carried out under the following climatic conditions:
temperature 23.0 °C, air humidity 53 %, air pressure 97.7 kPa



Εικόνα 27: Συντελεστές απορρόφησης ανά διαστήματα 1/3 οκτάβας της απορροφητικής διάταξης PET Wall Absorber 120 της εταιρίας T-Akustik [66].

Όπως προαναφέραμε, οι τιμές των συντελεστών απορρόφησης α μετριοούνται σε εργαστηριακό περιβάλλον και οι τιμές τους δύναται να διαφέρουν ανά μέθοδο μέτρησης. Επίσης, οι εργαστηριακές τιμές μπορεί να απέχουν αρκετά από την ικανότητα απορρόφησης στην πράξη, δηλαδή κατά την τοποθέτηση εντός μια πραγματικής αίθουσας. Υπάρχει περίπτωση, η ίδια επιφάνεια να αποδίδει στη πράξη διαφορετικές τιμές α έναντι μιας ίδιας, τοποθετημένης με διαφορετικό τρόπο σε άλλο σημείο της αίθουσας ή σε μεγαλύτερη απόσταση από τον τοίχο και αναλόγως της διάχυσης του ήχου εντός της αίθουσας [40] (Εικόνα 28).

Στη βιβλιογραφία συναντούμε πληθώρα πινάκων με σχετικούς συντελεστές απορρόφησης για την πλειοψηφία των οικοδομικών υλικών καθώς και απορροφητικών διατάξεων [1] [2] [3] [4] [10] [11] [23] [39].



Εικόνα 28: Συντελεστές απορρόφησης ανά οκτάβα διατάξεων ορυκτοβάμβακα τοποθετημένων σε δυο τρόπους. α) ορυκτοβάμβακας πάχους 5 cm σε επαφή με τον τοίχο, β) ορυκτοβάμβακας πάχους 5 cm σε απόσταση 2,5 cm από τον τοίχο, γ) ορυκτοβάμβακας πάχους 10 cm σε επαφή με το τοίχο και δ) ορυκτοβάμβακας πάχους 10 cm σε απόσταση 2,5 cm από τον τοίχο [1].

Κατά τη μελέτη του χρόνου αντήρησης μιας αίθουσας οι υπολογισμοί πρέπει πάντα να γίνονται για διαφορετικές συχνοτικές ζώνες. Σε περίπτωση που δεν αναγράφεται η συχνότητα συνήθως οι τιμές του συντελεστή απορρόφησης αναφέρονται στην οκτάβα του 1 kHz.

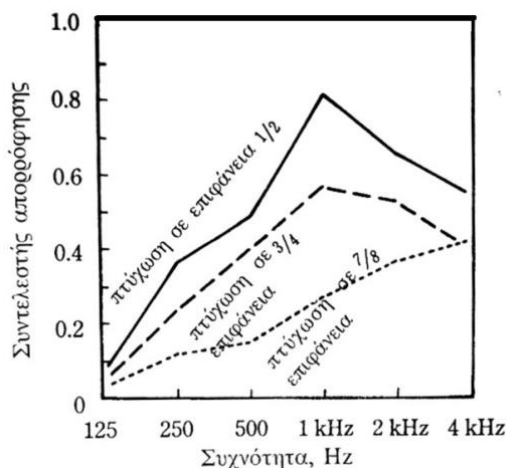
4.1.2 Απορροφητικές διατάξεις

Γενικά, η ρύθμιση του χρόνου αντήρησης στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες είναι ευκολότερη σε σχέση με τις χαμηλές καθώς υπάρχει πληθώρα έντονα απορροφητικών υλικών στην αγορά με σχετικά χαμηλό κόστος, ενώ υπάρχει και μεγαλύτερη ευκολία στην τοποθέτηση τους εντός του χώρου. Στις χαμηλές συχνότητες δεν συμβαίνει το ίδιο καθώς συχνά είναι ογκώδεις κατασκευές που εγκαθίστανται δύσκολα χωρίς να είναι πάντα εύκολη η πρόβλεψη της τελικής τους απορρόφησης. Ορισμένες απορροφητικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στον ακουστικό σχεδιασμό χώρων είναι οι εξής:

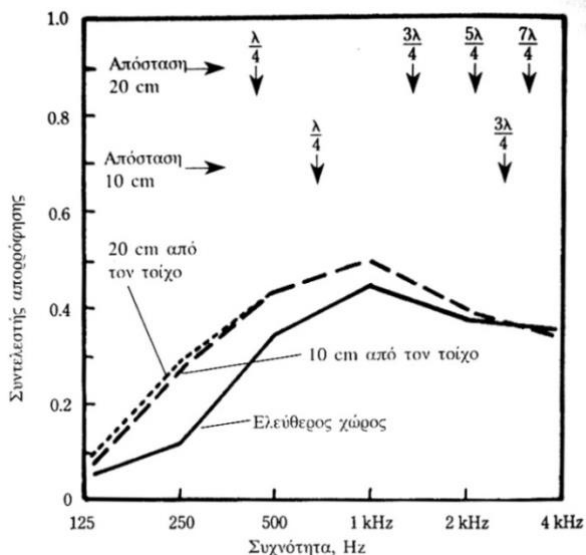
1. **Ημίκαμπτα Ταμπλό (πάνελ)** από υαλονήματα που καλύπτονται από ύφασμα και χρησιμοποιούνται ευρέως σε στούντιο. Το πάχος του υλικού, η πυκνότητα του και το κενό ανάμεσα σε αυτό και την όπισθεν τοιχοποιία επιδρούν με τη σειρά τους στην απορρόφηση. Όσο μεγαλύτερο το πάχος τους τόσο μεγαλύτερη η ηχοαπορρόφηση, ειδικά στις χαμηλές συχνότητες κάτω των 500 Hz καθώς σε συχνότητες πάνω από αυτήν επιτυγχάνονται μεγάλες τιμές ηχοαπορρόφησης και

για μικρότερο πάχος. Αντίστοιχα, μέσω της τοποθέτησης τους σε κάποια απόσταση από την όπισθεν τοιχοποιία μπορούμε να αυξήσουμε την απορρόφηση στις χαμηλές συχνότητες. Τέλος, η πυκνότητα των συγκεκριμένων υλικών δε φαίνεται να μεταβάλλει αξιοσημείωτα την ηχοαπορροφητική τους ικανότητα. Προφανώς δεν μιλάμε για πυκνότητες εξαιρετικά μικρές στις οποίες οι ίνες του υλικού θα είναι πολύ μεγάλες και δεν θα προκαλείται απορρόφηση αλλά ούτε και πολύ μεγάλες στις οποίες χάνεται η έννοια του "ηχοαπορροφητικού" και το υλικό αρχίζει να συμπεριφέρεται περισσότερο ως ανακλαστήρας. Τέτοιου είδους υλικά συνηθίζεται να κυκλοφορούν στο εμπόριο με τιμές πυκνότητας $0,73 \text{ kg/m}^3 - 2,72 \text{ kg/m}^3$.

2. **Ακουστικά πλακίδια** διαστάσεων $0,30 \text{ m} \times 0,30 \text{ m}$ η επιφάνεια των οποίων περιλαμβάνει οπές σε τυχαίες ή συμμετρικές αποστάσεις, σχισμές ή άλλες συνθέσεις. Περιορισμός σύμφωνα με το [2] είναι πως δεν μπορούμε να γνωρίζουμε ακριβώς τους συντελεστές απορρόφησης για κάθε πλακίδιο του εμπορίου. Γενικά συμπεριφέρονται καλά στον έλεγχο του χρόνου αντήχησης.
3. **Αφροί πολυουρεθάνης** σε σχήματα βυθισμάτων και κορυφών που μοιάζουν με τις διατάξεις των ανηχωϊκών θαλάμων. Έχουν μεγάλη ευκολία τοποθέτησης και προτιμούνται για λόγους "εμφάνισης" παρότι εμφανίζουν χαμηλότερη ηχοαπορρόφηση, σε σχέση με τα πάνελ από υαλονήματα, ειδικά στις χαμηλές συχνότητες. Έχουν μεγαλύτερο κόστος.
4. **Κουρτίνες** από πορώδη υφάσματα (όπως βελούδο) που εμφανίζουν αυξημένη ηχοαπορρόφηση ειδικά στην περιοχή $500 \text{ Hz} - 2 \text{ kHz}$. Η επιφανειακή τους πυκνότητα μπορεί να ποικίλει στο διάστημα $0,3 \text{ kg/m}^2 - 0,5 \text{ kg/m}^2$. Παρατηρείται αισθητή αύξηση της απορρόφησης για επιφανειακή πυκνότητα $0,5 \text{ kg/m}^2$ ενώ για επιφανειακές πυκνότητες $0,3 \text{ kg/m}^2 - 0,4 \text{ kg/m}^2$ η απορρόφηση δεν διαφέρει ουσιαστικά. Επιπλέον, αύξηση της ηχοαπορρόφησης παρατηρείται με την αύξηση των "πτυχώσεων" της κουρτίνας στην επιφάνεια που καλύπτει [2] [41] (Εικόνα 29), διότι αφενός αυξάνεται η ηχοαπορροφητική επιφάνεια και αφετέρου μέρος του ανακλώμενου ήχου προσπίπτει πάλι στην κουρτίνα και απορροφάται. Εξίσου σημαντικό ρόλο στη περίπτωση των κουρτινών παίζει και η απόσταση από την επιφάνεια που καλύπτει η οποία έχει άμεση σχέση με το μήκος κύματος της κάθε συχνότητας (Εικόνα 30). Για παράδειγμα [2], για τη συχνότητα του 1 kHz , με μήκος κύματος $0,346 \text{ m}$, οπότε ένα τέταρτο μήκους κύματος τα $0,0865 \text{ m}$, εμφανίζονται κορυφώσεις της απορρόφησης της κουρτίνας σε αποστάσεις ίσες με κάθε περιττό πολλαπλάσιο του τετάρτου του μήκους κύματος. Αντίθετα, η απορρόφηση εμφανίζει εξασθένιση για αποστάσεις ίσες με άρτια πολλαπλάσια μήκους κύματος.



Εικόνα 29: Παράδειγμα μεταβολής των συντελεστών απορρόφησης κουρτινών αναλόγως με τις αύξεις των πτυχώσεων [2].



Εικόνα 30: Παράδειγμα μεταβολής των συντελεστών απορρόφησης κουρτινών αναλόγως την απόστασή τους από τον τοίχο [2].

Αυτό οφείλεται στις οριακές συνθήκες που επιβάλλει ο όπισθεν της κουρτίνας τοίχος (θεωρώντας τον ανένδοτο). Η ακουστική πίεση στην επιφάνεια του τοίχου είναι μέγιστη και η σωματιδιακή ταχύτητα του ήχου μηδενική καθώς τα μόρια που βρίσκονται ακριβώς επί της διεπιφάνειας αέρα-τοίχου αδυνατούν να ταλαντωθούν (το απαγορεύει το ανένδοτο του τοίχου). Σε απόσταση όμως ενός τετάρτου του μήκους κύματος από τον τοίχο, η πίεση είναι μηδενική και η σωματιδιακή ταχύτητα του ήχου εμφανίζει μέγιστο. Οπότε, αν η κουρτίνα τοποθετηθεί στη συγκεκριμένη απόσταση από τον τοίχο τότε θα εμφανίσει μέγιστη απορρόφηση, λόγω της μέγιστης σωματιδιακής ταχύτητας. Σε απόσταση μισού μήκους κύματος αντίθετα, η σωματιδιακή ταχύτητα μηδενίζεται και η απορρόφηση ελαχιστοποιείται.

5. **Παγίδες χαμηλών συχνοτήτων** στις οποίες χρησιμοποιείται η ίδια λογική της επιλογής της απόστασης από τον τοίχο να είναι συνάρτηση του μήκους κύματος των συχνοτήτων τις οποίες θέλουμε πετύχουμε μέγιστη απορρόφηση. Πρόκειται ουσιαστικά για κουτιά ή συντονισμένες κοιλότητες (βλ. πιο κάτω συντονιστές Helmholtz) με βάθος ενός τετάρτου μήκους κύματος της συχνότητας που θέλουμε να μειώσουμε που εμπεριέχει φύλλα από υαλόνημα. Τοποθετούνται συνήθως σε γωνίες, κατά βάση σε χώρους που εμφανίζουν έντονα στάσιμα κύματα.
6. **Απορροφητές χαμηλών συχνοτήτων με διαφράγματα και πολυκυλινδρικοί απορροφητές** που στοχεύουν στην αύξηση της απορρόφησης στις χαμηλές συχνότητες δίχως να απαιτούνται πάνελ με πάχη ανάλογα του μήκους κύματος των χαμηλών συχνοτήτων που είναι ιδιαίτερα μεγάλα (για παράδειγμα τα 100 Hz έχουν μήκος κύματος 3,47 m). Πρόκειται για κατασκευές από γυψοσανίδες, κόντρα πλακέ, νοβοπάν κ.α., συγκεκριμένου (μικρού, π.χ. 1/6 έως 1/4 της ίντσας) πάχους που τοποθετούνται σε συγκεκριμένη απόσταση από τους τοίχους που καλύπτουν, στους οποίους προηγουμένως έχουν κολληθεί φύλλα υαλονήματος. Οι διατάξεις αυτές εκμεταλλεύονται το φαινόμενο του συντονισμού του διαφράγματος που ταλαντώνεται από τα ηχητικά κύματα, μετατρέπει την ηχητική ενέργεια σε ενέργεια ταλάντωσης του διαφράγματος και τελικά σε θερμότητα, λόγω τριβής στο πλαίσιο του, ενώ οι ίνες του υαλονήματος απορροφούν το μέρος του ήχου που διαθλάται. Η συχνότητα συντονισμού f_0 ενός τέτοιου διαφράγματος υπολογίζεται από τον τύπο:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{md'}} \quad (31)$$

όπου m η επιφανειακή πυκνότητα του διαφράγματος (σε kg/m^2), ρ η πυκνότητα του αέρα και d' το βάθος κενού αέρα (σε m). Με την επιλογή διαφορετικής επιφανειακής πυκνότητας διαφράγματος σε συνδυασμό με την τοποθέτησή τους σε διαφορετικές αποστάσεις d , αντί της εφαρμογής ενιαίου συνδυασμού επιφανειακής πυκνότητας διαφράγματος και απόστασης d , και τοποθετημένα σε διάφορα σημεία του χώρου, μπορούμε να επιτύχουμε συνολική ομοιόμορφη απορρόφηση σε περισσότερες από μια χαμηλές συχνότητες. Η χρήση υαλονήματος εντός των διατάξεων είναι προαιρετική, αυξάνει όμως κατά πολύ την απορροφητική τους απόδοση σε ευρύτερη περιοχή συχνοτήτων.

Οι πολυκυλινδρικοί απορροφητές λόγω της κοίλης επιφάνειάς τους πραγματοποιούν επιπλέον διάχυση στις υψηλές συχνότητες προσδίδοντας λαμπρότητα.

7. **Χαλιά και μοκέτες** αποτελούν τις πλέον διαδεδομένες επιφάνειες απορρόφησης σε διάφορους χώρους κυρίως για λόγους που δεν σχετίζονται με την ακουστική μελέτη αλλά για λόγους αισθητικούς, πρακτικότητας κ.α. Παρουσιάζουν μεγάλες

τιμές απορρόφησης από τις μεσαίες συχνότητες (~500 Hz) και άνω αλλά ελάχιστες στις χαμηλές. Στη βιβλιογραφία [2] αναγράφονται ενδεικτικές τιμές απορρόφησης 0,6 στα 4 kHz και μόλις 0,05 στα 125 Hz. Η κάλυψη επομένως μεγάλων επιφανειών με χαλιά μπορεί να επιφέρει μια έντονα ανομοιόμορφη κάλυψη των αναγκών σε απορροφητικές επιφάνειες μιας αίθουσας, για τον έλεγχο του χρόνου αντήχησης της, πράγμα που δεν θα οδηγήσει σε ιδανικά αποτελέσματα, μιας και οδηγεί σε υψηλή απορρόφηση στις υψηλές συχνότητες αλλά χαμηλή στις χαμηλές. Συνίστανται η χρήση τους σε συνδυασμό με άλλες διατάξεις που εμφανίζουν μεγάλες τιμές απορρόφησης στις χαμηλές συχνότητες. Τέλος, η απορροφητική ικανότητα των χαλιών, ειδικά στις χαμηλές συχνότητες, μπορεί να αυξηθεί αισθητά έπειτα από τοποθέτησης τους επάνω σε υπόβαθρα από διάφορα ελαστικά υλικά όπως πολυουρεθάνη, τσόχα από τρίχες (με ενδεικτικές πυκνότητες $1,5 \text{ kg/m}^3 - 2,5 \text{ kg/m}^3$), ελαστικό αφρό κατασκευασμένο από ανάδευση ενός υδατικού διαλύματος latex και προσθήκης ενός παράγοντα τήξης ή ελαστικούς σπόγγους που σχηματίζονται με φυσαλίδες αερίου που παράγονται με χημικό τρόπο, σχηματίζοντας τις απαραίτητες για την απορρόφηση ρωγμές στην επιφάνειά τους.

8. **Οι συντονιστές Helmholtz** απορροφούν την ενέργεια του ήχου σε μια στενή ζώνη συχνοτήτων γύρω από τη συχνότητα συντονισμού τους. Επηρεάζοντας το μήκος l , την επιφάνεια S του λαιμού τους και τον όγκο V της κοιλότητας τους μπορούμε να αλλάξουμε τη συχνότητα συντονισμού τους, $f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{[S/(Vl)]}$. Με εισαγωγή πορώδους ηχοαπορροφητικού εντός τους, μειώνουμε το συντελεστή ποιότητας του συντονισμού τους, διευρύνοντας της ζώνη απορρόφησης, αν και η μέγιστη απορρόφηση (στη συχνότητα συντονισμού) μειώνεται.

4.1.3 Απορρόφηση από ανθρώπους

Απορρόφηση όμως σε έναν χώρο θα εμφανιστεί και λόγω των ανθρώπων ή ακροατών εντός του χώρου και μάλιστα σημαντική. Η συνολική απορρόφηση φαίνεται [2] πως επηρεάζεται πέραν από το πλήθος τους και από το ντύσιμό τους με τα επίσημα, πιο παχιά ρούχα να εμφανίζουν αυξημένους συντελεστές απορρόφησης. Η απορρόφηση από ανθρώπους πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον ακουστικό σχεδιασμό ο οποίος συνήθως παρουσιάζεται για τις περιπτώσεις άδειας αίθουσας, γεμάτης κατά 50% και γεμάτης κατά 100%.

4.1.4 Απορρόφηση του αέρα

Η απορρόφηση λόγω του αέρα γίνεται σημαντική μόνο για χώρους με πολύ μεγάλους όγκους και αφορά συχνότητες από το 1 kHz και άνω.

Συχνότητα	Απορρόφηση (Sabine/29 m ³)
1 kHz	0,9
2 kHz	2,3
3 kHz	7,2

Πίνακας 1: Απορρόφηση λόγω του αέρα (σε Sabine) για 3 συχνοτικές ζώνες [2].

4.1.5 Ακουστική επιφάνεια καθισμάτων

Στους παραπάνω υπολογισμούς θεωρούμε πως τα ηχητικά κύματα καταφθάνουν ανεμπόδιστα στις διάφορες επιφάνειες. Για ορισμένες περιπτώσεις, όπως των καθισμάτων και του κοινού, για την αποφυγή της σκίασης απορροφητικών επιφανειών, έχει γίνει αποδεκτό να λαμβάνεται υπόψιν η πλάγια πλευρά των καθισμάτων ή των καθισμάτων με κοινό με τους παρακάτω τρόπους. Για καθίσματα εφαπτόμενα του τοίχου τότε να μη γίνεται καμία διόρθωση. Αλλιώς, η επιφάνεια τους εκτείνεται κατά μια ζώνη πλάτους 0,5 m, αν το πάτωμα αποτελεί διάδρομο μιας σειράς καθισμάτων και 1 m αν το πάτωμα αποτελεί διάδρομο μεταξύ δυο σειρών. Το εμβαδό που προκύπτει λέγεται ακουστική επιφάνεια καθισμάτων. Κατά τη σχεδίαση σε λογισμικό τα καθίσματα δε λαμβάνονται ως η επιφάνεια υπολογισμού των αποτελεσμάτων. Στα λογισμικά προσομοίωσης ακουστικής, συνηθίζεται η επιφάνεια ακρόασης να θεωρείται 1,2 m υψηλότερη αυτής των καθισμάτων με στόχο να πλησιάζει περισσότερο στα αισθητήρια όργανα της ακοής των καθομένων, τα αυτιά τους και το κεφάλι τους [1].

4.2 Διάχυση και διαχυτές

Έχουμε ήδη κάνει αναφορές στους όρους διάχυτο πεδίο καθώς και στην ομοιομορφη ή όχι διάδοση των ηχητικών κυμάτων στο χώρο (αποφυγή συγκέντρωσης ενέργειας σε συγκεκριμένες συχνότητες σε κάποιο σημείο του χώρου έναντι κάποιου άλλου). Η ομοιομορφία αυτή ή αλλιώς η υψηλή διάχυση

μπορεί να εξαλείψει σημαντικά πολλά από τα ακουστικά προβλήματα που προαναφέρθηκαν [1].

4.2.1 Ορισμός διάχυσης και διαχυτών

Ως διάχυση περιγράφουμε την ανάκλαση των ηχητικών κυμάτων προς τυχαίες κατευθύνσεις. Οι διαχυτές αποτελούν διατάξεις, συνήθως από έντονα ανακλαστικά υλικά όπως το ξύλο, κόντρα πλακέ κ.α. με ακανόνιστα και μη-συμμετρικά σχήματα. Η τοποθέτηση τους εντός μιας αίθουσας βοηθούν τον ήχο να ταξιδέψει προς τυχαίες κατευθύνσεις ενισχύοντας με το τρόπο αυτό την ενέργεια του αντηχητικού πεδίου.

4.2.2 Μετρήσεις διάχυσης επιφανειών

Έχουν γίνει διάφορες απόπειρες μέτρησης του συντελεστή διάχυσης των επιφανιών τόσο σε ελεύθερο πεδίο (ή ανηχωϊκούς θαλάμους) όσο και σε διάχυτο (κλειστούς χώρους) [1]. «Ο λόγος της κατοπτρικά ανακλώμενης ηχητικής ισχύος προς την συνολικά ανακλώμενη ισχύ αποτελεί τον συντελεστή κατοπτρικής ανάκλασης. Ο λόγος της διαφοράς των δυο παραπάνω μεγεθών ως προς την ολική ανακλώμενη ισχύ ονομάζεται συντελεστής διάχυσης» [1]. Ο συντελεστής διαφέρει και αυτός ανά συχνοτική ζώνη και εξαρτάται από τη γεωμετρία της επιφάνειας, τη καμπυλότητα της και τις διαστάσεις της ως προς το μήκος κύματος των συχνοτήτων που θέλουμε να προκληθεί διάχυση. Υπάρχουν πολλές τεχνικές πρόβλεψης και μελέτης για την κατασκευή τους. Οι διατάξεις που κατασκευάζονται με αυτό το σκοπό ονομάζονται διαχυτές και υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι [1][2][3].

4.2.3 Δείκτης διάχυσης επιφανειών (SDI)

Ο δείκτης διάχυσης επιφανειών (Surface Diffusivity Index – SDI) ορίζεται ως ο μέσος συντελεστής διάχυσης πλαγίων επιφανειών και οροφής. Αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό ενός χώρου αλλά υπολογίζεται δύσκολα [2] [41]. Αντίστοιχα με τους πίνακες συντελεστών απορρόφησης των υλικών, υπάρχουν και για τους συντελεστές διάχυσης [50] σε περιορισμένο όμως εύρος.

Χρόνος αντήχησης και άλλες ακουστικές παράμετροι

5.1 Χρόνος αντήχησης

5.1.1 Απευθείας ήχος και αντηχητικό πεδίο

Εντός ενός κλειστού χώρου, ο τελικός ήχος που θα καταφθάσει στον ακροατή αποτελεί ένα άθροισμα του απευθείας από τη πηγή ήχου και των ηχητικών κυμάτων που καταφθάνουν στο ίδιο σημείο έπειτα από τις διάφορες ανακλάσεις στους πλευρικούς τοίχους, στο πάτωμα και τις υπόλοιπες επιφάνειες του χώρου. Η ένταση του απευθείας ήχου θα εξασθενεί αναλόγως την απόσταση πηγής και ακροατή. Μεγαλύτερη απόσταση θα προκαλεί μεγαλύτερη μείωση της στάθμης ηχητικής πίεσης που θα καταφθάνει στο ακροατή. Ένας επιπλέον λόγος εξασθένησης του θα είναι η απορρόφηση από τον αέρα του οποίου η συμβολή γίνεται αισθητή και λαμβάνεται υπόψιν σε πολύ μεγάλους χώρους και κυρίως σε υψηλές συχνότητες.

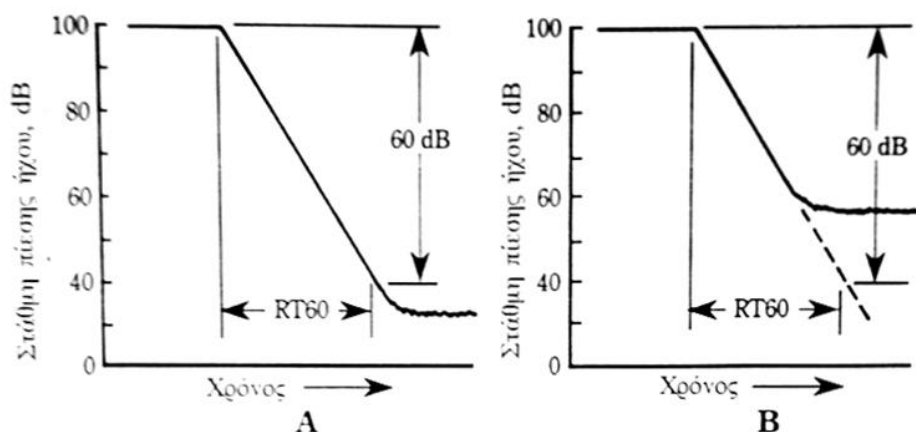
Τα ηχητικά κύματα που καταφθάνουν στον ακροατή από τις ανακλάσεις θα εξασθενούν αρχικά λόγω της μεγαλύτερης απόστασης που θα διανύουν έπειτα από τις διάφορες ανακλάσεις τους καθώς επίσης και από την απορρόφηση μέρους της ενέργειας τους έπειτα από κάθε ανάκλαση, η οποία θα είναι ανάλογη του συντελεστή απορρόφησης της εκάστοτε επιφάνειας στην οποία θα προσκρούουν. Λόγω των παραπάνω, έπειτα από κάποιο αριθμό ανακλάσεων, θα φτάσουν σε σημείο να εξασθενήσουν τόσο ώστε η ανθρώπινη ακοή να μην μπορεί πλέον να τις αντιληφθεί.

Τα παραπάνω φαινόμενα απαιτούν ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα μέχρι την ολοκλήρωσή τους που συνεπάγεται την απόλυτη σίγαση του ήχου. Το διάστημα αυτό περιγράφεται από τον χρόνο αντήχησης.

5.1.2 Χρόνος αντήχησης - ορισμός

Ο χρόνος αντήχησης $RT60$ είναι ο χρόνος που απαιτείται για να εξασθενήσει ένας ήχος κατά 60 dB μετά τη διακοπή της πηγής ήχου. Πιο αναλυτικά, χρόνος αντήχησης κλειστού χώρου, για συγκεκριμένη θέση και συχνότητα, είναι ο χρόνος που απαιτείται για να πέσει η στάθμη ηχητικής πίεσης από L_1 σε L_2 (dB) με την μεταξύ τους διαφορά να ικανοποιεί τη σχέση $L_1 - L_2 =$

60 dB. Μετριέται σε sec (δευτερόλεπτα). Στη πράξη βέβαια δεν είναι δυνατόν πάντα να έχουμε μια τέτοια εξασθένιση λόγω του θορύβου βάθους (εξωγενείς θόρυβοι). Για το λόγο αυτό απεικονίζουμε το σχετικό διάγραμμα στάθμης ως προς χρόνο και επεκτείνουμε την αντίστοιχη καμπύλη [2] (Εικόνα 30).



Εικόνα 31: Υπολογισμός χρόνου αντήχησης για τη περίπτωση χαμηλού θορύβου βάθους (A) και για τη περίπτωση υψηλού θορύβου βάθους (B) [2].

Ο χρόνος αντήχησης έχει σημαντική επίδραση στην ακουστική ποιότητα ενός χώρου επηρεάζοντας την αίσθηση του μεγέθους του, της σαφήνειας και της καταληπτότητας της ομιλίας ή της μουσικής και γενικά την ακουστική άνεση ακρόασης εντός του χώρου. Είναι το χαρακτηριστικό που θα χαρακτηρίσει τον χώρο ως "ζεστό" και "λαμπρό", "στεγνό" ή ακόμη και "νεκρό" (ανηχωϊκός θάλαμος ή κάποιο booth σε στούντιο ηχογραφήσεων).

Μετριέται σε δευτερόλεπτα (sec) με διάφορους τρόπους τους οποίους θα αναλύσουμε παρακάτω. Όσο μεγαλύτερος είναι τόσο μεγαλύτερη αίσθηση διάρκειας δίνει στον ακροατή έναντι της πραγματικής έντασης και διάρκειας του αρχικού ήχου από μια ηχητική πηγή. Μεγαλύτερος χρόνος αντήχησης συνεπάγεται περισσότερες τάξεις ανακλάσεων του ήχου, με αποτέλεσμα την αύξηση της ηχητικής ενέργειας που μεταφέρεται στο χώρο, την μεγαλύτερη διάρκεια του και τη δημιουργία μιας πιο "ζωντανής" ατμόσφαιρας. Ωστόσο, υπερβολικά μεγάλος χρόνος αντήχησης μπορεί να οδηγήσει σε δυσκολία κατανόησης του λόγου ή και της μουσικής. Αποτελεί βασικό στοιχείο της ακουστικής ενός χώρου και η κατανόηση της επίδρασής του στην ακουστική ποιότητα μπορεί να βοηθήσει στον βέλτιστο σχεδιασμό μιας αίθουσας, εξασφαλίζοντας μια άνετη και ευχάριστη ακρόαση.

5.1.3 Decay rate

Ένας διαφορετικός όρος περιγραφής του χρόνου αντήχησης είναι η ταχύτητα εξασθένησης (*decay rate*) που παίρνει τη μορφή εξασθένησης στάθμης (dB) ανά μονάδα χρόνου (sec). Για παράδειγμα, χρόνος αντήχησης 0,3 sec αντιστοιχεί σε *decay rate* $60 \text{ dB}/0,3 \text{ sec} = 200 \text{ dB/sec}$. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [2], ο όρος αυτός καλύπτει περισσότερο την ανομοιομορφία που παρουσιάζουν οι μικρές αίθουσες στον χρόνο αντήχησης στα διαφορετικά σημεία του χώρου.

5.1.4 Διαφορές ανά συχνότητα

Σημειώνουμε πως ο RT_{60} δεν είναι σταθερός σε όλες τις συχνότητες. Οι συντελεστές απορρόφησης του κάθε υλικού διαφέρουν ανά συχνότητα διαμορφώνοντας, συνολικά, έναν χρόνο αντήχησης ή ένα αντηχητικό πεδίο που συμπεριφέρεται διαφορετικά ανά συχνοτική περιοχή. Για το λόγο αυτό, οι τιμές του RT_{60} αποτυπώνονται πάντα για διάφορες οκτάβες ή σε διαστήματα $1/3$ οκτάβας και από αυτές μπορεί να προκύψει μια συνολική, μέση τιμή ως “χρόνος αντήχησης της αίθουσας”. Επιπλέον, σε έναν χώρο χωρίς ομοιόμορφη ακουστική συμπεριφορά και μετάδοσης του ήχου, ο χρόνος αντήχησης δύναται να διαφέρει από σημείο σε σημείο. Για το λόγο αυτό πρέπει να μετριέται σε διάφορες θέσεις και όχι μόνο σε μια [2].

5.1.5 Παρατηρήσεις περί χρόνου αντήχησης

Ο χρόνος αντήχησης σε καμία περίπτωση δεν αποτελεί το μοναδικό χαρακτηριστικό το οποίο θα περιγράφει την ακουστική αίσθηση που μας δίνει ένας χώρος. Δυο διαφορετικοί χώροι με ίδιο χρόνο αντήχησης σχεδόν ποτέ δεν θα δημιουργούν την ίδια αίσθηση ακρόασης.

Σημειώνεται πως σε ενωμένους χώρους (για παράδειγμα σκηνή και ακροατήριο) διαφορετικής γεωμετρίας, υλικών κατασκευής και κατ' επέκταση ακουστικών χαρακτηριστικών, συνηθίζεται να αντιμετωπίζονται ως συζευγμένοι χώροι και υπάρχουν διάφοροι τρόποι προσέγγισης τους στους οποίους δεν θα γίνει λόγος στην παρούσα διπλωματική εργασία καθώς η περίπτωση που ασχολούμαστε αποτελείται από έναν ενιαίο χώρο.

5.1.6 Μέτρηση χρόνου αντήχησης

Για τη μέτρηση του χρόνου αντήχησης απαιτείται μια πηγή ήχου και μια συσκευή καταγραφής του. Οι ήχοι μπορεί να ποικίλουν από πιο απλοί μέχρι πιο σύνθετοι. Ένα πιστόλι που εκπυρσοκροτεί (όπως το Ιαπωνικό αεροπίστολο που αναφέρεται στο [2] και παράγει ήχο 144 dB στο 1 m, διάρκειας περίπου 1 ms), ένα φουσκωμένο στο όριο του μπαλόνη που σκάει και γενικά ένας δυνατός και απότομος ("κοφτός"), κρουστικός ήχος, μικρής έως ελάχιστης διάρκειας, ικανός να διεγείρει όλο το συχνοτικό φάσμα εντός μιας αίθουσας.

Έχουν αναπτυχθεί ειδικοί ήχοι οι οποίοι αναπαράγονται μέσω παντοκατευθυντικών πηγών καθώς και μέθοδοι που μετρούν το χρόνο αντήχησης ελαχιστοποιώντας την πιθανότητα λάθους. Ορισμένοι εξ' αυτών είναι τα σήματα παλμού μέσω μιας γεννήτριας ήχου, συνεχόμενος ροζ ή λευκός θόρυβος που σταματά απότομα, η μέθοδο ακολουθίας μεγίστου μήκους MLS [1] [2] [3] ή μέσω επαναλήψεων ενός λογαριθμικού (exponential) Swept Tone σε ολόκληρο το ακουστικό φάσμα ή σε συγκεκριμένη συχνοτική περιοχή που μας ενδιαφέρει [38]. Όλοι οι παραπάνω ήχοι έχουν τη δυνατότητα να διεγείρουν όλες τις συχνότητες εντός μιας αίθουσας και στη συνέχεια, έπειτα από καταγραφή και επεξεργασία με κατάλληλα εργαλεία όπως ηχώμετρα, μετρητικά μικρόφωνα και λογισμικά ψηφιακής επεξεργασίας σήματος, να γίνει η αποτύπωση του χρόνου αντήχησης καθώς και των υπολοίπων ακουστικών παραμέτρων ενός χώρου (RAP) [33], όπως θα αναλύσουμε παρακάτω.

Πολλές φορές γίνεται χρήση φίλτρων A με στόχο τα αποτελέσματα να προσομιιάζουν το αποτέλεσμα στο ακουστικό αίσθημα. Συνίσταται [2] [38], η πραγματοποίηση παραπάνω από μιας μέτρησης, ιδανικά με διαφορετικούς τρόπους, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα τους για εξαγωγή πληρέστερων αποτελεσμάτων. Απαιτείται προσοχή, ιδιαίτερα σε σχετικά μικρούς χώρους, στην επίδραση των στάσιμων κυμάτων στην χρονική διάρκεια απόσβεσης των συχνοτήτων που ενισχύονται λόγω αυτών.

5.1.7 Έλεγχος χρόνου αντήχησης

Η μείωση του χρόνου αντήχησης μπορεί να επιτευχθεί με την τοποθέτηση απορροφητικών υλικών στις διάφορες επιφάνειες της αίθουσας. Η χρήση διαχυτικών επιφανειών μπορεί να αυξήσει την ομοιομορφία στην κατανομή των ανακλάσεων εντός του χώρου. Η χρήση πολλών διαχυτικών διατάξεων και γενικά ανακλαστικών επιφανειών μπορεί να αυξήσει το χρόνο αντήχησης.

5.1.8 Χρήση μη-επιστημονικών όρων για την περιγραφή του υποκειμενικού αισθήματος ακρόασης

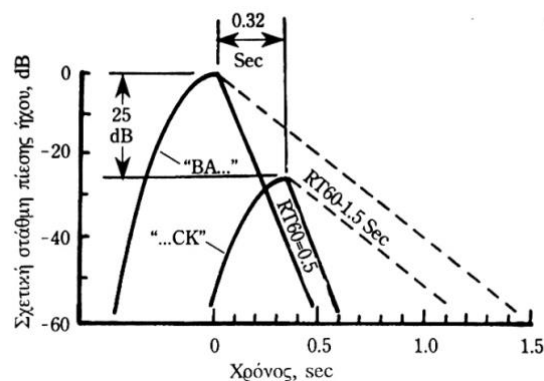
Παρατηρούμε πως γίνεται χρήση διαφόρων μη-επιστημονικών όρων για τις ακουστικές παραμέτρους που εξετάζουμε. Όπως αναφέρεται στο [2], τέτοιοι όροι προσπαθούν να καλύψουν το χάσμα μεταξύ των υποκειμενικών κριτηρίων ακουστικής ποιότητας ενός χώρου και τους όρους της ακουστικής ως επιστήμης με μετρήσιμα και αντικειμενικά μεγέθη. Λέξεις όπως "λαμπρός", "στεγνός"/"ξηρός", "μουντός" κ.τ.λ. που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στην καθημερινή μας ομιλία η χρήση των οποίων βοηθά στην καλύτερη και πιο άμεση κατανόηση όλων αυτών για τα οποία γίνεται λόγος. Μεταξύ άλλων αναφέρονται τα εξής [1] [2]:

1. "**Λαμπρός**" (Bright ή brightness στα αγγλικά) χαρακτηρίζεται ένας ήχος αν έχει πολλές αρμονικές, αν έχει δηλαδή ικανοποιητικές και σχετικά υψηλές στάθμες με αργή μείωση (μεγάλο RT_{60}) στις υψηλές συχνότητες.
2. "**Νεκρός**" ή "ξηρός" (Dead ή Dry στα αγγλικά). Λέξη που χρησιμοποιείται κατά κόρον στο γενικότερο χώρο του ήχου, της ηχοληψίας και της ακουστικής παγκοσμίως και χαρακτηρίζει ένα χώρο με πολύ χαμηλό χρόνο αντήχησης. Τυπικό παράδειγμα αποτελεί ένας θάλαμος ελέγχου σε ένα στούντιο ηχογραφήσεων που προορίζεται για ηχογράφιση φωνής, ηλεκτρικών κιθαρών ή ντραμς. Ακραίο παράδειγμα ένας ανηχωϊκός θάλαμος στον οποίο όλες οι επιφάνειες εμφανίζουν μέγιστη απορρόφηση, σχεδόν μηδενίζοντας την ενέργεια των ανακλάσεων, αφήνοντας μόνο τον απευθείας ήχο να διαχυθεί στο χώρο.
3. Η "**καθαρότητα**" των ήχων εξαρτάται από την αντήχηση. Μια μέση συλλαβή διαρκεί 0,1 sec και το διάστημα μεταξύ δυο λέξεων 0,2 sec περίπου. Σε ορισμένες γλώσσες του κόσμου ή σε ένα χίπ-χόπ τραγούδι ακόμη λιγότερο. Όταν οι επαναλήψεις του αρχικού ήχου καταφθάνουν, έπειτα από ανακλάσεις, με χρονική καθυστέρηση μεγαλύτερη από την ίδια τη διάρκεια του ήχου (σε σχετικά υψηλές στάθμες) και ενώ ο ομιλητής έχει περάσει στην επόμενη λέξη, γίνεται κατανοητό πως όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια κατά την οποία θα συνεχίσει να ηχεί η προηγούμενη λέξη, τόσο λιγότερο "καθαρό" θα είναι το άκουσμα. "Σε ακούω καθαρά", συνηθίζουμε να λέμε στις δοκιμές και πρόβες πριν από εκδηλώσεις.
4. "**Ζεστός**" ή "**Θερμός**" (Warm, warmth στα αγγλικά), χαρακτηρίζεται χώρος στον οποίον ο χρόνος αντήχησης στις χαμηλές συχνότητες είναι μεγάλος, προσδίδοντας τους μια μεγαλύτερη διάρκεια, έναντι των μεσαίων και υψηλών συχνοτήτων. Πολλά μουσικά είδη, ειδικά της ευρωπαϊκής κλασσικής μουσικής, έχουν συντεθεί με το σκεπτικό ότι θα εκτελούνται σε τέτοιους χώρους. Ακόμη και τα ισοκρατήματα στη βυζαντινή μουσική δεν θα ακούγονταν τόσο "γεμάτα" και εντυπωσιακά σε "ξηρούς" χώρους με χαμηλούς χρόνους αντήχησης.

5. *"Πηγάδι", "Σπηλιά" ή "Φαράγγι"*, ελληνικές πρωτότυπες λέξεις για τον χαρακτηρισμό χώρων με υπερβολικά μεγάλο χρόνο αντήχησης. Τέτοιοι φυσικοί χώροι εμφανίζουν συνήθως αρκετά από τα χαρακτηριστικά που θέλουμε να αποφύγουμε σε μια αίθουσα με "καλή" ακουστική όπως ηχώ, flutter echo κ.τ.λ. Προσομοιώσεις τέτοιων χώρων χρησιμοποιούνται κατά κόρων από κλαρινίστες σε παραδοσιακά σχήματα αλλά και σε ψυχεδελικά συγκροτήματα ροκ μουσικής, μέσω τεχνητών μηχανών εφέ (FX).

5.1.9 Επίδραση χρόνου αντήχησης στην καταληπτότητα του λόγου

Ένα καλό παράδειγμα σχετικά με την "καθαρότητα" της ομιλίας και την επίδραση του χρόνου αντήχησης της αίθουσας παρουσιάζεται στο [2]. Η αγγλική λέξη "Back" ("πίσω" στα ελληνικά) ξεκινά απότομα με τον ήχο "ba" και τελειώνει με το κοφτό σύμφωνο "ck". Έπειτα από μέτρηση, το σύμφωνο "ck" φαίνεται πως έχει περίπου 25 dB χαμηλότερη στάθμη από την μέγιστη του ήχου "ba" και φτάνει σε μέγιστο του περίπου 320 ms μετά το μέγιστο του πρώτου.



Εικόνα 32: Παράδειγμα επικάλυψης συμφώνων από φωνήεν [2].

Σε αίθουσα με $RT_{60} = 0,5$ s, όπως φαίνεται στην Εικόνα 32, ο ήχος "ba" έχει "σβήσει" σε μεγάλο βαθμό έπειτα από την άφιξη το ήχου "ck" και δεν τον υπερκαλύπτει (Εικόνα 31). Γίνεται όμως αντιληπτό πως σε αίθουσα με μεγαλύτερο χρόνο για παράδειγμα $RT_{60} = 1,5$ s και λόγο του χαμηλού *decay rate* της αίθουσας (40 dB/s) θα παρατηρηθεί εμφανής επικάλυψη του συμφώνου. Σε αυτό συνηγορούν οι μελέτες της ψυχοακουστικής που αναλύσαμε στο αντίστοιχο Κεφάλαιο.

Στο [2] αναφέρεται πως, γενικά, μεγάλος χρόνος αντήχησης τείνει σε έλλειψη ορισμού και διαύγειας της μουσικής και σε απώλεια αντιληπτικότητας (ή καταληπτότητας όπως ορίσαμε προηγουμένως) της ομιλίας. Αντίστοιχα στην ίδια πηγή διαβάζουμε πως σε έναν "νεκρό" ακουστικά χώρο με μικρό χρόνο αντήχησης, η ηχηρότητα (loudness) και η συνολική ισορροπία του ήχου που

καταφθάνουν στον ακροατή θα είναι ελλιπής ή "φτωχή" και θα παρουσιάζει προβλήματα.

5.1.10 Υπολογισμός χρόνου αντήχησης κατά Sabine

Ο υπολογισμός του χρόνου αντήχησης κατά Sabine προκύπτει από τον τύπο:

$$RT_{60} = \frac{0,161V}{A}, \quad (32)$$

όπου $A = S_1 \cdot a_1 + S_2 \cdot a_2 + \dots + S_n \cdot a_n = S_{tot} \cdot \tilde{\alpha}$ όπως είδαμε η απορρόφηση του χώρου. Επειδή όπως είπαμε η απορρόφηση διαφοροποιείται ανά συχνότητα, ο παραπάνω τύπος πρέπει να υπολογίζεται ανά συχνοτική ζώνη. Ο συγκεκριμένος τύπος αποτελεί μια πρώτη προσέγγιση του χρόνου αντήχησης και ισχύει ικανοποιητικά για χώρους με σχετικά μικρή απορρόφηση [3].

5.1.11 Παραδοχές τύπου Sabine

Ο τύπος του Sabine κάνει τις εξής παραδοχές [1]:

1. Η κατανομή του ήχου στο χώρο είναι ομοιόμορφη
2. Λόγω του ότι η κατανομή σπάνια είναι ομοιόμορφη, ο τύπος ανταποκρίνεται καλύτερα σε χώρους με σχετικά μικρή απορρόφηση των υλικών που σημαίνει περισσότερες και ισχυρότερες ανακλάσεις και σχετικά μεγάλους χρόνους αντήχησης.
3. Το αντηχητικό πεδίο θα πρέπει να αποτελείται από μεγάλο αριθμό επίπεδων κυμάτων, προερχόμενα από όλες τις κατευθύνσεις. Στη πράξη αυτό ισχύει μόνο για αρκετά μεγάλους χώρους με μεγάλες διαστάσεις.
4. Το σημείο μέτρησης-παρατήρησης δεν είναι πολύ κοντά στη πηγή.
5. Λόγω των παραπάνω γίνεται κατανοητό πως η απόδοση του τύπου δεν θα διαφέρει αισθητά για διαφορετικά σημεία μέτρησης.

Στο [1] αναφέρεται πως στην αίθουσα συναυλιών της Βοστώνης, στην οποία επαληθεύτηκε ο τύπος του Sabine, τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά. Δεν ισχύει το ίδιο για μικρούς χώρους που εμφανίζουν μεγαλύτερη ανομοιομορφία στη κατανομή του ήχου στο χώρο. Στη δικιά μας περίπτωση, τα κριτήρια πληρούνται σε μεγάλο βαθμό.

5.1.12 Όγκος αίθουσας και χρόνος αντήχησης

Στην βιβλιογραφία συναντάμε διάφορες υποπεριπτώσεις κατά τις οποίες ο συνολικός όγκος της υπό σχεδιασμού αίθουσας διαμοιράζεται ή δεν συνυπολογίζεται ομοιόμορφα στους τύπους υπολογισμούς του χρόνου αντήχησης. Στην παρούσα εργασία, λόγω της κοντινής γειτνίασης σκηνής και ακροατηρίου καθώς και της μη παρεμβολής χωρισμάτων, εξώστη ή αντίστοιχων κατασκευαστικών διατάξεων που να λειτουργούν ως εμπόδια στη διάδοση του ήχου που θα μπορούσε να θεωρηθεί πως χωρίζουν τον συνολικό όγκο σε επιμέρους τμήματα, δεν θα εξεταστούν.

Η παράμετρος που αξίζει να αναφερθεί είναι ο συνυπολογισμός ή όχι του όγκου της περιοχής που καταλαμβάνει το ακροατήριο. Παρόλο που έχει υποστηριχθεί [1] [41] πως δεν πρέπει να αφαιρείται, άποψη που στηρίζεται στο γεγονός ότι η απορροφητική ικανότητα των καθισμάτων μετρείται δίχως ακροατές να κάθονται επάνω τους, στην πράξη φαίνεται πως ο όγκος που καταλαμβάνουν μπορεί να μειώσει σημαντικά τον πραγματικό όγκο, κυρίως μιας μικρής αίθουσας.

5.1.13 Επίδραση αέρα, υγρασίας και θερμοκρασίας στον χρόνο αντήχησης

Η απορρόφηση του ήχου από τον αέρα θεωρείται αμελητέα για συχνότητες κάτω των 1000 Hz και αρχίζει να γίνεται αισθητή άνω των 2000 Hz. Εκφράζεται από τον συντελεστή m και εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την υγρασία. Για υγρασία άνω του 20% και όσο η θερμοκρασία αυξάνεται, η απορρόφηση μειώνεται. Σημαντικό ρόλο παίζει και ο όγκος του χώρου, με την απορρόφηση λόγω του αέρα να είναι ανάλογη αυτού. Για τον υπολογισμό της εισάγεται ο όρος $4mV$ στον παρονομαστή της προηγούμενης εξίσωσης, όπου $x = 4m$ ανά μονάδα όγκου του αέρα (m^{-1}). Η εξίσωση παίρνει τη μορφή:

$$RT_{60} = \frac{0,161V}{A + 4mV} \quad (33)$$

Ο συντελεστής m μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση, ως συνάρτηση υγρασίας και συχνότητας:

$$m = 5.5 \left(\frac{50}{h} \right) \left(\frac{f}{1000} \right)^{1.7} \cdot 10^{-4}, \quad (34)$$

όπου h η σχετική υγρασία και f η συχνότητα που εξετάζουμε.

5.1.14 Συχνότητα αποκοπής

Η συχνότητα αποκοπής f_c αντιστοιχεί στη μικρότερη συχνότητα κατά την οποία το διάχυτο (αντηχητικό) πεδίο θεωρείται έγκυρο ή αξιόπιστο. Όσο ανεβαίνουμε από τη συχνότητα αποκοπής τόσο πιο έγκυρες μπορούν να θεωρούνται οι μετρήσεις μας. Υπολογίζεται από τον τύπο:

$$f_c = 2000 \left(\frac{RT_{60}}{V} \right)^{1/2}. \quad (35)$$

5.1.15 Υπολογισμός χρόνου αντήχησης κατά Eyring

Ο τύπος υπολογισμού του χρόνου αντήχησης κατά Eyring προσπάθησε να καλύψει και να διορθώσει τα λανθασμένα αποτελέσματα που υπολογίζει ο νόμος του Sabine για τιμές συντελεστών απορρόφησης που πλησιάζουν τη μονάδα και απομακρύνουν ακόμη περισσότερο το αντηχητικό πεδίο του χώρου από το να είναι ομοιόμορφο. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ο χώρος συμπεριφέρεται περισσότερο ως ελεύθερο πεδίο, μόνο του απευθείας ήχου δηλαδή. Οι Norris-Eyring πρότειναν αντί του μέσου συντελεστή απορρόφησης $\tilde{\alpha}$ να χρησιμοποιηθεί ο μέσος ενεργειακός συντελεστής απορρόφησης σε στατική πρόσπτωση κύματος [1] για τον υπολογισμό της συνολικής απορρόφησης, οπότε ο τύπος που δίνει το RT_{60} κατά Norris-Eyring δίνεται από τη σχέση:

$$RT_{60} = \frac{0,161V}{S_{tot} \ln[1/(1 - \tilde{\alpha})]}, \quad (36)$$

ενώ, σε ένα χώρο στον οποίο οι επιφάνειες δεν εμφανίζουν παρόμοιο συντελεστή απορρόφησης ο τύπος γίνεται:

$$RT_{60} = \frac{0,161V}{xV - \sum_i S_i \ln(1 - a_{E_i})}, \quad (37)$$

και ο οποίος είναι γνωστός ως τύπος των Eyring-Millington. Έκτοτε έχουν υπάρξει και άλλες παραλλαγές του τύπου [43].

Μια λάθος παραδοχή του παραπάνω τύπου είναι πως υποθέτει πως όλες οι διαδρομές του ήχου είναι ίσες με την μέση ελεύθερη διαδρομή.

Χρησιμοποιείται συχνά για μεγάλους συντελεστές απορρόφησης.

5.1.16 Κατά Sabine ή κατά Eyring;

Δεν υπάρχει απάντηση σχετικά με την επιλογή μεταξύ των δυο τύπων υπολογισμού του RT_{60} . Αναφέρεται [1] πως για περιπτώσεις όπου η απορρόφηση σε κάποιες επιφάνειες είναι πολύ μεγάλη, συνίσταται η χρήση του τύπου Norris-Eyring ή Eyring-Millington, ακόμη και αν η μέση απορρόφηση $\bar{\alpha}$ δεν πλησιάζει υπερβολικά μεγάλες τιμές.

5.1.17 Επαρκεί ο χρόνος αντήχησης;

Γίνεται κατανοητό πως οι παραπάνω τύποι υπολογισμού του χρόνου αντήχησης λαμβάνουν υπόψιν τους μόνο συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ενός χώρου στον υπολογισμό τους (εμβαδόν, όγκο, απορρόφηση), αφήνοντας έξω πολλά εξίσου σημαντικά (διάχυση, γεωμετρία και μορφή χώρου, τοποθέτηση αντικειμένων και επιφανειών. Μια σειρά έντονα απορροφητικών ακουστικών πάνελ κοντά στο σημείο ακρόασης ή μέτρησης, θα επιφέρει διαφορετικά αποτελέσματα στο συγκεκριμένο σημείο σε σχέση με το να ήταν τοποθετημένα στο πίσω μέρος της σκηνής ή σε κάποιο μεγάλο ύψος. Ένα επιπλέον πρόβλημα που παρατηρήθηκε ήταν πως οι προηγούμενες διαδρομές στην πορεία των ανακλάσεων ενός ηχητικού κύματος δεν λαμβάνονται υπόψιν. Αντίθετα γίνεται η υπόθεση πως η πιθανότητα πρόσκρουσης ενός κύματος σε μια επιφάνεια είναι ανάλογη του μεγέθους της.

Για τους παραπάνω λόγους, τα αποτελέσματα των τύπων αυτών μπορούν να διαφέρουν αισθητά από τις πραγματικές μετρήσεις [1]. Κατά την υλοποίηση τους για συγκεκριμένους χώρους, παρατηρήθηκαν σαφώς μεγαλύτερες τιμές RT_{60} από αυτές που μετρήθηκαν. Παρόλα αυτά χρησιμοποιούνται συχνά προσφέροντας μια πολύτιμη βοήθεια κατά τον ακουστικό σχεδιασμό ενός χώρου. Συμπεριλαμβάνονται στα εργαλεία λογισμικών προσομοίωσης της διάδοσης του ήχου σε κλειστούς χώρους.

Οι τύποι αυτοί αμφισβητήθηκαν και προτάθηκαν νέοι με προσθήκη επιπλέον παραμέτρων όπως η εφαρμογή πινάκων πιθανοτήτων του να ανακλαστεί ένα ηχητικό κύμα από τον ένα τοίχο σε κάποιον άλλο (στατιστική θεωρία Markov), η εφαρμογή της οποίας επιβεβαίωσε πως ο χρόνος αντήχησης όντως διαφέρει από σημείο σε σημείο και εξαρτάται από την διάταξη και τοποθέτηση των επιμέρους επιφανειών [1].

Σε γενικές γραμμές και έπειτα από παρατήρηση θεωρείται πως ο τύπος του Eyring δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για περιπτώσεις χώρων των οποίων:

1. Η γεωμετρία κάτοψης πλησιάζει την τετράγωνη.
2. Όταν έχουμε κατά βάση κατοπτρικές ανακλάσεις, με την αύξηση της διάχυσης να βελτιώνει ακόμη περισσότερο την απόδοση του τύπου.
3. Ομοιομορφία στους συντελεστές απορρόφησης στις επιφάνειες του χώρου.

5.1.18 Μειονεκτήματα RT60

Ορισμένα μειονεκτήματα του χρόνου αντήχησης είναι [1]:

1. Τα αποτελέσματα δεν αντιστοιχούν συχνά στο υποκειμενικό αίσθημα ακρόασης που προκαλείται στο χώρο.
2. Απαιτούνται πηγές μεγάλης ισχύος και αρκετοί υπολογισμοί.
3. Η μείωση της στάθμης συνήθως δεν αντιστοιχεί σε μια τέλεια ευθεία, προκαλώντας ασάφειες ως προς την εκτίμηση του.

5.2 Επιπλέον δείκτες ακουστικής ποιότητας ενός χώρου

5.2.1 T₃₀, T₁₅, EDT

Υπάρχουν και άλλοι δείκτες του χρόνου αντήχησης που αποτυπώνουν διαφορετικά την ακουστική ποιότητα ενός χώρου και συνδέονται άμεσα με την υποκειμενική αίσθηση ακρόασης στο χώρο. Βασικά εξ' αυτών:

1. T₃₀ είναι το διπλάσιο του χρόνου μείωσης της στάθμης ηχητικής πίεσης μιας πηγής στο χώρο από τα -5 dB μέχρι τα -35 dB, δηλ. 30 dB πτώση στάθμης.
2. T₁₅ αντίστοιχα το τετραπλάσιο του χρόνου που απαιτείται για μείωση από τα -5 dB στα -20 dB, 15 dB πτώση στάθμης.
3. EDT (Early Decay Time ή Πρώμος Χρόνος Αντήχησης) το εξαπλάσιο του χρόνου που απαιτείται για μείωση από τα 0 dB μέχρι τα -10 dB, δηλ. μείωση κατά 10 dB.

Παραπάνω έγινε συχνά λόγος πως σε πραγματικές συνθήκες δεν υπάρχει συχνά ομαλότητα και ομοιομορφία στην απόσβεση της στάθμης ηχητικής πίεσης ενός ήχου σε κάθε σημείο ενός χώρου. Ακριβώς για αυτό, οι χρόνοι T₃₀, T₁₅, EDT, θα εμφανίζουν αποκλίσεις στις τιμές τους. Η μέτρηση τους σε μια αίθουσα θα πρέπει να γίνεται σε διάφορα σημεία. Η εξαγωγή αποτελεσμάτων προκύπτει από υπολογισμούς μέσω των τιμών.

5.2.2 Ανάλυση του EDT

Το μέγεθος που ανταποκρίνεται πιο πιστά στην ανθρώπινη αντίληψη είναι το EDT [1]. Υπάρχουν διαφορετικές προσεγγίσεις για τον υπολογισμό του. Πέραν της μείωσης στάθμης κατά 10 dB προτείνονται και οι τιμές 5 dB, 15 dB, 20 dB. Έπειτα από έρευνες [1], προτάθηκε να λαμβάνεται υπόψιν για τη μέτρηση του EDT η μείωση της στάθμης σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα αντί του χρονικού διαστήματος που απαιτείται για τη μείωση της στάθμης, με προτεινόμενη τιμή τα 160 msec. Σε αίθουσες με γάλο χρόνο αντήχησης με έντονες ανακλάσεις λόγω έλειψης απορροφητικών επιφανειών προτείνεται η χρήση του EDT_{10} και του $EDT_{160\text{msec}}$.

5.2.3 Bass ratio και Treble ratio

Οι δείκτες *Bass Ratio (BR)* και *Treble Ratio (TR)* περιγράφουν τους λόγους απόσβεσης EDT της στάθμης ηχητικής πίεσης σε ορισμένες ζώνες συχνοτήτων έναντι άλλων. Αποτελούν δείκτες που σχετίζονται με τη χροιά του ήχου σε ένα χώρο. Μεγάλες τιμές BR υποδηλώνουν περισσότερη ενέργεια στις χαμηλές συχνότητες με αποτέλεσμα πιο "ζεστό" και "γεμάτο" ήχο, ενώ υψηλές τιμές TR υποδηλώνουν περισσότερη ενέργεια στις υψηλές συχνότητες και πιο "λαμπρό" ήχο. Οι δείκτες υπολογίζονται από τους παρακάτω τύπους [1]:

$$BR = \frac{EDT_{125\text{ Hz}} + EDT_{250\text{ Hz}}}{EDT_{500\text{ Hz}} + EDT_{1\text{ kHz}}}, \quad (38)$$

$$TR = \frac{EDT_{2\text{ kHz}} + EDT_{4\text{ kHz}}}{EDT_{500\text{ Hz}} + EDT_{1\text{ kHz}}}. \quad (39)$$

5.3 Κριτήρια Καθαρότητας, Ευκρίνειας και καταληπτότητας του ήχου

Η έννοια της καθαρότητας και της ευκρίνειας ενός χώρου, ως προς την ακουστική του, εκφράζει τη δυνατότητα ενός ανθρώπου να ακούσει καθαρά και να διαχωριστεί δύο συνεχόμενες λέξεις ή φθόγγους της ίδιας λέξης, εντός του χώρου. Μεγαλύτερη ευκολία και άνεση σε αυτό υποδηλώνει υψηλή ευκρίνεια και καθαρότητα στην ακουστική της αίθουσας. Βασικά μετρήσιμα μεγέθη είναι ο *Δείκτης Ευκρίνειας (Definition Coefficient) D*, και ο *Δείκτης Διάυγειας (Clarity Coefficient) C*, που αποτυπώνουν την ενέργεια του απευθείας ήχου καθώς και των ισχυρών πρώτων ανακλάσεων, ως προς την συνολική ενέργεια, συμπεριλαμβανόμενης και αυτής του διάχυτου αντηχητικού πεδίου.

5.3.1 Δείκτης Ευκρίνειας (Definition Coefficient) D50

Ο δείκτης D ορίζει την αναλογία της στάθμης ηχητικής πίεσης ενός αρχικού και σύντομου χρονικού διαστήματος από την παύση της πηγής ως προς τη συνολική στάθμη και εκφράζεται με δεκαδικές τιμές από 0 – 1 ή ως ποσοστό % (Εξίσωση (40α) ή σε dB (Εξίσωση (41β)). Το σύντομο αυτό χρονικό διάστημα συνήθως είναι $t_1 = 50$ msec. Όπως είπαμε, στο χρονικό διάστημα αυτό, ο απευθείας από την πηγή ήχος και οι κοντινές και ισχυρές πρώιμες ανακλάσεις κυριαρχούν. Ο λόγος εκφράζει ουσιαστικά την αναλογία του, ωφέλιμου για την ευκρίνεια, αρχικού ηχητικού κύματος, ως προς τη συνολική, πιθανώς επιβλαβή για την ευκρίνεια, ηχητική ενέργεια του κύματος και δίδεται από τον τύπο [1]:

$$D_{t_1} = \frac{\int_0^{t_1} [g(t)]^2 dt}{\int_0^{\infty} [g(t)]^2 dt} \cdot 100\% , \quad (42\alpha)$$

$$D_{t_1} = 10 \log \frac{\int_0^{t_1} [g(t)]^2 dt}{\int_0^{\infty} [g(t)]^2 dt} , \quad (43\beta)$$

όπου $[g(t)]^2$ η κρουστική απόκριση για συγκεκριμένες θέσεις πηγής και δέκτη.

5.3.2 Δείκτες διαύγειας (Clarity Coefficient) C50 και C80

Αντίστοιχα, ο δείκτης διαύγειας C υποδηλώνει την αναλογία της στάθμης ηχητικής πίεσης για ένα, αντίστοιχα με πριν, σύντομο αρχικό διάστημα, ως προς την στάθμη από το τέλος αυτής της σύντομης χρονικής διάρκειας και μέχρι το τέλος του ήχου. Ουσιαστικά είναι ο λόγος των πρώιμων ανακλάσεων ως προς τις καθυστερημένες ανακλάσεις, αντί του συνολικού ήχου που προσμετρούνται στον δείκτη D . Συνήθως υπολογίζεται για τα πρώτα 80 msec καθώς και τα 50 msec . Εκφράζεται ως ποσοστό % (Εξίσωση (44α) ή σε dB (Εξίσωση (45β)). Υπολογίζεται από τον τύπο:

$$C_{t_1} = \frac{\int_0^{t_1} [g(t)]^2 dt}{\int_{t_1}^{\infty} P^2 [g(t)]^2 dt} \cdot 100\% , \quad (46\alpha)$$

$$C_{t_1} = 10 \log \frac{\int_0^{t_1} [g(t)]^2 dt}{\int_{t_1}^{\infty} P^2 [g(t)]^2 dt} , \quad (47\alpha)$$

Ο δείκτης D αποδίδει καλύτερα στην εκτίμηση της ακουστικής ποιότητας ενός χώρου όταν μιλάμε για ομιλίες ενώ ο δείκτης διαύγειας C είναι χρησιμότερος όταν μιλάμε για ανάμιξη διαφόρων πηγών όπως ένα σύνολο μουσικής.

Ο δείκτης $C_{80,3}$, είναι η μέση τιμή των παραμέτρων C για τις συχνότητες των 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz καθώς η ενέργεια σε αυτές τις συχνότητες συντελεί περισσότερο στην διαύγεια του ήχου [1].

5.3.3 Χρονικό Κέντρο Βάρους (Center Time) TS

Άλλος σχετικός δείκτης είναι το Χρονικό Κέντρο Βάρους (Center Time) TS . Αναφέρεται [21] ως ο χρόνος του "κέντρου βάρους" της τετραγωνισμένης κρουστικής απόκρισης (δηλ. της ισχύος $P(t)$ του σήματος της κρουστικής απόκρισης). Είναι ένα μέτρο της αντιληπτικής αίσθησης γύρω από τη γεωμετρία του χώρου και της διαφάνεια του ήχου. Περιγράφεται από το άθροισμα ανακλάσεων του απευθείας ήχου με τους σύμφωνους επόμενους ήχους και το σύνολο της ενέργειας. Όσο μεγαλύτερη η τιμή του, τόσο περισσότερη αίσθηση του χώρου είναι διαθέσιμη. Δίδεται από τον τύπο:

$$TS = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} t \cdot P(t) dt}{\int_{t_1}^{\infty} P(t) dt}. \quad (48)$$

Όλοι οι παραπάνω δείκτες είναι άμεσα σχετιζόμενοι μεταξύ τους. Εξαρτώνται άμεσα από τη θέση της πηγής (ή των πηγών) σε σχέση με τη θέση μέτρησης (ακροατή) και την κατευθυντικότητα της πηγής. Ανταποκρίνονται καλύτερα σε χώρους με όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη πτώση της στάθμης του ήχου. Στοιχεία κακής ακουστικής ενός χώρου όπως ηχώ επηρεάζουν αρνητικά τους δείκτες, απομακρύνοντας τα αποτελέσματα τους από την ακουστική που αντιλαμβάνεται ο άνθρωπος. Για παράδειγμα, μια ηχώ υψηλής στάθμης, μετά το πέρασμα του αρχικού σύντομου χρονικού διαστήματος που λάβαμε για τον υπολογισμού ενός από τους δείκτες θα είναι ξεκάθαρα ακουστή και σίγουρα θα επηρεάσει αρνητικά την καθαρότητα.

5.3.4 Καταληπτότητα της ομιλίας

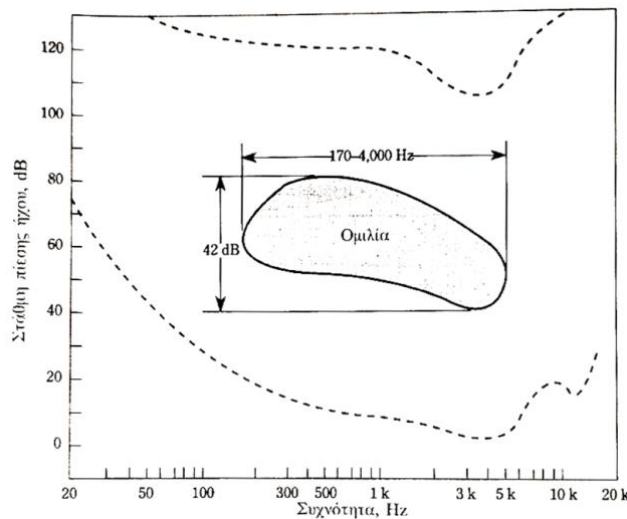
Τα φωνήεντα, λόγω μεγαλύτερης διάρκειας και χαμηλότερης συχνότητας, επικαλύπτουν τα σύντομα και υψίσυχνα σύμφωνα σε ένα χώρο με υψηλή αντήχηση, με αποτέλεσμα τη μείωση της καταληπτότητας τους. Για το λόγο αυτόν έχουν οριστεί διάφοροι δείκτες που υποδηλώνουν την απώλεια και υπερκάλυψη των συμφώνων σε ένα χώρο όπως ο *Articulation Loss of Consonants* ($AL_{CONS\%}$). Αντίστοιχα, δείκτες όπως ο *Speech Transmission Index* (STI) και ο *Rapid Speech Transmission Index* ($RASTI$) περιγράφουν την καταληπτότητα της ομιλίας.

5.3.5 Καταληπτότητα της ομιλίας (Speech Transmission Index) STI

Ο δείκτης *STI* εξαρτάται από το λόγο του ωφέλιμου σήματος προς τον θόρυβο. Λαμβάνει υπόψιν του την φασματική κατανομή ενέργειας της ομιλίας και την διαμόρφωση συχνότητας της φωνής. Για την εκτίμηση του απαιτείται ο υπολογισμός 98 τιμών της συνάρτησης μεταφοράς της διαμόρφωσης, δηλαδή ενός πίνακα τιμών του δείκτη *m*, που είναι συνάρτηση των 7 κεντρικών συχνοτήτων ζωνών οκτάβας (125 Hz – 8 kHz) και των 14 συχνοτήτων διαμόρφωσης ζωνών 1/3 οκτάβας (63 Hz – 12,5 kHz) [1]. Μια απλουστευμένη μορφή του που περιορίζεται σε μικρότερο αριθμό συχνοτήτων είναι ο δείκτης *RASTI*.

Η επιλογή των συχνοτήτων βασίζεται στο συχνοτικό φάσμα που καλύπτει η ανθρώπινη ομιλία (170 Hz – 4 kHz) (Εικόνα 32) το οποίο είναι στενότερο από αυτό των μουσικών ήχων (50 Hz – 8,5 kHz)

Η λεκτική περιγραφή καταληπτότητας ομιλίας αναλόγως τη τιμή του δείκτη *STI* φαίνεται στον Πίνακα 2.



Εικόνα 33: Συχνοτικό περιεχόμενο και δυναμικό εύρος της ανθρώπινης ομιλίας [2].

5.3.6 Απώλεια συμφώνων (Articulation Loss) %ALcons

Η απώλεια συμφώνων (*Articulation Loss of consonants*) εκφράζει το ποσοστό συμφώνων τα οποία ένας μέσος ακροατής δεν δύναται να ακούσει καθαρά και να κατανοήσει. Υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$$\%AL_{cons} = \frac{200 \cdot r^2 \cdot RT_{60}^2}{V}, \quad (49)$$

όπου r η απόσταση του σημείου που εξετάζουμε από τη πηγή. Η σχέση αυτή ισχύει για αποστάσεις $r > 3D_c$. Ο Πίνακας 2 απεικονίζει τη λεκτική περιγραφή καταληπτότητας ομιλίας αναλόγως την τιμή του δείκτη $AL_{cons\%}$.

Χαρακτηρισμός	STI	AL
Εξαιρετική	$1 > STI > 0,75$	$0 > AL > 1,5$
Πολύ καλή	$0,75 \geq STI > 0,60$	$1,5 > AL > 7$
μέτρια	$0,60 \geq STI > 0,45$	$7 > AL > 15$
πτωχή	$0,45 \geq STI > 0,32$	$15 > AL > 35$
κακή	$0,32 \geq STI > 0$	$35 > AL > 60$

Πίνακας 2: Λεκτικός χαρακτηρισμός της καταληπτότητας της ομιλίας με βάση τις τιμές των παραμέτρων STI και $\%AL_{cons}$ [1].

5.3.7 Συνοψίζοντας περί ευκρίνειας και καταληπτότητας του ήχου

Ένα σημαντικό γεγονός που αποκαλύπτουν οι μελέτες για τους παραπάνω δείκτες και έννοιες είναι η συμβολή των πρώιμων ανακλάσεων στην αύξηση της καταληπτότητας και ευκρίνειας του ήχου σε ένα χώρο. Πολλές φορές δίνεται έμφαση στη μείωση του χρόνου αντήχησης, αντί της βελτιστοποίησης των παραπάνω ακουστικών παραμέτρων, με κάθε κόστος, δίχως δηλαδή να λαμβάνονται υπόψη οι σημαντικές και ωφέλιμες ισχυρές πρώιμες ανακλάσεις. Τοποθετώντας έντονα απορροφητικές επιφάνειες στα σημεία από στα οποία γίνονται οι ανακλάσεις αυτές, μειώνουμε τον χρόνο αντήχησης της αίθουσας, μειώνουμε όμως και τις σημαντικές ανακλάσεις οι οποίες βοηθούν τους δείκτες καταληπτότητας και ευκρίνειας.

5.3.8 Δείκτης διωπικής ακρόασης (*Interaural correlation coefficient*) $IACC$

Ο δείκτης $IACC$ αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα στον μαθηματικό υπολογισμό της αίσθησης του χώρου μιας αίθουσας που επηρεάζει την ηχητική άνεση της ακρόασης. Αντίθετα με το χρόνο αντήχησης, είναι ένας υποκειμενικός παράγοντας που συσχετίζει τη γεωμετρία του χώρου με την ανθρώπινη ακοή. Διαχωρίζεται [1] στους δείκτες $IACC_L$ και $IACC_E$, όπου L και E εκφράζουν τις καθυστερημένες (Late) και πρώιμες (Early) ανακλάσεις αντίστοιχα. Επιπλέον οι δείκτες $IACC_{E3}$ και $IACC_{L3}$ αντιστοιχούν στις μέσες τιμές τους για τις συχνότητες

των 500 Hz, 1 kHz και 2 kHz καθώς επιτελούν το σημαντικότερο ρόλο. Υπολογίζεται από τον τύπο:

$$IACF_t = 10 \log \frac{\int_{t_1}^{t_2} P_L(t) P_R(t + \tau) dt}{(\int_{t_1}^{t_2} P_L^2 \int_{t_1}^{t_2} P_R^2 t dt)^{1/2}}, \quad (50)$$

όπου L και R αντιστοιχούν στις τιμές πίεσης για το αριστερό (Left) και δεξί (Right) αντί αντιστοιχα και ο συντελεστής τ προσωμοιάζει τις χρονικές διαφορές μεταξύ των δυο αυτιών που φθάνουν μέχρι και το 1 msec και λαμβάνει τιμές $-1 \leq \tau \leq +1$, αναλόγως τη γωνία της πηγής ως προς την ευθεία του κεφαλιού. Για μηδενική γωνία πηγής ως προς τον ακροατή λαμβάνει μηδενική τιμή.

Για απλοποίηση των αποτελεσμάτων έχει εισαχθεί ο δείκτης $IACC_t$ ο οποίος εκφράζεται ως: $IACC_t = |IACC_{t(\tau)}|_{max}$, για $-1 \leq \tau \leq +1$. Τα χρονικά όρια υπολογισμού είναι 0 – 80 ms για τον $IACC_E$ και 80 – 1000 ms για τον $IACC_L$.

5.3.9 Δείκτης πλευρικών ανακλάσεων (Lateral Energy Fraction) (LEF ή LF)

Αντίστοιχα, ο δείκτης πλευρικών ανακλάσεων εκφράζει το ποσοστό των πλευρικών ανακλάσεων ως προς τη συνολική διάρκεια του ήχου [1]. Για τη μέτρηση του χρησιμοποιούνται ένα μικρόφωνο που δεν μετρά τα απευθείας ηχητικά κύματα και ένα μη-κατευθυντικό μικρόφωνο. Αποτελεί το μοναδικό συντελεστή υπολογισμό των πλευρικών ανακλάσεων σε μια αίθουσα, μια σύγκριση του απευθείας ήχου προς όλες τις άλλες ανακλάσεις από οποιαδήποτε κατεύθυνση. Υπολογίζεται ως ποσοστό της σχέσης του σήματος μεταξύ των δυο μικροφώνων από τη σχέση:

$$LF = \frac{\int_{5\text{ ms}}^{80\text{ ms}} P_L^2(t) dt}{\int_{0\text{ ms}}^{80\text{ ms}} P^2(t) dt}, \quad (51)$$

όπου P_L , P η στάθμη των δυο μικροφώνων.

Ο δείκτης LF_4 δίνει τη μέση τιμή για τις συχνότητες των 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz και 1 kHz.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [34], έχουν προταθεί και άλλες μέθοδοι μέτρησης του δείκτη πλευρικών ανακλάσεων στα αποτελέσματα των οποίων λαμβάνεται υπόψιν και η κατεύθυνση προέλευσης των πρώτων ανακλάσεων, χρησιμοποιώντας συστοιχίες μικροφώνων. Η σημαντικότητα του δείκτη αυτού είναι μεγάλη καθώς καθορίζει την αίσθηση του εύρους της πηγής. Η συγκεκριμένη

μελέτη αφορά μικρούς χώρους ελέγχου σε στούντιο όμως τονίζεται η σημαντικότητα του δείκτη σε κάθε χώρο.

5.3.10 Απολαβή Δωματίου (Room Gain ή Strength Factor) G

Η απολαβή δωματίου είναι ο λόγος της στάθμης ηχητικής πίεσης που καταφθάνει σε συγκεκριμένο σημείο του χώρου ως προς την αντίστοιχη στάθμη που καταφθάνει από την ίδια πηγή σε ελεύθερο πεδίο. Εξαρτάται και αυτός από τη συχνότητα και ουσιαστικά μετράει το αίσθημα ακουστότητας (Loudness) του ήχου στο χώρο. Έχει μονάδα το dB και υπολογίζεται από τον τύπο [1]:

$$G_{t_1} = 10 \log \frac{\int_0^{t_1} P_L^2(t) dt}{\int_0^{t_1} P_A^2(t) dt}, \quad (52)$$

όπου P_A η στάθμη στο ελεύθερο πεδίο. Και σε αυτή τη περίπτωση οι δείκτες ολοκλήρωσης t_1 συνήθως είναι τα 80 ms. Χρησιμοποιείται και ως δείκτης αποτελεσματικότητας των ανακλάσεων για μετρήσεις που έχουν ληφθεί με χρήση φίλτρου A . Μειώνεται με την αύξηση της απόστασης από τη πηγή. Συμβολίζεται και ως G_L , G_M και G_{10} για χαμηλές, μεσαίες συχνότητες και τον προσδιορισμό των 10 m απόστασης αντίστοιχα.

5.3.11 Ακουστικές παράμετροι δωματίου (Room Acoustic Parameters) RAP

Οι ακουστικές παράμετροι που παρουσιάστηκαν συχνά συναντώνται με τη συντομογραφία RAP (Room Acoustic Parameters) [33] και αποτελούν μια σύνοψη στον τομέα της ακουστικής κλειστών χώρων όλων των αντικειμενικών ακουστικών παραμέτρων που προτάθηκαν από τις μελέτες του τελευταίου αιώνα. Γίνεται μια προσπάθεια κατηγοριοποίησης τους σε ένα πεδίο με τεράστια πολυπλοκότητα. Οι μεγάλες διαφορές των ακουστικών παραμέτρων που παρουσιάστηκαν ανά περιόδους, που λαμβάνουν υπόψιν τους υποκειμενικά κριτήρια σε συνδυασμό με την πληθώρα διαφορετικών περιπτώσεων αιθουσών και ειδών μουσικής, δυσχεραίνουν το έργο αυτό. Επιπλέον, αναγνωρίζεται πως η ομοιόμορφη κατανομή καθενός εξ' αυτών σε όλες τις θέσεις του ακροατηρίου οποιασδήποτε αίθουσας αποτελεί ένα δύσκολο έργο. Γίνεται επίσης λόγος περί αναθεώρησης της κοινής θέσης πως ο έλεγχος του χρόνου αντήχησης αποτελεί το βασικό εργαλείο στην μελέτη της ακουστικής ενός χώρου.

5.4 Χρήση Λογισμικών

Η χρήση λογισμικών ηλεκτρονικού υπολογιστή για σχεδιασμό ενός χώρου και η εξαγωγή των ακουστικών χαρακτηριστικών του είναι όλο και πιο διαδεδομένη. Η δυνατότητα υπολογισμού γιγάντιου αριθμού πράξεων σε σύντομες χρονικές διάρκειες δίνει τη δυνατότητα στον μηχανικό ήχου να παρατηρήσει τις μεταβολές στους ακουστικούς δείκτες που θα προκύψουν από τις παρεμβάσεις του, επιτρέποντας του να προβεί σε αλλαγές μέχρις ότου επιτύχει τα ιδανικά αποτελέσματα. Τέτοια λογισμικά όπως το CATT-Acoustic, το Odeon και το EASE κάνουν χρήση της γεωμετρικής ακουστικής. Σημειώνεται πως [44] τα προαναφερθέντα λογισμικά δεν κάνουν χρήση της κυματικής εξίσωσης και πως εμφανίζουν περιορισμούς καθώς η επίδραση του μεγέθους και των λεπτομερειών των επιφανειών σε σχέση με το μήκος κύματος δεν ανταποκρίνονται στα πραγματικά φαινόμενα με πλήρης ακρίβεια, αλλά με προσεγγίσεις. Σημειώνεται πως, παρόλο που η χρήση τους είναι σχετικά εύκολη και δεν απαιτεί γνώση σε βάθος, απαιτείται βαθύτερη γνώση των φαινομένων διάδοσης του ήχου για καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων [44] [45]. Το CATT-Acoustic χρησιμοποιεί τη μέθοδο εντοπισμού ακτίνων (Ray Tracing) για την εξαγωγή αποτελεσμάτων με τη μορφή χαρτών εντός ορισμένης επιφάνειας ακρόασης [46]. Για περισσότερη λεπτομέρεια χρησιμοποιεί τη μέθοδο RTC (Randomised Tail-Corrected Cone-Tracing) ένα συνδυασμό τριών μεθόδων (Image Source, Direct Diffuse και Randomized Cone-Tracing) που εκμεταλλεύονται τα δυνατά σημεία υπολογισμού της κάθε μεθόδου [46].

Περιορισμοί στη χρήση λογισμικών

1. Δεν απεικονίζεται ακριβώς ο χώρος με κάθε του λεπτομέρεια, ειδικά σε ότι επηρεάζει την διάχυση και τις ανακλάσεις. Έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες σύγκρισης μεταξύ μοντέλων με μεγάλη πιστότητα στον σχεδιασμό κλειστών χώρων καθώς και απλοποιημένων εκδόσεων τους, με τα αποτελέσματα να προτείνουν πως μια μείωση της ανάλυσης των επιφανειών του χώρου στο 80% δεν επιφέρει σημαντικές αλλοιώσεις στα αποτελέσματα, με το ποσοστό αυτό να μεταβάλλεται αναλόγως της ακουστικής παραμέτρου που εξετάζουμε [45].
2. Δεν μπορούμε να έχουμε απολύτως σωστή γνώση των συντελεστών απορρόφησης και διάχυσης για τα υλικά με τον ακριβή τρόπο με τον οποίο είναι τοποθετημένα στην προς μελέτη αίθουσα, με αποτέλεσμα να διαφέρουν από τις εργαστηριακές μετρήσεις. Παρόλα αυτά, η όσο το δυνατόν πιστότερη επιλογή των παραπάνω θα οδηγήσουν σε αποτελέσματα που προσεγγίζουν καλύτερα τα πραγματικά ακουστικά χαρακτηριστικά του χώρου [44].

Πέραν του ακουστικού σχεδιασμού, τα παραπάνω λογισμικά δύνανται να προσομοιάσουν την συμπεριφορά ηχείων σημειακών πηγών καθώς και συστημάτων Line Array. Σημειώνεται [46] η σημαντικότητα της λεπτομερούς απεικόνισης των κατευθυντικών χαρακτηριστικών των πηγών και στο εγγύς πεδίο, αντικείμενο μελέτης κατασκευαστών και μελετητών τέτοιου είδους συστημάτων.

Συσχετισμός ακουστικών παραμέτρων, κριτήρια ιεράρχησης και ιδανικές τιμές

6.1 Στοιχεία καλής ακουστικής ενός χώρου

Οι ιδανικές τιμές των ακουστικών παραμέτρων ενός χώρου εκδηλώσεων καθορίζονται αναλόγως της χρήσης του. Βασικές προϋποθέσεις είναι να υπάρχει άνεση της ακρόασης στο ακροατήριο και να μπορούν οι ακροατές να ακούσουν καθαρά τους ήχους που προέρχονται από τις πηγές (ομιλητές, μουσικά όργανα κ.τ.λ.) που βρίσκονται στη σκηνή. Η ομοιόμορφη κατανομή του ήχου που καταφθάνει σε όλη την έκταση του ακροατηρίου καθώς και η αποφυγή σε ορισμένα σημεία να ακούγεται δυνατώτερα ή πιο καθαρά ή πιο "μπουκωμένα" ή "μουντά", έναντι άλλων σημείων, να είναι το κλειδί για μια καλή ακουστική μελέτη. Οι ακουστικές παράμετροι, όπως είπαμε θα διαφέρουν αν η αίθουσα χρησιμοποιείται για ομιλίες ή συναυλίες. Διαφορετικά θα είναι μάλιστα αναλόγως του τύπου της μουσικής που θα παίζεται αλλά και του όγκου της αίθουσας. Για παράδειγμα, χορωδιακά σύνολα θα απαιτούν περισσότερη "λαμπρότητα" σε σχέση με άλλους τύπους μουσικής ή ομιλία.

Ένα ιδανικό διάχυτο πεδίο πρέπει να πληροί τις παρακάτω προϋποθέσεις [1]:

1. Οι ανωμαλίες στην διάδοση των ηχητικών κυμάτων σε έναν χώρο που λαμβάνονται από μετρήσεις σταθερής κατάστασης πρέπει να είναι αμελητέες.
2. Οι διακυμάνσεις στην καμπύλη εξασθένησης ιδανικά πρέπει να είναι ελάχιστες και η ίδια η καμπύλη απόσβεσης του ήχου να είναι τέλεια εκθετική στην λογαριθμική κλίμακα, δηλαδή ευθεία. Η ομοιομορφία αυτή πρέπει να ισχύει σε όλες τις συχνότητες και να είναι ανεξάρτητη από τα κατευθυντικά χαρακτηριστικά του μικροφώνου μέτρησης.
3. Ο χρόνος αντήχησης να είναι ίδιος σε κάθε θέση του χώρου.

6.2 Αίσθηση χώρου

Η τελική αίσθηση του χώρου που θα δημιουργηθεί στον ακροατή θα είναι αποτέλεσμα της άθροισης του συνόλου των ήχων που θα καταφθάνουν στα αυτιά του και μέσω της σύγκρισης των σχετικών τους εντάσεων, χρόνων άφιξης και κατεύθυνσης προέλευσης τους θα καθορίζεται το τελικό αποτέλεσμα. Όλα αυτοί οι παράγοντες διαμορφώνονται από τη γεωμετρία του χώρου, της

τοποθέτησης της απορρόφησης, της συμβολής των ανακλαστικών και διαχυτικών επιφανειών που τον απαρτίζουν, καθώς και την απόσταση και τοποθέτηση της πηγής, ή των πηγών, σε σχέση με το σημείο παρατήρησης ή μέτρησης. Ιδιαίτερος λόγος γίνεται για τη συμβολή των πλευρικών τοίχων οι οποίοι καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό το εύρος της πηγής [37].

6.3 Συσχετισμός ακουστικών παραμέτρων, κριτήρια ιεράρχησης και ιδανικές τιμές

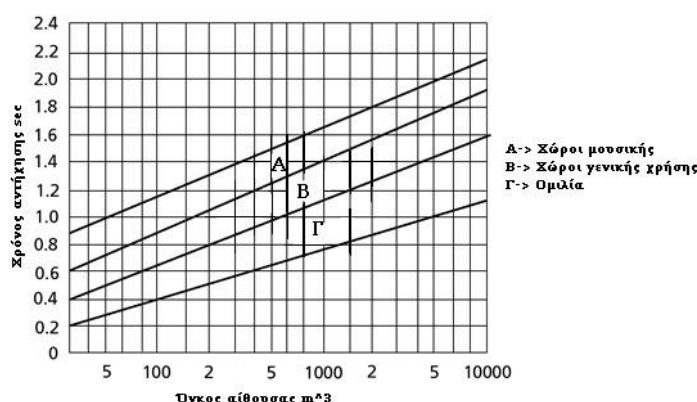
Γίνεται κατανοητή η πλήρης και άμεση συσχέτιση όλων των ακουστικών παραμέτρων που αναφέρθηκαν. Οι ιδανικές τιμές τους διαφέρουν αναλόγως την χρήση της αίθουσας, εμφανίζοντας διαφορετική βαρύτητα ανά περίπτωση. Έχει προταθεί [41] συγκεκριμένη ιεράρχηση τους κατά μια σειρά σημαντικότητας. Ενδεικτικά παρουσιάζεται η σειρά:

1. $1 - IACC_{E3}$ και EDT με προτίμηση 50%.
2. SDI και G_M με προτίμηση 30%.
3. RT_{60} και BR με προτίμηση 20%.

6.4 Ιδανικές τιμές ακουστικών παραμέτρων για χώρους ομιλιών

6.4.1 Αίθουσες ομιλιών

Σύμφωνα με [1] ένας ιδανικός χρόνος αντήχησης για μια αίθουσα ομιλιών, συνεδρίων ή θέατρο θα πρέπει να είναι περίπου 1 sec στις περιοχές των μεσαίων συχνοτήτων. Ο χρόνος αυτός βέβαια είναι ανάλογος με τον όγκο της αίθουσας, όπως φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 34).



Εικόνα 34: Προτεινόμενος χρόνος αντήχησης αίθουσας αναλόγως της χρήσης της σε συνάρτηση με τον όγκο της [67].

Η συμβολή των πρώιμων ανακλάσεων κρίνεται σημαντική για την υποβοήθηση (αύξηση αντιληπτής στάθμης) του απευθείας ήχου. Σημειώνεται πως η μελέτη πρέπει να γίνεται για διαφορετικές τιμές πληρότητας ακροατών της αίθουσας, καθώς οι διάφορες παράμετροι δύναται να ποικίλουν έντονα για τα σενάρια μεγάλης, μεσαίας και μικρής πληρότητας ακροατών. Τα καθίσματα επίσης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

- Ο προτεινόμενος χρόνος αντήχησης πρέπει ιδανικά να είναι σταθερός για συχνότητες από 125 Hz μέχρι και 4 kHz, ενώ στις χαμηλές και υψηλές συχνότητες μια τυπική απόκλιση της τάξης 25% – 30% είναι γενικώς αποδεκτή. Ειδικά στις χαμηλές συχνότητες, ενώ η αύξηση του χρόνου αντήχησης μπορεί να επιθυμητή σε αίθουσες μουσικής, σε αίθουσες ομιλιών μπορεί να μειώσουν δραστικά τους δείκτες διαύγειας, καταληπτότητας και ευκρίνειας. Σημειώνεται [1] επίσης πως η χρήση ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης, ενώ μπορεί να βοηθήσει τον απευθείας ήχο από την πηγή στους ακροατές μπορεί παράλληλα να ενισχύσει και όλα τα αρνητικά φαινόμενα, καθώς ενισχύεται και το αντηχητικό πεδίο.

Ένας εμπειρικός τύπος υπολογισμού του ιδανικού χρόνου αντήχησης για αίθουσα συγκεκριμένου όγκου, για χρήση ομιλιών είναι ο εξής:

$$RT_{60} = 0,7 + 0,435 \cdot \log_{10} \left(\frac{V}{1000} \right), \quad (53)$$

όπου ισχύει για όγκους $300 \text{ m}^3 \leq V \leq 30000 \text{ m}^3$. Σύμφωνα με [1], όγκοι μεγαλύτεροι από 30000 m^3 πρέπει να αποφεύγονται για χώρους ομιλιών.

Επιπλέον:

- Ο *EDT* πρέπει να μην διαφέρει πολύ από τον RT_{60} αλλά να είναι μικρότερος του. Ιδανικό εύρος τιμών μεταξύ $0,8RT_{60} \leq EDT \leq RT_{60}$.
- Οι τιμές του δείκτη C_{50} για καλή ευκρίνεια του λόγου να είναι ίσες ή μεγαλύτερες από το μηδέν.
- Οι τιμές του δείκτη C_{80} θα εμφανίζουν ικανοποιητικά αποτελέσματα για τιμές $4 \text{ dB} \leq C_{80} \leq 7 \text{ dB}$. Για μεγαλύτερες τιμές ο φυσικός ήχος μπορεί να απωλέσει μέρος της "ζωντάνιας" του και της πυκνότητας των τόνων που τον απαρτίζουν.
- Οι ιδανικές τιμές του δείκτη διαύγειας και D_{50} να κυμαίνονται μεταξύ $50 \leq D_{50} \leq 70$.
- Ο δείκτης πλευρικών ανακλάσεων *LF* ιδανικά παίρνει τιμές κοντά στο 0,25 που σημαίνει ικανοποιητική αίσθηση κατευθυντικότητας του ήχου της πηγής αλλά και σημαντικό ποσοστό πρώτων πλευρικών ανακλάσεων.
- Οι προτεινόμενες τιμές του G_M να είναι θετικές, ιδανικά μεγαλύτερες από 3 dB.
- Οι επιθυμητές τιμές του δείκτη *TS* για ομιλία είναι μεταξύ 60~80 ms.

- Οι τιμές των ακουστικών παραμέτρων STI και $ALcons\%$ και η σχέση τους με την υποκειμενική εκτίμηση της κατανόησης της ομιλίας ορίστηκαν στην προηγούμενη ενότητα (Πίνακας 2).

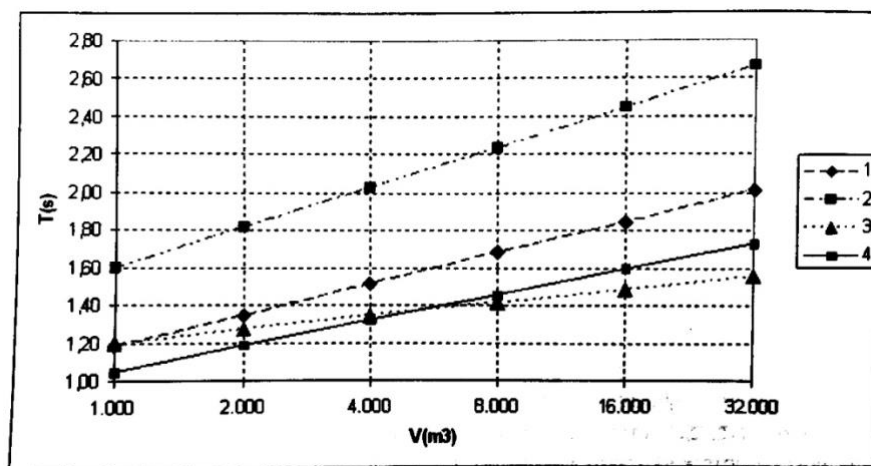
6.4.2 Αίθουσες μουσικής γενικής χρήσης

- Οι ιδανικές τιμές του χρόνου αντήχησης σε αυτή τη κατηγορία ποικίλουν ανά μουσικό είδος. Διαφορετικές τιμές προτείνονται για όπερες, ορχήστρες, μουσικής δωματίου, σύγχρονη μουσική, όπου συνηθίζεται η χρησιμοποίηση συστημάτων ενίσχυσης ήχου, αλλά και για αίθουσες χορού. Διαβάζουμε στη βιβλιογραφία [1] πως για έργα με εκκλησιαστικό όργανο, χρόνοι αντήχησης της τάξης των 3 sec είναι επιθυμητοί ενώ για πιάνο με γρήγορο παίξιμο (15-20 νότες ανά δευτερόλεπτο) ο αντίστοιχος χρόνος είναι πολύ μικρότερος. Στην ίδια πηγή διαβάζουμε πως για μια συναυλία με έργα του Mozart προτείνεται δείκτης $C_{80} = 0 \mp 1,6$ dB ενώ για έργα του Wagner $C_{80} = -3,3 \mp 1,8$ dB. Ακολουθεί ενδεικτικός Πίνακας (Πίνακας 3), με τους βέλτιστους χρόνους αντήχησης για συγκεκριμένα έργα γνωστών συνθετών:

Συνθέτες και έργα	41η Mozart	4η Brahms	Le Sacre Stravniski
$RT_{60}(\text{sec})$	1,55 sec	2,1 sec	1,45 sec

Πίνακας 3: Προτεινόμενοι χρόνοι αντήχησης για έργα γνωστών συνθετών [1].

Παρατηρούμε πως ο προτεινόμενος ιδανικός χρόνος αντήχησης ποικίλει και είναι άμεσα εξαρτώμενος με την ταχύτητα εκτέλεσης των μουσικών οργάνων στα συγκεκριμένα κομμάτια. Γρήγορο παίξιμο απαιτεί μικρότερο χρόνο αντήχησης ενώ έργα με πιο αργούς ήχους ακούγονται, υποκειμενικά πάντα, καλύτερα σε αίθουσες με μεγαλύτερους χρόνους αντήχησης. Με την παραπάνω δήλωση συμφωνούν και άλλες πηγές της παρούσας διπλωματικής [2] [41].



Εικόνα 35: Προτεινόμενοι χρόνοι αντήχησης αναλόγως τον όγκο της αίθουσας για τα εξής μουσικά είδη: 1) συμφωνική μουσική, 2) ρομαντική μουσική, 3) προκλασσική μουσική, 4) μουσική δωματίου [1].

Από το παραπάνω διάγραμμα (Εικόνα 35) παρατηρούμε επιπλέον την αύξηση του προτεινόμενου χρόνου αντήχησης ανά μουσικό είδος, συναρτήσει της αύξησης του όγκου της αίθουσας. Οι χρόνοι που απεικονίζονται προέρχονται από τον παρακάτω τύπο:

$$RT_{60} = \beta + \alpha \cdot \log_{10} \left(\frac{V}{1000} \right), \quad (54)$$

με τις τιμές των συντελεστών α, β , για κάθε μουσικό είδος να διαμορφώνονται σύμφωνα με τον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 4).

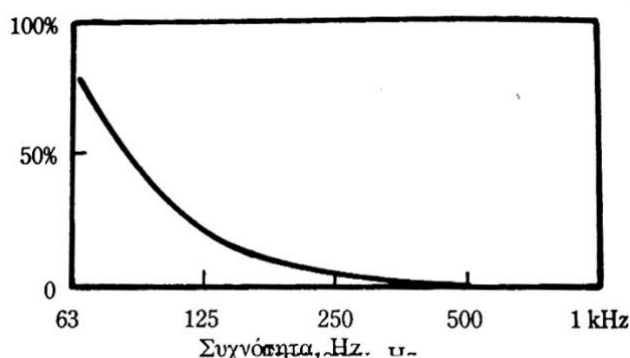
Μουσικό είδος	1. Συμφωνική ορχήστρα	2. Ρομαντική μουσική	3. Προκλασσική μουσική	4. Μουσική δωματίου
α	0,32	0,71	1,77	0,55
β	1,20	1,60	2,00	1,18

Πίνακας 4: Συντελεστές α και β του τύπου υπολογισμού ιδανικού χρόνου αντήχησης ανά μουσικό είδος με βάση των όγκο της αίθουσας [1].

Έπειτα από μελέτες [41] έχει διατυπωθεί πως αίθουσες συναυλιών, ανεξαρτήτου μεγέθους πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 1,8 – 2,0 sec. Τιμές που ξεπερνούν τα 2,2 sec στις μέρες μας δεν είναι επιθυμητές.

Αξίζει να σημειωθεί πως μελέτες υποκειμενικών κρίσεων έχουν δείξει [2] πως εμφανίζεται μια σχετική ανοχή σε μεγαλύτερους χρόνους αντήχησης χαμηλών συχνοτήτων, χωρίς να μειώνεται η ποιότητα των ακουστικών

χαρακτηριστικών της αίθουσας. Αντιθέτως, προσθέτουν "ηχηρότητα", ειδικά για μουσικούς ήχους (Εικόνα 36).



Εικόνα 36: Επιτρεπτή αύξηση χρόνου αντήχησης στις χαμηλές συχνότητες [2].

- Από την ίδια πηγή λαμβάνουμε πως ιδανικοί χρόνοι EDT θεωρούνται αυτοί που ικανοποιούν το λόγο $\frac{EDT}{RT_{60}} \approx 1,25 \text{ sec}$ [1][41].
- Ο δείκτης C_{80} , ως μέσος όρος για τις ζώνες με κεντρικές συχνότητες τα 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, είναι επιθυμητό να λαμβάνει τιμές μεταξύ $-2,5 \text{ dB} \geq C_{80} \geq -3,5 \text{ dB}$ ή, με περισσότερη ανοχή, τιμές μεταξύ $-1 \text{ dB} \geq C_{80} \geq -4 \text{ dB}$. Στην πράξη, σε μετρήσεις που έγιναν σε διάφορες αίθουσες συναυλιών ανά τον κόσμο που ξεχωρίζουν για την ακουστική τους, υπήρξαν μεγάλες αποκλίσεις από τις ιδανικές τιμές. Οι μετρήσεις έγιναν σε άδειες από κοινό αίθουσες [1]. Από άλλες πηγές [41] λαμβάνουμε ιδανικές τιμές του δείκτη για μουσική μεταξύ $-3 \text{ dB} \leq C_{80} \leq +4 \text{ dB}$ ή $-2 \text{ dB} \leq C_{80} \leq +2 \text{ dB}$, πράγμα που επιβαιβεώνει τη διατύπωση πως οι ιδανικές τιμές μπορεί να ποικίλουν.
- Η ιδανική τιμή του δείκτη BR για αίθουσες με υψηλό χρόνο αντήχησης ($RT_{60} \approx 1,8 \sim 2,0 \text{ sec}$) να κυμαίνονται μεταξύ $1,1 \leq BR \leq 1,25$ [41] ο οποίος να αυξάνει γραμμικά καθώς μειώνεται ο RT_{60} . Σε άλλες πηγές [36] προτείνονται τιμές $1,1 \leq BR \leq 1,40$.
- Στις μετρήσεις αιθουσών με αντικειμενικά καλή ακουστική, ο δείκτης G_M εμφανίζεται ελαφρώς μεγαλύτερος από τον δείκτη G_L , με τιμές από 2 dB έως 9 dB και αποκλίσεις μέχρι 2,1 dB. Και οι δυο εμφανίζουν μείωση όσο αυξάνεται ο όγκος του χώρου.
- Οι προτείνονται τιμές για τους δείκτες $1 - IACC_{E4} = 0,62 \sim 0,71$ [41]. Σε άλλες πηγές [36] βλέπουμε προτεινόμενες τιμές του δείκτη $IACC_{E3}$ μικρότερες του 0,40.
- Προτεινόμενη τιμή $LF_{E4} = 0,17 \sim 0,23$ [41], ενώ σε άλλες πηγές [36] προτείνονται τιμές του δείκτη LF μεταξύ 0,1 και 0,35.

- Οι επιθυμητές τιμές του δείκτη TS για μουσική κυμαίνονται μεταξύ 70~150 ms [41].
- Καλές περιοχές τιμών του δείκτη LE είναι μεταξύ -5 dB και -1 dB [41].
- Καλές περιοχές τιμών του δείκτη $LEF2$ είναι μεταξύ 0.10 dB και 0.25 dB [41].
- Μελέτες [37] συσχετίζουν τον δείκτη G και τον δείκτη LF με βάση τη γεωμετρία του χώρου συγκρίνοντας τις τιμές διαφόρων πραγματικών αιθουσών, έπειτα από μετρήσεις. Ειδική βαρύτητα δίνεται στο πλάτος της αίθουσας, που στη περίπτωση μας αποτελεί την μεγαλύτερη διάσταση, πράγμα αναμενόμενο καθώς μεγάλο μέρος των πλευρικών ανακλάσεων προέρχεται από τους πλευρικούς τοίχους. Από την παραπάνω σύγκριση προκύπτει πως σε περιπτώσεις σολίστ ή μικρών μουσικών συνόλων με σχετικά χαμηλά επίπεδα εκπομπής στάθμης ηχητικής πίεσης από τις πηγές (όργανα), μεγάλες τιμές του δείκτη G δύναται να παρέχουν ευνοϊκά υποκειμενικά ακουστικά αποτελέσματα. Σε ορχήστρες με μεγαλύτερες στάθμες ηχητικής πίεσης οι προτεινόμενες τιμές είναι κοντά στα 5 dB. Γίνεται άμεσος συσχετισμός με τον δείκτη LF . Αναφέρεται πως πολλές αίθουσες της μελέτης εμφανίζουν τιμές μεταξύ 20%~25% με τις τιμές στο άνω άκρο να οδηγούν σε πιθανή μετατόπιση της κατεύθυνσης προέλευσης του ήχου της πηγής. Από τα παραπάνω και λόγω γεωμετρίας της αίθουσας με την οποία ασχολείται η παρούσα διπλωματική αναμένονται υψηλές τιμές του δείκτη LF .

6.4.3 Αίθουσες μουσικής δωματίου

Στην κατηγορία αυτή εξετάζονται αίθουσες που προορίζονται για χρήση συνόλων μουσικής δωματίου τα οποία είναι σύνολα με μικρότερο αριθμό οργάνων (πηγών) έναντι αυτών μιας μεγάλης ορχήστρας και συνήθως είναι χώροι όπου θεατές και ορχήστρα βρίσκονται στον ίδιο χώρο. Η σκηνή δηλαδή δεν θεωρείται ξεχωριστός χώρος. Η μουσική αυτή απαιτεί υψηλή ευκρίνεια.

- Ένα μεγάλο ποσοστό πολλών αιθουσών ανά το κόσμο που κατασκευάστηκαν και εκτελέστηκαν για πρώτη φορά τέτοια έργα είχαν χρόνο αντήχησης που κυμαινόταν μεταξύ 1,1 sec ~2,0 sec με πολλές εκ των οποίων να ήταν κοντά στο 1,5 sec [1].
- Οι αντίστοιχες μέσες τιμές του λόγου $\frac{EDT}{RT_{60}}$ κυμαίνεται μεταξύ 1,7~1,9 [1].
- Οι μέσες τιμές του δείκτη BR κυμαίνονται μεταξύ 1~1,15 [1].
- Σχετικά με τον δείκτη G_M , οι αίθουσες στην Ευρώπη εμφάνιζαν μέση τιμή από 12,4 dB ενώ οι αντίστοιχες Ιαπωνικές 9,9 dB . Στην βιβλιογραφία [41], για αίθουσες με κοινό λιγότερο από 700 άτομα προτείνονται τιμές μεταξύ 9~13 dB.
- Ο δείκτης C_{80} δεν εμφάνιζε σε καμία κατηγορία κάποια ομοιομορφία μεταξύ των αιθουσών καθώς λαμβάνει τιμές από -3 dB~3 dB [1].

- Αντίστοιχα, ο δείκτης $1 - IACC_{E4}$ εμφάνιζε μέσο όρο 0,72 με σχετικά μεγάλες διακυμάνσεις 0,67~0,77 [1].

Σημειώνεται πως και σε αυτή τη περίπτωση, η ομοιομορφία της κατανομής των προτεινόμενων τιμών των παραπάνω ακουστικών παραμέτρων στο χώρο είναι εξαιρετικά σημαντική για την συνολική ακουστική ποιότητα του χώρου.

6.4.4 Επιπλέον τύπος υπολογισμού ιδανικού χρόνου αντήχησης αναλόγως του όγκου και της χρήσης

Ένας ακόμη τύπος υπολογισμού του ιδανικού χρόνου αντήχησης μιας αίθουσας αναλόγως τον όγκο της και με βάση τη χρήση της είναι ο εξής [68]:

$$RT_{60} = A \cdot \log V + B, \quad (55)$$

όπου A και B συντελεστές που λαμβάνουν τιμές σύμφωνα με τον πίνακα 5.

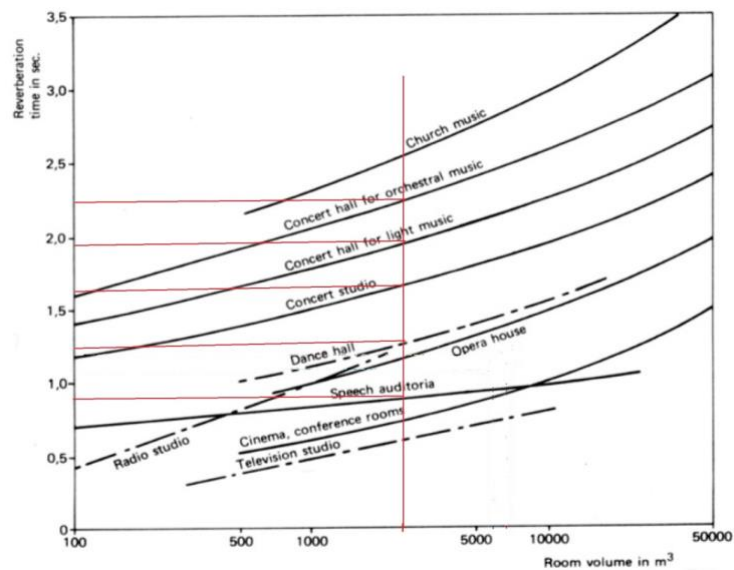
Είδος χώρου	A	B
Καθολικοί ναοί - Αίθουσες συναυλιών	0,4	0,22
Ναοί διαμαρτυρόμενων	0,35	0,19
Ορθόδοξες εκκλησίες - Όπερες	0,3	0,16
Κινηματογράφοι - Αίθουσες μουσικής	0,22	0,11
Χώροι διαλέξεων - Στούντιο	0,20	0,11
Χώροι ελέγχου	0,11	0,148

Πίνακας 5: Συντελεστές A, B του δεύτερου τύπου υπολογισμού του ιδανικού χρόνου αντήχησης αίθουσας συγκεκριμένου όγκου αναλόγως τη χρήση του [68].

6.4.5 Βιβλιογραφική αναζήτηση ιδανικού χρόνου αντήχησης

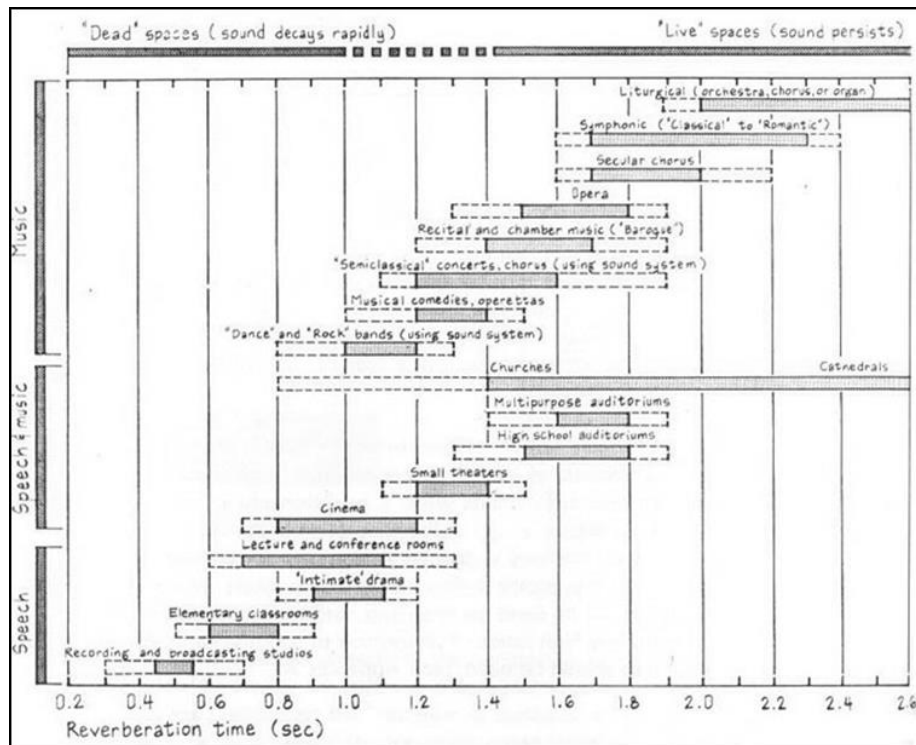
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται επιπλέον Διαγράμματα (Εικόνες 37, 38) που δείχνουν τον ιδανικό χρόνο αντήχησης κλειστού χώρου αναλόγως τον

όγκο και τη χρήση του. Οι υπό-περιπτώσεις σε κάθε κατηγορία είναι πολλαπλές και στη συγκεκριμένη αίθουσα φιλοξενούνται πολλοί εξ' αυτών.



Εικόνα 37: Διάγραμμα προτεινόμενων χρόνων αντήχησης αίθουσας συγκεκριμένου όγκου για πολλαπλές χρήσεις (Α) [26].

Στην παραπάνω Εικόνα (Εικόνα 37) με κόκκινο χρώμα αποτυπώνεται η περίπτωση της αίθουσας Στούντιο του Μεγάλου Χορού Καλαμάτας με βάση τον όγκο που εμφανίζει. Το διάγραμμα της Εικόνας 38 που ακολουθεί επιλέχθηκε καθώς παρουσιάζει πολλές και διαφορετικές κατηγορίες, ανάμεσα τους και το "Dance" and "Rock" bands (using sound system)", χορευτικά και ροκ συγκροτήματα που χρησιμοποιούν συστήματα ενίσχυσης, με προτεινόμενους ιδανικούς χρόνους αντήχησης μεταξύ 1,00 sec και 1,20 sec. Αντίστοιχες τιμές για αίθουσες πολλαπλών χρήσεων βλέπουμε τα 1,60 sec με 1,80 sec, ρεσιτάλ, μουσική δωματίου 1,40 sec με 1,60 sec και αίθουσες διαλέξεων και συνεδρίων τιμές μεταξύ 0,7 sec και 1,1 sec. Τα όρια των τιμών αντιστοιχούν σε διαφορετικούς όγκους με τη δικιά μας περίπτωση να πλησιάζει τα άνω όρια των παραπάνω τιμών. Επιπλέον με διακεκομμένη γραμμή φαίνεται πως υπάρχει μια ανοχή 0,10 sec στα άνω και κάτω όρια.



Εικόνα 38: Διάγραμμα προτεινόμενων χρόνων αντήχησης αίθουσας συγκεκριμένου όγκου για πολλαπλές χρήσεις (B) [24] [25].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:

Το Studio (Black Box) του Μεγάρου Χορού Καλαμάτας. Μετρήσεις και σχεδιασμός στο CATT-Acoustic

7.1 Γνωριμία με το χώρο

Ο συγκεκριμένος χώρος αποτελεί τη μικρή σκηνή (ή "μεγάλη αίθουσα δοκιμών" με βάση τα αρχιτεκτονικά της σχέδια) του Μεγάρου Χορού Καλαμάτας. Χαρακτηρίζεται ως "Black Box" λόγω της «ουδετερότητας» της του από αισθητικής πλευράς, δίχως καλλωπιστικά, διακοσμητικά στοιχεία, χρώματα, αντικείμενα κ.τ.λ. Το σκεπτικό πίσω από αυτή την "ουδετερότητα" είναι η προσαρμογή του χώρου κάθε φορά, αναλόγως της εκδήλωσης που φιλοξενεί, μέσω σκηνικών, φωτισμών κ.τ.λ. Ουσιαστικά η αίθουσα μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα μεγάλο κενό κουτί σχετικά τετράγωνης γεωμετρίας με έξι σειρές ξύλινων κερκίδων για τους ακροατές στην μια πλευρά που δύναται να φιλοξενήσουν περίπου 200-250 άτομα. Συχνά τοποθετούνται επιπλέον καρέκλες στο μέρος της σκηνής από την πλευρά των κερκίδων για αύξηση του ακροατηρίου.

Οι εκδηλώσεις που λαμβάνουν χώρα στο Studio ποικίλουν, με τις παραστάσεις, σεμινάρια και πρόβες χορού αλλά και συναυλίες, σεμινάρια και πρόβες διαφόρων ειδών μουσικής (από σόλο και ρεσιτάλ μέχρι μουσική δωματίου και χορωδίες) να αποτελούν τις συχνότερες. Ακολουθούν διαλέξεις και ομιλίες, αφηγήσεις παραμυθιών, εκθέσεις καλλιτεχνικών όπως ζωγραφικής, θέατρο, κουκλοθέατρο κ.α. Τα είδη μουσικής που μέχρι σήμερα συνήθως εκτελούνται στον χώρο αυτόν είναι μουσική δωματίου, σόλο και ρεσιτάλ διαφόρων οργάνων ορχήστρας αλλά και πιάνου, έργα σύγχρονης μουσικής, τζαζ και χορωδίες χωρίς να σημαίνει πως δεν πρόκειται να φιλοξενηθούν μελλοντικά και άλλα μουσικά είδη.

Στις παρακάτω Εικόνες [Εικόνες 39, 40, 41, 42] απεικονίζεται ο χώρος να φιλοξενεί διαφορετικού τύπου εκδηλώσεις.



Εικόνα 39: (Αριστερά) Σεμινάριο χορού [19].

Εικόνα 40: (Δεξιά) Προβολή ταινίας βουβού κινηματογράφου με συνοδεία πιάνου [17].



Εικόνα 41: (Αριστερά) Αφήγηση παραμυθιών [18].

Εικόνα 42: (Δεξιά) Συνέδριο [20].

7.2 Γεωμετρία του χώρου

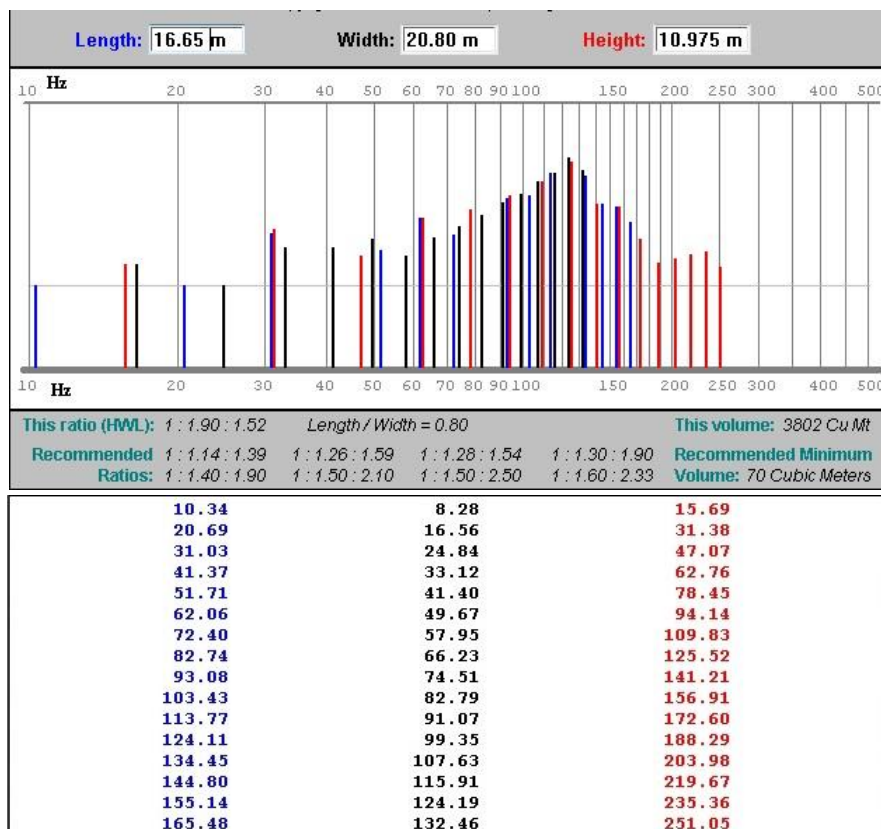
Οι βασικές διαστάσεις της αίθουσας, έπειτα από αφαίρεση των κερκίδων, των εισόδων δεξιά και αριστερά από αυτές, των εσοχών και προεξοχών στους τοίχους είναι:

μήκος	16,65 m
πλάτος	20,80 m
ύψος	10,975 m

Πίνακας 6: Βασικές διαστάσεις αίθουσας.

, με όγκο $V = 3802 \text{ m}^3$. Στη πράξη, με όλα τα προαναφερθέντα, ο συνολικός όγκος της αίθουσας διαμορφώνεται σε $V = 3447 \text{ m}^3$, 355 m^3 δηλαδή λιγότερο από το τέλει ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο. Ο λόγος όγκου της αίθουσας προς τον αριθμό των ακροατών (N), $\frac{V}{N} = \frac{3447}{250} = 13,788$, μας δείχνει πως η αίθουσα κατατάσσεται στους ακουστικά μεγάλους χώρους καθώς επίσης πως η επίδραση του κοινού στην ακουστική του χώρου θα είναι σχετικά μικρή. Επιπλέον, η επίδραση της υγρασίας, ειδικά στις υψηλές συχνότητες θα είναι σημαντική.

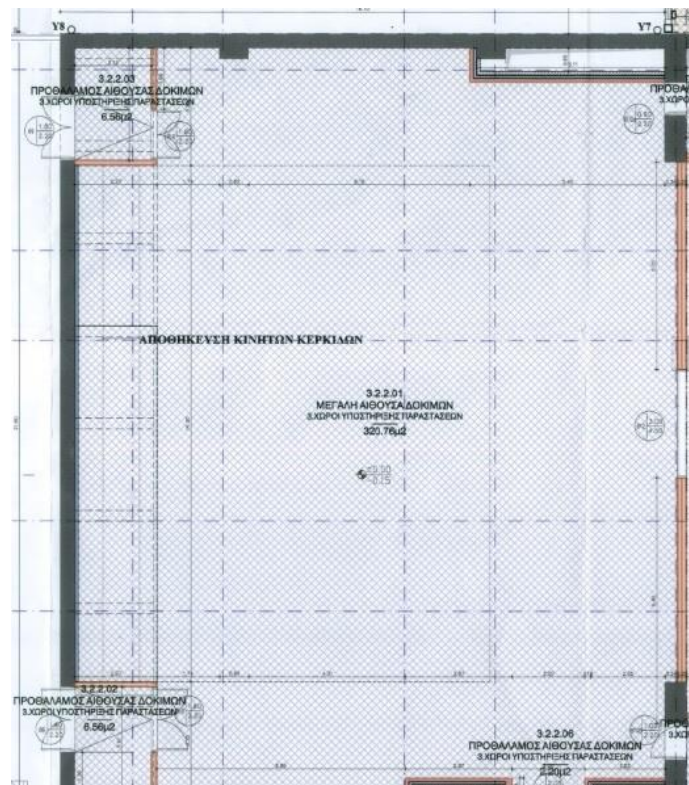
Αφαιρώντας τις κερκίδες, τα καμαράκια και τις προεξοχές στους τοίχους, αντιμετωπίζοντας την αίθουσα ως ένα ενιαίο ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο, προβαίνουμε σε υπολογισμό των στάσιμων κυμάτων εντός της, κάνοντας χρήση του λογισμικού Real Traps – Graphical Mode Calculator (Εικόνα 43).



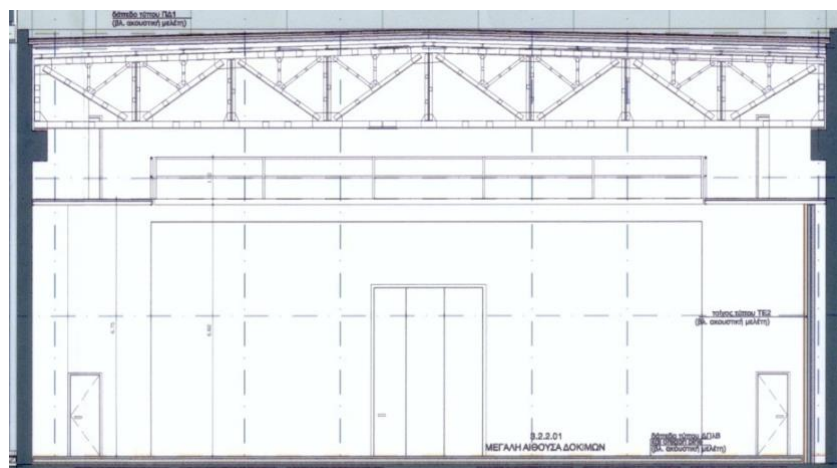
Εικόνα 43: Υπολογισμός στάσιμων κυμάτων εντός της αίθουσας μέσω του λογισμικού Real Traps – Graphical Mode Calculator [70].

Η υψηλή πυκνότητα των στάσιμων κυμάτων στις χαμηλές και χαμηλό μεσαίες συχνότητες υποδηλώνει μια ομοιομορφία της ακουστικής της αίθουσας ως προς συχνότητες αυτές, πράγμα που επιδρά θετικά στην ακουστική ποιότητα του χώρου. Δεν εντοπίζεται κάποια συγκεκριμένη περιοχή στην οποία αναμένονται προβλήματα.

Ακολουθούν Εικόνες με την κάτοψη σε μηδενικό επίπεδο και την τομή της αίθουσας παρμένες από τα αρχιτεκτονικά σχέδια (Εικόνες 44, 45).



Εικόνα 44: Κάτοψη της αίθουσας παρμένη από τα αρχιτεκτονικά σχέδια.



Εικόνα 45: Τομή της αίθουσας παρμένη από τα αρχιτεκτονικά σχέδια.

Να σημειωθεί πως οι μεταλλικοί διάδρομοι των τεχνικών δεξιά και αριστερά στο επάνω μέρος της όψης, καθώς και η μεγάλη πόρτα στο πίσω μέρος της σκηνης (βόρεια πλευρά) δεν έχουν κατασκευαστεί.

7.3 Ανάλυση επιφανειών του χώρου

Τα υλικά των επιφανειών που απαρτίζουν το χώρο είναι τα εξής:



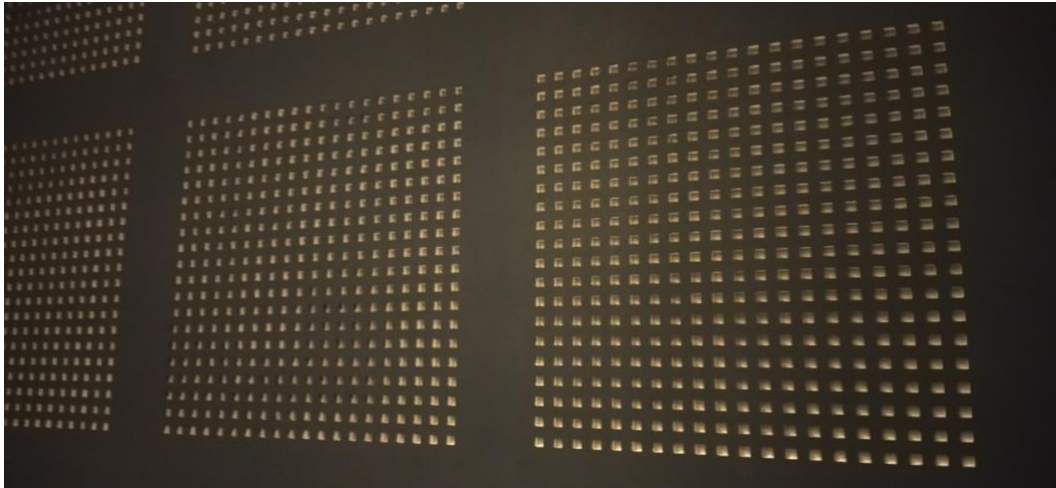
Εικόνα 46: Το πάτωμα της αίθουσας.

- Εύλινο πάτωμα (Εικόνα 46) από κόντρα πλακέ πάχους 2 cm σε καδρόνια πάχους 2 cm επίσης, επάνω σε τσιμέντο, πιθανώς με κενό από κάτω, βαμμένο, ομοιόμορφο σε όλη την αίθουσα.



Εικόνα 47: Οι πόρτες τις αίθουσας.

- 5 πόρτες μεταλλικές βαρέως τύπου. 3 δίφυλλες και 2 μονόφυλλες πόρτες (Εικόνα 47).



Εικόνα 48: Διάτρητη γυψοσανίδα στον τοίχο πίσω από τους ακροατές.

- Διάτρητη γυψοσανίδα (Εικόνα 48) σε μια αρκετά μεγάλη επιφάνεια του τοίχου (61.362 m^2), στο πίσω μέρος των ακροατών, με 20×20 τετράγωνες οπές ανά κομμάτι, διαστάσεων $1,1 \times 1,1 \text{ cm}$ και βάθους περίπου $1,5 \text{ cm}$.



Εικόνα 49: Κερκίδες ακροατών.

- Οι κερκίδες των ακροατών είναι από βαμμένο ξύλο πάχους $1,4 \text{ cm}$ και αποτελούνται από έξι επίπεδα. Δεν υπάρχουν καθίσματα και οι επιφάνειες είναι

γυμνές (Εικόνα 49). Συνήθως τοποθετούνται μαξιλάρια για την άνεση των ακροατών.



Εικόνα 50: Όλοι οι τοίχοι της αίθουσας αποτελούνται από μονή και διπλή γυψοσανίδα. Ορισμένοι έχουν ορυκτοβάμβακα και ορισμένοι κενό αέρα μεταξύ αυτών και των τοίχων.

- Όλοι οι περιμετρικοί τοίχοι αποτελούνται από βαμμένη γυψοσανίδα, μονή ή διπλή, πάχους 1,3 cm με ορυκτοβάμβακα εντός τους ή με κενό αέρα (Εικόνα 50). Τα μεταλλικά πλαίσια εντός τους είναι 10 cm έκαστο.



Εικόνα 51: Οροφή της αίθουσας και η σιδηροκατασκευή από κάτω της.

- Η οροφή (Εικόνα 51) αποτελεί την πιο σύνθετη επιφάνεια καθώς αποτελείται από μεταλλική οροφή. Από κάτω υπάρχει μια μεγάλη και σύνθετη κατασκευή από ατσάλι.



Εικόνα 52: Τράσα από αλουμίνιο πάνω από τη σκηνή.

- Από την σιδηροκατασκευή κρέμεται, μέσω συγχρονισμένων μοτέρ μια αλουμινένια τράσα (Εικόνα 52) σε παραλληλόγραμμη διάταξη με 3 επιπλέον ευθείες παράλληλες με τις κερκίδες. Είναι αναρτημένη ακριβώς επάνω από τη σκηνή που λαμβάνουν χώρα οι εκδηλώσεις. Προορίζεται για την ανάρτηση (κρέμασμα) σκηνικών όπως κουρτίνες, θεατρικά φώτα και ηχεία.

7.4 Μέτρηση χρόνου αντήχησης του χώρου

Η μέτρηση του χρόνου αντήχησης, του δείκτη T_{30} καθώς και των υπολοίπων ακουστικών παραμέτρων της αίθουσας, στην υπάρχουσα της κατάσταση, πραγματοποιήθηκε με τους εξής τρόπους:

- Έκρηξη μπαλονιού.
- Αναπαραγωγή σήματος παλμού.
- Αναπαραγωγή σήματος λογαριθμικού Swept Sine Tone.

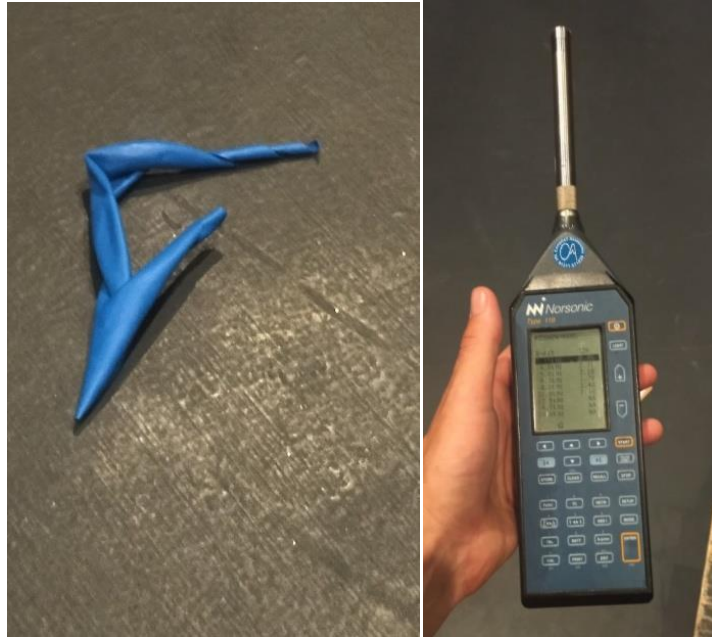
7.4.1 Με έκρηξη μπαλονιού

Εξοπλισμός

Κατά τη μέτρηση μέσω έκρηξης μπαλονιού χρησιμοποιήθηκαν τα εξής:

- Μπαλόني (Εικόνα 53).

- Ηχόμετρο Norsonic - Type 118. Ένα ηχόμετρο με ενσωματωμένο αναλυτή φάσματος πραγματικού χρόνου που χρησιμοποιείται μεταξύ άλλων για υπολογισμούς της στάθμης ηχητικής πίεσης, με προαιρετική επιλογή χρήσης διαφόρων φίλτρων, στατιστικά αποτελέσματα μετρήσεων ανά συχνοτική ζώνη καθώς και μετρήσεις χρόνου αντήχησης και άλλων ακουστικών παραμέτρων [12] (Εικόνα 54).

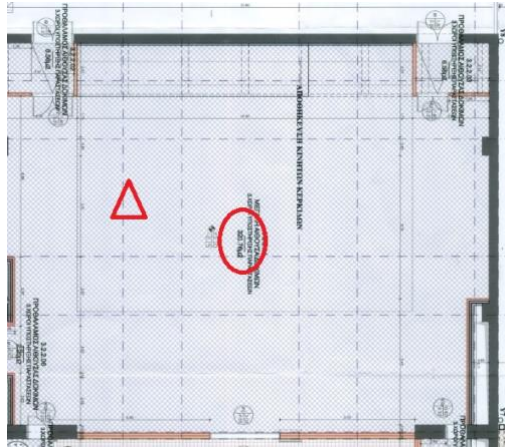


Εικόνα 53: (Αριστερά) Σκασμένο μπαλόνι.

Εικόνα 54: (Δεξιά) Ηχόμετρο Norsonic - Type 118.

1. Μεθοδολογία

Έπειτα από φούσκωμα, το μπαλόνι έσκασε απότομα με μια καρφίτσα. Η ξαφνική έκρηξη προκάλεσε την μηχανική διαταραχή στα μόρια του αέρα που ονομάσαμε ήχο στο πρώτο Κεφάλαιο, διεγείροντας σχεδόν το σύνολο του ακουστού συχνοτικού φάσματος. Η παραγόμενη ηχητική πίεση καταγράφηκε από απόσταση περίπου 4-5 m με το ηχόμετρο Norsonic - Type 118. Και τα δυο βρίσκονταν στο μέρος της σκηνής (Εικόνα 55).



Εικόνα 55: Εικόνα που αποτυπώνει κάτοψη της αίθουσας και τα σημεία που τοποθετήθηκαν το μπαλόνι (με κύκλο) και το σημείο μέτρησης (με τρίγωνο).

2. Μετρήσεις/ αποτελέσματα

Ακολουθεί Πίνακας με τις τιμές του δείκτη T_{30} που μετρήσαμε μέσω της έκρηξης μπαλονιού και υπολογίστηκαν από το ηχώμετρο:

Hz	50	63	80	100	125	160
T30 (sec)	1.49	0.58	3.17	3.33	1.77	2.18
Hz	200	250	315	400	500	630
T30 (sec)	2	1.97	2.55	2.68	2.59	2.9
Hz	800	1000	1250	1600	2000	2500
T30 (sec)	2.58	2.51	2.59	2.49	2.4	2.49
Hz	3150	4000	5000	6300	8000	10000
T30 (sec)	2.38	2.31	2.18	1.7	1.4	1.1

Πίνακας 7: Πίνακας που αποτυπώνει σε ζώνες 1/3 οκτάβας τον χρόνο T30 που μετρήθηκε στην αίθουσα μέσω έκρηξης μπαλονιού.

7.4.2 Με σήμα παλμού (Impulse)

1. Εξοπλισμός

Κατά την μέτρηση του χρόνου αντήχησης με την αναπαραγωγή παλμικού σήματος χρησιμοποιήθηκαν τα εξής:

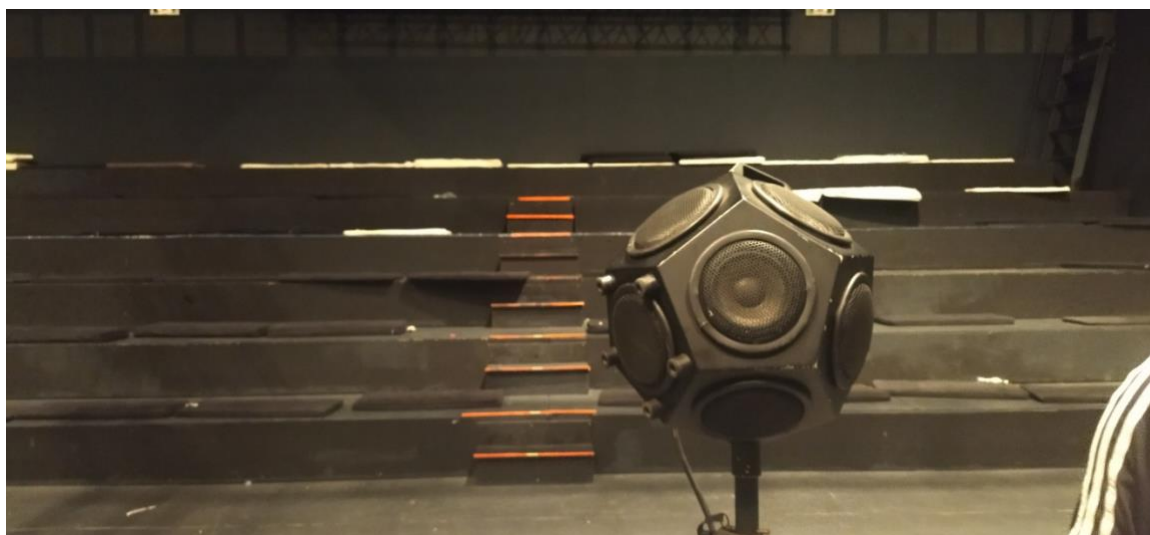
- Δωδεκάεδρο ηχείο που προσομοιάζει μια παντοκατευθυντική πηγή (ισόποση εκπομπή ηχητικής ενέργειας προς όλες τις κατευθύνσεις) (Εικόνα 57).
- Λογισμικό Dirac με χρήση από Η/Υ μέσω του οποίου έγινε αναπαραγωγή ηχητικού σήματος παλμού. Το συγκεκριμένο λογισμικό δύναται να υπολογίσει διάφορους δείκτες ακουστικής ενός χώρου μέσω συγκεκριμένης μεθοδολογίας και

πολλαπλών μετρήσεων [22]. Στη παρούσα διαδικασία χρησιμοποιήθηκε μόνο ως γεννήτρια ήχου.

- Ενισχυτής E-PAC της εταιρίας d&b Audiotehnic [16] (Εικόνα 56).
- Ηχόμετρο Norsonic - Type 118 (Εικόνα 54).



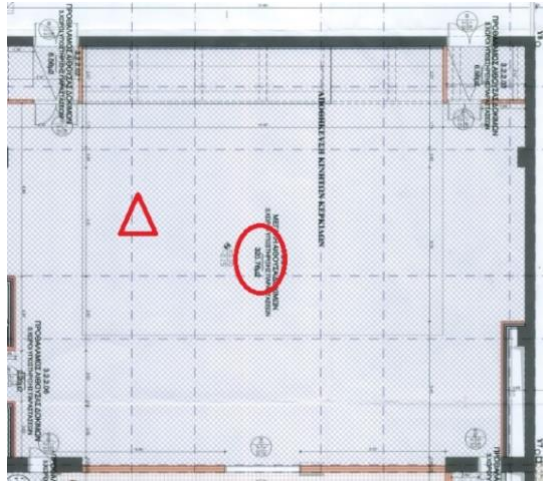
Εικόνα 56: Ενισχυτής E-PAC της εταιρίας d&b Audiotehnic.



Εικόνα 57: Δωδεκάεδρο ηχείο από όπου αναπαράχθηκε το σήμα παλμού.

2. Μεθοδολογία

Ομοίως με την μέτρηση μέσω μπαλονιού, το ηχόμετρο κατέγραψε τον δείκτη T_{30} του χώρου έπειτα από ακουστική διέγερση του μέσω της δωδεκάεδρος πηγής, από την οποία αναπαράχθηκε το σήμα παλμού (Impulse Signal). Η πηγή ήταν τοποθετημένη στο κέντρο της σκηνής και η λήψη της μέτρησης πραγματοποιήθηκε 4-5 m μακριά της (Εικόνα 58).



Εικόνα 58: Εικόνα που αποτυπώνει κάτοψη της αίθουσας και τα σημεία που τοποθετήθηκαν το δωδεκάεδρο ηχείο (με κύκλο) και το σημείο μέτρησης (με τρίγωνο).

3. Μετρήσεις/αποτελέσματα

Ακολουθεί Πίνακας με τις μετρήσεις του δείκτη T_{30} που μετρήσαμε έπειτα από την αναπαραγωγή σήματος παλμού:

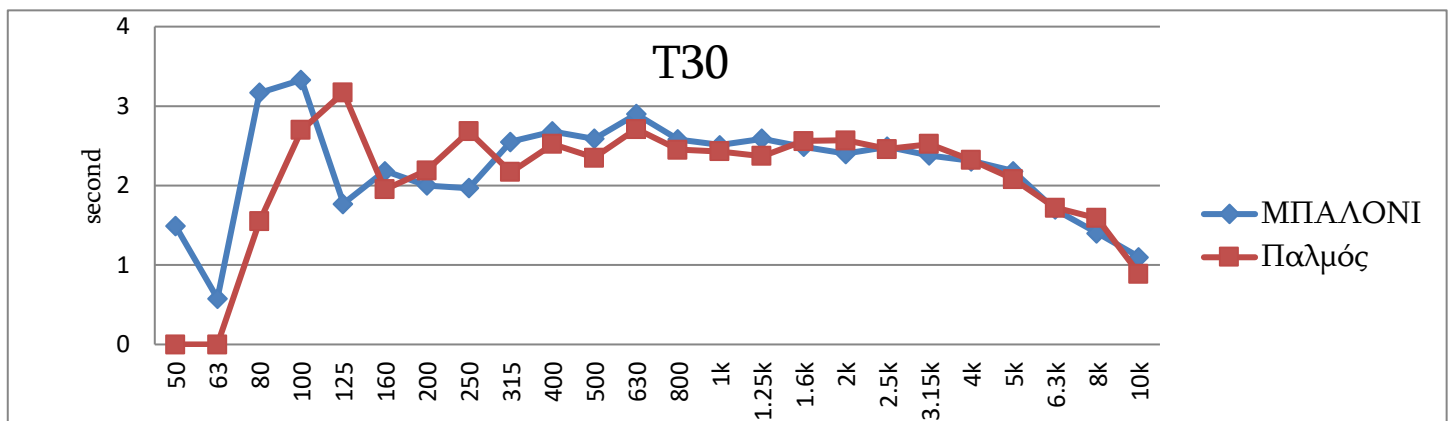
Hz	50	63	80	100	125	160
T30 (sec)	0	0	1.55	2.7	3.17	1.95
Hz	200	250	315	400	500	630
T30 (sec)	2.19	2.68	2.17	2.52	2.35	2.71
Hz	800	1000	1250	1600	2000	2500
T30 (sec)	2.45	2.43	2.37	2.56	2.57	2.46
Hz	3150	4000	5000	6300	8000	10000
T30 (sec)	2.52	2.32	2.08	1.72	1.59	0.89

Πίνακας 8: Πίνακας που αποτυπώνει σε ζώνες 1/3 οκτάβας τον χρόνο T_{30} που μετρήθηκε στην αίθουσα μέσω σήματος παλμού.

7.4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων των δύο μετρήσεων

Ακολουθούν Διαγράμματα του δείκτη T_{30} των δυο παραπάνω μετρήσεων (Διάγραμμα 1) καθώς και Διάγραμμα με τη διαφορά των δύο ανά συχνοτικές περιοχές διαστήματος 1/3 οκτάβας (Διάγραμμα 2). Παρατηρούμε μια σχετική ταύτιση των 2 μετρήσεων ειδικά όσο ανεβαίνουμε συχνοτικά, ειδικά από τα 500 Hz και άνω. Οι ανομοιομορφές στις χαμηλές συχνότητες ενδέχεται να οφείλονται στο ότι τα σημεία μέτρησης στις δυο περιπτώσεις δεν ήταν ακριβώς τα ίδια.

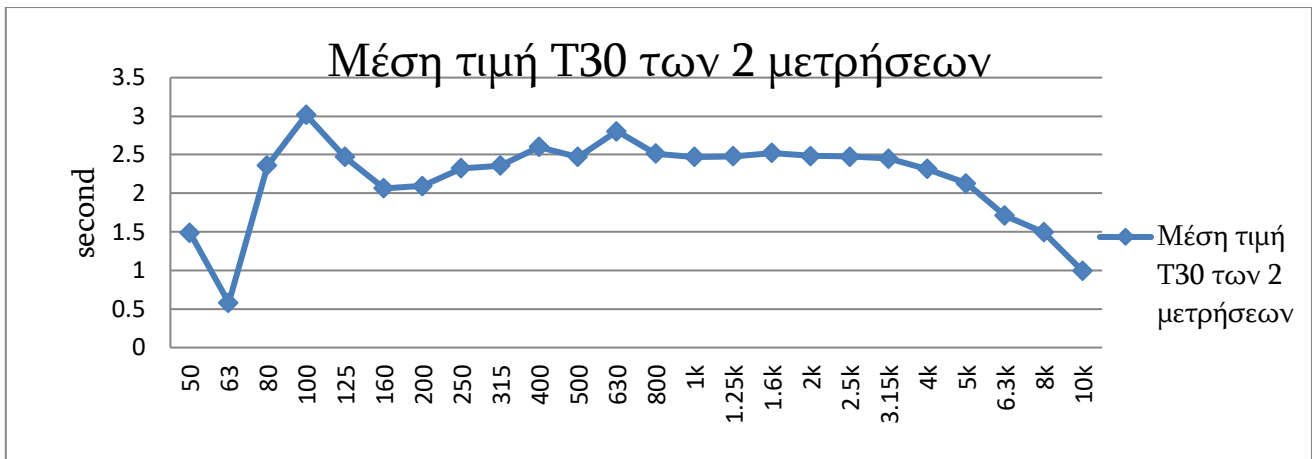
Δυστυχώς δεν υπήρξε επιπλέον χρόνος για περισσότερες μετρήσεις μέσω των 2 αυτών τρόπων που θα οδηγούσε στην εξαγωγή ασφαλέστερων τιμών και μέσων όρων. Στη μέτρηση μέσω σήματος παλμού δεν εμφανίστηκαν αποτελέσματα για τις συχνότητες των 50 Hz και 63 Hz, πιθανώς λόγω αδυναμίας του ηχείου να αναπαράγει επαρκές ηχητικές στάθμες σε αυτές τις συχνότητες. Τέλος παρουσιάζεται νέο Διάγραμμα (Διάγραμμα 3) με την μέση τιμή του δείκτη T_{30} που λάβαμε από τις 2 μετρήσεις. Για τις συχνότητες των 50 Hz και 63 Hz διατηρήθηκαν οι μετρήσεις μέσω μπαλονιού.



Διάγραμμα 1: Απεικόνιση τιμών του δείκτη T_{30} σε διαστήματα 1/3 οκτάβας για τους 2 τρόπους μέτρησης.



Διάγραμμα 2: Διαφορές στις τιμές του δείκτη T_{30} για τους 2 τρόπους μέτρησης σε διαστήματα 1/3 οκτάβας



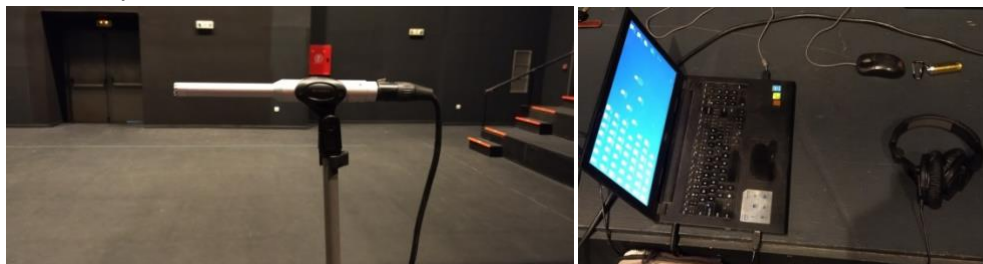
Διάγραμμα 3: Μέση τιμή δείκτη T30 σε διαστήματα 1/3 οκτάβας των 2 μετρήσεων. Για τις συχνοτικές ζώνες των 50 Hz και 63 Hz επιλέχθηκε η τιμή της μέτρησης μέσω της έκρηξης μπαλονιού.

7.4.4 Μέσω exponential Swept Tone στο λογισμικό REW

1. Εξοπλισμός

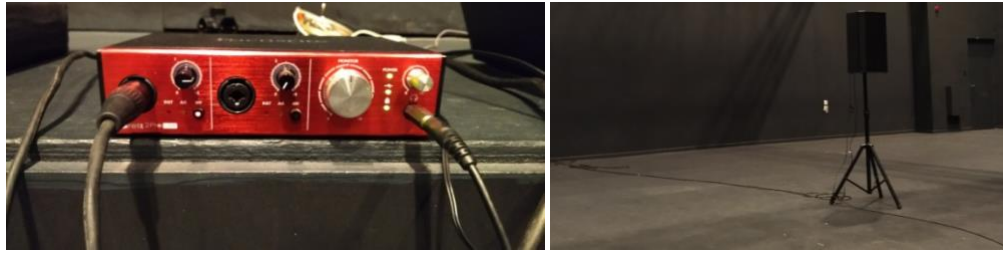
Κατά την μέτρηση του χρόνου αντήχησης και των υπολοίπων ακουστικών παραμέτρων μέσω Swept Sine Tone χρησιμοποιήθηκαν τα εξής μηχανήματα:

- Μετρητικό μικρόφωνο Behringer ECM8000, παντοκατευθυντικού πολικού διαγράμματος [13], τοποθετημένο σε στύλο μικροφώνου στο ύψος του κεφαλιού καθιστού ανθρώπου (Εικόνα 59).
- Laptop Dell Inspiron 15 3000 series με I7 επεξεργαστή 2 πυρήνες (processors) και threads στα 2 GHz και 8 GB μνήμη RAM (Εικόνα 60).
- Κάρτα ήχου Focusrite Clarett 2Pre με σύνδεση μέσω πρωτοκόλλου USB 2 [15] (Εικόνα 61).
- Ένα ηχείο PA Electro Voice EKX 12P ρυθμισμένο σε FLAT κατάσταση (εσωτερικό DSP), τοποθετημένο σε τρίποδο στο ύψος του κεφαλιού ενός όρθιου ομιλητή [14] (Εικόνα 62).



Εικόνα 59: (Αριστερά) Μετρητικό μικρόφωνο Behringer ECM8000.

Εικόνα 60: (Δεξιά) Laptop Dell Inspiron 15.



Εικόνα 61: (Αριστερά) Κάρτα ήχου Focusrite Clarett 2PRE.

Εικόνα 62: (Δεξιά) Ηχείο Electro Voice EKX12P.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν αρχές Αυγούστου του 2023 με θερμοκρασία 32°C και 65% υγρασία. Λόγω κακής θερμομόνωσης της αίθουσας η θερμοκρασία εντός της ήταν εξαιρετικά υψηλή.

- **Λογισμικό REW (Room EQ Wizard Room Acoustics Software)**

Το REW είναι ένα δωρεάν λογισμικό μέτρησης των ακουστικών παραμέτρων ενός χώρου, όπως στάθμες ακουστικής πίεσης, χρόνο αντήχησης κ.α. (dB_{SPL} , RT_{60} , EDT , T_{30} , D_{50} , C_{80}). Χρησιμοποιείται επίσης για μέτρηση χαρακτηριστικών και αποκρίσεων μεγάλφωνων και άλλων συσκευών ήχου. Μέσω των μετρήσεων ο χρήστης δύναται να προβεί σε συμπεράσματα σχετικά με τις βέλτιστες ρυθμίσεις που θα πρέπει να κάνει στις συσκευές ήχου του αλλά και της ακουστικής συμπεριφοράς του χώρου, παρέχοντας αποτελέσματα, ανά συχνότητα αλλά και σε βάθους χρόνου (waterfall). Περιλαμβάνει γεννήτριες σημάτων ήχου όπως pink noise, white noise, απλούς ημιτονικούς ήχους και Swept Sine Tone. Επιτρέπει την εξαγωγή διαγραμμάτων διαφόρων παραμέτρων όπως φασματική ανάλυση (Fourier RTA), στάθμης ηχητικής πίεσης, σχετικής φάσης, ακουστικών παραμέτρων για συγκεκριμένες χρονικές στιγμές ή απεικονίζοντας την εξέλιξη τους στο χρόνο καθώς και εξαγωγή αρχείων ήχου με την κρουστική απόκριση του χώρου. Δύναται να υπολογίσει τις συχνότητες των χρόνων απόσβεσης των στάσιμων κυμάτων [21].

2. Μεθοδολογία

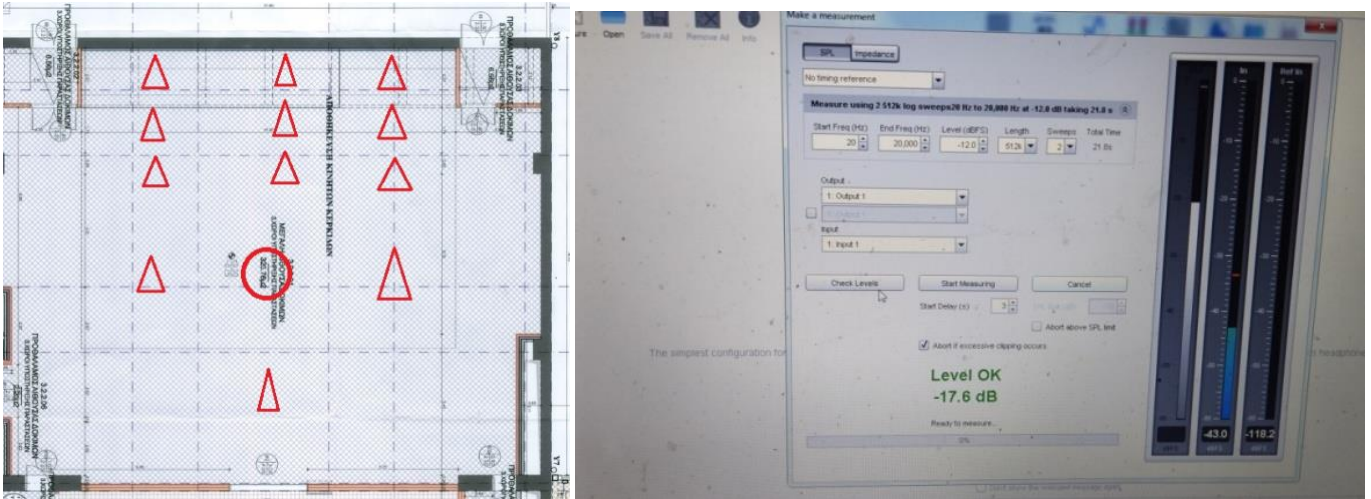
Γνωρίζοντας πως το ηχείο εμφανίζει συγκεκριμένη κατευθυντικότητα, ειδικά όσο ανεβαίνουμε συχνότητα, τοποθετήθηκε στο κέντρο της σκηνης (Εικόνα 63), στοχεύοντας προς τις κερκίδες, αντίστοιχα όπως συμβαίνει και με πραγματικές πηγές οι οποίες φιλοξενούνται στο χώρο. Η χρήση δωδεκάεδρης πηγής και σε αυτή τη μέτρηση θα αποτελούσε την ιδανική επιλογή καθώς, στην πράξη, οι φυσικές πηγές ήχου εμφανίζουν αισθητά μεγαλύτερη κατευθυντικότητα έναντι των ηχείων που προορίζονται για συναυλίες όπως αυτό που χρησιμοποιήθηκε.

Το μικρόφωνο τοποθετήθηκε σε 12 διαφορετικές θέσεις. Πραγματοποιήθηκε μια μέτρηση για κάθε θέση με το σύστημα laptop--> κάρτα ήχου--> ηχείο να αναπαράγουν σταθερά το ίδιο σήμα. Οι 9 θέσεις απλώνονταν στις κερκίδες με το σκεπτικό να είναι σε 3 διαφορετικές θέσεις κατά μήκος των κερκίδων (αριστερά, κέντρο, δεξιά) και σε 3 διαφορετικές θέσεις κατά ύψος, ως προς την απόσταση από τη πηγή (χαμηλά, κεντρικά και ψηλά) (Εικόνα 65). Το ύψος του μικροφώνου ήταν περίπου όσο το ύψος του κεφαλιού ενός ακροατή (Εικόνα 64). Οι υπόλοιπες 3 μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν δεξιά, αριστερά και πίσω από το ηχείο σε απόσταση περίπου 4-5 m από αυτό για σύγκριση με τις πρώτες δύο μετρήσεις. Πριν τις μετρήσεις πραγματοποιήθηκε ρύθμιση των στάθμεων προενίσχυσης του μικροφώνου και εξόδου της κάρτας ήχου, ώστε το λογισμικό REW να εμφανίζει την ένδειξη "OK" για την πραγματοποίηση των μετρήσεων (Εικόνα 66).



Εικόνα 63: (Αριστερά) Τοποθέτηση ηχείου στο κέντρο της σκηνής με κατεύθυνση προς το ακροατήριο.

Εικόνα 64: (Δεξιά) Τοποθέτηση μετρητικού μικροφώνου στις κερκίδες, στο ύψος της κεφαλής των ακροατών.

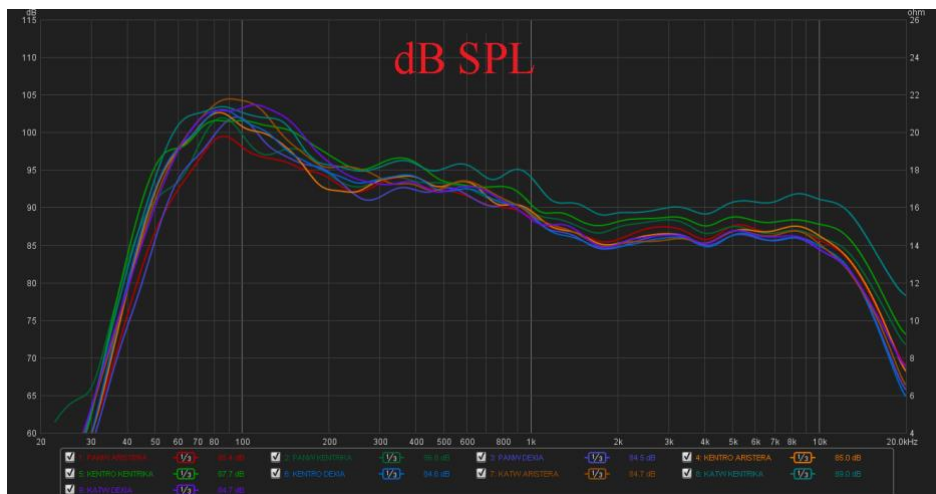


Εικόνα 65: (Αριστερά) Απεικόνιση στην κάτοψη της αίθουσας τα 12 σημεία μέτρησης μέσω REW.

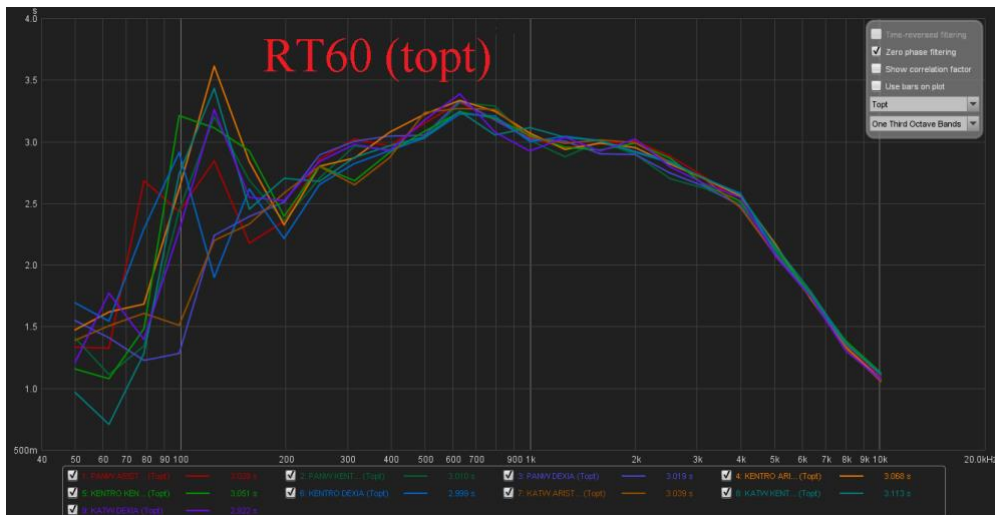
Εικόνα 66: (Δεξιά) Ρύθμιση κατάλληλης στάθμης μέτρησης στο λογισμικό REW.

3. Μετρήσεις/αποτελέσματα

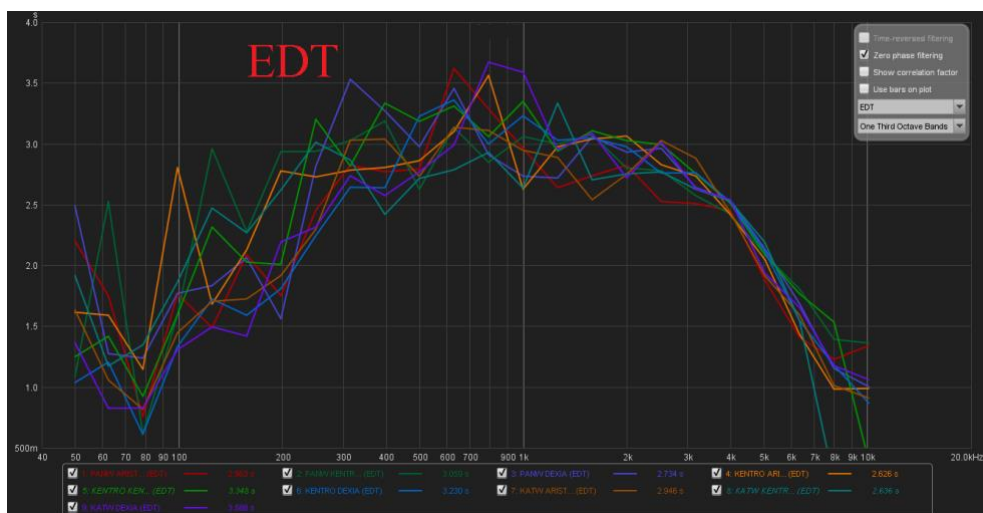
Τα παρακάτω Διαγράμματα (Διαγράμματα 4-15) απεικονίζουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων με λογαριθμικό Swept Sine Tone στις 9 θέσεις των ακροατών για τις ακουστικές παραμέτρους dB_{SPL} , $RT_{60}(topt)$, EDT , T_{20} , T_{30} , ETC (για τα πρώτα 100 msec), ETC (για τα πρώτα 30 msec), Κρουστική Απόκριση, C_{50} , C_{80} , D_{50} και TS . Δεν εμφανίζονται για τις 3 θέσεις στη σκηνή καθώς αυτές πραγματοποιήθηκαν για λόγους σύγκρισης με τους δυο πρώτους μέτρησης (μπαλόκι και παλμό).



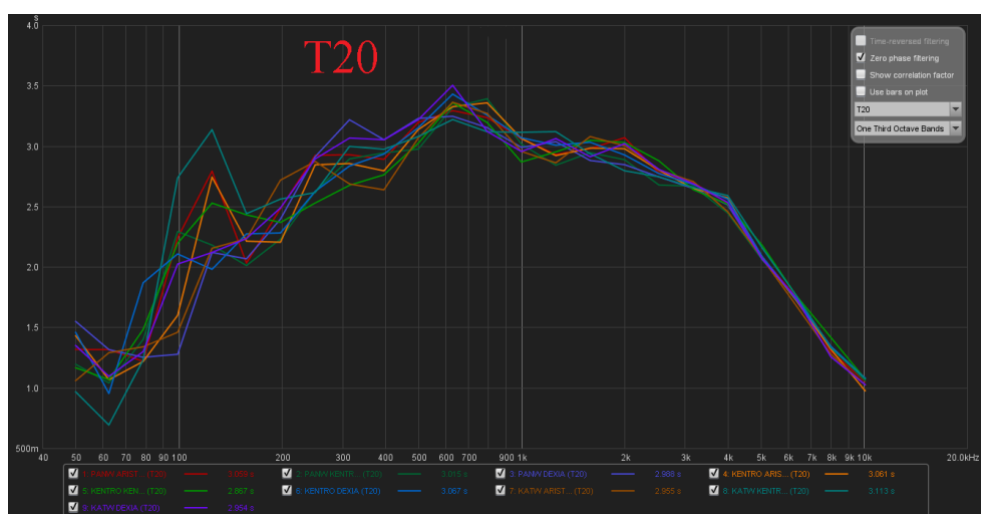
Διάγραμμα 4: dB SPL σε κάθε μια από τις 9 θέσεις στις κερκίδες (REW).



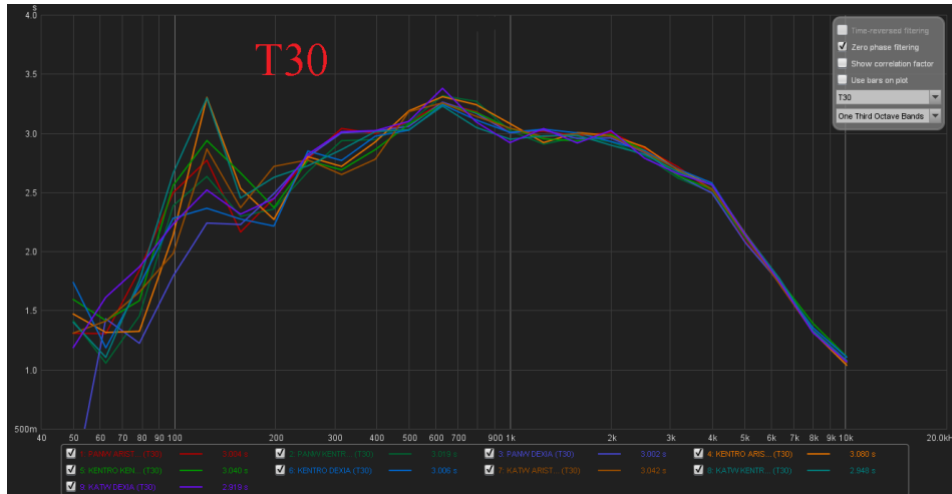
Διάγραμμα 5: RT60 (topt) σε κάθε μια από τις 9 θέσεις στις κερκίδες (REW).



Διάγραμμα 6: EDT σε κάθε μια από τις 9 θέσεις στις κερκίδες (REW).



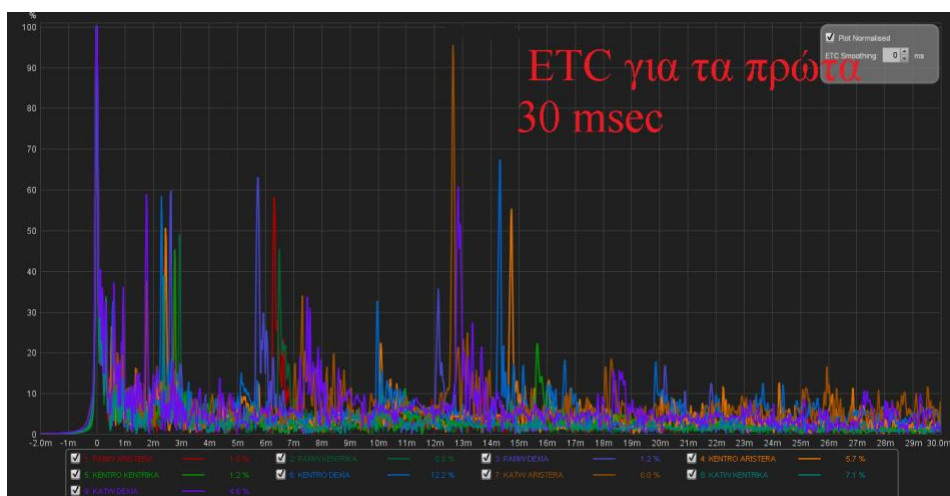
Διάγραμμα 7: T20 σε κάθε μια από τις 9 θέσεις στις κερκίδες (REW).



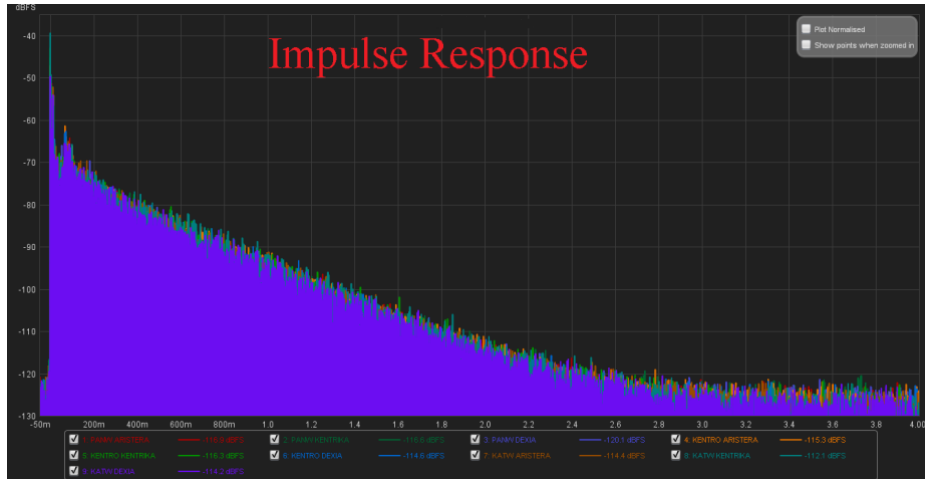
Διάγραμμα 8: T30 σε κάθε μια από τις 9 θέσεις στις κερκίδες (REW).



Διάγραμμα 9: ETC για τα πρώτα 100 msec σε κάθε μια από τις 9 θέσεις στις κερκίδες (REW).



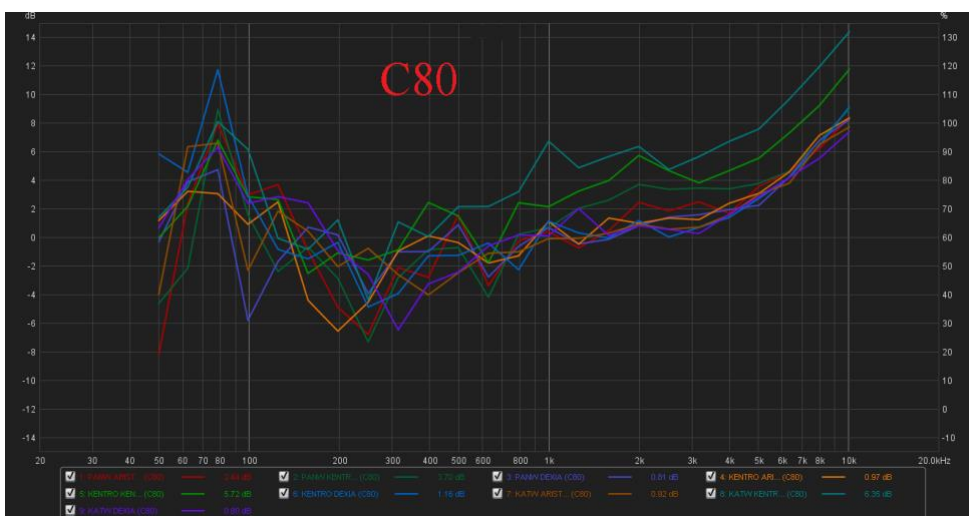
Διάγραμμα 10: ETC για τα πρώτα 30 msec σε κάθε μια από τις 9 θέσεις στις κερκίδες (REW).



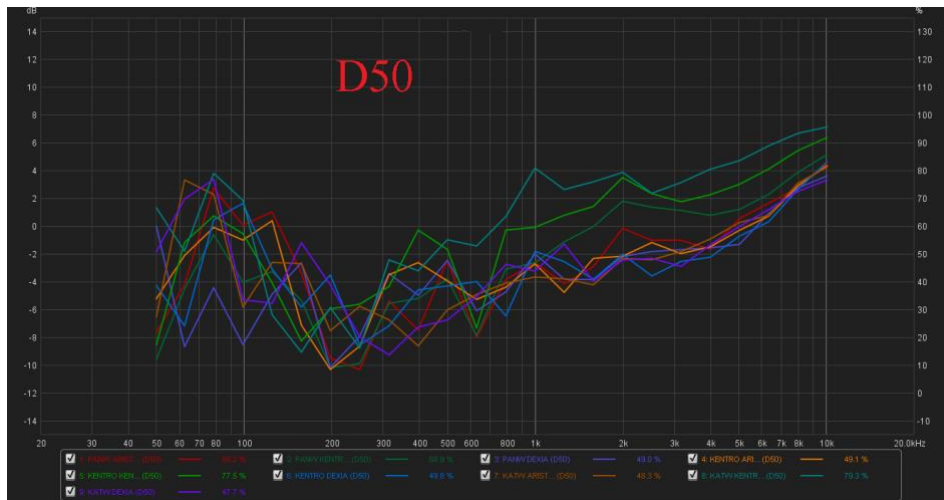
Διάγραμμα 11: Στάθμη της απόλυτης τιμής των τιμών της κρουστικής απόκρισης (σε dBFS) σε κάθε μια από τις 9 θέσεις στις κερκίδες (REW).



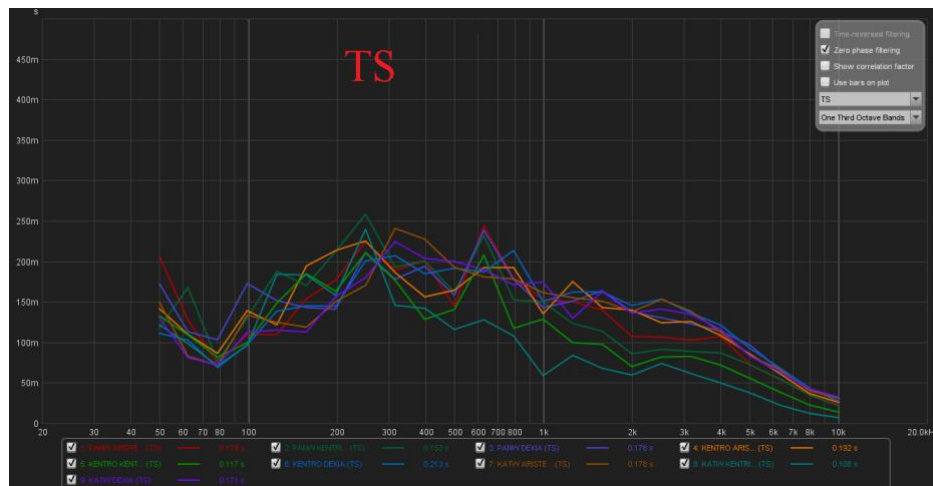
Διάγραμμα 12: C50 σε κάθε μια από τις 9 θέσεις στις κερκίδες (REW).



Διάγραμμα 13: C80 σε κάθε μια από τις 9 θέσεις στις κερκίδες (REW).



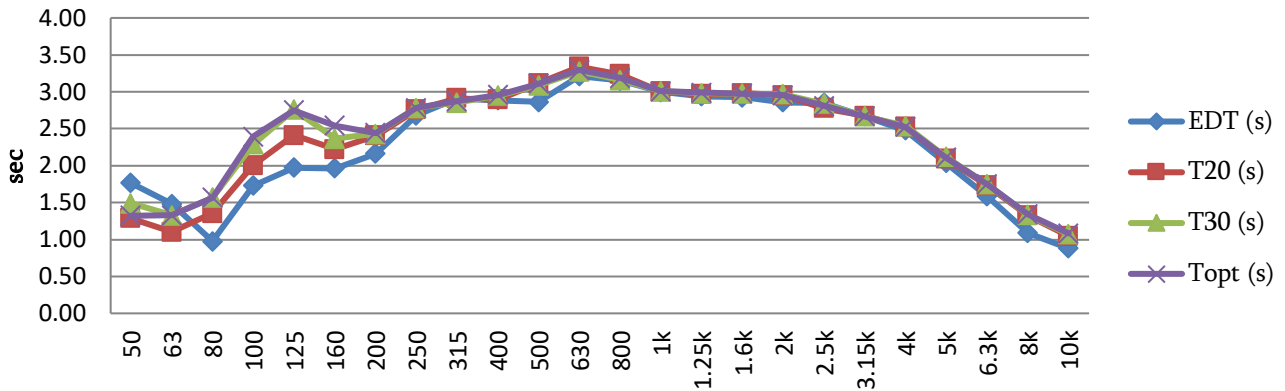
Διάγραμμα 14: D50 σε κάθε μια από τις 9 θέσεις στις κερκίδες (REW).



Διάγραμμα 15: TS σε κάθε μια από τις 9 θέσεις στις κερκίδες (REW).

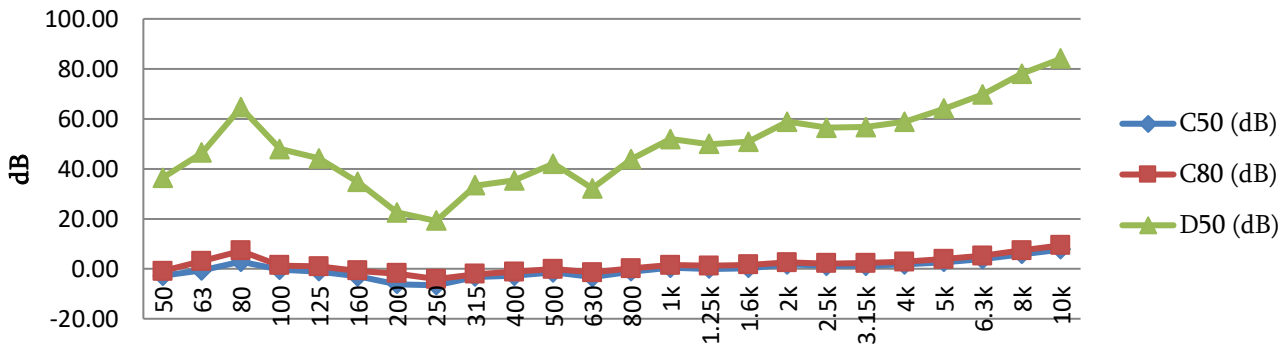
Ακολουθούν Διαγράμματα που δημιουργήθηκαν μέσω του λογισμικού Excel της Microsoft για να απεικονιστούν οι μέσες τιμές των ακουστικών παραμέτρων που σχετίζονται με το χρόνο αντήχησης (Διάγραμμα 16, 18, 20), την καταληπτότητα και την ευκρίνεια του λόγου (Διάγραμμα 17, 19, 21). Παρουσιάζονται σε δυο ομάδες μετρήσεων, η πρώτη για τις 9 θέσεις του κοινού και η δεύτερη για τις 3 θέσεις στη σκηνή, καθώς επίσης και ο δείκτης T_{30} συνολικά για τις 12 θέσεις για σύγκριση με τις προηγούμενες μετρήσεις.

Μέση τιμή EDT, T20, T30, T_{opt} - 9 θέσεις κοινού



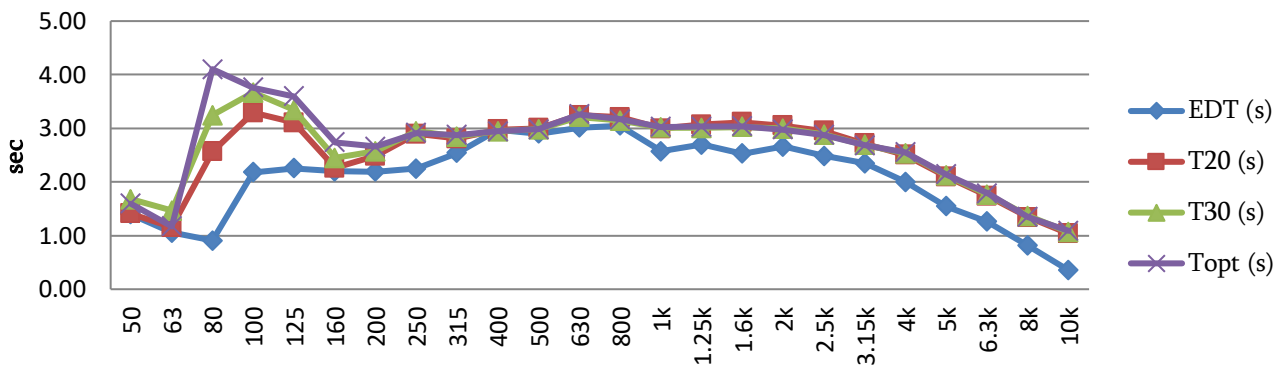
Διάγραμμα 16: Μέση τιμή EDT, T20, T30, T_{opt} για τις 9 θέσεις κοινού.

Μέση τιμή C50, C80, D50 - 9 θέσεις κοινού

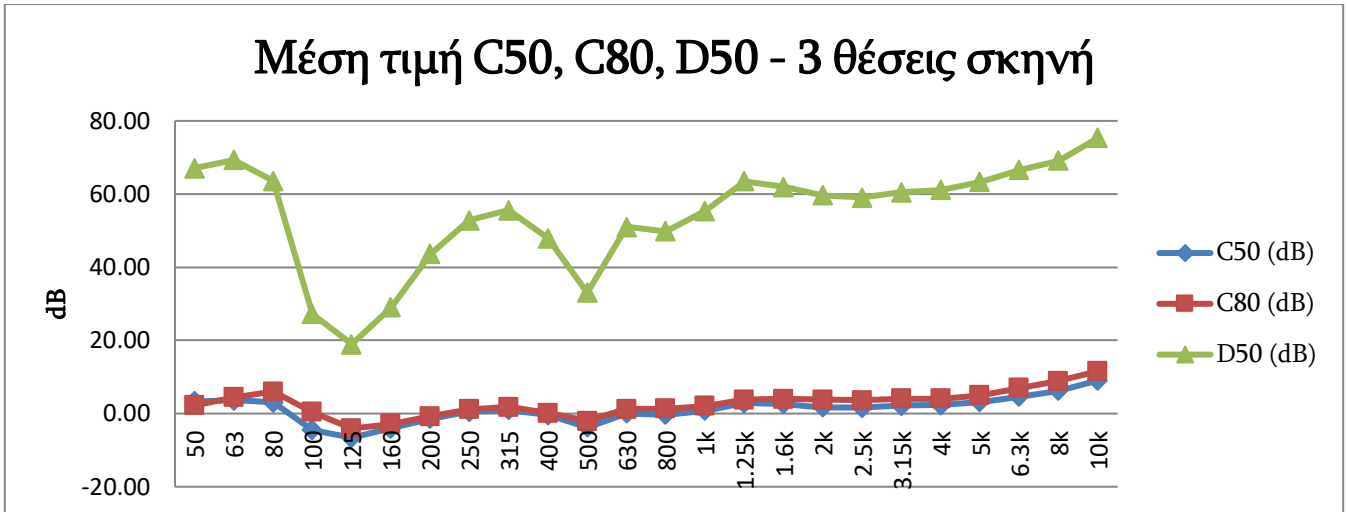


Διάγραμμα 17: Μέση τιμή C50, C80, D50 για τις 9 θέσεις κοινού.

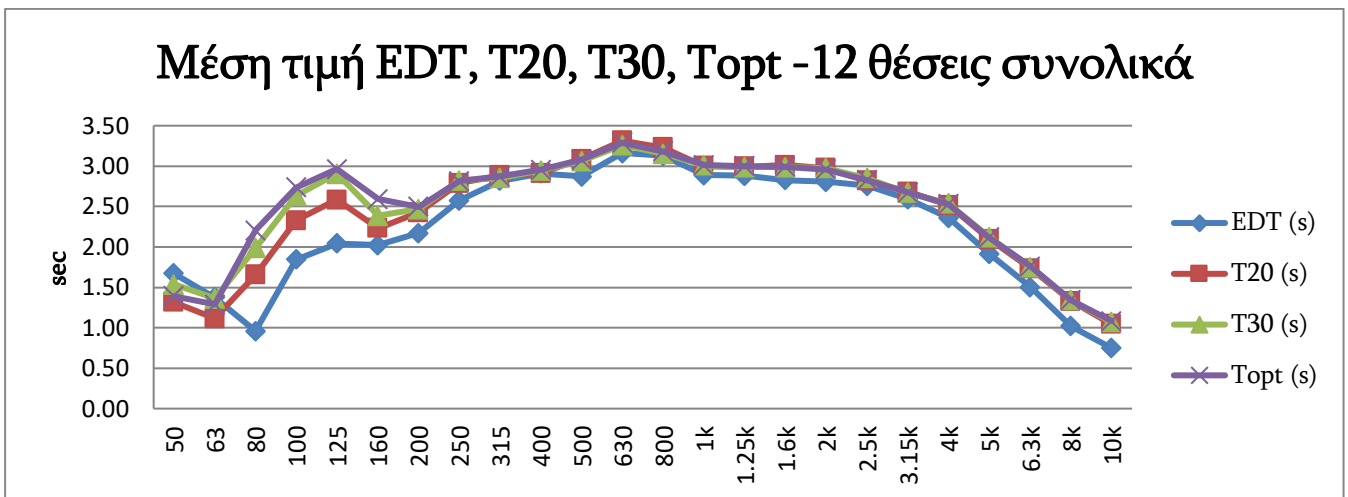
Μέση τιμή EDT, T20, T30, T_{opt} - 3 θέσεις σκηνής



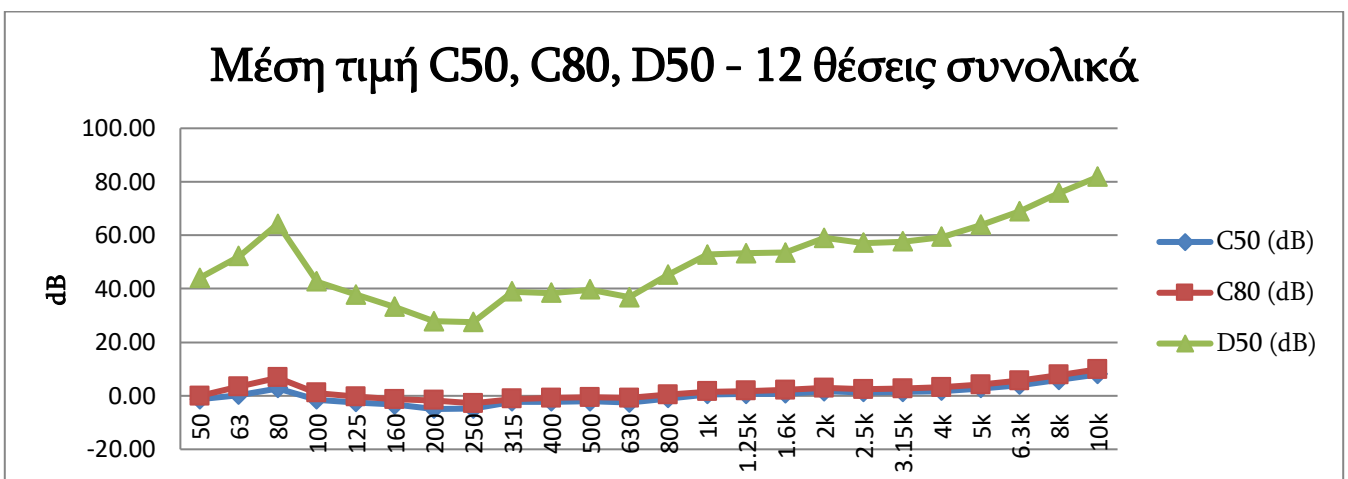
Διάγραμμα 18: Μέση τιμή EDT, T20, T30, T_{opt} για τις 3 θέσεις επί σκηνής.



Διάγραμμα 19: Μέση τιμή C50, C80, D50 για τις 3 θέσεις επί σκηνής.



Διάγραμμα 20: Μέση τιμή EDT, T20, T30, T_{opt} των 12 θέσεων μέτρησης.

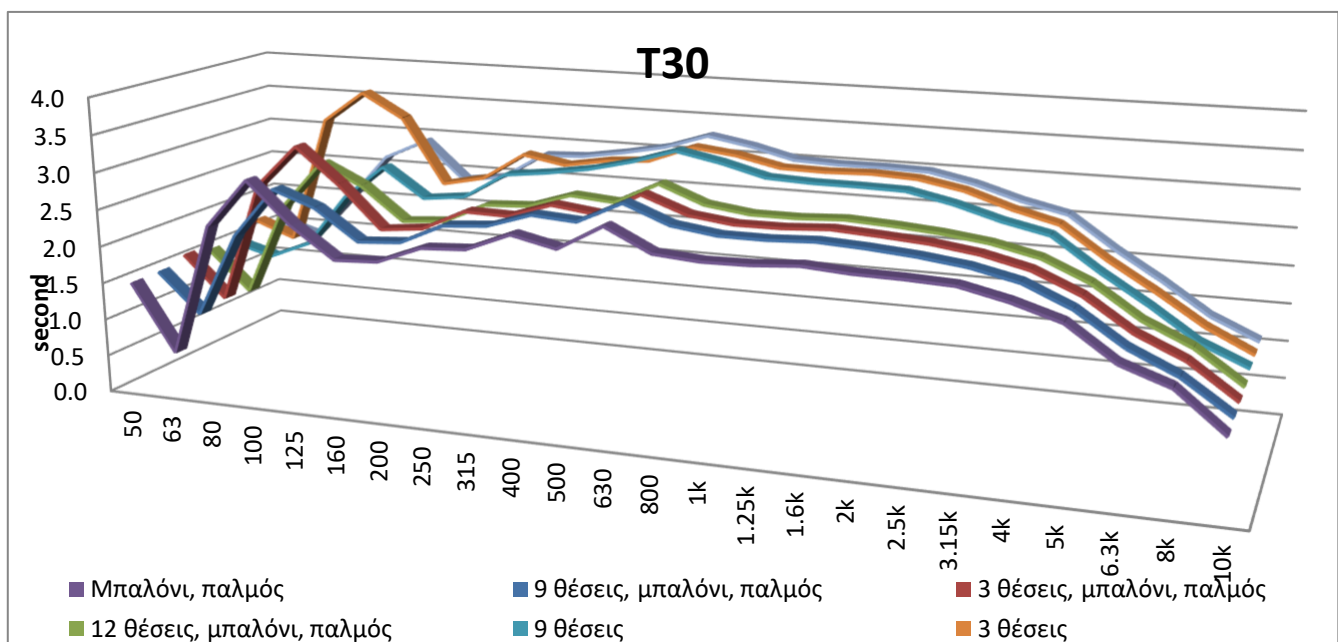


Διάγραμμα 21: Μέση τιμή C50, C80, D50 των 12 θέσεων μέτρησης.

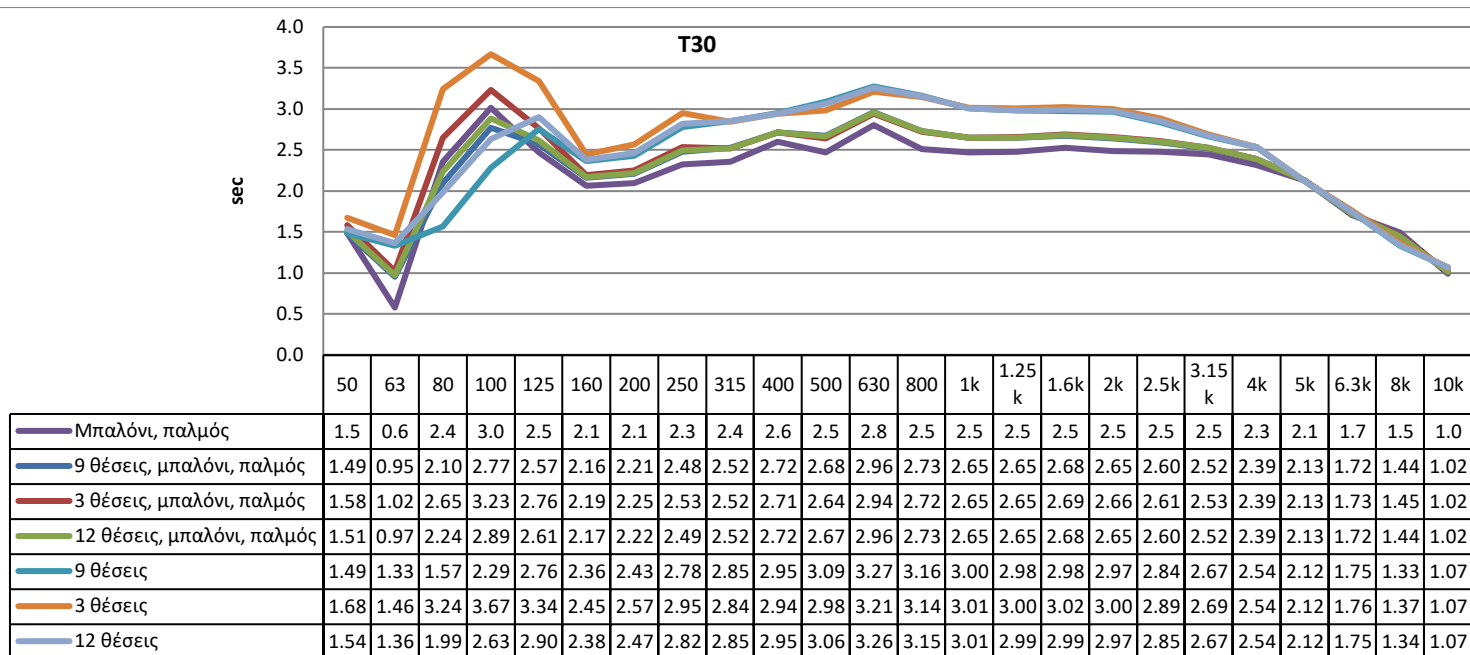
7.5 Μέσος χρόνος αντήχησης T_{30} των 3 τρόπων μέτρησης

Έπειτα από τις μετρήσεις και με τους 3 διαφορετικούς τρόπους προβαίνουμε στην εξαγωγή ενός μέσου δείκτη T_{30} (Διάγραμμα 22). Με το τρόπο αυτό επιτυγχάνουμε μια ασφαλέστερη εκτίμηση της πραγματικής τιμής του ανά συχνότητα, καθώς η διαδικασία της μέτρησης, όπως και οποιασδήποτε πειραματικής διαδικασίας, απαιτεί πάντα επαναλήψεις με στόχο την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων, εξαλείφοντας έτσι τις πιθανότητες σφάλματος λόγω κάποιου τυχαίου γεγονότος κατά την διαδικασία μέτρησης.

Επιπλέον, κανένας από τους 3 τρόπους μέτρησης δεν ήταν ικανός να παράγει μια απολύτως ισοκατανεμημένη ανά συχνότητα ηχητική ενέργεια. Αυτό οφείλεται στο ότι τα ηχεία των δυο μετρήσεων έχουν συγκεκριμένη συχνοτική απόκριση που δεν είναι απολύτως επίπεδη (ομοιόμορφη σε όλο το συχνοτικό φάσμα) και στην τοποθέτηση τους, ενώ η έκρηξη του μπαλονιού δημιουργεί και μεν διαταραχή των μορίων του αέρα, άρα ήχο, σε όλο το συχνοτικό φάσμα, δεν μετρήθηκε όμως και δεν μπορούμε να έχουμε απολύτως γνώση της αρχικής ηχητικής πίεσης ανά συχνότητα που διαδόθηκε στην αίθουσα.



Διάγραμμα 22: Τρισδιάστατη απεικόνιση και σύγκριση του δείκτη T_{30} υπολογισμένου από τη μέση τιμή διαφορετικών συνδυασμών των 3 τρόπων μέτρησης.



Πίνακας 9: Απεικόνιση και σύγκριση του δείκτη T30 υπολογισμένου από τη μέση τιμή διαφορετικών συνδυασμών των 3 τρόπων μέτρησης σε συνδυασμό πίνακα και διαγράμματος.

Έπειτα από την πειραματική διαδικασία μέτρησης και με τους 3 τρόπους και παρατηρώντας τα αποτελέσματα (Διάγραμμα 22, Πίνακας 9) επιλέγουμε την πράσινη καμπύλη με τον μέσο όρο όλων των μετρήσεων (12 θέσεις μέσω REW, μπαλόκι και παλμό) ως το δείκτη T_{30} που ανταποκρίνεται πιστότερα στην αίθουσα.

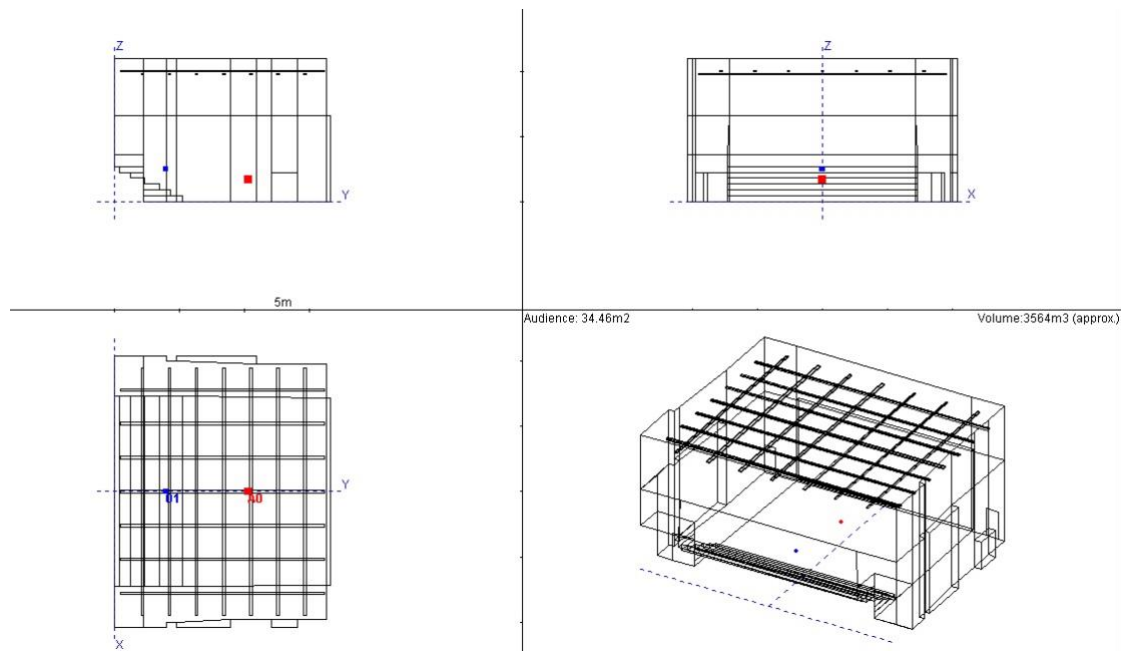
Ως γενική παρατήρηση στις συχνότητες αυτές μπορούμε να πούμε πως σχεδόν όλες οι μετρήσεις μέσω του REW έδειξαν 0,2 ~0,6 sec υψηλότερες τιμές σε σχέση με τους άλλους 2 τρόπους μέτρησης. Πιθανώς αυτό να ωφελείτε στην υψηλή στάθμη ηχητικής πίεσης με την οποία αναπαράχθηκε το λογαριθμικό Swept Sine Tone και η οποία ήταν σαφώς υψηλότερη σε σχέση με τις άλλες 2 πηγές (μπαλόκι και δωδεκάεδρο ηχείο). Γνωρίζουμε πως το λογαριθμικό σήμα Swept Sine Tone συνηθίζεται να χρησιμοποιείται στις μετρήσεις συχνοτικών αποκρίσεων ηχητικών συστημάτων και συσκευών. Το παραγόμενο σήμα του μπορεί πιθανώς να προκαλέσει ευκολότερα των συντονισμό ορισμένων επιφανιών ή υλικών εντός της αίθουσας σε σχέση με έναν τυχαίο θόρυβο σύντομης διάρκειας, με ενέργεια σε όλο το συχνοτικό φάσμα, όπως αυτά της έκρηξης και του παλμού. Η χρήση του

όμως για μετρήσεις αντίστοιχες με την δικιά μας περίπτωση, αναφέρεται στη βιβλιογραφία [38], εμφανίζει μικρές αποκλίσεις στα αποτελέσματα έναντι των πιο διαδεδομένων τρόπων μέτρησης. Οι διαφορές που εμφανίστηκαν αποδίδονται κυρίως στην μεγάλη διαφορά στάθμης και κατευθυντικότητας μεταξύ των πηγών και όχι στην διαφορετική διαδικασία μέτρησης.

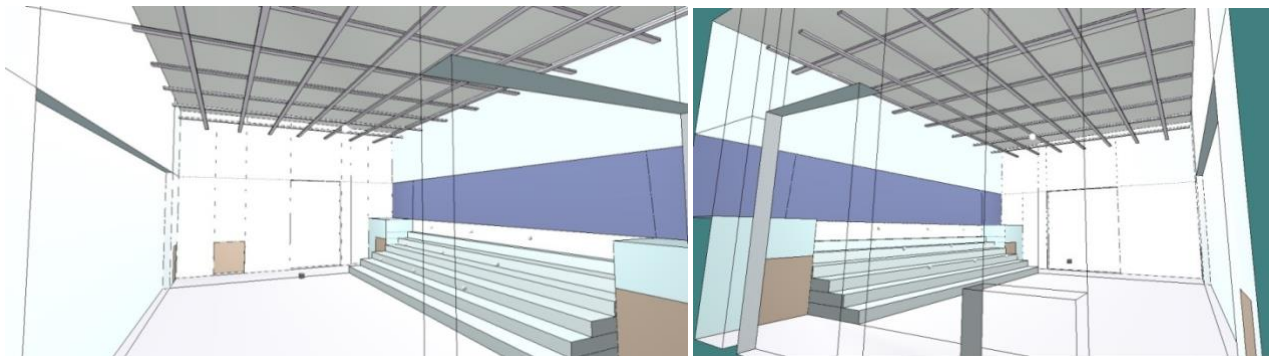
Στη μεσαία συχνοτική περιοχή (160 Hz ~ 4 kHz), η καμπύλη που επιλέξαμε (πράσινη) βρίσκεται στο μέσον όλων των υπολοίπων. Στις υψηλές συχνότητες (5 kHz ~ 10 kHz) αντίθετα υπάρχει μια αδιαμφισβήτητη ταύτιση όλων των μετρήσεων, με μια μικρή εξαίρεση στα 8 kHz. Τέλος, στις χαμηλές συχνότητες (< 160 Hz) η μέτρηση που επιλέξαμε αποτυπώνει έναν μέσο όρο όλων των μετρήσεων. Παρατηρούμε πως τα αποτελέσματα μέσω REW έχουν άμεση σχέση με την σχετική απόσταση πηγής και μικροφώνου. Όσο πιο μικρή απόσταση τόσο υψηλότερη τιμή χρόνου αντήχησης στις χαμηλές, με υψηλότερες τιμές στις 3 μετρήσεις μέσω REW στη σκηνή, κοντά στο ηχείο, των οποίων η απόσβεση του ήχου διαρκεί σαφώς περισσότερο.

7.6 Σχεδιασμός του χώρου σε λογισμικό ακουστικού σχεδιασμού και εύρεση συντελεστών απορρόφησης επιφανειών

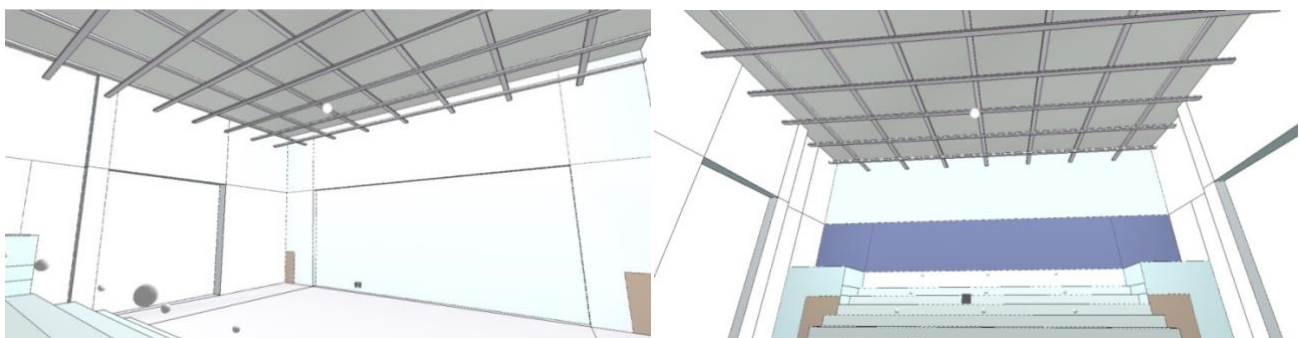
Επόμενο βήμα ήταν ο σχεδιασμός της αίθουσας στο λογισμικό CATT-Acoustic 9.1. Οι διαστάσεις του χώρου πάρθηκαν από τα αρχιτεκτονικά σχέδια καθώς και από πραγματικές μετρήσεις εντός της αίθουσας. Παρακάτω (Εικόνες 68, 69] παρουσιάζεται η τελική τρισδιάστατη μορφή της αίθουσας, όπως προέκυψε από τον σχεδιασμό καθώς και κάτοψη και τομή (Εικόνα 67).



Εικόνα 67: Κάτοψη, όψη, τομή της αίθουσας στην υπάρχουσα της κατάσταση έπειτα από τον σχεδιασμό της στο CATT-Acoustic.



Εικόνα 68: Τρισδιάστατες απεικονίσεις της αίθουσας μέσω του λογισμικού CATT-Acoustic (A).



Εικόνα 69: Τρισδιάστατες απεικονίσεις της αίθουσας μέσω του λογισμικού CATT-Acoustic (B).

Έπειτα από έλεγχο των επιφανειών, αναζητήθηκαν και εισήχθησαν οι πλησιέστεροι συντελεστές απορρόφησης που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία. Οι επιλεχθέντες τιμές παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Επιφάνεια	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	Πηγή
Εύλινο δάπεδο σε καδρόνια	0,11	0,11	0,12	0,11	0,10	0,08	[1]
Εύλινες κερκίδες	0,15	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	[11] [10]
Πόρτες βαρέως τύπου	0,35	0,39	0,44	0,49	0,54	0,57	[23]
Μεταλλική οροφή	0,13	0,09	0,08	0,09	0,11	0,11	[10] [11]
Διπλή γυψοσανίδα με ορυκτοβάμβακα	0,15	0,10	0,06	0,04	0,04	0,05	[1] [10] [11]
Μονή γυψοσανίδα με ορυκτοβάμβακα	0,30	0,12	0,08	0,06	0,06	0,05	[1] [10] [11]
μονή γυψοσανίδα με αέρα	0,08	0,11	0,05	0,03	0,02	0,03	[1] [10] [11]
Διάτρητη γυψοσανίδα	0,62	0,83	0,71	0,64	0,42	0,51	[1] [10] [11]
Ατσάλι	0,05	0,10	0,10	0,10	0,07	0,02	[23]
Κοινό	0,33	0,40	0,44	0,45	0,45	0,45	[10]

Πίνακας 10: Πίνακας με συντελεστές απορρόφησης επιφανειών και κοινού κατά τον αρχικό σχεδιασμό της αίθουσας στο λογισμικό CATT-Acoustic.

Πραγματοποιήθηκαν πολλαπλές αλλαγές και δοκιμές σε συντελεστές απορρόφησης των επιφανειών με στόχο την κατά δύναμη ταύτιση του δείκτη T_{30} που υπολογίζει το λογισμικό και αυτού που μετρήθηκε στην αίθουσα με τους διάφορους τρόπους.

Κατά το σχεδιασμό πραγματοποιήθηκαν δύο παραδοχές:

- Πρώτον, πως η οροφή, λόγω της πολυπλοκότητας της σιδηροκατασκευής από κάτω της, αλλά και της ίδιας, θα εμφανίζει υψηλές τιμές διάχυσης, υψηλότερες από τις γενικές τιμές <10 10 10 10 10 10> που ορίστηκαν για τις υπόλοιπες επιφάνειες. Ορίστηκαν οι τιμές <30 43 53 60 65 50> που εντοπίστηκαν στη

βιβλιογραφία για αντίστοιχες οροφές. Στη πράξη, η σιδηροκατασκευή από κάτω πιθανολογείται πως διαταράσσει σε μεγαλύτερο βαθμό την ομαλή και ευθεία διάδοση της πλειοψηφίας των ανακλάσεων, προκαλώντας ακόμα περισσότερη διάχυση. Η παραπάνω διατύπωση δεν μπορεί να δικαιολογηθεί με μετρήσιμο τρόπο και ο σχεδιασμός της στο λογισμικό θα απαιτούσε τεράστιο όγκο κώδικα με πολλά σημεία να ορίζονται σε μη πραγματικές θέσεις, πράγμα που αποκλείστηκε.

- Δεύτερον, παρότι αρχικά προχώρησε ο σχεδιασμός της αλουμινένιας τράσας, τελικά αφαιρέθηκε από τον τελικό σχεδιασμό καθώς το λογισμικό εντόπιζε ισχυρές ανακλάσεις από τις αντίστοιχες επιφάνειες οι οποίες στη πράξη έχουν κυκλική διατομή και πολύ μικρό πλάτος, πράγμα που τις κατατάσσει περισσότερο σε διαχυτικές παρά ανακλαστικές επιφάνειες. Οι συχνότητες με μεγάλα μήκη κύματος θα επηρεάζονται ελάχιστα από τη παρουσία της. Ο ακριβής σχεδιασμός τους θα απαιτούσε και εδώ τεράστιο φόρτο εργασίας και γιγάντωση του σχετικού κώδικα (.GEO αρχείο) με πιθανά αποτελέσματα που δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα, ενώ η δημιουργία μιας ενιαίας επιφάνειας αντίστοιχου εμβαδού για ευκολία στο σχεδιασμό, θα έκανε ακόμη εντονότερες τις πιθανές διαστρεβλώσεις στις διαδρομές των ανακλάσεων.

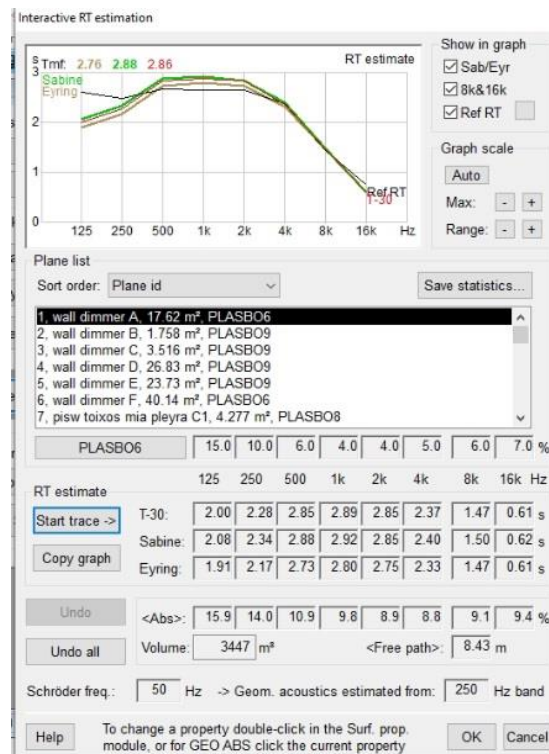
7.7 Αποτελέσματα λογισμικού

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του λογισμικού CATT-Acoustic για την αίθουσα στην υπάρχουσα της μορφή. Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για δυο περιπτώσεις. Πρώτον για την αίθουσα άδεια, χωρίς κοινό, όπως ήταν και στις μετρήσεις και δεύτερον για αίθουσα με κοινό καθώς η απορρόφηση λόγω του κοινού επηρεάζει σημαντικά όλες τις τιμές. Λόγω του ότι οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε άδεια αίθουσα θεωρήθηκε σημαντικός ο υπολογισμός και της άδειας αίθουσας στο λογισμικό για λόγους σύγκρισης. Επιπλέον, ως αίθουσα που πραγματοποιούνται πρόβες και σεμινάρια στα οποία ο αριθμός των ατόμων εντός της πιθανώς να είναι μικρός, οι δείκτες, όπως είπαμε θα μεταβάλλονται έντονα.

Το σκεπτικό της πραγματοποίησης μετρήσεων πριν το σχεδιασμό σε λογισμικό ακουστικών μελετών εξετάζεται στο [35]. Στη συγκεκριμένη μελέτη τα αποτελέσματα κρίνονται θετικά για έναν καθεδρικό ναό πολύ μεγαλύτερου όγκου και πολύπλοκης γεωμετρίας. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης μεταξύ μετρήσεων και σχεδιασμού στη περίπτωση της παρούσας διπλωματικής αναμένονται αντίστοιχα σε υψηλά επίπεδα ταύτισης.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν αρχές Αυγούστου του 2023 με θερμοκρασία 32°C και 65% υγρασία.

7.7.1 RT60, T30 για αίθουσα άδεια από κοινό

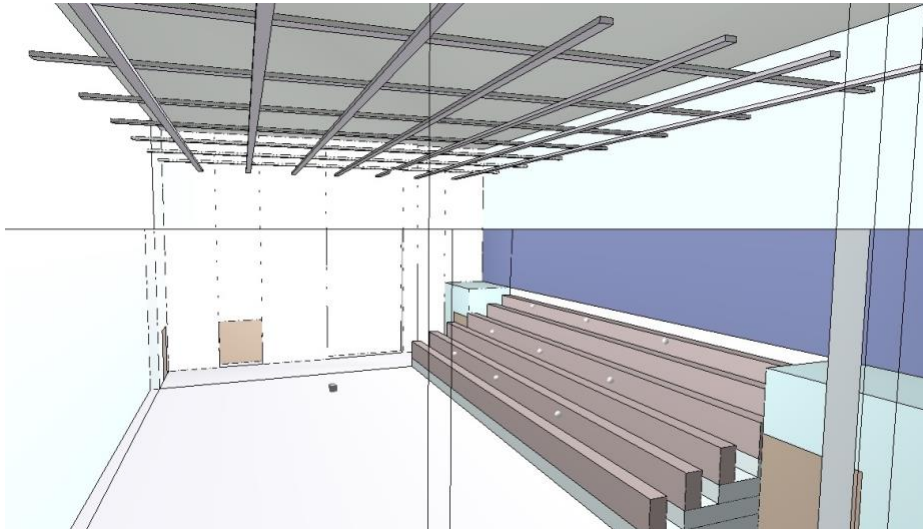


Εικόνα 70: Γρήγορος υπολογισμός χρόνου αντήχησης (κατά Sabine και κατά Eyring) και T30 της αίθουσας χωρίς κοινό. Με μαύρο χρώμα απεικονίζεται ο μέσος χρόνος T30 που υπολογίσαμε από τις μετρήσεις(για άδεια αίθουσα).

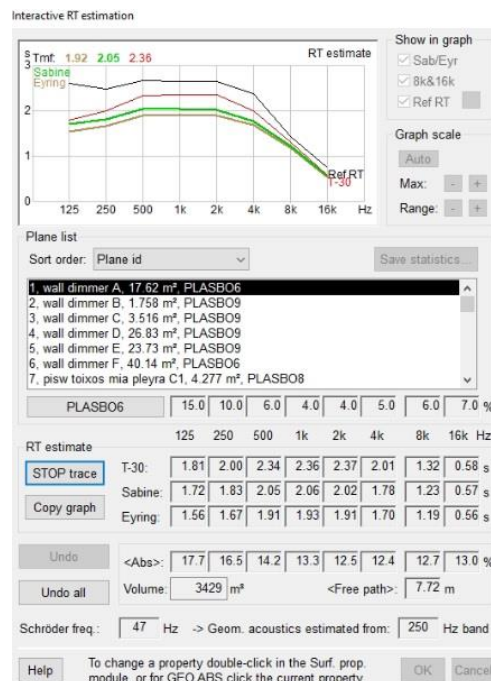
Στην παραπάνω Εικόνα (Εικόνα 70) φαίνεται με κόκκινο χρώμα ο χρόνος αντήχησης T_{30} που υπολόγισε το CATT-Acoustic. Με πράσινο χρώμα φαίνεται ο χρόνος αντήχησης κατά Sabine ενώ με το καφέ χρώμα κατά Eyring. Με μαύρο χρώμα φαίνεται ο χρόνος αντήχησης T30 αναφοράς (reference RT) που ορίσαμε και προσπαθήσαμε να επιτύχουμε. Παρατηρούμε πως οι τιμές που υπολογίζει το λογισμικό είναι πολύ κοντά στις πραγματικές, ειδικά από τα 250 Hz και άνω. Από εκεί και κάτω τα πράγματα είναι πιο δύσκολο να προσομοιαστούν καθώς οι μετρήσεις έδειξαν έντονες αυξομειώσεις στο διάστημα των πολύ χαμηλών συχνοτήτων (<125 Hz) μέχρι και περίπου τα 200 Hz. Ειδικά γύρω στα 80 Hz – 100 Hz όπου στις μετρήσεις εμφανίστηκαν έντονες κορυφώσεις, δεν γίνεται να αποτυπωθούν σωστά. Η διαφορά αυτή στη ζώνη των 125 Hz αναμένεται να επηρεάσει αρνητικά τους υπολογισμούς του δείκτη BR. Επίσης, τα διαστήματα οκτάβας για το οποία υπολογίζει το λογισμικό δεν είναι δυνατόν να αποτυπώσουν τις διακυμάνσεις στο ενδιαμέσο αυτών.

7.7.2 RT60, T30 για αίθουσα πλήρη κοινού

Σε αυτή τη περίπτωση όλα παρέμειναν ίδια όσον αφορά το σχεδιασμό στο λογισμικό και την επιλογή των συντελεστών απορρόφησης τους, με μόνη διαφορά την προσθήκη ορθογώνιων επιφανειών στο μπροστινό μέρος κάθε σκαλοπατιού των κερκίδων οι οποίες αντιστοιχούν στο κοινό.



Εικόνα 71: Τρισδιάστατη απεικόνιση της αίθουσας στο CATT-Acoustic έπειτα από προσθήκη των επιφανειών που καταλαμβάνει το κοινό, με την αντίστοιχη απορρόφηση να προστίθεται στην αίθουσα.



Εικόνα 72: Γρήγορος υπολογισμός χρόνου αντήησης (κατά Sabine και κατά Eyring) και T30 της αίθουσας με κοινό. Με μαύρο χρώμα απεικονίζεται ο μέσος χρόνος T30 που υπολογίσαμε από τις μετρήσεις (για άδεια αίθουσα).

Αντίστοιχα με τη περίπτωση της άδειας αίθουσας, προβαίνουμε στον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης της αίθουσας, αυτή τη φορά με τις κερκίδες γεμάτες από κοινό. Η μείωση του δείκτη T_{30} είναι σχετικά χαμηλή και σε λογικά πλαίσια (Πίνακας 11), με βάση την μεγάλη αναλογία ατόμων ανά όγκο όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.

	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	16kHz
T30 άδεια (sec)	2,00	2,28	2,85	2,89	2,85	2,37	1,47	0,61
T30 πλήρης (sec)	1,81	2,00	2,34	2,36	2,37	2,01	1,32	0,58
Διαφορά (sec)	0.19	0.28	0.51	0.53	0.48	0.36	0.15	0.03

Πίνακας 11: Αποτελέσματα γρήγορου υπολογισμού δείκτη T30 για αίθουσα άδειας, αίθουσας με κοινό και διαφορά τους.

7.8 Ανάλυση και σύγκριση αποτελεσμάτων πραγματικών μετρήσεων με αποτελέσματα λογισμικού προσομοίωσης

Σε αυτήν την ενότητα προχωράμε σε σύγκριση μεταξύ των ακουστικών παραμέτρων που εξάγαγε το λογισμικό προσομοίωσης (για άδεια αίθουσα) και των αντίστοιχων ακουστικών παραμέτρων που μετρήσαμε μέσω του REW. Παρουσιάζονται Διαγράμματα (Διαγράμματα 23-43) για τους δείκτες T_{30} , T_{20} , EDT , TS , D_{50} , C_{50} , C_{80} σε κάθε ένα από τα 9 σημεία μέτρησης στις κερκίδες των ακροατών. Στο λογισμικό έγιναν δυο προσομοιώσεις. Η πρώτη με την πηγή να είναι ένας ομιλητής και η δεύτερη η πηγή να είναι ένα ηχείο PA, με την κατευθυντικότητα να είναι πιο στενή ειδικά όσο ανεβαίνουμε συχνοτικά, αντίστοιχα με τη μέτρηση μέσω REW. Επίσης, έγινε προσπάθεια τοποθέτησης των δεκτών (receivers) στα αντίστοιχα σημεία με αυτά της μέτρησης όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα (Εικόνα 73).



Εικόνα 73: Γραφική αναπαράσταση μέσω του CATT-Acoustic των 9 θέσεων στις κερκίδες για τις οποίες υλοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις. Τα σημεία είναι αντίστοιχα με αυτά των μετρήσεων μέσω του REW.

Όπως θα φανεί και παρακάτω, ο σχεδιασμός στο λογισμικό, με χρήση ομιλητή ως πηγή, προσεγγίζει ικανοποιητικά τα αποτελέσματα στους δείκτες που σχετίζονται με τον χρόνο αντήχησης, διαφέρει αρκετά όμως στους δείκτες καταληπτότητας και ευκρίνειας. Θυμίζουμε πως η επιλογή των υλικών βασίστηκε στον μέσο χρόνο T30 που μετρήσαμε και με τους 3 τρόπους μέτρησης, λαμβάνοντας υπόψη μάλιστα και τις 3 επιπλέον μετρήσεις εντός σκηνης (δεξιά, αριστερά και πίσω από το ηχείο) κατά τις μετρήσεις μέσω REW.

Διαφορές μεταξύ των σημείων μέτρησης και σημείων receivers στο λογισμικό, χρήση διαφορετικής πηγής στις 2 περιπτώσεις, με την επιλογή παντοκατευθυντικής πηγής στο λογισμικό έναντι μιας υψηλά κατευθυντικής πηγής (ηχείο) κατά τη μέτρηση με REW, η πιθανώς όχι ακριβώς ίδια επιλογή υλικών στις κοντινές επιφάνειες με τα πραγματικά και τέλος οι διαφορές στις μεθόδους και κώδικες υπολογισμών μεταξύ του REW και του CATT-Acoustic μπορούν, ως σύνολο, να αποτελούν αιτίες για τις αποκλίσεις αυτές.

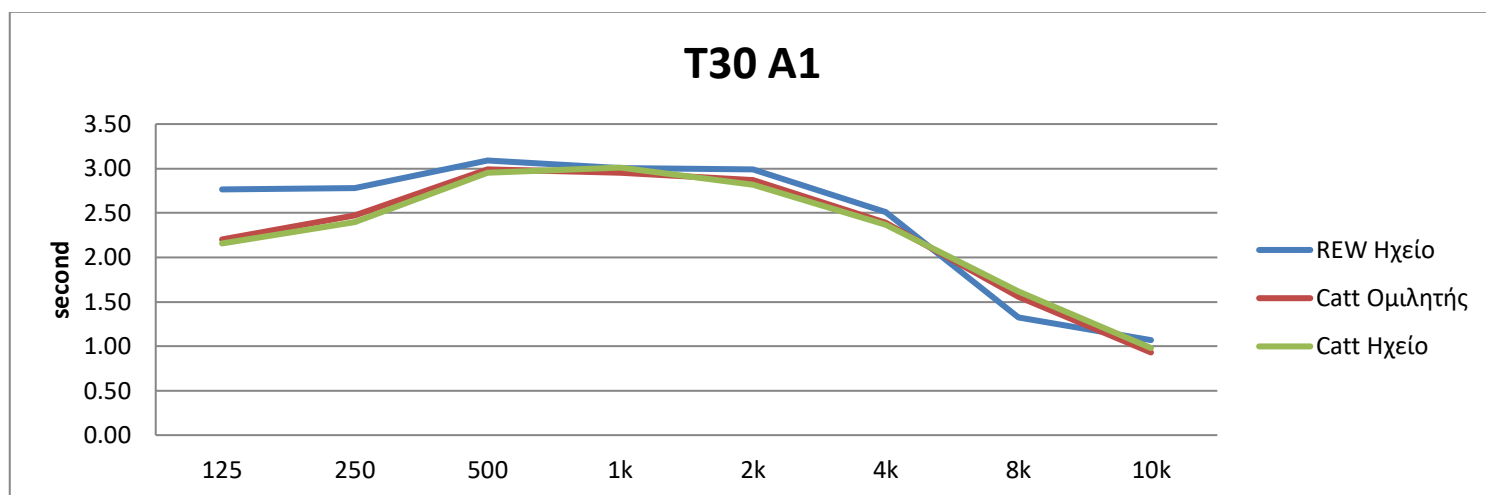
Από τα παραπάνω, πρωτεύουσας σημασίας κρίνεται η χρήση διαφορετικής πηγής. Η αυξημένη κατευθυντικότητα του ηχείου, ειδικά όσο ανεβαίνουμε συχνотικά σε συνδυασμό με την υψηλή στάθμη εκπομπής ηχητικής πίεσης στο οποίο ήταν ρυθμισμένο το ηχείο, πιθανώς ωφέλησαν σημαντικά τον απευθείας ήχο που κατάφθασε στο κάθε σημείο μέτρησης (τα πρώτα ελάχιστα msec) έναντι των καθυστερημένων ανακλάσεων, αλλάζοντας σημαντικά τον συσχετισμό του λόγου απευθείας προς ανακλώμενο/καθυστερημένο σήμα, επηρεάζοντας με τη σειρά τους όλους τους δείκτες καταληπτότητας και ευκρίνειας.

Αντίθετα, στους δείκτες που σχετίζονται με το χρόνο αντήχησης, οι οποίοι δεν υπολογίζουν το λόγο απευθείας προς ανακλώμενο ήχο, οι τιμές εμφανίζουν μεγαλύτερη ταύτιση. Σε γενικές γραμμές οι δείκτες μέσω REW είναι ελαφρώς αυξημένοι σε σχέση με αυτές του CATT-Acoustic, ειδικά όσο κατεβαίνουμε συχνότητα, πράγμα αναμενόμενο, καθώς κατά το σχεδιασμό της λάβαμε υπόψη και τις τιμές των μετρήσεων με μπαλόνι και παλμό οι οποίες παρουσίαζαν ελαφρώς χαμηλότερες τιμές T_{30} . Εάν η αίθουσα είχε σχεδιαστεί με βάση τις μετρήσεις μόνο μέσω του REW πιθανώς θα είχαμε ακόμη μεγαλύτερη ταύτιση.

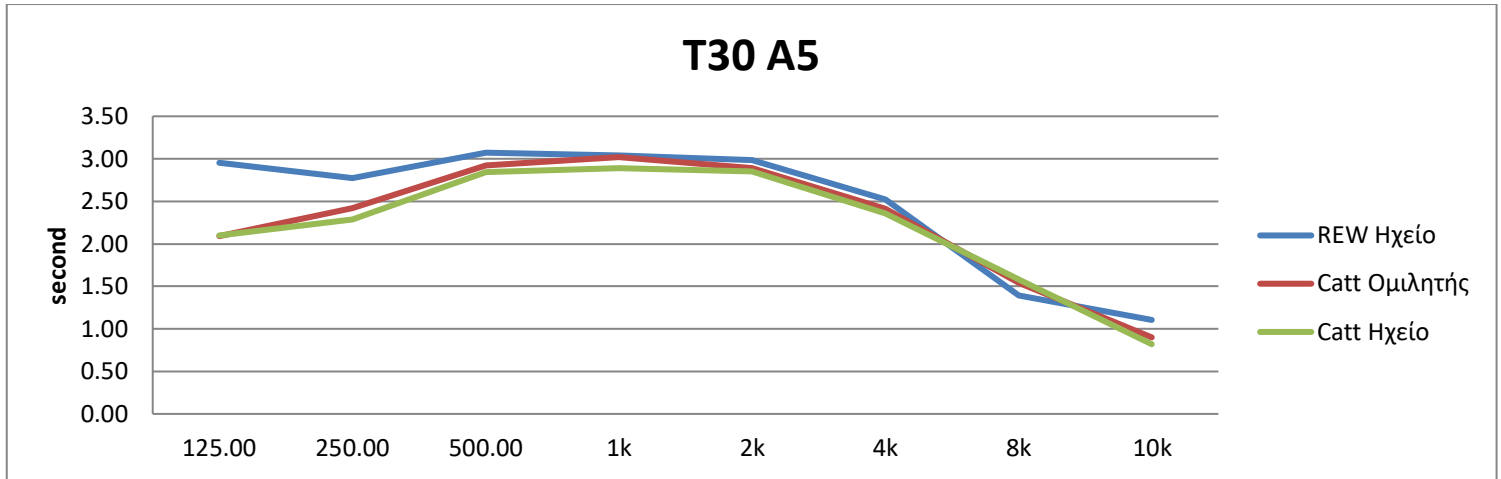
Για τους παραπάνω λόγους και ειδικά λόγω μεγάλης διαφοράς στους δείκτες καταληπτότητας και ευκρίνειας, πραγματοποιήθηκε επιπλέον προσομοίωση με χρήση ηχείου στη θέση του ομιλητή. Τα αποτελέσματα σε αυτή τη περίπτωση ταυτίζονταν αισθητά περισσότερο με αυτά των μετρήσεων.

Η διαδικασία σύγκρισης κρίνεται θετικά, ο σχεδιασμός εμφανίζει αρκετά μεγάλη πιστότητα στη συμπεριφορά της πραγματικής αίθουσας και βοηθά στην εξαγωγή συμπερασμάτων καθώς προχωρά η ακουστική μελέτη, με ένα βασικό συμπέρασμα, που ουσιαστικά αποδείχθηκε στο κεφάλαιο αυτό, να είναι πως η ηλεκτροακουστική εγκατάσταση, σωστά στοχευμένη προς το κοινό, θα αυξήσει κατά μεγάλο βαθμό όλους τους δείκτες καταληπτότητας και ευκρίνειας λόγου.

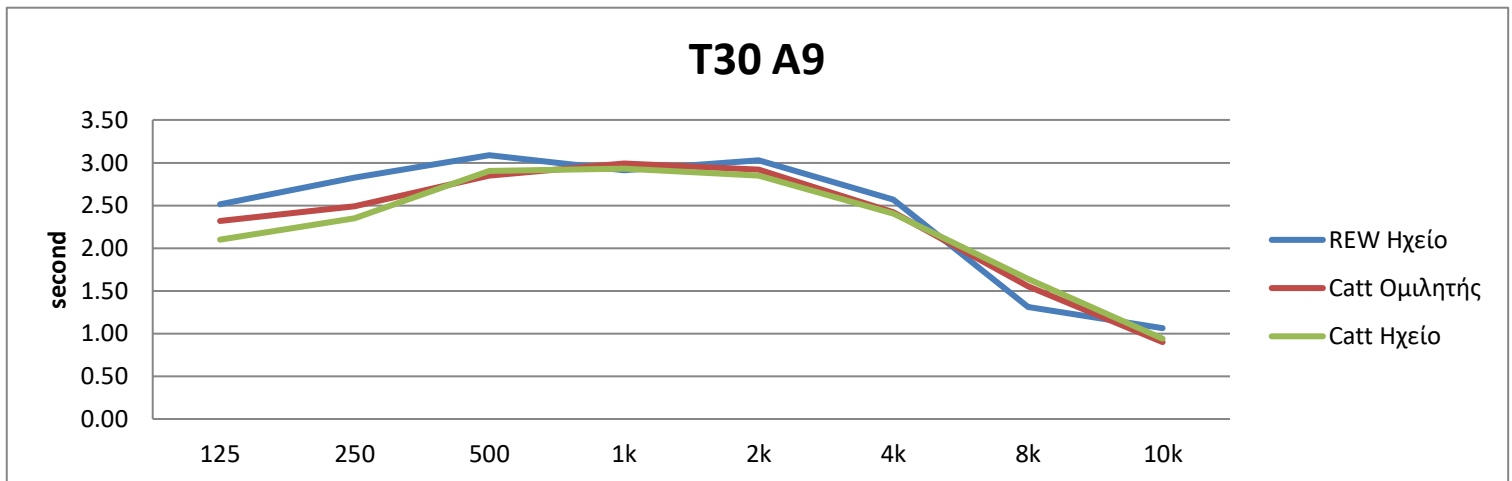
7.8.1 T_{30}



Διάγραμμα 23: Δείκτης T_{30} αρχικής αίθουσας για τη θέση A1.

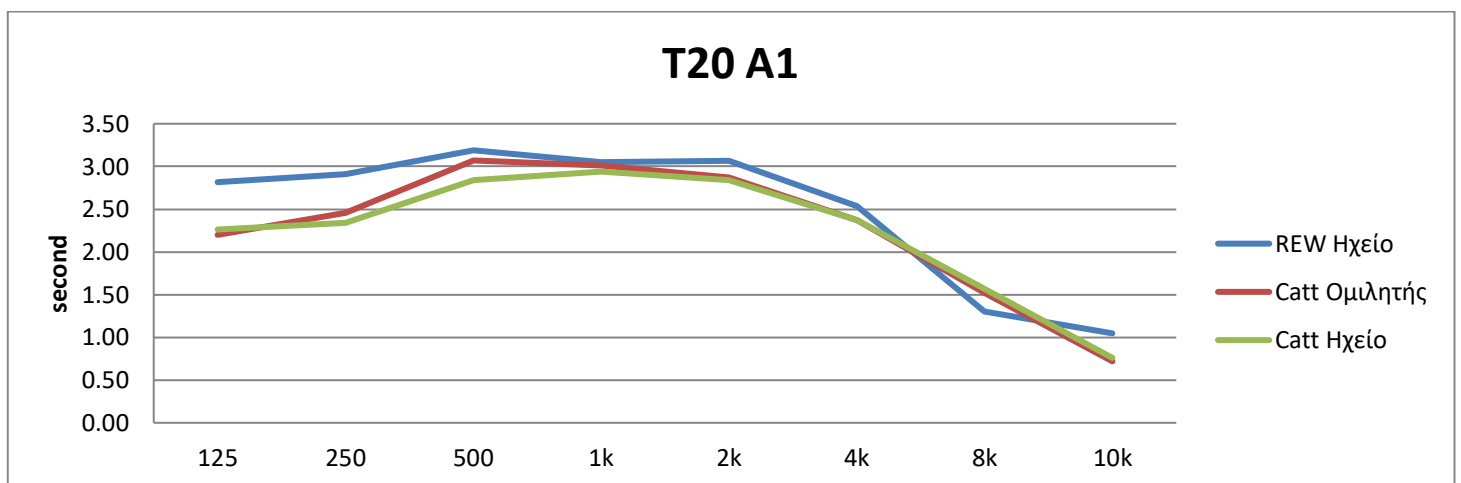


Διάγραμμα 24: Δείκτης T30 αρχικής αίθουσας για τη θέση A5.



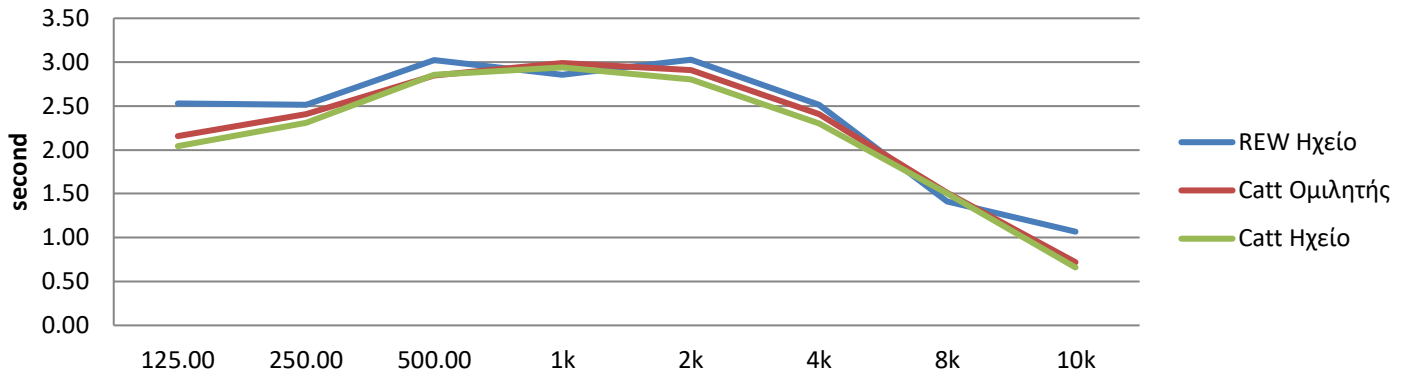
Διάγραμμα 25: Δείκτης T30 αρχικής αίθουσας για τη θέση A9.

7.8.2 T20



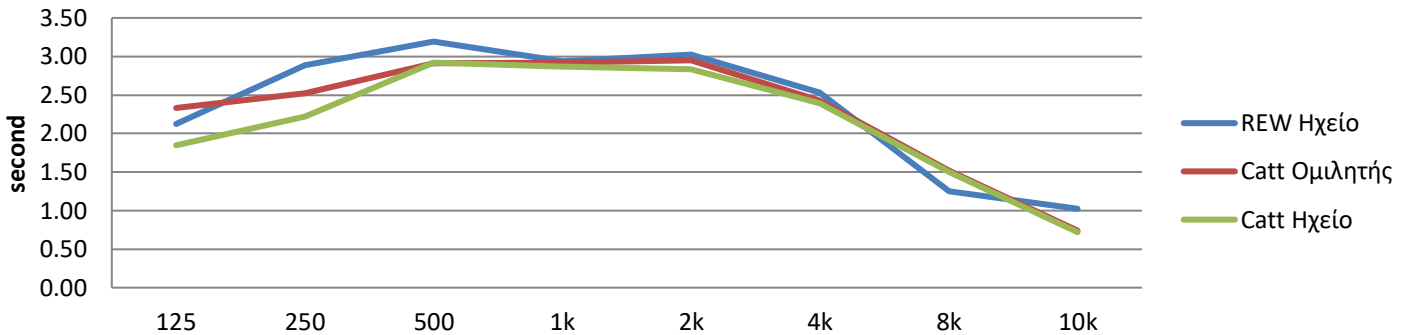
Διάγραμμα 26: Δείκτης T20 αρχικής αίθουσας για τη θέση A1.

T20 A5



Διάγραμμα 27: Δείκτης T30 αρχικής αίθουσας για τη θέση A5.

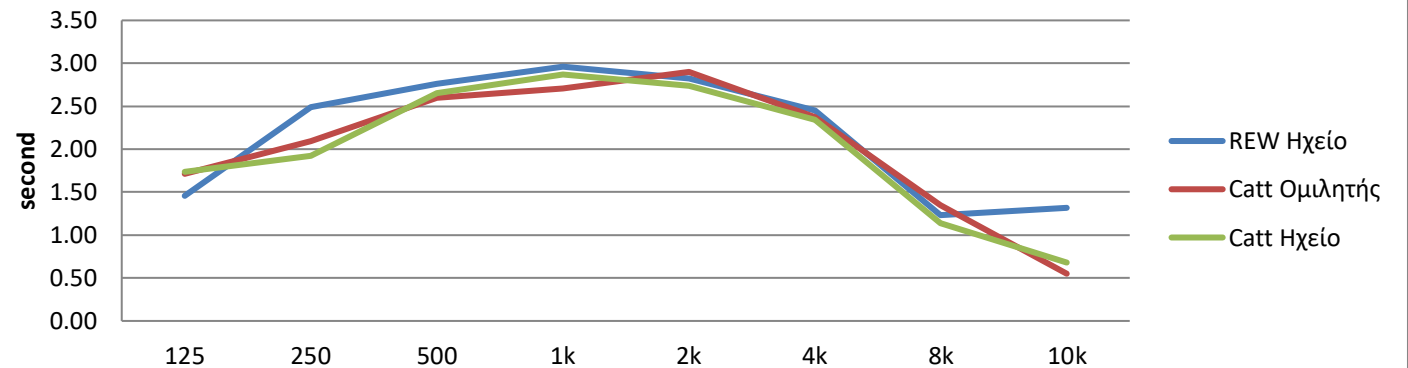
T20 A9



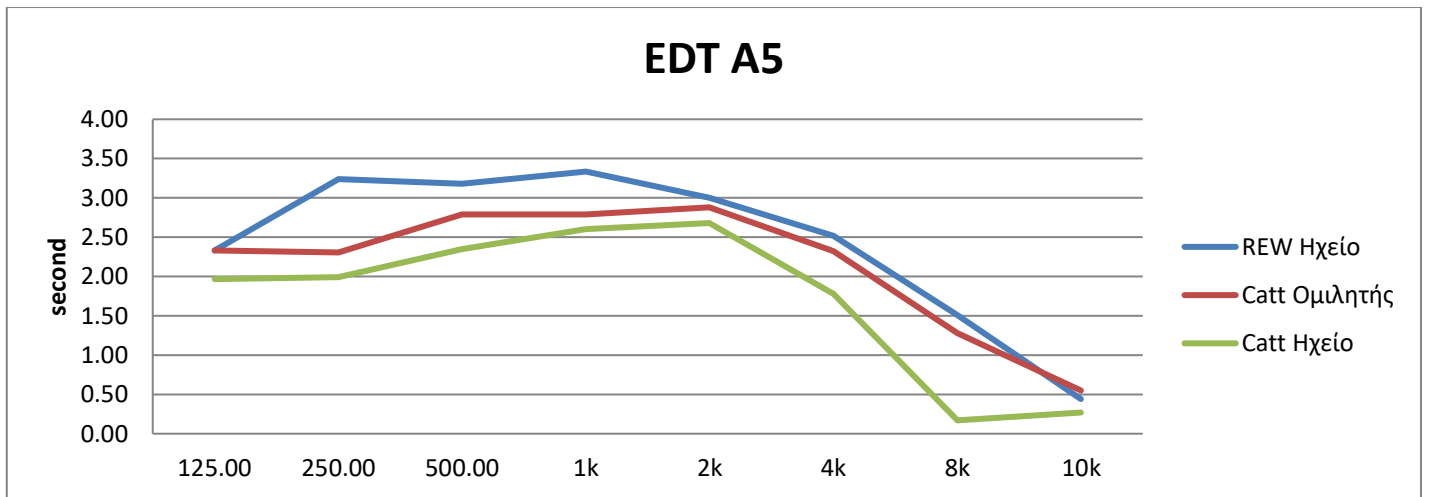
Διάγραμμα 28: Δείκτης T30 αρχικής αίθουσας για τη θέση A9.

7.8.3 EDT

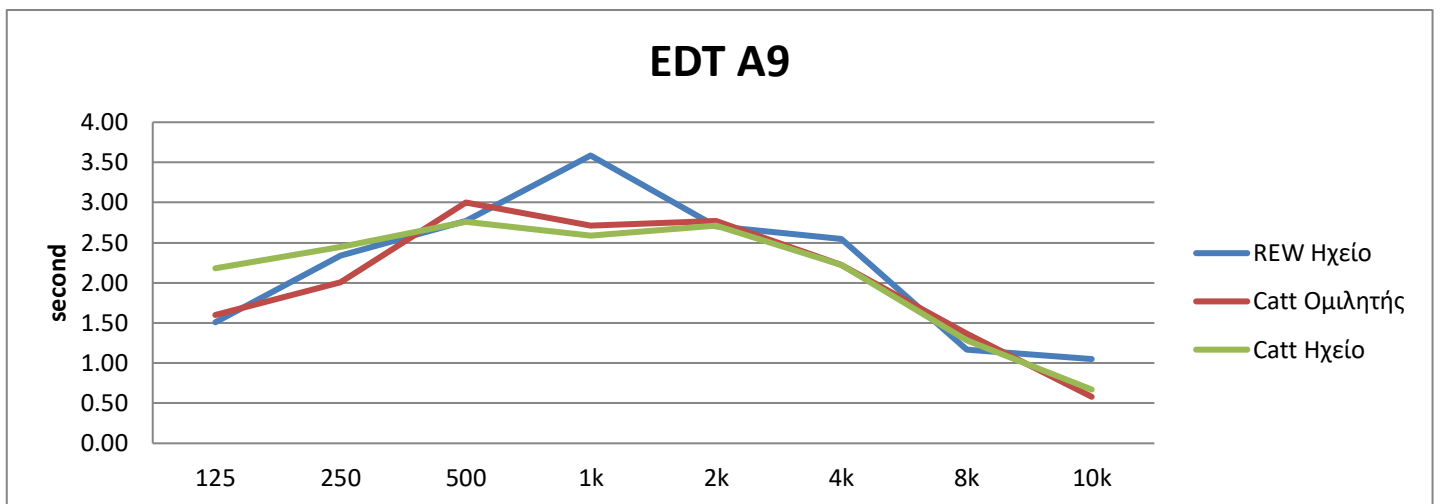
EDT A1



Διάγραμμα 29: Δείκτης EDT αρχικής αίθουσας για τη θέση A1.

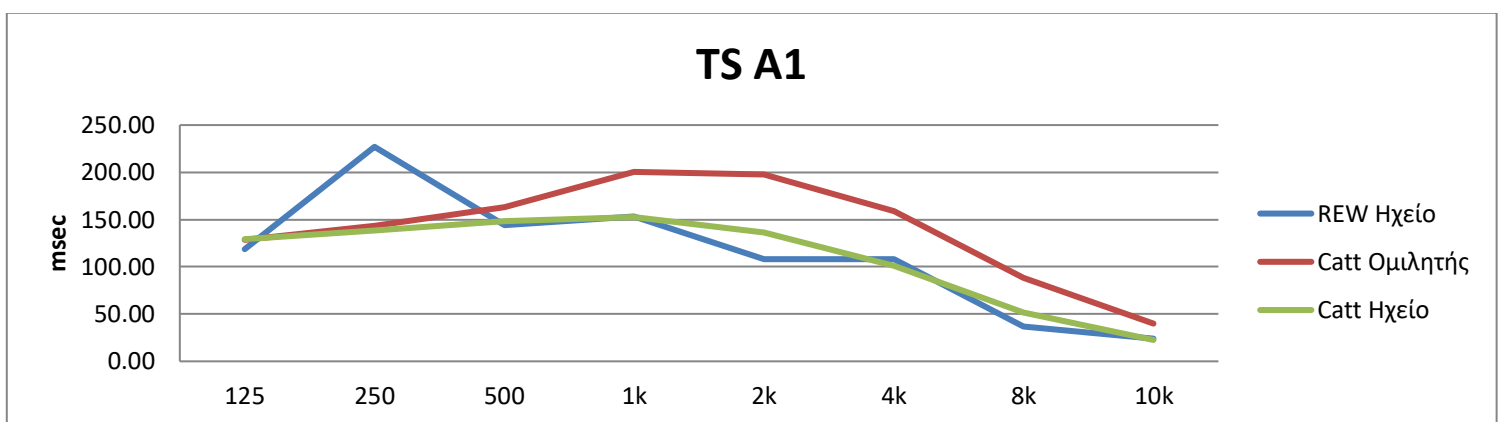


Διάγραμμα 30: Δείκτης EDT αρχικής αίθουσας για τη θέση A5.

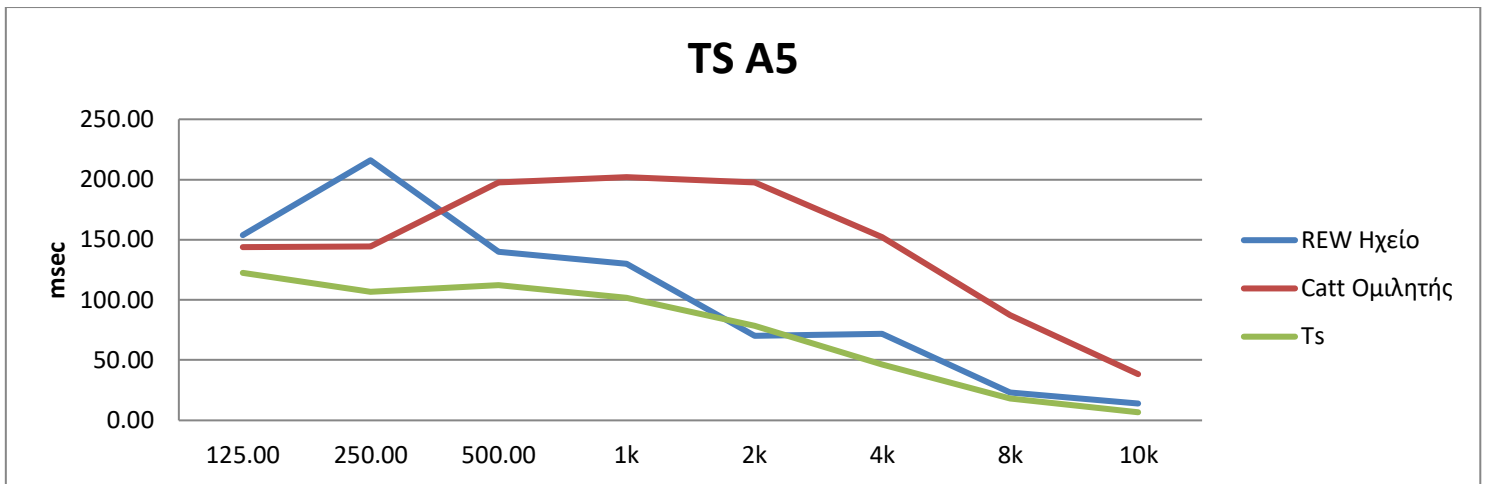


Διάγραμμα 31: Δείκτης EDT αρχικής αίθουσας για τη θέση A9.

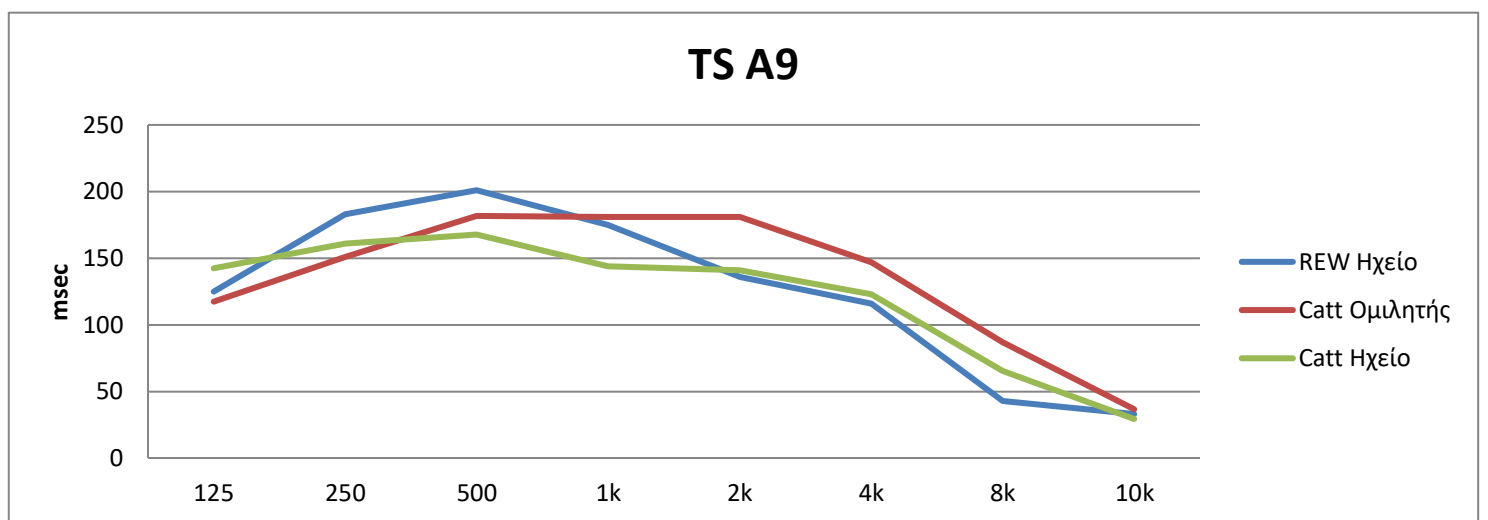
7.8.4 TS



Διάγραμμα 32: Δείκτης TS αρχικής αίθουσας για τη θέση A1.

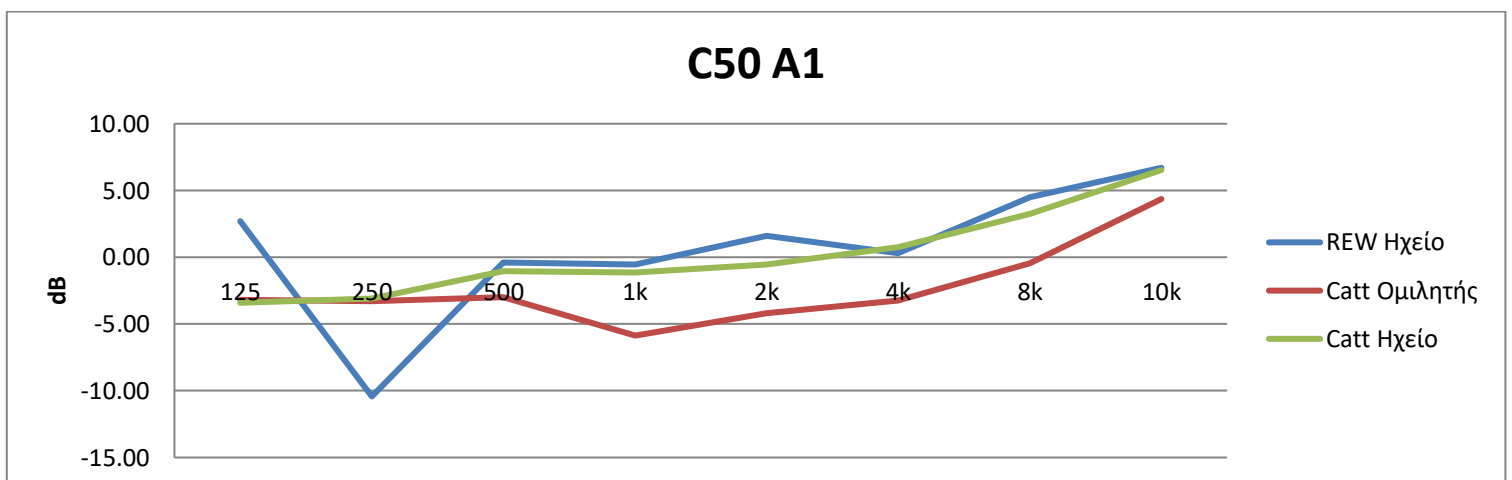


Διάγραμμα 33: Δείκτης TS αρχικής αίθουσας για τη θέση A5.

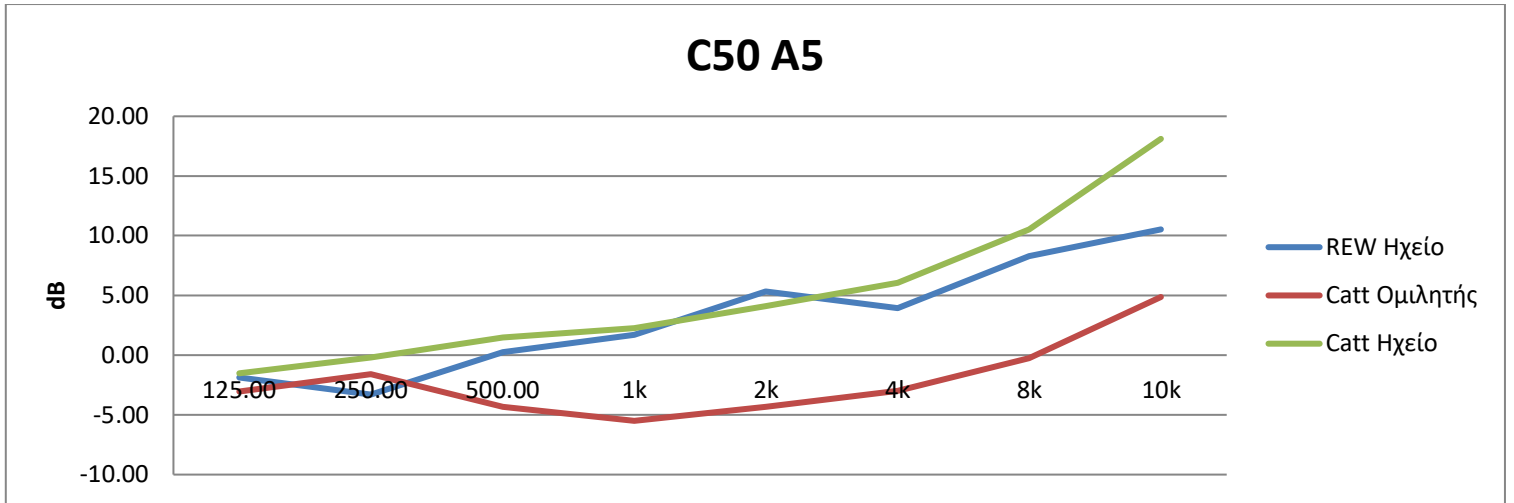


Διάγραμμα 34: Δείκτης TS αρχικής αίθουσας για τη θέση A9.

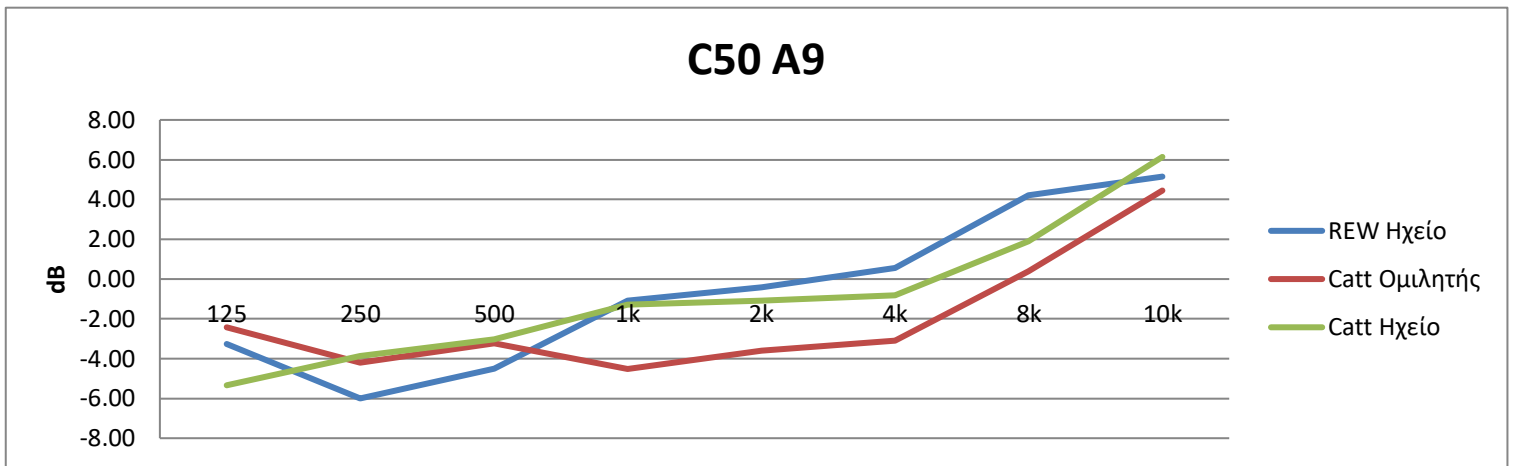
7.8.5 C50



Διάγραμμα 35: Δείκτης C50 αρχικής αίθουσας για τη θέση A1.

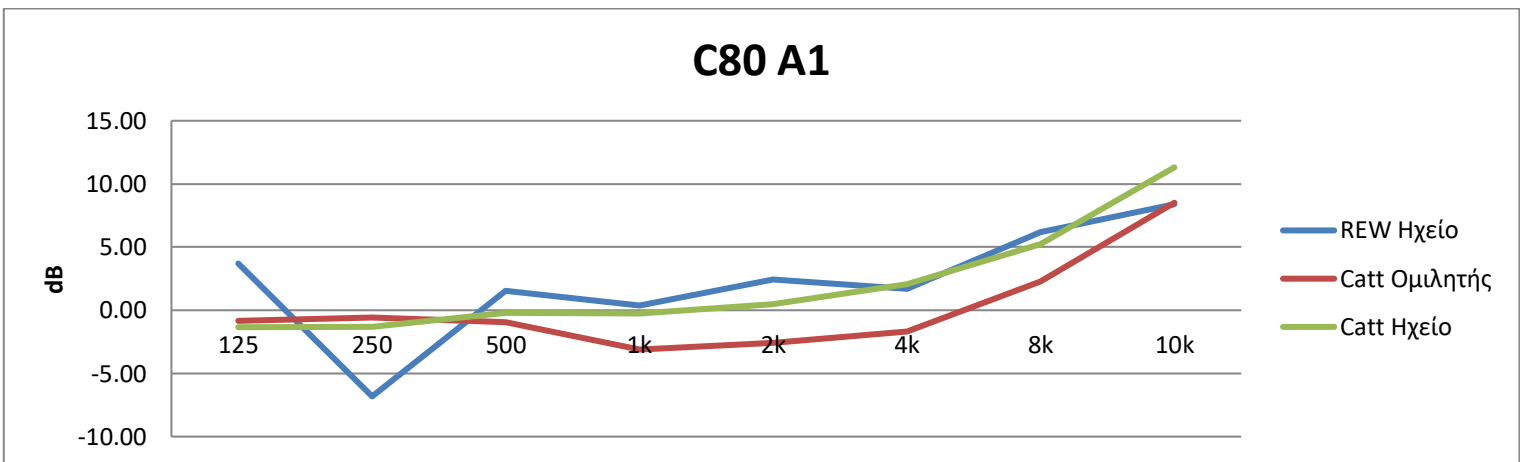


Διάγραμμα 36: Δείκτης C50 αρχικής αίθουσας για τη θέση A5.



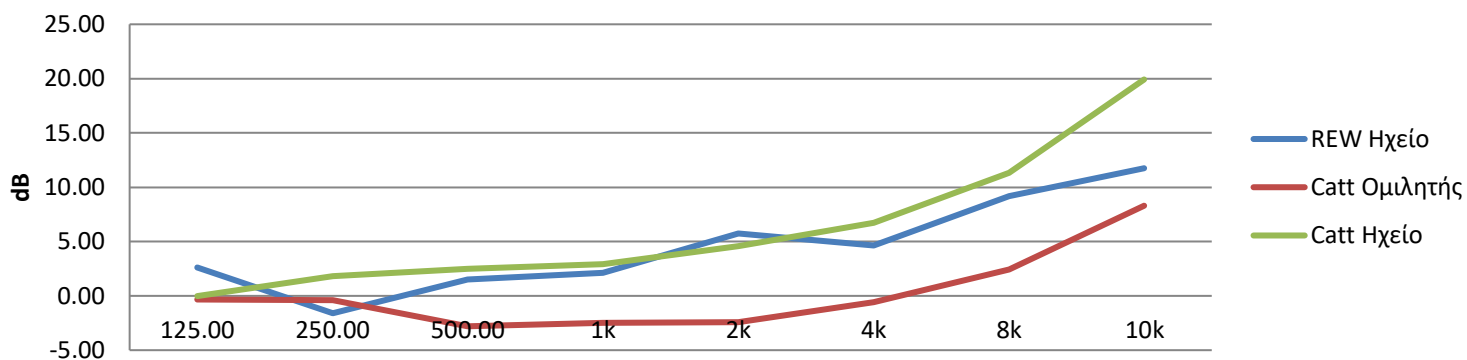
Διάγραμμα 37: Δείκτης C50 αρχικής αίθουσας για τη θέση A9.

7.8.6 C80



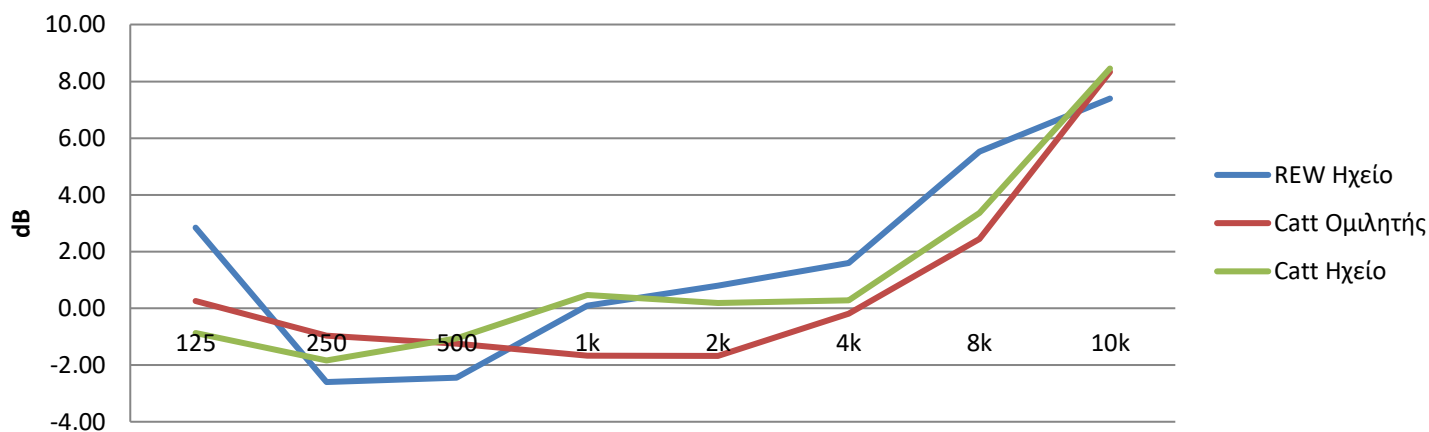
Διάγραμμα 38: Δείκτης C80 αρχικής αίθουσας για τη θέση A1.

C80 A5



Διάγραμμα 39: Δείκτης C80 αρχικής αίθουσας για τη θέση A5.

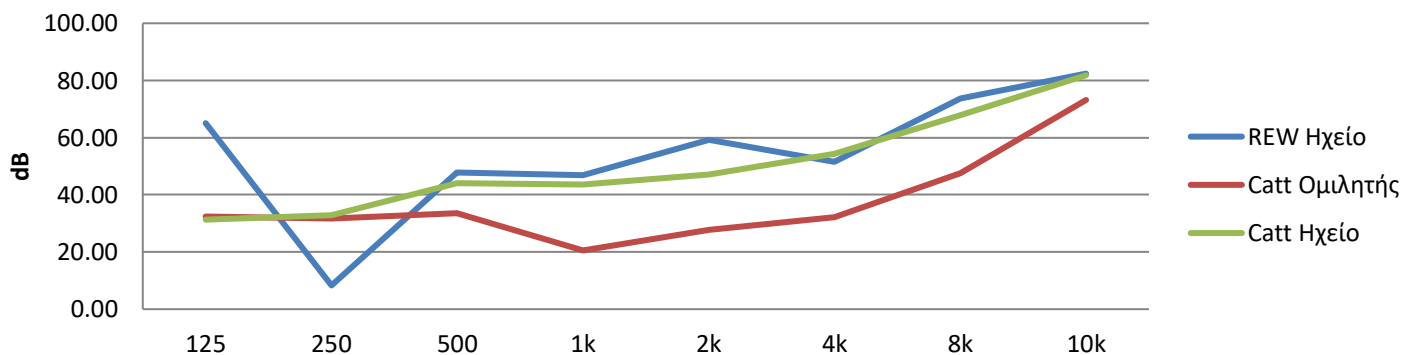
C80 A9



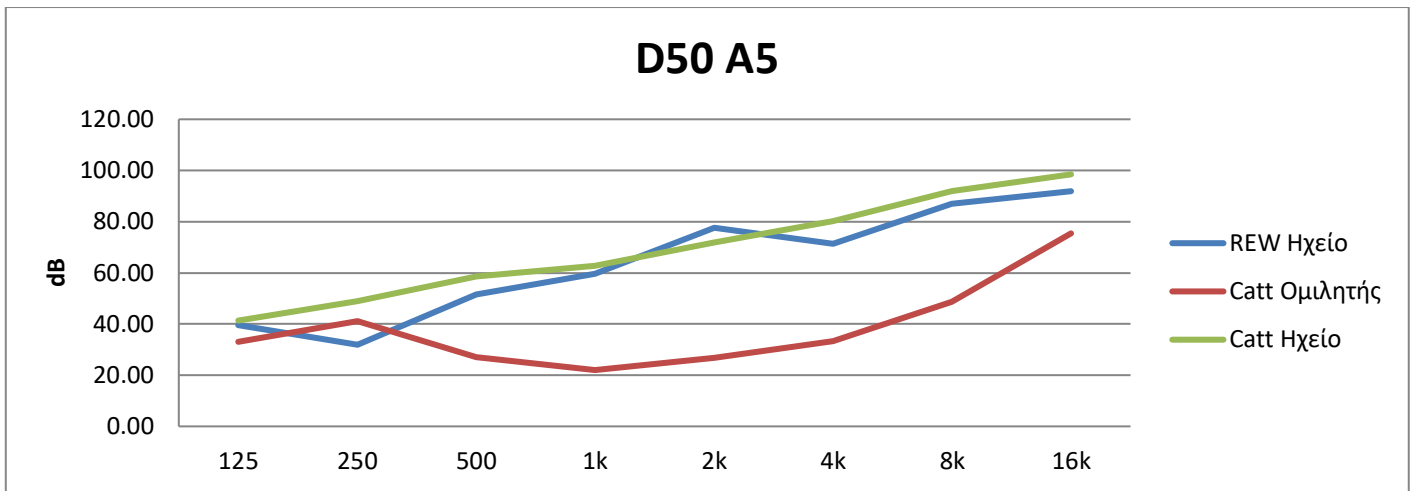
Διάγραμμα 40: Δείκτης C80 αρχικής αίθουσας για τη θέση A9.

7.8.7 D50

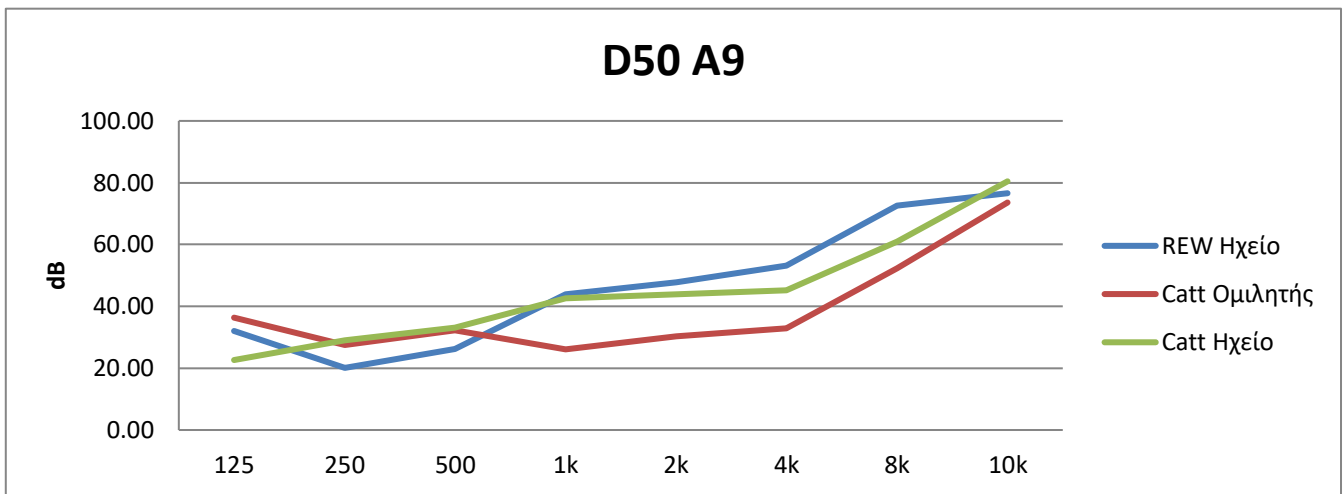
D50 A1



Διάγραμμα 41: Δείκτης D50 αρχικής αίθουσας για τη θέση A1.



Διάγραμμα 42: Δείκτης D50 αρχικής αίθουσας για τη θέση A5.



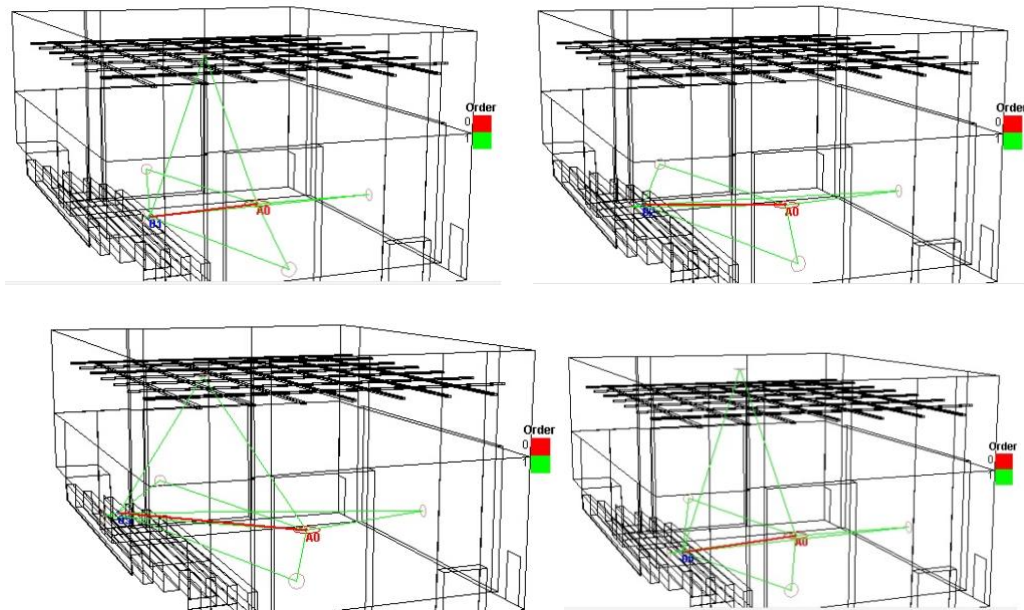
Διάγραμμα 43: Δείκτης D50 αρχικής αίθουσας για τη θέση A9.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 :

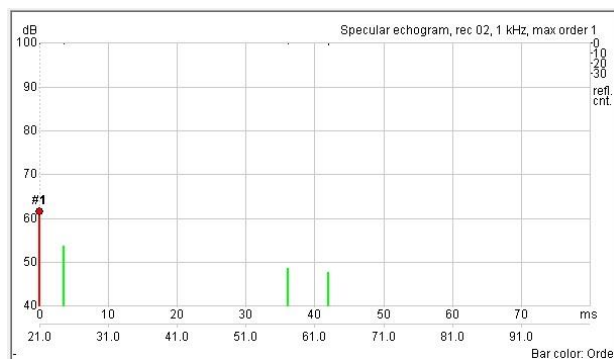
Προτάσεις για ακουστική βελτίωση της αίθουσας

8.1 Αύξηση πρώτων ανακλάσεων

Μέσω του λογισμικού CATT-Acoustic (Image source model) παρατηρούμε, στην άδεια αίθουσα, την προέλευση των πρώτων ανακλάσεων καθώς και το μήκος της διαδρομής που διανύουν και το χρόνο άφιξης τους στα σημεία των receivers.



Εικόνα 74: Γραφική απεικόνιση ανακλάσεων 1ης τάξης σε 4 διαφορετικά σημεία ακρόασης της αίθουσας στην υπάρχουσα της κατάσταση.



Διάγραμμα 44: Χρόνοι άφιξης ανακλάσεων 1ης τάξης στη θέση A2 της αίθουσας στην υπάρχουσα της κατάσταση.

Παρατηρούμε πως οι πρώτες ανακλάσεις προέρχονται από τους δύο πλευρικούς τοίχους, από τον πίσω τοίχο και από την οροφή (Εικόνα 74). Αυτό ισχύει για όλα τα σημεία του κοινού. Παρουσιάζονται ενδεικτικά (Διάγραμμα 44)

οι χρόνοι άφιξης τους για την θέση A05 που βρίσκεται ακριβώς στο κέντρο των κερκίδων. Η ανάκλαση από τον πίσω τοίχο καταφθάνει με καθυστέρηση περίπου 37 ms ενώ από τους πλευρικούς τοίχους περίπου 42 ms. Πλησιάζοντας προς την πηγή, οι τιμές καθυστέρησης δεν εμφανίζουν μείωση καθώς οι επιφάνειες των ανακλάσεων (τοίχοι) βρίσκονται αρκετά μακριά. Θέσεις πιο ψηλά στις κερκίδες εμφανίζουν αντίστοιχα μεγάλες τιμές σε συνδυασμό με μειωμένη όμως στάθμη του απευθείας ήχου, κάνοντας την αίσθηση ακρόασης ακόμη δυσκολότερη.

Σύμφωνα με το φαινόμενο Haas, οι καθυστερήσεις αυτές βρίσκονται στο όριο της ακουστικής ανάκλασης και την δημιουργία ειδώλου (διακριτής πηγής). Στην πράξη βέβαια, η ύπαρξη ανακλάσεων μεγαλύτερης τάξης ανάμεσα τους μειώνει τις πιθανότητες εμφάνισης του φαινομένου αυτού. Η χρήση ανακλαστήρων θα προσθέσει πρώτες ανακλάσεις στο διάστημα από 0 ms μέχρι 35 ms που, σύμφωνα με την ψυχοακουστική, αναμένεται να λειτουργήσουν ενισχυτικά στον απευθείας ήχο, μειώνοντας περαιτέρω την πιθανότητα εμφάνισης ακουστών ανακλάσεων και ειδώλων. Επιπλέον, η αύξηση των πρώτων ανακλάσεων θα αυξήσει και όλους τους δείκτες καταληπτότητας, διαύγειας και ευκρίνειας του λόγου και της μουσικής.

Για το λόγο αυτό προβαίνουμε στο σχεδιασμό ανακλαστήρων στην οροφή και επί των πλευρικών και όπισθεν τοίχων.

Στην οροφή τοποθετούνται δύο ανακλαστήρες, ένας άνωθεν των κερκίδων και ένας άνωθεν της σκηνής. Στους κάθετους τοίχους τοποθετούνται δύο ζευγάρια ανακλαστήρων. Το πρώτο στους πλευρικούς τοίχους, κοντά στις κερκίδες, όπου στην υπάρχουσα αίθουσα υπάρχουν δυο τοίχοι με μεγάλο ύψος εντελώς παράλληλοι μεταξύ τους, πράγμα όχι ιδανικό. Το δεύτερο ζευγάρι τοποθετήθηκε στον τοίχο στο πίσω μέρος της σκηνής, ο οποίος στην υπάρχουσα κατάσταση αποτελεί μια μεγάλη, εντελώς επίπεδη επιφάνεια παράλληλη προς τις κερκίδες.

Όλοι οι ανακλαστήρες συμβάλουν στην αύξηση των πρώτων ανακλάσεων σε κάθε θέση, πλην του ανακλαστήρα άνωθεν των κερκίδων που λειτουργεί μόνο για τους ακροατές στο άνω μέρος των κερκίδων και όχι για όσους κάθονται από τη μέση και κάτω. Οι θέσεις στο άνω μέρος της κερκίδας, λόγω απόστασης από τη σκηνή, απαιτούν μεγαλύτερη υποβοήθηση.

Αρχικά, η χρήση ανακλαστήρων στο ύψος του κεφαλιού των ακροατών στους πλευρικούς τοίχους αποκλείστηκε για λόγους γεωμετρίας της αίθουσας καθώς ο χώρος που θα κατελάμβαναν οι κατασκευές αυτές είναι ωφέλιμος χώρος της σκηνής σε ορισμένες εκδηλώσεις και η τοποθέτηση τους πιθανώς θα

δημιουργούσε προβλήματα άλλης φύσεως. Επιπλέον, δεξιά και αριστερά από τις κερκίδες βρίσκονται τα περάσματα των ακροατών προς αυτές και δεν μπορεί να επιτραπεί περαιτέρω στένεμα τους. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις όπου η τοποθέτηση τους δεν θα δημιουργούσε προβλήματα και θα βοηθούσαν την ακουστική. Σχεδιάστηκαν ανακλαστήρες οι οποίοι θα μπορούν να μετακινούνται ανά περίπτωση. Προτείνεται η χρήση των δύο πλευρικών ανακλαστήρων, αναρτημένων στον τοίχο σε συγκεκριμένο ύψος, με ειδικούς βραχίονες και με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει η δυνατότητα μετακίνηση τους μεταξύ θέσης εφαπτόμενης στον τοίχο και της επιθυμητής, ως προς τον κάθετο άξονα, κλήσης. Αντίστοιχο το σκεπτικό και για το ζεύγος ανακλαστήρων στο πίσω μέρος, με αντίστοιχους μηχανισμούς σε αντίστοιχο ύψος με τους ειδικούς βραχίονες να επιτρέπουν την μετατόπιση της μιας πλευράς των ανακλαστήρων από την εφαπτόμενη με τον τοίχο θέση μέχρι και την επιθυμητή κλήση. Σκοπός τους είναι να κατευθύνουν τα ηχητικά κύματα από την πηγή κατευθείαν προς το ακροατήριο, σε μεγαλύτερο ποσοστό από την υπάρχουσα κατάσταση. Επιπλέον, σπάζοντας την παραλληλία επιφανειών, εξαλείφουμε προβλήματα όπως το flutter echo καθώς επίσης και την εκπομπή ήχου προς άλλες κατευθύνσεις, ο οποίος θα φτάσει, έπειτα από πολλές ανακλάσεις, καθυστερημένα στο ακροατήριο. Ειδικά στην περίπτωση σύντομων κρουστικών ήχων (όπως ένα ταμπούρο ή τύμπανο) στο κέντρο της σκηνης, οι παράλληλοι πλευρικοί τοίχοι αποτελούν προβληματικό στοιχείο.

Οι ανακλαστήρες οροφής που προτείνονται αποτελούνται από δύο ενιαία κομμάτια έντονα ανακλαστικής επιφάνειας, με χαμηλούς συντελεστές απορρόφησης. Προβλέπεται η ανάρτηση τους με κατάλληλους μηχανισμούς από την σιδηροκατασκευή κάτω από την οροφή. Η τοποθέτηση τους θα πρέπει να γίνει σε σημεία που δεν εμποδίζουν την κίνηση της τράσας κατά την άνοδο της προς την οροφή και να υπάρχει επαρκής απόσταση ασφαλείας από τις αλυσίδες ανάρτησης της. Για το λόγο αυτό, το πλάτος του ανακλαστήρα επάνω από τη σκηνή πιθανώς να μην μπορεί να καλύψει όλο το πλάτος των κερκίδων καθώς στα όρια του βρίσκονται τα μοτέρ ανάρτησης της τράσας και οι αλυσίδες που την στηρίζουν. Στη περίπτωση αυτή ο ανακλαστήρας θα παραμείνει στο ίδιο σημείο με την ίδια κλήση αλλά με πλάτος μικρότερο αυτού της τράσας.

Οι διαστάσεις των ανακλαστήρων μελετήθηκαν έτσι ώστε να είναι λειτουργικοί σε διάφορες θέσεις της πηγής και μελετήθηκαν για διαφορετικές αποστάσεις από τις κερκίδες. Στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων η θέση του ομιλητή βρίσκεται στο ίδιο σημείο με αυτό που έγιναν οι μετρήσεις. Στους

παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι προτεινόμενες διαστάσεις και κλίσεις όλων των ανακλαστήρων (πίνακες 12, 13, 14, 15).

Ο ανακλαστήρας άνωθεν των κερκίδων θα έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

Πλάτος	14.60 m (Ίδιο με πλάτος κερκίδων)
Μήκος	1,93 m
Κλίση τοποθέτησης	18,2°
Ύψος τοποθέτησης (χαμηλή πλευρά)	6,58 m (από το πάτωμα)
Ύψος τοποθέτησης (υψηλή πλευρά)	7,18 m (από το πάτωμα)
Απόσταση ανακλαστήρα (αρχή) από τοίχο κοινού	0,45 m

Πίνακας 12: Προτεινόμενες διαστάσεις και συντεταγμένες τοποθέτησης ανακλαστήρα άνωθεν κερκίδων.

Ο ανακλαστήρας άνωθεν της σκηνής θα έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

Πλάτος	14,60 m (Ίδιο με πλάτος κερκίδων ή μικρότερο για ευκολία χρήσης τράσας)
Μήκος	6,63 m
Κλίση τοποθέτησης	6,1°
Ύψος (χαμηλή πλευρά)	10,48 m (από το πάτωμα)
Ύψος (υψηλή πλευρά)	11,18 m (από το πάτωμα)
Απόσταση ανακλαστήρα (αρχή) από τοίχο κοινού	4,45 m

Πίνακας 13: Προτεινόμενες διαστάσεις και συντεταγμένες τοποθέτησης ανακλαστήρα άνωθεν σκηνής.

Οι πλευρικοί ανακλαστήρες θα έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

Πλάτος	3,00 m
μήκος	4,00 m

Κλίση τοποθέτησης	2,86°
Ύψος τοποθέτησης (χαμηλή πλευρά)	1,5 m (από το πάτωμα)
Ύψος τοποθέτησης (υψηλή πλευρά)	4,00 m (από το πάτωμα)
Απόσταση ανακλαστήρα από τοίχο	0,40 m

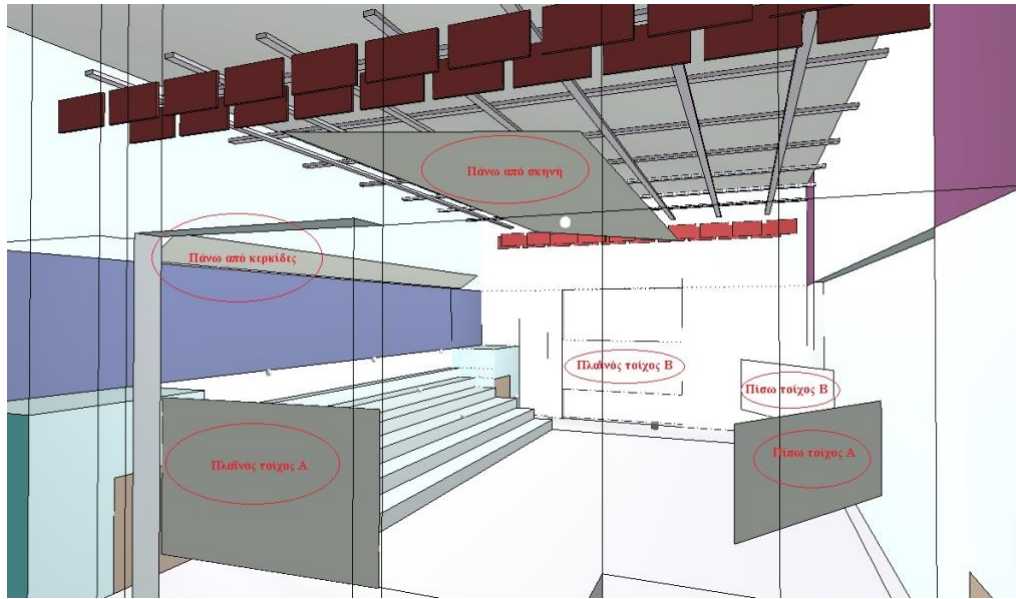
Πίνακας 14: Προτεινόμενες διαστάσεις και συντεταγμένες τοποθέτησης πλευρικών ανακλαστήρων.

Οι πίσω ανακλαστήρες θα έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

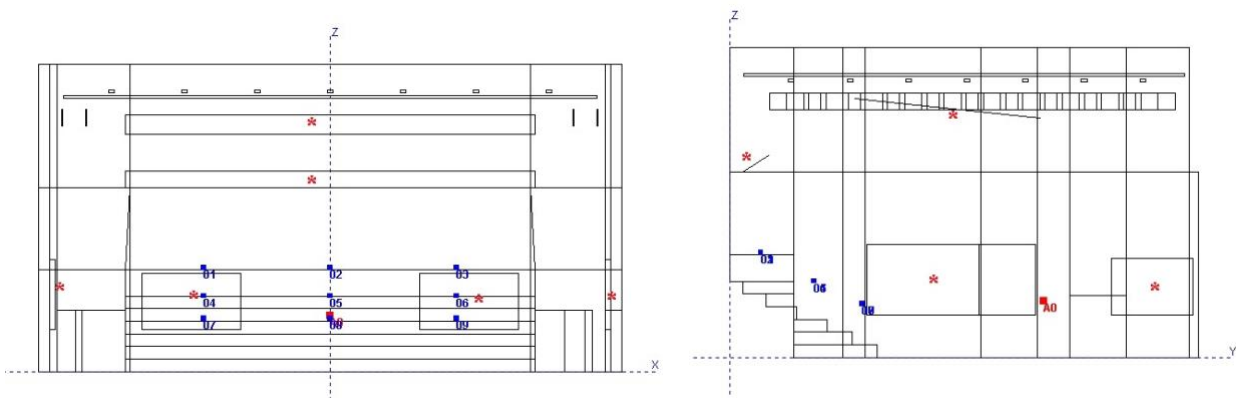
Πλάτος	2,00 m
μήκος	4,55 m
Κλίση τοποθέτησης	39,6°
Ύψος τοποθέτησης (χαμηλή πλευρά)	1,5 m (από το πάτωμα)
Ύψος τοποθέτησης (υψηλή πλευρά)	3,5 m (από το πάτωμα)
Απόσταση ανακλαστήρα από τοίχο	0,20 m

Πίνακας 15: Προτεινόμενες διαστάσεις και συντεταγμένες τοποθέτησης πίσω ανακλαστήρων.

Η τελική τους μορφή φαίνεται στις παρακάτω Εικόνες τρισδιάστατης απεικόνισης, κάτοψης και τομής (Εικόνες 75, 76, 77, 78). Με κόκκινο κύκλο και αστερίσκο συμβολίζεται η θέση τους.

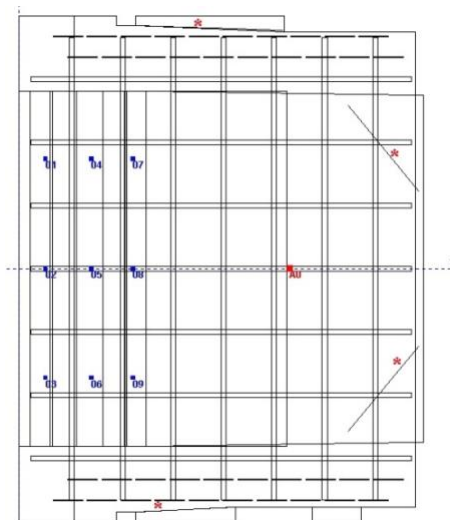


Εικόνα 75: Γραφική απεικόνιση των ανακλαστήρων που προστέθηκαν στην αίθουσα.



Εικόνα 76: (Αριστερά) Όψη Β της αίθουσας έπειτα από προσθήκη ανακλαστήρων.

Εικόνα 77: (Δεξιά) Όψη Α της αίθουσας έπειτα από προσθήκη ανακλαστήρων.



Εικόνα 78: Κάτοψη της αίθουσας έπειτα από προσθήκη ανακλαστήρων.

Η ανάρτηση τους από τη σιδηροκατασκευή μπορεί να γίνει αντίστοιχα με τον τρόπο που εμφανίζεται στην παρακάτω Εικόνα (Εικόνα 79). Προσοχή, η Εικόνα δεν παρέχει ουδεμίαν πιστοποίηση ασφαλείας ούτε αποτελεί πρόταση για σωστή και εγκεκριμένη ανάρτηση των ανακλαστήρων. Αποτελεί απλά έναν οδηγό για οπτική διευκόλυνση του τελικού αισθητικού αποτελέσματος αλλά και απόδειξη πως η πρόταση είναι εφικτή. Σε κάθε περίπτωση η ανάρτηση τους θα πρέπει να γίνει υπό την επίβλεψη και εποπτεία κατάλληλα εκπαιδευμένων και πιστοποιημένων μηχανικών και τεχνικών και με χρήση πιστοποιημένων μηχανισμών ανάρτησης.



Εικόνα 79: Παράδειγμα ανάρτησης ανακλαστήρων οροφής [27].

Από τη πλευρά της οροφής οι ανακλαστήρες μπορούν να αναρτηθούν με χρήση αλυσίδας και ναυτικών κλειδιών με τα κατάλληλα πάχη και τις αντίστοιχες πιστοποιήσεις (ISO) ανοχής φορτίου. Σε περίπτωση ενιαίας επιφάνειας ανακλαστήρα, εφόσον η ανάρτηση συμβεί με 4 ανεξάρτητα μοτέρ (ένα για κάθε γωνία), αντίστοιχα με αυτά τις τράσας, θα είναι δυνατή η μεταβολή της κλήσης τους. Παράγοντας που σίγουρα ανεβάζει το κόστος και την περιπλοκότητα της εγκατάστασης.

Έπειτα από αναζήτηση σε εταιρίες που προμηθεύουν αντίστοιχα υλικά επιλέχθηκε το Acoustical reflector / diffuser (ακουστικός ανακλαστήρας/ διαχυτής) της εταιρίας Ovation. Πρόκειται για ακουστικά πάνελ που αναρτιούνται από την οροφή σε μεγάλους χώρους για τον έλεγχο των ανακλάσεων και αύξηση της διάχυσης του ήχου. Στην παρακάτω Εικόνα (Εικόνα 80) φαίνεται ένα παράδειγμα παρμένο από τον ιστότοπο της εταιρίας.



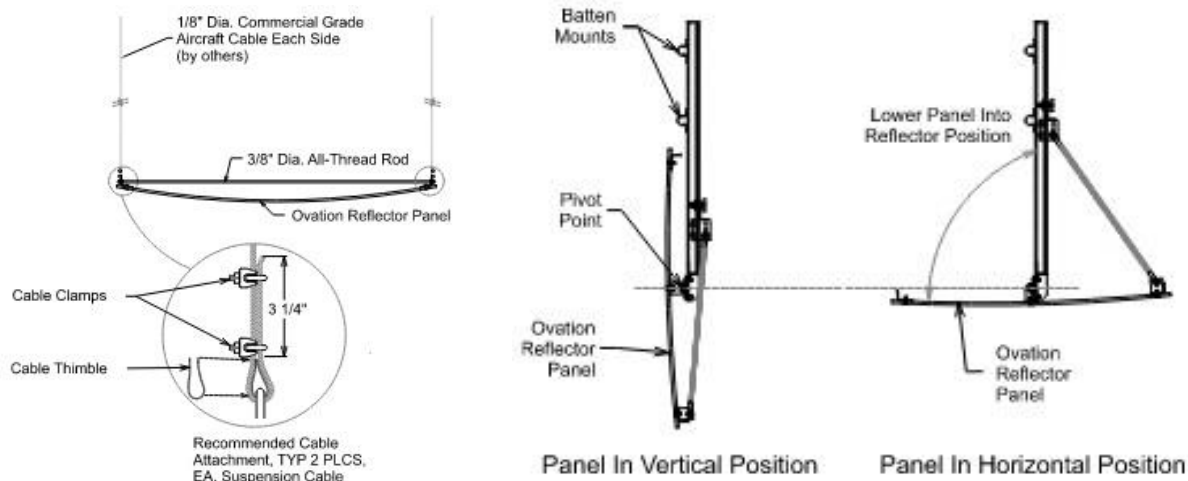
Εικόνα 80: Παράδειγμα χρήσης ανακλαστήρων Acoustical reflector της εταιρίας Ovation σε πραγματικές συνθήκες [28].

Η ανακλαστική τους πλευρά είναι είτε από κόντρα πλακέ 1/2" ή laminate (καπλαμάς ξύλου) πάχους 3/4". Δύναται να τοποθετηθεί δημιουργώντας καμπύλη, διαχέοντας με αυτό το τρόπο περισσότερο τον ήχο. Η περίπτωση αυτή αναμένεται πως θα βελτιώνει ακόμη περισσότερο την διάχυση του ήχου στο ακροατήριο. Το συγκεκριμένο υλικό εμφανίζει τους παρακάτω συντελεστές απορρόφησης (Πίνακας 16):

Hz	125	250	500	1k	2k	4k
Απορρόφηση α	0.14	0.00	0.03	0.03	0.04	0.13

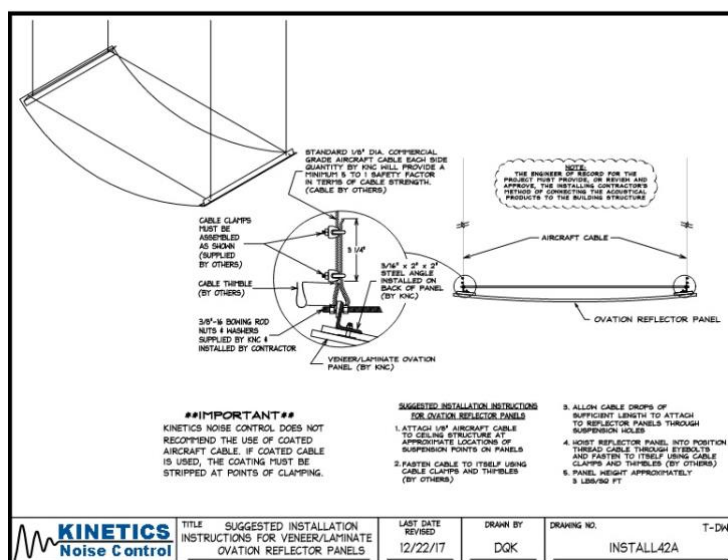
Πίνακας 16: Συντελεστές απορρόφησης ανά οκτάβα ανακλαστήρων Acoustical reflector της εταιρίας Ovation [28].

Στον ιστότοπο της εταιρίας υπάρχουν όλα τα σχετικά εγχειρίδια χρήσης, πιστοποιήσεων και ενδειγμένων τρόπων ανάρτησης. Ο βασικός τρόπος ανάρτησης με ειδικούς μηχανισμούς που επιτρέπουν τη ρύθμιση της κλήσης τους φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα (Εικόνες 82). Παρακάτω (Εικόνες 81, 83) απεικονίζεται και επιπλέον τρόπος ανάρτησης παρόμοιος με αυτόν που παρουσιάστηκε παραπάνω.



Εικόνα 81: (Αριστερά) Απόσπασμα από εγχειρίδιο ανάρτησης ανακλαστήρων οροφής με τους προτεινόμενους μηχανισμούς (Α) [28].

Εικόνα 82: (Δεξιά) Απόσπασμα από εγχειρίδιο ανάρτησης ανακλαστήρων οροφής με τους προτεινόμενους μηχανισμούς (Β) [28].



Εικόνα 83: Απόσπασμα από εγχειρίδιο ανάρτησης ανακλαστήρων οροφής με τους προτεινόμενους μηχανισμούς (Γ) [28].

Οι πλευρικοί και πίσω ανακλαστήρες μπορούν να τοποθετηθούν, όπως προαναφέρθηκε, με ειδικούς βραχίονες ρυθμιζόμενης κλίσης, που να μοιάζουν με τις παρακάτω Εικόνες (Εικόνες 84, 85). Το παράδειγμα που ακολουθεί είναι απλά μια παραπομπή για καλύτερη απεικόνιση του προτεινόμενου τρόπου στήριξης τους. Το σκεπτικό είναι πως οι ανακλαστήρες αυτοί θα δύναται να βρεθούν σε παράλληλη θέση ως προς τον τοίχο στήριξης τους με συνέπεια την ακυρόση της συνεισφοράς και λειτουργίας τους. Στην παράλληλη θέση η συμπεριφορά των συγκεκριμένων τοίχων ως προς τις ανακλάσεις θα είναι ίδια με την αυτήν της υπάρχουσας κατάστασης της αίθουσας.

Οι μηχανισμοί που θα χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να παρέχουν υψηλή αντοχή και μηδαμινή πιθανότητα πτώσης των ανακλαστήρων. Οι προτεινόμενες κλήσεις και θέσεις θα αναγράφονται επάνω τους αναλόγως την περίπτωση.



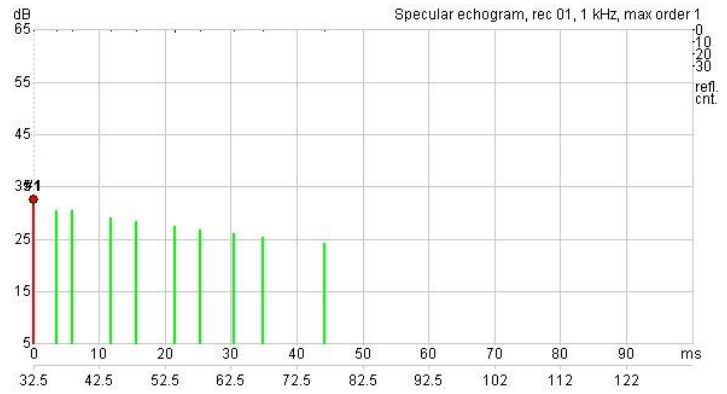
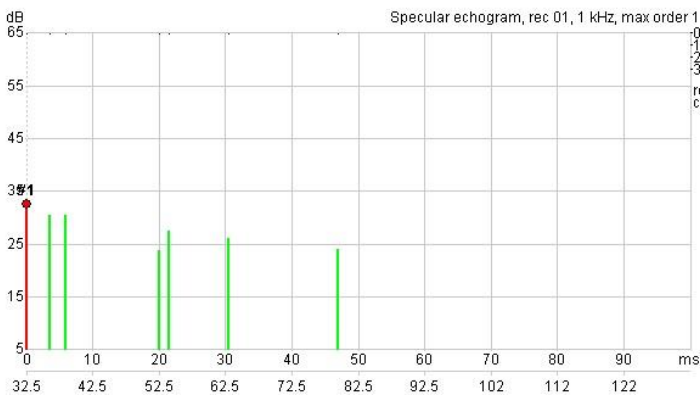
Εικόνα 84: Παράδειγμα Α τρόπου πτυσσόμενης ανάρτησης πλευρικών και πίσω ανακλαστήρων [71].



Εικόνα 85: Παράδειγμα Β τρόπου πτυσσόμενης ανάρτησης πλευρικών και πίσω ανακλαστήρων [72].

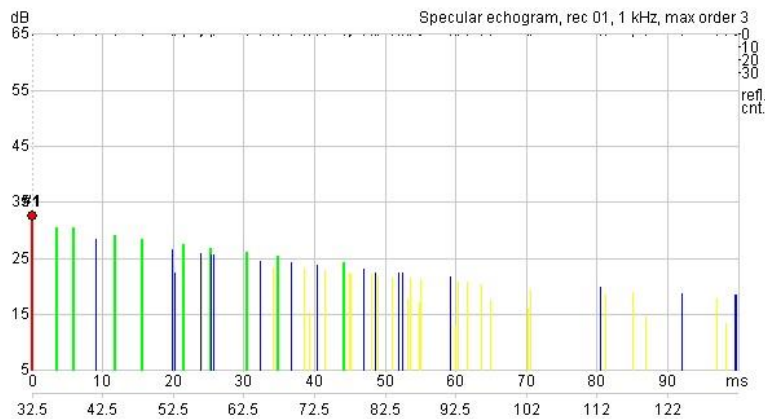
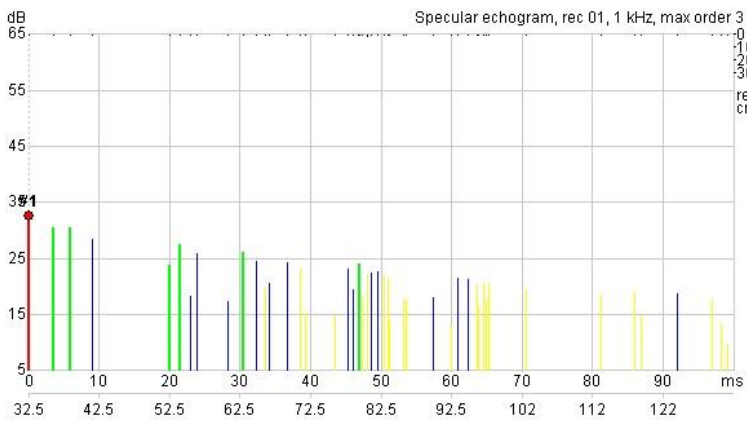
Ακολουθούν Διαγράμματα (Διαγράμματα 45-560 από το λογισμικό CATT-Acoustic, για 3 θέσεις του κοινού, που δείχνουν τη μεταβολή των πρώτων ανακλάσεων καθώς και το νέο χρόνο άφιξης τους.

- Θέση A1



Διάγραμμα 45: (Αριστερά) Απεικόνιση ανακλάσεων 1ης τάξης θέσης A1 αρχικής αίθουσας.

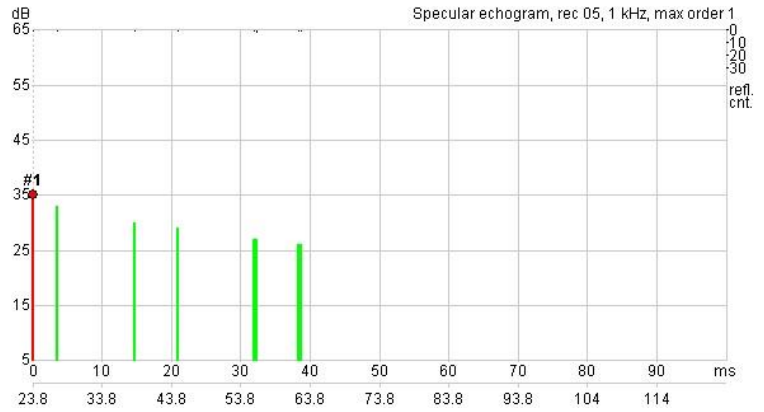
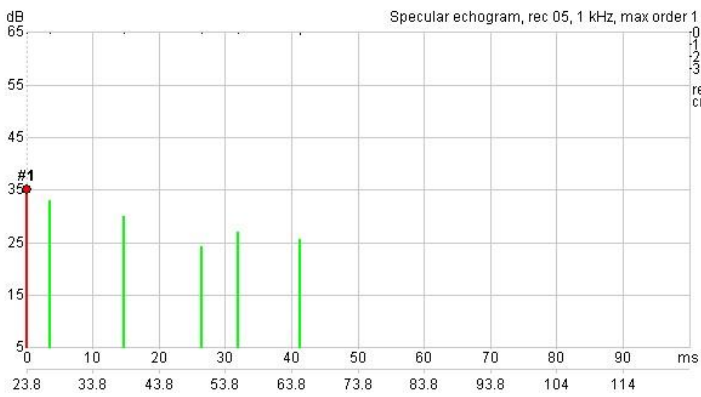
Διάγραμμα 46: (Δεξιά) Απεικόνιση ανακλάσεων 1ης τάξης θέσης A1 έπειτα από τοποθέτηση ανακλαστήρων.



Διάγραμμα 47: (Αριστερά) Απεικόνιση ανακλάσεων 3ης τάξης θέσης A1 αρχικής αίθουσας.

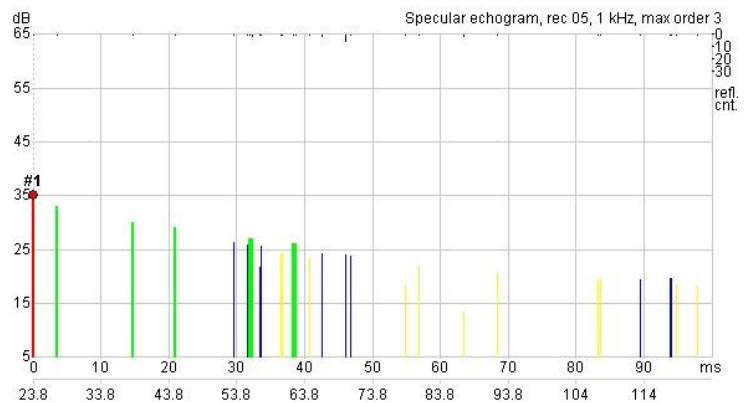
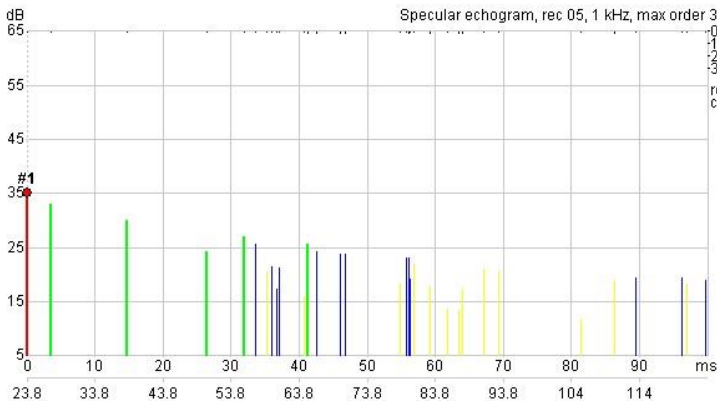
Διάγραμμα 48: (Δεξιά) Απεικόνιση ανακλάσεων 3ης τάξης θέσης A1 έπειτα από τοποθέτηση ανακλαστήρων.

- Θέση A5



Διάγραμμα 49: (Αριστερά) Απεικόνιση ανακλάσεων 1ης τάξης θέσης A5 αρχικής αίθουσας.

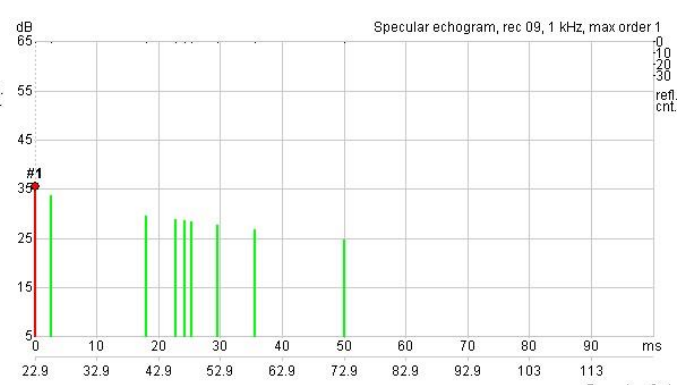
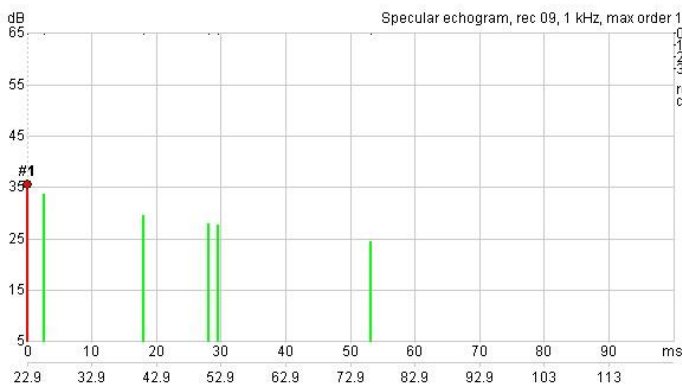
Διάγραμμα 50: (Δεξιά) Απεικόνιση ανακλάσεων 1ης τάξης θέσης A5 έπειτα από τοποθέτηση ανακλαστήρων.



Διάγραμμα 51: (Αριστερά) Απεικόνιση ανακλάσεων 3ης τάξης θέσης A5 αρχικής αίθουσας.

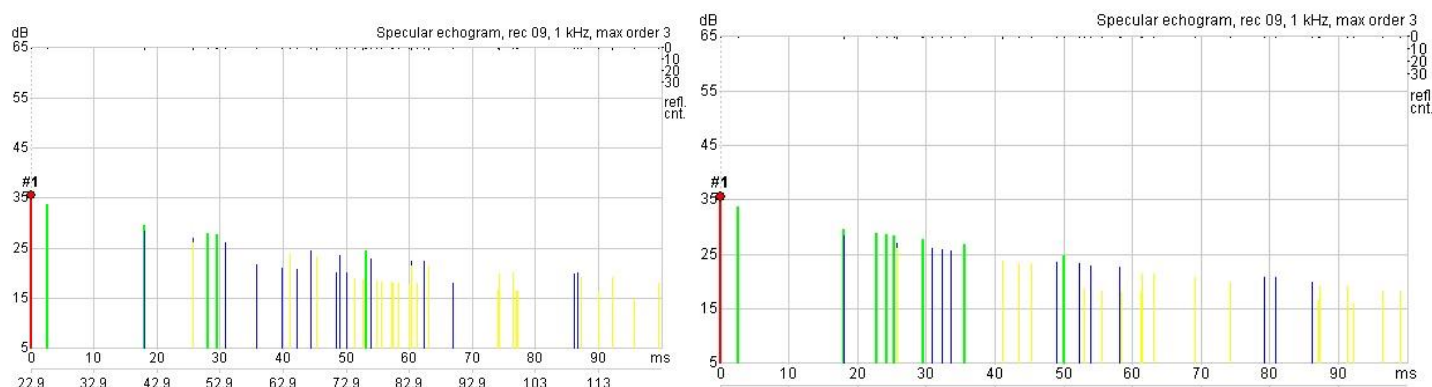
Διάγραμμα 52: (Δεξιά) Απεικόνιση ανακλάσεων 3ης τάξης θέσης A5 έπειτα από τοποθέτηση ανακλαστήρων.

- Θέση A9



Διάγραμμα 53: (Αριστερά) Απεικόνιση ανακλάσεων 1ης τάξης θέσης A9 αρχικής αίθουσας.

Διάγραμμα 54: (Δεξιά) Απεικόνιση ανακλάσεων 1ης τάξης θέσης A9 έπειτα από τοποθέτηση ανακλαστήρων.



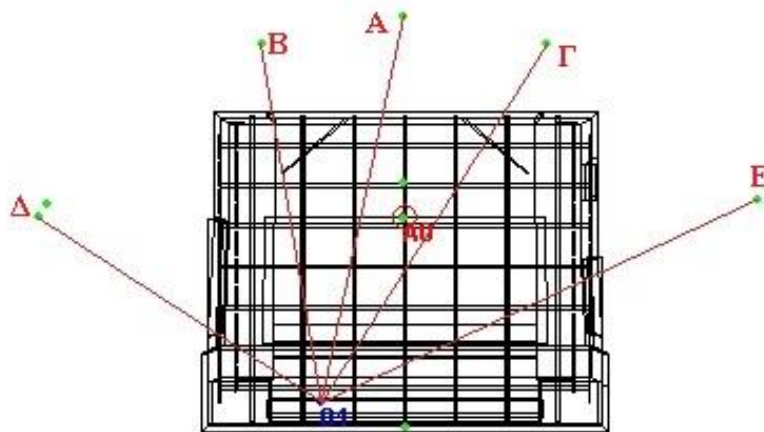
Διάγραμμα 55: (Αριστερά) Απεικόνιση ανακλάσεων 3ης τάξης θέσης A9 αρχικής αίθουσας.

Διάγραμμα 56: (Δεξιά) Απεικόνιση ανακλάσεων 3ης τάξης θέσης A9 έπειτα από τοποθέτηση ανακλαστήρων.

Στα παραπάνω Διαγράμματα (Διαγράμματα 45-56) φαίνεται η προσθήκη ωφέλιμων ανακλάσεων σε χρόνους μικρότερους των 50 ms οι οποίες θα υποβοηθήσουν τους δείκτες C_{50} και D_{50} , καθώς επίσης και γενικά στα πρώτα 80 ms πράγμα που ωφελεί τον δείκτη C_{80} . Και οι τρεις αυτοί δείκτες αφορούν την ευκρίνεια και καταληπτότητα του λόγου κα της μουσικής.

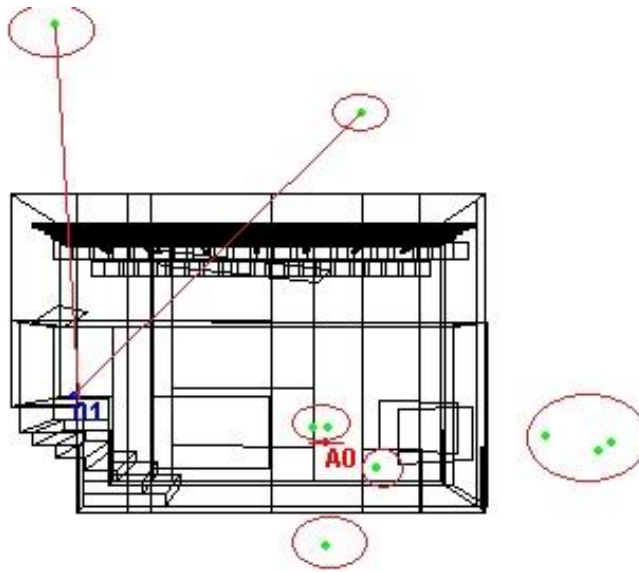
Η αύξηση των τιμών θα ποικίλει αναλόγως τη θέση της πηγής και του σημείου ακρόασης. Επιπλέον, σε ορισμένες περιπτώσεις φαίνεται η χρονική μετατόπιση ορισμένων ανακλάσεων σε ελαφρώς συντομότερους χρόνους άφιξης σε σχέση με την υπάρχουσα κατάσταση, πράγμα επιθυμητό καθώς όσο πλησιάζουμε προς το χρόνο άφιξης του απευθείας ήχου τόσο μεγαλύτερη ανοχή δίδεται από το κατώφλι ακουστότητας διακριτών ανακλάσεων. Μια παράμετρος που πρέπει να τονιστεί και φαίνεται στη θέση A5 με έντονο πράσινο χρώμα, είναι η ταυτόχρονη άφιξη 2 ανακλάσεων 1ης τάξης. Στη πράξη, ακριβώς στο κέντρο των κερκίδων όπου βρίσκεται το σημείο A5, σπάνια θα κάθεται κάποιος ακροατής καθώς υπάρχει διάδρομος. Όσο απομακρυνόμαστε από το κέντρο τόσο αλλάζει ο σχετικός χρόνος άφιξης μεταξύ των 2 αυτών ανακλάσεων και να ακυρώνεται η ενισχυτική του συμβολή που οδηγεί σε διπλασιασμό του συνολικού ηχητικού κύματος.

Επίσης, σημαντικό ρόλο παίζει και η μικρή αλλά σημαντική διάχυση που επιτελεί στη πράξη η κάθε ανακλαστική επιφάνεια και που ήταν δύσκολο να εντοπιστεί στη βιβλιογραφία καθώς είναι δύσκολα μετρήσιμη και δεν υπάρχουν εκτενής πίνακες υλικών, αντίθετα από τους συντελεστές απορρόφησης.



Εικόνα 86: Απεικόνιση ειδώλων έπειτα από τοποθέτηση ανακλαστήρων, κάτοψη.

Στην παραπάνω Εικόνα (Εικόνα 86) αποτυπώνεται κάτοψη της αίθουσας με τα είδωλα της πηγής που δημιουργούνται από τις ανακλάσεις πρώτης τάξης. Ιδανική θέση αποτελεί η θέση Α, από τον πίσω τοίχο της σκηνής ο οποίος και παρέμεινε όπως ήταν. Τα είδωλα Β και Γ από τους πίσω ανακλαστήρες θα αποτελούν ιδανικές ανακλάσεις στις ακριανές πλευρές των κερκίδων, ειδικά όταν αυτές ταυτίζονται με την ευθεία πηγής και ακροατή. Τα είδωλα Δ και Ε από τους πλευρικούς τοίχους δεν αποτελούν τόσο ιδανικές ανακλάσεις, ως προς την κατεύθυνση τους, καθώς προκαλούν μια "διεύρυνση" της πηγής ως προς το ακουστικό αίσθημα που προκαλεί. Σύμφωνα με τη θεωρία [2] όμως, ειδικά για μουσική και γρήγορους κρουστικούς ήχους, οι ανακλάσεις από τους πλευρικούς τοίχους μπορεί να δημιουργήσουν ανεπιθύμητα φαινόμενα "ειδώλων" και για αυτό προτάθηκε η επιλογή να μπορούν να ακυρωθεί η χρήση των ανακλαστήρων αυτών. Ιδανικά, θα μπορούσε να τοποθετηθεί και ένα μέρος απορρόφησης στη θέση τους, εάν τα φαινόμενα γίνουν ενοχλητικά.



Εικόνα 87: Απεικόνιση ειδώλων έπειτα από τοποθέτηση ανακλαστήρων, όψη.

Αντίστοιχα, το "είδωλο" που δημιουργείται από τον ανακλαστήρα άνωθεν της σκηνης (Εικόνα 87) προβάλλει κάθετα στη πηγή και επιδρά θετικά στο τελικό άκουσμα. Η ανάκλαση πάνω από τις κερκίδες, παρόλο που δεν παρέχει ιδανική θέση "ειδώλου" ως προς τη πραγματική θέση της πηγής, λόγω διαδρομής ήχου, καταφθάνει συντομότερα από τις υπόλοιπες, σε χρονικές καθυστερήσεις που επιτρέπουν μεγαλύτερο κατώφλι διακριτής ανάκλασης και λόγω του ότι αφορούν μόνο τις θέσεις στο πάνω μέρος των κερκίδων επιδρούν επίσης θετικά. Σε κάθε περίπτωση, ιδανική θεωρείται η κατεύθυνση που ταυτίζεται με την προέλευση του αρχικού, απευθείας ήχου. Σε γενικές γραμμές, όπως φάνηκε και στις προσομοιώσεις, η αύξηση αυτών των ανακλάσεων συμβάλει στην αύξηση των ακουστικών παραμέτρων καταληπτότητας και ευκρίνειας, πράγμα που κρίνεται θετικά, αυξάνει όμως και τους δείκτες EDT , T_{20} και T_{30} έναντι του χρόνου αντήχησης καθώς αυξάνουν κατά πολύ την ενέργεια στο άμεσο χρονικό διάστημα από τη παύση της πηγής.

Η χρήση ανακλαστήρων οροφής προτιμήθηκε εξαρχής έναντι της προσθήκης απορροφητικών επιφανειών στα αντίστοιχα σημεία για τους εξής λόγους. Λόγω της μεγάλης σιδηροκατασκευής στην οροφή, που λειτουργεί ως ένας γιγάντιος διαχυτής, η αίσθηση εντός της αίθουσας, στην υπάρχουσα της μορφή, είναι πως η "ουρά", του χρόνου αντήχησης, οι καθυστερημένες ανακλάσεις, (διάχυτο πεδίο), καταφθάνει από την οροφή μεταβάλλοντας ήδη το ακουστό αίσθημα προέλευσης του αρχικού ήχου προς τα επάνω. Η επιλογή ανακλαστήρων στα συγκεκριμένα σημεία έγινε, πέραν από την αύξηση των πρώτων ανακλάσεων και για την αποκοπή των καθυστερημένων ανακλάσεων κατά την κάθοδο τους προς τις κερκίδες.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί πως λόγω του ότι η σκηνή καταλαμβάνει πολύ μεγάλο μέρος, υπάρχει περίπτωση οι πηγές να βρίσκονται σε διαφορετικό σημείο εντός της. Στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε αυτή τη διπλωματική, η θέση της πηγής είναι παρόμοια με αυτές των σημείων μέτρησης. Σε πολλές περιπτώσεις, ένας ομιλητής ή μουσικός μπορεί να πλησιάζει περισσότερο στις κερκίδες. Οι προσομοιώσεις έγιναν για 3 διαφορετικές αποστάσεις (μικρή, μεσαία και μεγάλη) και η τοποθέτηση των ανακλαστήρων λειτουργούσε σε όλες, πλην του πίσω μέρους της σκηνης, σχεδόν εφαπτόμενης σε αυτόν, θέση που σπανίως χρησιμοποιείται.

8.2 Εύρεση ιδανικών χρόνων αντήχησης αναλόγως τη χρήση

Στην ενότητα αυτή προβαίνουμε στην επίλυση των τύπων που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο σχετικά με τον υπολογισμό του ιδανικού χρόνου αντήχησης αίθουσας συγκεκριμένου όγκου, αναλόγως τη χρήση της. Με βάση τον πρώτο τύπο υπολογισμού καταλήγουμε στις εξής τιμές (Πίνακας 17):

Είδος μουσικής/χρήση	Συμφωνική ορχήστρα	Ρομαντική μουσική	Προκλασσική μουσική	Μουσική δωματίου	Ομιλία
Ιδανικός RT60 (sec)	1,37	1,98	2,95	1,48	0,93

Πίνακας 17: Υπολογισμός ιδανικών τιμών χρόνου αντήχησης με χρήση του πρώτου μαθηματικού τύπου.

Με βάση τον δεύτερο αντίστοιχο τύπο προκύπτουν οι εξής τιμές (Πίνακας 18):

Είδος μουσικής/χρήση	Αίθουσες συναυλιών	Όπερες	Αίθουσες μουσικής/Κινηματογράφος	Χώροι διαλέξεων/Στούντιο
Ιδανικός RT60 (sec)	1,64	1,22	0,89	0,82

Πίνακας 18: Υπολογισμός ιδανικών τιμών χρόνου αντήχησης με χρήση του δεύτερου μαθηματικού τύπου.

Επιπλέον, ξανά με βάση τα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν στη θεωρία, γνωρίζουμε διάφορες ακόμη προτάσεις για βέλτιστους χρόνους αντήχησης.

Συνοψίζοντας και έπειτα από μεγάλο προβληματισμό η παρούσα διπλωματική προτείνει τα εξής.

- Μείωση του γενικού χρόνου αντήχησης με χρήση μόνιμων ηχο-απορροφητικών διατάξεων, σε τιμές που θα καθιστούν την αίθουσα ιδανική για εκδηλώσεις μουσικής καθώς και ως αίθουσα πολλαπλών χρήσεων. Παρατηρήθηκε μια σχετική ταύτιση των τιμών για διάφορα είδη μουσικής που λαμβάνουν συχνά χώρα στην αίθουσα με αυτές για αίθουσες πολυχώρων, με τιμές που κυμαίνονται κοντά στο $1,6 \text{ sec} \pm 0,2$.
- Προσθήκη ηχο-απορροφητικών κουρτινών με τη δυνατότητα ανοίγματος και κλεισίματος τους, που με το άνοιγμα όλων θα μειώνουν το χρόνο αντήχησης της αίθουσας στα επιθυμητά επίπεδα για ομιλίες, συνέδρια και προβολές ταινιών κοντά στα $0,82 \text{ sec} \pm 0,1$.

Οι τιμές αυτές, ιδανικά, θα πρέπει να είναι σταθερές σε όλο το ακουστικό συχνοτικό φάσμα με περισσότερη βαρύτητα στο διάστημα 125 Hz – 4 kHz. Λαμβάνεται υπόψη η ανοχή που υπάρχει κατά 25% – 30% περίπου στα άνω και κάτω όρια του συχνοτικού φάσματος ως προς τις ιδανικές τιμές με τις χαμηλές συχνότητες συνήθως να εμφανίζουν υψηλότερες τιμές και τις υψηλές συχνότητες χαμηλότερες. Η διακύμανση των τιμών είναι αναπόφευκτη λόγω γεωμετρίας του χώρου, της απορρόφησης από το κοινό και της σχετικής θέσης πηγής με ακροατή.

Όπως είπαμε παραπάνω η αίθουσα έχει χωρητικότητα περίπου 250 ατόμων. Στην πράξη όμως, χρησιμοποιείται συχνά σε εκδηλώσεις που το κοινό πέφτει στο μισό ή και λιγότερο. Επίσης σε περιπτώσεις πρόβας ή σεμιναρίου, μπορεί να βρίσκονται λιγότερο από 20 άτομα εντός της αίθουσας, με την απορρόφηση λόγω αυτών να είναι ελάχιστη. Αντιλαμβανόμαστε πως η πολυπλοκότητα που δημιουργείται από τις πολλαπλές περιπτώσεις χρήσης της αίθουσας δυσχεραίνουν συνολικά την ακουστική μελέτη.

Για το λόγο αυτό οι υπολογισμοί που εκτελέστηκαν και θα παρουσιαστούν παρακάτω έχουν συμβεί για τις εξής περιπτώσεις:

- Μέγιστος χρόνος αντήχησης (μουσικής) για άδεια αίθουσα.
- Μέγιστος χρόνος αντήχησης (μουσικής) για γεμάτη αίθουσα.
- Ελάχιστος χρόνος αντήχησης (ομιλίας) για άδεια αίθουσα.
- Ελάχιστος χρόνος αντήχησης (ομιλίας) για γεμάτη αίθουσα.

Η επιλογή των όρων "μουσικής" και "ομιλίες" είναι ενδεικτική της προτεινόμενης χρήσης σε κάθε περίπτωση και αντιστοιχούν στον προτεινόμενο υψηλό και στον προτεινόμενο χαμηλό χρόνο αντήχησης.

Ο υπολογισμός των ακουστικών παραμέτρων της αίθουσας και για τις 4 περιπτώσεις εκτελέστηκε και για την περίπτωση της αφαίρεσης των πλευρικών και πίσω ανακλαστήρων (τοποθέτηση των ανακλαστήρων στη παράλληλη με τον

τοίχο ανάρτησης θέση). Ο λόγος ήταν πως έπειτα από την προσομοίωση των 4 αρχικών περιπτώσεων, με τους ανακλαστήρες στις προτεινόμενες κλήσεις, οι δείκτες καταληπτότητας και ευκρίνειας στη περίπτωση της μουσικής (μέγιστος χρόνος αντήχησης) ήταν αρκετά πάνω από τις προτεινόμενες τιμές. Αντίθετα στις περιπτώσεις της ομιλίας (ελάχιστος χρόνος αντήχησης) η συνεισφορά των ανακλαστήρων κρίθηκε θετικά.

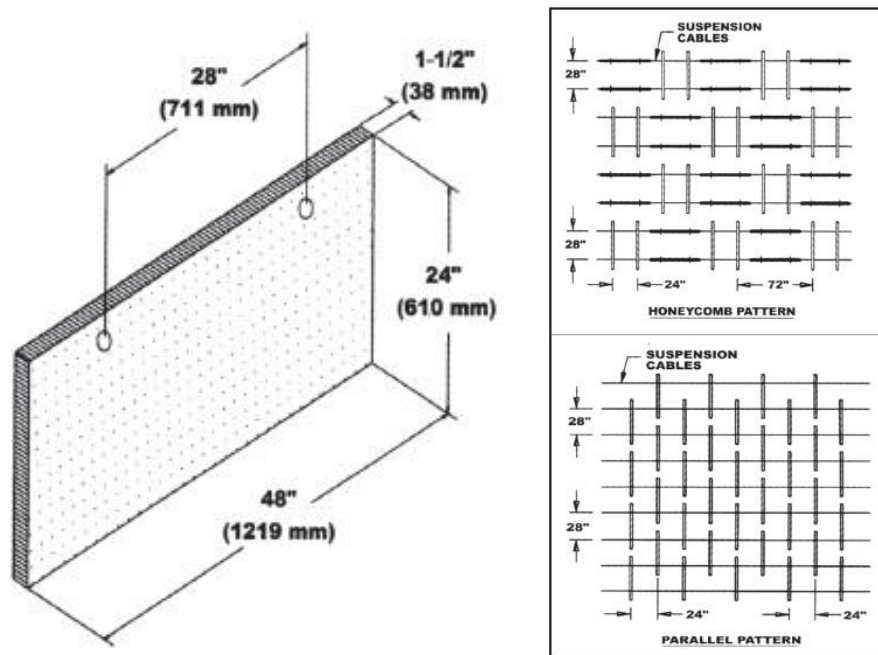
8.3 Υλικά απορρόφησης για δημιουργία ιδανικού μέγιστου χρόνου αντήχησης (μουσικής/πολυχώρου)

Όπως προαναφέρθηκε, το ακουστικό αίσθημα ακρόασης στην παρούσα κατάσταση είναι πως ο ήχος "σβήνει" προερχόμενος από την οροφή. Η μεγάλη σιδηροκατασκευή συγκεντρώνει μεγάλο μέρος του ήχου καθυστερώντας τον σημαντικά πριν βρει διέξοδο και κατευθυνθεί ξανά προς τα κάτω. Για το λόγο αυτό προτείνονται οι εξής μόνιμες προσθήκες ηχο-απορροφητικών διατάξεων:

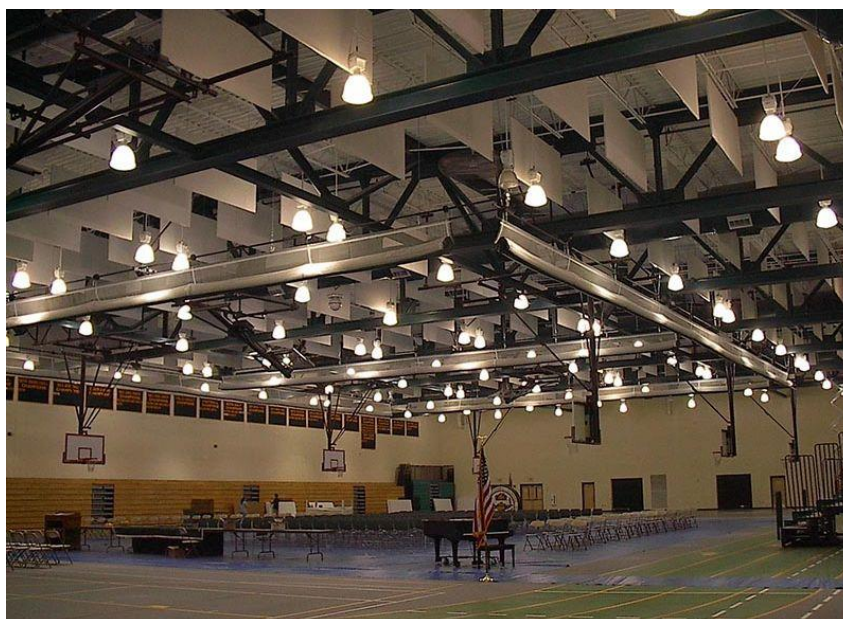
- 2 σειρές των 10 τεμαχίων ακουστικών baffles KB803 [48] ανά πλευρά, αναρτημένα από το κάτω μέρος της σιδηροκατασκευής, σε ύψος 9,58 m από το πάτωμα, εκατέρωθεν των κερκίδων στους πλευρικούς τοίχους. Τα συγκεκριμένα baffles έχουν μορφή και διαστάσεις που φαίνονται στην Εικόνα 88, εμφανίζουν μεγάλους συντελεστές απορρόφησης σε μεγάλο συχνοτικό εύρος (Πίνακας 19) και αναρτιούνται εύκολα με συρματόσκοινα δίχως την παραμικρή τροποποίηση της αίθουσα. Η τοποθέτηση τους προτείνεται σε 2 διατάξεις (Εικόνα 89) από τις οποίες επιλέχθηκε η παράλληλη. Η απόσταση τους από τους κοντινούς τοίχους εναλλάσσεται από 0,26 m σε 0,85 m, λόγω του ότι περίπου από το μέσο και μετά οι πλευρικοί τοίχοι εισέρχονται κατά 0,59 m πιο μέσα. Η τοποθέτηση τους σε κοντινή απόσταση από το τοίχο, με βάση τη θεωρία, μπορεί να προκαλέσει περαιτέρω αύξηση της απορρόφησης σε χαμηλές συχνότητες με σχετικά μήκη κύματος. Η επιλογή μαύρου ή σκούρου γκρι χρώματος δεν θα μεταβάλλει καθόλου τον αισθητικά ουδέτερο χαρακτήρα της αίθουσας και λόγω ύψους δεν θα είναι εμφανή από το κοινό κατά τη διάρκεια εκδήλωσης. Στην Εικόνα 90 προβάλλεται παράδειγμα χρήσης τους σε αντίστοιχο χώρο.

Συχνότητα	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Συντελεστής Απορρόφησης KB803	0,25	0,74	1,5	1,8	1,5	0,98

Πίνακας 19: Συντελεστές απορρόφησης των ακουστικών baffles KB803 [47].



Εικόνα 88: (Αριστερά) Διαστάσεις των ακουστικών Baffles KB803 [47].
 Εικόνα 89: (Δεξιά) Προτεινόμενες διατάξεις τοποθέτησης των ακουστικών baffles KB803 [47].



Εικόνα 90: Χρήση ακουστικών baffles KB803 σε πραγματικές συνθήκες χώρου με μεγάλο χρόνο αντήχησης [47].

- Αλλαγή ή κάλυψη της υπάρχουσας γυψοσανίδας στα άνω άκρα του τοίχου πίσω από τη σκηνή με τα ηχο-απορροφητικά πάνελ Baswa Phon Classic Fine [49]. Τα συγκεκριμένα πάνελ εμφανίζουν αρκετά μεγάλους και ομοιόμορφους συντελεστές απορρόφησης σε όλο το συχνοτικό φάσμα συμπεριλαμβανομένης και της περιοχής των 125 Hz όπως φαίνεται στον πίνακα 20, επηρεάζοντας όμως

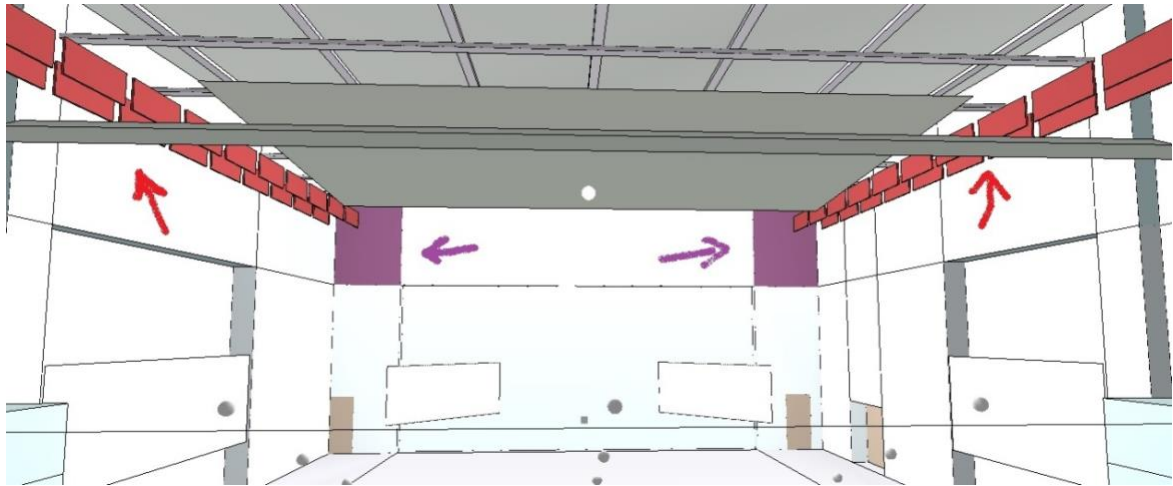
σχετικά λιγότερο τις συχνότητες άνω των 2 kHz στις οποίες τα περισσότερα ηχο-απορροφητικά υλικά και διατάξεις απορροφούν συχνά περισσότερο. Με το τρόπο αυτό γίνεται μια προσπάθεια ομοιόμορφης συχνοτικά απορρόφησης και με το δεδομένο πως η απορρόφηση λόγω του αέρα στις υψηλές συχνότητες, σε μια τόσο μεγάλη αίθουσα είναι υπαρκτή και όχι αμελητέα. Στην (Εικόνα 91) προβάλλεται το συγκεκριμένο υλικό.

Συχνότητα	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Συντελεστής Απορρόφησης Baswa Phon Classic Fine	0,49	0,75	0,95	0,83	0,68	0,7

Πίνακας 20: Συντελεστές απορρόφησης των ακουστικών πάνελ Baswa Phon Classic Fine [49].



Εικόνα 91: Το ακουστικό πάνελ Baswa Phon Classic Fine[49].



Εικόνα 92: Τρισδιάστατη απεικόνιση της αίθουσα έπειτα από προσθήκη των KB803 (κόκκινο χρώμα) και των πάνελ της εταιρίας Baswa (με μωβ χρώμα).

Στην παραπάνω Εικόνα (Εικόνα 92) απεικονίζεται η αίθουσα στο CATT-Acoustic έπειτα από τοποθέτηση των 2 παραπάνω υλικών/διατάξεων. Με κόκκινο βέλος φαίνονται οι διατάξεις των KB803 και με μωβ βέλος οι επιφάνειες που θα καλυφθούν με το Baswa Phon Classic Fine. Με βάση τις προσομοιώσεις στο CATT-Acoustic οι θέσεις που επιλέχτηκαν δεν είναι πιθανό να αποτελέσουν επιφάνειες βασικών ανακλάσεων, πράγμα επιθυμητό. Αντίθετα, από τα σημεία αυτά πιθανώς θα ανακλώνται πίσω προς τη σκηνή και τους ακροατές ανακλάσεις έπειτα από μεγάλες διαδρομές στην οροφή. Το συνολικό εμβαδόν που καλύπτουν είναι 23,12 m². Η επιλογή τους έγινε στο τελικό στάδιο υπό τον φόβο πως τα KB803 δεν θα παρείχαν επαρκείς αύξηση της απορρόφησης. Εναλλακτικά προτείνεται η αντικατάστασή τους με KB803 αντίστοιχων sabine στον τοίχο πίσω από το κοινό σε αντίστοιχο ύψος με τα προηγούμενα. Η συγκεκριμένη κίνηση θα ωφελούσε στην ευκολία εγκατάστασης και δυνατότητα εύκολης πιθανής αφαίρεσης.

8.4 Υλικά απορρόφησης για δημιουργία ιδανικού ελάχιστου χρόνου αντήχησης (ομιλίες)

Σε αυτό το στάδιο, στην σχετική βιβλιογραφική αναζήτηση που πραγματοποιήθηκε, το υλικό που εντοπίστηκε με την ευκολότερη τοποθέτηση για την επίτευξη μεταβαλλόμενης ακουστικής ήταν οι κουρτίνες. Έτσι επιλέχθηκαν παχιές κουρτίνες, σε συγκεκριμένη απόσταση από τον τοίχο, που επιτυγχάνουν σημαντική ηχο-απορρόφηση. Επιλέχθηκε το μοντέλο ShowTex Wool Serge Panne των 1000 g/m² [47] που εμφανίζει υψηλούς συντελεστές απορρόφησης και από τις 2 όψεις τους (Πίνακας 21). Οι συντελεστές απορρόφησης τους είναι σταθερές

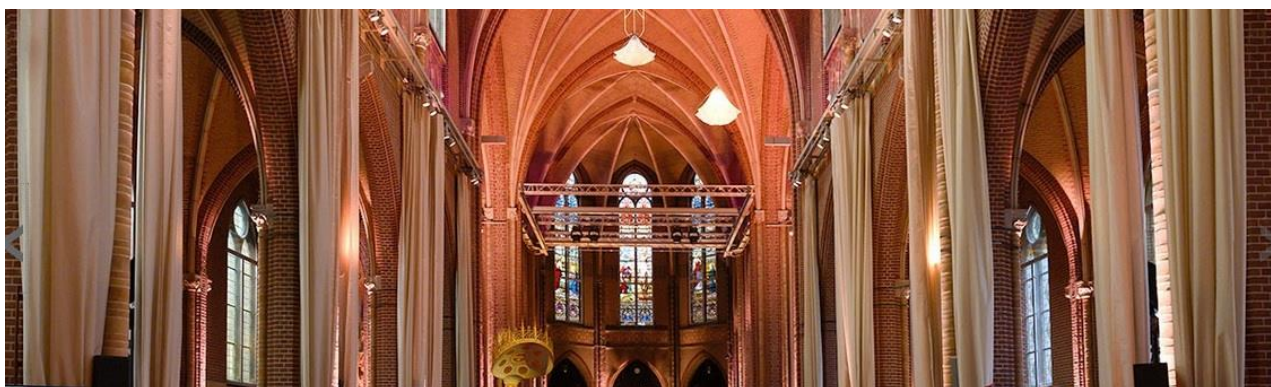
από τα 500 Hz και άνω πράγμα επιθυμητό σε κάθε περίπτωση. Λόγω της ανοχής σε μεγαλύτερους χρόνους αντήχησης στις χαμηλές συχνότητες, η χρήση τους ικανοποιεί τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης περίπτωσης. Επιπλέον, ασχέτως από ακουστικής πλευράς, εμφανίζουν υψηλή ανθεκτικότητα σε πυρκαγιά πράγμα επιθυμητό καθώς στα υψηλά σημεία της αίθουσας βρίσκονται καλώδια ηλεκτρικού ρεύματος για τον φωτισμό της αίθουσας ενώ παράλληλα, λόγω κακής θερμομόνωσης της αίθουσας το καλοκαίρι αναπτύσσονται εντός της υψηλές θερμοκρασίες. Παρακάτω (Εικόνες 93, 94) παρουσιάζονται παραδείγματα χρήσης των συγκεκριμένων κουρτινών για 2 διαφορετικές περιπτώσεις.

Συχνότητα	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Συντελεστής Απορρόφησης ShowTex Wool Serge Panne των 1000 g/m ² 15 cm από τον τοίχο	0,30	0,48	0,77	0,78	0,79	0,78

Πίνακας 21: Συντελεστές απορρόφησης των κουρτινών ShowTex Wool Serge Panne των 1000g ανά τετραγωνικό μέτρο, 15cm από το τοίχο [47].



Εικόνα 93: Παράδειγμα χρήσης των κουρτινών ShowTex Wool Serge Panne (A) [47].



Εικόνα 94: Παράδειγμα χρήσης των κουρτινών ShowTex Wool Serge Panne (B) [47].

Το άνοιγμα και κλείσιμο των κουρτινών μπορεί να γίνεται χειροκίνητα ή μηχανοκίνητα. Υπάρχουν στην αγορά πληθώρα μηχανισμών κατάλληλων για αυτή τη λειτουργία. Παρακάτω (Εικόνες 95, 96) απεικονίζονται ενδεικτικά ένα προϊόν για κάθε περίπτωση. Οι μηχανοκίνητες ράγες ανεβάζουν σημαντικά το κόστος, επιταχύνουν σημαντικά όμως την διαδικασία αλλαγής του χρόνου αντήχησης της αίθουσας.

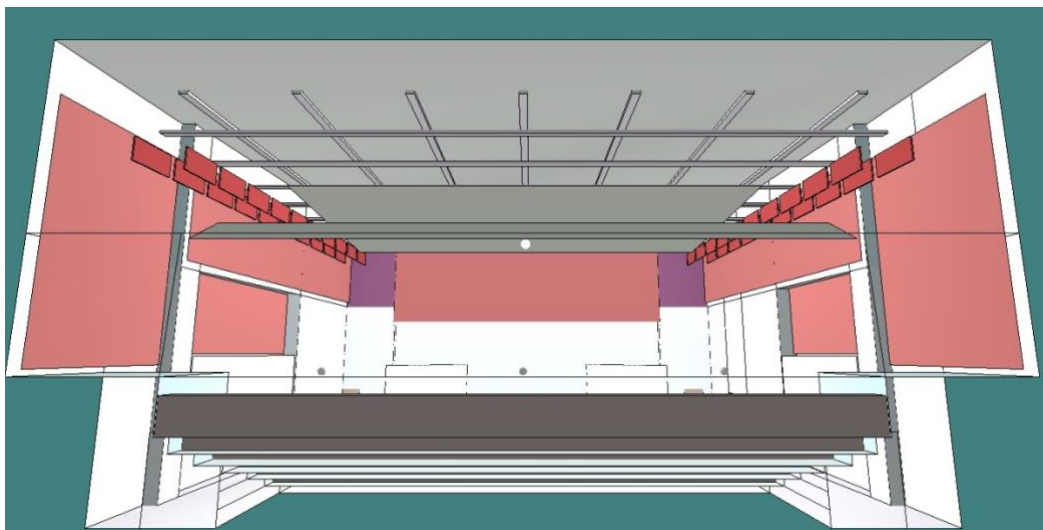


Εικόνα 95: Μηχανοκίνητος μηχανισμός ανοίγματος και κλεισίματος κουρτινών [32].



Εικόνα 96: Χειροκίνητος μηχανισμός ανοίγματος και κλεισίματος κουρτινών [31].

Στις Εικόνες 97 και 98 απεικονίζονται, μέσω του λογισμικού CATIA-Acoustic, όλες οι κουρτίνες (με μπορντό χρώμα) που προτείνεται να τοποθετηθούν στην αίθουσα, πλήρως κλειστές, για μέγιστη απορρόφηση και επίτευξη ελάχιστου χρόνου αντήχησης (για ομιλίες).



Εικόνα 97: Τρισδιάστατη απεικόνιση όλων των κουρτινών στην τελική τους θέση (Α).



Εικόνα 98: Τρισδιάστατη απεικόνιση όλων των κουρτινών στην τελική τους θέση (Β).

Αποτελούνται από 7 κομμάτια διαφόρων διαστάσεων τοποθετημένων 15 cm από τους τοίχους, συνολικού εμβαδού 157,9 m², που καλύπτουν όλες τις γυμνές επιφάνειες στους πλευρικούς τοίχους καθώς και στον τοίχο πίσω από τη σκηνή. Η κάθε κουρτίνα θα ελέγχεται από ξεχωριστό μηχανισμό ανοίγματος/κλεισίματος πράγμα που σημαίνει πως θα υπάρχει η δυνατότητα κλεισίματος ορισμένων μόνων εξ' αυτών, επιτρέποντας τη δημιουργία και

ενδιάμεσων χρόνων αντήχησης μεταξύ του μέγιστου και του ελάχιστου. Οι ενδιάμεσες αυτές τιμές δεν έχουν υπολογιστεί καθώς αυτό θα δημιουργούσε τεράστιο όγκο πληροφοριών, αποτελεσμάτων και διαγραμμάτων για κάθε υποπερίπτωση. Η θεωρία της ακουστικής και όσα παρουσιάστηκαν ως τώρα βεβαιώνουν την διατύπωση αυτή.

8.5 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για κάθε περίπτωση

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται, μέσω του λογισμικού Microsoft Excel, Διαγράμματα που απεικονίζουν τα αποτελέσματα των ακουστικών παραμέτρων όπως προέκυψαν από τις προσομοιώσεις μέσω του λογισμικού CATT-Acoustic για τις εξής περιπτώσεις:

- Μέγιστος χρόνος αντήχησης (μουσική), με ανοιχτές κουρτίνες, όλους τους ανακλαστήρες και αίθουσα άδεια από κοινό.
- Μέγιστος χρόνος αντήχησης (μουσική), με ανοιχτές κουρτίνες, όλους τους ανακλαστήρες και αίθουσα γεμάτη από κοινό.
- Ελάχιστος χρόνος αντήχησης (ομιλία), με κλειστές κουρτίνες, όλους τους ανακλαστήρες και αίθουσα άδεια από κοινό.
- Ελάχιστος χρόνος αντήχησης (ομιλία), με κλειστές κουρτίνες, όλους τους ανακλαστήρες και αίθουσα γεμάτη από κοινό.
- Μέγιστος χρόνος αντήχησης (μουσική), με ανοιχτές κουρτίνες, μόνο με ανακλαστήρες οροφής και αίθουσα άδεια από κοινό.
- Μέγιστος χρόνος αντήχησης (μουσική), με ανοιχτές κουρτίνες, μόνο με ανακλαστήρες οροφής και αίθουσα γεμάτη από κοινό.
- Ελάχιστος χρόνος αντήχησης (ομιλία), με κλειστές κουρτίνες, μόνο με ανακλαστήρες οροφής και αίθουσα άδεια από κοινό.
- Ελάχιστος χρόνος αντήχησης (ομιλία), με κλειστές κουρτίνες, μόνο με ανακλαστήρες οροφής και αίθουσα γεμάτη από κοινό.

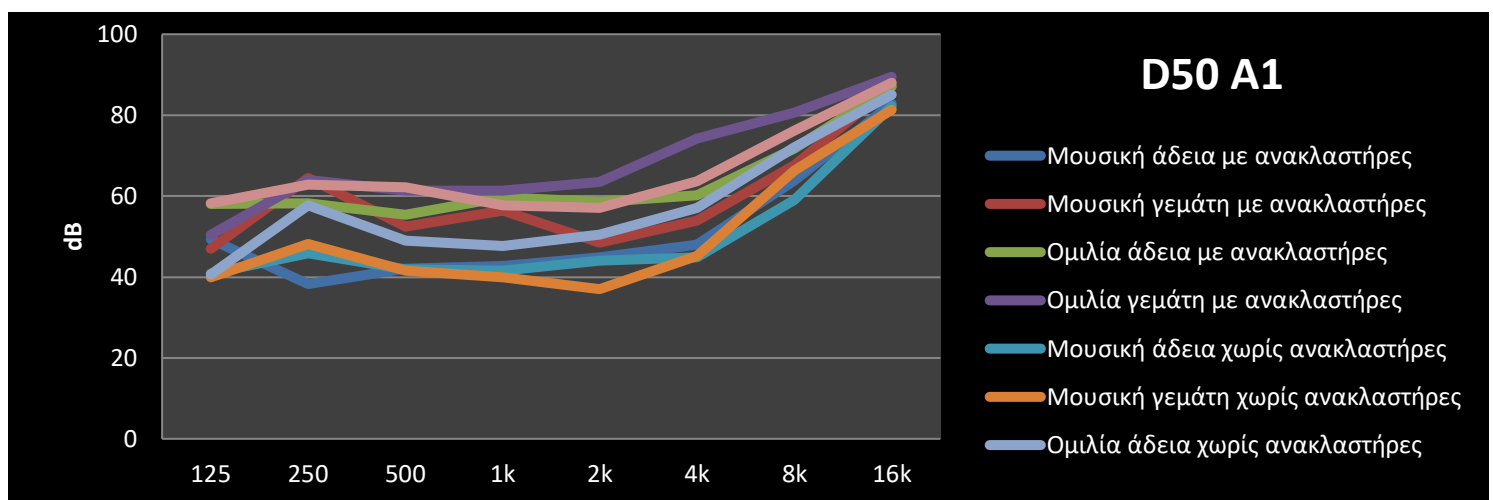
Επίσης παρουσιάζονται τα ηχογράμματα, οι κρουστικές αποκρίσεις και οι καμπύλες Schroeder όπως εξήχθησαν από το λογισμικό.

Οι ακουστικοί δείκτες, τα ηχογράμματα, οι κρουστικές αποκρίσεις και οι καμπύλες Schroeder υπολογίστηκαν για 9 σημεία ακροατών (Εικόνα 73), παρουσιάζονται όμως για τα εξής 3 σημεία:

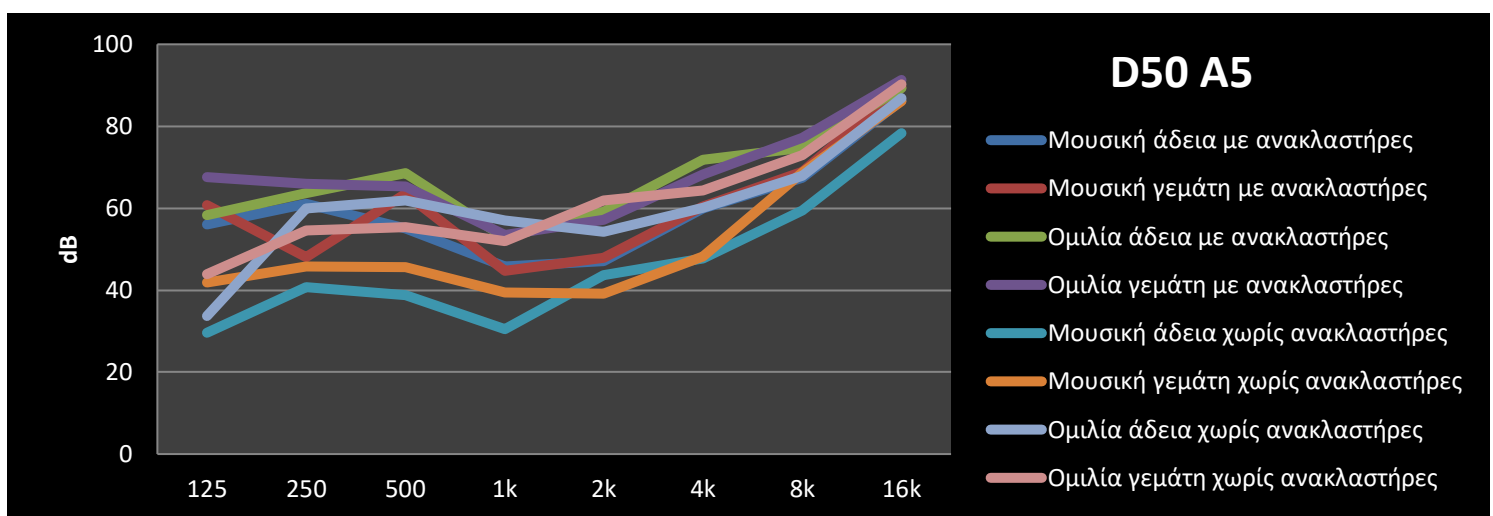
- A1 - Πάνω αριστερά.
- A5 - Κέντρο κεντρικά.
- A9 - Κάτω δεξιά.

Τα 3 σημεία είναι ίδια με αυτά στα οποία παρουσιάστηκαν οι αντίστοιχοι δείκτες στη σύγκριση των τιμών που μετρήθηκαν στην άδεια αίθουσα μέσω Sweet Sine Tone στο λογισμικό REW με τα αντίστοιχα που υπολόγισε το CATT-Acoustic για τις περιπτώσεις ομιλητή και ηχείου PA. Γίνεται κατανοητό πως η επιλογή των 3 σημείων έγινε με βάση το άπλωμα των σημείων στο χώρο (αριστερά, κεντρικά και δεξιά) καθώς και σε σχέση με την απόσταση πηγής και ακροατών στις κερκίδες (κάτω, κέντρο, πάνω). Η αποτύπωση των αποτελεσμάτων για όλα τα σημεία θα μεγάλωνε υπερβολικά τον όγκο της διπλωματικής χωρίς να βλέπουμε μεγάλες διαφορές, λόγω συμμετρικής τοποθέτησης των θέσεων ακρόασης ως προς την πηγή και τις επιφάνειες της αίθουσας.

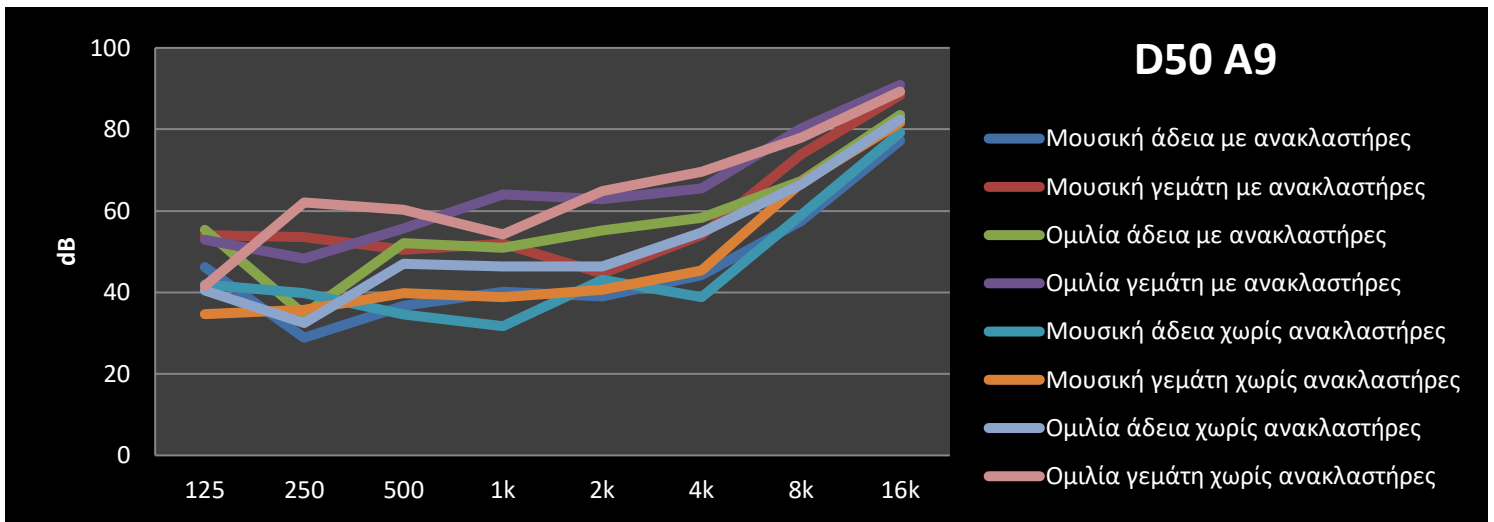
8.5.1 D50



Διάγραμμα 57: Δείκτης D50 για τη θέση A1.

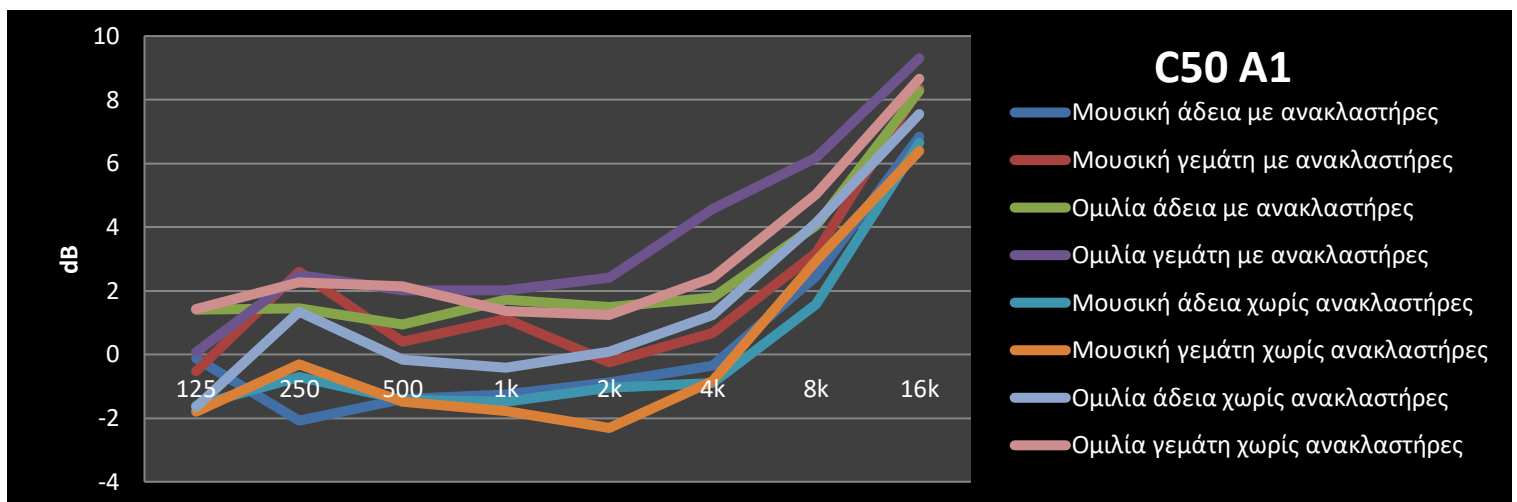


Διάγραμμα 58: Δείκτης D50 για τη θέση A5.

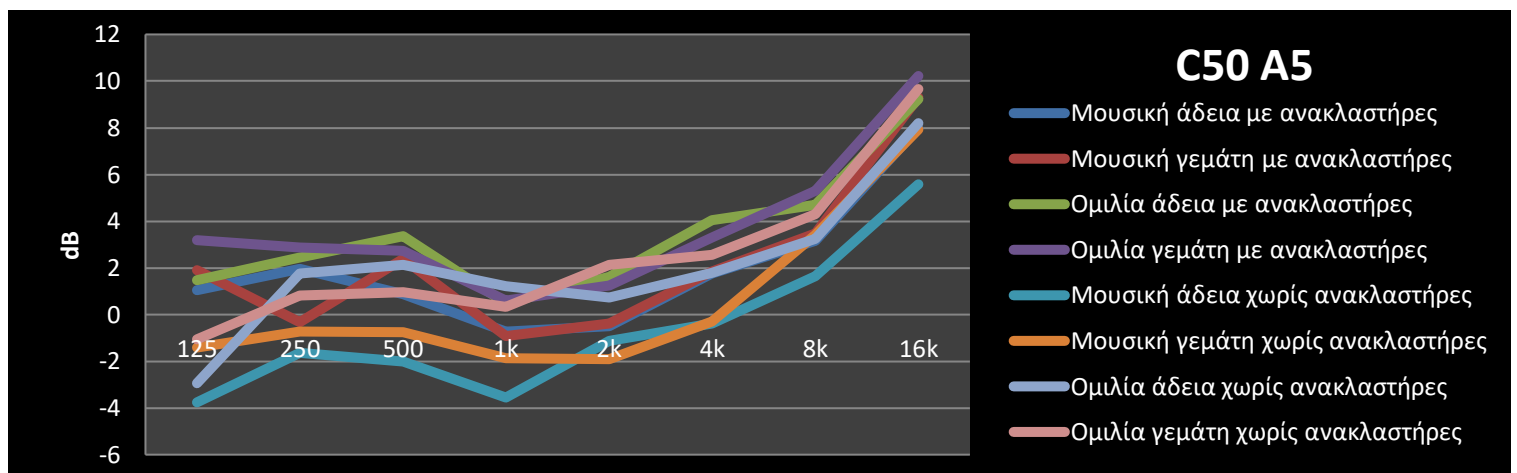


Διάγραμμα 59: Δείκτης D50 για τη θέση A9.

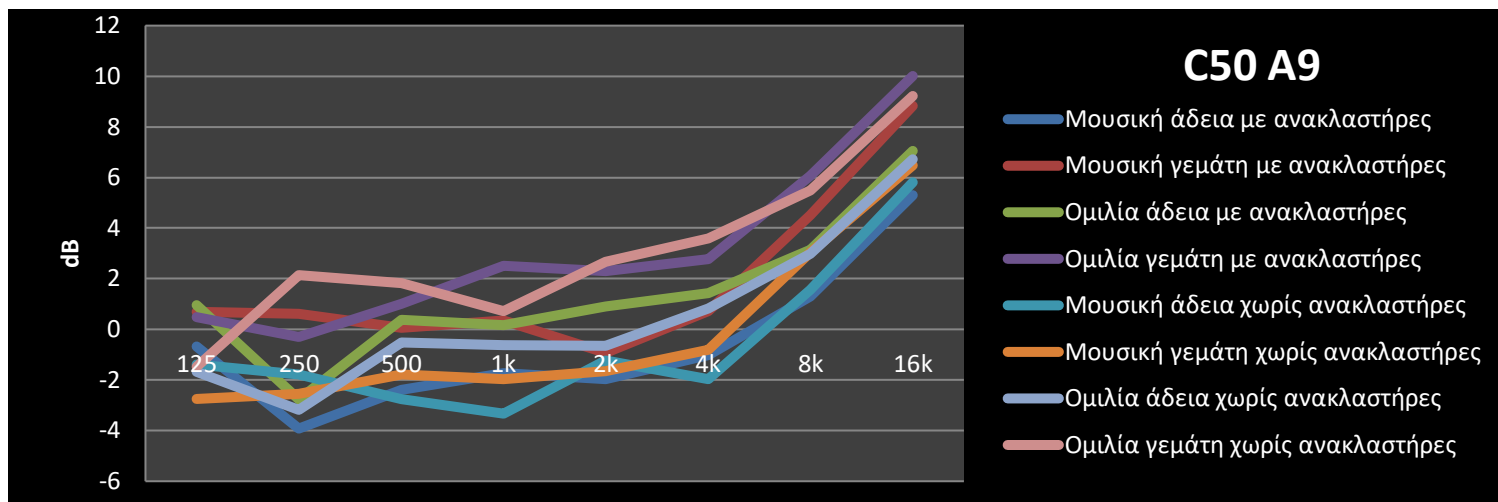
8.5.2 C50



Διάγραμμα 60: Δείκτης C50 για τη θέση A1.

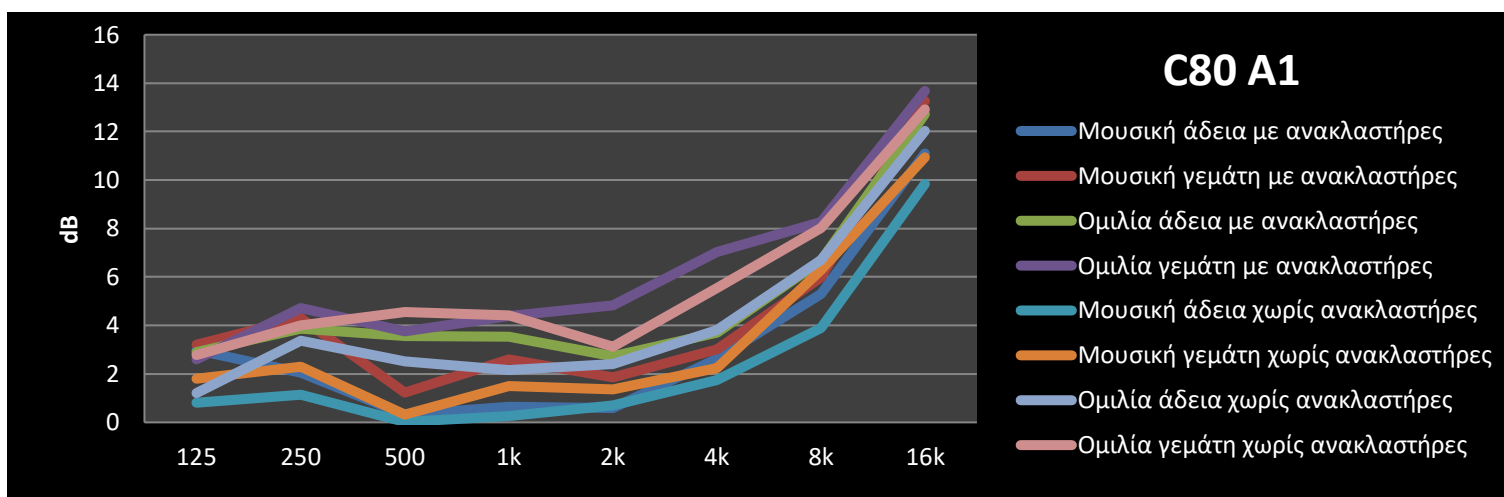


Διάγραμμα 61: Δείκτης C50 για τη θέση A5.

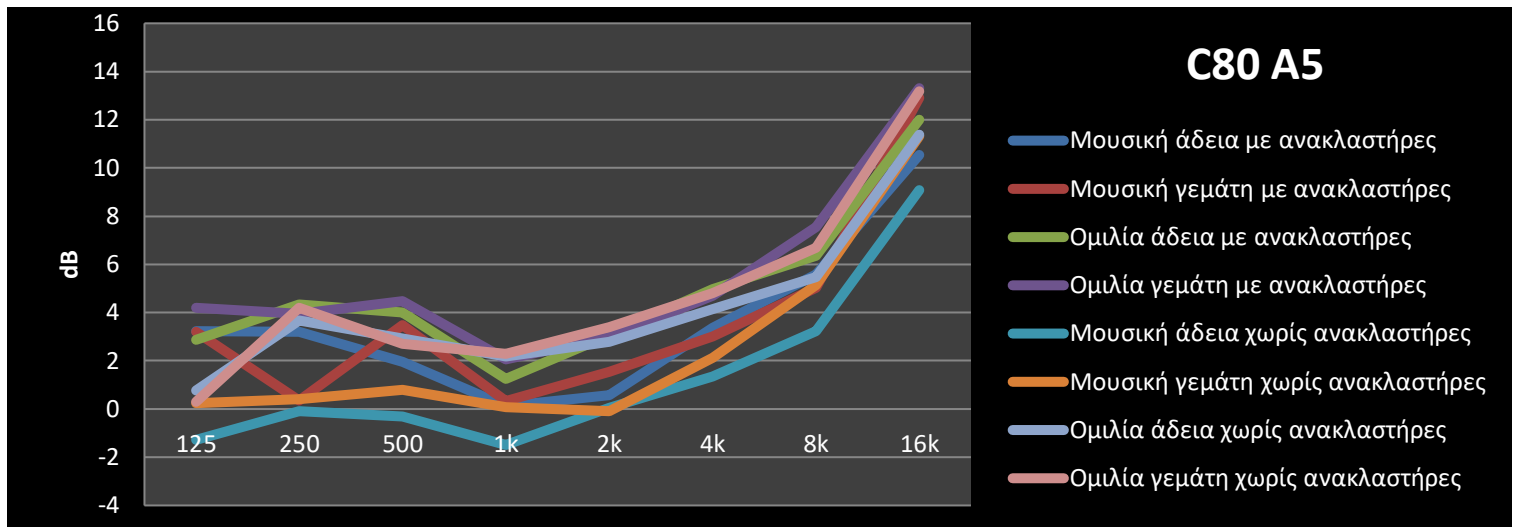


Διάγραμμα 62: Δείκτης C50 για τη θέση A9.

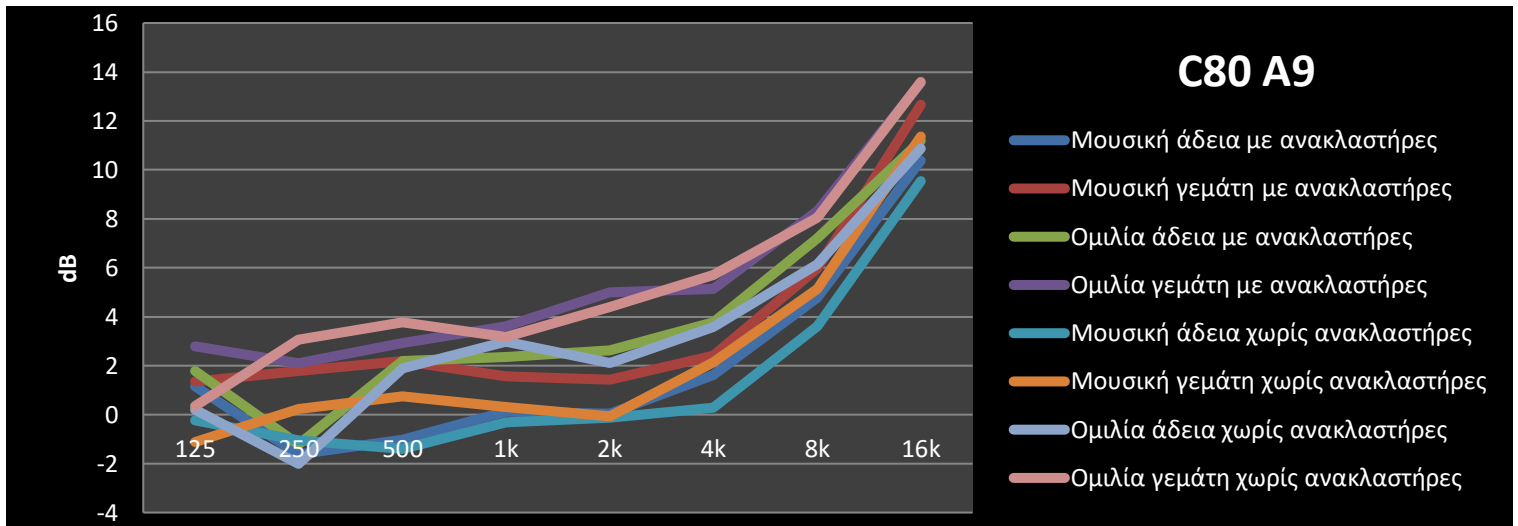
8.5.3 C80



Διάγραμμα 63: Δείκτης C80 για τη θέση A1.

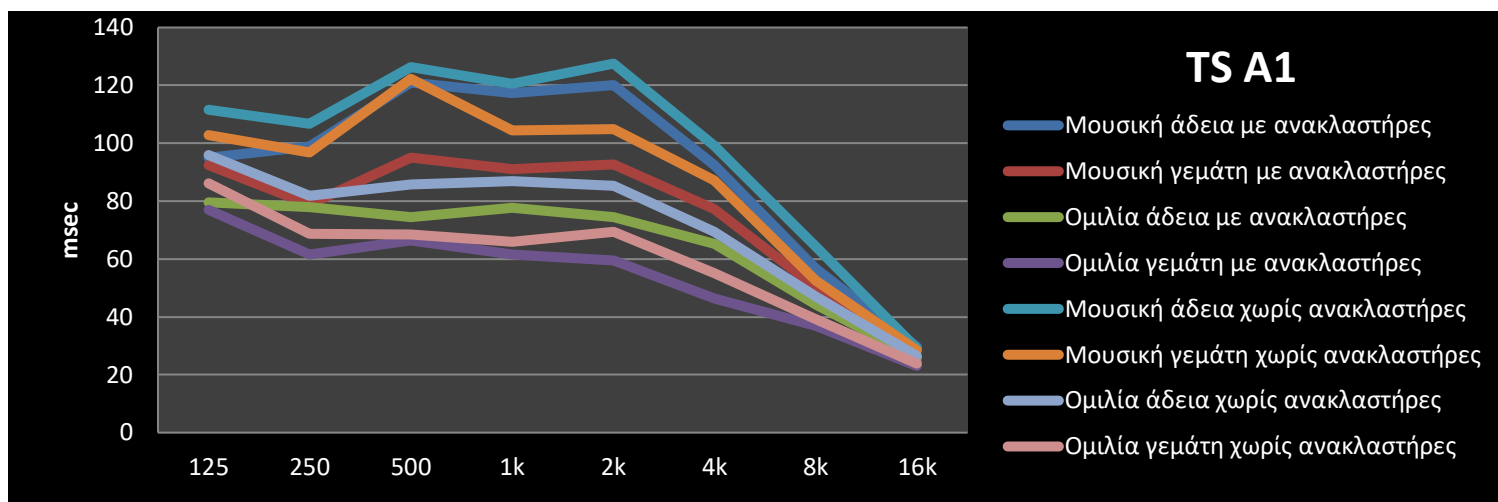


Διάγραμμα 64: Δείκτης C80 για τη θέση A5.

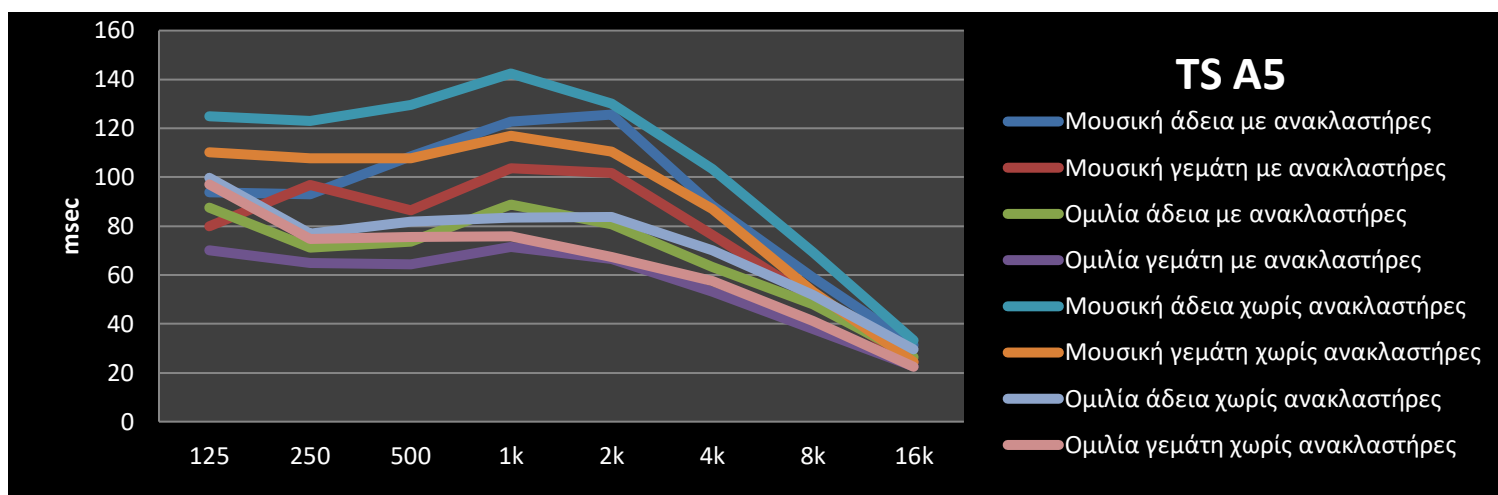


Διάγραμμα 65: Δείκτης C80 για τη θέση A9.

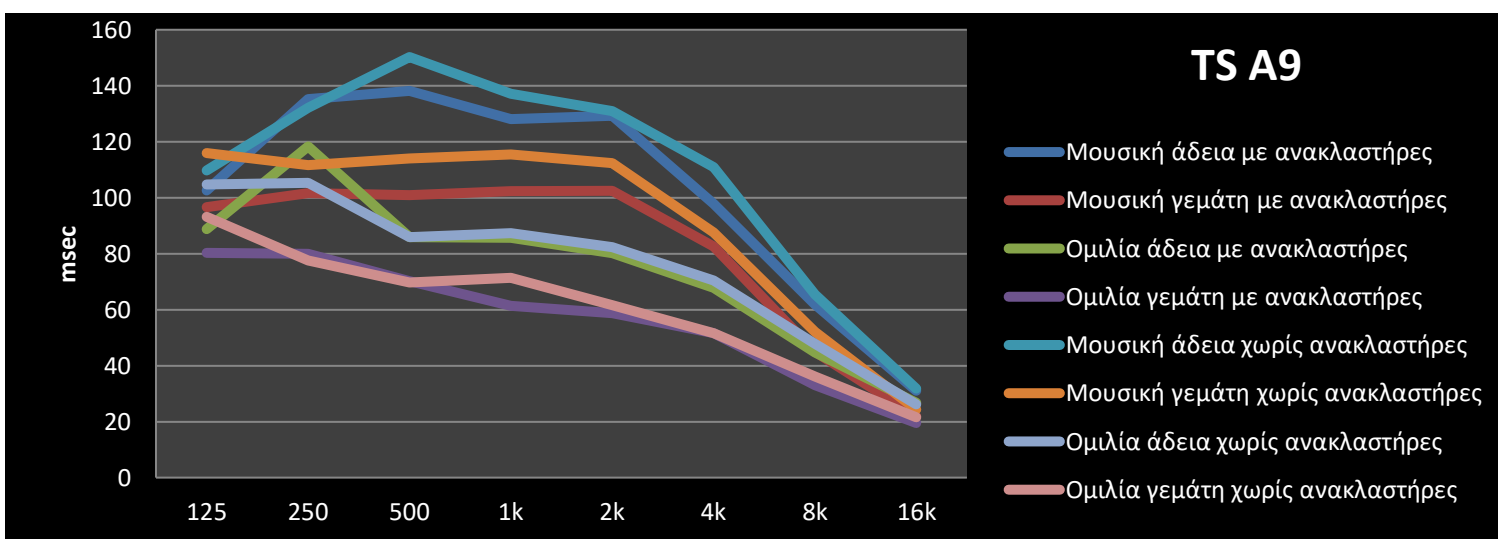
8.5.4 TS



Διάγραμμα 66: Δείκτης TS για τη θέση A1.

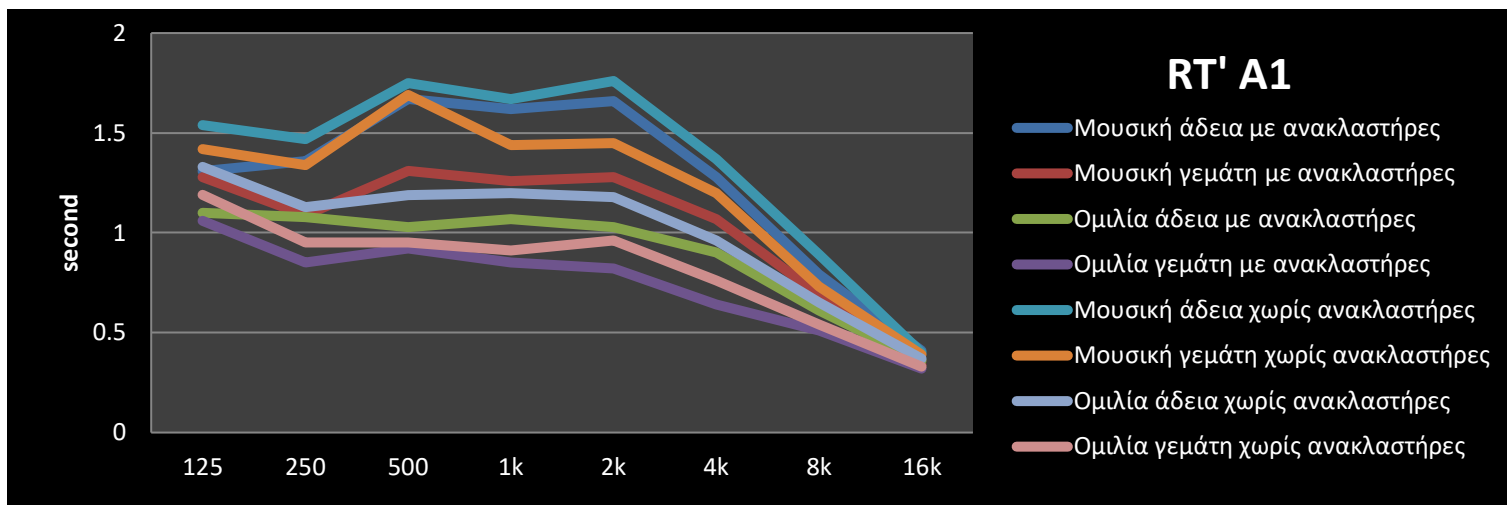


Διάγραμμα 67: Δείκτης TS για τη θέση A5.

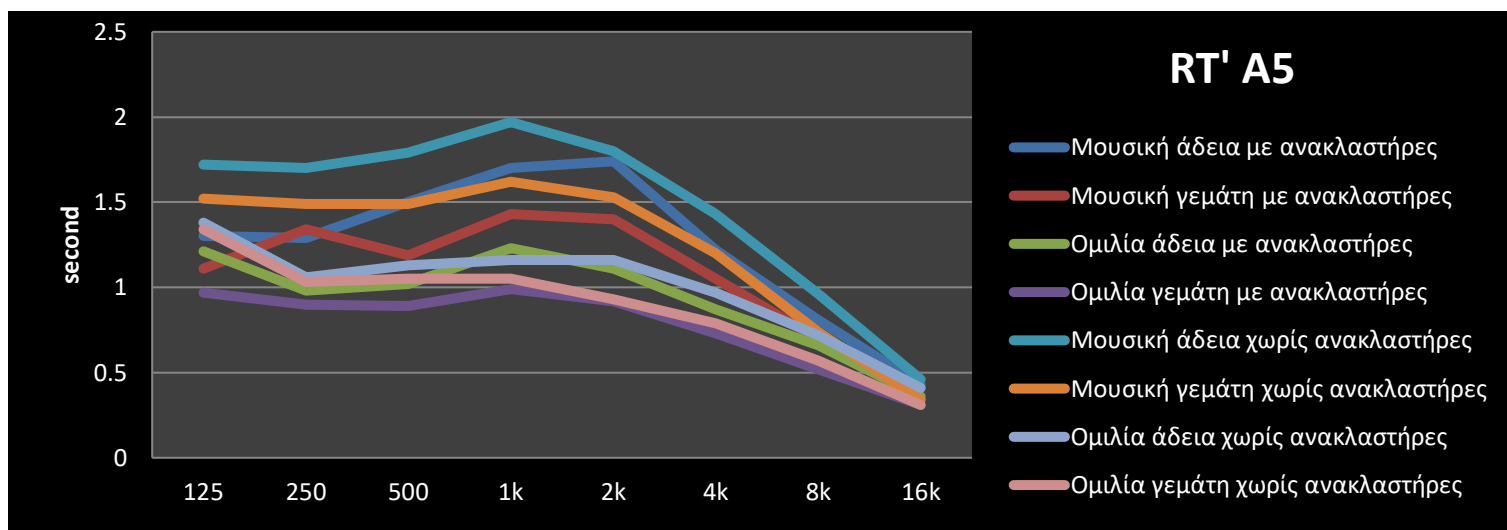


Διάγραμμα 68: Δείκτης TS για τη θέση A9.

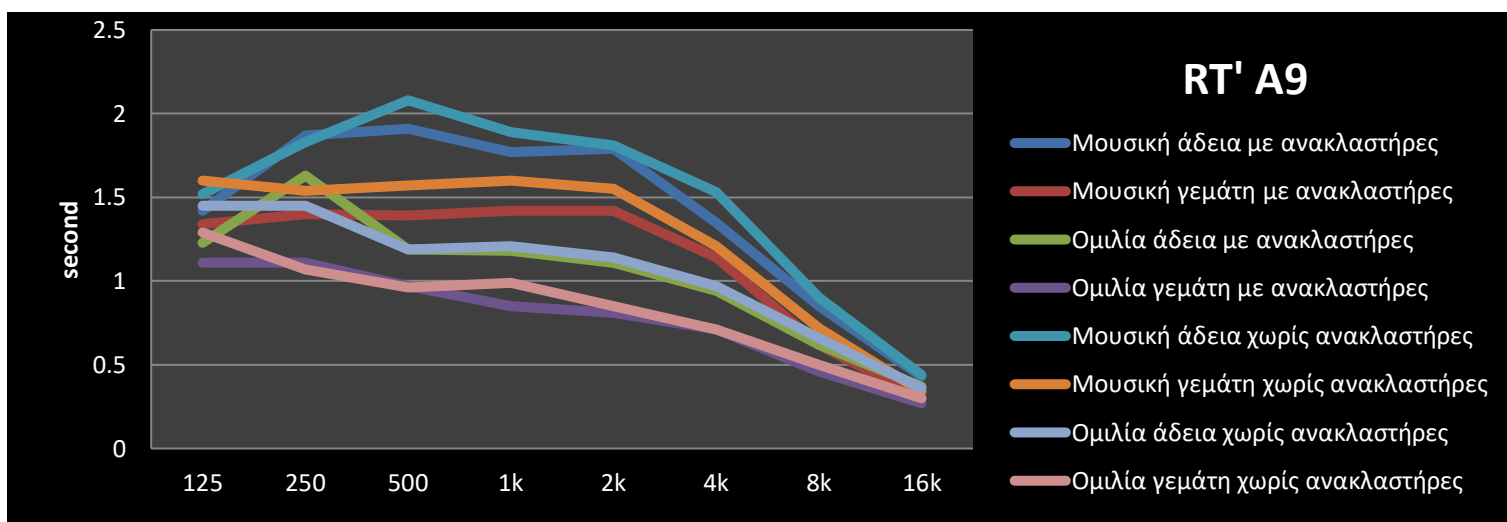
8.5.5 RT'



Διάγραμμα 69: Δείκτης RT' για τη θέση A1.

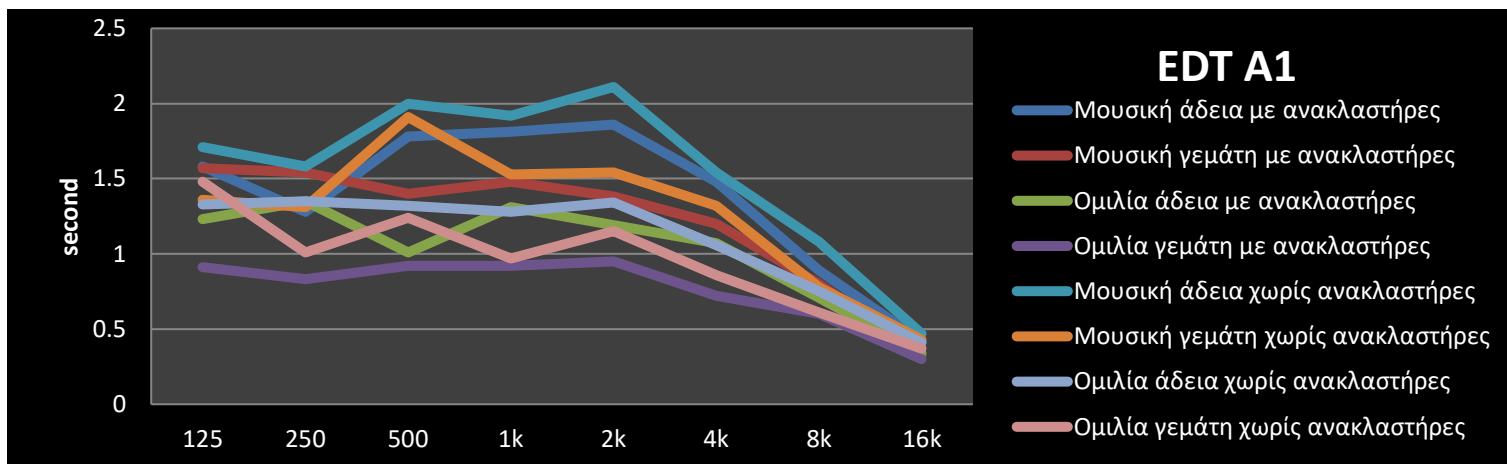


Διάγραμμα 70: Δείκτης RT' για τη θέση A5.

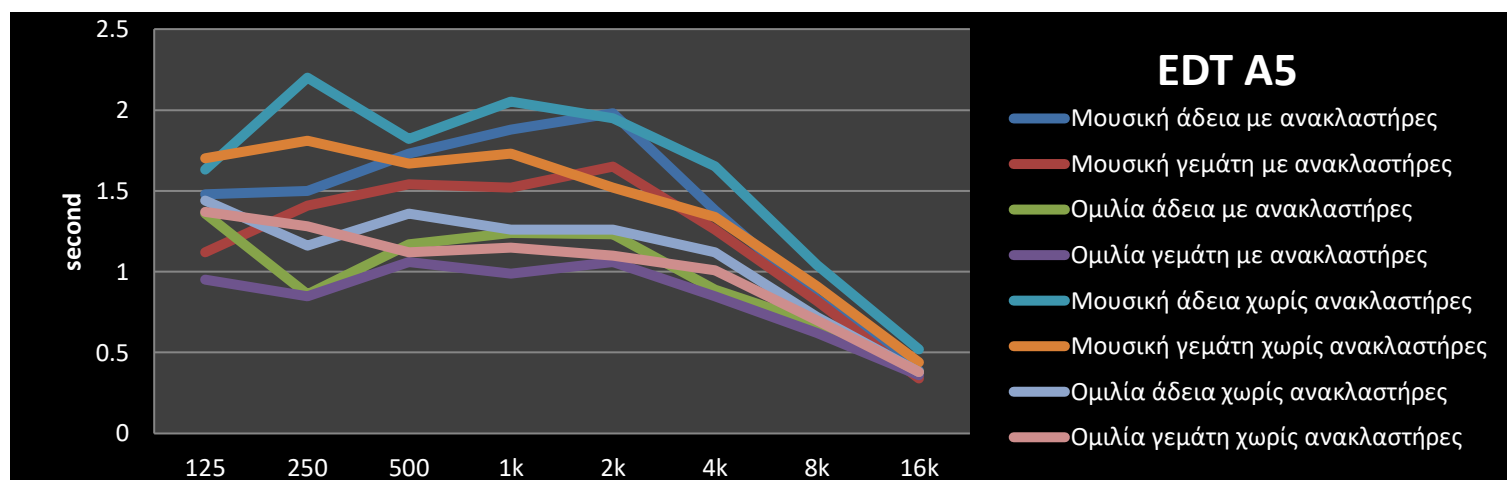


Διάγραμμα 71: Δείκτης RT' για τη θέση A9.

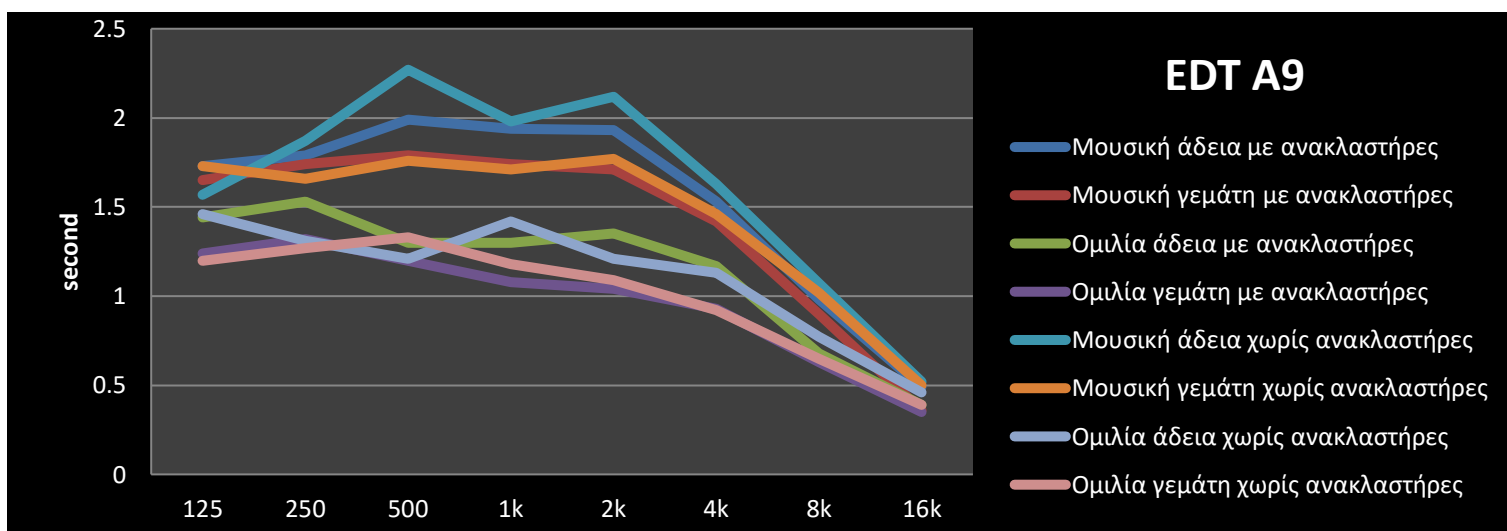
8.5.6 EDT



Διάγραμμα 72: Δείκτης EDT για τη θέση A1.

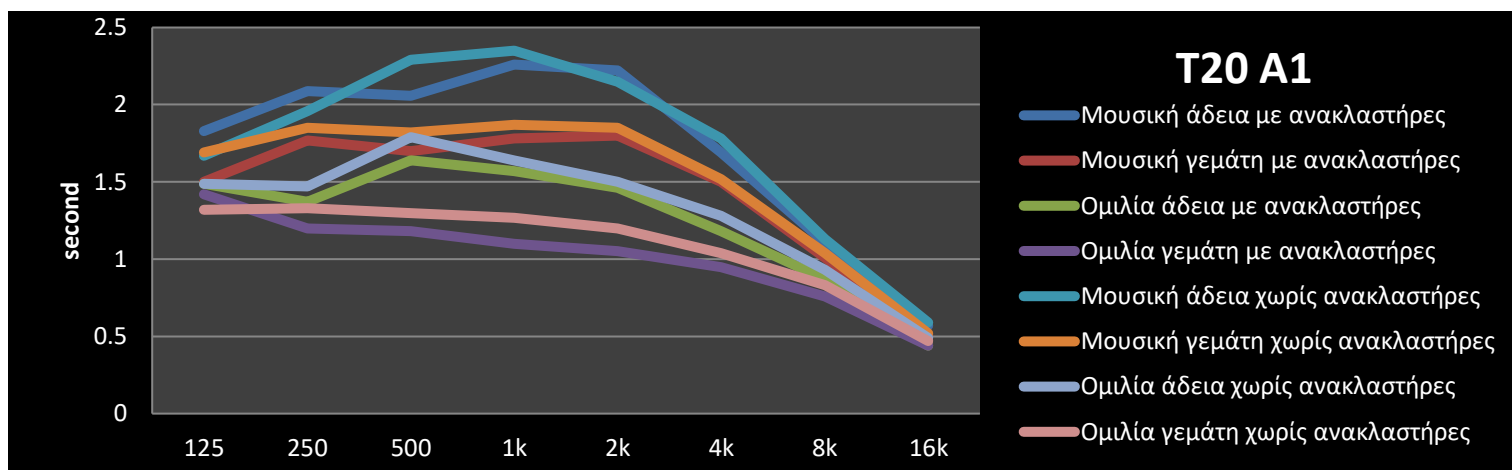


Διάγραμμα 73: Δείκτης EDT για τη θέση A5.

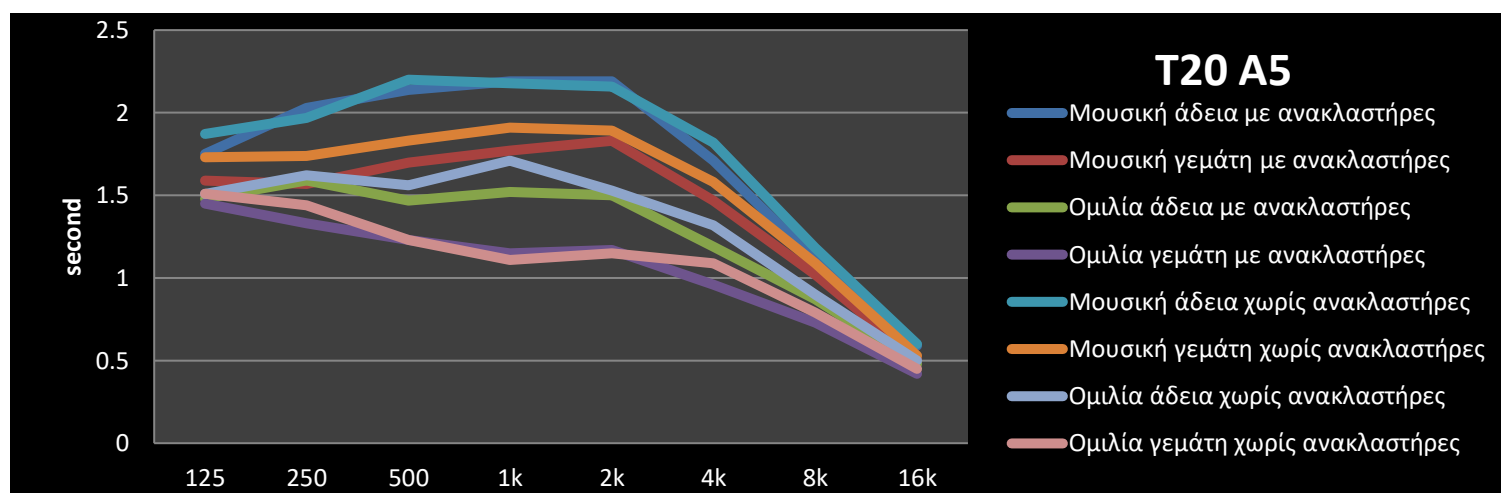


Διάγραμμα 74: Δείκτης EDT για τη θέση A9.

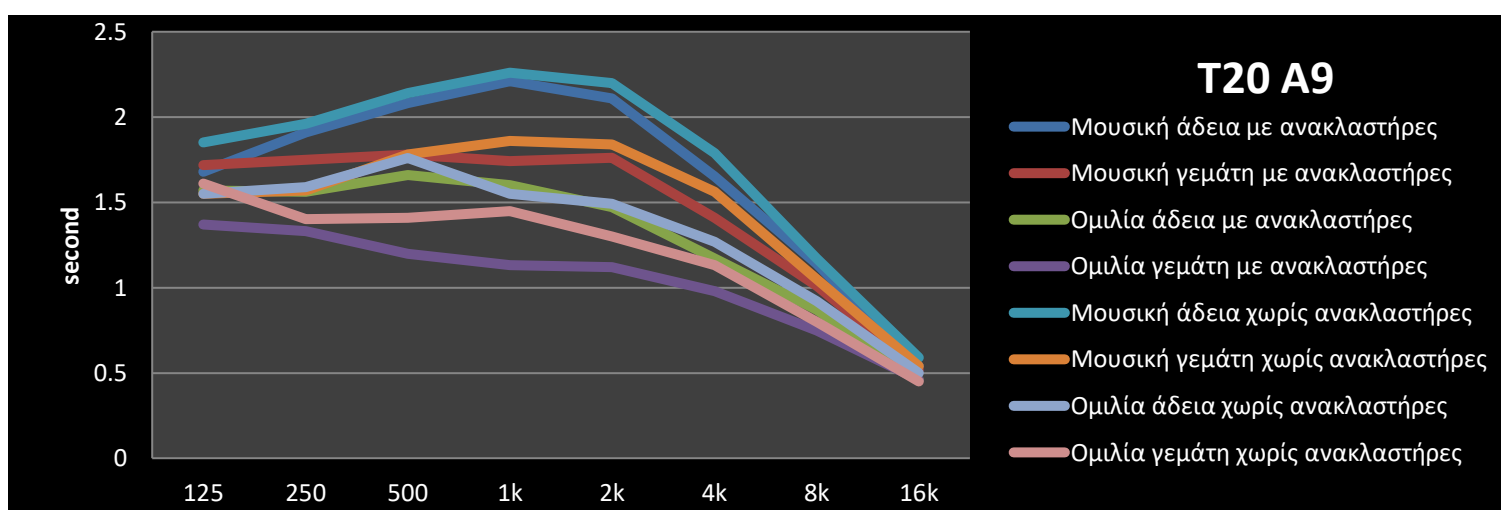
8.5.7 T20



Διάγραμμα 75: Δείκτης T20 για τη θέση A1.

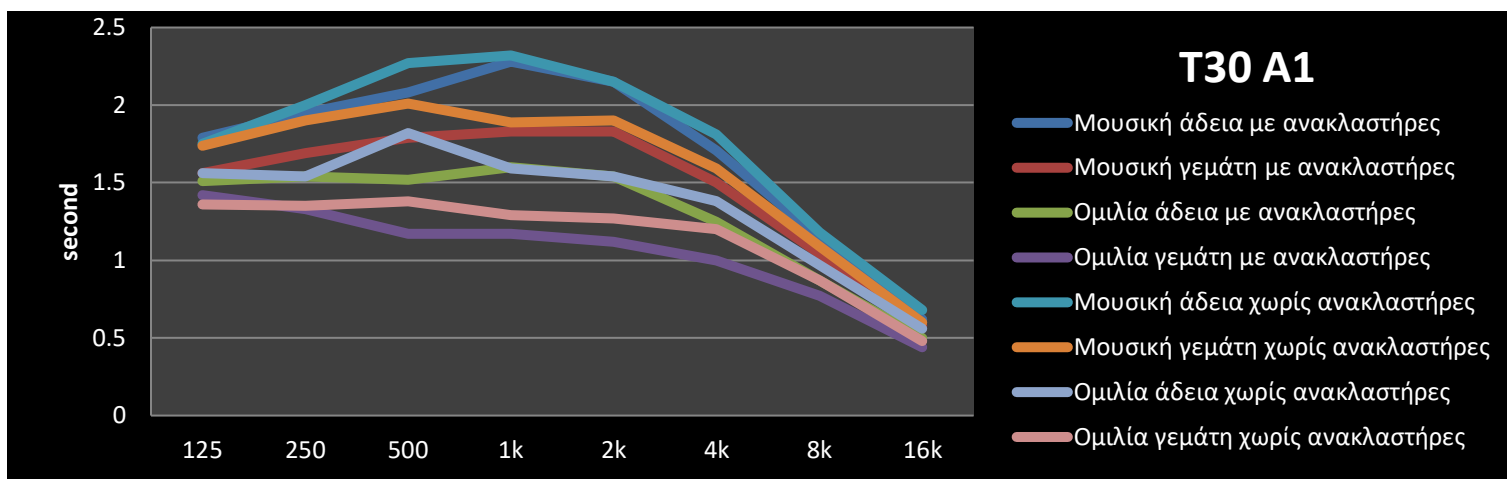


Διάγραμμα 76: Δείκτης T20 για τη θέση A5.

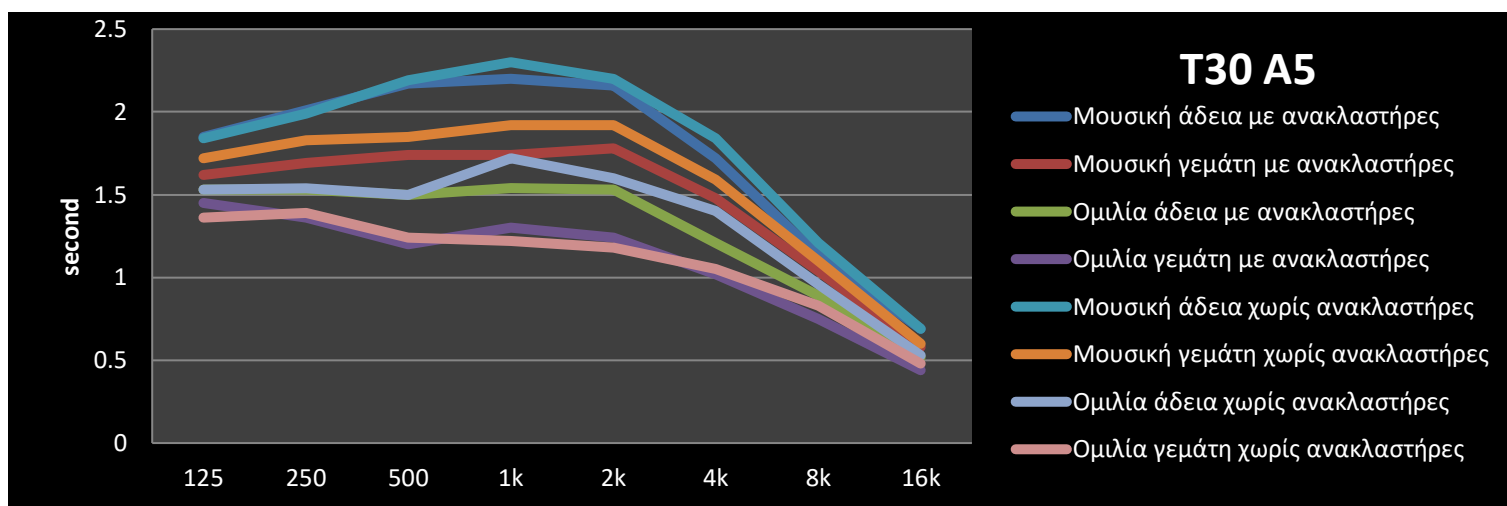


Διάγραμμα 77: Δείκτης T20 για τη θέση A9.

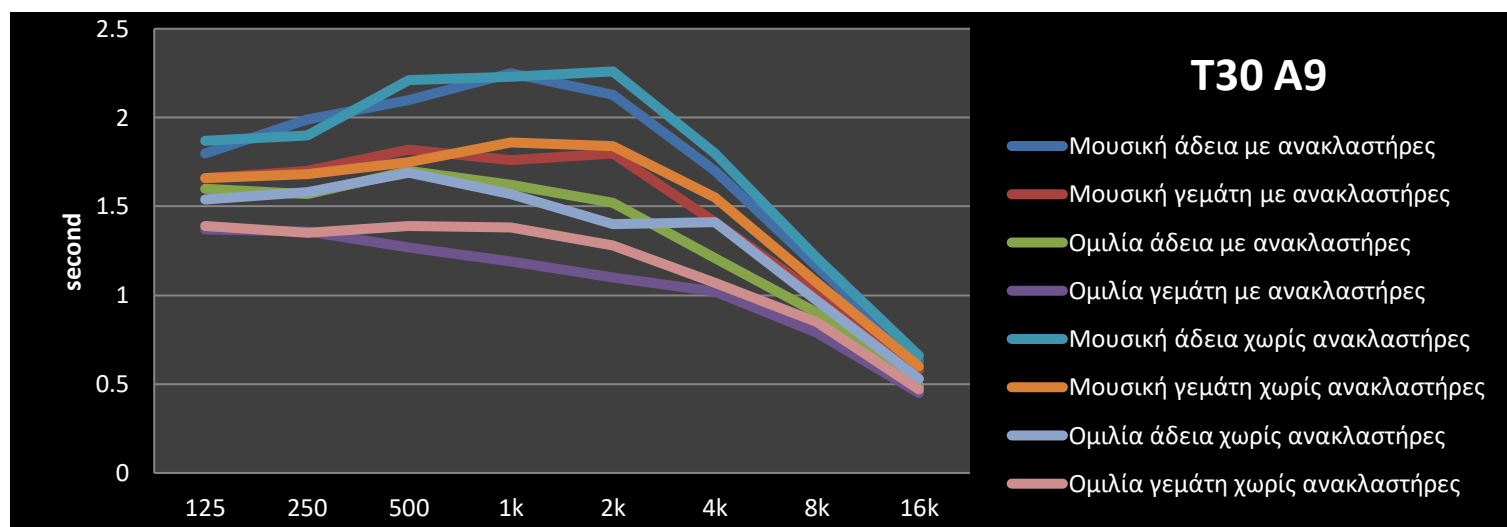
8.5.8 T30



Διάγραμμα 78: Δείκτης T30 για τη θέση A1.

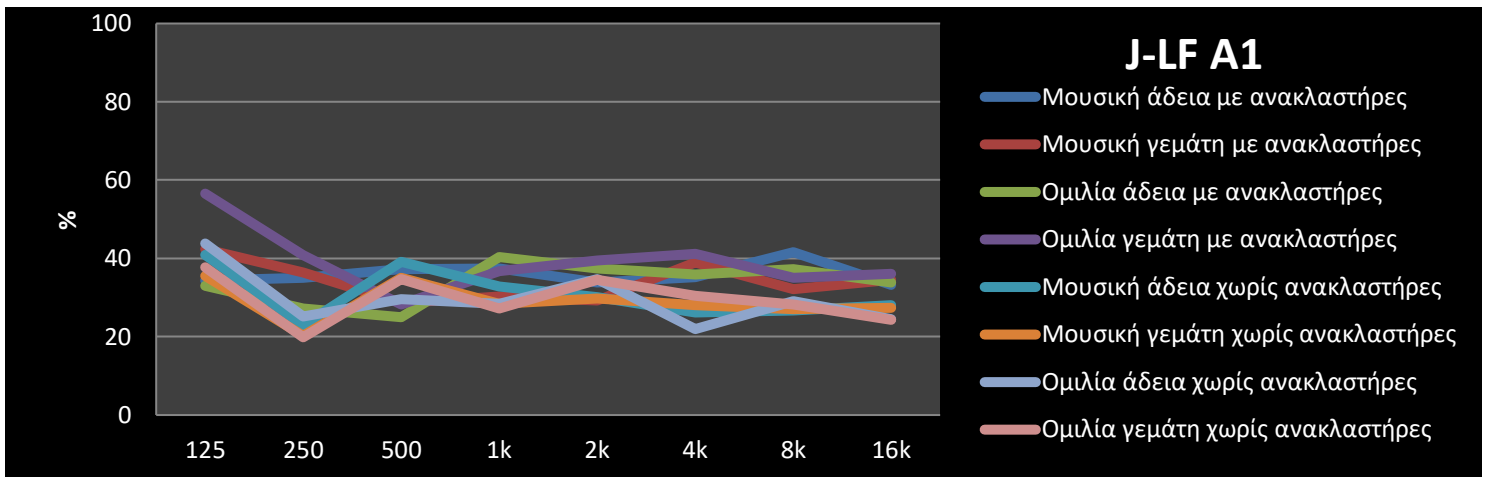


Διάγραμμα 79: Δείκτης T30 για τη θέση A5.

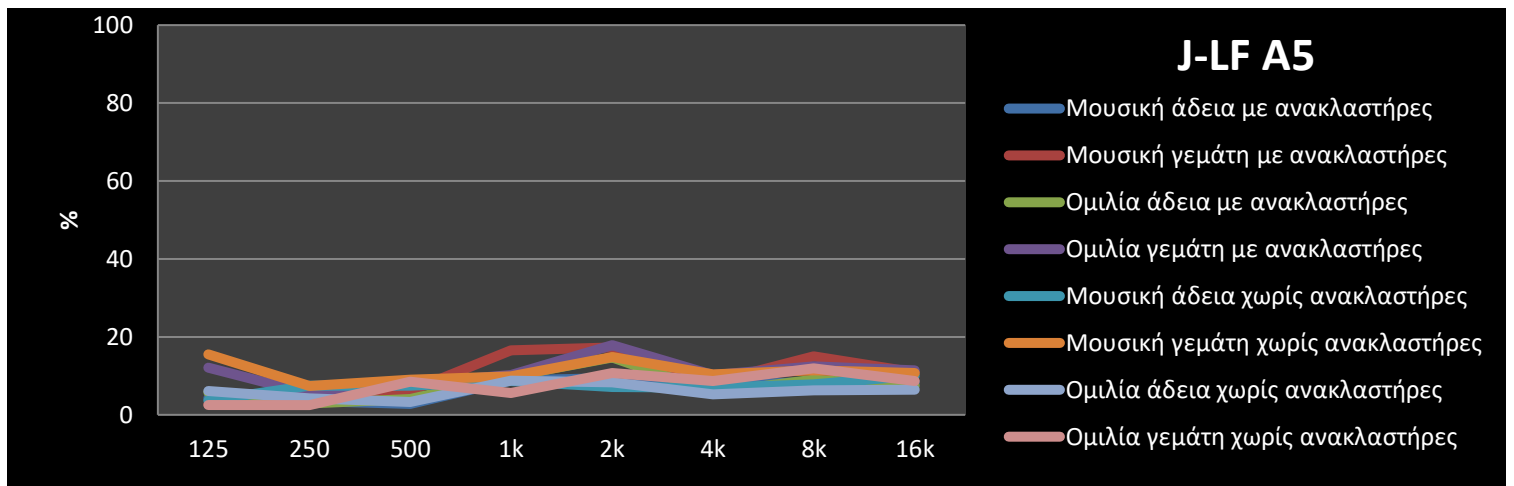


Διάγραμμα 80: Δείκτης T30 για τη θέση A9.

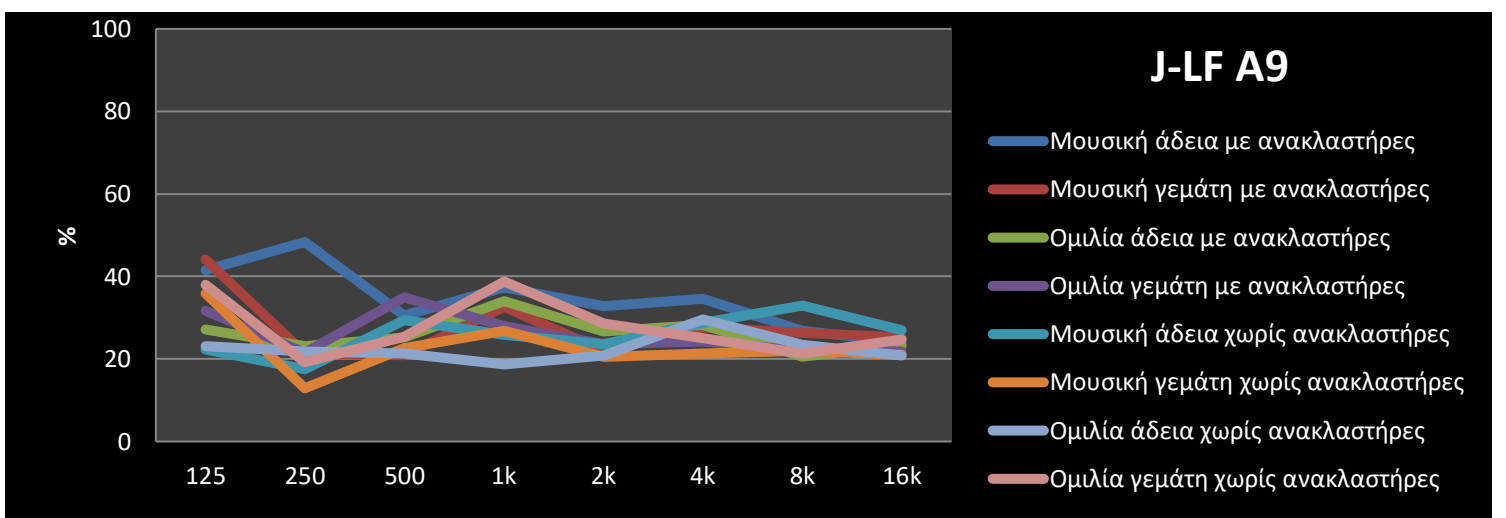
8.5.9 J-LF



Διάγραμμα 81: Δείκτης J-LF για τη θέση A1.

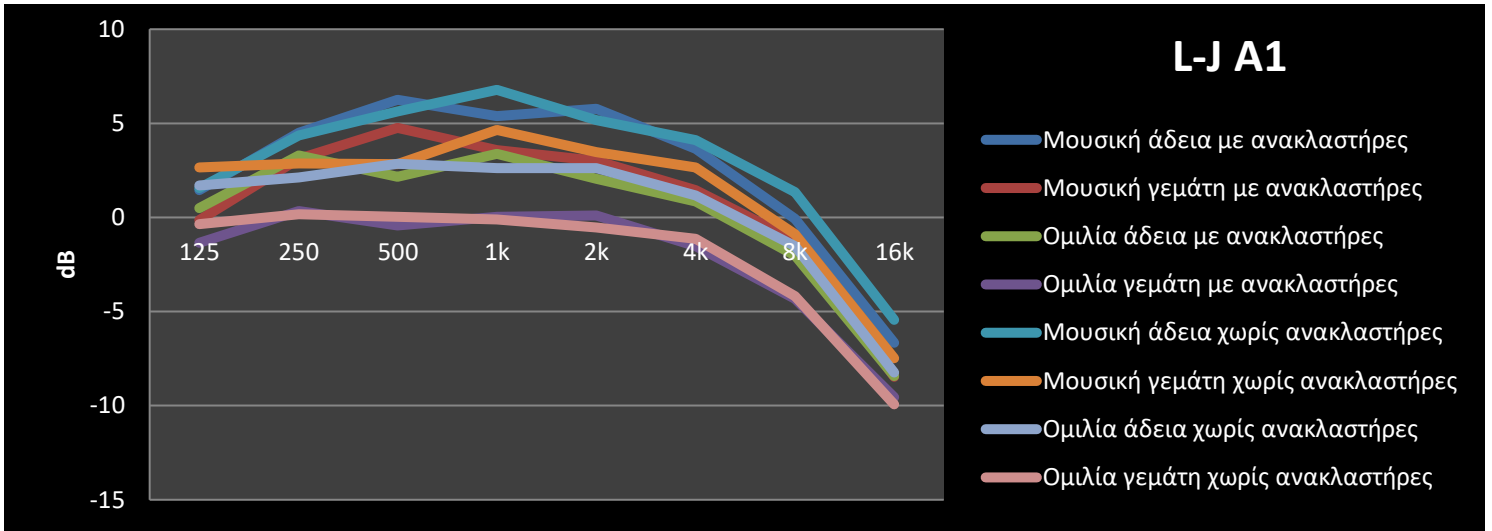


Διάγραμμα 82: Δείκτης J-LF για τη θέση A5.

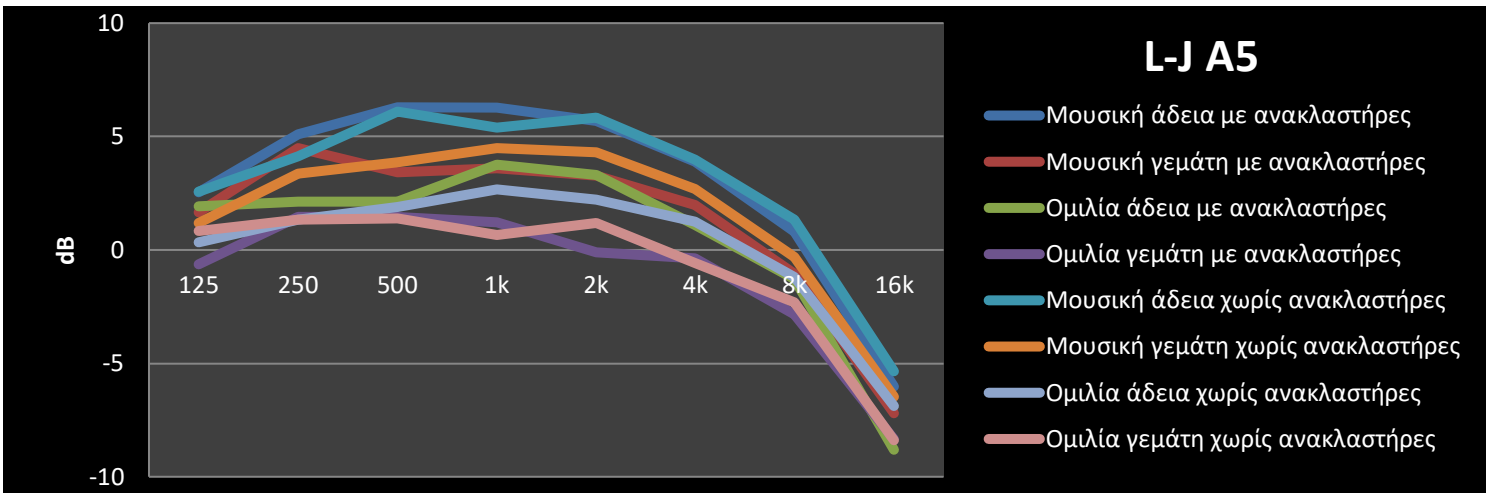


Διάγραμμα 83: Δείκτης J-LF για τη θέση A9.

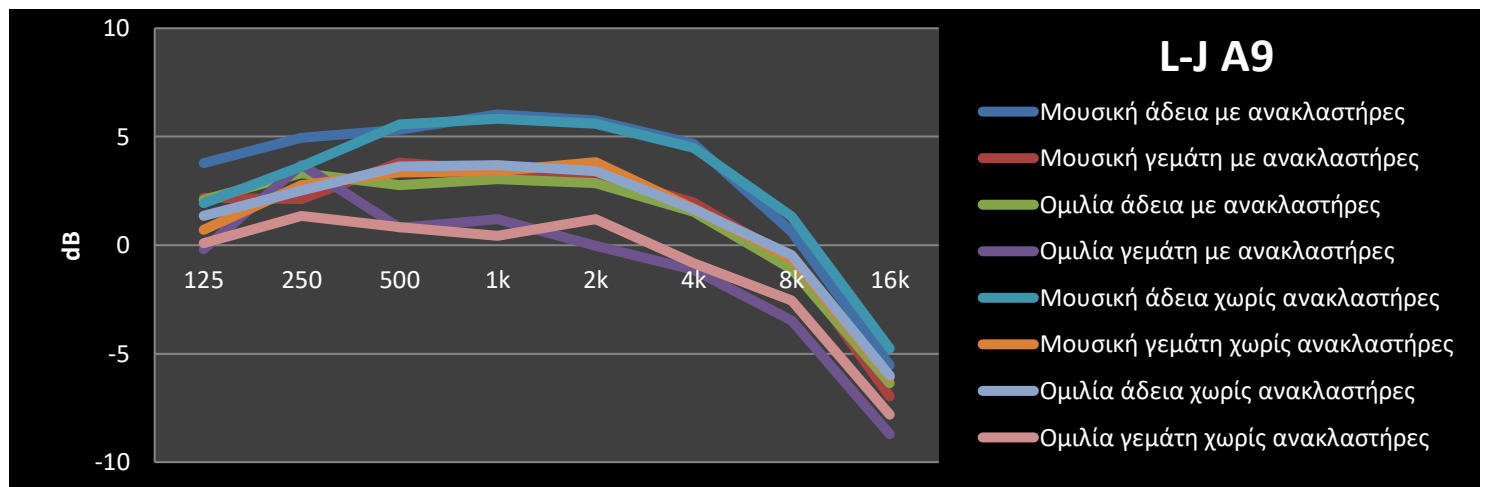
8.5.10 L-J



Διάγραμμα 84: Δείκτης J-LF για τη θέση A1.

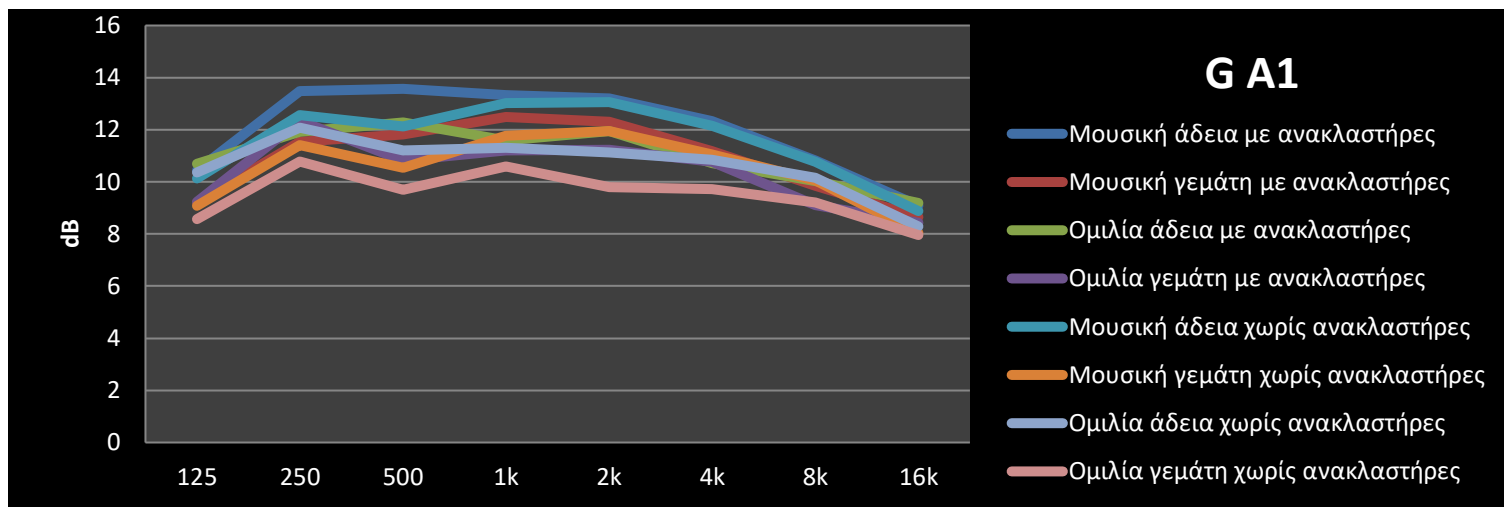


Διάγραμμα 85: Δείκτης J-LF για τη θέση A5.

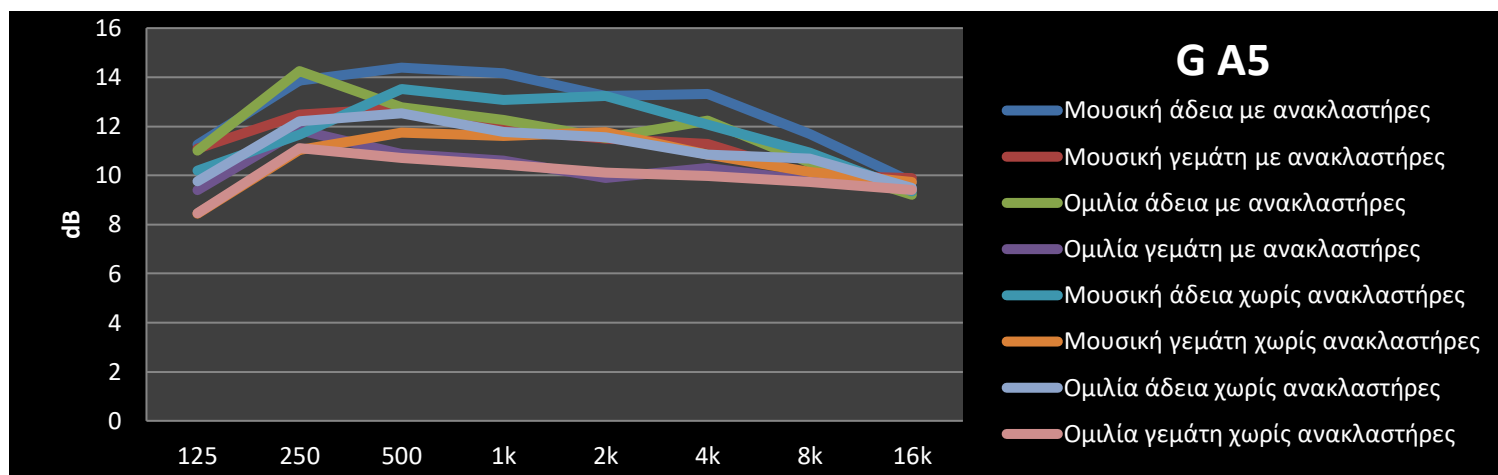


Διάγραμμα 86: Δείκτης J-LF για τη θέση A9.

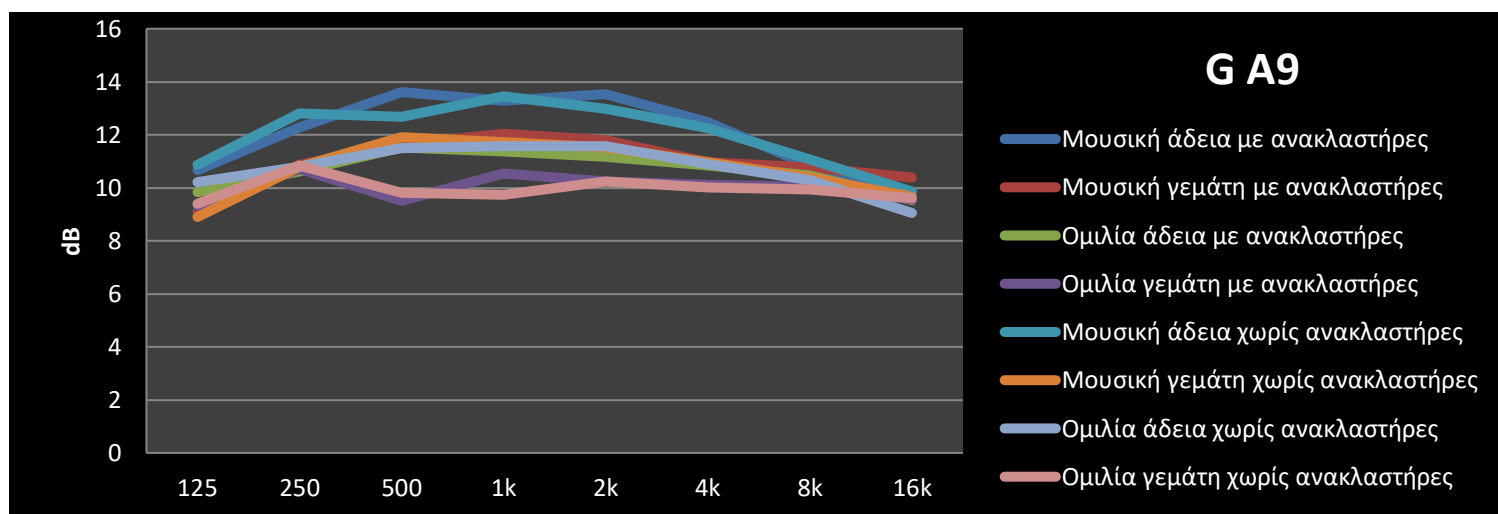
8.5.11 G



Διάγραμμα 87: Δείκτης G για τη θέση A1.

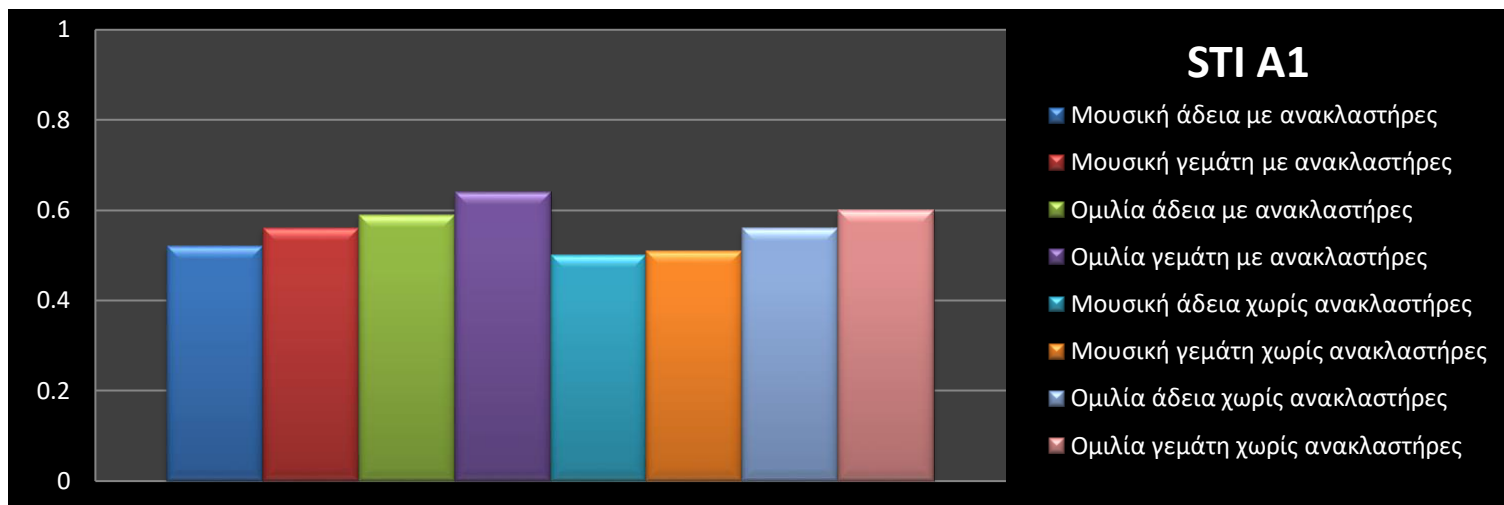


Διάγραμμα 88: Δείκτης G για τη θέση A5.

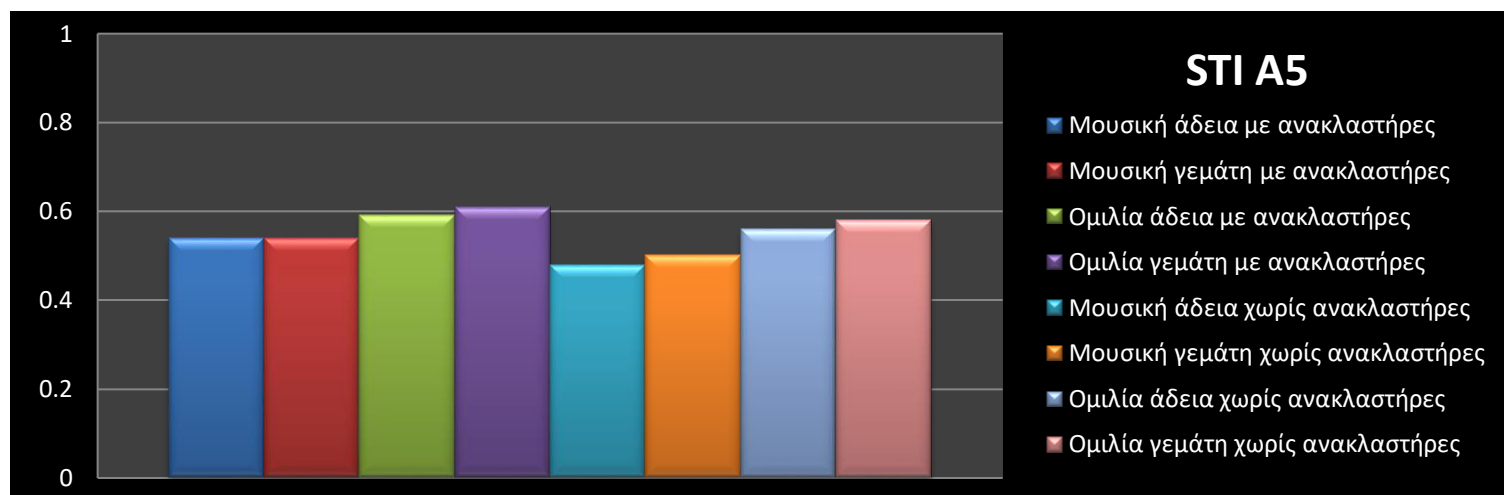


Διάγραμμα 89: Δείκτης G για τη θέση A9.

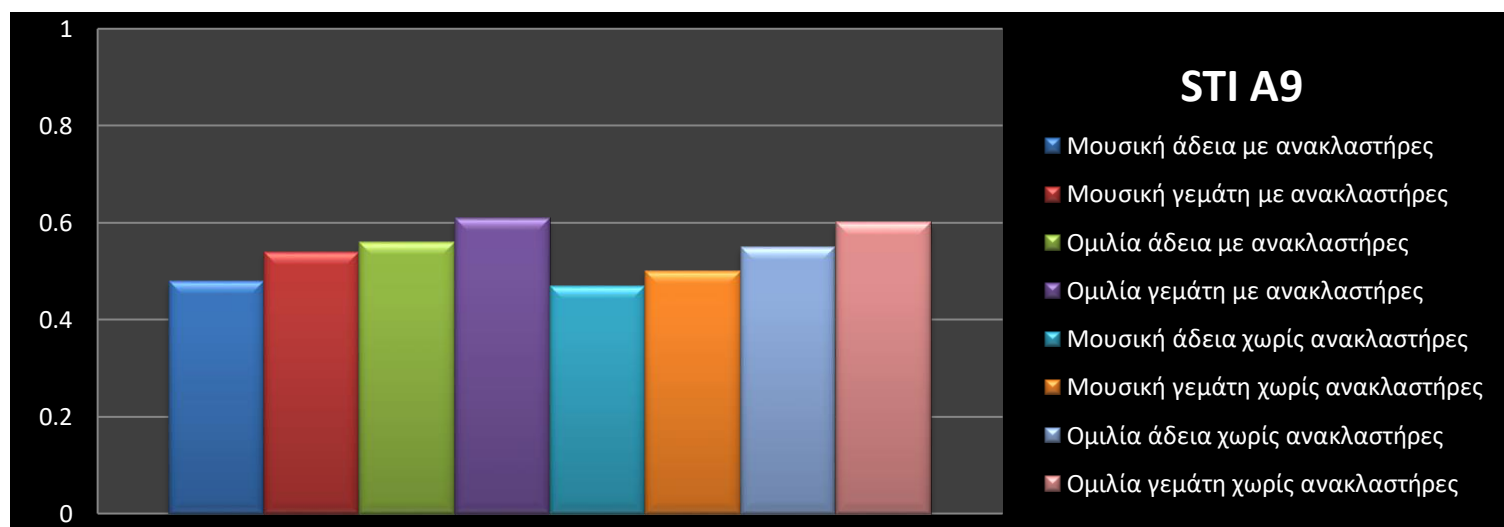
8.5.12 STI



Διάγραμμα 90: Δείκτης STI για τη θέση A1.

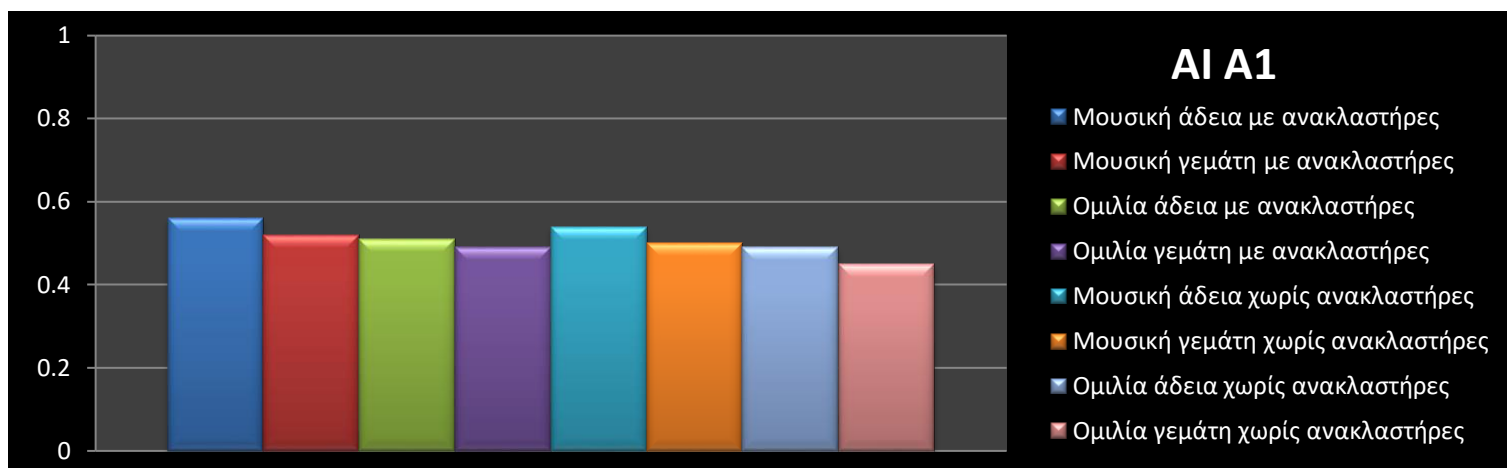


Διάγραμμα 91: Δείκτης STI για τη θέση A5.

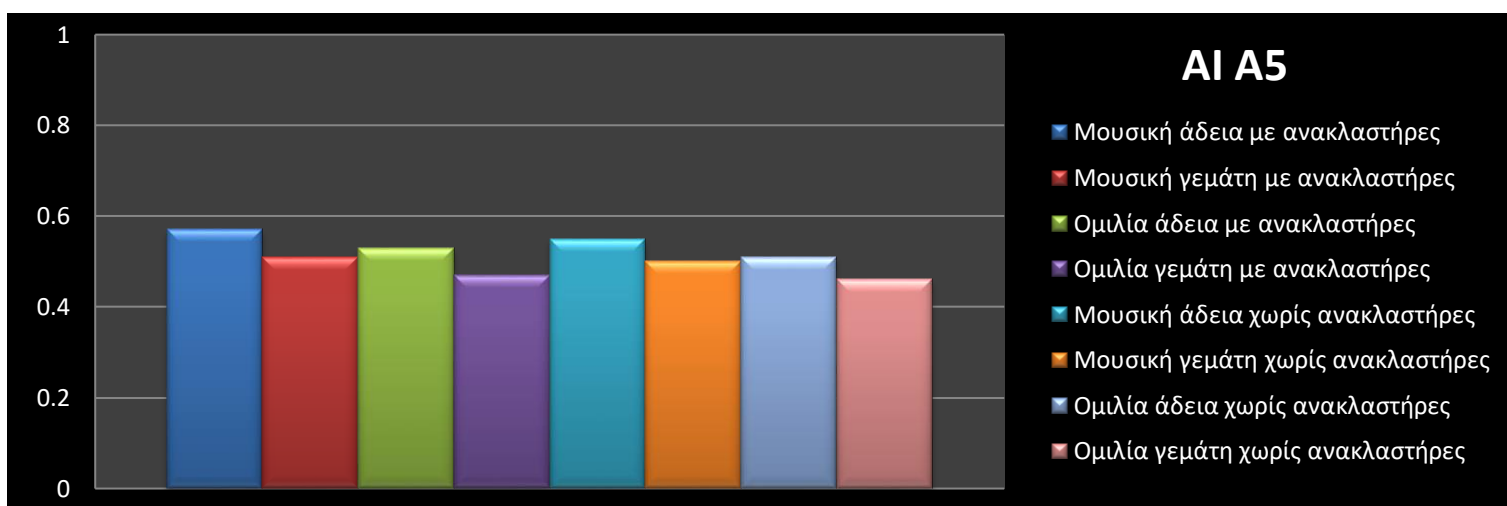


Διάγραμμα 92: Δείκτης STI για τη θέση A9.

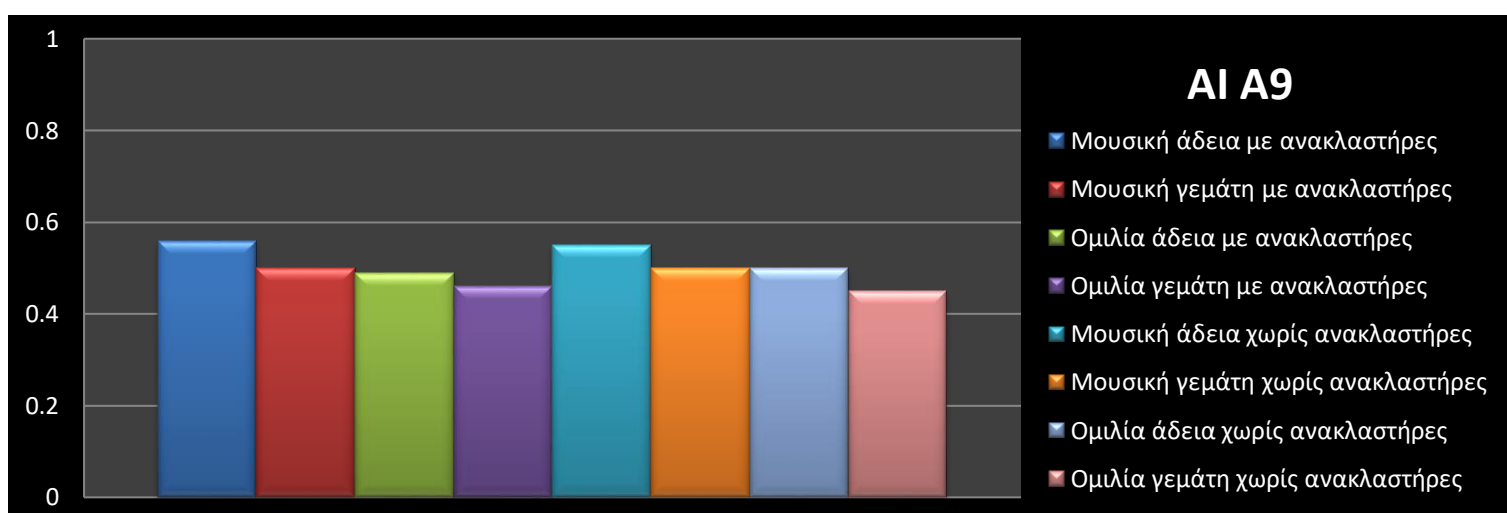
8.5.13 ΑΙ



Διάγραμμα 93: Δείκτης ΑΙ για τη θέση Α1.

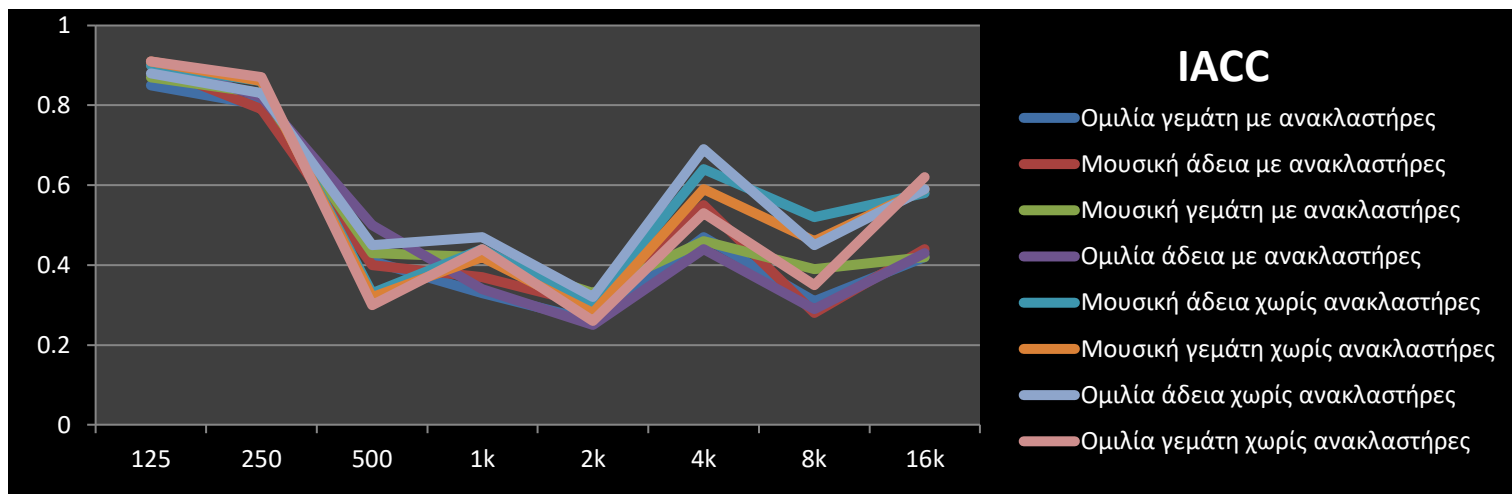


Διάγραμμα 94: Δείκτης ΑΙ για τη θέση Α5.

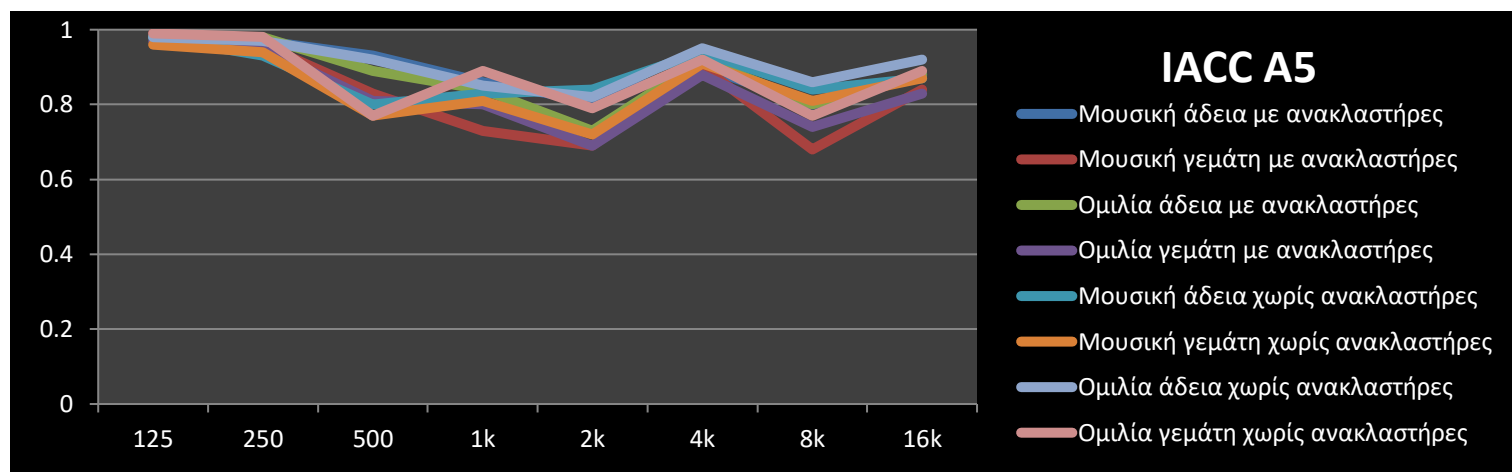


Διάγραμμα 95: Δείκτης ΑΙ για τη θέση Α9.

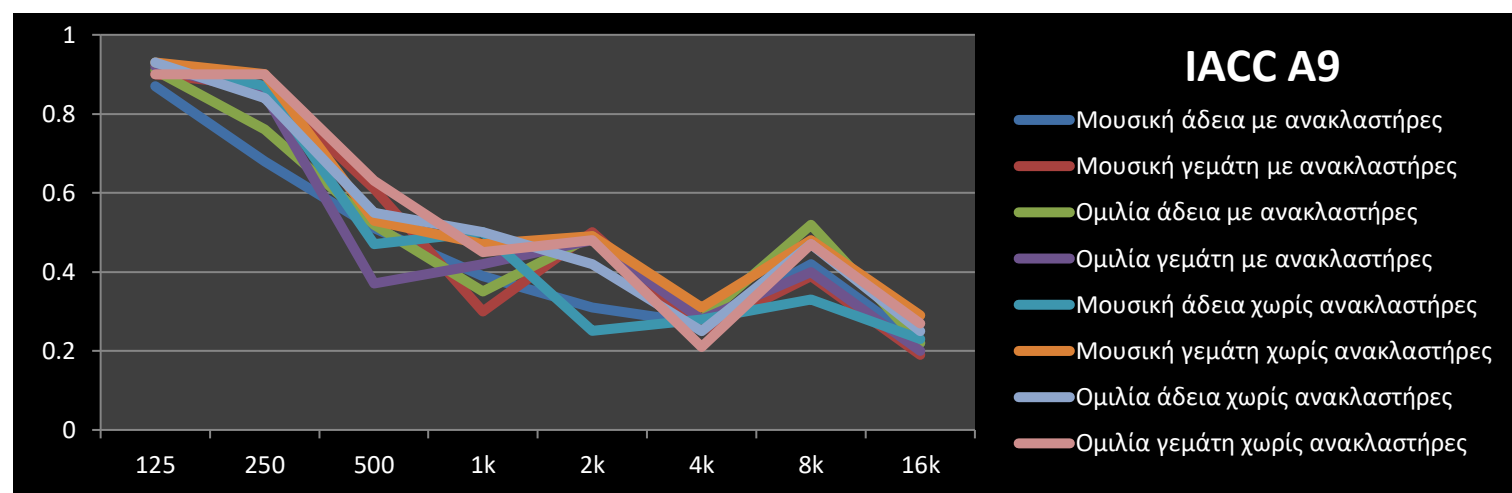
8.5.14 IACC



Διάγραμμα 96: Δείκτης IACC για τη θέση A1.



Διάγραμμα 97: Δείκτης IACC για τη θέση A5.



Διάγραμμα 98: Δείκτης IACC για τη θέση A9.

8.5.15 Υπολογισμός λόγου EDT/RT'

Λόγος EDT/RT θέση A1	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	16 kHz	min	max	Μέσος όρος
Μουσική άδεια με ανακλαστήρες	1.21	0.94	1.07	1.12	1.12	1.16	1.13	1.02	0.94	1.21	1.09
Μουσική γεμάτη με ανακλαστήρες	1.23	1.41	1.07	1.17	1.08	1.12	1.16	0.97	0.97	1.41	1.15
Ομιλία άδεια με ανακλαστήρες	1.12	1.25	0.98	1.22	1.16	1.19	1.16	0.94	0.94	1.25	1.13
Ομιλία γεμάτη με ανακλαστήρες	0.86	0.98	1.00	1.08	1.16	1.13	1.18	0.94	0.86	1.18	1.04
Μουσική άδεια χωρίς ανακλαστήρες	1.11	1.07	1.14	1.15	1.20	1.12	1.21	1.18	1.07	1.21	1.15
Μουσική γεμάτη χωρίς ανακλαστήρες	0.96	0.98	1.13	1.06	1.06	1.10	1.07	1.10	0.96	1.13	1.06
Ομιλία άδεια χωρίς ανακλαστήρες	1.00	1.19	1.11	1.07	1.14	1.10	1.15	1.11	1.00	1.19	1.11
Ομιλία γεμάτη χωρίς ανακλαστήρες	1.24	1.06	1.31	1.07	1.20	1.13	1.13	1.12	1.06	1.31	1.16

Πίνακας 22: Υπολογισμός λόγου EDT προς RT' στη θέση A1.

Λόγος EDT/RT θέση A5	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	16 kHz	min	max	Μέσος όρος
Μουσική άδεια με ανακλαστήρες	1.14	1.16	1.15	1.11	1.14	1.13	1.02	0.91	0.91	1.16	1.10
Μουσική γεμάτη με ανακλαστήρες	1.01	1.05	1.29	1.06	1.18	1.20	1.17	1.00	1.00	1.29	1.12
Ομιλία άδεια με ανακλαστήρες	1.12	0.88	1.15	1.01	1.11	1.02	1.03	1.06	0.88	1.15	1.05
Ομιλία γεμάτη με ανακλαστήρες	0.95	0.85	1.06	0.99	1.06	0.85	0.78	0.72	0.72	1.06	0.91
Μουσική άδεια χωρίς ανακλαστήρες	0.95	1.29	1.02	1.04	1.08	1.15	1.08	1.13	0.95	1.29	1.09
Μουσική γεμάτη χωρίς ανακλαστήρες	1.12	1.21	1.12	1.07	0.99	1.12	1.23	1.29	0.99	1.29	1.14
Ομιλία άδεια χωρίς ανακλαστήρες	1.04	1.09	1.20	1.09	1.09	1.15	1.00	0.93	0.93	1.20	1.07
Ομιλία γεμάτη χωρίς ανακλαστήρες	1.02	1.24	1.07	1.10	1.18	1.28	1.23	1.23	1.02	1.28	1.17

Πίνακας 23: Υπολογισμός λόγου EDT προς RT' στη θέση A5.

Λόγος EDT/RT θέση A9	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	16 kHz	min	max	Μέσος όρος
Μουσική άδεια με ανακλαστήρες	1.22	0.96	1.04	1.10	1.08	1.13	1.15	1.14	0.96	1.22	1.10
Μουσική γεμάτη με ανακλαστήρες	1.23	1.24	1.29	1.23	1.20	1.25	1.45	1.20	1.20	1.45	1.26
Ομιλία άδεια με ανακλαστήρες	1.17	0.94	1.09	1.10	1.22	1.24	1.10	1.05	0.94	1.24	1.11
Ομιλία γεμάτη με ανακλαστήρες	1.12	1.19	1.24	1.27	1.28	1.31	1.37	1.30	1.12	1.37	1.26
Μουσική άδεια χωρίς ανακλαστήρες	1.03	1.02	1.09	1.05	1.17	1.07	1.19	1.18	1.02	1.19	1.10
Μουσική γεμάτη χωρίς ανακλαστήρες	1.08	1.08	1.12	1.07	1.14	1.21	1.42	1.47	1.07	1.47	1.20
Ομιλία άδεια χωρίς ανακλαστήρες	1.01	0.90	1.02	1.17	1.06	1.16	1.17	1.28	0.90	1.28	1.10
Ομιλία γεμάτη χωρίς ανακλαστήρες	0.93	1.19	1.39	1.19	1.28	1.30	1.30	1.30	0.93	1.39	1.23

Πίνακας 24: Υπολογισμός λόγου EDT προς RT' στη θέση A9.

8.5.16 Υπολογισμός BR

BR A1 (EDT125+EDT250/EDT500+EDT1000)	
Μουσική άδεια με ανακλαστήρες	0.80
Μουσική γεμάτη με ανακλαστήρες	1.08
Ομιλία άδεια με ανακλαστήρες	1.11
Ομιλία γεμάτη με ανακλαστήρες	0.95
Μουσική άδεια χωρίς ανακλαστήρες	0.84
Μουσική γεμάτη χωρίς ανακλαστήρες	0.78
Ομιλία άδεια χωρίς ανακλαστήρες	1.03
Ομιλία γεμάτη χωρίς ανακλαστήρες	1.13

Πίνακας 25: Υπολογισμός BR θέσης A1.

BR A5 (EDT125+EDT250/EDT500+EDT1000)	
Μουσική άδεια με ανακλαστήρες	0.83
Μουσική γεμάτη με ανακλαστήρες	0.83
Ομιλία άδεια με ανακλαστήρες	0.92
Ομιλία γεμάτη με ανακλαστήρες	0.88
Μουσική άδεια χωρίς ανακλαστήρες	0.99
Μουσική γεμάτη χωρίς ανακλαστήρες	1.03
Ομιλία άδεια χωρίς ανακλαστήρες	0.99
Ομιλία γεμάτη χωρίς ανακλαστήρες	1.17

Πίνακας 26: Υπολογισμός BR θέσης A5.

BR A9 (EDT125+EDT250/EDT500+EDT1000)	
Μουσική άδεια με ανακλαστήρες	0.90
Μουσική γεμάτη με ανακλαστήρες	0.96
Ομιλία άδεια με ανακλαστήρες	1.14
Ομιλία γεμάτη με ανακλαστήρες	1.12
Μουσική άδεια χωρίς ανακλαστήρες	0.81
Μουσική γεμάτη χωρίς ανακλαστήρες	0.98
Ομιλία άδεια χωρίς ανακλαστήρες	1.05
Ομιλία γεμάτη χωρίς ανακλαστήρες	0.98

Πίνακας 27: Υπολογισμός BR θέσης A9.

8.5.17 Υπολογισμός μέσου όρου λόγου EDT/RT' και BR

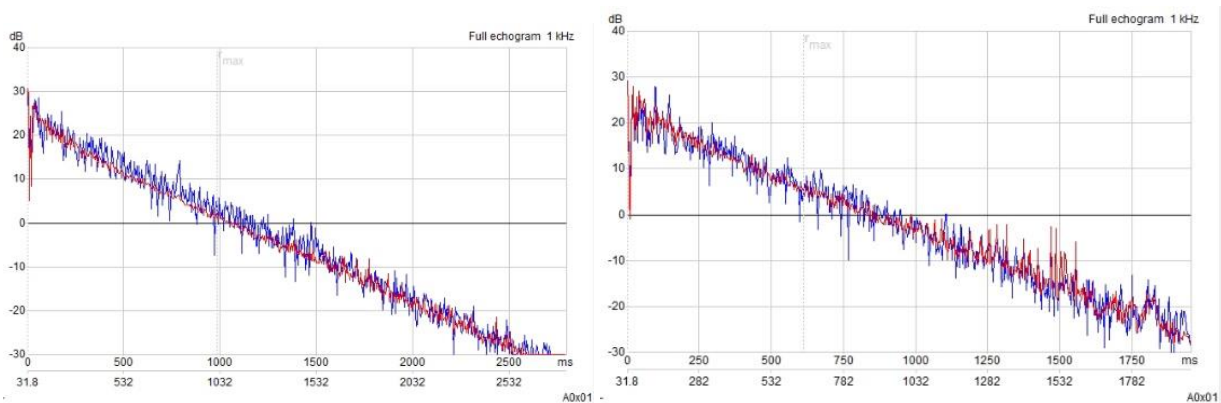
Μέσος όρος λόγου EDT/RT60 3 θέσεων:	
μουσική με ανακλαστήρες άδεια	1.10
μουσική με ανακλαστήρες γεμάτη	1.18
ομιλία με ανακλαστήρες άδεια	1.10
ομιλία με ανακλαστήρες γεμάτη	1.07
μουσική χωρίς ανακλαστήρες άδεια	1.11
μουσική χωρίς ανακλαστήρες γεμάτη	1.13
ομιλία χωρίς ανακλαστήρες άδεια	1.09
ομιλία χωρίς ανακλαστήρες γεμάτη	1.19

Πίνακας 28: Μέσος όρος λόγου EDT/RT' στις 3 θέσεις.

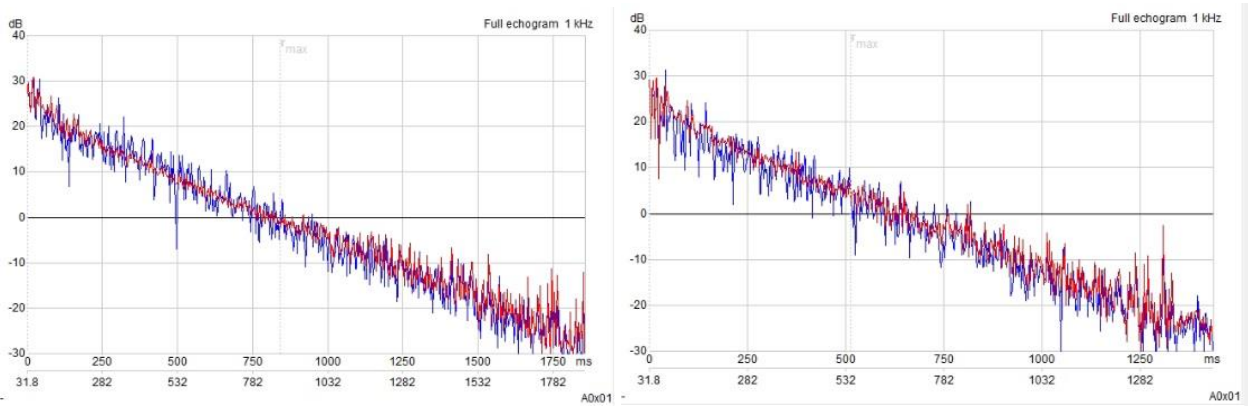
Μέσος όρος BR 3 θέσεων:	
μουσική με ανακλαστήρες άδεια	0.84
μουσική με ανακλαστήρες γεμάτη	0.96
ομιλία με ανακλαστήρες άδεια	1.06
ομιλία με ανακλαστήρες γεμάτη	0.98
μουσική χωρίς ανακλαστήρες άδεια	0.88
μουσική χωρίς ανακλαστήρες γεμάτη	0.93
ομιλία χωρίς ανακλαστήρες άδεια	1.03
ομιλία χωρίς ανακλαστήρες γεμάτη	1.09

Πίνακας 29: Μέσος όρος BR στις 3 θέσεις.

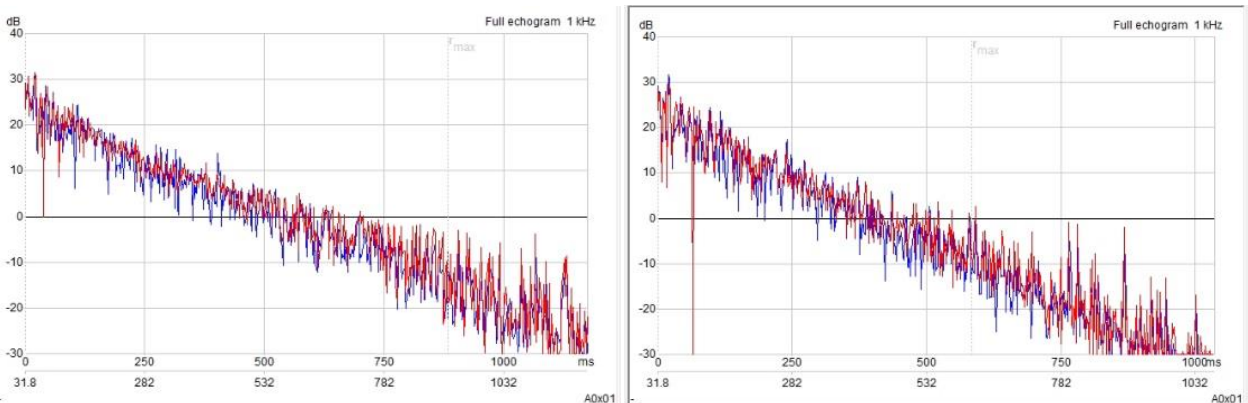
8.5.18 Ηχογράμματα θέση A1



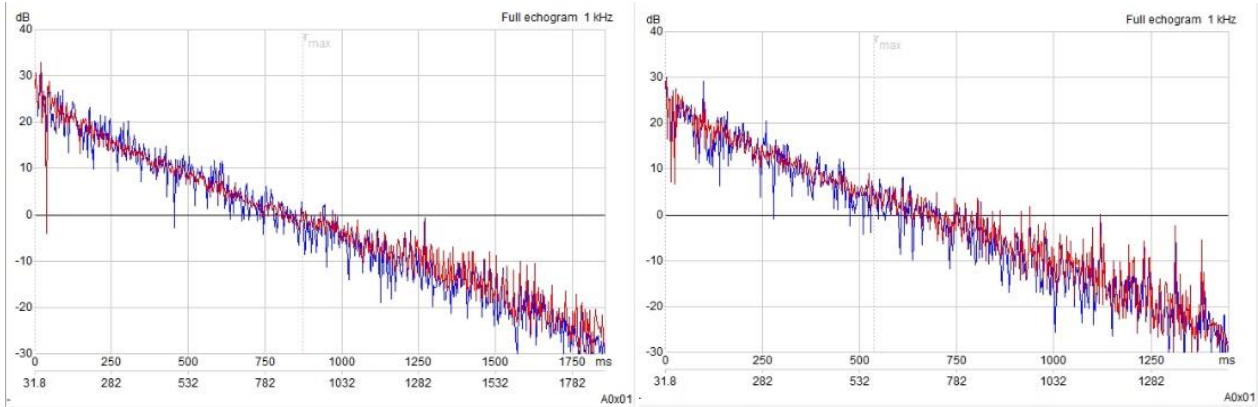
Διάγραμμα 99: (Αριστερά) Ηχογράμμα θέσης A1 αρχική αίθουσα χωρίς κοινό.
Διάγραμμα 100: (Δεξιά) Ηχογράμμα θέσης A1 αρχική αίθουσα με κοινό.



Διάγραμμα 101: (Αριστερά) Ηχογράμμα θέσης A1 με KB803, BASWA και ανακλαστικές χωρίς κοινό.
Διάγραμμα 102: (Δεξιά) Ηχογράμμα θέσης A1 με KB803, BASWA και ανακλαστικές, με κοινό.

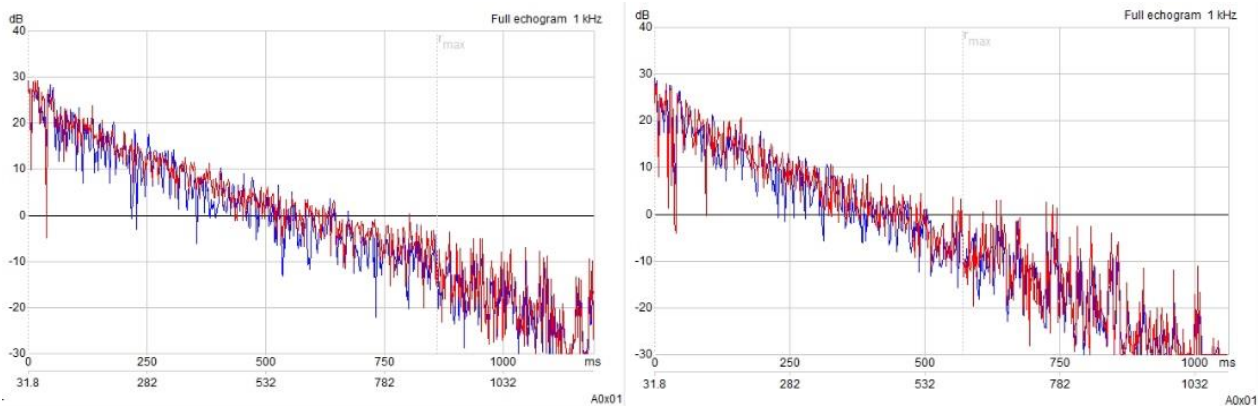


Διάγραμμα 103: (Αριστερά) Ηχογράμμα θέσης A1 με KB803, BASWA, κουρτίνες και ανακλαστικές, χωρίς κοινό.
Διάγραμμα 104: (Δεξιά) Ηχογράμμα θέσης A1 με KB803, BASWA, κουρτίνες και ανακλαστικές, με κοινό.



Διάγραμμα 105: (Αριστερά) Ηχόγραμμα θέσης A1 με KB803, BASWA χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

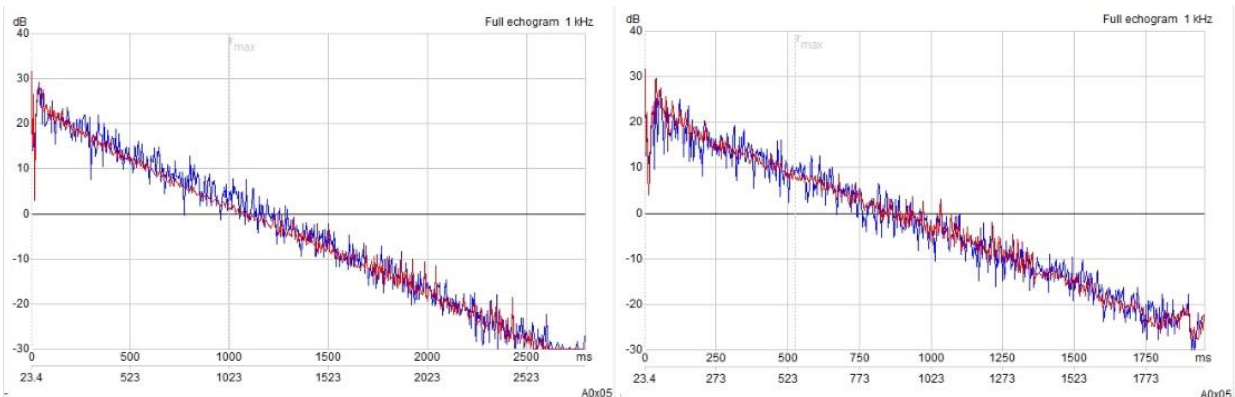
Διάγραμμα 106: (Δεξιά) Ηχόγραμμα θέσης A1 με KB803, BASWA χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, με κοινό.



Διάγραμμα 107: (Αριστερά) Ηχόγραμμα θέσης A1 με KB803, BASWA, κουρτίνες χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

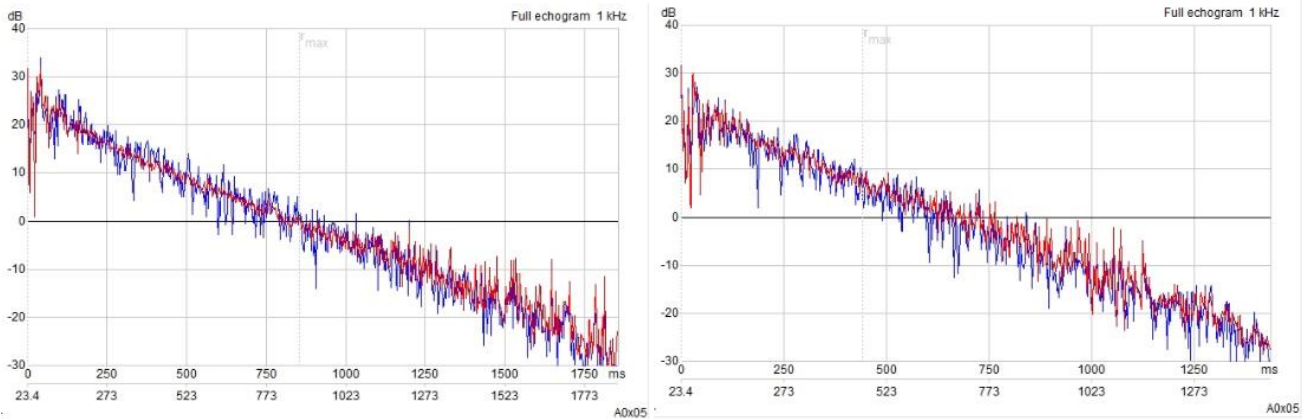
Διάγραμμα 108: (Δεξιά) Ηχόγραμμα θέσης A1 με KB803, BASWA, κουρτίνες χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, με κοινό.

8.5.19 Ηχογράμματα θέση A5



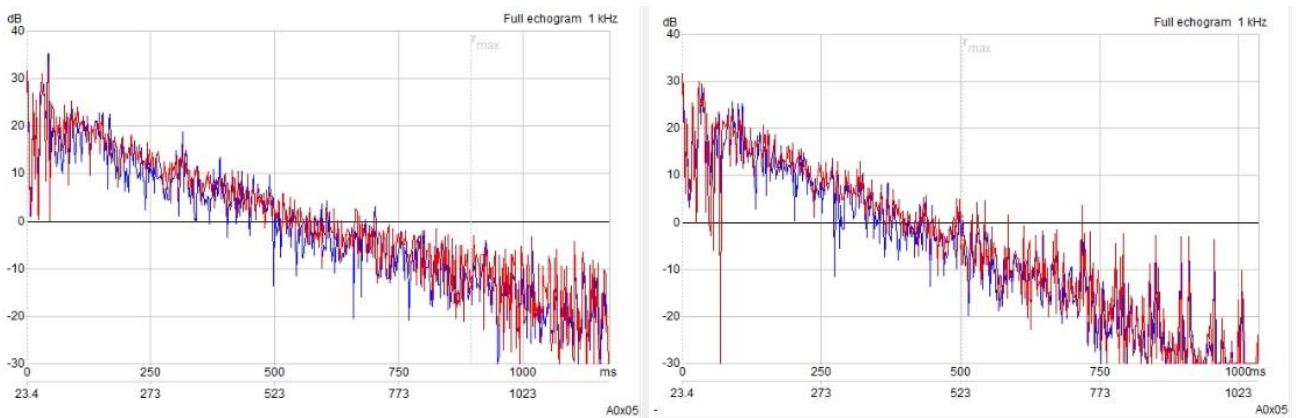
Διάγραμμα 109: (Αριστερά) Ηχόγραμμα θέσης A5 αρχική αίθουσα χωρίς κοινό.

Διάγραμμα 110: (Δεξιά) Ηχόγραμμα θέσης A5 αρχική αίθουσα με κοινό.



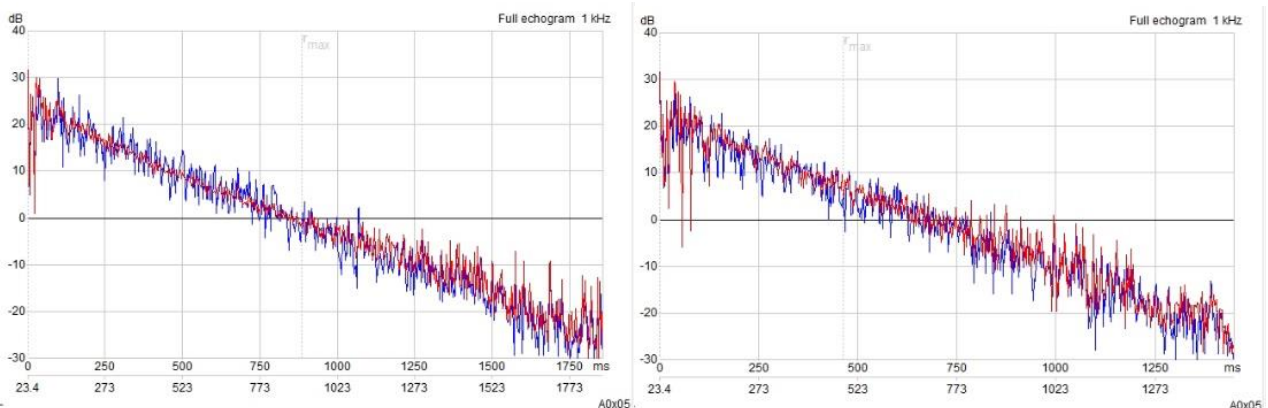
Διάγραμμα 111: (Αριστερά) Ηχόγραμμα θέσης A5 με KB803, BASWA και ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

Διάγραμμα 112: (Δεξιά) Ηχόγραμμα θέσης A5 με KB803, BASWA και ανακλαστήρες, με κοινό.



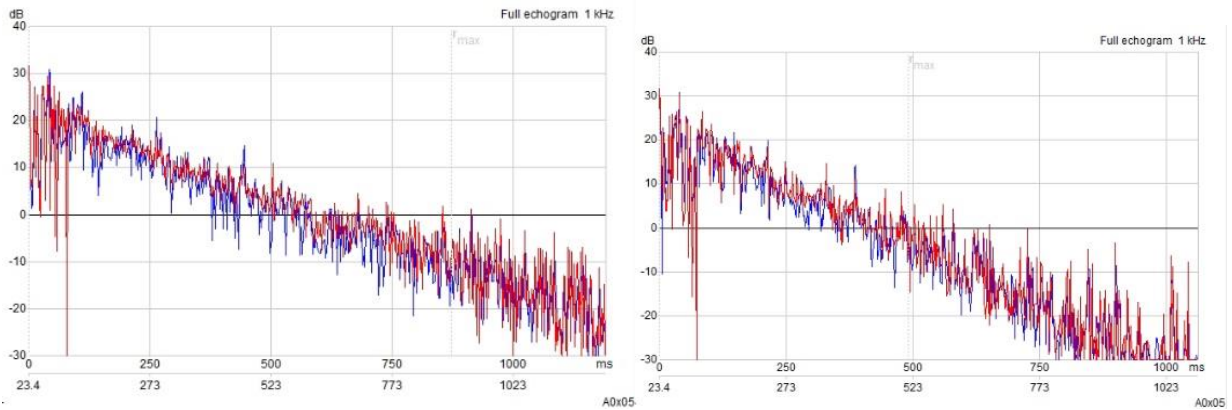
Διάγραμμα 113: (Αριστερά) Ηχόγραμμα θέσης A5 με KB803, BASWA, κουρτίνες και ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

Διάγραμμα 114: (Δεξιά) Ηχόγραμμα θέσης A5 με KB803, BASWA, κουρτίνες και ανακλαστήρες, με κοινό.



Διάγραμμα 115: (Αριστερά) Ηχόγραμμα θέσης A5 με KB803, BASWA χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

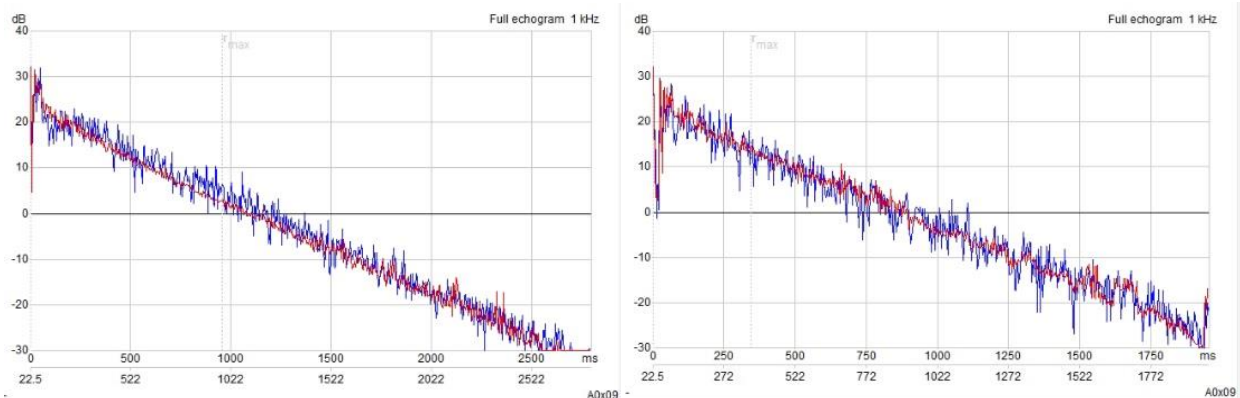
Διάγραμμα 116: (Δεξιά) Ηχόγραμμα θέσης A5 με KB803, BASWA χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, με κοινό.



Διάγραμμα 117: (Αριστερά) Ηχόγραμμα θέσης A5 με KB803, BASWA κουρτίνες χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

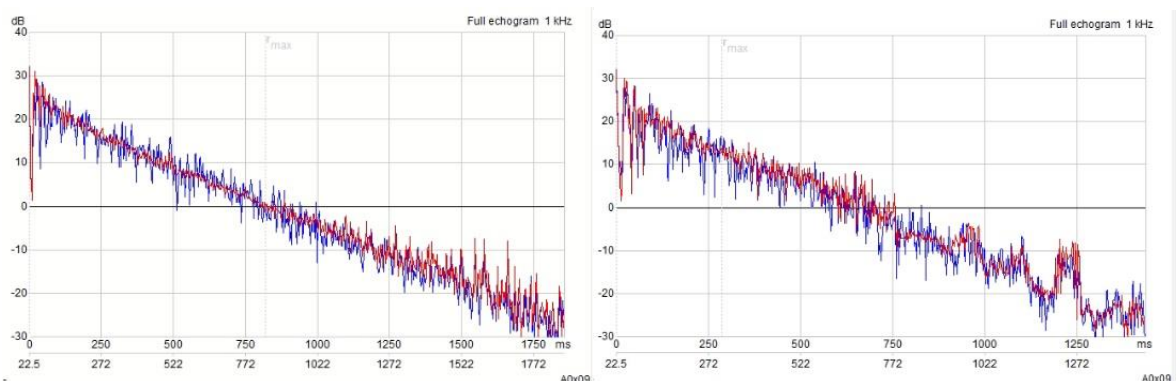
Διάγραμμα 118: (Δεξιά) Ηχόγραμμα θέσης A5 με KB803, BASWA κουρτίνες χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, με κοινό.

8.5.20 Ηχογράμματα θέση A9



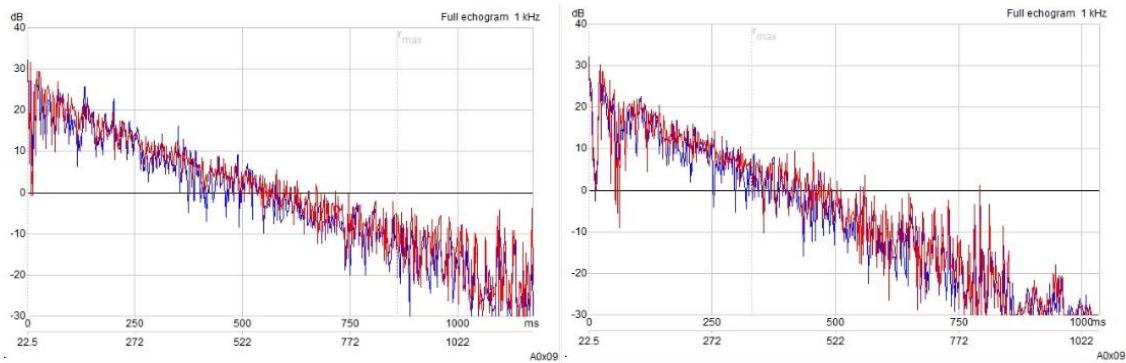
Διάγραμμα 119: (Αριστερά) Ηχόγραμμα θέσης A9 αρχική αίθουσα χωρίς κοινό.

Διάγραμμα 120: (Δεξιά) Ηχόγραμμα θέσης A9 αρχική αίθουσα με κοινό.



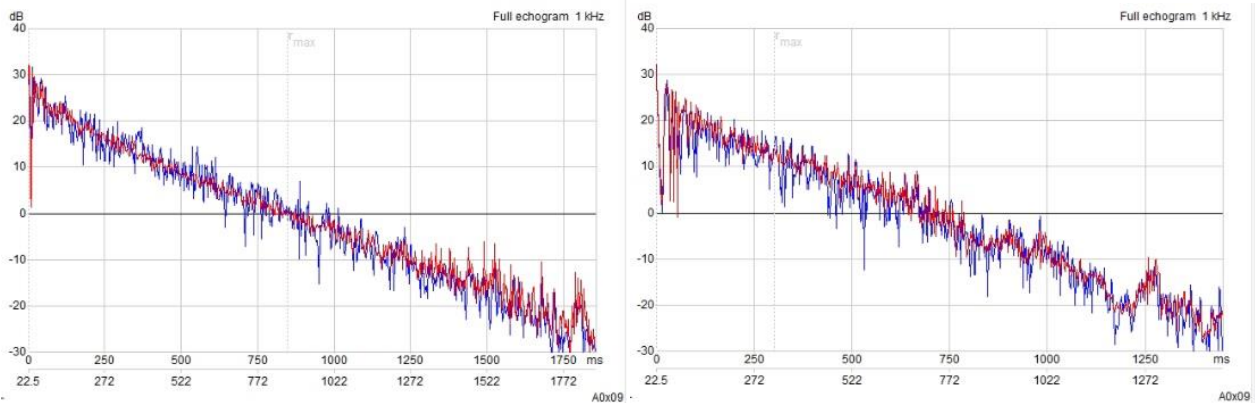
Διάγραμμα 121: (Αριστερά) Ηχόγραμμα θέσης A9 με KB803, BASWA και ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

Διάγραμμα 122: (Δεξιά) Ηχόγραμμα θέσης A9 με KB803, BASWA και ανακλαστήρες, με κοινό.



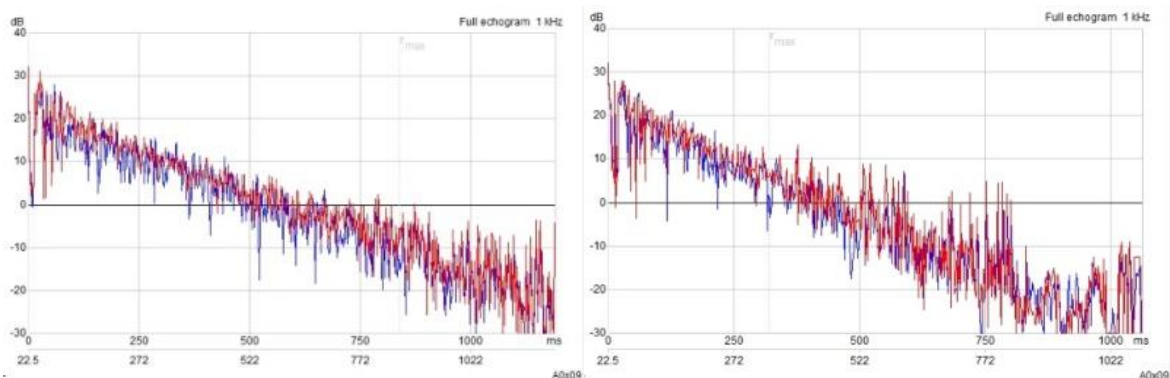
Διάγραμμα 123: (Αριστερά) Ηχόγραμμα θέσης A9 με KB803, BASWA, κουρτίνες και ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

Διάγραμμα 124: (Δεξιά) Ηχόγραμμα θέσης A9 με KB803, BASWA, κουρτίνες και ανακλαστήρες, με κοινό.



Διάγραμμα 125: (Αριστερά) Ηχόγραμμα θέσης A9 με KB803, BASWA χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

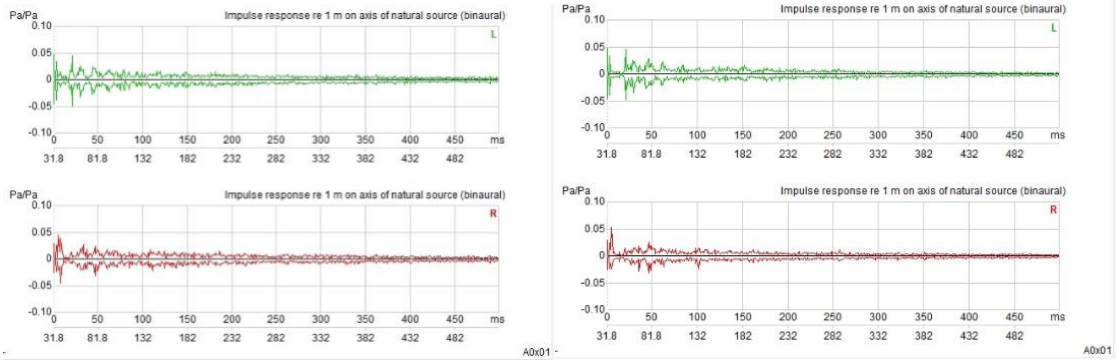
Διάγραμμα 126: (Δεξιά) Ηχόγραμμα θέσης A9 με KB803, BASWA χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, με κοινό.



Διάγραμμα 127: (Αριστερά) Ηχόγραμμα θέσης A9 με KB803, BASWA, κουρτίνες χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

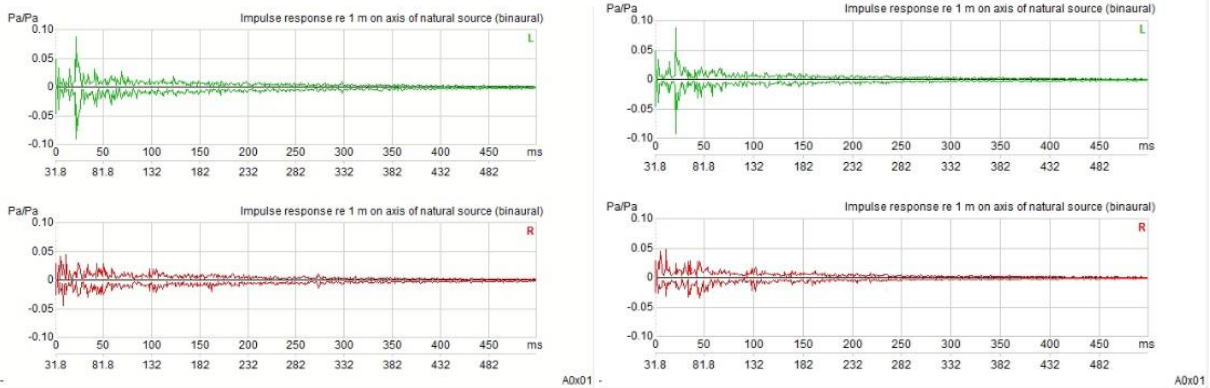
Διάγραμμα 128: (Δεξιά) Ηχόγραμμα θέσης A9 με KB803, BASWA, κουρτίνες χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, με κοινό.

8.5.21 Κρουστικές αποκρίσεις θέση A1



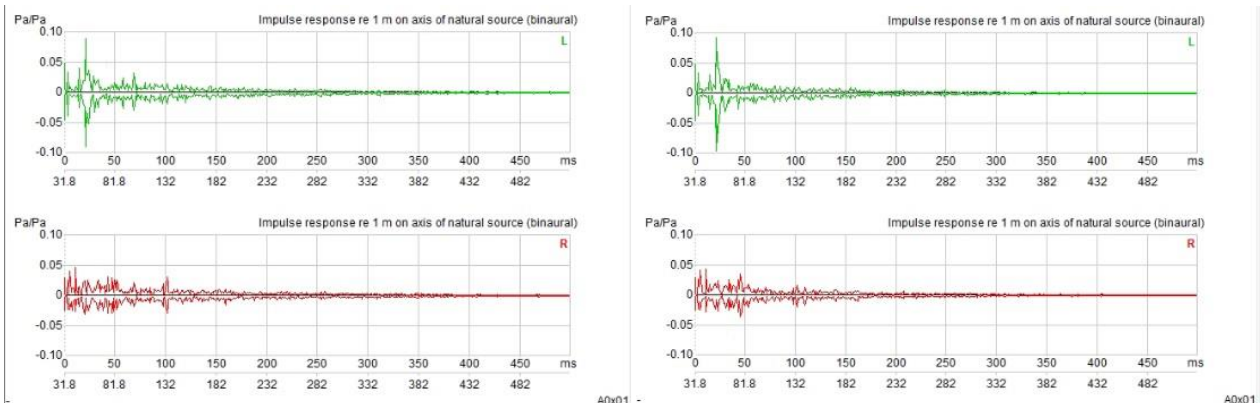
Διάγραμμα 129: (Αριστερά) Κρουστική απόκριση θέσης A1 αρχικής αίθουσας χωρίς κοινό.

Διάγραμμα 130: (Δεξιά) Κρουστική απόκριση θέσης A1 αρχικής αίθουσας με κοινό.



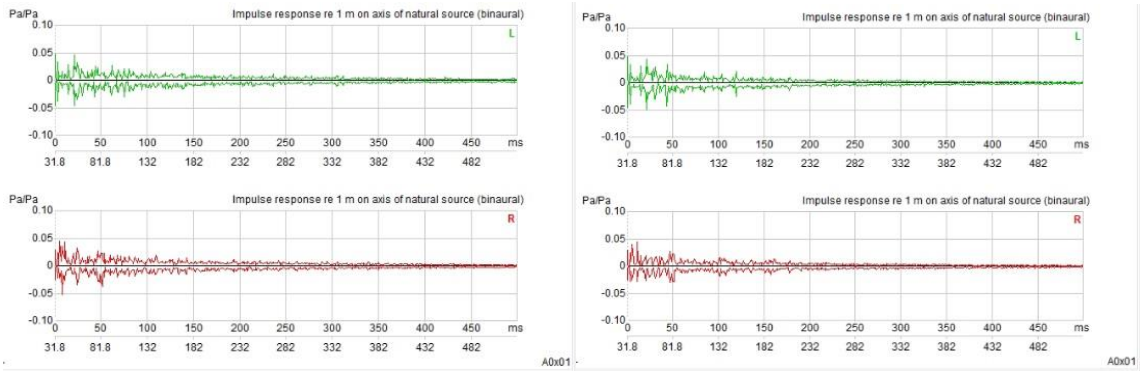
Διάγραμμα 131: (Αριστερά) Κρουστική απόκριση θέσης A1 με KB803, BASWA και ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

Διάγραμμα 132: (Δεξιά) Κρουστική απόκριση θέσης A1 με KB803, BASWA και ανακλαστήρες, με κοινό.



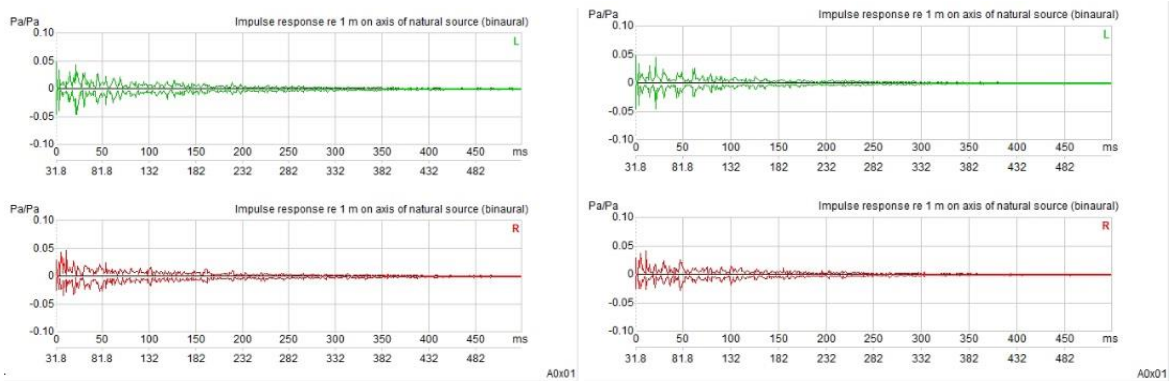
Διάγραμμα 133: (Αριστερά) Κρουστική απόκριση θέσης A1 με KB803, BASWA, κουρτίνες και ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

Διάγραμμα 134: (Δεξιά) Κρουστική απόκριση θέσης A1 με KB803, BASWA, κουρτίνες και ανακλαστήρες, με κοινό.



Διάγραμμα 135: (Αριστερά) Κρουστική απόκριση θέσης A1 με KB803, BASWA χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

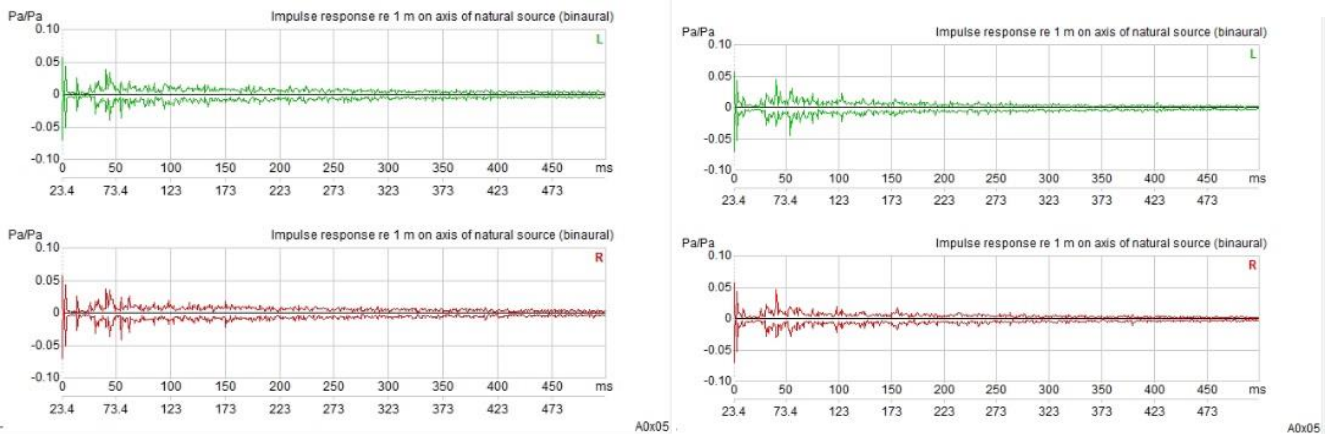
Διάγραμμα 136: (Δεξιά) Κρουστική απόκριση θέσης A1 με KB803, BASWA χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, με κοινό.



Διάγραμμα 137: (Αριστερά) Κρουστική απόκριση θέσης A1 με KB803, BASWA, κουρτίνες χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

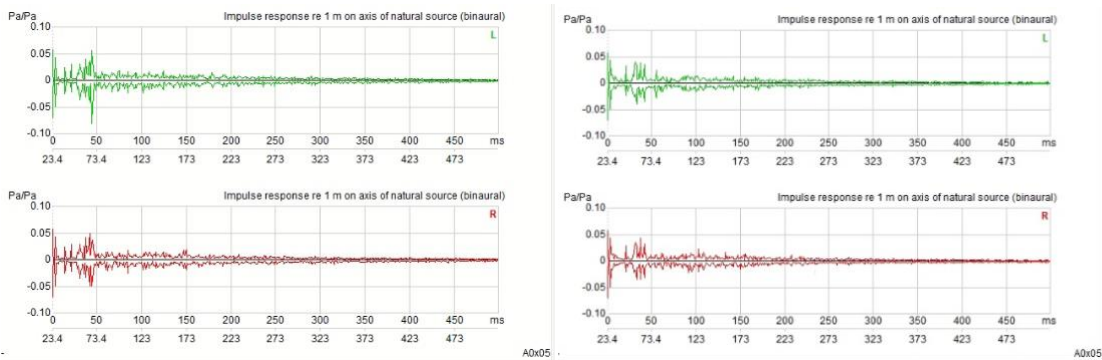
Διάγραμμα 138: (Δεξιά) Κρουστική απόκριση θέσης A1 με KB803, BASWA, κουρτίνες χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, με κοινό.

8.5.22 Κρουστικές αποκρίσεις θέση A5



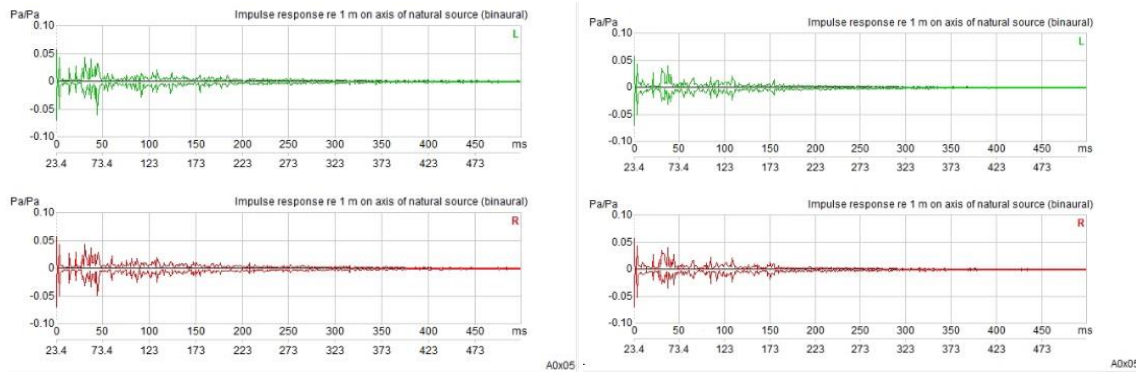
Διάγραμμα 139: (Αριστερά) Κρουστική απόκριση θέσης A5 αρχικής αίθουσας χωρίς κοινό.

Διάγραμμα 140: (Δεξιά) Κρουστική απόκριση θέσης A5 αρχικής αίθουσας με κοινό.



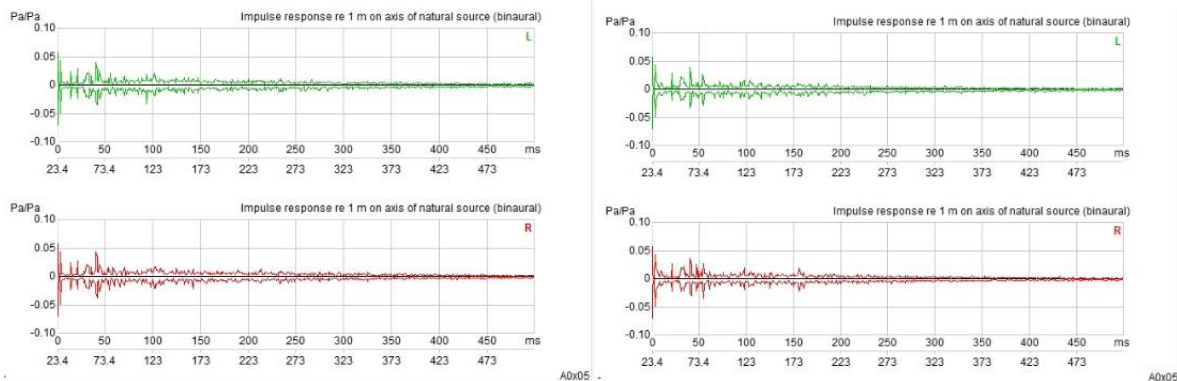
Διάγραμμα 141: (Αριστερά) Κρουστική απόκριση θέσης A5 με KB803, BASWA και ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

Διάγραμμα 142: (Δεξιά) Κρουστική απόκριση θέσης A5 με KB803, BASWA και ανακλαστήρες, με κοινό.



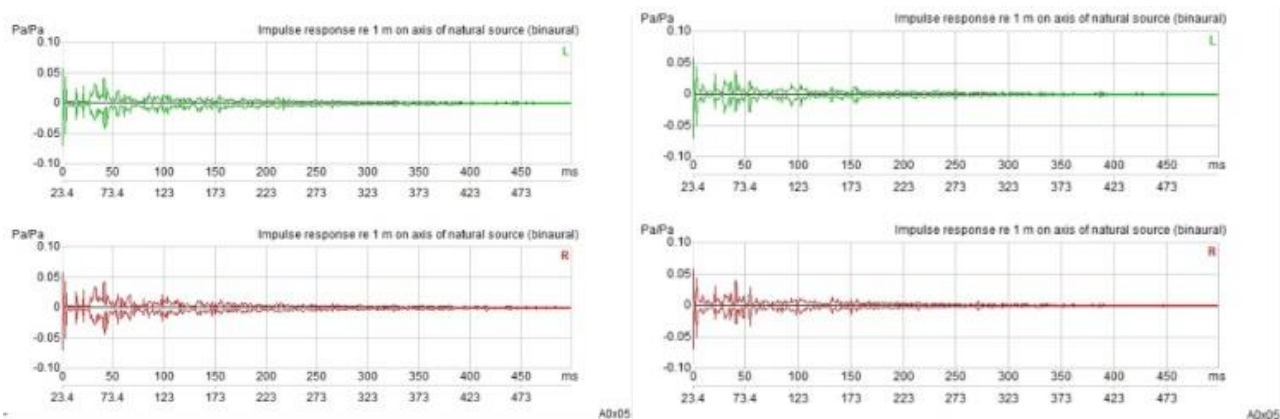
Διάγραμμα 143: (Αριστερά) Κρουστική απόκριση θέσης A5 με KB803, BASWA, κουρτίνες και ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

Διάγραμμα 144: (Δεξιά) Κρουστική απόκριση θέσης A5 με KB803, BASWA, κουρτίνες και ανακλαστήρες, με κοινό.



Διάγραμμα 145: (Αριστερά) Κρουστική απόκριση θέσης A5 με KB803, BASWA, χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

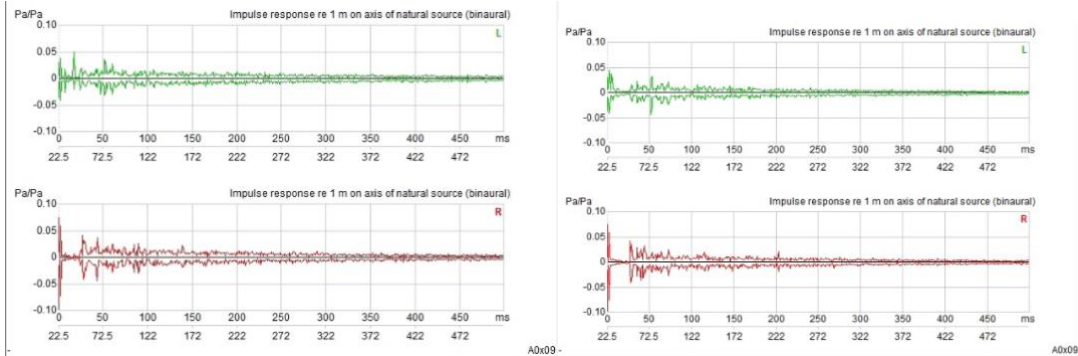
Διάγραμμα 146: (Δεξιά) Κρουστική απόκριση θέσης A5 με KB803, BASWA, χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, με κοινό.



Διάγραμμα 147: (Αριστερά) Κρουστική απόκριση θέσης A5 με KB803, BASWA, κουρτίνες, χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

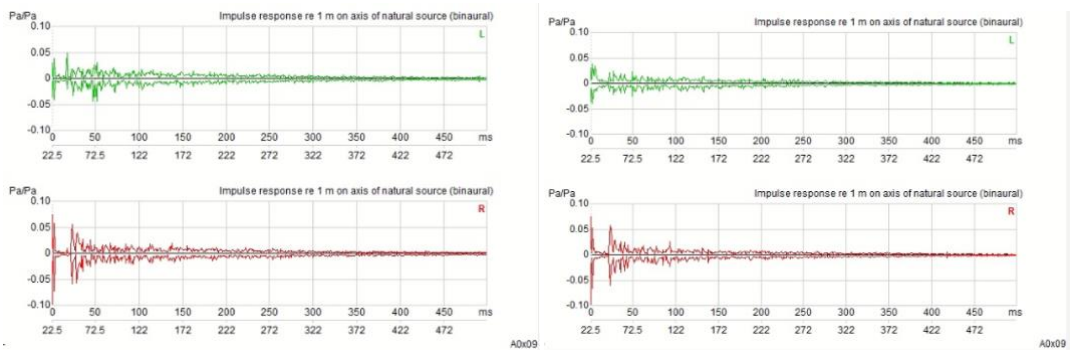
Διάγραμμα 148: (Δεξιά) Κρουστική απόκριση θέσης A5 με KB803, BASWA, κουρτίνες, χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, με κοινό.

8.5.23 Κρουστικές αποκρίσεις θέσης A9



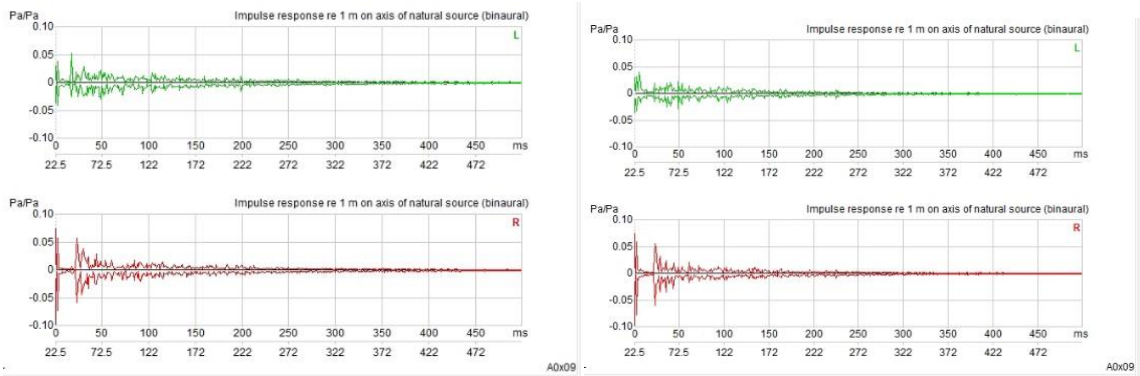
Διάγραμμα 149: (Αριστερά) Κρουστική απόκριση θέσης A9 αρχικής αίθουσας χωρίς κοινό.

Διάγραμμα 150: (Δεξιά) Κρουστική απόκριση θέσης A9 αρχικής αίθουσας με κοινό.



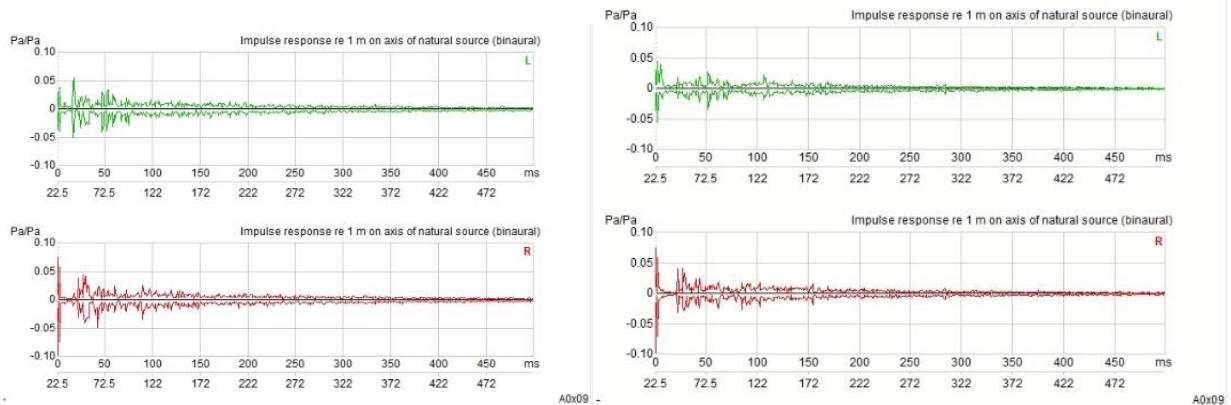
Διάγραμμα 151: (Αριστερά) Κρουστική απόκριση θέσης A9 με KB803, BASWA και ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

Διάγραμμα 152: (Δεξιά) Κρουστική απόκριση θέσης A9 με KB803, BASWA και ανακλαστήρες, με κοινό.



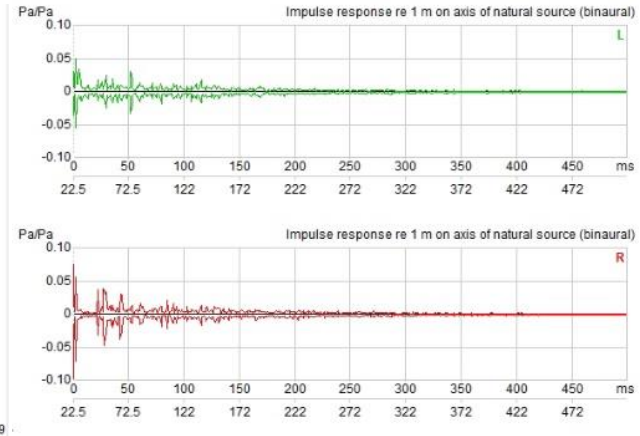
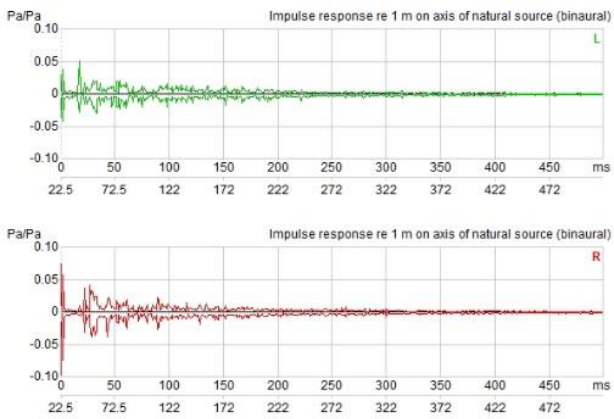
Διάγραμμα 153: (Αριστερά) Κρουστική απόκριση θέσης A9 με KB803, BASWA,κουρτίνες και ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

Διάγραμμα 154: (Δεξιά) Κρουστική απόκριση θέσης A9 με KB803, BASWA, κουρτίνες και ανακλαστήρες, με κοινό.



Διάγραμμα 155: (Αριστερά) Κρουστική απόκριση θέσης A9 με KB803, BASWA, χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

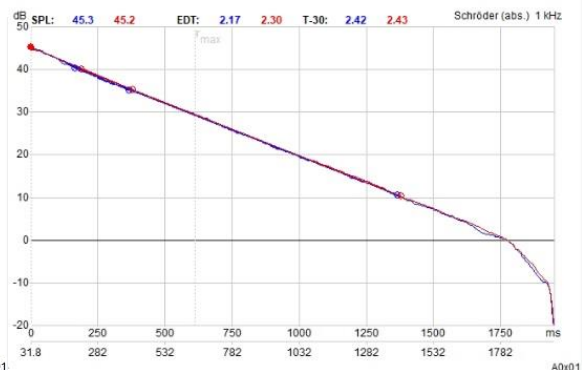
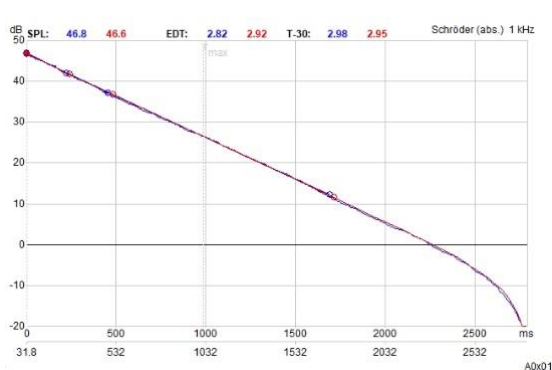
Διάγραμμα 156: (Δεξιά) Κρουστική απόκριση θέσης A9 με KB803, BASWA, χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, με κοινό.



Διάγραμμα 157: (Αριστερά) Κρουστική απόκριση θέσης A9 με KB803, BASWA, κουρτίνες, χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

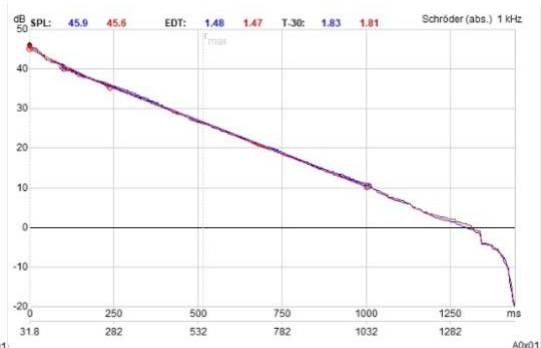
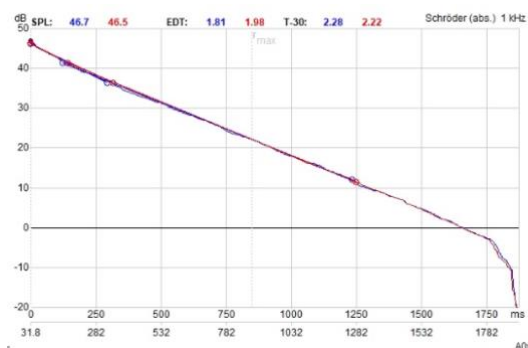
Διάγραμμα 158: (Δεξιά) Κρουστική απόκριση θέσης A9 με KB803, BASWA, κουρτίνες, χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, με κοινό.

8.5.24 Διαγράμματα Schroeder θέση A1



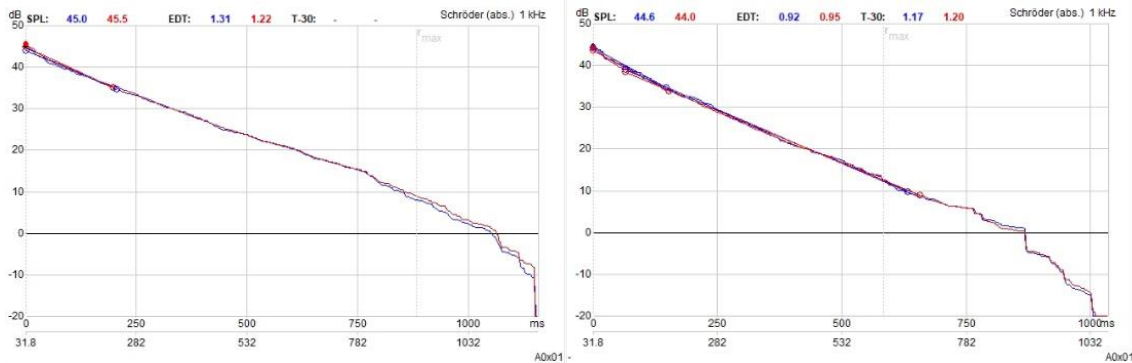
Διάγραμμα 159: (Αριστερά) Καμπύλη Schroeder θέση A1 αρχική αίθουσα χωρίς κοινό.

Διάγραμμα 160: (Δεξιά) Καμπύλη Schroeder θέση A1 αρχική αίθουσα με κοινό.



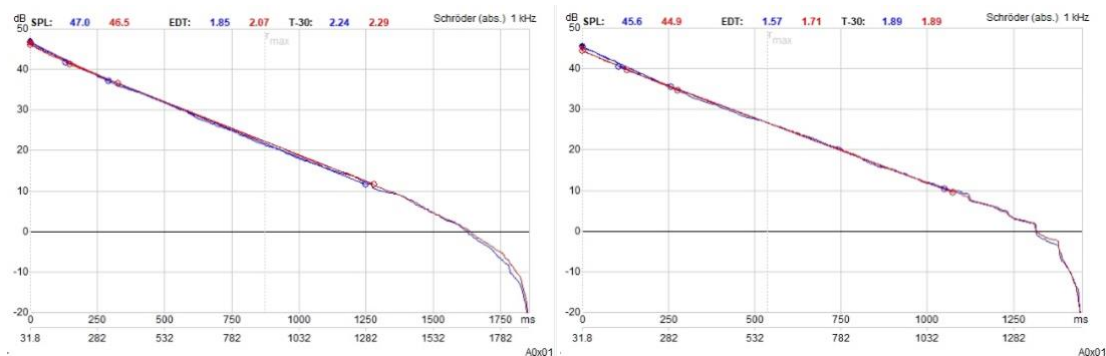
Διάγραμμα 161: (Αριστερά) Καμπύλη Schroeder θέση A1 με KB803, BASWA και ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

Διάγραμμα 162: (Δεξιά) Καμπύλη Schroeder θέση A1 με KB803, BASWA και ανακλαστήρες, με κοινό.



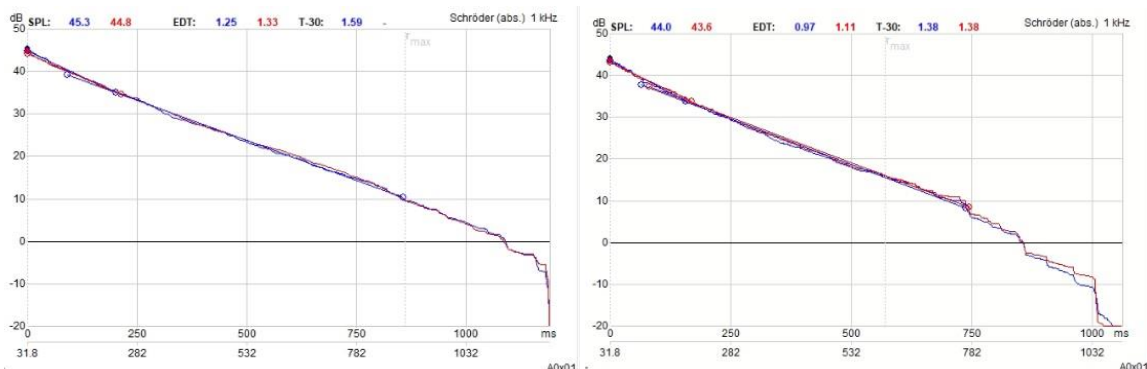
Διάγραμμα 163: (Αριστερά) Καμπύλη Schroeder θέση A1 με KB803, BASWA, κουρτίνες και ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

Διάγραμμα 164: (Δεξιά) Καμπύλη Schroeder θέση A1 με KB803, BASWA, κουρτίνες και ανακλαστήρες, με κοινό.



Διάγραμμα 165: (Αριστερά) Καμπύλη Schroeder θέση A1 με KB803, BASWA χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

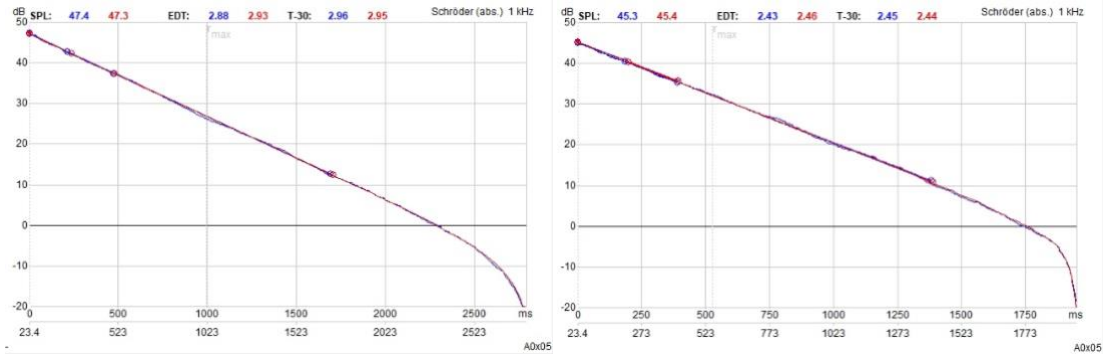
Διάγραμμα 166: (Δεξιά) Καμπύλη Schroeder θέση A1 με KB803, BASWA χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, με κοινό.



Διάγραμμα 167: (Αριστερά) Καμπύλη Schroeder θέση A1 με KB803, BASWA, κουρτίνες, χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

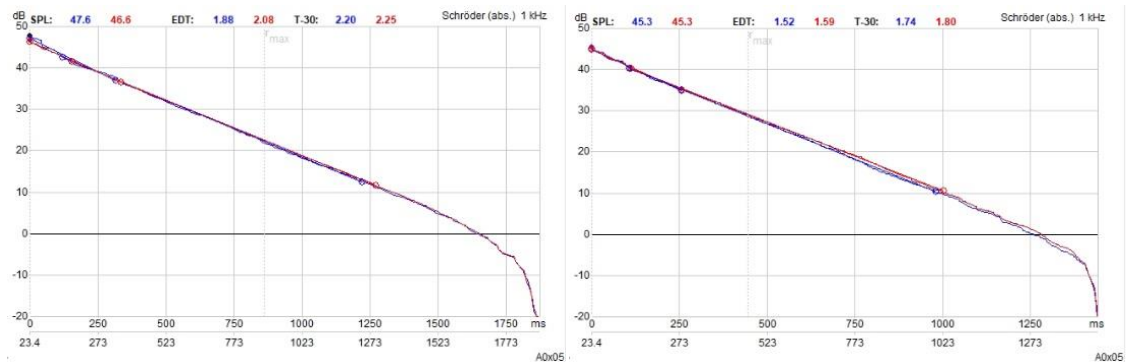
Διάγραμμα 168: (Δεξιά) Καμπύλη Schroeder θέση A1 με KB803, BASWA, κουρτίνες χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, με κοινό.

8.5.25 Διαγράμματα Schroeder θέση A5



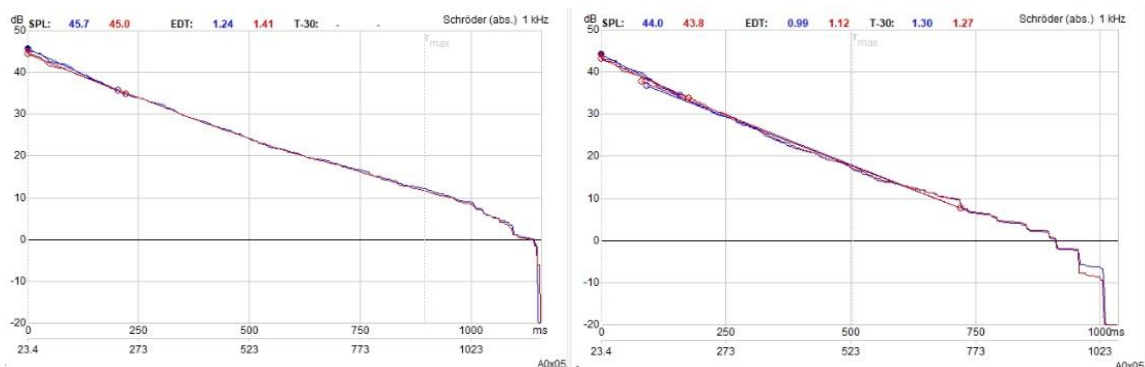
Διάγραμμα 169: (Αριστερά) Καμπύλη Schroeder θέση A5 αρχική αίθουσα χωρίς κοινό.

Διάγραμμα 170: (Δεξιά) Καμπύλη Schroeder θέση A5 αρχική αίθουσα με κοινό.



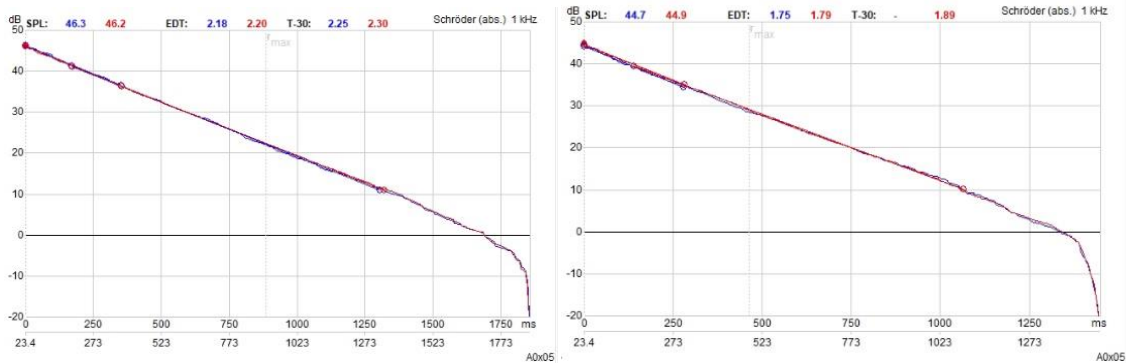
Διάγραμμα 171: (Αριστερά) Καμπύλη Schroeder θέση A5 με KB803, BASWA με ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

Διάγραμμα 172: (Δεξιά) Καμπύλη Schroeder θέση A5 με KB803, BASWA με ανακλαστήρες, με κοινό.



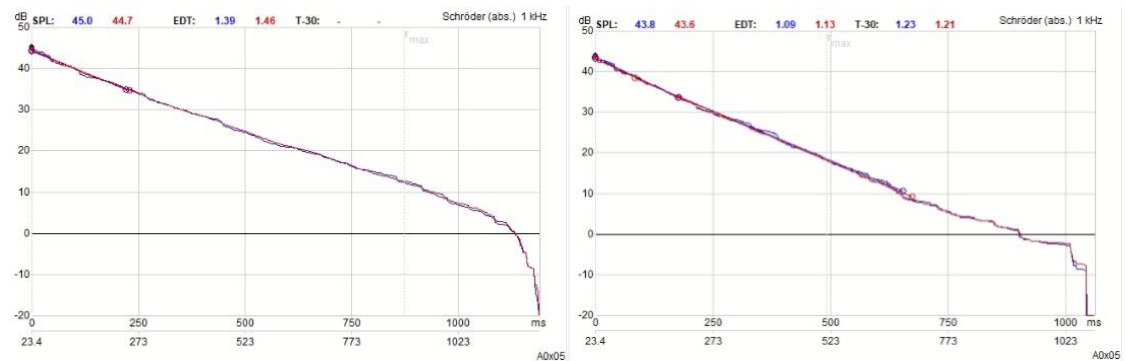
Διάγραμμα 173: (Αριστερά) Καμπύλη Schroeder θέση A5 με KB803, BASWA, κουρτίνες με ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

Διάγραμμα 174: (Δεξιά) Καμπύλη Schroeder θέση A5 με KB803, BASWA, κουρτίνες, με ανακλαστήρες, με κοινό.



Διάγραμμα 175: (Αριστερά) Καμπύλη Schroeder θέση A5 με KB803, BASWA χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

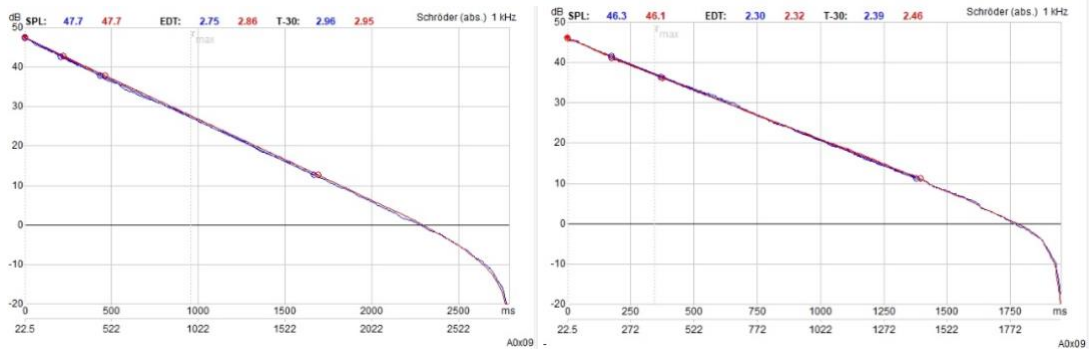
Διάγραμμα 176: (Δεξιά) Καμπύλη Schroeder θέση A5 με KB803, BASWA χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, με κοινό.



Διάγραμμα 177: (Αριστερά) Καμπύλη Schroeder θέση A5 με KB803, BASWA, κουρτίνες, χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

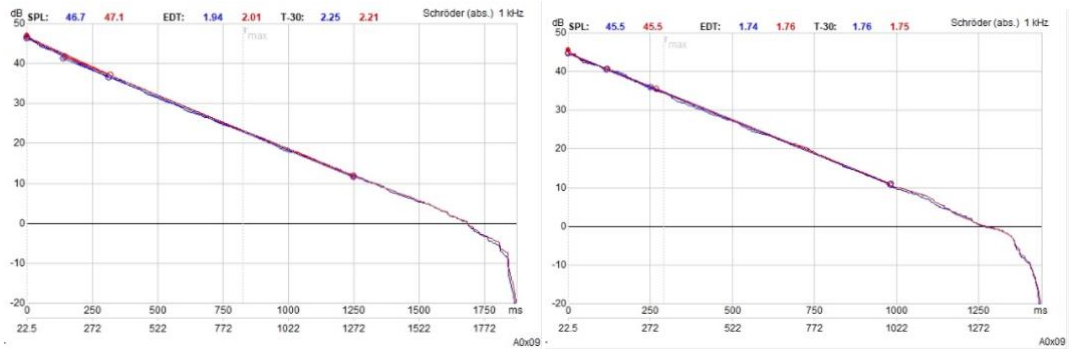
Διάγραμμα 178: (Δεξιά) Καμπύλη Schroeder θέση A5 με KB803, BASWA, κουρτίνες χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, με κοινό.

8.5.26 Διαγράμματα Schroeder θέση A9



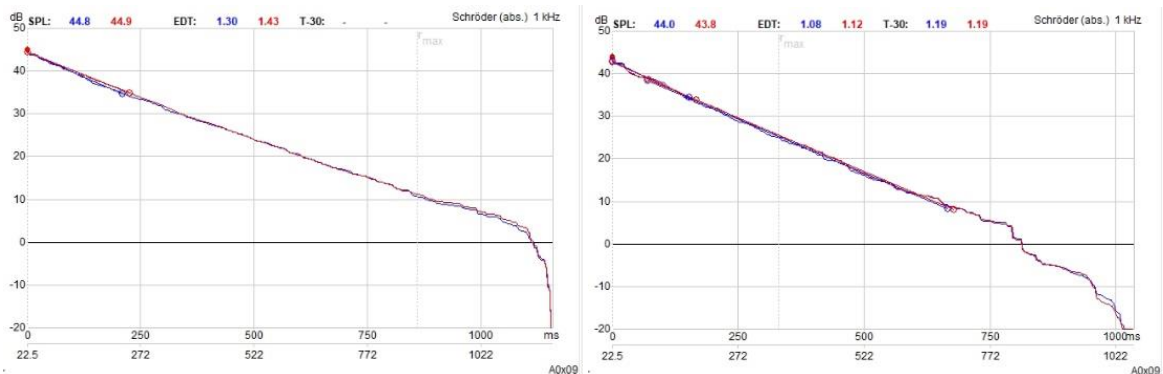
Διάγραμμα 179: (Αριστερά) Καμπύλη Schroeder θέση A9 αρχική αίθουσα χωρίς κοινό.

Διάγραμμα 180: (Δεξιά) Καμπύλη Schroeder θέση A9 αρχική αίθουσα με κοινό.



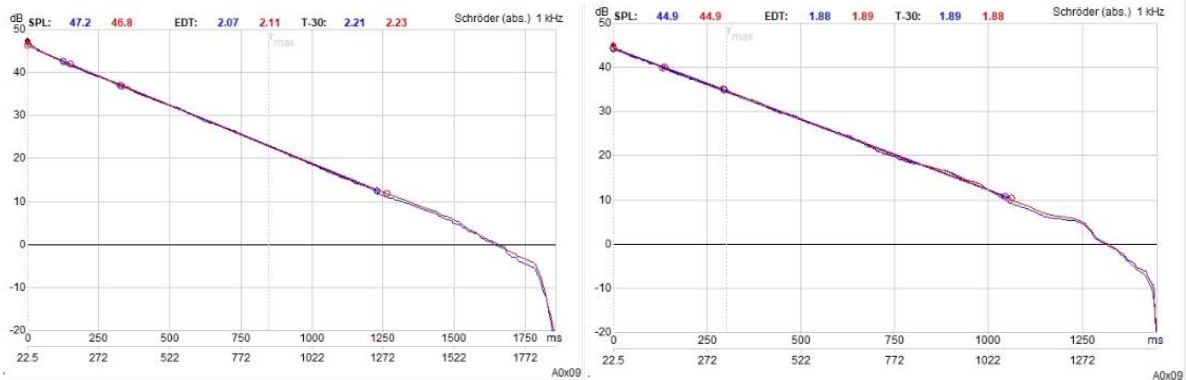
Διάγραμμα 181: (Αριστερά) Καμπύλη Schroeder θέση A9 με KB803, BASWA με ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

Διάγραμμα 182: (Δεξιά) Καμπύλη Schroeder θέση A9 με KB803, BASWA με ανακλαστήρες, με κοινό.



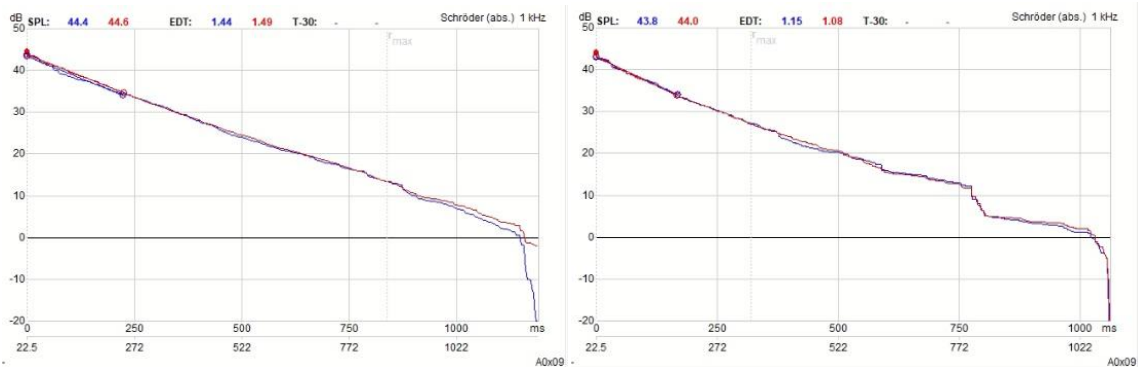
Διάγραμμα 183: (Αριστερά) Καμπύλη Schroeder θέση A9 με KB803, BASWA, κουρτίνες, με ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

Διάγραμμα 184: (Δεξιά) Καμπύλη Schroeder θέση A9 με KB803, BASWA, με ανακλαστήρες, με κοινό.



Διάγραμμα 185: (Αριστερά) Καμπύλη Schroeder θέση A9 με KB803, BASWA, χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

Διάγραμμα 186: (Δεξιά) Καμπύλη Schroeder θέση A9 με KB803, BASWA, χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, με κοινό.



Διάγραμμα 187: (Αριστερά) Καμπύλη Schroeder θέση A9 με KB803, BASWA, κουρτίνες, χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, χωρίς κοινό.

Διάγραμμα 188: (Δεξιά) Καμπύλη Schroeder θέση A9 με KB803, BASWA, κουρτίνες, χωρίς πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, με κοινό.

8.6 Ανάλυση και συμπεράσματα ακουστικής μελέτης

Κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού και τοποθέτησης των ανακλαστήρων και των ηχο-απορροφητικών υλικών στα διάφορα σημεία της αίθουσας έγιναν πολλαπλές δοκιμές και αλλαγές, μέχρι να καταλήξουμε στις τελικές προτάσεις. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι αλλαγές βελτίωναν την ακουστική ποιότητα σε ορισμένα σημεία στο ακροατήριο, σε άλλες πάλι όχι τόσο. Οι τελικές προτάσεις ικανοποιούν τα επιθυμητά αποτελέσματα σε μεγάλο ποσοστό κάνοντας βέβαια τις αναγκαίες υποχωρήσεις.

Όπως είδαμε η ακουστική μελέτη μας επιτρέπει τη μεταβολή δυο βασικών στοιχείων. Αρχικά των κουρτινών με αποτέλεσμα την αύξηση ή μείωση του

χρόνου αντήχησης, από το νέο επιθυμητό μέγιστο που ικανοποιεί τον θεωρητικά υπολογισμένο χρόνο αντήχησης για αίθουσα τέτοιου όγκου (ως αίθουσα μουσικής γενικής χρήσης ή ως αίθουσα πολλαπλών χρήσεων) και αντίστοιχα του υπολογισμένου ελάχιστου, που προτείνεται για χρήση ομιλιών, διαλέξεων, συνεδρίων κ.τ.λ. Το δεύτερο μεταβαλλόμενο στοιχείο αφορά τα δύο ζευγάρια ανακλαστήρων στους πλευρικούς και πίσω από τη σκηνή τοίχους. Το σκεπτικό της αύξησης των πρώτων ανακλάσεων στις θέσεις του κοινού φαίνεται να λειτουργεί θετικά στις περισσότερες περιπτώσεις, σε ορισμένες περιπτώσεις μουσικής όμως ενδέχεται να λειτουργεί περισσότερο από το επιθυμητό, ανεβάζοντας πολλούς δείκτες υψηλότερα από τις προτεινόμενες τιμές. Λόγω γεωμετρίας του χώρου η απολύτως ομοιόμορφη κατανομή των ακουστικών παραμέτρων σε όλες τις θέσεις του ακροατηρίου δεν είναι εύκολα εφικτή. Το μεγάλο πλάτος της αίθουσας μεταβάλλουν τα αποτελέσματα όσο πλησιάζουμε προς το κέντρο των κερκίδων λόγω μέγιστης απόστασης από τους πλευρικούς τοίχους.

Παρατηρώντας τις τιμές όλων των ακουστικών παραμέτρων στην υπάρχουσα κατάσταση της αίθουσας (Διαγράμματα 23-43) για την περίπτωση του ομιλητή, οι τιμές που προέκυψαν από το λογισμικό CATT-Acoustic δεν ικανοποιούσαν σε καμία θέση τις ιδανικές τιμές. Αντίστοιχα για άλλες χρήσεις της αίθουσας, κυρίως αυτές που αφορούν μουσική, οι δείκτες δεν ενδείκνυνται σε καμία περίπτωση με μοναδική εξαίρεση ταύτισης πραγματικών και ιδανικών τιμών να είναι (ή να πλησιάζει) η χρήση της αίθουσας για εκτέλεση προκλασικής μουσικής, μια περίπτωση χρήσης που σπανίζει. Στον αντίποδα, ένα θετικό στοιχείο της ακουστικής της υπάρχουσας αίθουσα όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 11 της κρουστικής της απόκρισης είναι η ομαλότητα στην χρονική της εξέλιξη.

Από τα Διαγράμματα με τους ακουστικούς δείκτες, σχετικά με το χρόνο αντήχησης RT' (Διαγράμματα 69-71) παρατηρούμε πως με τη προσθήκη των βασικών στοιχείων απορρόφησης και χωρίς τους πλευρικούς και πίσω ανακλαστήρες, επιτυγχάνονται οι επιθυμητοί χρόνοι αντήχησης ως αίθουσα μουσικής γενικής χρήσης καθώς και ως αίθουσα πολλαπλών χρήσεων. Η προσθήκη επιπλέον απορρόφησης μέσω των κουρτινών αποκλείεται σε περίπτωση που η εκδήλωση αφορά μουσική, ειδικά σε είδη όπως οργανική μουσική ή μουσική δωματίου. Οι τιμές για άδεια αίθουσα, για τις περιπτώσεις με ανακλαστήρες και χωρίς, πλησιάζουν σε μεγάλο βαθμό. Όσο όμως ανεβαίνει ο αριθμός του κοινού, η περίπτωση με ανακλαστήρες ρίχνει αισθητά τον χρόνο αντήχησης, κάτω από τα επιθυμητά επίπεδα. Αντίθετα στη περίπτωση δίχως τους επιπλέον ανακλαστήρες, οι τιμές του χρόνου αντήχησης εμφανίζουν μεγαλύτερη

σταθερότητα και λιγότερη μείωση στη σύγκριση άδειας και γεμάτης αίθουσας. Η προσθήκη ανακλαστήρων όμως μπορεί να ωφελήσει σημαντικά χρήσεις όπως συγκροτήματα χορού και ροκ, θεατρικές παραστάσεις και συμφωνική ορχήστρα. Στη περίπτωση χωρίς ανακλαστήρες παρατηρούμε επιπλέον μια μεγαλύτερη τάνυση του δείκτη *EDT* (Διαγράμματα 72-74) και του χρόνου αντήχησης (Διαγράμματα 69-71) πράγμα επιθυμητό με βάση τη θεωρία ενώ αντίθετα, στη περίπτωση με ανακλαστήρες οι τιμές του δείκτη *EDT* υπερβαίνουν οριακά αυτές του χρόνου αντήχησης.

Από τα ίδια Διαγράμματα, για την περίπτωση των ομιλιών, η προσθήκη επιπλέον απορρόφησης με το κλείσιμο των κουρτινών μειώνει το χρόνο αντήχησης εντός των επιθυμητών ορίων και προτιμάται ως ρύθμιση της αίθουσας.

Οι δείκτες T_{20} και T_{30} (Διαγράμματα 75-77 και 78-80) και στις δυο περιπτώσεις (προσθήκη ανακλαστήρων και κουρτινών στη περίπτωση ομιλίας και αφαίρεσης τους στη περίπτωση μουσικής) παρατηρούμε πως ταυτίζονται περισσότερο με τον δείκτη αντήχησης στις άνω και κάτω θέσεις των κερκίδων (A1 και A9) για τις επιλεγμένες περιπτώσεις, πράγμα που κρίνεται θετικά καθώς υποδηλώνουν μια ομοιόμορφη κατανομή του αντηχητικού πεδίου. Στις κεντρικές θέσεις των κερκίδων παρατηρείται μια αύξηση των ακουστικών παραμέτρων *EDT*, T_{20} και T_{30} κατά 20% περίπου. Η εξήγηση είναι πως οι θέσεις αυτές ωφελούνται περισσότερο συνολικά από τις πρώτες ανακλάσεις για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από τη παύση της πηγής, μειώνοντας τον χρόνο απόσβεσης του ήχου από 0 dB μέχρι τα -20 dB και -30 dB (για τους δείκτες T_{20} , T_{30} αντίστοιχα), ενώ από εκεί και πέρα, επικρατεί το αντηχητικό πεδίο το οποίο έχει εξασθενήσει σημαντικά λόγω της σημαντικής προσθήκης απορρόφησης.

Τα παραπάνω αποτελέσματα και οι αναφορές στην επίδραση της προσθήκης επιπλέον ανακλαστήρων προϋδεάζουν για τα αποτελέσματα που αφορούν του δείκτες διαύγειας και ευκρίνειας του λόγου και της μουσικής. Όπως φαίνεται στα αντίστοιχα Διαγράμματα για τους δείκτες D_{50} , C_{50} και C_{80} (Διαγράμματα 57-59, 60-62, 63-65) η προσθήκη των επιπλέον ανακλαστήρων επιφέρει σημαντική αύξηση τους σε κάθε θέση ακρόασης.

Συγκρίνοντας με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της αρχικής αίθουσας (Διαγράμματα 12-14, 17, 35-37, 38-40, 41-43), τα οποία εμφάνιζαν αρνητικές (C_{50} και C_{80}) και χαμηλότερες του 50% (D_{50}) σε κάθε συχνοτική ζώνη και σε κάθε θέση ακρόασης, η αύξηση είναι εμφανής και επιθυμητή.

Για την περίπτωση ομιλίας με ανακλαστήρες, ο δείκτης C_{80} πλησιάζει σημαντικά τις ιδανικές τιμές (+4 dB ~ +7 dB). Πιο συγκεκριμένα, για τις πιο

απομακρυσμένες θέσεις (A1) ξεπερνά οριακά το όριο στις περισσότερες συχνότητες ενώ στις κεντρικές και κάτω θέσεις (A5 και A9) βρίσκεται εντός των ορίων στις περισσότερες συχνοτικές ζώνες, με ορισμένες αποκλίσεις να εμφανίζονται ως βυθίσματα στα αντίστοιχα Διαγράμματα με τιμές όμως πάντα άνω των +2 dB και ποτέ κάτω από αυτή. Οι αποκλίσεις στις κεντρικές θέσεις (A5) εμφανίζονται στις ζώνες κυρίως του 1 kHz και λιγότερο των 2 kHz. Αντίστοιχα, στις κάτω θέσεις (A9), οι συχνοτικές ζώνες των οποίων οι τιμές δεν φθάνουν τις προτεινόμενες είναι οι χαμηλές, με τον δείκτη να εξασθενεί σχετικά γραμμικά αρχίζοντας να μειώνεται αισθητά από τη ζώνη των 500 Hz και κάτω. Οι αυξημένες τιμές του δείκτη στις άνω θέσεις των κερκίδων πιθανώς οφείλεται στην προσθήκη του ανακλαστήρα άνωθεν των κερκίδων ο οποίος όπως είδαμε παραπάνω συμβάλλει θετικά με την αύξηση των πρώτων ανακλάσεων στις πάνω θέσεις των κερκίδων. Οι διαστάσεις τους επιλέχθηκαν με τρόπο ώστε να μην συμπεριφέρονται το ίδιο από τη μέση και κάτω για την αποφυγή ανεπιθύμητων "ειδώλων" της πηγής.

Αντίστοιχα, οι τιμές του δείκτη C_{50} για την περίπτωση της ομιλίας με χρήση ανακλαστήρων είναι θετικές σε κάθε συχνοτική ζώνη, σε κάθε θέση των ακροατών πράγμα που ικανοποιεί τις ιδανικές τιμές, σε αντίθεση με την αρχική κατάσταση της αίθουσας που εμφάνιζε αρνητικές τιμές σε κάθε περίπτωση, ακόμη και με την αναπαραγωγή σήματος υψηλότερης στάθμης από ηχείο, πόσο μάλλον για ομιλητή δίχως ενίσχυση.

Τέλος, ο δείκτης D_{50} επωφελείται έντονα από τη προσθήκη ανακλαστήρων με τις τιμές να βρίσκονται σαφώς εντός των επιθυμητών ορίων μεταξύ 50%~70%, σε αντίθεση με την υπάρχουσα κατάσταση της αίθουσας που κυμαίνεται γύρω στο 30% για την περίπτωση του ομιλητή, ακόμη και σε σύγκριση με χρήση ηχείου η οποία αυξάνει σε γενικές γραμμές τον δείκτη, χωρίς όμως να φτάνει τα επιθυμητά επίπεδα, ειδικά στις ζώνες χαμηλότερες του 1 kHz.

Συγκρίνοντας τις τιμές για τις δυο περιπτώσεις ομιλίας, με και χωρίς ανακλαστήρες (με κλειστές κουρτίνες), παρατηρούμε πως σε γενικές γραμμές και η περίπτωση χωρίς ανακλαστήρες πλησιάζει τις ιδανικές τιμές, εμφανίζοντας όμως μεγαλύτερες αποκλίσεις και γενικά χαμηλότερες τιμές. Η χρήση των επιπλέον ανακλαστήρων κρίνεται θετική και προτείνεται για περιπτώσεις ομιλιών.

Προχωρώντας στον δείκτη TS (Διαγράμματα 66-68), τα αποτελέσματα κρίνονται ιδιαίτερος θετικά και στη περίπτωση μουσικής (ανοιχτές κουρτίνες, δίχως ανακλαστήρες) και στη περίπτωση ομιλίας (κλειστές κουρτίνες και χρήση των επιπλέον ανακλαστήρων). Οι τιμές στη πρώτη περίπτωση κυμαίνονται μεταξύ 100 ms~140 ms με πτώση στις υψηλές συχνότητες, τιμές που συνάδουν με τις

προτεινόμενες τιμές των $70\text{ ms} \sim 150\text{ ms}$, εμφανίζοντας σχετικά χαμηλή διακύμανση ανά θέση ακροατή. Στη δεύτερη περίπτωση οι τιμές του δείκτη TS κυμαίνονται μεταξύ $60\text{ ms} \sim 80\text{ ms}$ με γεμάτη αίθουσα, τιμές πανομοιότυπες με αυτές των επιθυμητών ορίων. Στη περίπτωση της μουσικής οι τιμές του δείκτη βρίσκονται εντός ορίων τόσο στη περίπτωση άδειας από κοινό αίθουσας όσο και σε γεμάτη, πράγμα επιθυμητό και θετικό σε κάθε περίπτωση. Στη περίπτωση όμως ομιλίας σε άδεια αίθουσα οι διακυμάνσεις του δείκτη είναι μεγαλύτερες, ειδικά στις χαμηλές συχνοτικές ζώνες όπου ξεπερνιούνται τα όρια. Η πιθανότητα ομιλίας όμως σε άδεια αίθουσα δεν είναι μεγάλη οπότε η ακουστική μελέτη θεωρείται πως θα ικανοποιεί τις ιδανικές τιμές στην πλειοψηφία των εκδηλώσεων ομιλιών.

Από τον υπολογισμό του λόγου EDT/RT' (Πίνακας 28) προκύπτει πως για τη περίπτωση της μουσικής χωρίς ανακλαστήρες, οι μέσες τιμές 1,11 και 1,13 για άδεια και γεμάτη αίθουσα αντίστοιχα, είναι μικρότερες από τις ιδανικές τιμές που ορίζονται ως "κοντά στο 1,25" που εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφική αναζήτηση. Η τιμή αυτή προτείνεται για χρόνους αντήχησης μεταξύ $1,8 \sim 2,0\text{ sec.}$, ενώ στη περίπτωση μας ο χρόνος αντήχησης είναι ελαφρώς μικρότερος. Ο αντίστοιχος μέσος όρος για ομιλίες υπολογίστηκε 1,07 για άδεια αίθουσα και 1,10 για γεμάτη τιμές σαφώς μεγαλύτερες από τις ιδανικές που τοποθετούνται μεταξύ $0,8 \cdot RT$ και RT . Σε αντίθεση με τα ως τώρα θετικά αποτελέσματα, το κριτήριο αυτό δεν καλύπτεται ικανοποιητικά από την παρούσα ακουστική μελέτη. Περαιτέρω μελέτη και δοκιμές απαιτούνται γύρω από τον έλεγχο του λόγου EDT/RT' με την περίπτωση της μουσικής να πρέπει να είναι σαφώς μεγαλύτερη από αυτή της ομιλίας, πράγμα δύσκολο σε μια αίθουσα που προσπαθεί να ικανοποιήσει πολλές διαφορετικές περιπτώσεις.

Οι μέσες τιμές του δείκτη BR για μουσική χωρίς ανακλαστήρες είναι 0,88 και 0,93 για αίθουσα άδεια και γεμάτη αντίστοιχα, χαμηλότερες από τις ιδανικές που κυμαίνονται μεταξύ $1,10 \sim 1,25$. Σημαντικό ρόλο στα αποτελέσματα αυτά φαίνεται να προκαλεί ο ελλειμματικός σχεδιασμός της αρχικής αίθουσας στη ζώνη των 125 Hz όπως προαναφέρθηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Οι τελικές τιμές απορρόφησης που επιλέχθηκαν, παρότι παρείχαν πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα στις υπολογισμένες από το λογισμικό τιμές σε σχέση με αυτές που μετρήσαμε, στις περισσότερες συχνοτικές ζώνες, ήταν χαμηλότερες στη ζώνη των 125 Hz . Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την σχετικά χαμηλή απορροφητικότητα των υλικών που επιλέχθηκαν στη ζώνη αυτή, υποδηλώνει πως σε περίπτωση πραγματοποίησης της παρούσας ακουστικής μελέτης, ο δείκτης BR αναμένεται να δώσει τιμές μεγαλύτερες από αυτές που υπολογίστηκαν πλησιάζοντας τις ιδανικές.

Ο δείκτης *STI* (Διαγράμματα 90-92) στη περίπτωση ομιλιών με ανακλαστικές εμφανίζει ομοιομορφία και σταθερότητα, σε κάθε θέση ακρόασης, με τιμές λίγο πάνω από 60 %, τιμές που με βάση τη θεωρία προσδίδουν μια "καλή" ακουστική καταληπτότητα του λόγου, σύμφωνα με τον Πίνακα 2. Αντίθετα, ο δείκτης απώλειας συμφώνων $\%AL_{cons}$ φαίνεται πως ελαττώνεται ελαφρώς όσο μεγαλώνει η προσθήκη απορρόφησης στην αίθουσα, με τη τιμή του σε κάθε θέση να ξεπερνά το 0,45. Η επιπλέον απορρόφηση φαίνεται πως επιδρά αρνητικά εδώ χωρίς όμως οι τελικές προτάσεις της ακουστικής μελέτης να κατατάσσουν την αίθουσα σε απαγορευτικές τιμές του συγκεκριμένου δείκτη. Παρατηρείται η επίτευξη της ομοιόμορφης κατανομής του δείκτη σε όλο το ακροατήριο.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί η εξάρτηση της τοποθέτησης της πηγής κατά τις προσομοιώσεις. Υπάρχουν περιπτώσεις που η πηγή θα τοποθετηθεί πιο κοντά στις κερκίδες. Σε αυτή τη περίπτωση, η μείωση της απόσταση πηγής και ακροατών, αυξάνει τον απευθείας ήχο που καταφθάνει στους ακροατές από τη πηγή, βελτιώνοντας τους παραπάνω δείκτες. Και οι δύο δείκτες δύναται να αυξηθούν αισθητά με τη χρήση ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης.

Ο δείκτης *G* (Διαγράμματα 87-89) στη περίπτωση της μουσικής χωρίς ανακλαστικές κυμαίνεται μεταξύ 10 ~ 12 dB. Οι τιμές βρίσκονται εντός των ορίων για αίθουσες μουσικής δωματίου με χωρητικότητα λιγότερο από 700 άτομα (9 – 13 dB). Στις μετρήσεις σε αντίστοιχους χώρους που προορίζονται για μουσική δωματίου και παρουσιάστηκαν στο θεωρητικό μέρος, παρατηρούμε μια αισθητή διακύμανση στις τιμές του μέσου δείκτη από 9,9 στις Ιαπωνικές μέχρι 12,4 στις Ευρωπαϊκές. Η περίπτωση μας ικανοποιεί σε γενικές γραμμές και τις τιμές αυτές. Επίσης ικανοποιεί τη συνθήκη για ομιλία που απαιτούν τον δείκτη να είναι θετικός αριθμός, ιδανικά πάνω από 3 dB. Στη περίπτωση της μουσικής γενικής χρήσης οι τιμές του δείκτη εμφανίζονται αυξημένες καθώς σύμφωνα με τις μετρήσεις σε αντίστοιχους χώρους οι τιμές να κυμαίνονται από 2 dB έως 9 dB. Ομοίως με πριν, η αναμενόμενη μείωση της απορρόφησης στις χαμηλές συχνότητες αναμένεται να αυξήσει ελαφρώς τις τιμές του δείκτη *G* στις συχνότητες αυτές.

Οι τιμές πλευρικών ανακλάσεων LF ή $J - LF$ (Διαγράμματα 81-83, 84-86) για μουσική, στις περισσότερες ζώνες συχνοτήτων βρίσκονται εντός του ορίου 0,1~0,35 με εξαίρεση της κεντρικές θέσεις για τις ζώνες κάτω του 1 kHz. Αντίθετα από άλλους δείκτες, δεν εμφανίζεται μεγάλη ομοιομορφία σε όλες τις θέσεις. Στη θέση A5 οι τιμές του δείκτη είναι εμφανώς μειωμένες πράγμα αναμενόμενο καθώς, λόγω μεγάλου πλάτους, οι θέσεις στο κέντρο των κερκίδων απέχουν τη μέγιστη

απόσταση από αυτούς. Η μοναδική επιλογή για την ενίσχυση τους ήταν η προσθήκη ανακλαστήρα πάνω από τη σκηνή πράγμα που δεν ήταν αρκετό για την πρόκληση ομοιομορφίας σε όλες τις θέσεις. Στη περίπτωση ομιλίας με ανακλαστήρες ο δείκτης παρουσιάζει επίσης έντονες διακυμάνσεις. Λόγω μεγάλου πλάτους, οι ακριανές θέσεις του κάθε επιπέδου αναμένεται να έχουν σχετικά καλύτερες τιμές, λόγω κοντινής γειτνίασης με τους πλευρικούς τοίχους. Παρατηρούμε πως, στις άνω θέσεις αυξάνει έντονα, στις κεντρικές εμφανίζεται μειωμένος και μόνο στις χαμηλές βρίσκεται στα επιθυμητά επίπεδα του 25%. Οι ενδιάμεσες θέσεις αναμένεται να εμφανίζουν και τιμές ενδιάμεσες στα υψηλά και χαμηλά όρια που προαναφέρθηκαν. Οι υπερβολικά αυξημένες τιμές στην άνω θέση (A9) αναμένεται να μειωθεί ελαφρώς στο κέντρο της σειράς ενώ η χαμηλή τιμή στο κεντρικό σημείο (A5) αναμένεται να αυξηθεί όσο απομακρυνόμαστε από το κέντρο προς τις πλαϊνές θέσεις του ίδιου επιπέδου. Καλύτερος έλεγχος των πλευρικών ανακλάσεων θα μπορούσε να προκύψει από μετακινούμενους ανακλαστήρες οι οποίοι θα τοποθετούνται σε σημεία μεταξύ πηγής και κοινού, σε όσον το δυνατόν μεγαλύτερες αποστάσεις από τους πλευρικούς τοίχους, με αντίστοιχη κλίση προς τις κερκίδες.

Παρατηρώντας τις Κρουστικές Αποκρίσεις (Διαγράμματα 129-158) παρατηρούμε πως, σε κάθε περίπτωση, έχει αυξηθεί η αναλογία των πρώτων ανακλάσεων ως προς τις καθυστερημένες, πράγμα αναμενόμενο από την προσθήκη ανακλαστήρων σε συνδυασμό με τα ηχο-απορροφητικά υλικά. Η ανάλυση των μέχρι τώρα αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων συνηγορεί στη τελευταία διατύπωση.

Από τα ηχογράμματα (Διαγράμματα 99-128), σε πολλές περιπτώσεις και θέσεις, παρατηρούμε έντονες καθυστερημένες ανακλάσεις σε χρόνους που πλησιάζουν την ολική απόσβεση του ήχου. Για τις 2 περιπτώσεις που εστίασαμε, μουσική με ανοιχτές κουρτίνες χωρίς ανακλαστήρες και ομιλία με κλειστές κουρτίνες και ανακλαστήρες, το φαινόμενο αυτό περιορίζεται σε έναν βαθμό με εξαίρεση τη μεσαία θέση A5 στη περίπτωση της ομιλίας με ανακλαστήρες. Οι κορυφές αυτές υποδηλώνουν τη πιθανότητα ανεπιθύμητου *Flutter echo*. Εδώ πρέπει να τονιστεί πως κατά το σχεδιασμό της αρχικής αίθουσας, ο ορισμός του ακριβούς συντελεστή διάχυσης κάθε επιφάνειας δεν ήταν δυνατός λόγω έλλειψης στοιχείων από τη βιβλιογραφία, με εξαίρεση την οροφή, τη σιδηροκατασκευή και το κοινό, όπως προαναφέρθηκε στο σχετικό κεφάλαιο. Στη πράξη η διάχυση του ήχου στο χώρο αναμένεται να είναι μεγαλύτερη, πράγμα που συμβάλει στην εξάλειψη τέτοιων φαινομένων. Σε κάθε περίπτωση, σε όλες τις επιφάνειες πλην αυτών που προκαλούν τις ωφέλιμες πρώτες ανακλάσεις, η προσθήκη διαχυτικών

επιφανειών συμβάλει θετικά στη δημιουργία ενός ομοιόμορφου διάχυτου/αντηχητικού πεδίου και προτείνεται. Τίθεται λοιπόν ζήτημα περαιτέρω εμβάθυνσης και μελέτης της προέλευσης των καθυστερημένων αυτών ανακλάσεων με πιθανές λύσεις είτε τη προσθήκη διαχυτικών επιφανειών στα σημεία προέλευσης αυτών, είτε τη μεταφορά ορισμένων εκ των προτεινόμενων απορροφητικών διατάξεων στα αντίστοιχα σημεία. Η προσθήκη επιπλέον απορροφητικών διατάξεων θα μειώσει αισθητά το χρόνο αντήχησης της αίθουσας σε χαμηλότερα από το επιθυμητό επίπεδα και για το λόγο αυτό δεν προτείνεται.

9.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

Μέσω της μελέτης ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης υπολογίζονται το απαιτούμενο κέρδος, η απαιτούμενη ισχύς, ο λόγος απευθείας πεδίου προς αντηχητικό, το ποσοστό απώλειας συμφώνων, η στάθμη ηχητικής πίεσης σε συγκεκριμένα σημεία της αίθουσας, για ομιλητή και για τη προσθήκη ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης, καθώς και η ευστάθεια του συστήματος ενίσχυσης σχετικά με την πιθανότητα εμφάνισης φαινομένων ανάδρασης. Παρόλο που προβαίνουμε στους υπολογισμών πολλών εξ' αυτών και μέσω του λογισμικού CATT-Acoustic, ο υπολογισμός τους και σε θεωρητικό επίπεδο μπορεί να μας δώσει μια καλύτερη εικόνα της ποιότητας της ακουστικής ακρόασης εντός της αίθουσας, εντοπίζοντας τα βασικά χαρακτηριστικά στα οποία πρέπει να εστιάσει ο μηχανικός σχεδίασης, που αποκτά μεγαλύτερη οικειότητα στον συγκεκριμένο τομέα, μειώνοντας το χρόνο υλοποίησης του σχεδιασμού στο λογισμικό και εντοπίζοντας πιο άμεσα τις παραμέτρους που θα καθορίσουν την αποτελεσματικότητα των επιλογών του. Τα βασικά σημεία που καλείται να καλύψει ένας καλός σχεδιασμός ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης είναι τα εξής:

- Επαρκής στάθμη ηχητικής πίεσης σε κάθε σημείο ακρόασης.
- Ισοκατανομή και ομοιομορφία στις στάθμες ηχητικής πίεσης στο χώρο, ιδανικά με διαφορές μικρότερες των 6 dB.
- Ικανοποιητικούς δείκτες διαύγειας, ευκρίνειας και καταληπτότητας σε κάθε σημείο ακρόασης.
- Ελαχιστοποίηση ή μηδενισμός της πιθανότητας εμφάνισης φαινομένων ανάδρασης.

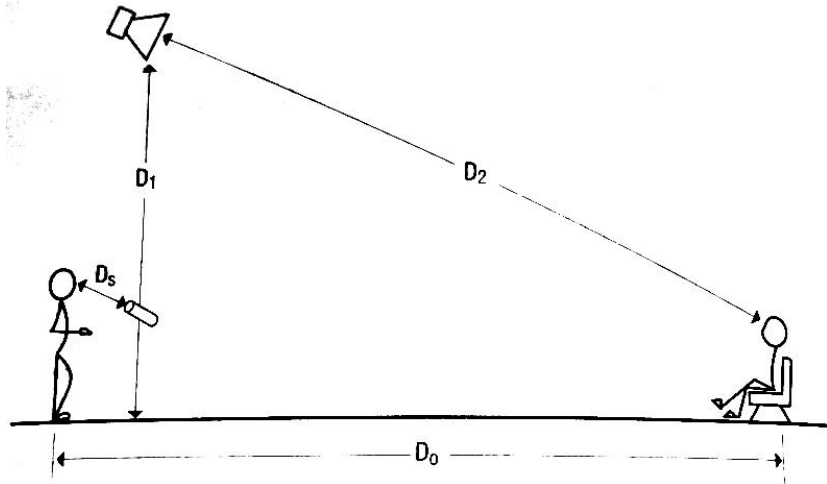
Η προσέγγιση του θέματος ακολουθεί τα βήματα που παρουσιάζονται στο [5] και στο [69].

9.1.1 Ορισμός βασικών αποστάσεων μελέτης

Ξεκινάμε με τον ορισμό των βασικών αποστάσεων προς μελέτη (Εικόνα 99):

- D_s , η απόσταση πηγής από το μικρόφωνο.
- D_0 , η απόσταση πηγής από τον πιο απομακρυσμένο ακροατή.
- D_1 , η απόσταση ηχείου από το μικρόφωνο.

- D_2 , η απόσταση (εγγύτερου) ηχείου από τον πίο απομακρυσμένο ομιλητή.



Εικόνα 99: Αποστάσεις D_0 , D_1 , D_2 , D_s [5].

9.1.2 Λόγος ωφέλιμου σήματος προς θόρυβο

Κάθε χώρος, ανοιχτός ή κλειστός χαρακτηρίζεται από έναν θόρυβο βάθους. Η διαφορά στάθμης του ωφέλιμου ακουστικού σήματος σε κάθε σημείο ακρόασης, ως προς τον θόρυβο βάθους ιδανικά πρέπει να ξεπερνά τα 25 dB. Σε αυτή τη περίπτωση εξασφαλίζεται πως δεν θα επηρεάζεται σημαντικά η καταληπτότητα και η κατανόηση του ωφέλιμου ήχου. Ο λόγος αυτός ονομάζεται $\frac{S}{N}$ (Signal to Noise ratio, SNR) και όπως είπαμε εκφράζεται σε dB. Η απαιτούμενη στάθμη ηχητικής πίεσης σε κάθε σημείο του χώρου πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση $L_{Pd} \geq L_{Noise} + 25 \text{ dB}$.

9.1.3 Ισοδύναμη ακουστική απόσταση (EAD)

Η ισοδύναμη ακουστική απόσταση περιγράφει την μέγιστη απόσταση γύρω από τη πηγή για την οποία η καταληπτότητα του λόγου αναμένεται να είναι στα επιθυμητά επίπεδα με βάση τη σύγκριση του απευθείας από τη πηγή ωφέλιμου ήχου και του θορύβου βάθους. Υπολογίζεται από τον τύπο:

$$EAD = D_{ref} \cdot 10^{\frac{L_{Pt} - L_{Pd}}{20}}, \quad (56)$$

όπου L_{Pt} η παραγόμενη από τον ομιλητή στάθμη σε απόσταση αναφοράς D_{ref} και L_{Pd} η επιθυμητή στάθμη που όπως είπαμε συνήθως ορίζεται ως $L_{NOISE} + 25 \text{ dB}$.

9.1.4 Κατευθυντικότητα και αριθμός μικροφώνων και ηχείων

Στη πράξη, οι βασικές συσκευές ενός ηλεκτροακουστικού συστήματος (ηχεία και μικρόφωνα) εμφανίζουν συγκεκριμένες κατευθυντικότητες οι οποίες όμως εντοπίζονται κυρίως από ορισμένες συχνότητες και πάνω. Γίνεται κατανοητό πως λόγω κατευθυντικότητας τα φαινόμενα ανάδρασης δύναται να περιοριστούν. Λόγω όμως του ότι η κατευθυντικότητα μειώνεται όσο μειώνεται η συχνότητα, ειδικά στις χαμηλές συχνότητες το επιπλέον ακουστικό κέρδος περιορίζεται κατά 1~2 dB [5].

Στην πράξη, στις περισσότερες εφαρμογές, χρησιμοποιούνται πέραν του ενός ηχείου και ενός μικροφώνου. Για το λόγο αυτό, παρόλη την κατευθυντικότητα που θα εμφανίζουν τα παραπάνω, οι πολλαπλές και πολύπλοκες διαδρομές των σημάτων προερχόμενων από τις πηγές, τα ηχεία και τις ανακλάσεις, δεν επιτρέπουν την μείωση των ανωτέρων ορίων καλής λειτουργίας της εγκατάστασης που θέσαμε.

Στους παρακάτω τύπους η κατευθυντικότητα των ηχείων υπολογίζεται μέσω του παράγοντα κατευθυντικότητας μεγάφωνου που συμβολίζεται με Q και προσεγγίζεται από τον τύπο (ισχύει με καλή ακρίβεια στις χοάνες, αλλά χρησιμοποιείται κατά προσέγγιση και σε άλλα ηχεία):

$$Q = \frac{180^\circ}{\sin^{-1} \cdot \left(\sin \frac{\varphi}{2} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \right)}, \quad (57)$$

όπου φ, θ οι ονομαστικές γωνίες (σε μοίρες) της οριζόντιας και κατακόρυφης κάλυψης του ηχείου.

9.1.5 Ακουστικοί δείκτες ηλεκτροακουστικής μελέτης

Οι ακουστικές παράμετροι ενός κλειστού χώρου που λαμβάνονται υπόψη σε μια μελέτη ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης είναι οι εξής:

- Χρόνος αντήχησης RT_{60} (ομοίως με ακουστική μελέτη).
- Σταθερά δωματίου R (ομοίως με ακουστική μελέτη).
- Κρίσιμη απόσταση D_C , υπολογίζεται από τον τύπο:

$$D_C = 0,141 \cdot \sqrt{\frac{Q \cdot R}{(n + 1)}}. \quad (58)$$

9.1.6 Ευαισθησία μεγάφωνου και απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς

Κάθε ηχείο χαρακτηρίζεται από μια ονομαστική ευαισθησία (Sensitivity) που συμβολίζεται ως L_{sens} που εκφράζει σε dB_{SPL} την στάθμη ηχητικής πίεσης που παράγει σε συγκεκριμένη απόσταση (1 m) για συγκεκριμένη ηλεκτρική ισχύ εισόδου (1 Watt). Συνήθως αναγράφεται στα χαρακτηριστικά του ηχείου στο αντίστοιχο εγχειρίδιο χρήσης ως $dB_{SPL}/W/m$. Για τον υπολογισμό της απαιτούμενης ηλεκτρικής ισχύος για τη παραγωγή συγκεκριμένης στάθμης ηχητικής πίεσης σε συγκεκριμένο σημείο ακρόασης, σε ανοιχτό χώρο, χρησιμοποιείται ο μαθηματικός τύπος:

$$ERP = 10^C, \quad (59)$$

όπου

$$C = \frac{(L_P + H - L_{sens} + 20 \cdot \log_{10} D_2)}{10}. \quad (60)$$

Στην περίπτωση κλειστού χώρου ο εκθέτης C υπολογίζεται από τον τύπο:

$$C = L_P + H - L_{sens} - 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{Q}{4\pi \cdot D_2^2} + \frac{4}{R} \right) + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{Q}{4 \cdot \pi} + \frac{4}{R} \right), \quad (61)$$

όπου H το περιθώριο κέρδους (headroom) που επιτρέπουμε στο σύστημα για την αποφυγή παραμόρφωσης λόγω crest factor του αναπαραγόμενου ήχου, δεδομένου ότι όλοι οι υπολογισμοί γίνονται για RMS τιμές. Δίχως το συντελεστή H το σύστημα ο ήχος είναι πολύ πιθανό να παραμορφωθεί ακόμη και από ψαλιδισμό. Μια συνηθισμένη τιμή του συντελεστή είναι τα -6 dB ή τα -12 dB σε περιπτώσεις ομιλίας.

Σε περιπτώσεις ανοικτών χώρων, όπως προαναφέρθηκε, η μείωση του ήχου είναι -6 dB ανά διπλασιασμό της απόστασης.

9.1.7 Δυνητικό ακουστικό κέρδος (Potential Acoustical Gain) - PAG

Η αναπαραγωγή μέσω ηχείου σήματος προερχόμενου από μικρόφωνο στον ίδιο χώρο, μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητη ανάδραση. Η πιθανότητα ανάδρασης καθορίζεται από τις σχέσεις φάσης, και πλάτους μεταξύ των σημάτων προερχόμενων από τη πηγή προς το μικρόφωνο και από το ηχείο προς το μικρόφωνο.

Ως δυνητικό ακουστικό κέρδος (PAG) ή μέγιστο θεωρητικό κέρδος, ορίζεται η διαφορά στάθμης στο πιο απομακρυσμένο σημείο ακρόασης όταν το

ηλεκτροακουστικό σύστημα βρίσκεται εντός και εκτός λειτουργίας. Η στάθμη όταν το σύστημα είναι εντός λειτουργίας θα πρέπει να ορίζεται ως το μέγιστο όριο πριν εμφανιστεί το φαινόμενο της ανάδρασης. Όσο περισσότερα μικρόφωνα βρίσκονται ανοιχτά στο χώρο τόσο μεγαλώνει η πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου. Σε ανοιχτό χώρο το PAG υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$$PAG = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{D_0 \cdot D_1}{D_{s*} \cdot D_2} \right) - 10 \cdot \log_{10} N_M - 6, \quad (62)$$

όπου N_M ο αριθμός των ανοικτών μικροφώνων. Ο επιπλέον συντελεστής κέρδους -6 dB ονομάζεται και FSM (feedback stability margin).

Στην παραπάνω σχέση δύναται να συμπεριληφθεί η κατευθυντικότητα των ηχείων και των μικροφώνων με τους όρους L_{LSpol} και L_{Mpol} αντίστοιχα, οι οποίοι θα αυξήσουν το δυνητικό ακουστικό κέρδος. Η ακτινοβολία του ηχείου προς τη κατεύθυνση του μικροφώνου θα είναι μειωμένη κατά μια στάθμη L_{LSpol} , σύμφωνα με την πολική απόκριση του ηχείου ενώ αντίστοιχα η ευαισθησία του μικροφώνου προς την κατεύθυνση του ηχείου θα είναι μειωμένη κατά μια στάθμη L_{Mpol} για τον ίδιο λόγο.

Στην περίπτωση μας και λόγω του ότι η σκηνή καταλαμβάνει μεγάλο εμβαδόν με πληθώρα πιθανών θέσεων και τύπων μικροφώνων (χειρός, κεφαλής, πέτου, επιδαπέδια), το άθροισμα των όρων ορίζεται ως $L_{LSpol} + L_{Mpol} \leq 6 \text{ dB}$, το οποίο αθροίζεται στην τελική στάθμη PAG .

Σε κλειστό χώρο με η επίδραση του αντηχητικού πεδίου της αίθουσας μεταβάλλει τον δείκτη PAG με ο αντίστοιχος τύπος διαμορφώνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} PAG = & 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{Q}{4\pi \cdot D_s^2} + \frac{4}{R} \right) + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{Q}{4\pi \cdot D_2^2} + \frac{4}{R} \right) \\ & - 10 \log_{10} \left(\frac{Q}{4\pi \cdot D_0^2} + \frac{4}{R} \right) - 10 \log_{10} \left(\frac{Q}{4\pi \cdot D_1^2} + \frac{4}{R} \right) \\ & + L_{LSpol} + L_{Mpol} - 10 \cdot \log_{10} N_M - 6. \end{aligned} \quad (63)$$

9.1.8 Απαιτούμενο ακουστικό κέρδος (Needed Acoustical Gain) - NAG

Το απαιτούμενο ακουστικό κέρδος (NAG) σε κάποιο απομακρυσμένο σημείο του ακροατηρίου απόστασης D_0 έτσι ώστε η στάθμη στο σημείο αυτό να ισοδυναμεί με τη στάθμη στην απόσταση EAD . Σε ανοιχτό χώρο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$NAG = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{D_0}{EAD} \right). \quad (64)$$

Σε κλειστό χώρο, αντίστοιχα με το PAG , προστίθενται η σταθερά δωματίου και ο παράγοντας κατευθυντικότητας των ηχείων. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$NAG = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{Q}{4\pi \cdot EAD^2} + \frac{4}{R} \right) - 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{Q}{4\pi \cdot D_0^2} + \frac{4}{R} \right). \quad (65)$$

9.1.9 Σχέση PAG και NAG

Σε περιπτώσεις όπου το PAG είναι μεγαλύτερο από το NAG μπορούμε να θεωρήσουμε πως το σύστημα δεν θα κινδυνεύει από φαινόμενα ανάδρασης.

9.1.10 Καταληπτότητα και κατανόηση ομιλίας

Οι δείκτες που σχετίζονται με την καταληπτότητα και την κατανόηση της ομιλίας αναλύθηκαν πλήρως στο σχετικό θεωρητικό κεφάλαιο της ακουστικής μελέτης. Ο βασικός δείκτης που υπολογίζεται στα πλαίσια της μελέτης ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης είναι ο δείκτης $\%AL_{cons}$ που ορίζει το ποσοστό απώλειας των συμφώνων του λόγου. Υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\%AL_{cons} = \frac{200 \cdot D_2^2 \cdot RT_{60}^2 \cdot (n + 1)}{Q \cdot V}, \quad (668)$$

όπου n ο αριθμός των ηχείων και V ο όγκος της αίθουσας.

Οι συχνοτικές ζώνες μεταξύ 250 Hz και 4 kHz παίζουν το σημαντικότερο ρόλο στη κατανόηση των συμφώνων. Ως ανώτατο όριο κάτω από το οποίο δεν θεωρείται πως υπάρχει πρόβλημα κατανόησης προτείνεται η τιμή $\%AL_{cons} = 15\%$.

Ο δείκτης STI υπολογίζεται από τη σχέση:

$$STI = -0,1845 \cdot \ln(\%AL_{cons}) + 0,9482. \quad (59)$$

9.1.11 Υπολογισμός στάθμης ηχητικής πίεσης σε συγκεκριμένη απόσταση

Ομοίως με την ακουστική μελέτη, ο υπολογισμός της στάθμης ηχητικής πίεσης που καταφθάνει σε συγκεκριμένο σημείο κλειστού χώρου από πηγή που εμφανίζει συγκεκριμένη κατευθυντικότητα, υπολογίζεται από τον τύπο:

$$L_p \approx L_w + 10 \cdot \log_{10}[Q/(4\pi \cdot r^2) + 4/R], \quad (60)$$

με το r να συμβολίζεται την απόσταση μεγάφωνου με ακροατή (D_2).

9.2 Θέσεις ομιλητή, ηχείων και σημείων ακρόασης - επιλογή ηχείων

Επιλέχθηκε ένας ομιλητής στις αντίστοιχες συντεταγμένες με αυτές που ορίστηκαν στο CATT-Acoustic κατά την ακουστική μελέτη.

Τα μεγάφωνα που επιλέχθηκαν είναι της εταιρίας Yamaha και πιο συγκεκριμένα το μοντέλο IF2115/99 (Εικόνα 100) που εμφανίζει ευαισθησία $L_{sens} = 106 \text{ dB}_{\text{SPL}}/\text{Watt}/\text{m}$. [29]. Η γωνία κάλυψης του συγκεκριμένου ηχείου ορίζεται στις 90° και στους δύο άξονες (οριζόντιο και κατακόρυφο). Επιλέχθηκαν 3 ηχεία για ομοιόμορφη κάλυψη σε όλο το μήκος και πλάτος των κερκίδων καθώς επίσης και λόγω του ότι σε πολλές εκδηλώσεις χορού, πέραν της στερεοφωνικής αναπαραγωγής του συστήματος ενίσχυσης ήχου απαιτείται και ένα επιπλέον κεντρικό σε διάταξη LCR (Left, Center, Right).



Εικόνα 100: Ηχείο Yamaha IF2115/99 [29].

Η τοποθέτηση τους έγινε 7,2 m από τον τοίχο πίσω από τους ακροατές, περίπου 1,5 m μετά το τελευταίο σκαλοπάτι το κερκίδων, με τα Left και Right ηχεία να ισαπέχουν 4,2 m εκατέρωθεν από το κέντρο της σκηνης και το Center να βρίσκεται ακριβώς στο κέντρο. Το ύψος τους ορίστηκε στα 0,5 m κάτω από το ύψος της αλουμινένιας τράσας άνωθεν της σκηνης, στα 5,5 m. Λόγω γεωμετρίας δεν υπάρχει άλλο σημείο εντός της αίθουσας το οποίο να επιτρέπεται την

ανάρτηση μεγάφωνων. Το ύψος της τράσας στις περισσότερες εκδηλώσεις είναι σταθερό στα 6 m από το πάτωμα καθώς πολλά από τα σκηνικά που αναρτιούνται από αυτήν έχουν αυτό το ύψος.

Η κλήση των ηχείων έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να στοχεύουν αναμεσά στο κέντρο και στο άνω μέρος των κερκίδων, με το σκεπτικό οι μπροστινές θέσεις να λαμβάνουν υψηλότερες στάθμες ηχητικής πίεσης λόγω απόστασης και χαμηλότερες λόγω κατευθυντικότητας και οι άνωθεν θέσεις να λαμβάνουν σχετικά χαμηλότερες στάθμες λόγω απόστασης, μεγαλύτερες όμως λόγω κατευθυντικότητας. Τα χαρακτηριστικά του ηχείου ενσωματώθηκαν στον κώδικα του CATT-Acoustic μέσω του αρχείου .clf2 του συγκεκριμένου ηχείου [30].

Οι σχετικές τιμές υπολογίστηκαν για 9 θέσεις ακροατών στις κερκίδες, όμοιες με αυτές για τις οποίες υπολογίστηκαν μέσω του CATT-Acoustic κατά την ακουστική μελέτη.

Οι αποστάσεις του κάθε ηχείου από το κάθε σημείο ακρόασης φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 30).

Αποστάσεις ηχείων από σημεία ακρόασης			
Θέση	Main-L	Main-R	Main-C
1. Πάνω αριστερά	6.37	10.78	7.79
2. Πάνω κεντρικά	7.62	7.62	6.36
3. Πάνω δεξιά	10.78	6.37	7.79
4. Κέντρο αριστερά	5.06	10.06	6.76
5. Κέντρο κεντρικά	6.57	6.57	5.05
6. Κέντρο δεξιά	10.06	5.06	6.76
7. Κάτω αριστερά	4.39	9.74	6.28
8. Κάτω κεντρικά	6.07	6.07	4.38
9. Κάτω δεξιά	9.74	4.39	6.28
μέγιστη $r=$	10.78	10.78	7.79
ελάχιστη $r=$	4.39	4.39	4.38

Πίνακας 30: Αποστάσεις σε m μεταξύ των 3 ηχείων και των 9 θέσεων ακρόασης. Με ροζ χρώμα φαίνονται οι μέγιστες και με σιέλ οι ελάχιστες.

9.3 Υλοποίηση βασικών υπολογισμών

Προχωρώντας στη υλοποίηση των παραπάνω τύπων για την αίθουσα Στούντιο του Μεγάλου Χορού Καλαμάτας, για την περίπτωση της ομιλίας με

ανακλαστήρες και κλειστές κουρτίνες, λαμβάνουμε μέσω του λογισμικού CATT-Acoustic τις εξής τιμές:

- Όγκος αίθουσας $V_{\text{αίθουσας}} = 3594,3 \text{ m}^3$
- Συνολική επιφάνεια $S_{\text{ολικό}} = 2412,19 \text{ m}^2$
- Μέσος συντελεστής απορρόφησης στο 1 kHz $\bar{\alpha} = 0,2336$
- Συντελεστής απορρόφησης κοινού στο 1 kHz $\bar{\alpha} = 0,45$
- Στάθμη θορύβου $L_{\text{Noise}} = 35,6 \text{ dB}$

Ακολουθούν, με τη μορφή λίστας, οι επιλογές που έγιναν κατά τον υπολογισμό των θεωρητικών τύπων καθώς και τα αποτελέσματα αυτών:

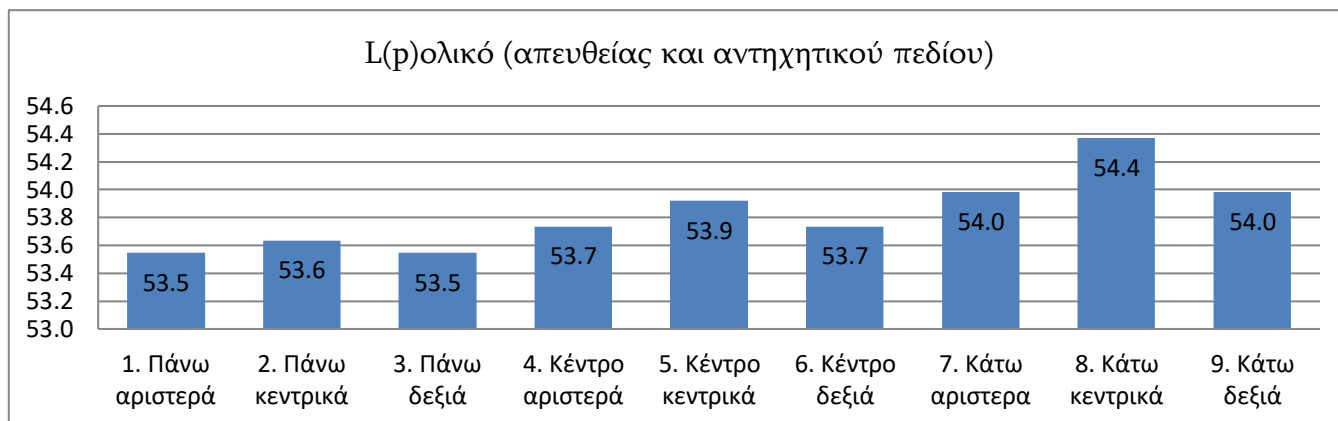
- Υπολογίστηκε η σταθερά δωματίου με τιμή $R = 735$.
- Η συνολική απορρόφηση της αίθουσας υπολογίστηκε ως $A = 563,49$.
- Αριθμός μικροφώνων $N_M = 1$.
- Ως απόσταση ομιλητή και μικροφώνου ορίστηκε η τιμή $D_s = 0,40 \text{ m}$.
- Η κατευθυντικότητα του ομιλητή ορίστηκε ως παντοκατευθυντική ($Q = 1$).
- Η στάθμη ηχητική πίεσης στο 1 m, για τη συχνότητα του 1 kHz ορίστηκε ως $L_{p, \text{ομιλητή}} = 65 \text{ dB}_{\text{SPL}}$, με $L_{w, \text{ομιλητή}} = 75,7 \text{ dB}_W$.
- Η επιθυμητή στάθμη σε κάθε σημείο των ακροατών επιλέχθηκε 25 dB πάνω από τον θόρυβο βόθους (ο οποίος σύμφωνα με το CATT-Acoustic υπολογίζεται στα 35,6 dB) και λαμβάνει τιμή $L_p = 60,6 \text{ dB}$.
- Η ισοδύναμη ακουστική απόσταση υπολογίστηκε στη τιμή $EAD = 1,66 \text{ m}$.
- Η απόσταση μεγάφωνου με τον πιο απομακρυσμένο ομιλητή (D_2) είναι πολύ μεγαλύτερη της EAD για το λόγο αυτό η χρήση ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης κρίνεται απαραίτητη.
- Η κρίσιμη απόσταση του ομιλητή υπολογίστηκε ως $D_{C \text{ ομιλητής}} = 3,82 \text{ m}$.
- Η κρίσιμη απόσταση των μεγάφωνων υπολογίστηκε ως $D_{C \text{ ηχείων}} = 4,68 \text{ m}$.
- Η συχνότητα Schroeder υπολογίστηκε ως $F_C = 33,8 \text{ Hz}$.
- Ως περιθώριο κέρδους ορίστηκε η τιμή $H = 12 \text{ dB}$.
- Ως επιπλέον περιθώριο κέρδους ορίστηκε η τιμή $FSM = 6 \text{ dB}$.
- Ως $L_{\text{spol}} + L_{\text{mpol}} = 6 \text{ dB}$ με το σκεπτικό πως δεν γνωρίζουμε το πολικό διάγραμμα του μικροφώνου και πως αυτό πιθανώς κινείται στο χώρο.
- Η στάθμη ηχητικής ισχύος της πηγής υπολογίστηκε στη τιμή $L_{W \text{ ηχείου}} = 109,16 \text{ dB}_W$.
- Παράγοντας κατευθυντικότητας μεγάφωνων $Q = 6$.
- Δείκτης κατευθυντικότητας μεγάφωνων $DI = 7,78 \text{ dB}$.

- Η ελάχιστη απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς για κλειστό χώρο υπολογίστηκε ως $ERP = 0,02 \text{ Watt}$.
- Το απαιτούμενο ακουστικό κέρδος για κλειστό χώρο υπολογίστηκε για την πιο απομακρυσμένη θέση ακροατή ως $NAG = 12,85 \text{ dB}$.
- Το δυνητικό ακουστικό κέρδος για κλειστό χώρο στην πιο απομακρυσμένη θέση υπολογίστηκε ως $PAG = 21,34 \text{ dB}$.

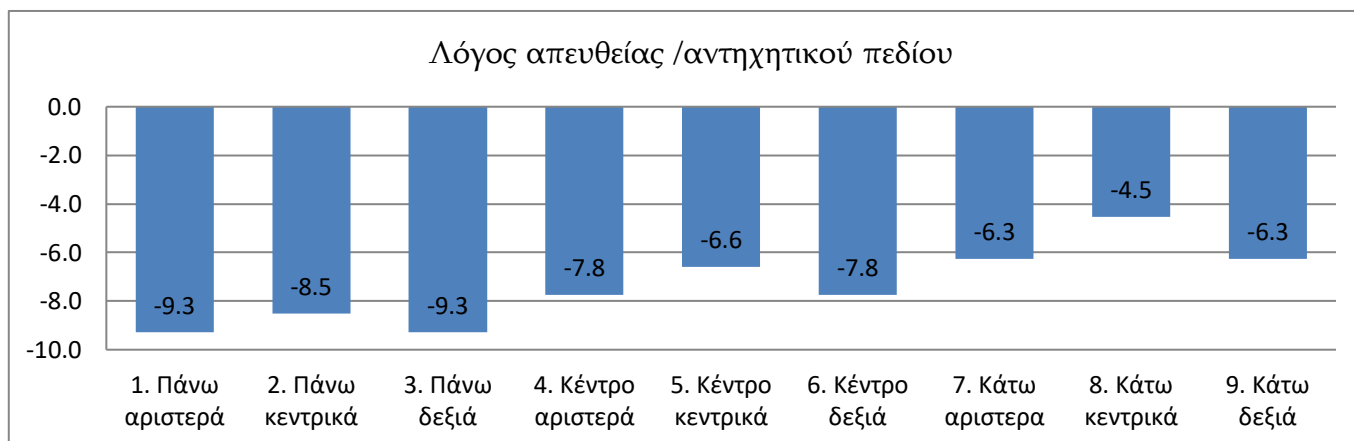
9.4 Παρουσίαση θεωρητικών αποτελεσμάτων σε κάθε θέση ακροατή

9.4.1 Για άδεια αίθουσα

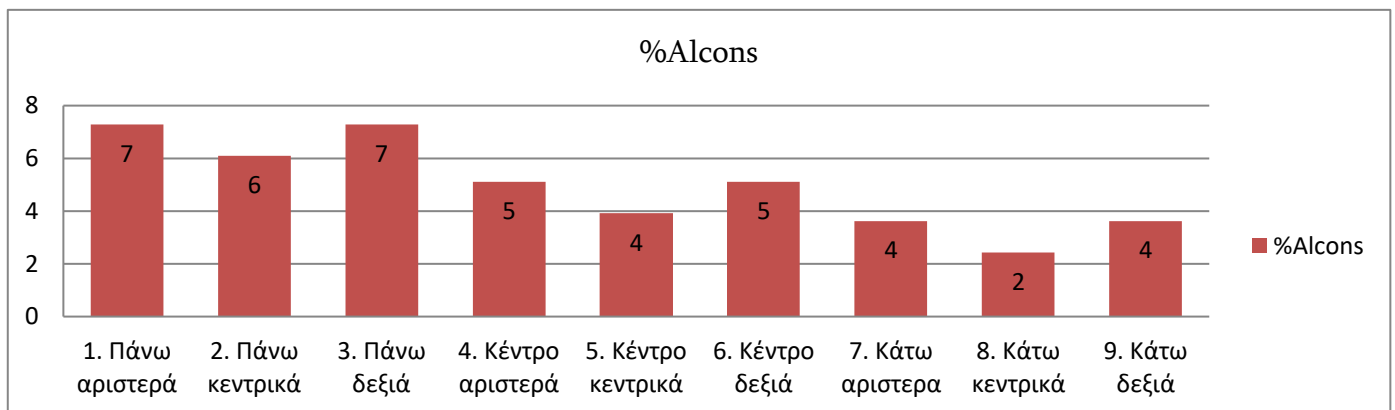
Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των υπολογισμών για κάθε ένα από τα εννέα σημεία των ακροατών με την αίθουσα στη πρώτη περίπτωση να είναι άδεια από κοινό και στη δεύτερη γεμάτη. Αρχικά θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα σε κάθε σημείο ως προς την στάθμη του ομιλητή, δίχως ηλεκτροακουστική εγκατάσταση και στη συνέχεια για κάθε σημείο σε σχέση με την στάθμη κάθε ενός από τα τρία ηχεία.



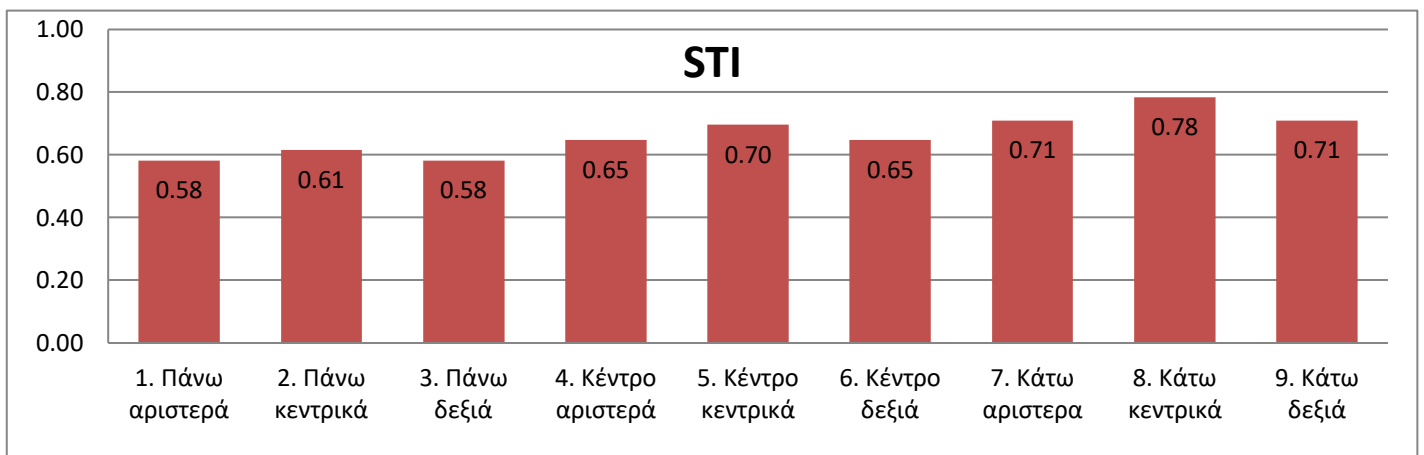
Διάγραμμα 189: Lp ολικό (απευθείας και αντηχητικού πεδίου) από ομιλητή σε κάθε θέση ακρόασης, άδεια αίθουσα.



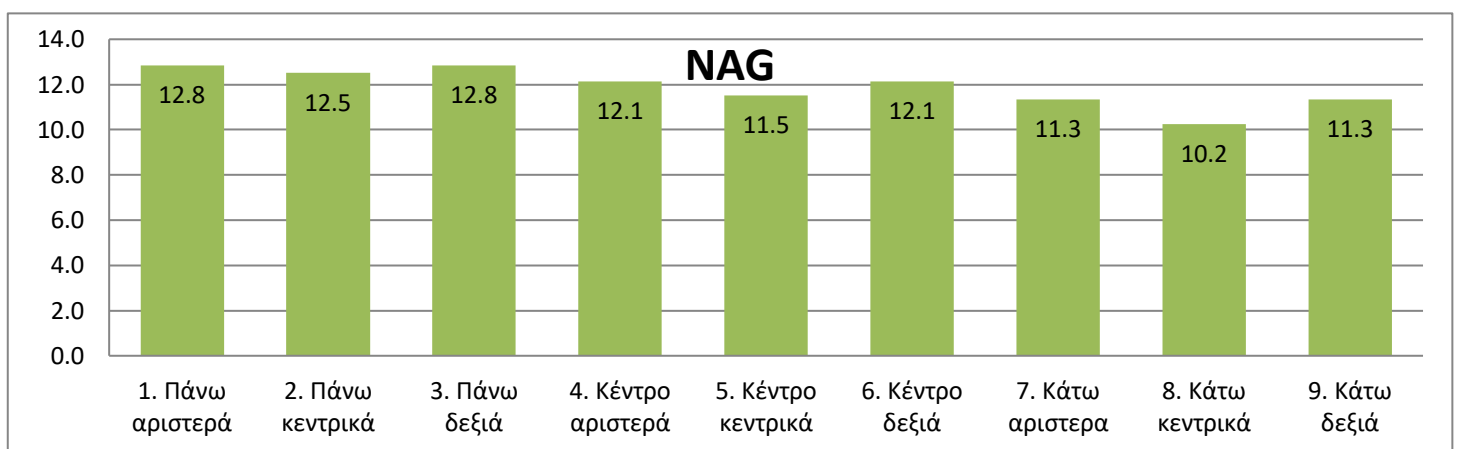
Διάγραμμα 190: Λόγος απευθείας προς αντηχητικού πεδίου από ομιλητή σε κάθε θέση ακρόασης, άδεια αίθουσα.



Διάγραμμα 191: Δείκτης %ALcons από ομιλητή σε κάθε θέση ακρόασης, άδεια αίθουσα.



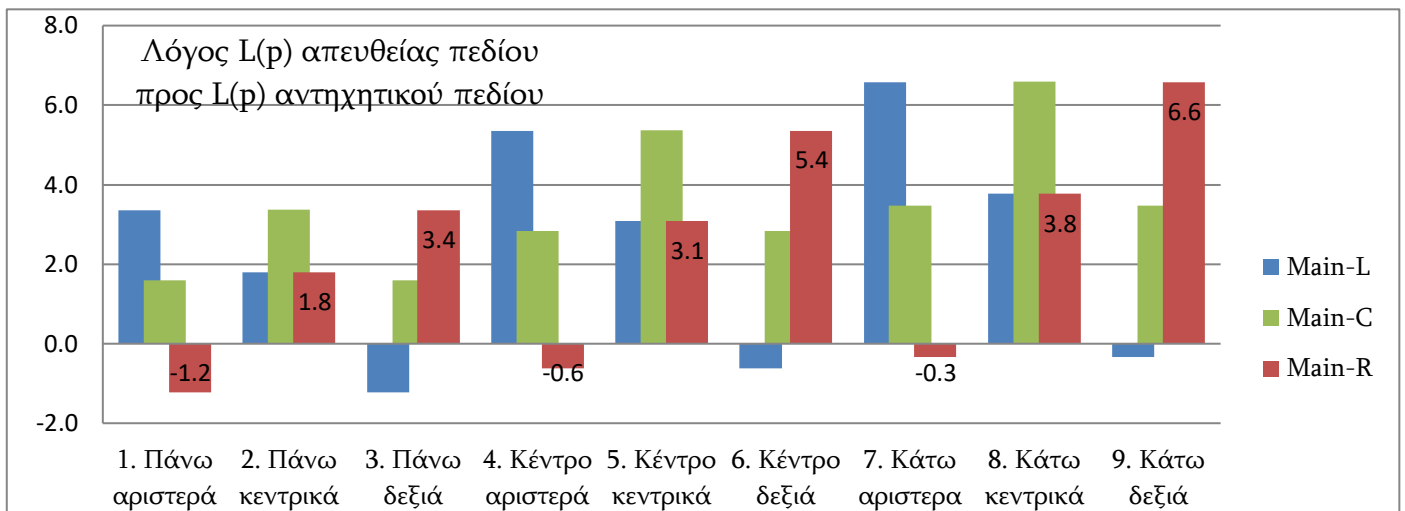
Διάγραμμα 192: Δείκτης STI από ομιλητή σε κάθε θέση ακρόασης, άδεια αίθουσα.



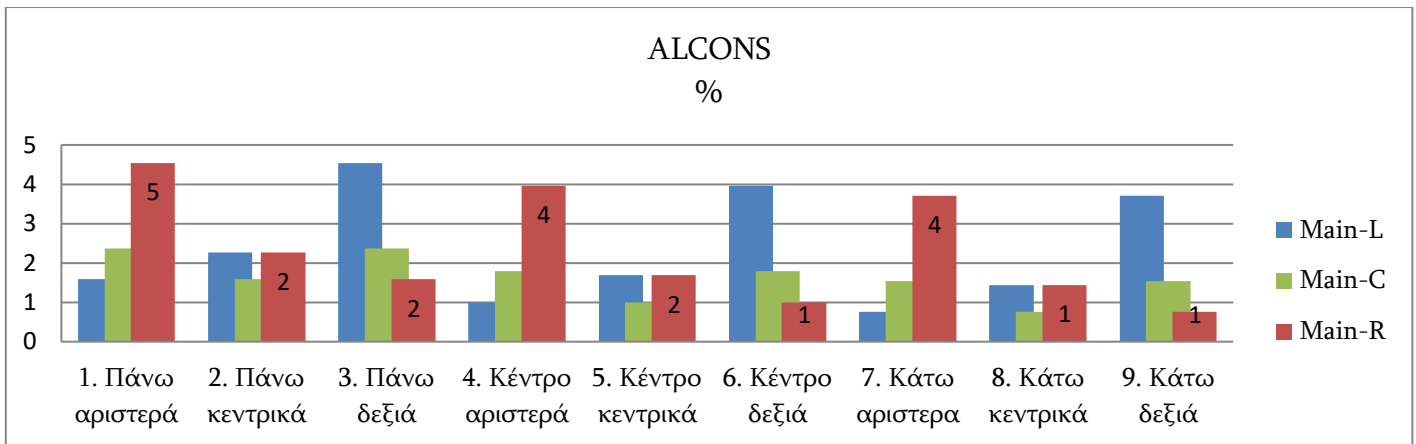
Διάγραμμα 193: Απαιτούμενο ακουστικό κέρδος σε κάθε θέση ακρόασης, άδεια αίθουσα.



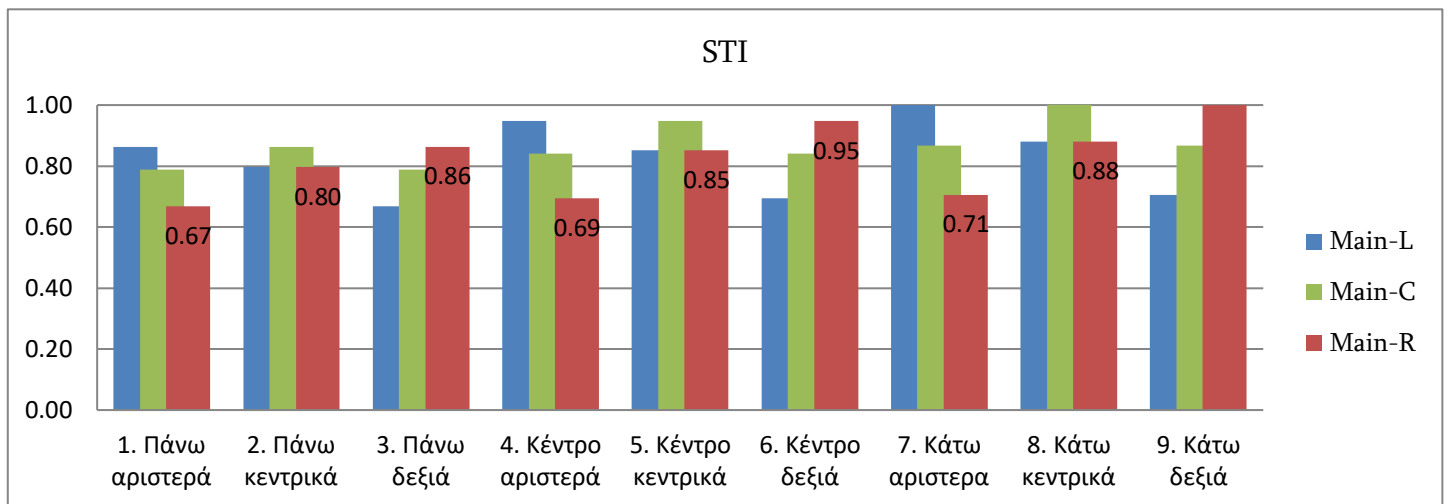
Διάγραμμα 194: Lp ολικό (απευθείας και αντηχητικού πεδίου) από κάθε ηχείο σε κάθε θέση ακρόασης, άδεια αίθουσα.



Διάγραμμα 195: Λόγος απευθείας προς αντηχητικού πεδίου από κάθε ηχείο σε κάθε θέση ακρόασης, άδεια αίθουσα.



Διάγραμμα 196: Δείκτης %ALcons από κάθε ηχείο σε κάθε θέση ακρόασης, άδεια αίθουσα.



Διάγραμμα 197: Δείκτης STI από κάθε ηχείο σε κάθε θέση ακρόασης, άδεια αίθουσα.

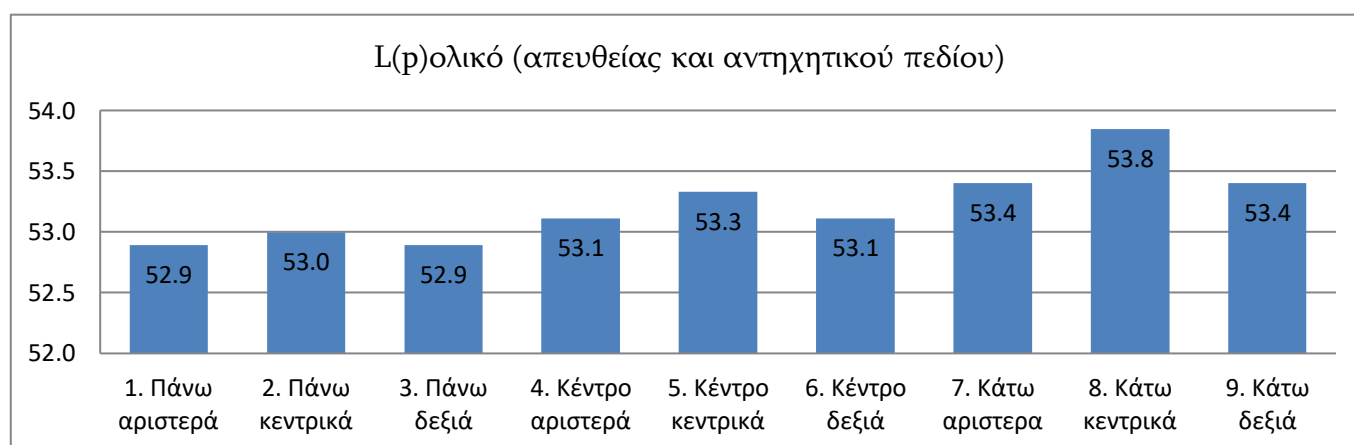
PAG με ηχεία			
Θέση	Main-L	Main-R	Main-C
1. Πάνω αριστερά	23.90	21.3	22.8
2. Πάνω κεντρικά	22.6	22.6	23.6
3. Πάνω δεξιά	21.3	23.9	22.8
4. Κέντρο αριστερά	24.7	20.9	22.8
5. Κέντρο κεντρικά	22.4	22.4	24.1
6. Κέντρο δεξιά	20.9	24.7	22.8
7. Κάτω αριστερά	24.8	20.2	22.5
8. Κάτω κεντρικά	21.6	21.6	23.7
9. Κάτω δεξιά	20.2	24.8	22.5

Πίνακας 31: Υπολογισμός PAG από κάθε ηχείο σε κάθε θέση ακρόασης, άδεια αίθουσα.

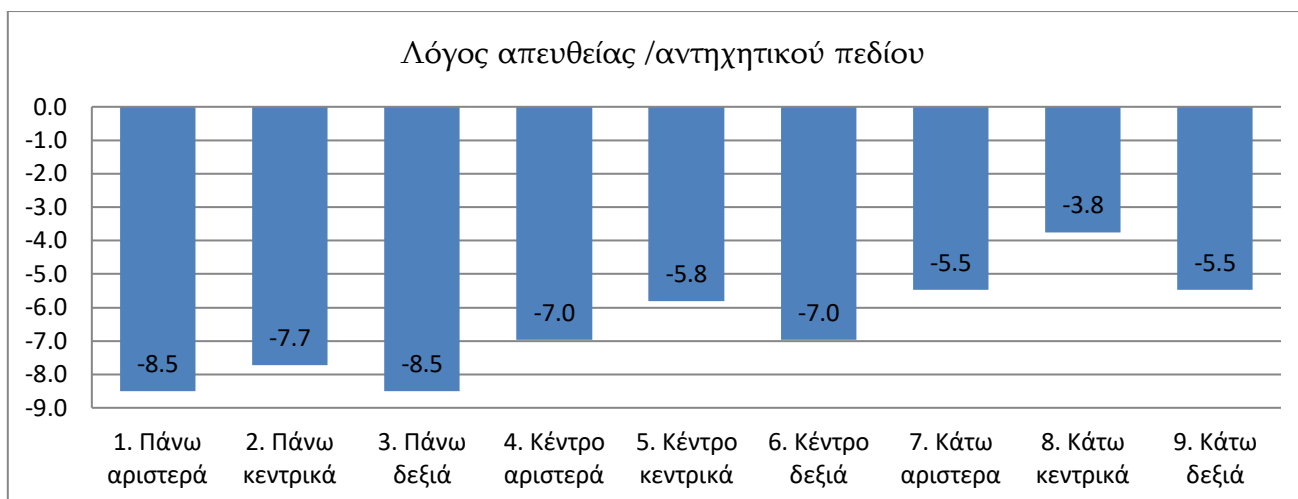
Είναι ευσταθές; Ισχύει PAG>NAG σε κάθε θέση?			
Θέση	Main-L	Main-R	Main-C
1. Πάνω αριστερά	NAI	NAI	NAI
2. Πάνω κεντρικά	NAI	NAI	NAI
3. Πάνω δεξιά	NAI	NAI	NAI
4. Κέντρο αριστερά	NAI	NAI	NAI
5. Κέντρο κεντρικά	NAI	NAI	NAI
6. Κέντρο δεξιά	NAI	NAI	NAI
7. Κάτω αριστερά	NAI	NAI	NAI
8. Κάτω κεντρικά	NAI	NAI	NAI
9. Κάτω δεξιά	NAI	NAI	NAI

Πίνακας 32: Ευστάθεια συστήματος από κάθε ηχείο σε κάθε θέση ακρόασης, άδεια αίθουσα. Σε περίπτωση που το σύστημα είναι ευσταθές φαίνεται η ένδειξη NAI.

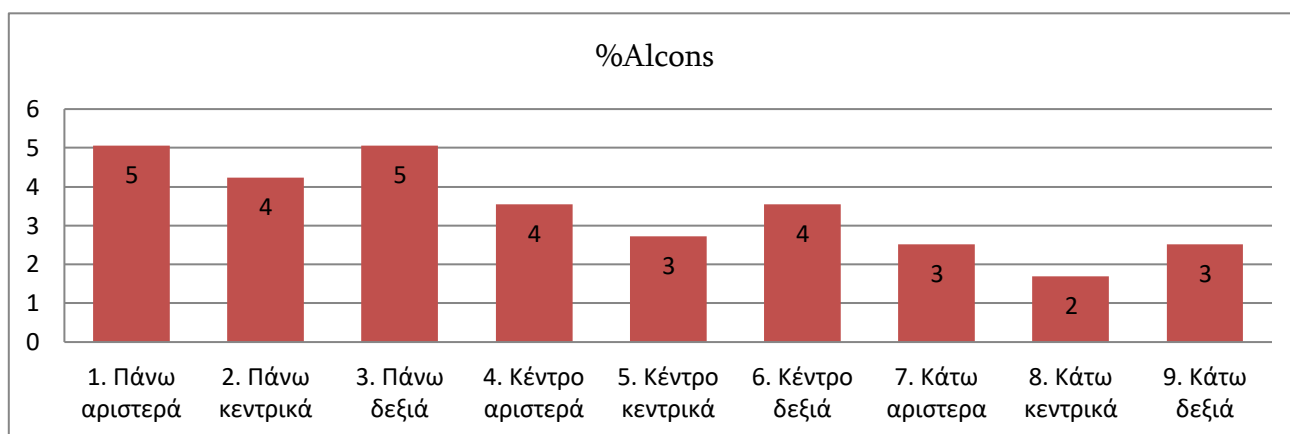
9.4.1 Για γεμάτη αίθουσα



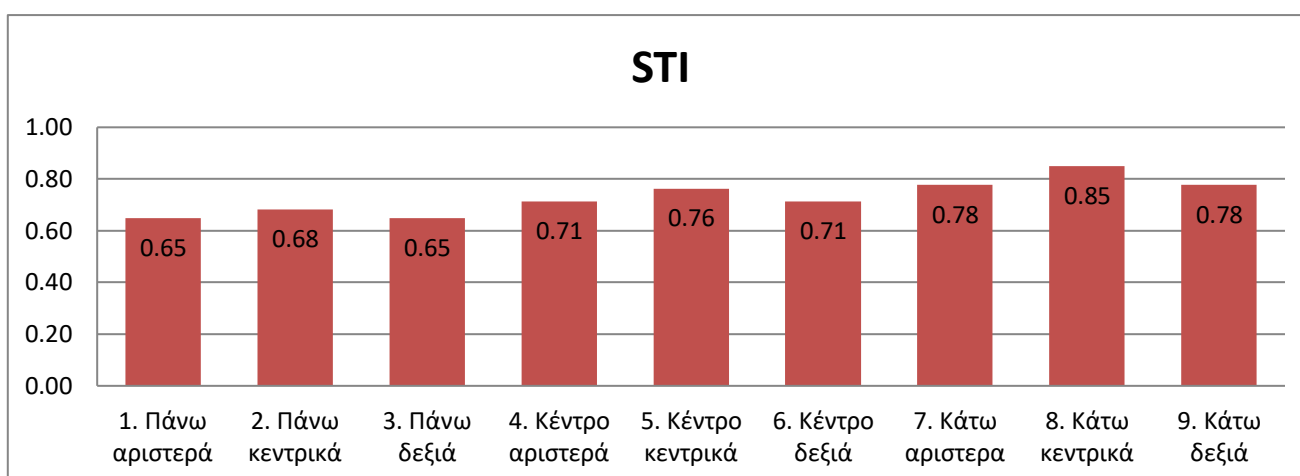
Διάγραμμα 198: Lp ολικό (απευθείας και αντηχητικού πεδίου) από ομιλήτη σε κάθε θέση ακρόασης, γεμάτη αίθουσα.



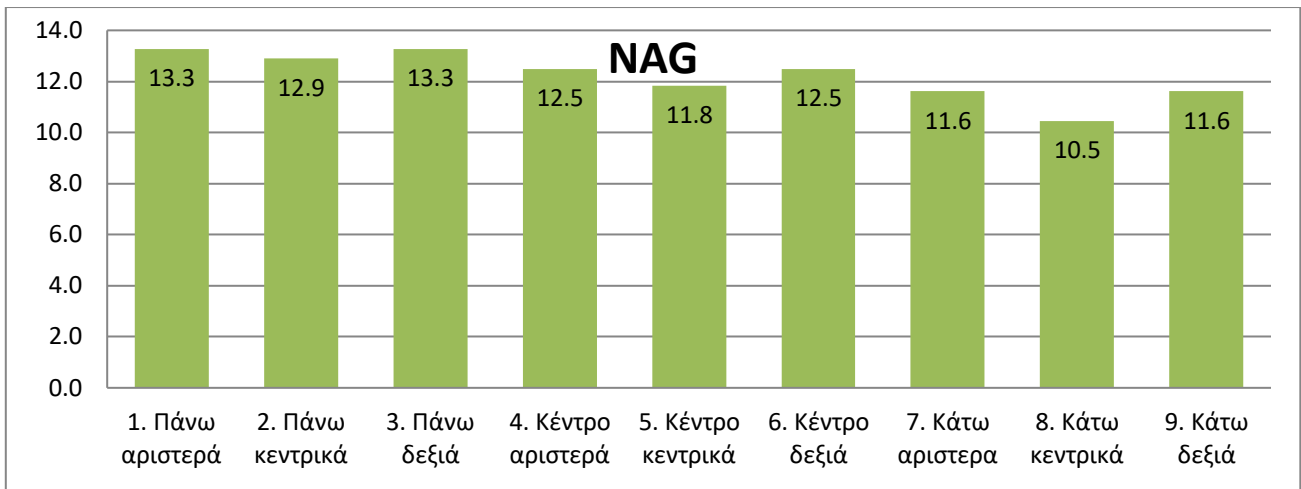
Διάγραμμα 199: Λόγος απευθείας προς αντηχητικό πεδίο από ομιλητή σε κάθε θέση ακρόασης, γεμάτη αίθουσα.



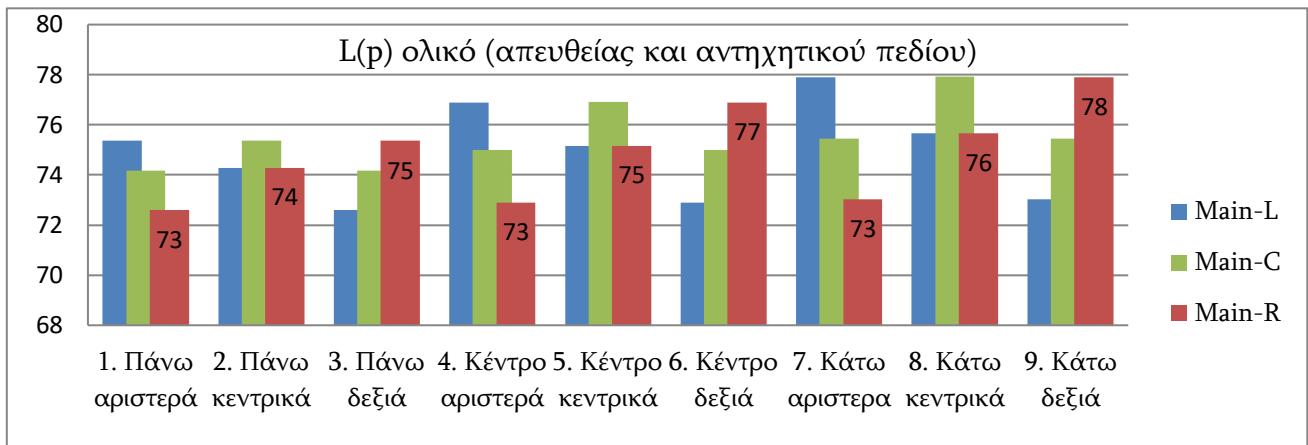
Διάγραμμα 200: Δείκτης %ALcons από ομιλητή σε κάθε θέση ακρόασης, γεμάτη αίθουσα.



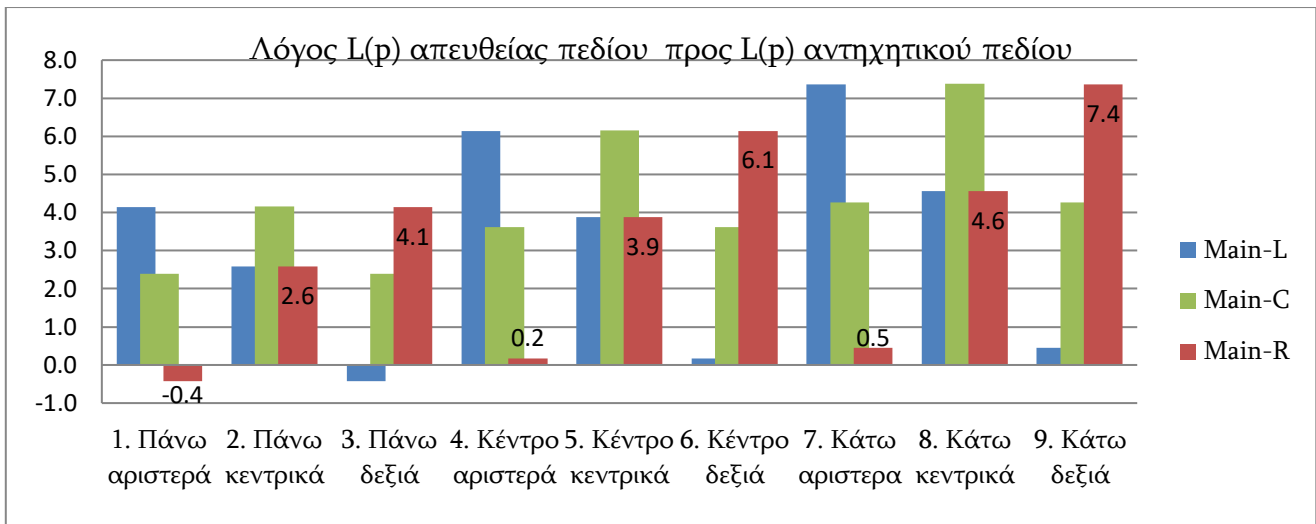
Διάγραμμα 201: Δείκτης STI από ομιλητή σε κάθε θέση ακρόασης, γεμάτη αίθουσα.



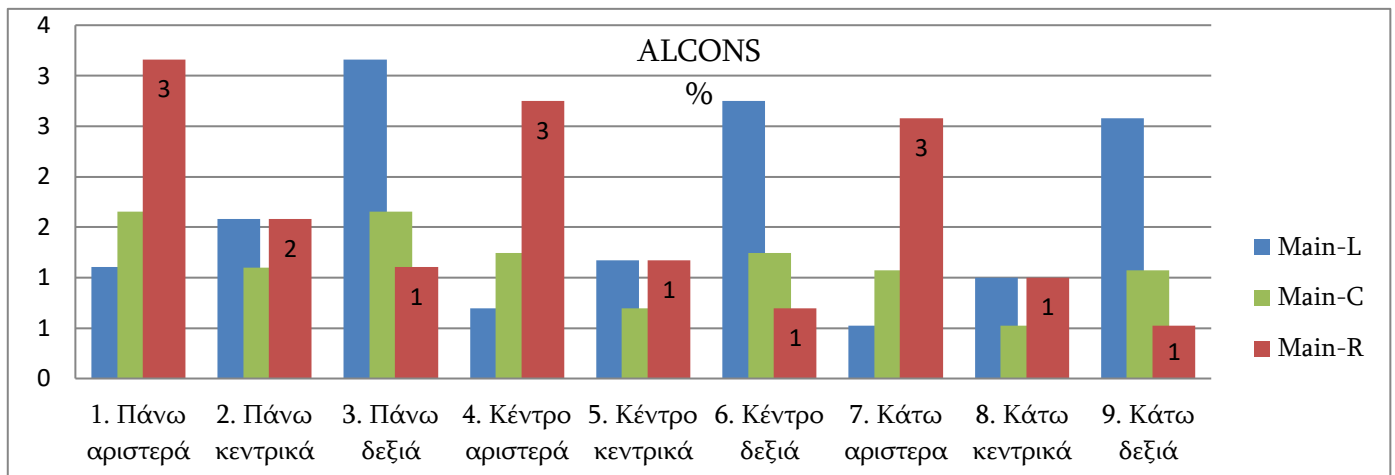
Διάγραμμα 202: Απαιτούμενο ακουστικό κέρδος σε κάθε θέση ακρόασης, γεμάτη αίθουσα.



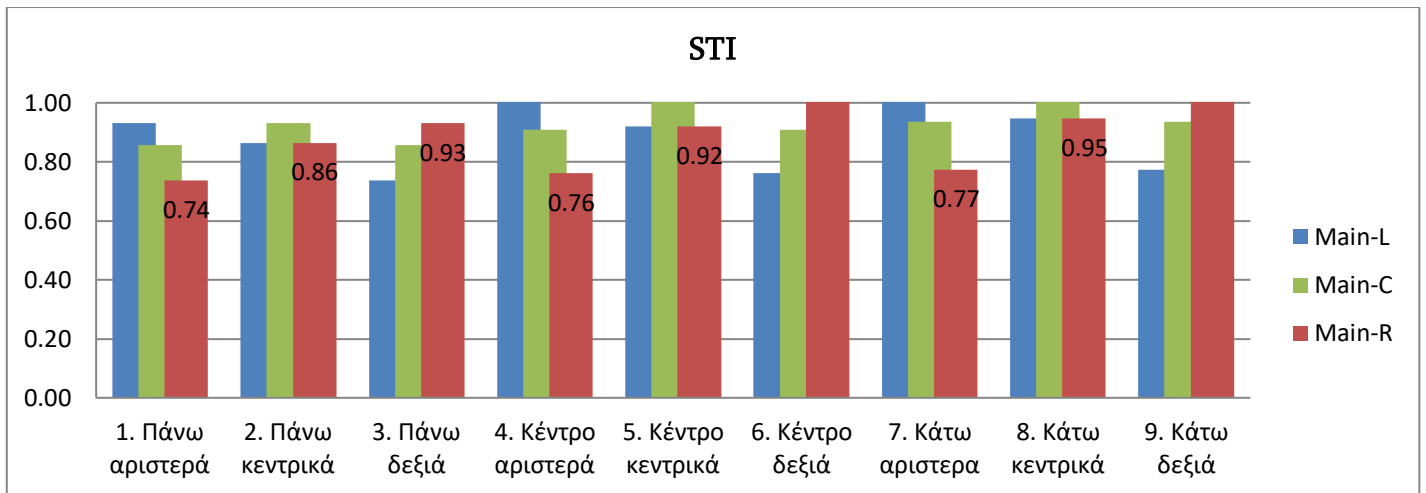
Διάγραμμα 203: L_p ολικό (απευθείας και αντηχητικού πεδίου) από κάθε ηχείο σε κάθε θέση ακρόασης, γεμάτη αίθουσα.



Διάγραμμα 204 :Λόγος απευθείας προς αντηχητικού πεδίου από κάθε ηχείο σε κάθε θέση ακρόασης, γεμάτη αίθουσα.



Διάγραμμα 205: Δείκτης %ALcons από κάθε ηχείο σε κάθε θέση ακρόασης, γεμάτη αίθουσα.



Διάγραμμα 206: Δείκτης STI από κάθε ηχείο σε κάθε θέση ακρόασης, γεμάτη αίθουσα.

PAG με ηχεία			
Θέση	Main-L	Main-R	Main-C
1. Πάνω αριστερά	24.29	21.5	23.1
2. Πάνω κεντρικά	22.8	22.8	23.9
3. Πάνω δεξιά	21.5	24.3	23.1
4. Κέντρο αριστερά	25.0	21.1	23.1
5. Κέντρο κεντρικά	22.7	22.7	24.4
6. Κέντρο δεξιά	21.1	25.0	23.1
7. Κάτω αριστερά	25.2	20.3	22.7
8. Κάτω κεντρικά	21.8	21.8	24.0
9. Κάτω δεξιά	20.3	25.2	22.7

Πίνακας 33: Υπολογισμός PAG από κάθε ηχείο σε κάθε θέση ακρόασης, γεμάτη αίθουσα.

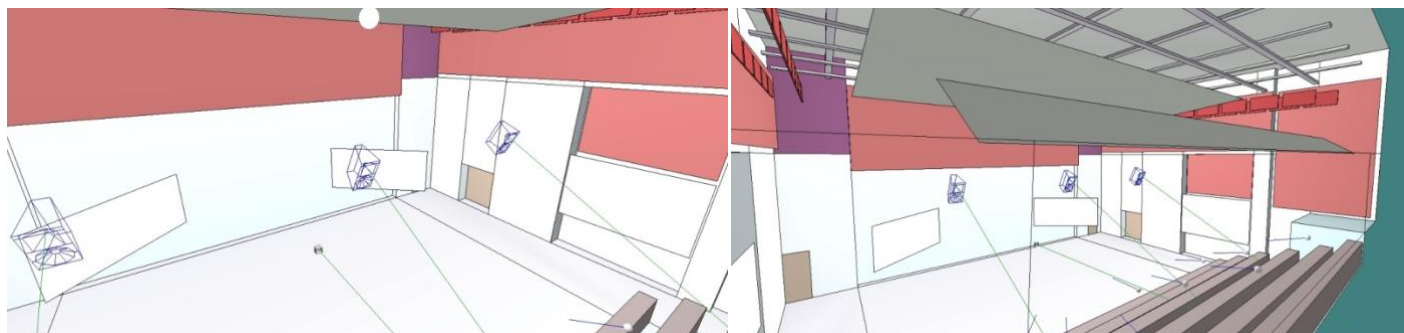
Είναι ευσταθές; Ισχύει PAG>NAG σε κάθε θέση?			
Θέση	Main-L	Main-R	Main-C
1. Πάνω αριστερά	NAI	NAI	NAI
2. Πάνω κεντρικά	NAI	NAI	NAI
3. Πάνω δεξιά	NAI	NAI	NAI
4. Κέντρο αριστερά	NAI	NAI	NAI
5. Κέντρο κεντρικά	NAI	NAI	NAI

6. Κέντρο δεξιά	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ
7. Κάτω αριστερά	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ
8. Κάτω κεντρικά	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ
9. Κάτω δεξιά	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ

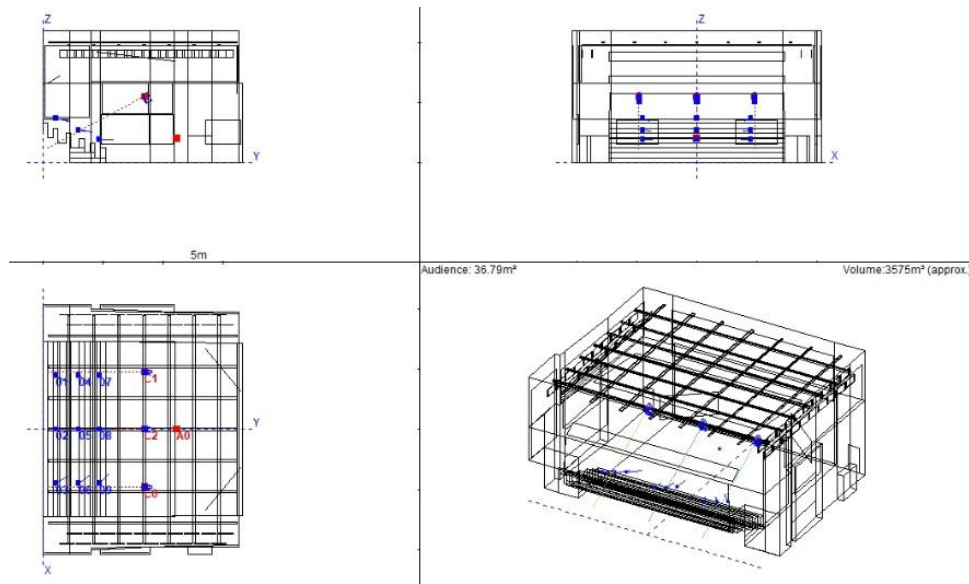
Πίνακας 34: Ευστάθεια συστήματος από κάθε ηχείο σε κάθε θέση ακρόασης, γεμάτη αίθουσα. Σε περίπτωση που το σύστημα είναι ευσταθές φαίνεται η ένδειξη ΝΑΙ.

9.5 Εισαγωγή ηχείων στο CATT-Acoustic και εξαγωγή αποτελεσμάτων

Έπειτα από τον θεωρητικό υπολογισμό των παραπάνω ακουστικών παραμέτρων προχωρήσαμε στην εισαγωγή των συγκεκριμένων ηχείων στον τελικό σχεδιασμό της αίθουσας για ομιλία με κουρτίνες και χρήση πλευρικών και πίσω ανακλαστήρων. Η απεικόνιση των ηχείων καθώς και η ακριβής τους τοποθέτηση στο λογισμικό φαίνεται στις παρακάτω Εικόνες (Εικόνες 101, 102).



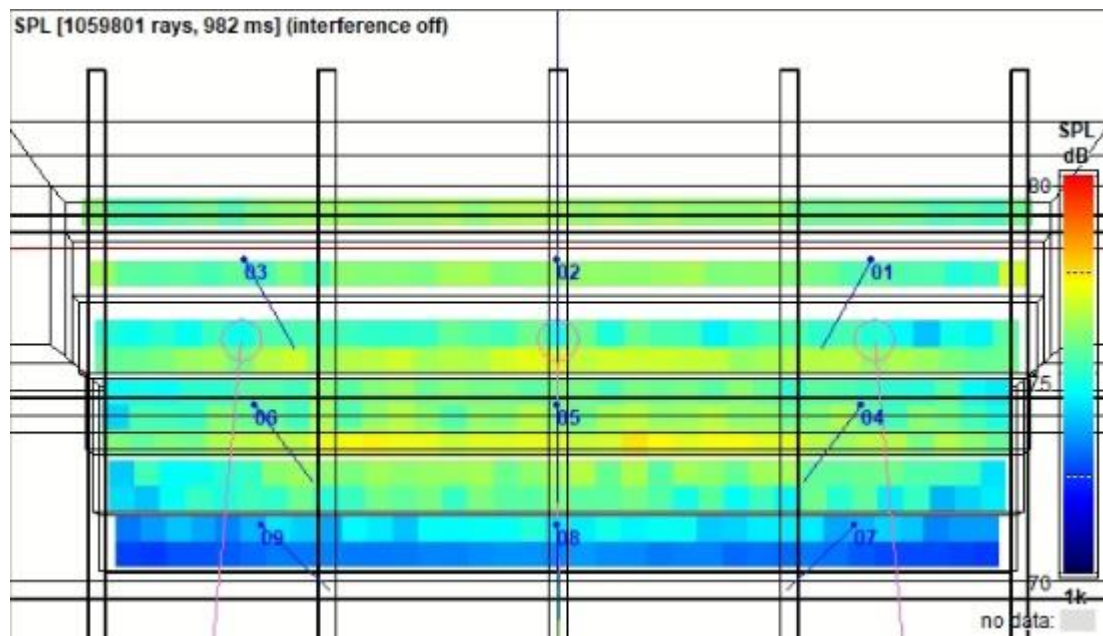
Εικόνα 101: Τρισδιάστατη απεικόνιση της αίθουσας για ομιλία με την προσθήκη των 3 ηχείων στο CATT-Acoustic.



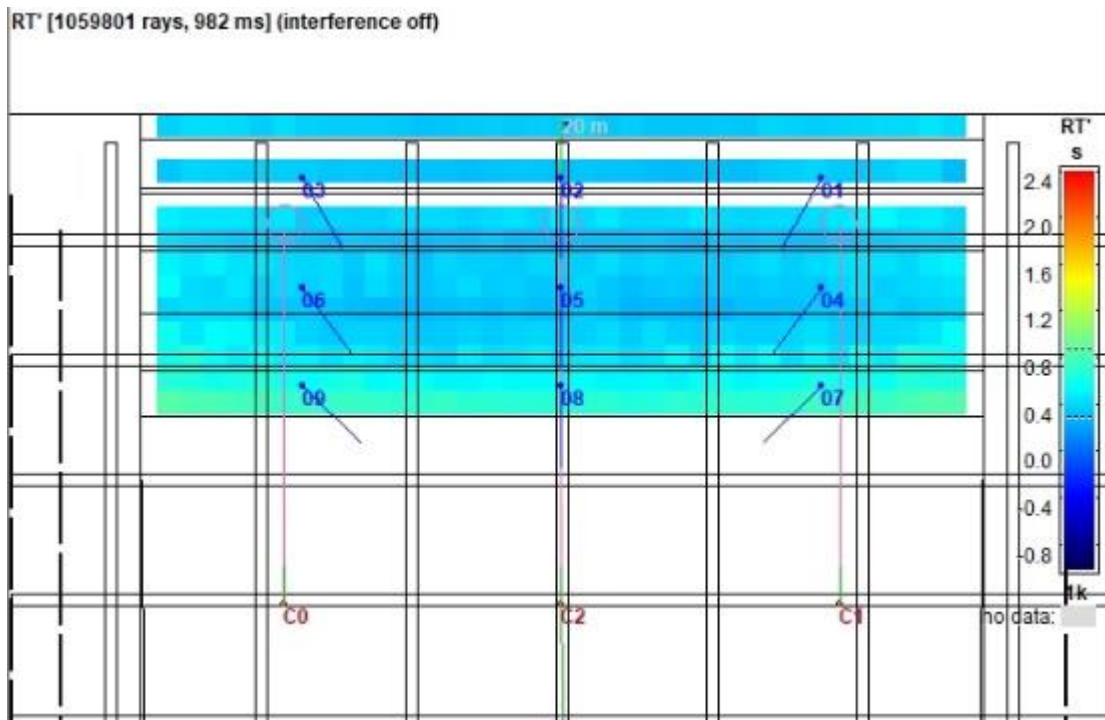
Εικόνα 102: Κάτοψη, όψη της αίθουσας για ομιλία με την προσθήκη των 3 ηχείων στο CATT-Acoustic.

9.5.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αίθουσας άδειας από κοινό

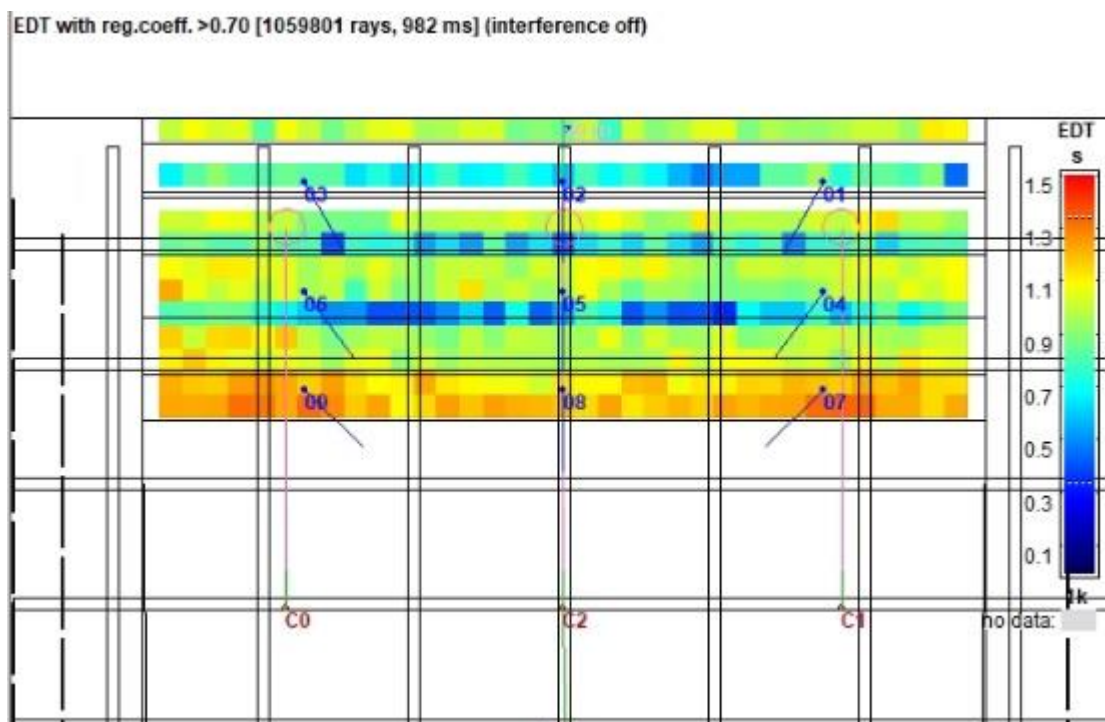
Ακολουθεί παρουσίαση των αποτελέσματα της προσομοίωσης, μέσω του λογισμικού CATT-Acoustic, για την περίπτωση ομιλίας με κουρτίνες και όλους τους ανακλαστήρες χωρίς κοινό.



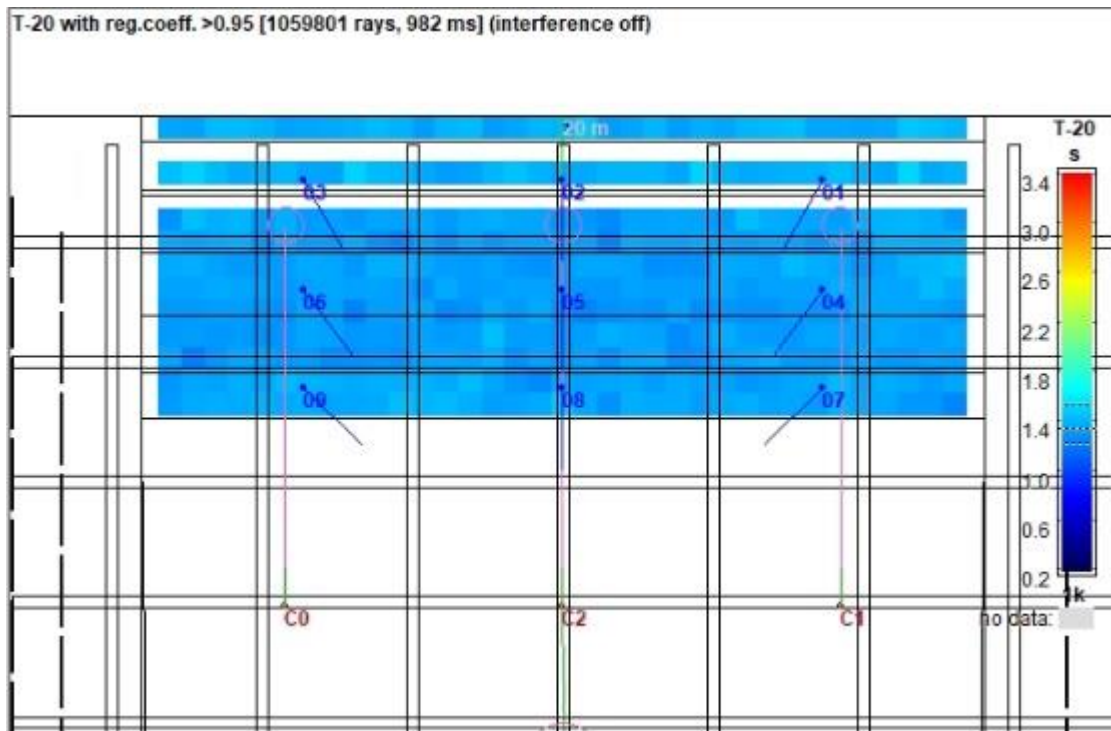
Εικόνα 103: SPL στο 1 kHz για ομιλία με ηχεία, χωρίς κοινό (KB803, BASWA, κουρτίνες και ανακλαστήρες).



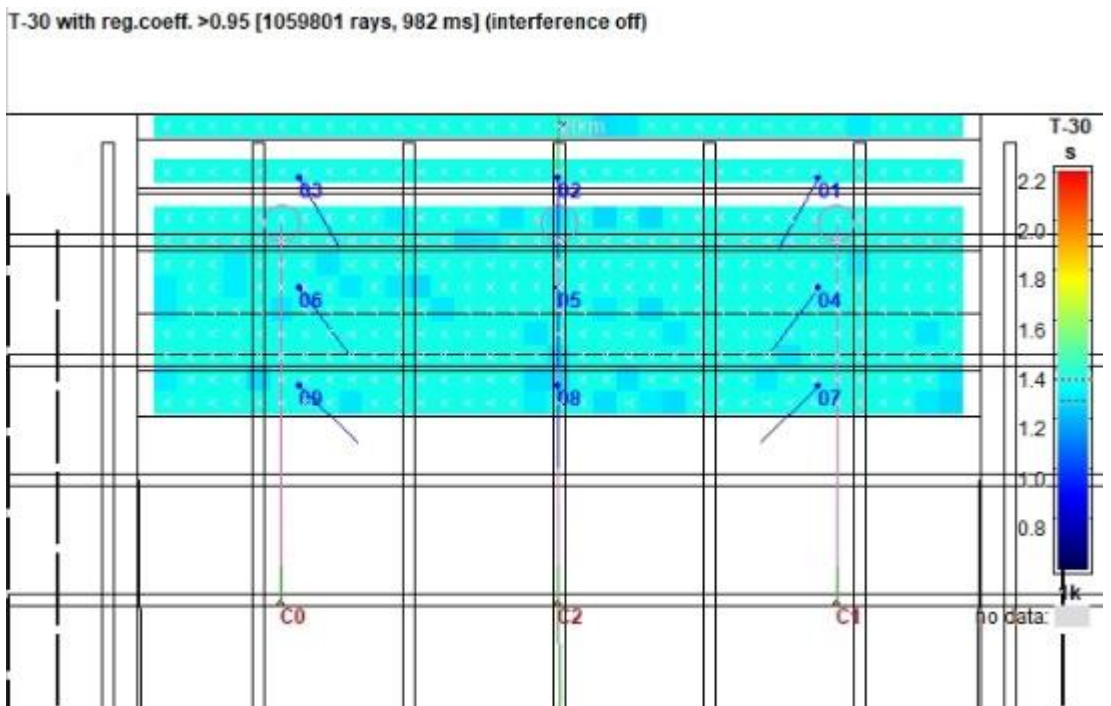
Εικόνα 104: RT' στο 1 kHz για ομιλία με ηχεία, χωρίς κοινό (KB803, BASWA,κουρτίνες και ανακλαστήρες).



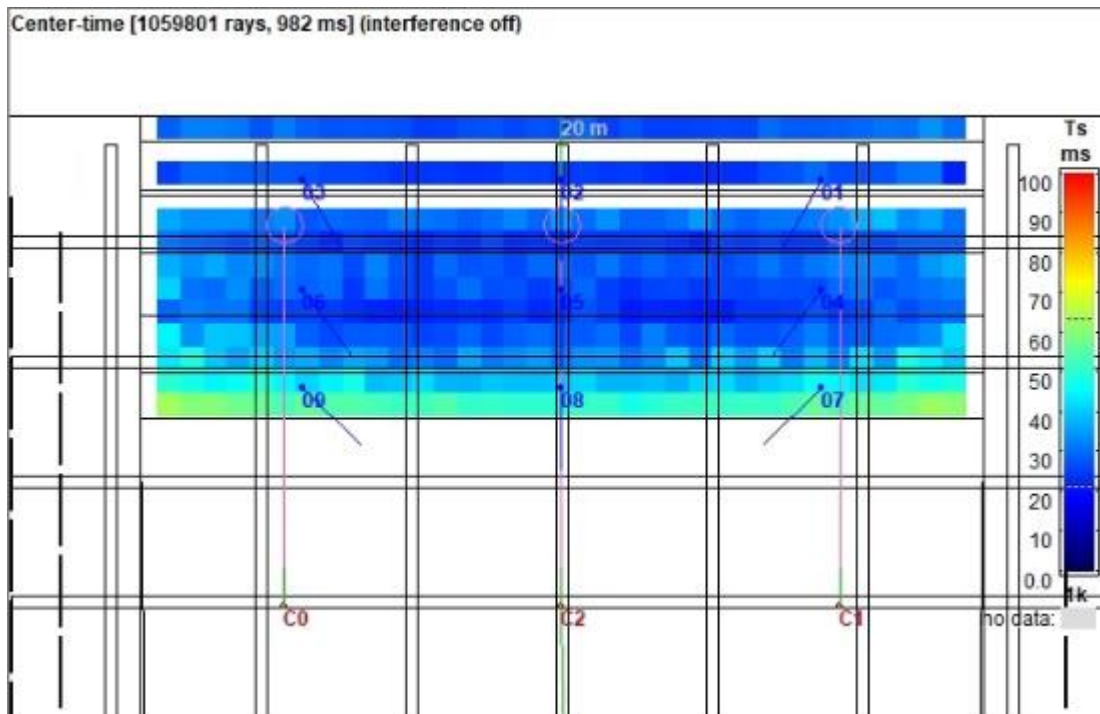
Εικόνα 105: EDT στο 1 kHz για ομιλία με ηχεία, χωρίς κοινό (KB803, BASWA,κουρτίνες και ανακλαστήρες).



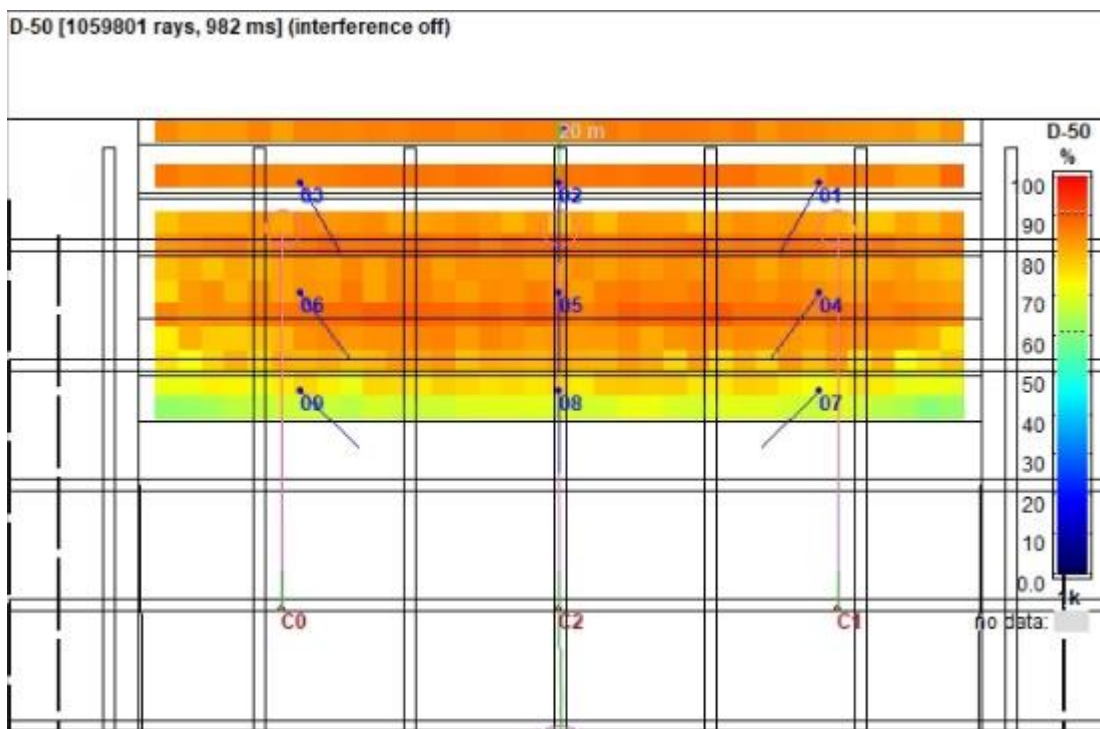
Εικόνα 106: T20 στο 1 kHz για ομιλία με ηχεία, χωρίς κοινό (KB803, BASWA,κουρτίνες και ανακλαστήρες).



Εικόνα 107: T30 στο 1 kHz για ομιλία με ηχεία, χωρίς κοινό (KB803, BASWA,κουρτίνες και ανακλαστήρες).

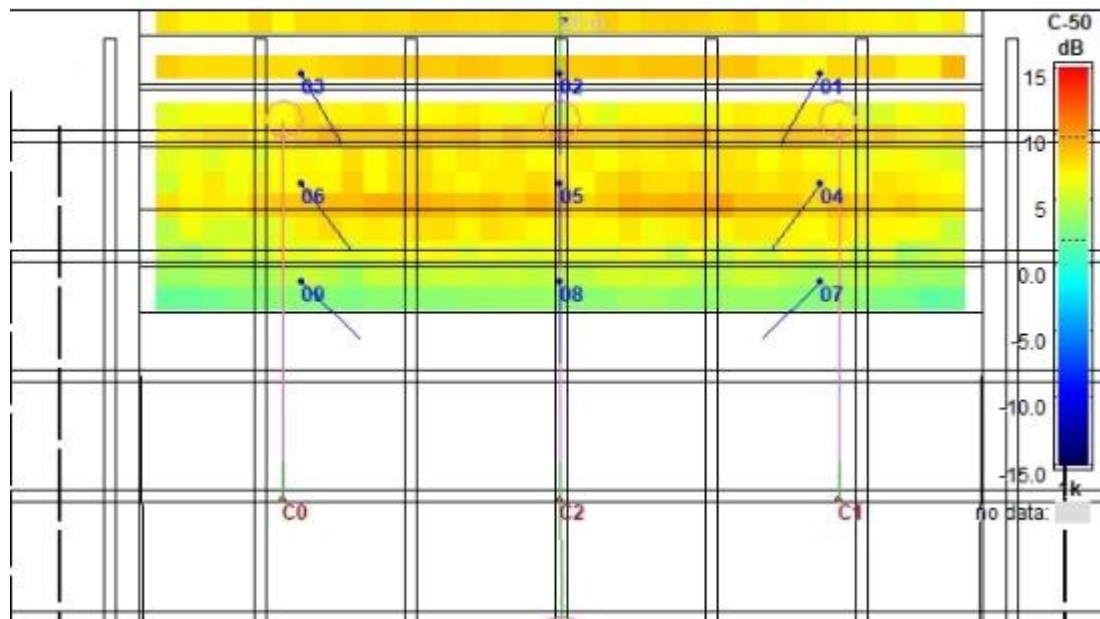


Εικόνα 108: TS στο 1 kHz για ομιλία με ηχεία, χωρίς κοινό (KB803, BASWA,κουρτίνες και ανακλαστήρες).



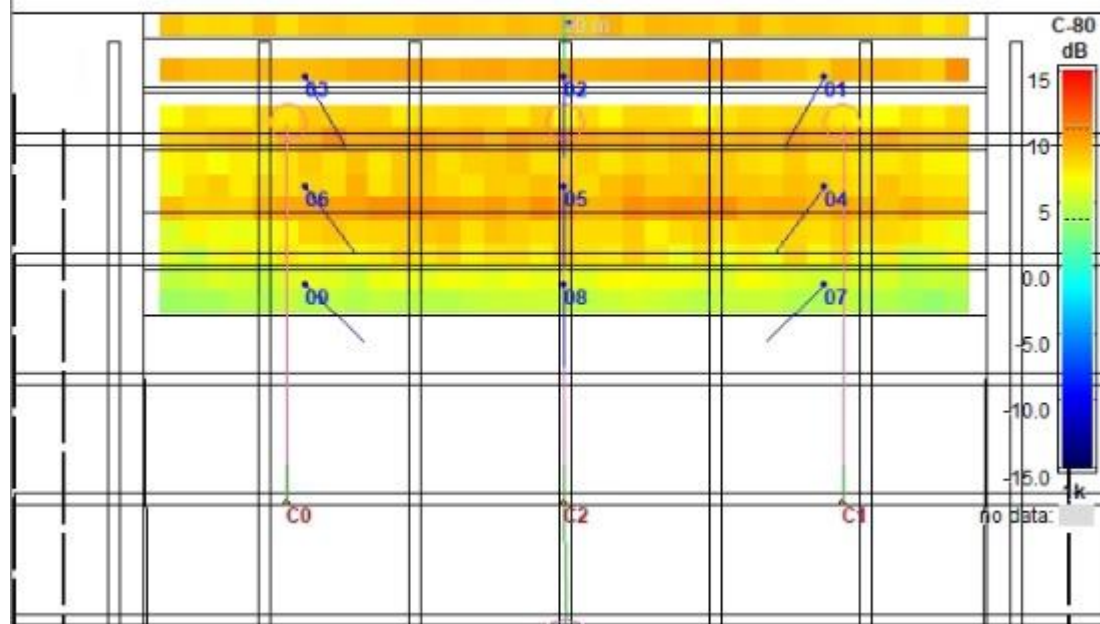
Εικόνα 109: D50 στο 1 kHz για ομιλία με ηχεία, χωρίς κοινό (KB803, BASWA,κουρτίνες και ανακλαστήρες).

C-50 [1059801 rays, 982 ms] (interference off)

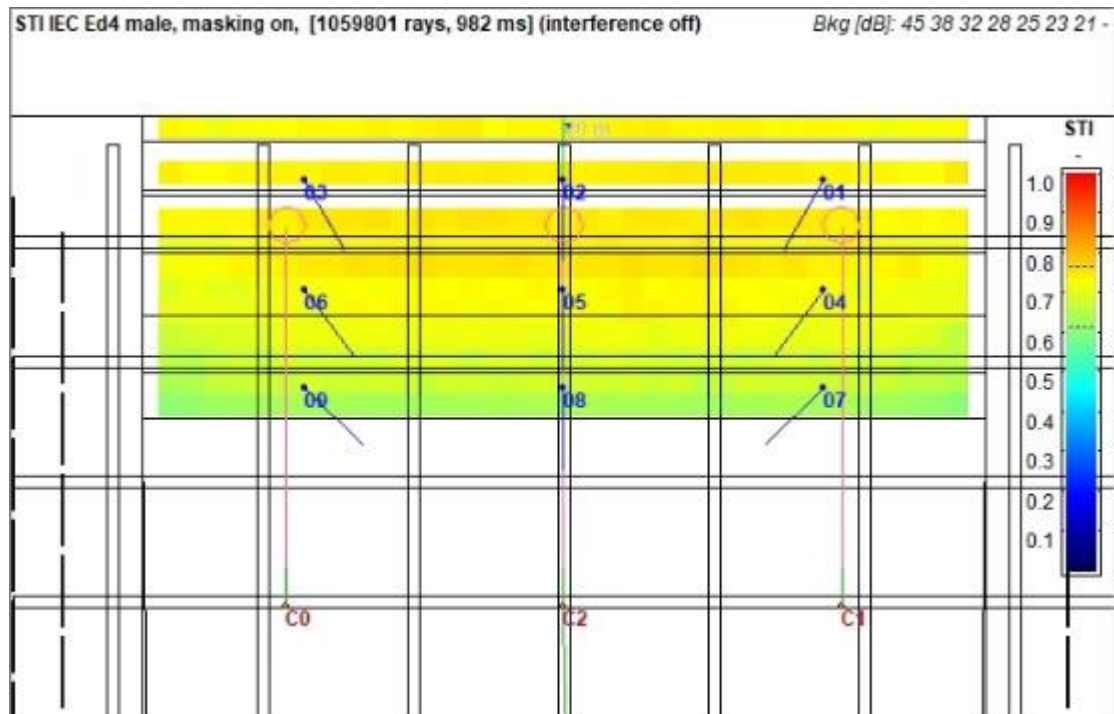


Εικόνα 110: C50 στο 1 kHz για ομιλία με ηχεία, χωρίς κοινό (KB803, BASWA, κουρτίνες και ανακλαστήρες).

Clarity [1059801 rays, 982 ms] (interference off)



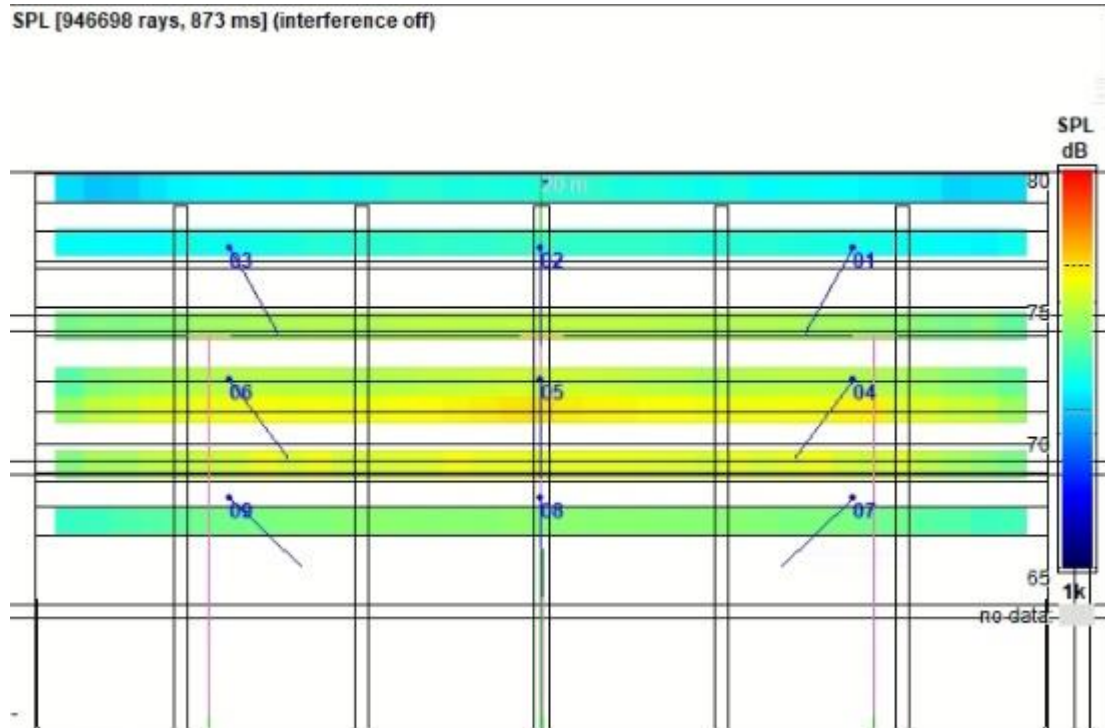
Εικόνα 111: C80 στο 1 kHz για ομιλία με ηχεία, χωρίς κοινό (KB803, BASWA, κουρτίνες και ανακλαστήρες).



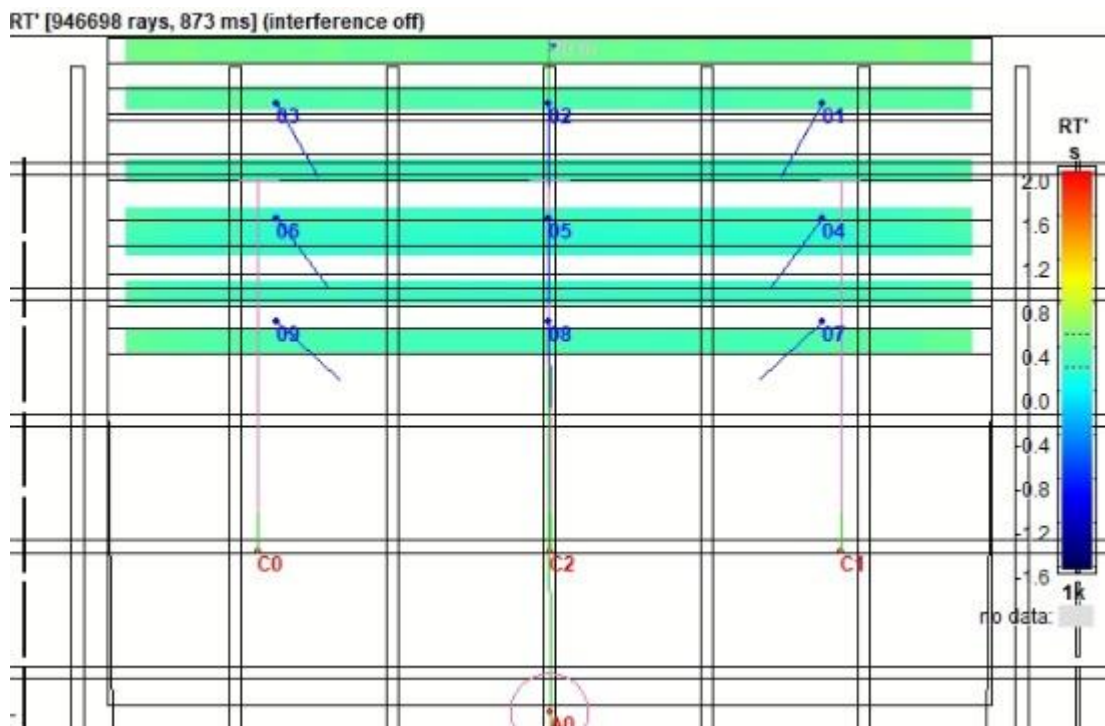
Εικόνα 112: STI στο 1 kHz για ομιλία με ηχεία, χωρίς κοινό (KB803, BASWA, κουρτίνες και ανακλαστήρες).

9.5.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων αίθουσας γεμάτης από κοινό

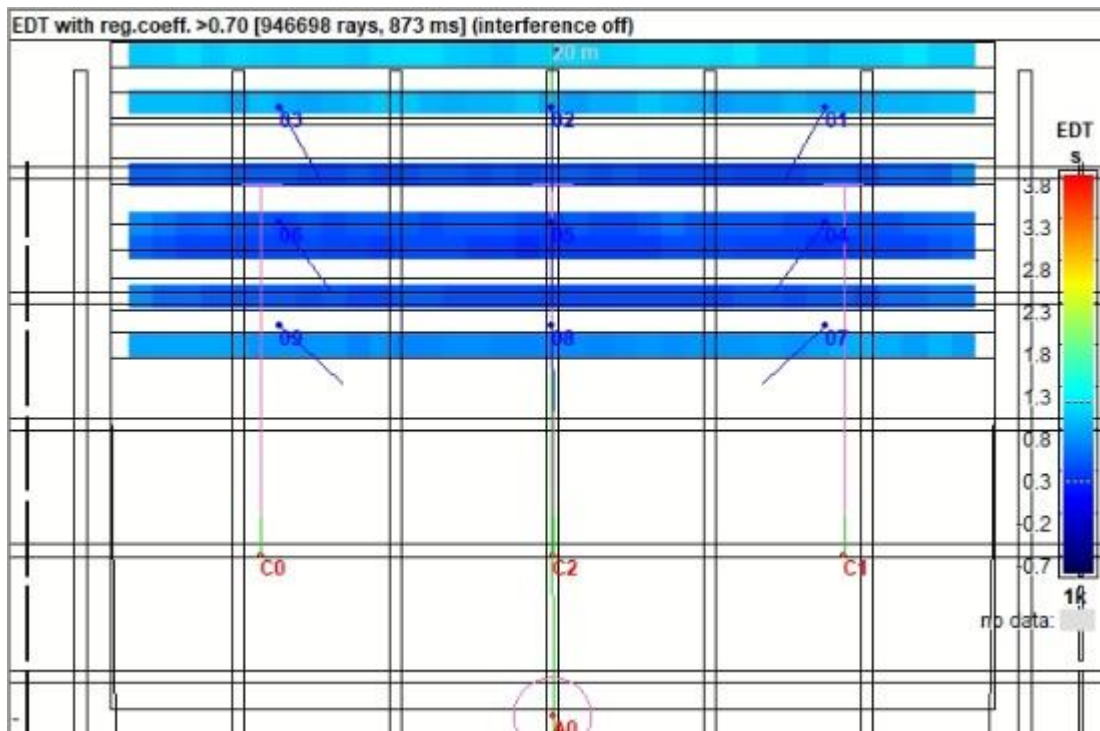
Ακολουθεί παρουσίαση των αποτελέσματα της προσομοίωσης, μέσω του λογισμικού CATT-Acoustic, για την περίπτωση ομιλίας με κουρτίνες και όλους τους ανακλαστήρες με κοινό.



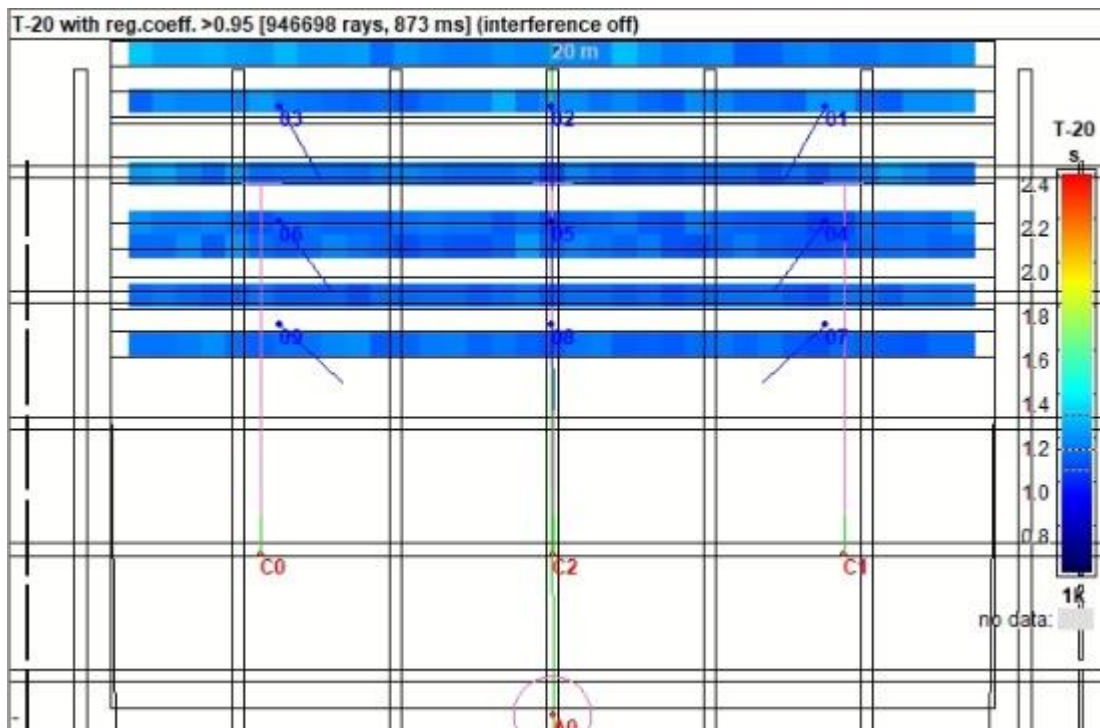
Εικόνα 113: SPL στο 1 kHz για ομιλία με ηχεία, με κοινό (KB803, BASWA, κουρτίνες και ανακλαστήρες).



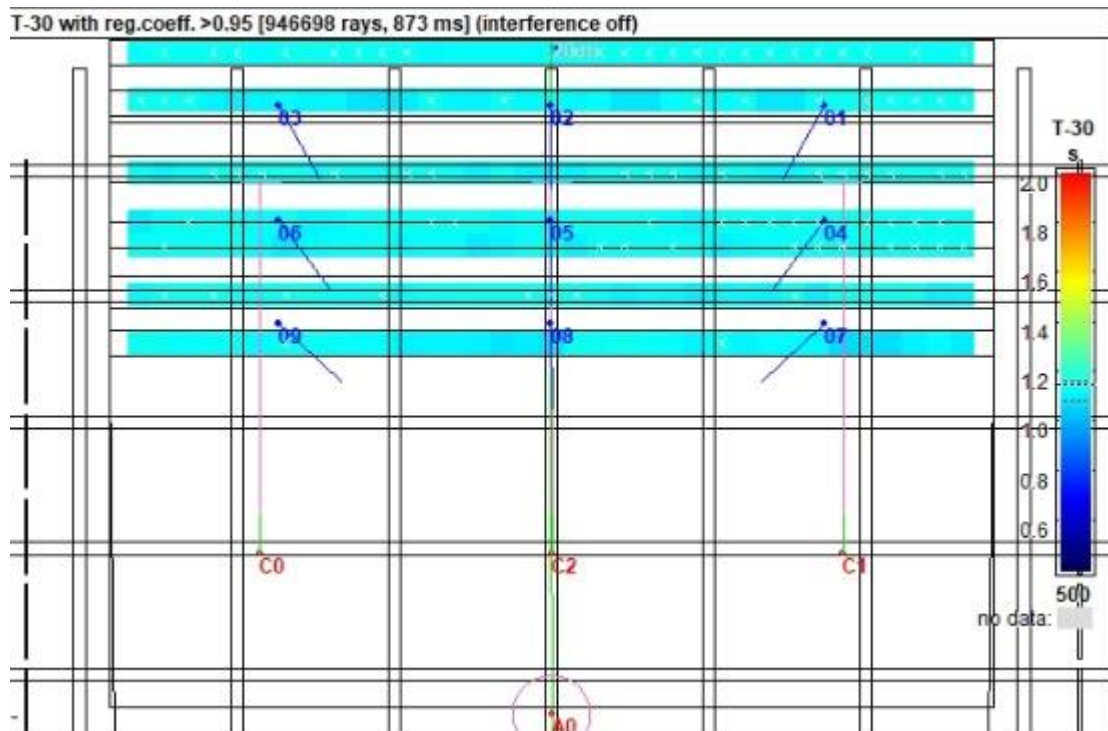
Εικόνα 114: RT' στο 1 kHz για ομιλία με ηχεία, με κοινό (KB803, BASWA, κουρτίνες και ανακλαστήρες).



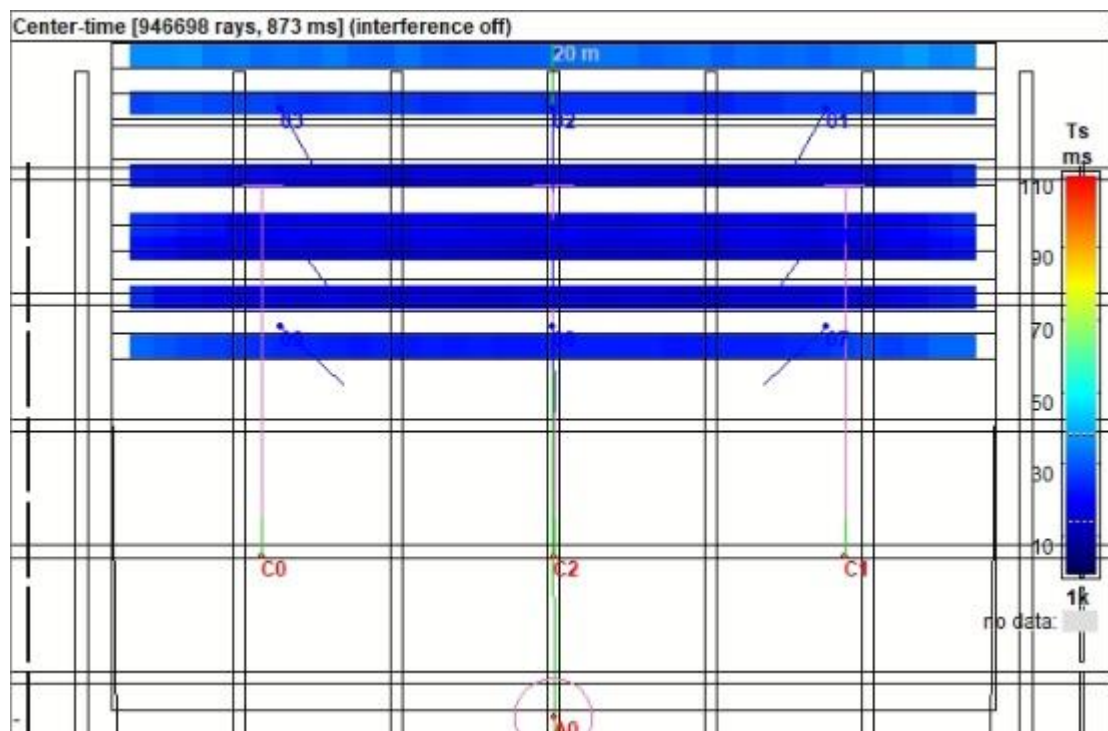
Εικόνα 115: EDT στο 1 kHz για ομάδα με ηχεία, με κοινό (KB803, BASWA, κουρτίνες και ανακλαστήρες).



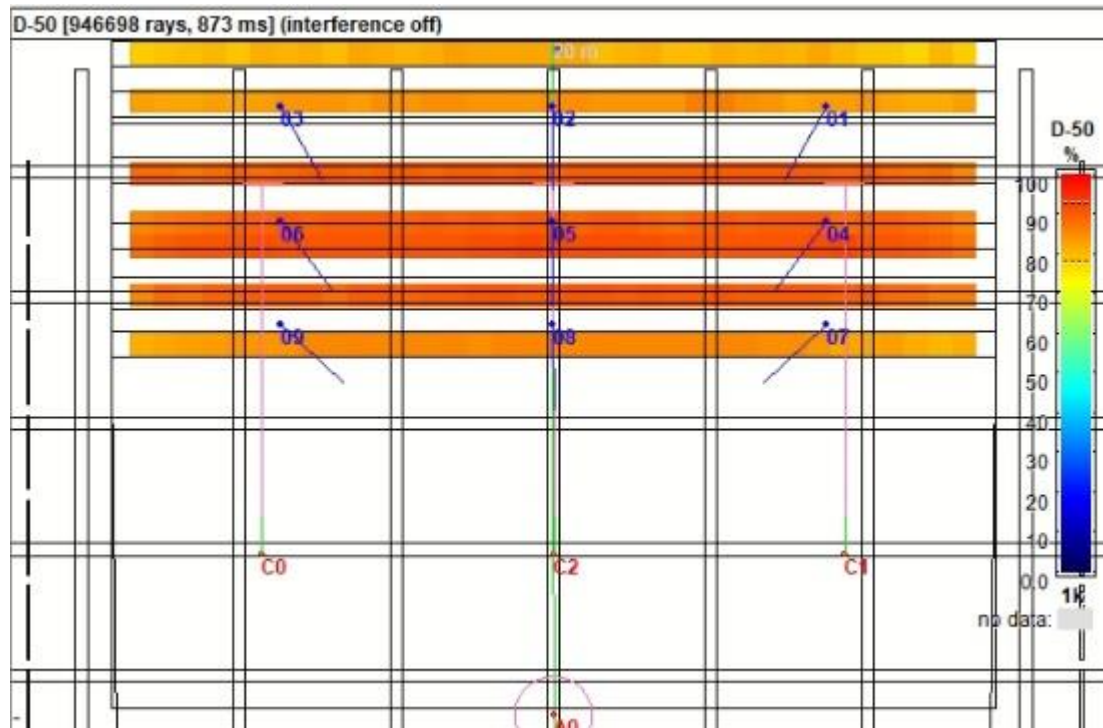
Εικόνα 116: T20 στο 1 kHz για ομάδα με ηχεία, με κοινό (KB803, BASWA, κουρτίνες και ανακλαστήρες).



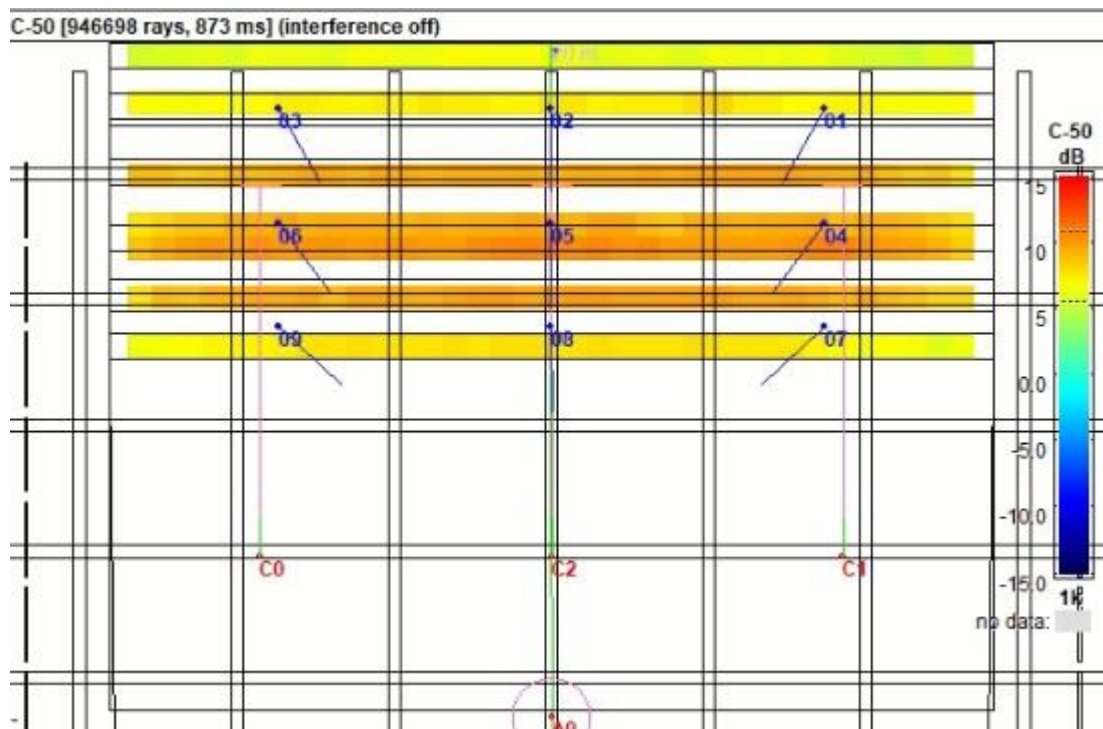
Εικόνα 117: T30 στο 1 kHz για ομάδα με ηχεία, με κοινό (KB803, BASWA,κουρτίνες και ανακλαστήρες).



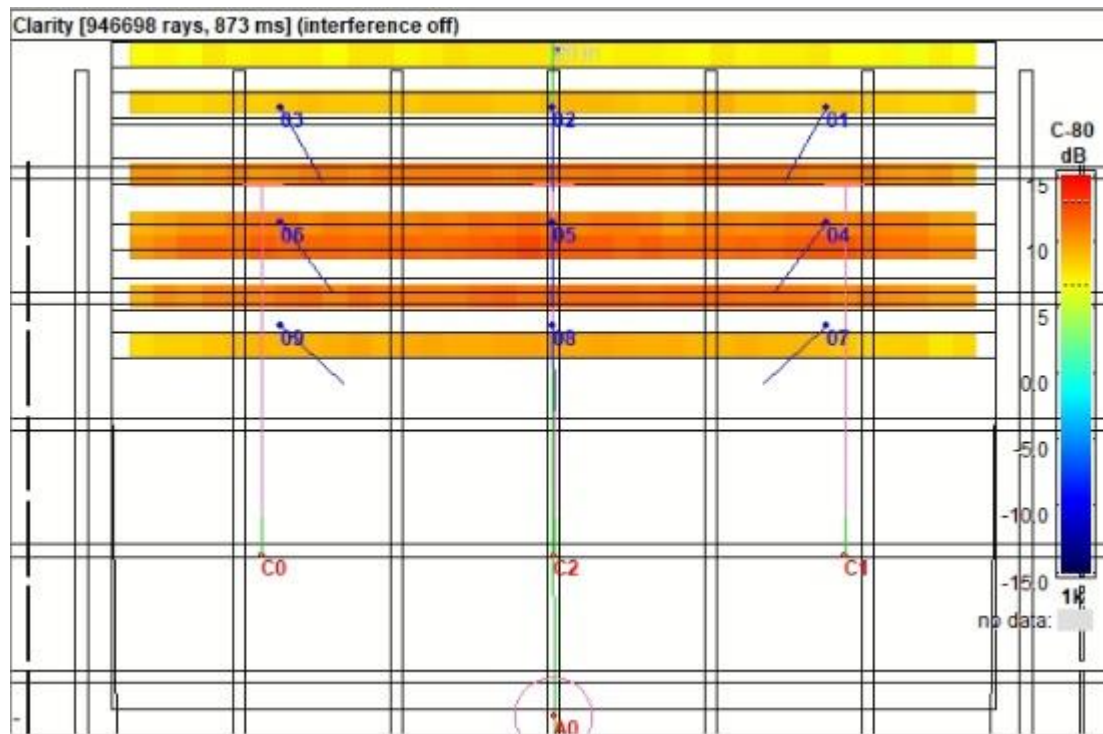
Εικόνα 118: TS στο 1 kHz για ομάδα με ηχεία, με κοινό (KB803, BASWA,κουρτίνες και ανακλαστήρες).



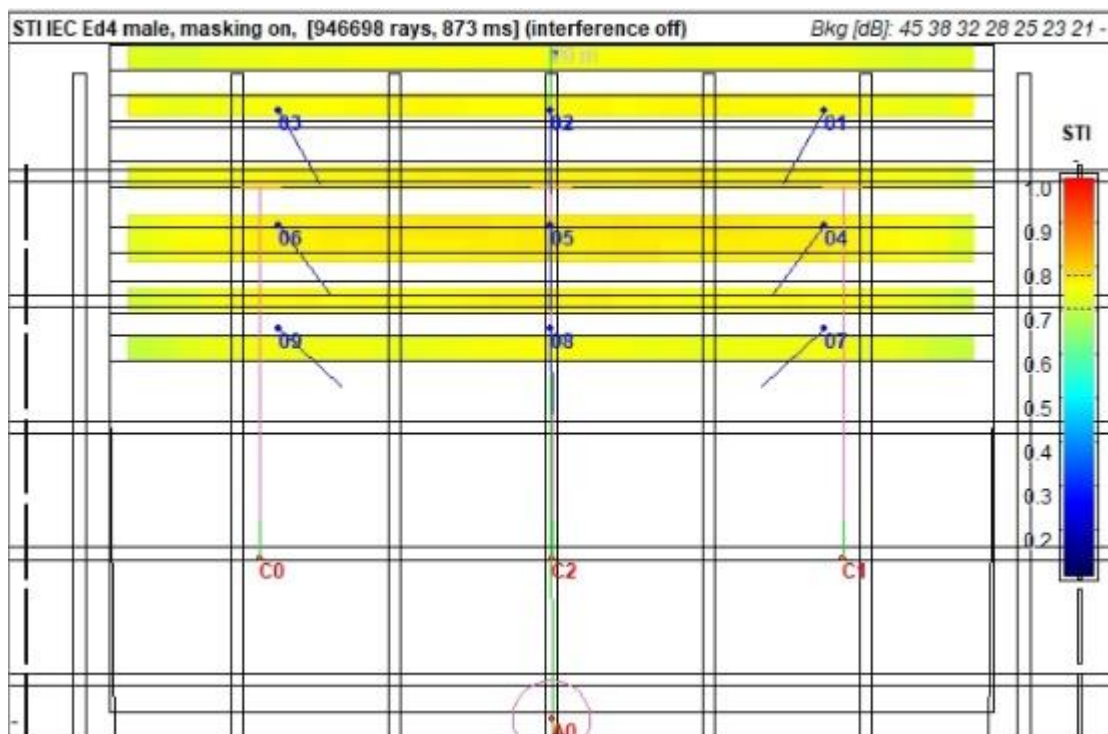
Εικόνα 119: D50 στο 1 kHz για ομιλία με ηχεία, με κοινό (KB803, BASWA,κουρτίνες και ανακλαστήρες).



Εικόνα 120: C50 στο 1 kHz για ομιλία με ηχεία, με κοινό (KB803, BASWA,κουρτίνες και ανακλαστήρες).



Εικόνα 121: C80 στο 1 kHz για ομιλία με ηχεία, με κοινό (KB803, BASWA, κουρτίνες και ανακλαστήρες).



Εικόνα 122: STI στο 1 kHz για ομιλία με ηχεία, με κοινό (KB803, BASWA, κουρτίνες και ανακλαστήρες).

9.6 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Οι προσομοιάσεις μέσω του λογισμικού και οι θεωρητικοί υπολογισμοί συνηγορούν σε επαρκής και ομοιόμορφες στάθμες ηχητικής πίεσης σε κάθε θέση του ακροατήριου. Αυτό ισχύει και στις δύο περιπτώσεις, άδειας και γεμάτης αίθουσας. Η παραπάνω διατύπωση αποτυπώνεται στο Διάγραμμα 203 καθώς και στις Εικόνες 103, 113.

Οι δείκτες STI και $\%AL_{cons}$ πληρούν τις προϋποθέσεις για καλή κατανόηση του λόγου σε κάθε θέση στο ακροατήριο σε κάθε περίπτωση που εξετάστηκε, για άδεια και γεμάτη αίθουσα, στο λογισμικό και στον θεωρητικό υπολογισμό. Η παραπάνω διατύπωση αποτυπώνεται στα Διαγράμματα 195-197, 205-206 καθώς και στις Εικόνες 112, 122.

Οι δείκτες καταληπτότητας και ευκρίνειας του λόγου D_{50} , C_{50} και C_{80} στις Εικόνες 109-111, 119-121 φανερώουν εξαιρετικά αποτελέσματα σε κάθε θέση του ακροατηρίου και στις 2 περιπτώσεις και είναι σε άμεση σχέση με τη αισθητή πτώση του δείκτη TS , όπως φαίνεται στις Εικόνες 108, 118.

Με βάση τους θεωρητικούς υπολογισμούς, όπως φαίνεται στους αντίστοιχους πίνακες (Πίνακες 32, 34) το σύστημα ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης που προτείνεται θα είναι ευσταθές, δίχως την εμφάνιση φαινομένων ανάδρασης, για κάλυψη της απαραίτητης στάθμης ηχητικής πίεσης σε κάθε θέση στο ακροατήριο και στις δυο περιπτώσεις. Όπως φαίνεται μάλιστα αυτό επιτυγχάνεται από κάθε ηχείο για κάθε θέση, πράγμα που υποδηλώνει πως ακόμη και η προσθήκη ενός ηχείου θα υπερκάλυπτε τις ανάγκες της αίθουσας. Σε καμία περίπτωση όμως δεν προτείνεται μείωση του αριθμού των ηχείων.

Οι Εικόνες 104, 114 υποδηλώνουν αρκετά χαμηλούς χρόνους αντήχησης. Το άνοιγμα ορισμένων κουρτινών θα μπορούσε να οδηγήσει σε αύξηση της τιμής του χωρίς να μειώνονται σημαντικά οι υπόλοιποι δείκτες.

Αντίστοιχα στις Εικόνες 105-107, 115-117 αποτυπώνονται υψηλότερες τιμές στους δείκτες EDT , T_{20} και T_{30} σε σχέση με τον RT' πράγμα που υποδηλώνει απότομη πτώση της καμπύλης Schroeder της αίθουσας, με ισχυρές πρώτες ανακλάσεις και ξαφνική απότομη μείωση του αντηχητικού πεδίου. Αυτό δεν συνάδει με τις ιδανικές προτάσεις για ομιλίες όπως ειπώθηκε στο αντίστοιχο Κεφάλαιο, δύναται δε να τροποποιηθεί με το άνοιγμα ορισμένων κουρτινών και την προσθήκη επιπλέον διαχυτικών διατάξεων.

Παρατηρώντας το σύνολο των αποτελεσμάτων μπορεί να ειπωθεί πως στο συγκεκριμένο στήσιμο της αίθουσας από άποψης ακουστικής (απορροφητικές

επιφάνειες και ανακλαστές) οι ακουστικές παραμέτροι της δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από τη προσθήκη του κοινού. Εμφανίζουν χαμηλές διακυμάνσεις πράγμα που υποδεικνύει μια σταθερότητα στον ακουστικό χαρακτήρα της αίθουσας ανεξάρτητα από τον αριθμό των παρευρισκόμενων ακροατών, πράγμα που κρίνεται θετικά.

Σε κάθε περίπτωση, η εγκατάσταση ηλεκτροακουστικού εξοπλισμού είναι απολύτως απαραίτητη σε μια αίθουσα πολλαπλών χρήσεων, πόσο μάλλον σε ένα Μέγαρο Χορού που πολλές από τις εκδηλώσεις που φιλοξενεί δεν νοούνται δίχως την αναπαραγωγή μουσικών κομματιών σε υψηλές στάθμες.

9.7 Επιπλέον εξοπλισμός

Ακολουθεί μια αναφορά σε επιμέρους εξοπλισμό που απαιτείται για τη σωστή χρήση, τοποθέτηση και καλωδίωση των ηχείων.

- Καλώδια XLR σήματος mic/line επιπέδου υψηλής ποιότητας. Τα ηχεία είναι ενεργά (αυτοενισχυόμενα) πράγμα που σημαίνει πως εμπεριέχουν τελικό ενισχυτή ισχύος εντός της καμπίνας τους και δέχονται ως είσοδο την έξοδο της κονσόλας απευθείας δίχως την παρεμβολή επιπλέον ενισχυτή. Τέτοια σήματα, επιπέδου line μεταφέρονται ιδανικά από καλώδια αντίστοιχα με αυτά μεταφοράς σημάτων επιπέδου mic.
- Ψηφιακή κονσόλα μίξης ήχου υψηλής ποιότητας.
- Ή εναλλακτικά αναλογική κονσόλα μίξης ήχου με συνοδεία των απαραίτητων περιφερειακών μονάδων δυναμικών επεξεργαστών και εφέ (Compressors, Gate, Graphic Equalizer, Reverb, Delay) στα αντίστοιχα rack cases τους.
- Ψηφιακός Επεξεργαστής διαχείρισης του τελικού σήματος μεταξύ έξοδου κονσόλας και εισόδου ηχείων για τη προσθήκη Limiter προστασίας, γραφική ισοστάθμιση τους (καλιμπράρισμα ή "κούρδισμα" με χρήση Swept Sine Tone ή Pink Noise και μετρητικού μικροφώνου), προσθήκη sub-harmonics και πιθανή ρύθμιση χρονικής καθυστέρησης του συστήματος (Line Delay).
- Δυναμικά μικρόφωνα φωνής καρδιοειδούς ή υπερκαρδιοειδούς πολικού διαγράμματος. Η αύξηση της κατευθυντικότητας των μικροφώνων όπως προαναφέρθηκε θα μειώσει περαιτέρω την πιθανότητα φαινομένων ανάδρασης.
- Στύλους μικροφώνων στα κατάλληλα ύψη.
- Ειδικά πλαίσια ανάρτησης U-Brackets UB2115 των συγκεκριμένων ηχείων όπως φαίνεται στα εγχειρίδια χρήσης και εγκατάστασης,

UB2115 U-Brackets



Εικόνα 123: U-Brackets UB2115 που προτείνονται από την εταιρία για ανάρτηση των συγκεκριμένων ηχείων [29].

- ή εναλλακτικά ανάρτησή τους με αλυσίδες και ναυτικά κλειδιά M10 με την ανάλογη πιστοποίηση ανοχής φορτίου.

9.8 Ρύθμιση Καθυστέρησης Συστήματος

Για την αποφυγή διαστρέβλωσης της προέλευσης του ήχου της αρχικής πηγής από το αντίστοιχο σήμα που αναπαράγεται από τα ηχεία, όπως αναλύεται στο κεφάλαιο περί των ανακλάσεων προτείνεται η χρήση μηχανής καθυστέρησης του τελικού σήματος από τη κονσόλα μίξης προς τα ηχεία κατά 5,86 msec. Η τιμή αυτή προκύπτει από το μέσο όρο των αποστάσεων σημείων ακρόασης και ηχείων, για κάθε συνδυασμό. Η μέση απόσταση αφαιρείτε από τη μέση απόσταση της θέσης του ομιλητή προς κάθε σημείο ακρόασης και το αποτέλεσμα διαιρείται με τη ταχύτητα του ήχου. Σε περίπτωση διαφορετικής θέσης των πηγών (ομιλητών ή μουσικών οργάνων) η τιμή θα πρέπει να υπολογίζεται εκ νέου κατά τον ίδιο τρόπο. Κατά την εγκατάσταση της ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης προτείνεται η διενέργεια ακουστικών δοκιμών με χρήση της προτεινόμενης τιμής καθυστέρησης καθώς και παραπλήσιων για εύρεση διαφορών στο τελικό άκουσμα και πιθανή επιλογή διαφορετικής τιμής.

Το αποτέλεσμα της προσθήκης καθυστέρησης (delay), εκμεταλλεύόμενο τους νόμους της ψυχοακουστικής (*ITD*) που παρουσιάστηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο, θα βοηθήσει στην διατήρηση της αίσθησης της προέλευσης του αρχικού ήχου της πηγής.

ΣΥΝΟΨΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ακουστική μελέτη με στόχο τη βελτίωση της ακουστικής ποιότητας ενός κλειστού χώρου μπορεί να γίνει μια πολύπλοκη διαδικασία. Στην παρούσα διπλωματική έγινε προσπάθεια να αναδειχθούν όλοι εκείνοι οι παράγοντες που ο μηχανικός ήχος πρέπει να λάβει υπόψη του για να πετύχει τον στόχο του.

Έπειτα από μετρήσεις των ακουστικών παραμέτρων της προς μελέτης αίθουσας, με τρεις διαφορετικούς τρόπους, επιτεύχθηκε η σύγκριση τους με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον σχεδιασμό της αίθουσας στο λογισμικό CATT Acoustic. Η προσωπική εμπειρία ακρόασης στον συγκεκριμένο χώρο επίσης βοήθησε την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Οι μετρήσεις επιπλέον βοήθησαν στην επιλογή των συντελεστών απορρόφησης των υλικών από τα οποία απαρτίζεται, στην τωρινή της κατάσταση, η αίθουσα.

Τα αποτελέσματα της ακουστικής μελέτης, έπειτα από την προσθήκη ανακλαστήρων και απορροφητικών διατάξεων υποδεικνύουν πως είναι δυνατή η βελτίωση της ακουστικής ποιότητας της αίθουσας σε μεγάλο βαθμό. Η δυνατότητα της μεταβολής των ακουστικών παραμέτρων, μέσω των μηχανισμών που παρουσιάστηκαν, δίνει τη δυνατότητα επιλογής της βέλτιστης ρύθμισης τους, ανά περίπτωση. Η πραγματοποίηση δοκιμαστικών ρυθμίσεων έπειτα από την διεκπεραίωση της μελέτης και πριν την αρχή λειτουργίας της αίθουσας, θα επιβεβαιώσει τις ιδανικές ρυθμίσεις, χωρίς να αποκλείεται ή προσωπική επιλογή από μουσικούς, εκτελεστές κ.τ.λ., καθώς όπως ανέδειξε η παρούσα διπλωματική εργασία, οι περισσότερες ιδανικές τιμές των ακουστικών παραμέτρων βασίζονται σε υποκειμενικές εκτιμήσεις.

Σημειώνεται πως, λόγω της πολυπλοκότητας και της αλληλεπίδρασης των διαφορετικών ακουστικών παραμέτρων από κοινούς παράγοντες (ανακλάσεις, απορρόφηση), υπήρξαν θέσεις στο ακροατήριο στις οποίες ορισμένες ακουστικές παράμετροι επιδέχονται περισσότερη μελέτη, κάτι που θα μπορούσε να προσφέρει ακόμη καλύτερα αποτελέσματα. Προς όφελος ορισμένων κάποιες άλλες παρεκτράπηκαν από τα ιδανικά όρια.

Τέλος, φάνηκε πως μέσω της ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης που προτείνεται, οι απαραίτητες στάθμες ηχητικής πίεσης καθώς και οι ακουστικοί δείκτες θα ικανοποιούν τις απαιτήσεις για καλή και ποιοτική ακουστική ακρόαση σε ολόκληρη την έκταση του ακροατηρίου.

- [1] Δ. Ευθυμιάτος, *Ακουστική & κτιριακές εφαρμογές*. Αθήνα: Παπασωτηρίου, 2007.
- [2] F. A. Everest, *Εγχειρίδιο ακουστικής*, (3^η έκδοση). Θεσσαλονίκη: Τζιολα, 2003.
- [3] Δ. Σκαρλάτος, *Εφαρμοσμένη Ακουστική*, (3^η έκδοση). Πάτρα: Gotsis, 2008.
- [4] Ν. Τσινίκας, *Ακουστικός σχεδιασμός χώρων*. Θεσσαλονίκη: Univercity studio press, 1990.
- [5] Σ. Ι. Λουτρίδης, *Ηλεκτροακουστική & ηχητικές εγκαταστάσεις*. Αθήνα: Ίων, 2009.
- [6] *Localization 101: Hearing Aid Factors in Localization*. [Online]. Available: <https://hearingreview.com/hearing-loss/hearing-disorders/apd/localization-101-hearing-aid-factors-localization>. [Accessed: 08-Aug-2023].
- [7] L. Sun, X. Zhong and W. A. Yost, *Dynamic binaural sound source localization with interaural time difference cues: Artificial listeners*, *The journal of the Acoustical society of America*, April-2015. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/276473132_Dynamic_binaural_sound_source_localization_with_interaural_time_difference_cues_Artificial_listeners/citations. [Accessed: 09-Aug-2023].
- [8] *Music and computers. A theoretical and historical approach: Chapter 5: The Transformation of Sound by Computer, Section 5.3: Localization/Spatialization*. [Online]. Available: http://sites.music.columbia.edu/cmc/MusicAndComputers/chapter5/05_03.ph. [Accessed: 09-Aug-2023].
- [9] *LibreTexts medicine 5.5: Auditory System - Central Processing*. [Online]. Available: https://med.libretexts.org/Sandboxes/admin/Introduction_to_Neuroscience_%28Hedges%29/05%3A_Sensory_Systems/5.05%3A_Auditory_System-Central_Processing. [Accessed: 09-Aug-2023].
- [10] *Absorption Coefficients*. [Online]. Available: https://www.acoustic.ua/st/web_absorption_data_eng.pdf. [Accessed: 15-Aug-2023].

- [11] *List of Absorption Coefficients*. [Online]. Available: <https://www.auralexchange.com/knowledgebase/list-of-absorbtion-coefficients/>. [Accessed: 15-Aug-2023].
- [12] *Instructions manual*. [Online]. Available: <https://www.manualslib.com/manual/844273/Norsonic-Nor118.html#manual>. [Accessed: 28-Jul-2023].
- [13] *Behringer ECM8000 manual*. [Online]. Available: <https://www.manua.ls/behringer/ecm8000/manual>. [Accessed: 31-Jul-2023].
- [14] *EKX Powered Loudspeakers*. [Online]. Available: https://products.electrovoice.com/binary/EKX_Powered_F01U318952_en.pdf. [Accessed: 31-Jul-2023].
- [15] *Clarett 2 Pre, User Guide*. [Online]. Available: <https://fael-downloads-prod.focusrite.com/customer/prod/s3fs-public/downloads/Clarett%2B%20Pre%20User%20Guide%20V2.pdf>. [Accessed: 31-Jul-2023].
- [16] *E-PAC Amplifier Hardware manual*. [Online]. Available: <https://www.dbaudio.com/assets/products/downloads/out-of-production/dbaudio-manual-hardware-e-pac-1.2-en.pdf>. [Accessed: 28-Jul-2023].
- [17] *notospress.gr*. [Online]. Available: <https://www.notospress.gr/life/gallery/79511/kataxeiokrotithike-to-aristoergima-sunrise-sto-megaro-xoroy-kalamatas>. [Accessed: 15-Aug-2023].
- [18] *kalamatafaris.gr*. [Online]. Available: https://kalamatafaris.gr/wp-content/uploads/2023/02/IMG_20230204_213437-scaled-e1675684571463.jpg. [Accessed: 15-Aug-2023].
- [19] *messinialive.gr*. [Online]. Available: <https://www.messinialive.gr/synechizontai-seminaria-tou-ekpaideftikou-programmatos-keep-dancing/>. [Accessed: 15-Aug-2023].
- [20] *eleftheriaonline.gr*. [Online]. Available: <https://eleftheriaonline.gr/local/politismos/ekdiloseis/item/206570-i-kalamata-agkaliase-to-routelab-to-taksidi-ksekinise-vinteo>. [Accessed: 15-Aug-2023].
- [21] *REW V5.20 Help*. [Online]. Available: <https://www.roomeqwizard.com/>. [Accessed: 29-Jul-2023].
- [22] *Dirac room acoustics software Type 7841*. [Online]. Available: <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp1974.ashx>. [Accessed: 28-Jul-2023].
- [23] *Sound absorption data for common building materials and furnishin*. [Online]. Available: http://mapleintegration.com/sound_ab.php. [Accessed: 21-Aug-2023].

- [24] R.B. Newman, "*Acoustics*" in J.H. Callender (ed.), *Time-Saver Standards for Architectural Design Data*, McGraw-Hill, New York, 1974, p. 696
- [25] *Acoustics in music: outdoor, indoor and isolated spaces*. [Online]. Available: <https://online.berklee.edu/takenote/acoustics-in-music/>. [Accessed: 09-Aug-2023].
- [26] *Tutorial for the handbook for avoustic ecology. Sound propagation in open and enclosed spaces*. [Online]. Available: <http://www.sfu.ca/sonic-studio-webdav/cmns/Handbook%20Tutorial/Sound-Environment.html>. [Accessed: 09-Aug-2023].
- [27] *Sign hanging systems - ceiling acoustic*. [Online]. Available: <https://www.artiteq.com/en/product/sign-hanging-systems-ceiling-acoustic/>. [Accessed: 15-Sept-2023].
- [28] *Ovation reflectors. Acoustical reflector/diffuser*. [Online]. Available: <https://kineticsnoise.com/ovation/acoustical-reflector-diffuser?file=files/content/downloads/data-sheets/ovation.pdf&cid=18857>. [Accessed: 15-Sept-2023].
- [29] *Yamaha If2115 data sheet*. [Online]. Available: <https://usermanual.wiki/Yamaha/If2115If2115MDataSheet.935718611/html>. [Accessed: 11-Sept-2023].
- [30] *CLF files Section*. [Online]. Available: <http://www.clfgroup.org/files/index.php>. [Accessed: 11-Sept-2023].
- [31] *Guard assembly hand winch 200mm dia x 15 metre travel*. [Online]. Available: <https://stage-shop.com/curtains-tracks/curtain-controllers/manual-curtain-controllers/guard-assembly-hand-winch-200mm-dia-x-15-metre-travel>. [Accessed: 05-Sept-2023].
- [32] *Motorized curtain track Power 801*. [Online]. Available: <https://www.archiexpo.com/prod/mottura-spa/product-61328-733778.html>. [Accessed: 05-Sept-2023].
- [33] E. Green, M. Barron, E. Kahle, T. Halmrast, W. Lachenmayr, H. Moller, U. Stephenson, L. Strepi, B. Stofringsdal, "*Development of a technical memorendum describing optimal room acoustic parameter ranges for musical performance and rehearsal spaces*", Joint Acoustics Conference, 9th-11th-May-2022, Aalborg. [Online]. Available: https://www.conforg.fr/erbnam2022/output_directory/data/articles/000043.pdf. [Accessed: 08-Sept-2023].
- [34] M. Dunn, D. Protheroe, "*Visualizarion of early reflections in control rooms*", Audio Engineering Society, 137th Convention, 9-12-Oct-2014. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=17480>. [Accessed: 08-Sept-2023].

- [35] A. Escobar, T. Zamarreno, S.Giron, " *Virtual Acoustics of the cathedral of Cadiz*", *TecniAcustica*, 49th Congreso Espanol de Acustica, 24th-26th-oct-2018, Cadiz. [Online]. Available: https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/99579/ASL-0_017.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [Accessed: 09-Sept-2023].
- [36] T. Fidecki, " *Room Acoustics and Sound Reinforcement Systems*". [Online]. Available: <https://www.ire.pw.edu.pl/~mmedia/pub/Acoustics%20and%20Audio%20Technology/Room%20acoustics/Room%20acoustics%20and%20sound%20systems.pdf>. [Accessed: 16-Sept-2023].
- [37] H. Moller, J. Hyde, " *Behavior of lateral energy in small concert halls*". [Online]. Available: https://www.akutek.info/Papers/HM_SmallHall_LF.pdf. [Accessed: 15-Sep-2022].
- [38] P. Guidorzi, L. Barbaresi, D. D'Orazio, M.Garai, " *Impulse responses measured with MLS or Swept-Sine signals applied to architectural acoustics: an in-depth analysis of the two methods and some case studies of measurements inside theaters*", *ScienceDirect*, 6th International Building Physics Conference, Bologna, 2015. [Online]. Available: www.sciencedirect.com. [Accessed: 25-Jun-2023].
- [39] "ASC Steel deck, Sound absorption data". [Online]. Available: <https://ascsd.com/wp-content/uploads/ASCSD-Sound-Absorption-Data.pdf>. [Accessed: 17-Aug-2023].
- [40] E. Toyoda, S. Sakamoto, H. Tachibana, " *Effects of room shape and diffusing treatment on the measurment of sound absorption coefficient in a reverberation room*", *Acoust. Sci & Tech.*, 25-Apr-2004. [Online]. Available: https://www.jstage.jst.go.jp/article/ast/25/4/25_4_255/_pdf/-char/en. [Accessed: 08-Aug-2023].
- [41] L. L. Beranek, *Acoustics*. Cambridge: Acoustic Laboratory Massachusetts Institute of Technology Bolt Beranek and Newmann, Inc, 1993. [Online]. Available: https://www.academia.edu/35252349/Leo_L_Beranek_Acoustics. [Accessed: 10-Aug-2023].
- [42] A. Farina, "Measurments of the surface scattering coefficient: comparison of the Mommertz/Vorlander approach with the new Wave Filed Synthesis method". [Online]. Available: <http://pcfarina.eng.unipr.it/Public/Papers/138-Sem00.PDF>. [Accessed: 30-Aug-2023].
- [43] H. Kuttruff, *Room Acoustics* (4th edition). London: Spon Press, 2000. [Online]. Available: <https://danylastchild07.files.wordpress.com/2016/05/room-acoustics-kuttruff.pdf>. [Accessed: 12-Aug-2023].
- [44] I. Rees, " *Common oitfalls in computer modelling of room acoustics*", *Proceedings of the Institute of Acoustics*. Norwich, Adrian James Acoustics Ltd.

- [Online]. Available: <https://www.adrianjamesacoustics.com/papers/Common%20pitfalls%20in%20computer%20modelling%20of%20room%20acoustics.pdf>. [Accessed: 29-Jun-2023].
- [45] S. Mason, "*Simplified Architectural Models and Affected Acoustic Parameters. Creation of a method to simplify architectural models and the effects of the simplified models on various room acoustic parameters*". Master's thesis in Master Program Sound and Vibration, Chalmers University of Technology, Gothenburg, 2020. [Online]. Available: <https://odr.chalmers.se/items/f0e25f20-4cb1-4586-bfc2-8ba96552a4a2>. [Accessed: 20-Aug-2023].
- [46] A. James. "Computer modelling with Catt-Acoustic- Theory and practice of diffuse reflection and array modeling". [Online]. Available: <https://www.adrianjamesacoustics.com/papers/cattacoustic.pdf>. [Accessed: 20-Aug-2023].
- [47] *ShowTex Wool Serge Panne, technical data sheet*. [Online]. Available: <https://www.showtex.com/en/products/flame-retardant-textiles/masking-blackout/wool-serge-panne>. [Accessed: 15-Aug-2023].
- [48] *Kinetics KB803 Acoustical Ceiling Baffles*. [Online]. Available: <https://kineticsnoise.com/kb803/noise-control-ceiling-baffles>. [Accessed: 15-Aug-2023].
- [49] *Baswa Phon Classic Fine*. [Online]. Available: <https://www.baswa.com/en/product/baswa-phon-classic-fine/>. [Accessed: 15-Aug-2023].
- [50] *Material Data*. [Online]. Available: https://cds.cern.ch/record/1251519/files/978-3-540-48830-9_BookBackMatter.pdf. [Accessed: 15-Aug-2023].
- [51] *Digital Audio Wiki, Sound in Air*. [Online]. Available: https://digital-audio.fandom.com/wiki/Sound_in_Air. [Accessed: 15-Sept-2023].
- [52] K. Γεωργιάκης, "Ένα blog για τη Φυσική, Απλή Αρμονική Ταλάντωση (A.A.T) Εξισώσεις κίνησης". [Online]. Available: <https://www.g-physics.com/2012/06/blog-post.html>. [Accessed: 15-Sept-2023].
- [53] A. Z. Jones, "Ταλάντωση και περιοδική κίνηση". [Online]. Available: <https://el.eferrit.com/%CF%84%CE%B1%CE%BB%CE%AC%CE%BD%CF%84%CF%89%CF%83%CE%B7-%CE%BA%CE%B1%CE%B9-%CF%80%CE%B5%CF%81%CE%B9%CE%BF%CE%B4%CE%B9%CE%BA%CE%AE-%CE%BA%CE%AF%CE%BD%CE%B7%CF%83%CE%B7/>. [Accessed: 15-Sept-2023].

- [54] “Please enlighten me Cubase Audio Performance Meter”. [Online]. Available: <https://forums.steinberg.net/t/please-enlighten-me-cubase-audio-performance-meter/142988>. [Accessed: 15-Sept-2023].
- [55] Phy chem bi “3,3 define amplitude, frequency, wavelength and period of a wave”. [Online]. Available: <https://phychembi.tumblr.com/post/109358569611/33-define-amplitude-frequency-wavelength-and>. [Accessed: 16-Sept-2023].
- [56] “Fourier Series”. [Online]. Available: <https://www.compadre.org/osp/EJSS/4487/272.htm>. [Accessed: 16-Sept-2023].
- [57] “Digital Signal Processing with MATLAB Applications”. [Online]. Available: https://www.udemy.com/course/digital-signal-processing-with-matlab-applications/?amp=&aff_code=Ewh3Y11WQH8FQR93MkBPbG1RGXffW1h8B14ZeU5TQ3YBRxFzWj5XMRM%3D&pmtag=CAREERS24LEARN15&utm_campaign=careers24octlaunch&utm_medium=web. [Accessed: 16-Sept-2023].
- [58] M. Muhr, Sinran sinran Pack, R. Schwarz, S. Kornhuber, B. Koerbler, “Sound Analysis and PD measurement of HV transmission lines”. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/307936434_Sound_analysis_and_PD_measurement_of_HV_transmission_lines. [Accessed: 16-Sept-2023].
- [59] “Συμπιεσμένος Ήχος: Χρησιμοποιώντας το MP3 και άλλους Perceptual Codecs”. [Online]. Available: https://avmentor.gr/tech/perceptual_codecs_2.htm. [Accessed: 16-Sept-2023].
- [60] R. Bernhard, R. Wayson, J. Haddock, N. Neithalath, A. El-Aassar, J. Olek, T. Pellinen, W. Weiss. “An Introduction to Tire/Pavement Noise of Asphalt Pavement”. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/An-Introduction-to-Tire-Pavement-Noise-of-Asphalt-Bernhard-Wayson/fb816c10bafce501129495b1f5dc95f21c4db934>. [Accessed: 16-Sept-2023].
- [61] “Tontechnik-Rechner-sengpielaudio. Comb filters”. [Online]. Available: <http://www.sengpielaudio.com/calculator-combfilter.htm>. [Accessed: 16-Sept-2023].
- [62] R. S. A. R. Abdullah, Saleh, S. Mumtazah, Zamri, Rashid, “Texture Classification Using Spectral Entropy of Acoustic Signal Generated by a Human Echolocator”. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/336227251_Texture_Classification_Using_Spectral_Entropy_of_Acoustic_Signal_Generated_by_a_Human_Echolocator. [Accessed: 17-Sept-2023].
- [63] “Complete Communications Engineering, Critical Distance”. [Online]. Available: <https://vocal.com/dereverberation/critical-distance/>. [Accessed: 17-Sept-2023].

- [64] E. I. Hristev, “Sound field descriptors”. [Online]. Available: <https://slideplayer.com/slide/8409987/>. [Accessed: 17-Sept-2023].
- [65] “Echo trzepoczace”. [Online]. Available: https://brasil.cel.agh.edu.pl/~14sapyzik/index0743.html?page_id=69. [Accessed: 17-Sept-2023].
- [66] “T.akustik-PET Wall absorber 120 data sheet”. [Online]. Available: https://images.static-thomann.de/pics/atg/atgdata/document/specs/522257_etc_v3_datasheet_en_online.pdf. [Accessed: 17-Sept-2023].
- [67] A. Daza, “Reverberation Time recommended depending on activity and volume of the room” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/profile/Andrea-Daza-2/publication/336900465/figure/fig1/AS:819748187164674@1572454606472/Reverberation-Time-recommended-depending-on-activity-and-volume-of-the-room-Source.ppm>. [Accessed: 19-Sept-2023].
- [68] Σ. Ποτηράκης, Ν. Α. Τάτλας, “Εφαρμοσμένη Ακουστική” [Πανεπιστημιακές σημειώσεις]. Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών. Αιγάλεω, 2019.
- [69] Σ. Ποτηράκης, “Ηλεκτρακουστική” [Πανεπιστημιακές σημειώσεις]. Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών. Αιγάλεω, 2019.
- [70] “Real Traps – Graphical Mode Calculator”. [Online]. Available: <https://realtraps.com/modecalc.htm>. [Accessed: 01-Sept-2023].
- [71] Torche L shape wall mount foldable bracket. [Online]. Available: <https://www.flipkart.com/torche-l-shape-wall-mounted-foldable-bracket-folding-steel-hings-12-inches-12-shelf/p/itm24e17f2d9024c>. [Accessed: 13-Sept-2023].
- [72] Heavy duty Folding Shelf Brackets. [Online]. Available: https://www temu.com/gr-en/2pcs-folding-shelf-brackets-8inch-10inch-12inch-heavy-duty-floating-triangle-shelf-brackets-collapsible-shelves-brackets-wall-mounted-l-table-hinges-brackets-for-bench-table-with-screws-g-601099513877625.html?top_gallery_url=https%3A%2F%2Fimg.kwcdn.com%2Fproduct%2FFancyalgo%2FVirtualModelMatting%2F191dbd37dda65f11c6ad243d5bd b1de0.jpg&spec_gallery_id=12710463&refer_page_sn=10009&refer_source=10022&freesia_scene=2&oak_freesia_scene=2&oak_rec_ext_1=OTk4&refer_page_el_s n=200049&refer_page_name=search_result&refer_page_id=10009_1696427725126_4b6w0eyi2m&_x_sessn_id=qfw92rb8mj. [Accessed: 13-Sept-2023].