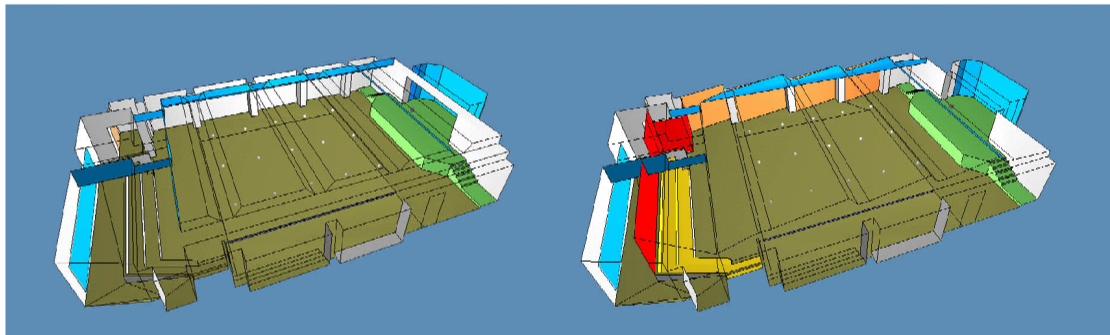




Τ.Ε.Ι. ΚΡΗΤΗΣ
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΡΕΘΥΜΝΟΥ
ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

*ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΙΘΟΥΣΩΝ ΔΙΔΑΣΚΑΛΙΑΣ ΚΑΙ
ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΧΡΗΣΕΩΝ*



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: Βογιατζής Ορέστης Α.Μ. 822
 Καλαποθάκης Αλέξανδρος Α.Μ. 587
 Ντακοβάνος Γεώργιος Α.Μ. 712

Επιβλέπων: Μπρέζας Σπύρος

ΡΕΘΥΜΝΟ

Μάιος 2010

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα και εισηγητή της παρούσας εργασίας, κύριο Μπρέζα Σπύρο, για την πολύτιμη προσφορά του στην διεκπεραίωση αυτού του εγχειρήματος, καθώς επίσης και τον κύριο Ορφανό Γιάννη για την σημαντική βοήθεια του

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	
Βασικές Έννοιες Ακουστικής	12
Decibel	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
Ακουστικά πεδία	16
Ελεύθερο πεδίο	16
Αντηχητικό πεδίο	17
Κοντινό πεδίο (Near field)	18
Μακρινό πεδίο (Far field)	19
Αντηχητικό πεδίο	19
2.1 Κρίσιμη απόσταση D_c	20
2.2 Υπολογισμός στάθμης πίεσης σε κλειστό χώρο	22
2.3 Διάκριση κλειστών χώρων	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
Ηχητικά φαινόμενα	26
3.1 Ανάκλαση	26
Ανάκλαση από κυρτές επιφάνειες	28
Ανάκλαση από κοίλες επιφάνειες	28
Ανάκλαση από παραβολικές επιφάνειες	29

Ανάκλαση από γωνίες	30
3.2 Απευθείας ήχος - Πρώτες ανακλάσεις - Καθυστερημένες ανακλάσεις	31
Απευθείας ήχος (direct sound)	32
Πρώτες ανακλάσεις (early reflections)	33
Καθυστερημένες ανακλάσεις (late reverberation)	34
3.3 Απορρόφηση	34
Συντελεστής απορρόφησης και κεντρικές συχνότητες	36
Απορροφητικά υλικά	38
3.4 Πορώδη υλικά	39
Η επίδραση του πάχους	39
Η επίδραση του διάκενου	40
Η επίδραση της πυκνότητας	41
Σανίδες fiberglass	42
Διάτρητα αφρώδη υλικά	42
Οι κουρτίνες ως απορροφητές	43
Τα χαλιά ως απορροφητές	44
Επιρροή του τύπου του χαλιού στην απορρόφηση	45
Επιρροή στην απορρόφηση με την ύπαρξη υποστρώματος (επένδυσης)	45
3.5 Πάνελ (απορροφητικά ταμπλό)	46
Πολυκυλινδρικοί απορροφητές	49
Διάτρητα πάνελ	50
Τοποθέτηση απορροφητικών υλικών	52

Μείωση στάσιμων κυμάτων με απορροφητικά υλικά	52
3.6 Διάχυση	54
Το πλήρως διάχυτο ηχητικό πεδίο	54
Διασπορά της ηχητικής ενέργειας	55
Δείκτης διασποράς	55
Υλικά που συντελούν στη διάχυση του ήχου	56
Μείωση φαινομένου flutter echo	57
3.7 Περίθλαση	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	
Ιδιορυθμοί και στάσιμα κύματα δωματίου	62
4.1 Τρόποι δόνησης σε ορθογώνιο δωμάτιο	62
4.2 Κατηγορίες στάσιμων κυμάτων	63
Αξονικά (Axial modes)	63
Εφαπτομενικά (Tangential modes)	64
Πλάγια (oblique modes)	65
4.3 Πυκνότητα εμφάνισης στάσιμων κυμάτων	66
4.4 Προτεινόμενες αναλογίες διαστάσεων σε ορθογώνια δωμάτια	68
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	
Έλεγχος θορύβου και ηχομείωση	70
5.1 Συντελεστής ηχητικής μετάδοσης (τ) και Απώλεια μετάδοσης (TL)	70
5.2 Αερόφερτος θόρυβος	72
5.3 Στερεόφερτος θόρυβος	74
5.4 Απώλεια μετάδοσης σε απλές επιφάνειες	75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	

Ακουστικοί δείκτες	79
6.1 Υποκειμενική περιγραφή	79
Η αίσθηση της ολότητας της ηχητικής πηγής (ensemble)	80
Η αίσθηση της οικειότητας (intimacy)	80
Αντιληπτότητα των συλλαβών (syllable intelligibility)	80
Η ευκρίνεια (clarity)	81
Η ακουστότητα (loudness)	81
6.2 Αντικειμενική περιγραφή	81
Χρόνος αντήχησης	81
E.D.T (Early Decay Time)	84
Διακριτότητα (Definition)	85
Διαύγεια (Clarity C50,C80)	86
STI – RASTI ([rapid] speech transmission index)	87
Articulation loss of consonants (Alcons)	88
Ηχηρότητα (Sound strength ,G)	92
Noise weighting curves	93
Noise rating (NR)	93
Noise criteria (NC)	95
Room criteria (RC)	95
Balanced noise criteria (NCB)	96
Room noise criteria (RNC)	97
Κεντρικός χρόνος (Center time)	98

Υποστήριξη σκηνής (stage support)	99
Πλευρικά κλάσματα	99
Interaural cross correlation	100
Envelopment-Late lateral sound level	100
Initial time delay gap (αρχική χρονική καθυστέρηση)	101
Κριτήριο ηχούς (Echo Criterion, TS)	101
Λόγος Σήματος Προς Θόρυβο (signal to noise ratio)	102
6.3 Σήματα μέτρησης κρουστικής απόκρισης	102
Μέθοδος απειροστού παλμού	102
Μέθοδος λευκού θορύβου	104
Μέθοδος ακολουθίας μεγίστου μήκους (MLS)	105
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	
Μελέτη ακουστικής συμπεριφοράς χώρων	110
7.1 Μέθοδοι προσομοίωσης ήχου σε δωμάτια	110
Μέθοδος ακτινών(ray tracing)	110
Μέθοδος εικονικών πηγών (image source model)	112
Υβριδικά μοντέλα (hybrid models)	113
7.2 Catt Acoustic	114
Χαρακτηριστικά λογισμικού	114
Ακουστική προσομοίωση	114
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8	
Αίθουσες διδασκαλίας	116
8.1 Προδιαγραφές για αίθουσες διδασκαλίας	116
8.2 Ακουστικός χαρακτήρας	118

Χρόνος αντήχησης	118
Καταληπτότητα	120
Θόρυβος βάθους	121
8.3 Ακουστική βελτίωση	122
Κατανομή απορροφητικών	122
Χρήσιμες Ανακλάσεις	123
Ηχομόνωση	123
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9	
Διαδικασία μετρήσεων	125
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10	
Ακουστική μελέτη αίθουσας διαλέξεων κτιρίου Β και Γ στο Τ.Ε.Ι. μουσικής τεχνολογίας και ακουστικής στο Ρέθυμνο	127
10.1 Περιγραφή αίθουσας Β	127
Ακουστικά προβλήματα αίθουσας	128
10.2 Περιγραφή ακουστικής μελέτης	129
Οροφή	129
Πίσω τοίχος	130
Κουρτίνα	130
Αύξηση ηχομείωσης	130
10.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων αίθουσα Β	131
Χρόνος αντήχησης T-15 και EDT	131
Καταληπτότητα C-50, D-50, RASTI	133
Ένταση ηχητικού πεδίου	134
10.4 Περιγραφή αίθουσας Γ	135

Ακουστικά προβλήματα αίθουσας	137
10.5 Περιγραφή ακουστικής μελέτης	138
Οροφή	138
Πίσω τοίχος	138
Κουρτίνα	138
Αύξηση ηχομείωσης	138
10.6 Ανάλυση αποτελεσμάτων αίθουσας Γ	139
Χρόνος αντήχησης T-15 και EDT	139
Καταληπτότητα C-50 D-50 RASTI	141
Ένταση ηχητικού πεδίου	142
Κόστος εφαρμογής	143

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11

Μελέτη αίθουσας πολλαπλών χρήσεων στο 14^ο δημοτικό

σχολείο Ρέθυμνου	145
11.1 Περιγραφή αίθουσας	145
Ακουστικά προβλήματα αίθουσας	147
11.2 Περιγραφή ακουστικής μελέτης	147
Οροφή	147
Πλαινοί τοίχοι	147
Πίσω μέρος αίθουσας	148
Ηχομόνωση	148
11.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων αίθουσας πολλαπλών χρήσεων	149
Χρόνος αντήχησης T-15 και EDT	149

Καταληπτικότητα C-50 D-50 RASTI	150
Συνολική στάθμη ηχητικής πίεσης	152
Κόστος μελέτης	154
Παράρτημα Α	155
Παράρτημα Β	180
Παράρτημα Γ	205
Βιβλιογραφία	216

Εισαγωγή

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματεύεται την ακουστική μελέτη τριών συνολικά χώρων: δύο αιθουσών διδασκαλίας του Τ.Ε.Ι. Ρέθυμνου, και μίας αίθουσας πολλαπλών χρήσεων του 14^{ου} δημοτικού σχολείου Ρέθυμνου. Η αναγκαιότητα της ακουστικής βελτίωσης σε ευαίσθητους χώρους, όπως αυτούς της εκπαίδευσης είναι πολύ μεγάλη λόγω της αυξημένης όχλησης λόγω εξωτερικών θορύβων στις μέρες μας.

Στα πλαίσια της ακουστικής μελέτης πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις από τις οποίες εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα και προτάθηκαν λύσεις με τη βοήθεια του ειδικού λογισμικού μοντελοποίησης Catt acoustic. Στο πρώτο μέρος της πτυχιακής εργασίας παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρό της και στη συνέχεια αναλύονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων αλλά και της μοντελοποίησης. Στο τελευταίο μέρος της εργασίας υπάρχουν παραρτήματα με όλα τα πειραματικά και εξαγόμενα δεδομένα.

Στην μελέτη αυτή προτιμήθηκαν στο βαθμό του δυνατού οικονομικές λύσεις, πάντα όμως σε συνδυασμό με την επιθυμητή απόδοση.

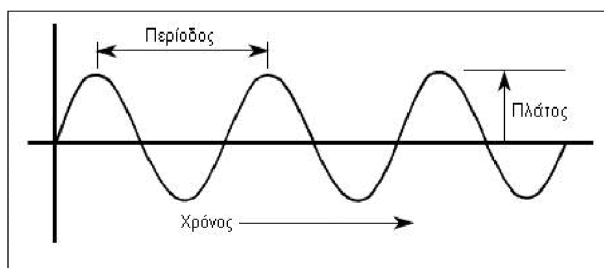
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Βασικές Έννοιες Ακουστικής

Η επιστήμη που εξετάζει την παραγωγή, τη διάδοση και τις εφαρμογές του ήχου λέγεται ακουστική. Ήχος ορίζεται ως μια μηχανική διαταραχή η οποία προκαλείται από μια πηγή και διαδίδεται με ορισμένη ταχύτητα σε ένα ελαστικό μέσο. Η διαταραχή αυτή πρέπει να έχει τέτοιο χαρακτήρα ώστε να μπορεί να διεγείρει το αισθητήριο όργανο της ακοής και να προκαλέσει ακουστικό ερέθισμα. Αυτό που αποκαλούμε ήχο δημιουργείται ουσιαστικά από την περιοδική ταλάντωση των μορίων του υλικού γύρω από μια θέση ισορροπίας και η μέγιστη μετατόπιση της ταλάντωσης αυτής ονομάζεται πλάτος της ταλάντωσης. Η διαταραχή αυτή μεταδίδεται με την μορφή κύματος σε διπλανά μόρια μέχρι να φτάσει στο αυτί μας.

Ο ήχος ως κυματικό φαινόμενο χαρακτηρίζεται από τέσσερα βασικά στοιχεία:

1. Τη συχνότητα f που μετράται σε Hertz (Hz), και δηλώνει τον αριθμό των περιοδικών ταλαντώσεων των σωματιδίων ανά μονάδα χρόνου. Οι ήχοι που αντιλαμβάνεται το αυτί μας εκτείνονται σε συχνότητες από 20 Hz έως 20 kHz.
2. Τη περίοδο T που μετράται σε δευτερόλεπτα (sec), και δηλώνει τη χρονική διάρκεια που απαιτείται για να γίνει ένας ολόκληρος κύκλος του ακουστικού κύματος.
3. Το μήκος κύματος λ που μετράται σε μέτρα (m), και δηλώνει τη φυσική απόσταση που καλύπτεται από έναν πλήρη κύκλο ταλάντωσης.
4. Τη ταχύτητα c που μετρείται σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο (m/sec) και δηλώνει την απόσταση διάδοσης που καλύπτει η διαταραχή στο μέσο διάδοσης ανά μονάδα χρόνου. Στον αέρα και σε θερμοκρασία 20°C η ταχύτητα του ήχου είναι 343 m/sec.



Σχήμα 1.1: Μαθηματική απεικόνιση ηχητικού κύματος [4].

Η βασική σχέση της ταχύτητας του ήχου, της συχνότητας και του μήκους κύματος είναι η εξής:

$$c = \lambda f \quad [1.1]$$

Γενικά ένα ηχητικό κύμα χαρακτηρίζεται από την ένταση, το φάσμα συχνοτήτων, την κατεύθυνση, τη φάση και τη διάρκεια. Έτσι ο ήχος μπορεί να οριστεί με υποκειμενικά χαρακτηριστικά όπως το ύψος, μέσω του οποίου διακρίνεται ο ήχος σε οξύς ή βαρύς και είναι απευθείας συνδεδεμένο με τη συχνότητα του ηχητικού κύματος, την ακουστότητα που είναι το μέγεθος της ακουστικής αντίληψης που παράγει ο ήχος στον ακροατή και βάσει αυτού διακρίνεται αν ο ήχος είναι ισχυρός ή ασθενής και τη χροιά που αποτελεί το υποκειμενικό εκείνο γνώρισμα του ήχου το οποίο επιτρέπει το διαχωρισμό δυο ήχων του ίδιου ύψους και της ίδιας ακουστότητας που παράγονται από διαφορετικές πηγές.

Τέλος, ο ήχος διαχωρίζεται ανάλογα την μορφή του στις εξής κατηγορίες:

- Σε απλούς τόνους, στους οποίους η μορφή του ηχητικού κύματος είναι περιοδική κι ημιτονοειδής.
- Σε σύνθετους ήχους που αποτελούνται από τη σύνθεση πολλών απλών τόνων κι η κυματομορφή τους είναι μεν περιοδική αλλά όχι ημιτονοειδής.
- Σε θορύβους που αντιστοιχούν σε μη περιοδικά ηχητικά κύματα.
- Σε κρότους που είναι ηχητικά ερεθίσματα μικρής χρονικής διάρκειας και σχετικά μεγάλης έντασης [4],[26].

Decibel

Η μετάδοση του ηχητικού κύματος στον αέρα γίνεται με διαμήκη κύματα, δηλαδή κύματα στα οποία η κατεύθυνση της ταλάντωσης είναι ίδια με εκείνη της μετάδοσης του κύματος. Οι ταλαντώσεις της διαταραχής δημιουργούν εναλλασσόμενες συμπιέσεις και αραιώσεις των μορίων του αέρα ενώ η διάδοση του ηχητικού κύματος προκαλείται από τις μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης. Αυτή η μεταβολή της πίεσης του μέσου μετάδοσης γύρω από την θέση ισορροπίας ονομάζεται ηχητική πίεση p , και μετράται σε Pascal (Pa).

Στην ακουστική τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται περισσότερο είναι λογαριθμικά λόγω του μεγάλου εύρους τιμών που λαμβάνουν, αλλά κυρίως για

ψυχοφυσικούς λόγους ,που έχουν να κάνουν με τον τρόπο αντίληψης του ήχου από τον άνθρωπο. Τα μεγέθη αυτά καλούνται στάθμες και μετρούνται σε decibels. Έτσι η ηχητική στάθμη πίεσης SPL (dB_{SPL}), σε κάποιο σημείο υπολογίζεται από τον τύπο:

$$L_p = 10 \log \frac{p}{p_0} \text{ (dB}_{\text{SPL}}) \quad [1.2]$$

Όπου p η ενεργός τιμή της ηχητικής πίεσης (Pa)

p_0 η τιμή αναφοράς (για τον αέρα $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$)

Ένα άλλο μέγεθος που χρησιμοποιείται στην περιγραφή των ηχητικών φαινομένων είναι η ηχητική ισχύς W (watt), δηλαδή ο ρυθμός ακτινοβολίας ηχητικής ενέργειας από την πηγή. Η στάθμη ηχητικής ισχύος L_W (dB_{SWL}) υπολογίζεται από τον τύπο:

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \text{ (dB}_{\text{SWL}}) \quad [1.3]$$

Όπου W : η μέση ηχητική ισχύς (Watt)

W_0 η τιμή αναφοράς (10^{-12} Watt)

Η ηχητική ένταση I (W/m^2), είναι το πηλίκο της ηχητικής ισχύος που διαπερνά κάθετα μια επιφάνεια προς το εμβαδόν της επιφάνειας και δίδεται από τον τύπο:

$$I = \frac{p^2}{2\rho_0 c} \quad [1.4]$$

Όπου $\rho_0 c$: η χαρακτηριστική εμπέδηση του μέσου διάδοσης (σταθερός αριθμός: 414 rayls)

Ενώ η στάθμη της ηχητικής έντασης L_I (dB_{SIL}) υπολογίζεται:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ (dB}_m\text{)} \quad [1.5]$$

Όπου I : η ηχητική ένταση (W/m²)

I_0 : η τιμή αναφοράς (10⁻¹² W / m²)

[3],[4],[26]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ακουστικά πεδία

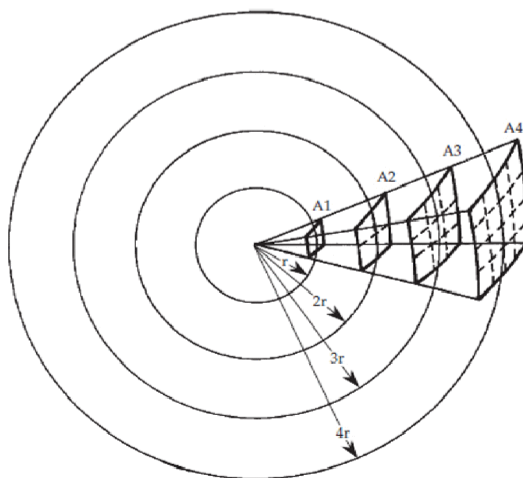
Ελεύθερο πεδίο

Όταν μία πηγή βρίσκεται σε ένα χώρο ομογενή όπου δεν υπάρχουν ανακλώσες επιφάνειες, υπάρχει ελεύθερη διάδοση των ηχητικών κυμάτων και το δημιουργούμενο από την ηχητική πηγή πεδίο ονομάζεται ελεύθερο πεδίο (Free field). Σε ένα τέτοιου είδους πεδίο, το τετράγωνο της ηχητικής πίεσης είναι ανάλογο της έντασης και η στάθμη ηχητικής πίεσης μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης.

Πιο συγκεκριμένα, αν η στάθμη της ηχητικής πίεσης σε απόσταση r_1 από την πηγή είναι L_1 τότε η στάθμη L_2 σε απόσταση r_2 θα δίδεται από τη σχέση:

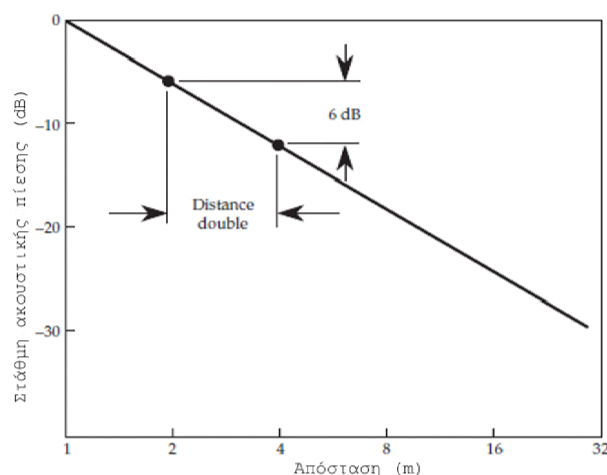
$$L_2 = L_1 - 20 \log \frac{r_2}{r_1} \text{ (dB)} \quad [2.1]$$

Η σχέση [2.1] υποδηλώνει ότι υπάρχει μείωση της στάθμης κατά 6 dB για κάθε διπλασιασμό της απόστασης από την ηχητική πηγή. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό και ως νόμος του αντιστρόφου τετραγώνου.



Σχήμα 2.1: Ηχητική ενέργεια σε ελεύθερο πεδίο. Καθώς η απόσταση από την πηγή διπλασιάζεται, η στάθμη ηχητικής πίεσης μειώνεται κατά 6dB. [7]

Ο ήχος σε ένα ελεύθερο πεδίο δεν υφίσταται κανένα από τα παρακάτω φαινόμενα: ανάκλαση, απορρόφηση, περίθλαση, διάθλαση, διάχυση. Σε κλειστούς χώρους μόνο οι ανηχοϊκοί θάλαμοι, δηλαδή χώροι με μεγάλη απορρόφηση σε όλο το ακουστικό συχνοτικό φάσμα, μπορούν να προσομοιάσουν τέτοιες συνθήκες. Γενικά το ελεύθερο πεδίο είναι μία θεωρητική προσέγγιση, ένας ελεύθερος χώρος που επιτρέπει στον ήχο να ταξιδέψει ανεμπόδιστος.



Σχήμα 2.2: Παράδειγμα πτώσης της στάθμης ηχητικής πίεσης συναρτήσει της απόστασης από την πηγή σε ελεύθερο πεδίο. [7]

Αντηχητικό πεδίο

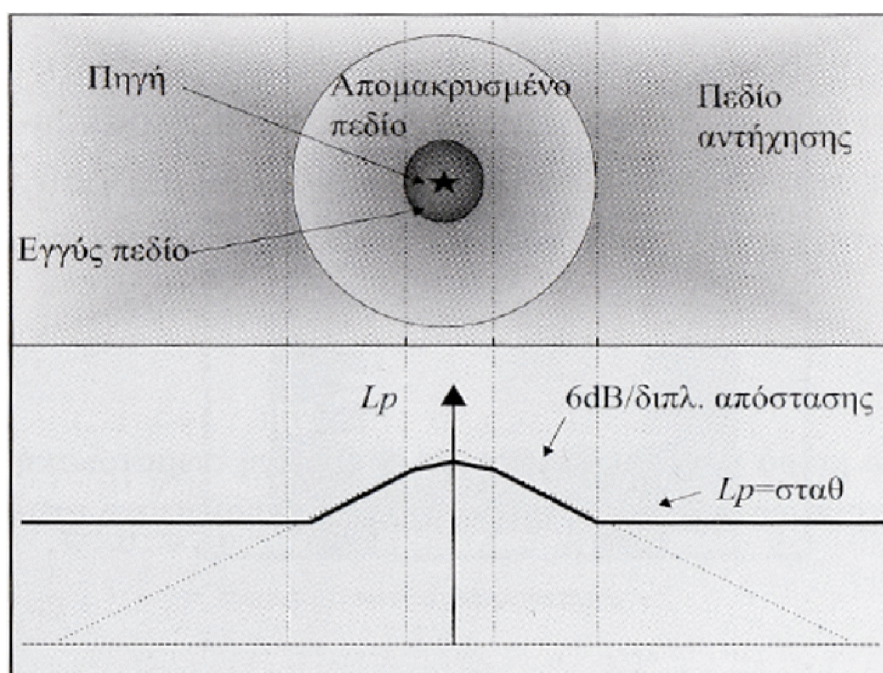
Στην περίπτωση κατά την οποία ένας κλειστός χώρος αποτελείται από τοιχώματα πλήρως ανακλαστικά, δηλαδή από τοιχώματα που ανακλούν πολύ μεγάλο ποσοστό της προσπίπτουσας σε αυτά ηχητικής ενέργειας, το ηχητικό πεδίο που δημιουργείται ονομάζεται αντηχητικό και ο χώρος θάλαμος αντήχησης. Το αντηχητικό πεδίο προέρχεται από τη συμβολή απευθείας και ανακλώμενων ηχητικών κυμάτων κι έχει σταθερή πυκνότητα ακουστικής ενέργειας, δηλαδή είναι διάχυτο.

Σύμφωνα με τον ΕΛΟΤ 556.1: Ως αντηχητικό πεδίο, σε ένα ολικά ή μερικά κλειστό χώρο όπου λειτουργεί ηχητική πηγή, ορίζεται η συνιστώσα του ηχητικού πεδίου που προέρχεται από τις αλληπάλληλες ανακλάσεις των ηχητικών κυμάτων στις περατωτικές επιφάνειες του χώρου και στην οποία η επίδραση του ήχου που φθάνει κατευθείαν από τη πηγή είναι αμελητέα. [3].

Αυτές είναι δύο ακραίες καταστάσεις που στην πραγματικότητα δύσκολα υφίστανται. Μεταξύ αυτών των ακραίων καταστάσεων υπάρχει το ημιαντηχητικό

πεδίο. Σύμφωνα με τον ΕΛΟΤ 556.1, ως *αντηχητικό* ορίζεται το πεδίο που επικρατεί σε ένα μεγάλο κλειστό χώρο με επιφάνειες που έχουν μέτρια ανακλαστικότητα.[3].

Στην πράξη σε ένα κλειστό χώρο όπου λειτουργεί μία πηγή, το παραγόμενο ηχητικό πεδίο μπορεί να χωριστεί σε τρία επιμέρους, τα οποία φαίνονται στο σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Κατηγορίες ηχητικών πεδίων σε κλειστό χώρο. [15]

Κοντινό πεδίο (Near field)

Είναι μία μικρή περιοχή γύρω από τη πηγή όπου το τετράγωνο της ηχητικής πίεσης δε σχετίζεται απλά με την ένταση του ήχου. Το ίδιο συμβαίνει και όταν η πηγή βρίσκεται σε ανοιχτό χώρο. Σύμφωνα με τον ΕΛΟΤ 556.1, *το κοντινό ηχητικό μίας ηχητικής πηγής που ακτινοβολεί σε συνθήκες ελεύθερου ηχητικού πεδίου, είναι η περιοχή εκείνη του ηχητικού πεδίου της πηγής στην οποία η ηχητική πίεση και η ηχητική σωματιδιακή ταχύτητα δεν είναι σε φάση.* [3].

Στον καθορισμό της ηχητικής πίεσης στο κοντινό πεδίο, παίζουν σπουδαίο ρόλο οι διαστάσεις, το υλικό κι η γεωμετρία της πηγής. Γενικά αν η πηγή είναι σφαιρική κι ισότροπη, η περιοχή του κοντινού πεδίου εκτείνεται μέχρι δύο μήκη κύματος. Αν η πηγή έχει μεγάλο ακανόνιστο σχήμα κι η κατευθυντικότητα της είναι γνωστή, τότε η περιοχή αυτή εκτείνεται από δύο έως πέντε φορές τη μεγαλύτερη

χαρακτηριστική διάσταση της πηγής. Μετρήσεις του ήχου σε αυτή τη περιοχή δεν μπορούν να καθορίσουν την εκπεμπόμενη ισχύ της πηγής, διότι όπως προαναφέρθηκε η σωματιδιακή ταχύτητα κι η πίεση είναι εκτός φάσης.

Στην περίπτωση που το μήκος κύματος είναι πολύ μικρό, η ηχητική πίεση κι η ηχητική σωματιδιακή ταχύτητα μπορεί να είναι σε φάση. Σε τέτοιες περιπτώσεις χρησιμοποιείται ο όρος πλησιέστατο ηχητικό πεδίο (ΕΛΟΤ 556.1) [3].

Μακρινό πεδίο (Far field)

Σύμφωνα με τον ΕΛΟΤ 556.1, *ως μακρινό πεδίο μίας ηχητική πηγής που ακτινοβολεί σε συνθήκες ελεύθερου ηχητικού πεδίου, ορίζεται η περιοχή εκείνη του ηχητικού πεδίου στην οποία η ηχητική σωματιδιακή ταχύτητα κι η ηχητική πίεση είναι ουσιαστικά σε φάση και στην οποία η ηχητική σωματιδιακή ταχύτητα είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης από την πηγή. [3].*

Το μακρινό πεδίο ξεκινά μετά το κοντινό πεδίο. Στη περιοχή αυτή, η στάθμη της ηχητικής πίεσης ελαττώνεται κατά 6 dB για κάθε διπλασιασμό της απόστασης κι η ένταση είναι ανάλογη του τετραγώνου της ακουστικής πίεσης. Ένα σημείο βρίσκεται στο χώρο του μακρινού πεδίου αν η απόσταση από την πηγή ικανοποιεί τις παρακάτω σχέσεις:

$$r \gg \lambda / 2\pi \quad r \gg 1 \quad r \gg \frac{\pi l^2}{2\lambda} \quad [2.2]$$

Όπου λ : το μήκος κύματος του ήχου σε m

l : η μεγαλύτερη διάσταση της πηγής σε m

Αντηχητικό πεδίο

Όπως προαναφέρθηκε, το αντηχητικό πεδίο προέρχεται από τις αλληπάλληλες ανακλάσεις των ηχητικών κυμάτων σε επιφάνειες του δωματίου και διατηρεί σταθερή την ενέργειά του σε όλα τα σημεία του χώρου που βρίσκονται μέσα σε αυτό. Το αντηχητικό πεδίο μπορεί να καλείται και διάχυτο πεδίο λόγω της συμβολής μεγάλου αριθμού ανακλάσεων που παραπέμπει στο φαινόμενο της διάχυσης. Η

στάθμη του αντηχητικού πεδίου σε ένα κλειστό χώρο υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση.

$$L(\alpha ντι.πεδίου) = L_w + 10 \log[4/R] \quad [2.3]$$

Όπου $R = \frac{S\alpha}{1-\alpha}$: η σταθερά δωματίου

Όπου S : η επιφάνεια του χώρου

Όπου α : ο μέσος συντελεστής απορρόφησης του χώρου

Όπου L_w : η ηχητική στάθμη ισχύος που εκπέμπει η πηγή
[3],[16]

2.1 Κρίσιμη απόσταση Dc

Ως κρίσιμη απόσταση ενός κλειστού χώρου ορίζεται η απόσταση από την ηχητική πηγή όπου οι ηχητικές στάθμες των δύο πεδίων, ελεύθερου και αντηχητικού, είναι ίσες. Δηλαδή ισχύει:

$$L_{ελ.πεδίου} = L_{αντ.πεδίου} = L_{κρ.απόστασης}$$

Η κρίσιμη απόσταση υπολογίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$Dc = \sqrt{Q \frac{R}{7}} \quad [2.4]$$

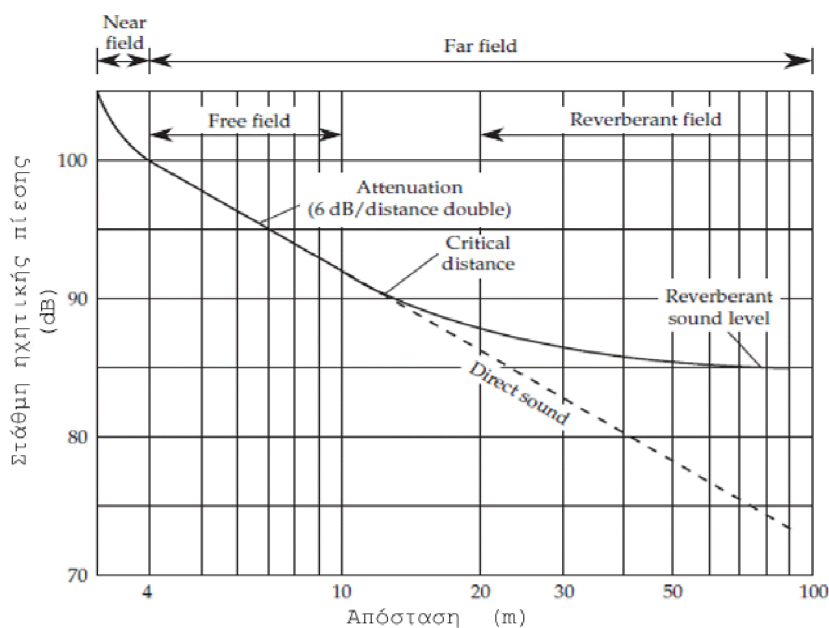
$$Dc = \frac{\sqrt{Q \cdot A_s}}{7} \quad [2.5]$$

$$Dc = 0,057 \sqrt{\frac{QV}{RT_{60}}}, \text{ αν } \alpha \ll 1 \quad [2.6]$$

Όπου Q : παράγοντας κατευθυντικότητας πηγής

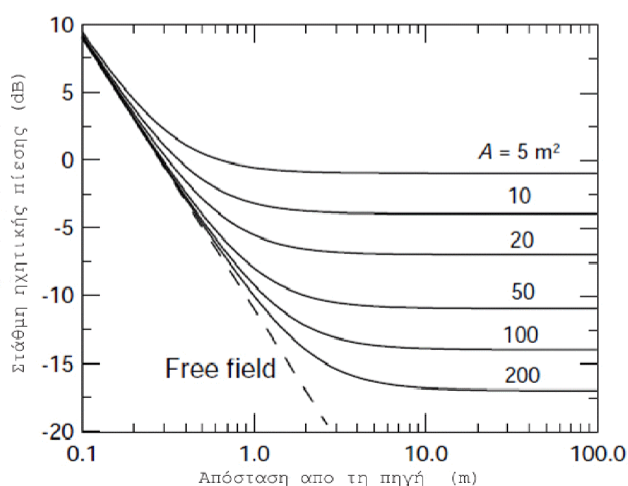
R : σταθερά δωματίου

RT_{60} : χρόνος αντήχησης σε sec.



Σχήμα 2.1.1: Γραφικός προσδιορισμός κρίσιμης απόστασης. [7]

Όσο μεγαλύτερη γίνεται η επιφάνεια απορρόφησης της αίθουσας τόσο αυξάνει η κρίσιμη απόσταση και συνεπώς μειώνεται η έκταση του αντηχητικού πεδίου. Οπότε, η προσθήκη απορροφητικών υλικών σε ένα χώρο έχει ως επακόλουθο την αύξηση της έκτασης του ελεύθερου πεδίου στο οποίο επικρατεί ο απευθείας ήχος κι οι πρώτες ανακλάσεις, αυξάνοντας την καταληπτότητα του ήχου της αίθουσας. Αυτό περιγράφεται και στο σχήμα 2.1.2 [16].



Σχήμα 2.1.2: Στάθμη του ελεύθερου και του αντηχητικού πεδίου μίας αίθουσας για διαφορετικές τιμές της απορρόφησης της αίθουσας. [8]

2.2 Υπολογισμός της στάθμης ηχητικής πίεσης σε κλειστό χώρο

Για τον υπολογισμό της στάθμης ηχητικής πίεσης σε έναν κλειστό χώρο βασικό ρόλο παίζει η απορρόφηση, μέγεθος που περιγράφηκε παραπάνω κι εκφράζεται μέσω μιας σταθεράς που καλείται σταθερά δωματίου (room constant) κι η οποία δίδεται από την ακόλουθη σχέση:

$$R_c = \frac{Sa}{1-a} \quad [2.7]$$

Η στάθμη ηχητικής πίεσης σε έναν κλειστό χώρο όπου υπάρχει πηγή ισχύος W σε απόσταση r από αυτήν, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$(L_P)_{\text{πεδίου}} = (L_w)_{\text{πηγής}} + 10 \log \left[\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right] \quad [2.8]$$

Όπου Q : δείκτης κατευθυντικότητας της πηγής

Όπου L_w : η ηχητική στάθμη ισχύος που εκπέμπει η πηγή

Όπου r : η απόσταση από τη πηγή

Όπου R : η σταθερά δωματίου

[3],[16]

2.3 Ακουστική διάκριση κλειστών χώρων

Η “ακουστική ταυτότητα” που χαρακτηρίζει κάθε χώρο διαμορφώνεται από τις διαστάσεις του, τη γεωμετρία του, τα δομικά υλικά του κι από τα διάφορα φυσικά φαινόμενα που εμφανίζονται μέσα σε αυτόν κατά τη μετάδοση ηχητικού σήματος. Οι κλειστοί χώροι όσον αφορά τον τρόπο μελέτης από ακουστική σκοπιά., διακρίνονται σε ακουστικά μικρούς, μεγάλους και πολύ μεγάλους.

Ένας χώρος θεωρείται ακουστικά μεγάλος όταν η μικρότερη διάστασή του είναι τουλάχιστον κατά δύο μήκη κύματος μεγαλύτερη από το μήκος κύματος της συχνότητας που ενδιαφέρει. Ο ίδιος χώρος θεωρείται πολύ μεγάλος όταν η απορρόφηση από τον αέρα δεν είναι αμελητέα. Στην περίπτωση της ακουστικής

μελέτης ενός χώρου λαμβάνονται υπ' όψιν τα γενικά χαρακτηριστικά του, αλλά και τυχούσες ιδιαιτερότητες του, έτσι ώστε να προσδιοριστεί η “ακουστική του ταυτότητα”.

Η διάκριση των κλειστών χώρων σε ακουστικά μεγάλους και μικρούς γίνεται με κριτήριο τη *συχνότητα αποκοπής* f_c (cut-off frequency). Ο Manfred Schroeder όρισε ως *συχνότητα* f_c τη *συχνότητα πάνω από την οποία εμφανίζεται τόσο μεγάλος αριθμός στάσιμων κυμάτων* ώστε το δωμάτιο να συμπεριφέρεται πρακτικά ομοιόμορφα σε όλες τις συχνότητες. Η *συχνότητα αποκοπής* υπολογίζεται από τον τύπο:

$$f_c = 2102 \sqrt{\left(\frac{RT_{60}}{V}\right)} \quad [2.9]$$

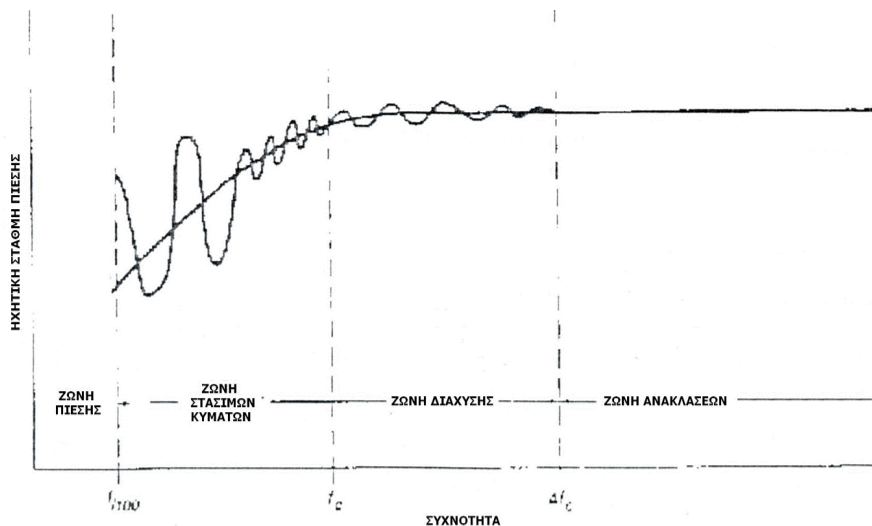
Όπου RT_{60} : ο χρόνος αντήχησης σε sec

V : ο όγκος του δωματίου σε m^3

Ή, με την υπόθεση ότι ισχύει ο τύπος του Sabine:

$$f_c = \frac{800}{\sqrt{A}} \quad [2.10]$$

Όπου A : η ισοδύναμη επιφάνεια απορρόφησης σε m^2



Σχήμα 2.3.1: Διάγραμμα έλεγχου της ακουστικής απόκρισης ενός δωματίου. [15]

Στο σχήμα 2.3.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα «έλεγχου της σταθερής κατάστασης της ακουστικής απόκρισης ενός δωματίου», βάσει του οποίου πραγματοποιείται ο διαχωρισμός της συμπεριφοράς ενός χώρου σύμφωνα με τη συχνότητα ή το μήκος κύματος του ήχου ως προς τις διαστάσεις του χώρου. Σύμφωνα με το πιο πάνω διάγραμμα το ακουστικό φάσμα χωρίζεται σε τέσσερις περιοχές: τη ζώνη πίεσης όπου δεν υπάρχει κανένας συντονισμός, τη ζώνη των στάσιμων κυμάτων για τη μελέτη της οποίας εφαρμόζεται η κυματική ακουστική, τη ζώνη διάχυσης στην οποία πραγματοποιείται μετάβαση από την δεύτερη στην τέταρτη περιοχή και τη ζώνη των ανακλάσεων, η οποία μελετάται σύμφωνα με τις αρχές της γεωμετρικής ακουστικής.

1. Ζώνη πίεσης (pressure zone/ cut off region):

$$\text{για } f \leq f_{\min} \text{ όπου } f_{\min} = \frac{c}{2L_{\max}} \text{ με } L_{\max} \text{ τη μεγαλύτερη διάσταση του χώρου}$$

Οι συχνότητες που βρίσκονται σε αυτή τη περιοχή είναι μικρότερες από την κατώτατη συχνότητα συντονισμού, δηλαδή το μήκος κύματος του ήχου είναι πολύ μεγαλύτερο από τη μεγαλύτερη διάσταση του χώρου.

2. Ζώνη των στάσιμων (modal zone):

$$\text{για } f_{\min} \leq f \leq f_c \text{ όπου } f_c \text{ η συχνότητα αποκοπής}$$

Το μήκος κύματος των συχνοτήτων του ήχου αυτής της περιοχής είναι της τάξης μεγέθους των διαστάσεων του χώρου. Συγκεκριμένα οι συχνότητες στην περιοχή αυτή είναι ανάμεσα στην κατώτατη συχνότητα συντονισμού και τη συχνότητα αποκοπής. Στην περιοχή αυτή εφαρμόζονται οι αρχές της κυματικής ακουστικής.

3. Ζώνη διάχυσης (diffusion zone):

$$f_c \leq f \leq 4f_c$$

Είναι η περιοχή μετάβασης μεταξύ της ζώνης στάσιμων και της ζώνης ανακλάσεων. Οι συχνότητες αυτής της περιοχής είναι έως τέσσερις φορές μεγαλύτερες της συχνότητας αποκοπής. Πρόκειται για μια δύσκολη συχνοτική περιοχή, γιατί ο χώρος θεωρείται αρκετά μικρός για τη χρήση της γεωμετρικής ακουστική εφ'όσον εμφανίζονται ακόμη έντονοι συντονισμοί, αλλά κι αρκετά μεγάλος για την εφαρμογή των αρχών της κυματικής ακουστικής, σύμφωνα με το μήκος κύματος.

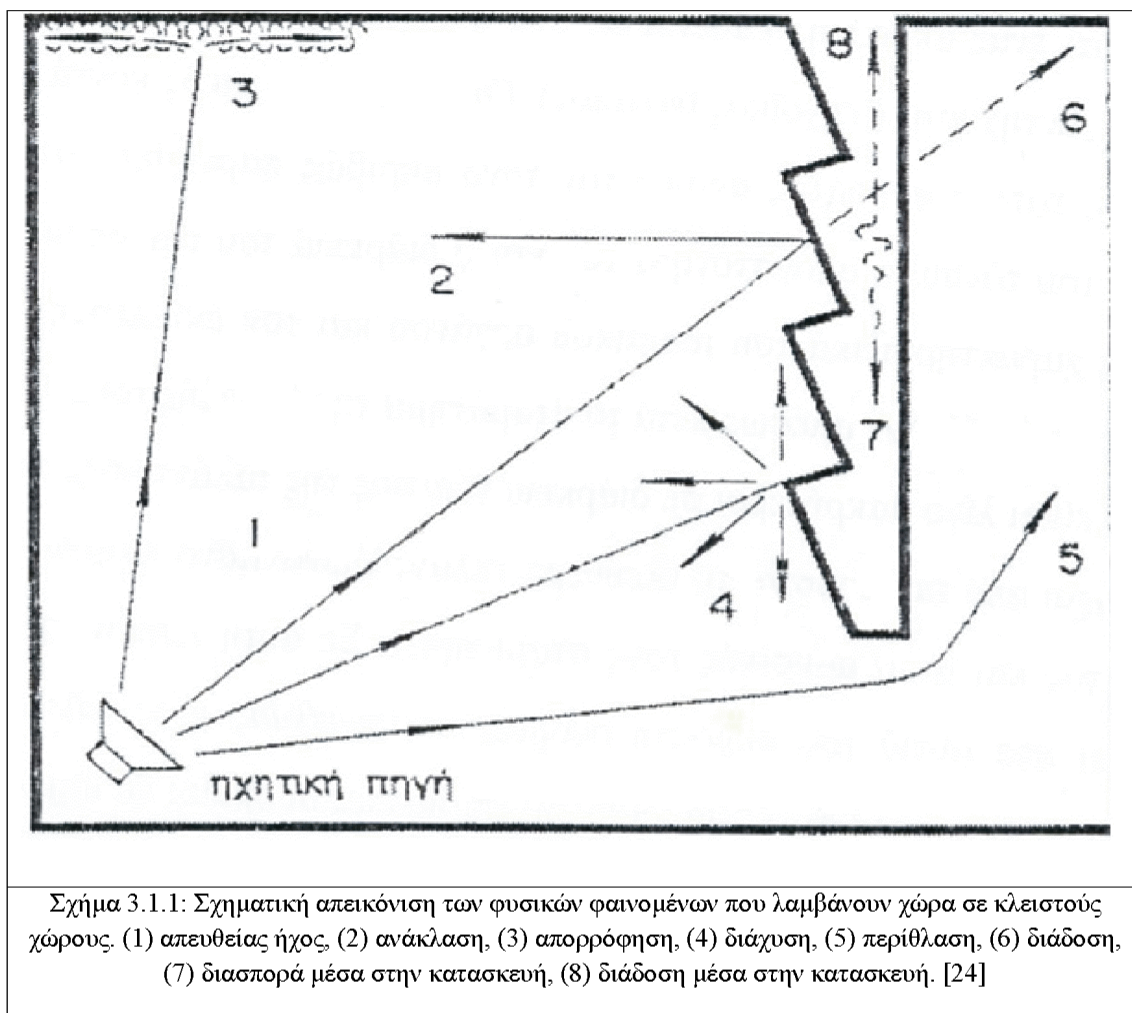
4. Ζώνη ανακλάσεων (specular reflection zone):

$$f \geq 4f_c$$

Σε αυτή τη ζώνη τα κυματικά φαινόμενα εξασθενούν. Το μήκος κύματος του ήχου είναι πολύ μικρό κι επικρατούν οι τυχαίες ανακλάσεις. Ο ήχος μπορεί να θεωρηθεί ότι διαδίδεται σε ευθείες ακτίνες κι εφαρμόζονται πλέον οι αρχές της γεωμετρικής ακουστικής [3],[16].

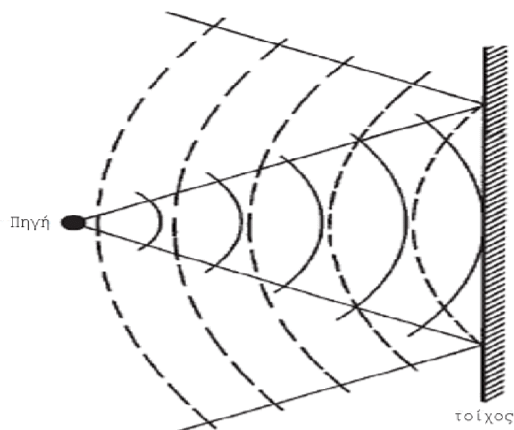
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Ηχητικά φαινόμενα



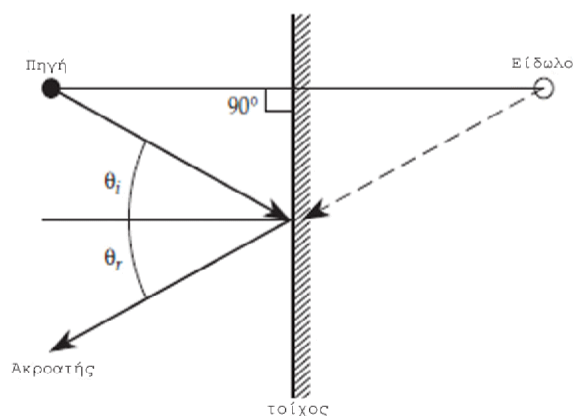
3.1 Ανάκλαση

Όταν ένα ηχητικό κύμα προσπίπτει σε μία επιφάνεια διαχωρισμού δύο μέσων διάδοσης, ένα μέρος από την ενέργεια που μεταφέρει ανακλάται. Η διαδικασία της ανάκλασης από μία επίπεδη επιφάνεια είναι απλή. Στην περίπτωση σημειακής ισότροπης ηχητικής πηγής, τα σφαιρικά κύματα προσπίπτουν στην επιφάνεια και ανακλώνται επιστρέφοντας προς την πηγή. Είναι η ίδια διαδικασία με το φως που ανακλάται από ένα καθρέφτη, όπως περιγράφεται κι από τον νόμο του Snell. Στο παρακάτω σχήμα υπάρχει αναπαράσταση του φαινομένου.



Σχήμα 3.1.2: Ανάκλαση σφαιρικών κυμάτων σημειακής πηγής από επίπεδη επιφάνεια. [7]

Ο ήχος ακολουθεί τον ίδιο κανόνα με το φως. Η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με την γωνία ανάκλασης. Επιπλέον η διεύθυνση του ανακλώμενου ήχου είναι μία ευθεία γραμμή από το εικονικό είδωλο της πηγής που σχηματίζεται στην ίδια ακριβώς θέση, αλλά από την αντίθετη πλευρά της επιφάνειας, όπως ακριβώς το είδωλο σε ένα καθρέφτη. Αυτό το είδωλο βρίσκεται στην ίδια απόσταση από τον τοίχο με αυτή που βρίσκεται κι η πραγματική πηγή. Αυτή είναι η απλή περίπτωση μίας μόνο ανακλαστικής επιφάνειας.



Σχήμα 3.1.3: Επεξήγηση ανάκλασης ηχητικού κύματος με τη χρήση εικονικής πηγής. [7]

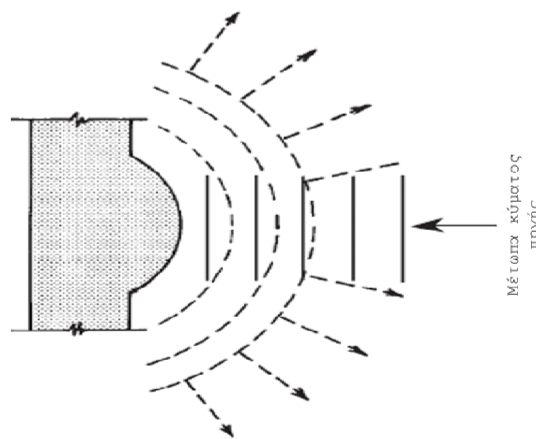
Όταν ο ήχος προσπίπτει σε περισσότερες από μία επιφάνειες, δημιουργούνται πολλές ανακλάσεις κι είδωλα. Έτσι ο ήχος μπορεί να θεωρηθεί ως μία τρισδιάστατη πηγή απομακρυσμένη από την κυρίως πηγή, όπου ο ακροατής λαμβάνει τις

ανακλάσεις της με μικρές χρονικές καθυστερήσεις που εξαρτώνται από την απόσταση που έχουν οι ανακλαστικές επιφάνειες από την πηγή. Σε έναν τυποποιημένο κλειστό χώρο υπάρχουν έξι περατωτικές επιφάνειες. Όλες δημιουργούν είδωλα της πηγής, στέλνοντας ενέργεια πίσω στον ακροατή, δημιουργώντας ένα πολύπλοκο ηχητικό πεδίο.

Ανάκλαση από κυρτές επιφάνειες

Για την πιο απλοποιημένη περιγραφή του φαινομένου, θεωρείται ότι ο ήχος μπορεί να αναλυθεί σε ακτίνες. Κάθε ακτίνα θεωρείται ως μία διαφορετική δέσμη ήχου με ένα σφαιρικό μέτωπο κύματος στο οποίο ο νόμος του αντίστροφου τετραγώνου έχει εφαρμογή.

Τα σφαιρικά μέτωπα κύματος από μία σημειακή πηγή μπορούν να θεωρηθούν επίπεδα κύματα για μεγάλες αποστάσεις από την πηγή. Για αυτό το λόγο ο ήχος ο οποίος επιδρά σε ποικίλες επιφάνειες συνήθως θεωρείται ως επίπεδο μέτωπο κύματος. Ανακλάσεις των επίπεδων μετώπων κύματος του ήχου από συμπαγείς κυρτές επιφάνειες διασκορπίζει την ηχητική ενέργεια σε διάφορες κατευθύνσεις όπως δείχνει και το σχήμα 3.1.4. Κυρτά απορροφητικά υλικά χρησιμοποιούνται ως απορροφητές αλλά συνεισφέρουν και στη διάχυση του ήχου στο χώρο, λόγω του σχήματος της επιφάνειάς τους.

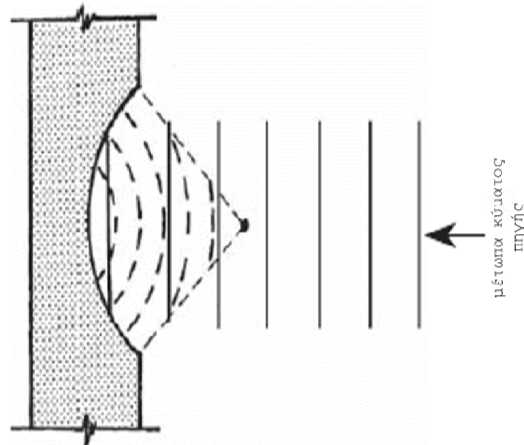


Σχήμα 3.1.4: Ανάκλαση από κυρτή επιφάνεια. [7]

Ανάκλαση από κοίλες επιφάνειες

Τα επίπεδα μέτωπα κύματος που προσκρούουν σε μία κοίλη επιφάνεια τείνουν να εστιάζονται ανακλώμενα σε ένα σημείο. Η ακρίβεια με την οποία ο

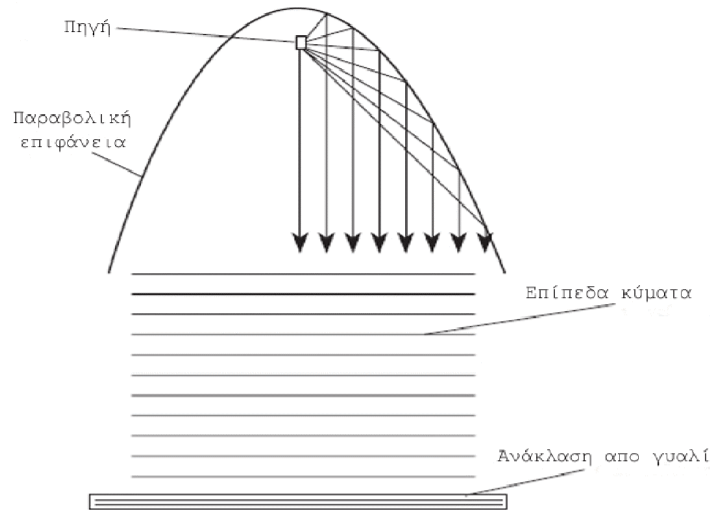
ανακλώμενος ήχος εστιάζεται καθορίζεται από το σχήμα και το μέγεθος της κοίλης επιφάνειας. Σφαιρικές κοίλες επιφάνειες είναι κοινές καθώς είναι οι πιο εύκολα κατασκευάσιμες. Για παράδειγμα, κοίλες οροφές που χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε εκκλησίες θα ήταν η αιτία ενός μεγάλου προβλήματος σε κοινά δωμάτια καθώς παράγουν συγκεντρώσεις του ήχου, κάτι το οποίο έρχεται σε πλήρη αντίθεση με τον στόχο της ομοιόμορφης κατανομής αυτού.



Σχήμα 3.1.5: ανάκλαση από κοίλη επιφάνεια. [7]

Ανάκλαση από παραβολικές επιφάνειες

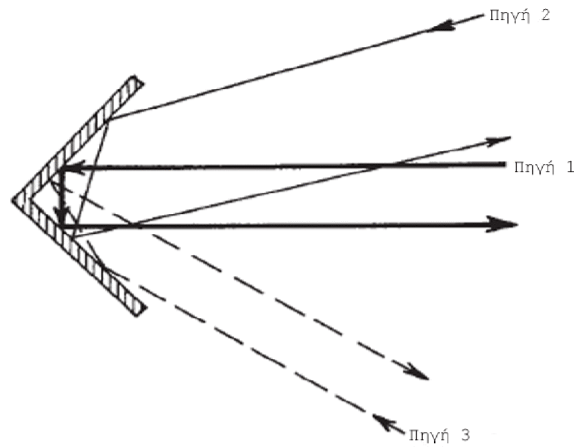
Μια παραβολή περιγράφεται μαθηματικά από την εξίσωση $y=x^2$. Έχει τα χαρακτηριστικά της εστίασης του ήχου ακριβώς σε ένα σημείο. Μία πολύ βαθιά παραβολική επιφάνεια πετυχαίνει πολύ καλύτερα κατευθυντικά χαρακτηριστικά από μία αβαθή παραβολική επιφάνεια. Υπενθυμίζεται ότι τα κατευθυντικά χαρακτηριστικά της παραβολικής επιφάνειας εξαρτώνται από το μέγεθος του ανοίγματος σε σχέση με τα μελετούμενα μήκη κύματος.



Σχήμα 3.1.6: ανάκλαση από παραβολική επιφάνεια [7]

Ανάκλαση από γωνίες

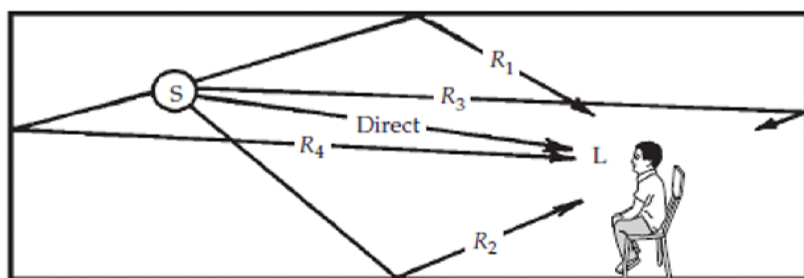
Γενικά θεωρείται ότι οι ανακλάσεις σε έναν κλειστό χώρο δημιουργούνται μόνο μεταξύ των περατωτικών επιφανειών (τοιχών) αυτού. Παρ' όλα αυτά ανακλάσεις προκύπτουν κι από τις γωνίες ενός χώρου. Οι ανακλάσεις που δημιουργούνται από γωνίες ακολουθούν τη θέση της πηγής σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου. Η γωνία που απεικονίζεται στο σχήμα 3.1.7 δέχεται ήχο από την πηγή στη θέση 1 κι ανακλά ακριβώς προς την ίδια κατεύθυνση προς την πηγή στη θέση 1. Αν οι γωνίες πρόσπτωσης κι ανάκλασης σχεδιαστούν με προσοχή τότε κι η πηγή που βρίσκεται στην θέση 2 αλλά και 3 θα δεχτούν ανάκλαση προς τα πίσω συνδυασμένη από τις δύο επιφάνειες που σχηματίζουν τη γωνία του δωματίου. Οι γωνιακές ανακλάσεις υφίστανται απορρόφηση σε δύο επιφάνειες και για αυτό το λόγο η ηχητική ενέργεια που μεταφέρουν είναι μικρότερη στην ίδια απόσταση από τις προαναφερθείσες επιφάνειες. Η εικόνα στο σχήμα 3.1.7 περιλαμβάνει μόνο δύο επιφάνειες που σχηματίζουν γωνία. Η ίδια αρχή πάντως επικρατεί και για τις τέσσερις επάνω και κάτω γωνίες που σχηματίζονται σε ένα δωμάτιο από τρεις επιφάνειες (ταβάνι - δύο τοίχοι, πάτωμα - δύο τοίχοι). Έχουν μελετηθεί υλικά αποτελούμενα από τρία, κυκλικού σχήματος, ανακλαστικά υλικά έτσι ώστε να είναι κάθετα μεταξύ τους [7].



Σχήμα 3.1.7: Ανάκλαση από γωνία αποτελούμενη από δύο ανακλαστικά υλικά. [7]

3.2 Απευθείας ήχος - Πρώτες ανακλάσεις - Καθυστερημένες ανακλάσεις

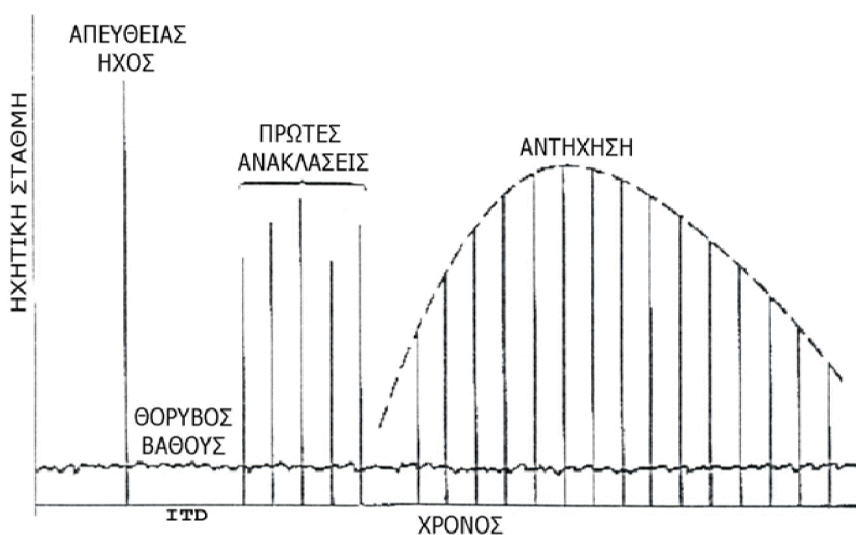
Οι ανακλάσεις ενός κλειστού χώρου αποτελούν πολύ σημαντικό στοιχείο για την ακουστική του. Βάσει πειραματικών διαδικασιών κι υπολογισμών έχει προκύψει το λεγόμενο RIR (room impulse response). Το συγκεκριμένο διάγραμμα συσχετίζει τον απευθείας ήχο (direct sound), τις πρώτες ανακλάσεις (early sound) και τις καθυστερημένες ανακλάσεις (late reverberation or reverberant sound). Το σχήμα 3.2.1 αναπαριστά τον τρόπο με τον οποίο ο δέκτης λαμβάνει τον ήχο από μία πηγή. Αρχικά λαμβάνει τον απευθείας ήχο και σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα τις πρώτες ανακλάσεις από τις πιο κοντινές επιφάνειες προς αυτόν.



Σχήμα 3.2.1: Αρχικά ο δέκτης λαμβάνει τον απευθείας ήχο και στη συνέχεια τις ανακλάσεις από τις γύρω επιφάνειες. [7]

Τα ηχητικά κύματα ταξιδεύουν με ταχύτητα περίπου 344 m/s στον αέρα. Αυτό σημαίνει ότι ο απευθείας ήχος φτάνει στον ακροατή σε χρόνο μεταξύ 20-200 ms (εξαρτάται από την απόσταση πηγής – ακροατή). Σε μικρό χρονικό διάστημα, ο ίδιος ήχος φτάνει στον ακροατή από διάφορες ανακλαστικές επιφάνειες. Η πρώτη ομάδα

ανακλάσεων που φτάνει στον ακροατή στα πρώτα 50-80 ms μετά τον απευθείας ήχο, λέγονται πρώτες ανακλάσεις (early sound). Ύστερα από τις πρώτες ανακλάσεις φθάνουν οι καθυστερημένες ανακλάσεις. Αυτές οι ανακλάσεις είναι ασθενέστερες σε ηχητική ενέργεια κι όσο περνάει ο χρόνος γίνονται ακόμα περισσότερο ασθενείς. Καταλήγουν να συγχωνεύονται σχηματίζοντας με αυτό τον τρόπο την αντήχηση του δωματίου (reverberant sound, reverberant tail).



Σχήμα 3.2.2: Διάγραμμα RIR- ακουστική απόκριση χώρου [16].

Το διάγραμμα RIR χωρίζει την ηχητική πληροφορία που φθάνει στο δέκτη που είναι τοποθετημένος σε έναν κλειστό χώρο σε τρεις κατηγορίες. Σε πολλές περιπτώσεις η ακουστική ανάλυση των χώρων βασίζεται σε αυτές τις κατηγορίες.

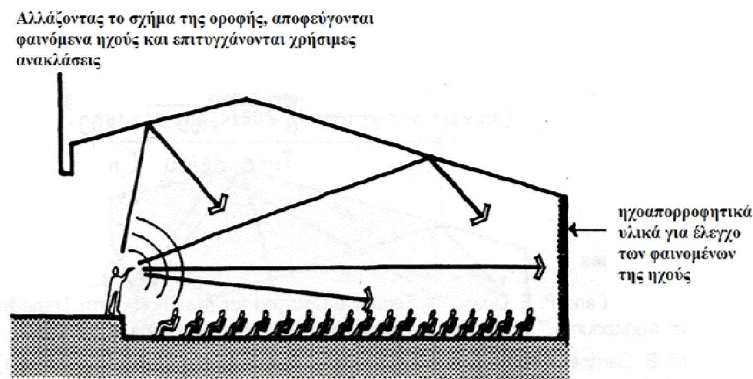
Απευθείας ήχος (direct sound)

Η ηχητική στάθμη στο σημείο του παρατηρητή εξαρτάται μόνο από την απόστασή του από την πηγή. Η ηχητική ενέργεια του απευθείας ήχου ακολουθεί το νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου. Αυτό σημαίνει πως η αρχική ηχητική ένταση της πηγής μειώνεται κατά 6 dB για κάθε διπλασιασμό της απόστασης. Ο απευθείας ήχος παρέχει την πληροφορία για τη θέση της πηγής. Δηλαδή ο άνθρωπος εντοπίζει τη θέση της πηγής από την άφιξη του απευθείας ήχου, με την προϋπόθεση ότι οι πρώτες ανακλάσεις φτάνουν μέσα σε 35 msec από το απευθείας σήμα κι ότι η στάθμη τους δεν είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από αυτή του απευθείας ήχου.

Πρώτες ανακλάσεις (early reflections)

Οι πρώτες ανακλάσεις έχουν το χαρακτηριστικό της χρονικής καθυστέρησης σε σχέση με το απευθείας σήμα. Επίσης, λόγω της ανάκλασης σε επιφάνειες του χώρου έχουν χάσει μέρος της αρχικής τους ενέργειας και συνεπώς έχουν χαμηλότερη στάθμη από το απευθείας σήμα. Επιπροσθέτως, σε υψηλές συχνότητες οι απώλειες είναι μεγαλύτερες καθώς το μικρότερο μήκος κύματος τους απορροφάται ευκολότερα από τον αέρα. Η ενέργεια των πρώτων ανακλάσεων εξαρτάται από τα υλικά του χώρου λόγω της διαφορετικής απορρόφησης σε διαφορετικές συχνότητες από αυτά.

Το χρονικό διάστημα άφιξης των πρώτων ανακλάσεων (msec) και οι στάθμες τους, παρέχουν πληροφορίες σχετικές με το γεωμετρικό σχήμα και το μέγεθος του χώρου. Πιο συγκεκριμένα ο χρόνος ITD (initial time delay gap), ο οποίος ορίζεται ως το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί ανάμεσα στο απευθείας σήμα και τις πρώτες ανακλάσεις (σχήμα 3.2.2), διαμορφώνει την αίσθηση του μεγέθους του χώρου στον ακροατή. Ο χρόνος καθυστέρησης της άφιξης των πρώτων ανακλάσεων είναι αυτός που καθορίζει το μέγεθος ενός κλειστού χώρου. Επιπλέον, ο λόγος των στάθμων του απευθείας σήματος προς τις πρώτες ανακλάσεις δίνει την αίσθηση της απόστασης πηγής – ακροατή. Είναι πολύ σημαντικό για ζητήματα καταληπτότητας του λόγου οι πρώτες ανακλάσεις να μην ξεπερνούν το όριο του Haas (50 msec). Αυτό γιατί έχει βρεθεί πως τα πρώτα 50 msec του RIR διαγράμματος συμβάλλουν στην καταληπτότητα του λόγου. Όταν οι πρώτες ανακλάσεις καταφθάνουν με καθυστέρηση 35 msec τότε το ανθρώπινο αυτί δεν τις αντιλαμβάνεται ως ξεχωριστό ήχο με αποτέλεσμα να ενισχύουν τη στάθμη του απευθείας ήχου. Αυτό είναι πολύ σημαντικό για παράδειγμα, σε έναν ακροατή που βρίσκεται μακριά από την πηγή. Υπάρχουν μέθοδοι ελέγχου των πρώτων ανακλάσεων έτσι ώστε να ενισχύουν την αίσθηση της καταληπτότητας. Στο παρακάτω σχήμα επιχειρείται αύξηση των χρήσιμων ανακλάσεων μέσα από τη διαμόρφωση της οροφής και παράλληλη μείωση της αντήχησης του χώρου με τη χρήση απορροφητικών υλικών στο πίσω μέρος της αίθουσας.



Σχήμα 3.2.3: Μέθοδος αΐξης καταληπτότητας. (24)

Καθυστερημένες ανακλάσεις (late reverberation)

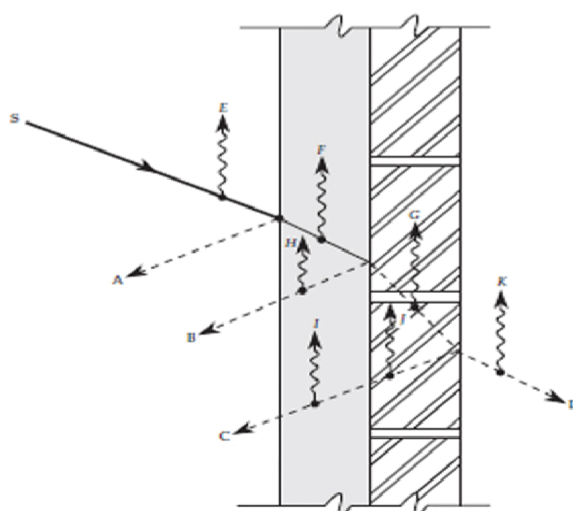
Οι καθυστερημένες ανακλάσεις σχηματίζουν το διάχυτο ή αντηχητικό πεδίο. Σε αντίθεση με το απευθείας σήμα και τις πρώτες ανακλάσεις, οι καθυστερημένες ανακλάσεις φτάνουν στο σημείο καταγραφής (παρατηρητής ή μικρόφωνο) σχεδόν ταυτόχρονα ή με αμελητέα χρονική διαφορά μεταξύ τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να έχουν την ίδια ηχητική ενέργεια με αποτέλεσμα η ηχητική πυκνότητα να είναι ομοιόμορφη. Η παραπάνω υπόθεση ισχύει για την περίπτωση διάχυτου πεδίου. Για τη δημιουργία αντηχητικού πεδίου σε κλειστούς χώρους συντελούν επιφάνειες (τοίχοι) με μικρή απορρόφηση στους οποίους ανακλάσεις μεγάλης ηχητικής ενέργειας συμβάλλουν εποικοδομητικά [5],[7],[11],[13],[16].

3.3 Απορρόφηση

Ο νόμος της διατήρησης της ενέργειας δηλώνει ότι η ενέργεια δεν μπορεί ούτε να δημιουργηθεί ούτε να καταστραφεί. Αυτό που συμβαίνει είναι η αλλαγή της ενέργειας από από μία μορφή ενέργειας σε μία άλλη. Στην περίπτωση κατά την οποία υπάρχει πλεονάζουσα ηχητική ενέργεια σε ένα χώρο, η ενέργεια από μόνη της δεν μπορεί να εξαλειφθεί, αλλά μπορεί να μετατραπεί σε άλλης μορφής ενέργεια (π.χ. θερμική).. Σε αυτή τη μετατροπή βασίζεται η λειτουργία των απορροφητικών υλικών.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, όταν ένα ηχητικό κύμα προσπίπτει πάνω σε μία επιφάνεια, ένα μέρος της αρχικής ενέργειας ανακλάται ενώ ένα άλλο μέρος απορροφάται από το υλικό ή διαδίδεται μέσα από αυτό. Έστω ένα οδευόν ηχητικό κύμα στον αέρα προσπίπτει σε ένα τοίχο από σκυρόδεμα, ο οποίος είναι καλυμμένος από απορροφητικό υλικό. Η μεταβολή της αρχικής ηχητικής ενέργειας απεικονίζεται στο σχήμα 3.3.1. Καθώς το ηχητικό κύμα ταξιδεύει στον αέρα υπάρχει αρχικά μια

μικρή απώλεια ενέργειας σε θερμότητα που προκαλείται από την απορρόφηση του αέρα (E). Η απορρόφηση του αέρα είναι μη αμελητέα σε μεγάλου όγκου χώρους και σημαντικότερη στις υψηλές συχνότητες. Καθώς το ηχητικό κύμα προσκρούσει στον τοίχο υπάρχει η ανακλώμενη ηχητική ενέργεια η οποία ταξιδεύει και πάλι στον αέρα (A). Ένα άλλο μέρος της ηχητικής ενέργειας διαπερνά το απορροφητικό υλικό. Η κατεύθυνση στην οποία διαδίδεται το ηχητικό κύμα αλλάζει λόγω της αλλαγής της εμπέδησης (φαινόμενο διάθλασης). Υπάρχει και πάλι απώλεια ακουστικής ενέργειας με τη μορφή θερμότητας (F) λόγω της αντίστασης που το απορροφητικό υλικό προσφέρει στα δονούμενα μόρια του αέρα. Καθώς η ηχητική ακτίνα προσπίπτει στην επιφάνεια του τοίχου από σκυρόδεμα δύο τινά συμβαίνουν. Ένα ποσοστό της ενέργειας ανακλάται (B) και ένα άλλο διαπερνά τον κατά πολύ μεγαλύτερο σε πυκνότητα τοίχο από σκυρόδεμα με αποτέλεσμα να χάνεται περαιτέρω ηχητική ενέργεια σε θερμότητα από τον τοίχο (G). Εν συνεχεία καθώς η ηχητική ακτίνα προχωρά έχοντας συνεχώς απώλειες ηχητικής ενέργειας, φθάνοντας στο τέλος του τοίχου ανακλάται ένα μέρος της ξανά (C). Υπάρχει και πάλι απώλεια ενέργειας (J) και (I) λόγω της αντίστροφης πορείας της ακτίνας προς τον τοίχο και το απορροφητικό αντίστοιχα. Τέλος, εξέρχεται στον αέρα και διαθλάται ταυτόχρονα άλλη μια φορά λόγω αλλαγής του μέσου διάδοσης (D). Επίσης υπάρχουν και πάλι απώλειες σε θερμότητα λόγω του αέρα (K).



Σχήμα 3.3.1: Διαδικασία απώλειας ηχητικής ενέργειας και μετατροπής της σε θερμότητα. [7]

Συντελεστής απορρόφησης και κεντρικές συχνότητες

Ο συντελεστής απορρόφησης χρησιμοποιείται με σκοπό την αξιολόγηση της απορροφητικότητας ενός υλικού. Ο συντελεστής απορρόφησης ποικίλει ανάλογα με τη συχνότητα και τη γωνία με την οποία ο ήχος προσπίπτει επάνω στο υπό εξέταση υλικό. Σε ένα διάχυτο ηχητικό πεδίο ο ήχος ταξιδεύει σε κάθε κατεύθυνση με την ίδια πιθανότητα. Σε πολλές περιπτώσεις χρειάζεται ο συντελεστής απορρόφησης να εκφράζεται για κάθε πιθανή γωνία πρόσπτωσης. Βάσει αυτού, ορίζεται ο διάχυτος συντελεστής απορρόφησης ενός υλικού ο οποίος συμβολίζεται με το γράμμα a . Ο συντελεστής αυτός, είναι ένας τρόπος μέτρησης της ικανότητας μίας επιφάνειας ή ενός υλικού να απορροφά ηχητική ενέργεια. Εάν για παράδειγμα υποθέσουμε ότι ένα υλικό έχει διάχυτο συντελεστή απορρόφησης $a = 0.55$ για μία συγκεκριμένη συχνότητα, αυτό σημαίνει πως το υλικό αυτό απορροφά το 55% της προσπίπτουσας ηχητικής ενέργειας, μετατρέποντάς τη σε άλλη μορφή ενέργειας. Ένας τέλειος απορροφητής μετατρέπει όλη την ηχητική ενέργεια σε άλλη μορφής ενέργεια, δηλαδή παρουσιάζει 100% απορρόφηση, ενώ αντίθετα μια τέλεια ανακλαστική επιφάνεια παρουσιάζει 0% απορρόφηση. Αυτό σημαίνει πως οι τιμές που μπορεί να πάρει ο διάχυτος συντελεστής απορρόφησης κυμαίνονται από 0 έως 1 με $a_{\min}=0$ και $a_{\max}=1$. Η απορρόφηση που προσδίδει ολόκληρη η επιφάνεια του υλικού προκύπτει πολλαπλασιάζοντας το συντελεστή απορρόφησης του, με το συνολικό εμβαδό που αυτό έχει. Η μαθηματική σχέση που δίνει τη συνολική απορρόφηση ενός υλικού είναι η παρακάτω:

$$A = S \cdot a \quad [3.1]$$

Όπου S : το εμβαδό της επιφάνειας (m^2)

a : ο συντελεστής απορρόφησης του υλικού

Όταν ζητείται να υπολογιστεί η συνολική απορρόφηση ενός δωματίου όλα τα υλικά κι οι επιφάνειες συνεισφέρουν στην απορρόφηση του χώρου κι υπολογίζεται με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$\sum A = S_1 a_1 + S_2 a_2 + \dots + S_n a_n \quad [3.2]$$

Όπου S : το εμβαδό της κάθε επιφάνειας

a : ο συντελεστής απορρόφησης της κάθε επιφάνειας

Επιπλέον, ο μέσος συντελεστής απορρόφησης μπορεί να υπολογιστεί βρίσκοντας το λόγο της συνολικής απορρόφησης προς το συνολικό εμβαδό του χώρου.

$$a_{average} = \frac{\sum A}{\sum S} \quad [3.3]$$

Ο συντελεστής απορρόφησης ενός υλικού εξαρτάται, όπως προαναφέρθηκε, από τη συχνότητα του προσπίπτοντος ήχου. Οι τυπικές κεντρικές συχνότητες για τις οποίες συνήθως υπολογίζεται ο συντελεστής απορρόφησης είναι έξι: 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz και 4 kHz.

Σε κάποιες περιπτώσεις η απορρόφηση ενός υλικού δίδεται από έναν αριθμό ο οποίος είναι γνωστός ως NRC (noise reduction coefficient). Ο NRC είναι ουσιαστικά ο μέσος όρος των συντελεστών απορρόφησης για τις παρακάτω συχνότητες: 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz και 2kHz.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι ο NRC αποτελεί μία μέση εκτίμηση κι έχει αξία μόνο για την απορρόφηση σε μεσαίες συχνοτικές περιοχές. Για αυτό το λόγο ο NRC είναι περισσότερο χρήσιμος σε ακουστικές μελέτες κι εφαρμογές που επικεντρώνονται στην ανθρώπινη ομιλία. Για μελέτες με ευρύτερη μουσική εφαρμογή χρησιμοποιείται μεγαλύτερο εύρος κεντρικών συχνοτήτων.

Σε άλλες περιπτώσεις, ένας άλλος αριθμός χρησιμοποιείται για την περιγραφή της απορρόφησης ενός υλικού και ονομάζεται SAA (sound absorption average), ο οποίος εκφράζει μια αριθμητική μέση τιμή απορρόφησης που μοιάζει με αυτή του NRC, με τη διαφορά ότι λαμβάνονται κεντρικές συχνότητες στο 1/3 της οκτάβας από τα 200 Hz μέχρι τα 2.5 kHz. Τέλος το ISO 11654 ορίζει μια συγκεκριμένη ωφέλιμη σταθερά απορρόφησης η οποία χρησιμοποιείται σε υλικά τα οποία υπόκεινται και χρησιμοποιούν τον έλεγχο του προτύπου ISO 354 [7].

Απορροφητικά υλικά

Υπάρχουν τέσσερις κύριοι τύποι ακουστικών απορροφητών. Ο καθένας τους με διαφορετικές ιδιότητες στον τρόπο με τον οποίο απορροφά τον ήχο και με διαφορετική ακουστική συμπεριφορά στο πεδίο των συχνοτήτων. Οι τύποι αυτοί είναι:

- Πορώδη υλικά, όπως τα χαλιά, οι κουβέρτες, ο υαλοβάμβακας και πολλά άλλα. Απορροφούν ακουστική ενέργεια καθώς αντιστέκονται στην κίνηση των μορίων του αέρα και μετατρέπουν την ενέργεια σε θερμότητα στην πορεία του ακουστικού κύματος μέσα από την πορώδη κατασκευή του υλικού τους. Η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται από την πυκνότητα του υλικού τους, το πάχος τους και την τοποθέτησή τους. Είναι αποτελεσματικά κυρίως σε μεσαίες κι υψηλές συχνότητες.

- Απορροφητικά από πάνελ (ταμπλό), όπως τα λεπτά κόντρα πλακέ, λεπτές σανίδες ή πλαστικό με διάκενο από πίσω του. Το ακουστικό κύμα θέτει το πάνελ σε παλινδρομική κίνηση με αποτέλεσμα αυτή η ελαστική κίνηση να μετατρέπει την ηχητική ενέργεια σε θερμότητα. Είναι κυρίως αποτελεσματικά σε χαμηλές συχνότητες.

- Συνηχητές, οι οποίοι διαθέτουν μικρές οπές μέσα σε μία κατασκευή από μεγαλύτερες κενές κοιλότητες. Η αντίσταση στην κίνηση του αέρα μπρός πίσω στο σημείο της οπής μετατρέπει την ηχητική ενέργεια σε θερμότητα. Αυτού του τύπου απορροφητικά υλικά πολύ συχνά καλούνται συνηχητές Helmholtz και τυπικά παρουσιάζουν μέγιστη απορρόφηση σε μία συγκεκριμένη συχνότητα συντονισμού της οπής. Κάθε υλικό με σχισμές ή οπές που οδηγούν σε ένα μεγαλύτερο χώρο ανήκει στη συγκεκριμένη κατηγορία απορροφητών.

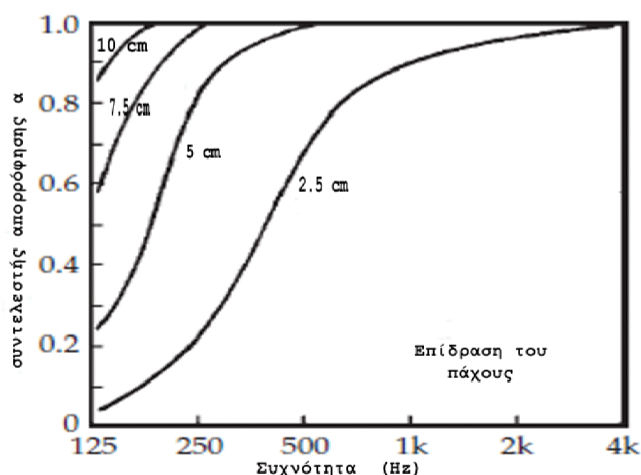
- Ενεργό απορροφητές, οι οποίοι βασίζονται τη λειτουργία τους σε φαινόμενα καταστρεπτικής συμβολής. Μία εφαρμογή αυτής της μεθόδου είναι σε αγωγούς αέρα όπου χρησιμοποιείται ένα μικρόφωνο ώστε να συλλέγει ηχητικά δείγματα, το οποίο ακολουθείται από ένα μεγάφωνο το οποίο τροφοδοτείται με το σήμα που λαμβάνει το μικρόφωνο με διαφορά φάσης 180 μοίρες. Έτσι με την αναπαραγωγή του από το μεγάφωνο δημιουργείται το φαινόμενο της καταστρεπτικής συμβολής κι ο ήχος ακυρώνεται.

Οι πρώτοι δύο τύποι απορροφητικών υλικών είναι αυτοί που θα μας απασχολήσουν άμεσα [12].

3.4 Πορώδη υλικά

Η επίδραση του πάχους

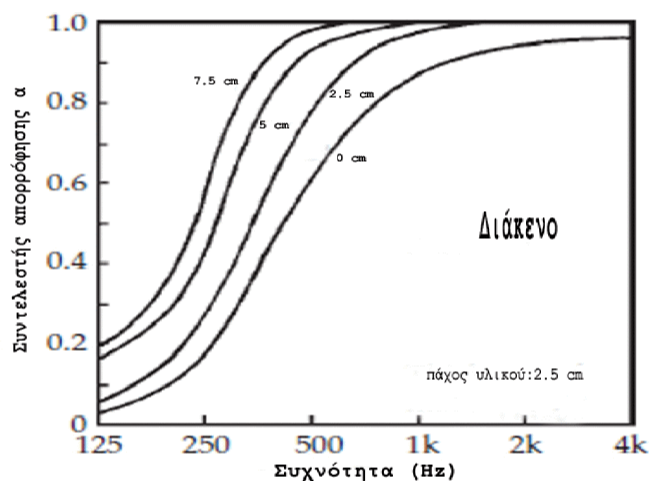
Μπορεί να θεωρηθεί πως μεγαλύτερη απορρόφηση παρουσιάζεται σε υλικά με μεγαλύτερο πάχος κι ειδικότερα στην περίπτωση πορώδων υλικών. Ο ισχυρισμός αυτός ισχύει μόνο για χαμηλές συχνότητες. Μεγαλύτερη απορρόφηση επιτυγχάνεται όταν τα πορώδη υλικά τοποθετούνται σε απόσταση $\lambda/4$ από μία ισχυρά ανακλαστική επιφάνεια ή σε περιττά πολλαπλάσια αυτής της διάστασης. Αυτό είναι το σημείο όπου η ταχύτητα των σωματιδίων γίνεται μέγιστη. Στη πραγματικότητα αυτό είναι δύσκολο να επιτευχθεί. Στο σχήμα 3.4.1 φαίνεται η επίδραση του πάχους σε απορροφητές οι οποίοι είναι τοποθετημένοι απ' ευθείας σε μία συμπαγή επιφάνεια. Υπάρχει ελάχιστη διαφορά για συχνότητες άνω των 500 Hz σε αντίθεση με αυτές που βρίσκονται χαμηλότερα από τα 500 Hz. Παρατηρείται επίσης πως υπάρχει πολύ μεγαλύτερη απορρόφηση με την αύξηση του πάχους από 2.5 cm σε 5cm σε σχέση με τα μεγαλύτερα πάχη των 7.5 cm και 10 cm αντίστοιχα, στα οποία υπάρχει αύξηση της απορροφητικότητας, αλλά όχι τόσο μεγάλη όσο στην μετάβαση από τα 2.5 cm στα 5 cm πάχους.



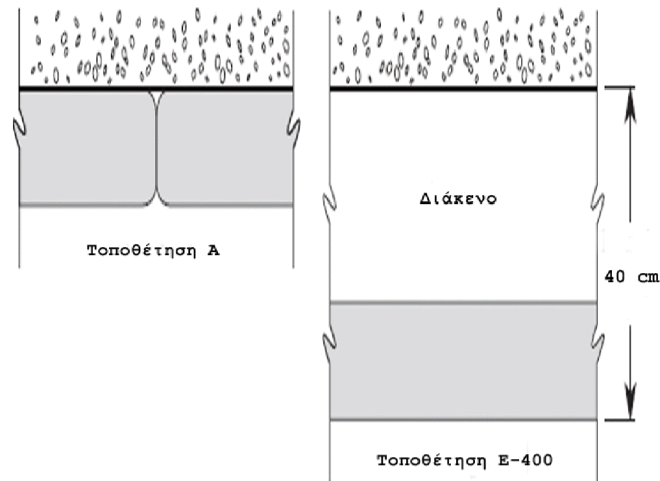
Σχήμα 3.4.1: Επίδραση του πάχους σε απορροφητικά τοποθετημένα χωρίς διάκενο σε συμπαγή επιφάνεια [7].

Η επίδραση του διάκενου

Αποτελεσματική απορρόφηση σε χαμηλές συχνότητες μπορεί επίσης να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας πορώδη υλικά και τοποθετώντας τα σε απόσταση από κάποια περατωτική επιφάνεια. Ένας πορώδης απορροφητής με διάκενο είναι το ίδιο αποτελεσματικός με έναν πορώδη απορροφητή μεγαλύτερου πάχους ο οποίος έχει τοποθετηθεί απ' ευθείας στο συμπαγή τοίχο. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει την απορρόφηση φύλλου υαλοβάμβακα πάχους 2.5 cm τοποθετημένο σε αποστάσεις 0, 2.5, 5 και 7.5 cm από τον συμπαγή τοίχο. Παρατηρείται ότι το ίδιο υλικό πάχους 2.5 cm σε απόσταση 7.5 cm από τον τοίχο προσεγγίζει την απορρόφηση υαλοβάμβακα με 5cm πάχος τοποθετημένου απ' ευθείας στον τοίχο. (σύγκριση της καμπύλης 3 σχήμα 3.4.1 με την καμπύλη 2 σχήμα 3.4.2)



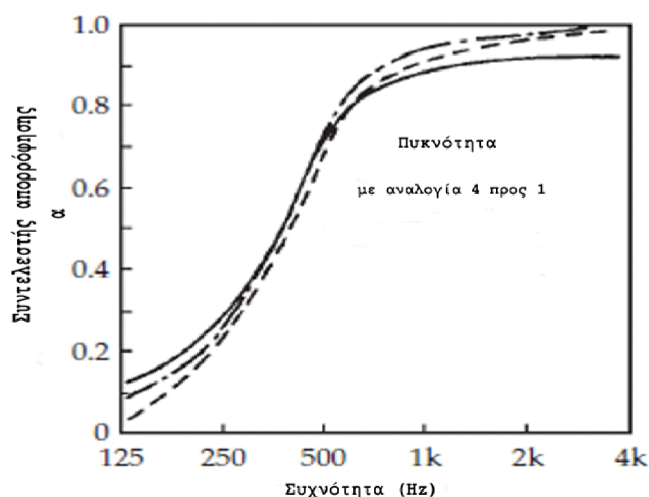
Σχήμα 3.4.2: Επίδραση τοποθέτησης πορώδους υλικού με διάκενο [7].



Σχήμα 3.4.3: Σνήθειες τοποθετήσεις που ισχύουν για απορροφητικά υλικά από την ASTM (American society of testing and materials). Στην τοποθέτηση Α το υλικό εφάπτεται του τοίχου. Η τοποθέτηση Ε-400 έχει εφαρμογές σε ψευδοροφές με πάνελ τοποθετημένα με διάκενο 40cm από το ταβάνι [7].

Η επίδραση της πυκνότητας

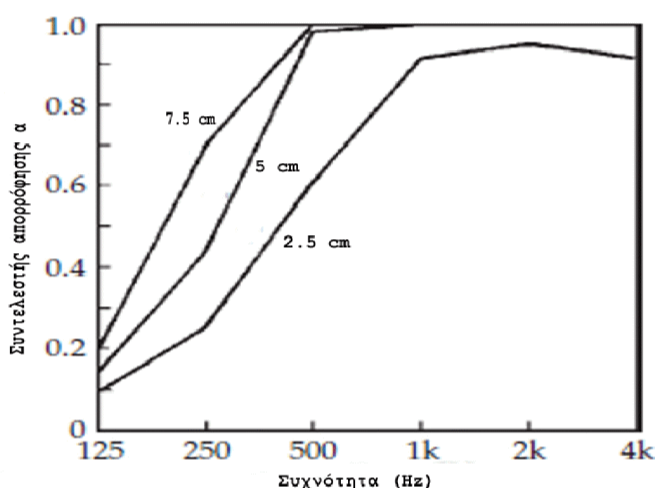
Ο υαλοβάμβακας κι άλλα υλικά, διατίθενται εμπορικά σε διαφορετικές πυκνότητες. Γενικά, ο ήχος έχει τη δυνατότητα να διαπερνά με την ίδια ευκολία μία μικρής πυκνότητας επιφάνεια με μία μεγαλύτερης πυκνότητας. Στο σχήμα που ακολουθεί εμφανίζεται η αλλαγή της απορρόφησης λόγω μεταβολής της πυκνότητας για τον υαλοβάμβακα.



Σχήμα 3.4.4: Επίδραση της πυκνότητας σε πορώδες υλικό [7].

Σανίδες fiberglass

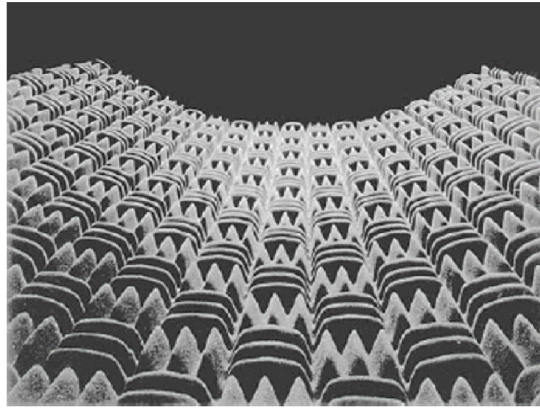
Σανίδες μέτριας σκληρότητας από υαλοβάμβακα χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση της ακουστικής σε κλειστούς χώρους. Αυτού του τύπου ο υαλοβάμβακας είναι μεγαλύτερης πυκνότητας από αυτούς που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές θερμομόνωσης κτιρίων. Τυπικά παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι τα: John Manville 1000 series spin glass και Owens-Corning Type 703 fiberglass και τα δύο με πυκνότητα 3000 kg/m^3 . Διατίθενται σε διάφορα πάχη και πυκνότητες. Για παράδειγμα ο τύπος 701 έχει πυκνότητα 1500 kg/m^3 και ο τύπος 705 έχει πυκνότητα 6000 kg/m^3 .



Σχήμα 3.4.5: Συντελεστής απορρόφησης αφρώδες απορροφητικού της Sonex [7].

Διάτρητα αφρώδη υλικά

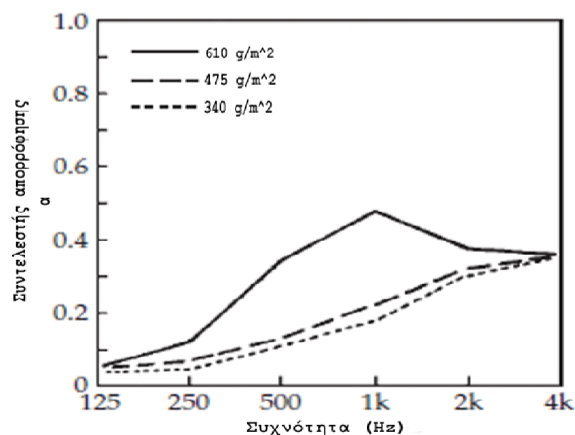
Αφρώδη ελαστικά υλικά κατασκευασμένα από πολυουρεθάνη και πολυεστέρα χρησιμοποιούνται συχνά σε εφαρμογές για τη βελτιστοποίηση της ακουστικής σε studio ηχογραφήσεων αλλά και σε δωμάτια που απαιτείται καλή ακουστική συμπεριφορά. Η εικόνα 3.4.1 που ακολουθεί απεικονίζει ένα αφρώδες υλικό της εταιρίας Sonex που χρησιμοποιείται και για την κατασκευή ανηχοικών θαλάμων. Αυτό το υλικό μπορεί να κολληθεί ή να συρραφεί στην επιφάνεια για την οποία προορίζεται. Στο σχήμα 3.4.5 φαίνεται ο συντελεστής απορρόφησης του συγκεκριμένου υλικού με πάχος 2.5, 5 και 7.5cm για απ' ευθείας τοποθέτηση σε συμπαγή τοίχο.



Εικόνα 3.4.1: Αφρώδες απορροφητικό υλικό της εταιρίας Sonex [7].

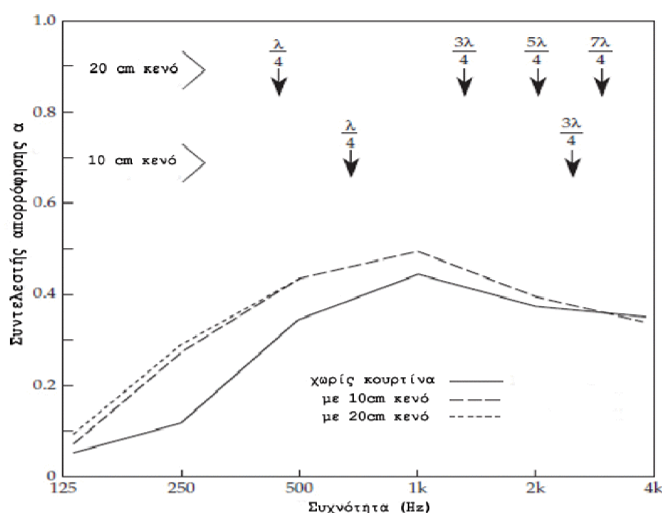
Οι κουρτίνες ως απορροφητές

Οι κουρτίνες κατατάσσονται στα πορώδη απορροφητικά υλικά καθώς ο ήχος μπορεί να διαπεράσει το ύφασμα τους. Αυτή η διείσδυση στους πόρους του υφάσματος επιτρέπει την απορρόφηση της ηχητικής ενέργειας. Μεταβλητές που επηρεάζουν την αποδοτικότητα του υλικού είναι ο τύπος κι η πυκνότητά του, ο βαθμός της αναδίπλωσής του κι ο τρόπος τοποθέτησής του στον τοίχο. Όσο μεγαλύτερη πυκνότητα διαθέτει το ύφασμα τόσο μεγαλύτερη είναι κι η προσφερόμενη απορρόφηση. Το σχήμα 3.4.6 εξετάζει την απορρόφηση σε σχέση με την επιφανειακή πυκνότητα μίας κουρτίνας (340, 475 και 610 kg/m²) κρεμασμένης παράλληλα χωρίς πτυχώσεις σε τοίχο. Η απορρόφηση λαμβάνει μεγάλες τιμές για συχνότητες μεταξύ 500 Hz – 1 kHz.



Σχήμα 3.4.6: Συντελεστής απορρόφησης για διαφορετικής πυκνότητας κουρτίνα [7].

Η απόσταση που μία κουρτίνα θα κρεμαστεί από μία ανακλαστική επιφάνεια παίζει σημαντικό ρόλο. Στο σχήμα 3.4.7 φαίνεται η απορρόφηση μίας υφασμάτινης κουρτίνας επιφανειακής πυκνότητας 645 g/m^2 κρεμασμένης σε απόσταση 10 και 20 cm από ένα συμπαγή τοίχο, κι η απορρόφηση του τοίχου χωρίς κουρτίνα.



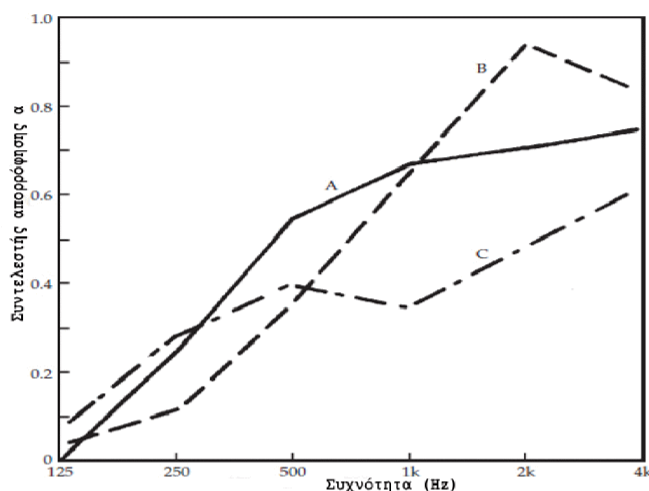
Σχήμα 3.4.7: Επιρροή διάκενου από ένα τοίχο στο κρέμασμα της κουρτίνας [7].

Τα χαλιά ως απορροφητές

Τα χαλιά θεωρούνται κι αυτά πορώδη απορροφητικά υλικά για τον ίδιο λόγο με τις κουρτίνες. Επίσης η χρησιμοποίησή τους εξυπηρετεί και την καλαισθησία ενός χώρου πέρα από τις απορροφητικές τους ιδιότητες. Το χαλί με το υπόστρωμά του, αν αυτό διαθέτει, προσφέρει σημαντικά ποσοστά απορρόφησης σε μεσαίες και υψηλές συχνότητες. Υποθέτοντας πως ένα χαλί έχει τοποθετηθεί σε πάτωμα επιφάνειας 300 m^2 και πως ο χρόνος αντήχησης της αίθουσας αυτής έχει καθοριστεί στα 0.5sec, για την επίτευξη αυτού του χρόνου απαιτούνται 1.060 sabines απορρόφησης στο δωμάτιο. Σε υψηλές συχνότητες ένα βαρύ χαλί και μία επένδυση με συντελεστή απορρόφησης περίπου 0.6 δίνουν περίπου 600 sabines απορρόφησης στα 4 kHz ή 57% της απαιτούμενης απορρόφησης για όλο το χώρο χωρίς να συνυπολογιστεί η απορρόφηση που θα προσδίδουν οι τοίχοι και το ταβάνι.

Επίδραση του τύπου χαλιού στην απορρόφηση

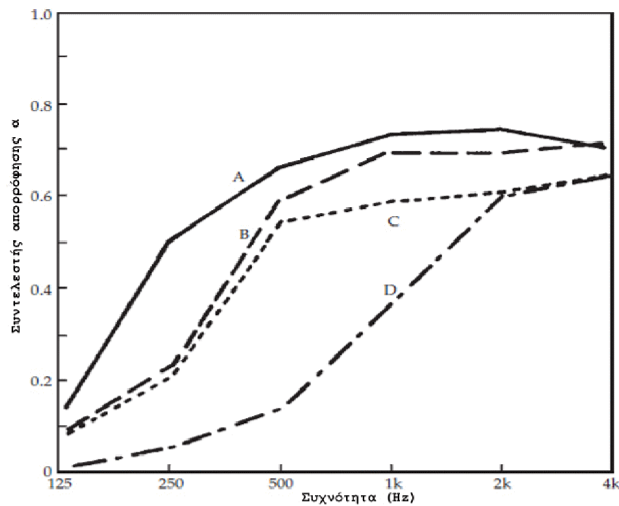
Υπάρχουν αρκετές διαφορές στην απορρόφηση του ήχου αναλόγως με τον τύπο του χαλιού. Το σχήμα 3.4.8 απεικονίζει τις διαφορές ανάμεσα σε ένα χαλί Wilton πάχους 0.74cm κι επιφανειακής πυκνότητας 3.14 kg/m² [A], σε ένα χαλί από βελούδο πάχους 0.64 cm κι επιφανειακής πυκνότητας 2.59 kg/m² με ενίσχυση latex [B] και στο ίδιο χαλί χωρίς latex πυκνότητας 1.27 kg/m² [C].



Σχήμα 3.4.8: Διαφορές απορροφητικότητας ανάμεσα σε τρεις διαφορετικούς τύπους χαλιών [7].

Επίδραση στην απορρόφηση λόγω της ύπαρξης υποστρώματος (επένδυσης)

Αφρώδη ή σπογγώδη καουτσούκ, πολυουρεθάνη ή συνδυασμός αυτών συχνά χρησιμοποιούνται ως επένδυση κάτω από ένα χαλί. Το καουτσούκ από αφρώδη υλικά είναι πάντα διάτρητο ενώ το καουτσούκ από σπογγώδη υλικά μπορεί να είναι είτε διάτρητο είτε όχι. Τα διάτρητα υλικά συμβάλλουν στην απορρόφηση του ήχου ενώ τα μη διάτρητα όχι. Το σχήμα 3.4.9 παρουσιάζει το συντελεστή απορρόφησης μετρούμενο με τη μέθοδο του θαλάμου αντήχησης για τέσσερις διαφορετικού τύπου επενδύσεις κάτω από το ίδιο χαλί. Η γραμμή [A] και [C] αναπαριστά την επένδυση πολυουρεθάνης επιφανειακής πυκνότητας 2.7 και 1.35 kg/m² αντίστοιχα. Η γραμμή [B] αναπαριστά έναν ενδιάμεσο συνδυασμό επένδυσης από πολυουρεθάνη κι αφρό. Ενώ αυτά τα τρία γραφήματα διαφέρουν μεταξύ τους, κανένα δε συγκρίνεται με την πολύ φτωχή απορρόφηση που παρέχει το γράφημα [D], το οποίο αναπαριστά το χαλί τοποθετημένο απ' ευθείας στο πάτωμα, χωρίς καμία επένδυση. Συμπεραίνεται πως η επένδυση συνεισφέρει στην απορρόφηση του χαλιού για μεγάλο συχνοτικό εύρος [7].



Σχήμα 3.4.9: Συνεισφορά επένδυσης κάτω από το χαλί [7].

3.5 Πάνελ (απορροφητικά ταμπλό)

Η απορρόφηση σε χαμηλές συχνότητες επιτυγχάνεται με τη χρήση των λεγόμενων απορροφητικών πάνελ. Τα πορώδη υλικά δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν από μόνα τους για την απορρόφηση χαμηλών συχνοτήτων. Η απορρόφηση ενός πορώδους υλικού επιτυγχάνεται όταν το πάχος του είναι συγκρίσιμο με το μήκος κύματος. Στα 100 Hz το μήκος κύματος είναι 3.35 m και θα ήταν μη πρακτικό να χρησιμοποιούνται απορροφητές τέτοιων διαστάσεων. Για αυτό το λόγο, για την απορρόφηση χαμηλών συχνοτήτων χρησιμοποιούνται συνηχητές. Τα πάνελ κατασκευάζονται από υλικά με μεγάλη ελαστικότητα, τα οποία είναι επιρρεπή σε ταλάντωση. Ένα τυπικό υλικό για την κατασκευή των πάνελ είναι το κόντρα πλακέ. Το πλάτος της ταλάντωσης γίνεται μέγιστο στη συχνότητας συντονισμού. Σε αυτό το σημείο η απορρόφηση της κατασκευής παίρνει τη μέγιστη τιμή της. Η εσώκλειστη και σφραγισμένη κοιλότητα αέρα πίσω από το πάνελ ενεργεί ως πηγή. Όσο μεγαλώνει το διάκενο αέρος τόσο ασθενέστερη γίνεται η πηγή. Αντίθετα, μικρότερο διάκενο αέρος δημιουργεί ισχυρή πηγή. Η συχνότητα συντονισμού για ένα επίπεδο, μη διάτρητο πάνελ δίνεται από τη σχέση:

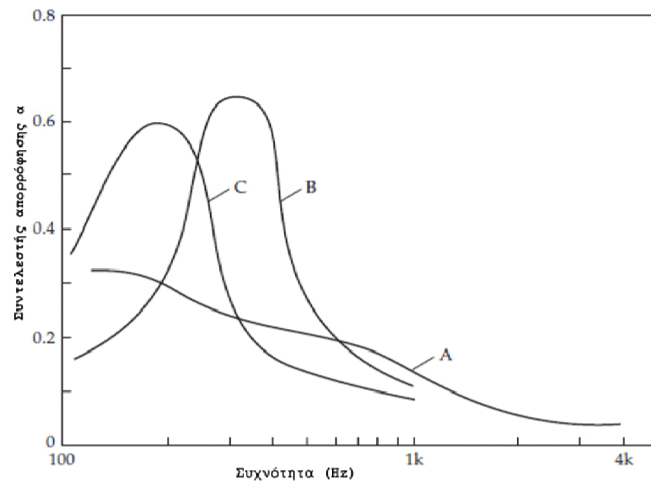
$$f_0 = \frac{60}{\sqrt{md}} \quad [3.4]$$

Όπου f_0 : συχνότητα συντονισμού (Hz)

m : επιφανειακή πυκνότητα πάνελ (kg/m^2)

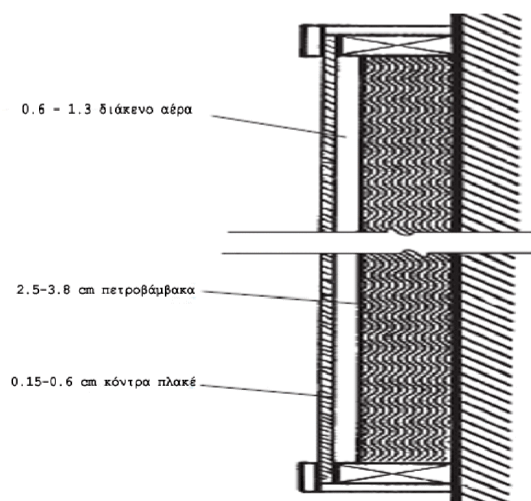
d : το πλάτος του διάκενου (m)

Για παράδειγμα, ένα πάνελ από κόντρα πλακέ πάχους 63.5 cm τοποθετημένο σε απόσταση 9.5cm από τον τοίχο και επιφανειακής πυκνότητας 4.7 kg/m² έχει συχνότητα συντονισμού 102Hz.



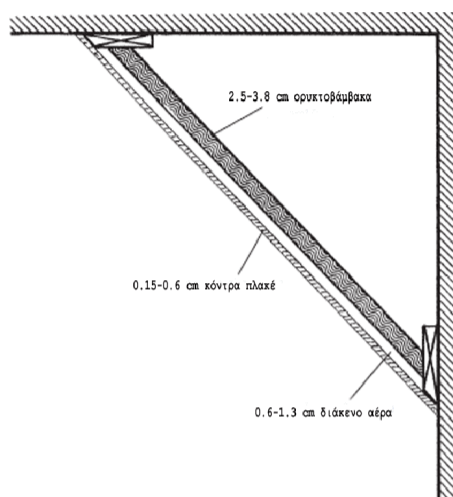
Σχήμα 3.5.1: Συντελεστής απορρόφησης τριών πάνελ. [A]-0.5cm κόντρα πλακέ με 5cm απόσταση από τον τοίχο.[B]-0.15cm κόντρα πλακέ με 2.5cm ορυκτοβάμβακα και 0.6cm απόσταση από τον τοίχο.[C]- το ίδιο με το [B] αλλά για 0.6cm πάνελ [7].

Η απορρόφηση αυξάνει όταν στο διάκενο αέρα τοποθετούνται πορώδη υλικά, όπως ο υαλοβάμβακας. Αυτό συμβαίνει γιατί το υλικό αυξάνει σε όγκο τον ταλαντούμενο μηχανισμό.



Σχήμα 3.5.2: τοποθέτηση πάνελ σε τοίχο ή οροφή [7].

Στο σχήμα 3.5.2 φαίνεται η τοποθέτηση ενός πάνελ σε τοίχο ή οροφή. Κόντρα πλακέ πάχους 0.15- 0.6 cm είναι στερεωμένο σε μία ξύλινη κατασκευή για να δώσει το απαιτούμενο διάκενο αέρα από τον τοίχο. Ορυκτοβάμβακας πάχους 2.5–3.8 cm είναι τοποθετημένος στην επιφάνεια του τοίχου. Συνήθως συνιστάται ένα διάκενο αέρα της τάξης των 0.6-1.3 cm μεταξύ του απορροφητικού και του πάνελ από κόντρα πλακέ.



Σχήμα 3.5.3: Τοποθέτηση πάνελ σε γωνία [7].

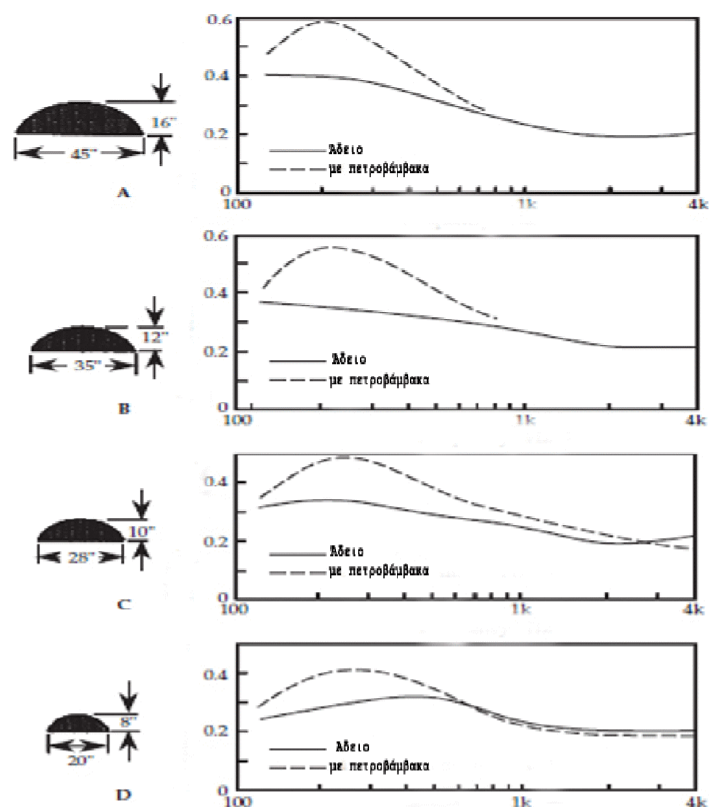
Η τοποθέτηση απορροφητικού πάνελ σε γωνία μεταξύ δύο τοίχων φαίνεται στην σχήμα 3.5.3. Όλοι οι τρόποι δόνησης (στάσιμα κύματα) παρουσιάζουν μέγιστα ηχητικής πίεσης στις γωνίες ενός κλειστού χώρου. Ένα πάνελ τοποθετημένο σε γωνία χρησιμοποιείται για τη μείωση της ηχητικής ενέργειας συγκεκριμένων ιδιοκυμάτων του χώρου. Ο απορροφητής μπορεί εύκολα να διαχωριστεί από το κόντρα πλακέ πάνελ με τη χρήση μεταλλικών στηριγμάτων όπως τα Tectum, αφήνοντας διάκενο αέρα στο πίσω μέρος του πάνελ 0.6–1.3 cm. Για εφαρμογές όπου μεσαίες κι υψηλές συχνότητες μπορούν να δημιουργήσουν πρόβλημα λόγω της ανάκλασής τους από το πάνελ, δύναται να προστεθεί μία επικάλυψη από υαλοβάμβακα με διάκενο, χωρίς αυτό να επηρεάζει την απορρόφηση των χαμηλών συχνοτήτων από το πάνελ. Το διάκενο χρησιμοποιείται για την αποφυγή της ζεύξης του συντονισμού του υαλοβάμβακα με την υπόλοιπη κατασκευή [7].

Πολυκυλινδρικοί απορροφητές

Η τοποθέτηση επίπεδων πάνελ σε ένα χώρο μπορεί να επιφέρει επιθυμητά αποτελέσματα, αλλά η περιέλιξη του κόντρα πλακέ γύρω από ημικύλινδρικές διατάξεις μπορεί να προσφέρει πολύ ελκυστικά χαρακτηριστικά. Με τη χρήση τέτοιων στοιχείων είναι από ακουστικής άποψης πιθανό, να επιτευχθεί ηχητικό πεδίο που να προσομοιάζει κατά πολύ το διάχυτο, το οποίο συνυπάρχει με στοιχεία όπως η ζωντάνια κι η λαμπρότητα του ήχου, παράμετροι που τείνουν να μην υφίστανται σε χώρους με επίπεδες επιφάνειες.

Όσο μεγαλύτερο το μέγεθος τέτοιων απορροφητών, τόση μεγαλύτερη η απόδοσή τους στις χαμηλές συχνότητες. Για συχνότητες πάνω από τα 500 Hz, το μέγεθος αυτών των στοιχείων έχει ελάχιστη σημασία. Το μήκος των πολυκυλινδρικών απορροφητών είναι μάλλον ασαφές, αφού μπορεί να εκτείνεται από το μήκος ενός χαρτιού κόντρα πλακέ μέχρι το συνολικό μήκος, πλάτος ή ύψος ενός δωματίου. Παρ' όλα αυτά συνιστάται, να χωρίζεται η κοιλότητα πίσω από την επιφάνεια του κυλίνδρου, με τυχαίο τρόπο από χωρίσματα με διάκενο μεταξύ τους. Τα πολυκυλινδρικά στοιχεία του σχήματος 3.5.4 έχουν τέτοια χωρίσματα.

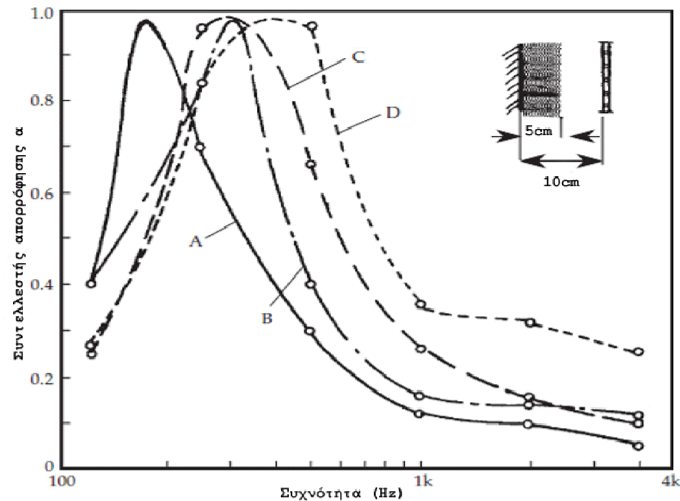
Η απορρόφηση αυτών των στοιχείων αυξάνει με την τοποθέτηση απορροφητικών υλικών όπως υαλοβάμβακα στο εσωτερικό τους. Αν είναι απαραίτητη η απορρόφηση χαμηλών συχνοτήτων, μπορεί η κοιλότητα τους να εμπλουτισθεί με απορροφητικό υλικό (π.χ. αφρό). Γενικά είναι προτιμότερο και πιο αποδεκτό να κατασκευάζεται κάθε πολυκυλινδρικός απορροφητής ως ανεξάρτητο στοιχείο, καθώς με αυτόν τον τρόπο υπάρχουν περισσότερες επιλογές τοποθέτησης τους για επίτευξη καλύτερης διάχυσης [7].



Σχήμα 3.5.4: Συντελεστής απορρόφησης πολυκυκλινδρικών απορροφητών διαφόρων διαστάσεων. Οι διακεκομμένες γραμμές δηλώνουν την εισαγωγή ορυκτοβάμβακα στο διάκενο ενώ οι συνεχείς γραμμές δηλώνουν το διάκενο αέρα μέσα στο απορροφητικό στοιχείο [7].

Διάτρητα πάνελ

Διάτρητα πάνελ, για παράδειγμα, κατασκευασμένα από λεπτό ξύλο, κόντρα πλακέ, αλουμίνιο ή χάλυβα και τοποθετημένα με διάκενο από τον τοίχο ανήκουν στην κατηγορία των συνηχητών. Κάθε οπή λειτουργεί ως ο λαιμός ενός συνηχητή Helmholtz κι η κοιλότητα πίσω από τις οπές έχει τον ίδιο ρόλο με τις κοιλότητες στους συνηχητές Helmholtz. Όταν ο ήχος προσπίπτει κάθετα στο διάτρητο πάνελ, οι ταλαντώσεις των μορίων του αέρα σε κάθε οπή βρίσκονται σε φάση. Για ηχητικά κύματα που προσπίπτουν στο πάνελ υπό γωνία, η αποτελεσματικότητα του στοιχείου μειώνεται. Αυτή η απώλεια μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με το διαχωρισμό της κοιλότητας που βρίσκεται πίσω από το πάνελ χρησιμοποιώντας ξύλο ή αυλακωτό χαρτί [7].



Σχήμα 3.5.6: Συντελεστής απορρόφησης διάτρητων πάνελ με 10 cm διάκενο, μισογεμάτο με ορυκτοβάμβακα και με πάχος πάνελ 0.4 cm. [A]- διάτρηση 18% [B]- διάτρηση 0.79% [C]- διάτρηση 1.4% [D]- διάτρηση 8.7%. Η παρουσία του ορυκτοβάμβακα μετατοπίζει τη συχνότητα συντονισμού από τις θεωρητικές τιμές που πηγάζουν από τη σχέση 3.5 [7].

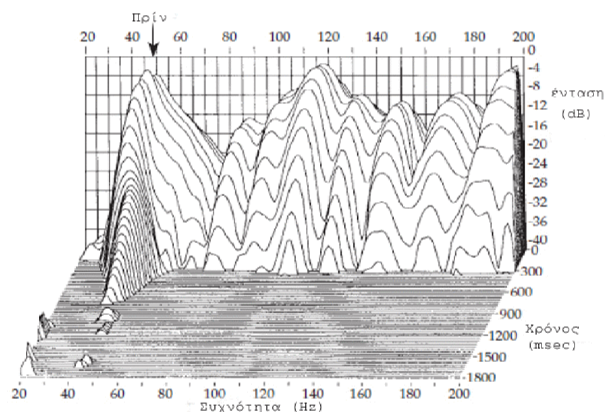
Τοποθέτηση απορροφητικών υλικών

Η τοποθέτηση των απορροφητικών υλικών σε διάσπαρτες θέσεις κι όχι σε συνεχόμενη τοποθέτηση συνεισφέρει στην καλύτερη απορρόφηση. Τέτοιου είδους τοποθέτηση δύναται να συμβάλλει και στη διάχυση του ήχου. Αν διάφοροι τύποι απορροφητικών υλικών χρησιμοποιούνται, είναι επιθυμητό να τοποθετούνται σε γωνίες, άκρες περατωτικών επιφανειών, πλευρικές επιφάνειες κι οροφή έτσι ώστε και τα τρία είδη αξονικών στάσιμων κυμάτων (διαμήκη, κάθετα και οριζόντια) να επηρεαστούν. Σε ορθογώνια δωμάτια η καλύτερη τοποθέτηση είναι σε γωνίες και στις άκρες κατά μήκος της επιφάνειας του δωματίου. Υλικά που έχουν απορρόφηση κυρίως σε υψηλές συχνότητες θα πρέπει να τοποθετούνται σε υψηλά σημεία στους τοίχους. Υλικά τοποθετημένα στα χαμηλότερα σημεία ψηλών τοίχων, μπορούν να είναι δύο φορές πιο αποτελεσματικά, σε σύγκριση με τα ίδια υλικά τοποθετημένα αλλού [7].

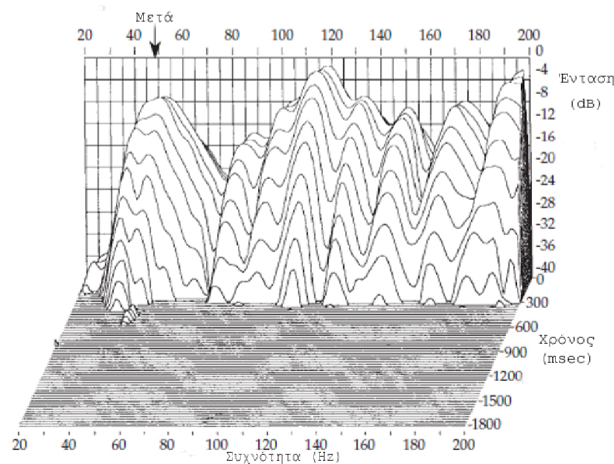
Μείωση της ενέργειας στάσιμων κυμάτων με απορροφητικά υλικά

Εξαιτίας του αρκετά στενού συχνοτικού εύρους που μπορούν οι συνηχητές να ενεργήσουν απορροφώντας αποτελεσματικά, αποτελούν ιδανική λύση για την μείωση ενέργειας των στάσιμων κυμάτων. Για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας μεθόδους ETF

(energy time frequency analysis), ένας έντονος ιδιορυθμός ενός χώρου μπορεί να προσδιοριστεί συχνοτικά όπως είναι φαίνεται στην εικόνα 3.7.1. Το εν λόγω στάσιμο κύμα χρωματίζει τον ήχο και δημιουργεί παρατεταμένη ουρά στα 47 Hz. Είναι επιθυμητή η μείωση της ηχητικής ενέργειας για το συγκεκριμένο στάσιμο κύμα. Η λύση είναι να χρησιμοποιηθεί ένας συνηχητής Helmholtz σε ένα σημείο όπου η πίεση θα είναι μέγιστη για τη συχνότητα των 47 Hz. Οι δεσμοί των 47 Hz εντοπίζονται, διεγείροντας τον χώρο με ένα σήμα στα 47 Hz που θα παράγει ένα μεγάφωνο και καταγράφοντας την απόκριση του δωματίου με ένα μικρόφωνο υψηλής ακρίβειας. Μια τοποθεσία η οποία θα είναι ταυτόχρονα βολική κι αποτελεσματική, το πιθανότερο είναι να βρίσκεται σε κάποια γωνία του χώρου όπου εμφανίζεται το στάσιμο κύμα. Η εικόνα 3.7.2 παρουσιάζει την αισθητή μείωση της ενέργειας στα 47 Hz μετά την τοποθέτηση ενός συνηχητή Helmholtz για την απορρόφηση αυτού του στάσιμου κύματος [7].



Εικόνα 3.5.1: Έντονο πρόβλημα στάσιμου κύματος στα 47 Hz [7].



Εικόνα 3.5.2: εξάλειψη προβλήματος με χρήση συνηχητή Helmholtz [7].

3.6 Διάχυση

Όταν η μέση τιμή του τετραγώνου της ηχητικής πίεσης έχει σταθερή τιμή για κάθε επίπεδο κύμα, ανεξάρτητα από την κατεύθυνση, τότε ο ήχος ονομάζεται διάχυτος. Διάχυτο πεδίο ονομάζεται το πεδίο όπου ο ήχος φτάνει στο σημείο καταγραφής από όλες τις πιθανές κατευθύνσεις και έχει την ίδια ενέργεια. Στη πραγματικότητα αυτό σπάνια είναι εφικτό ειδικά σε μικρούς κλειστούς χώρους. Αντιθέτως, τα χαρακτηριστικά ενός ήχου διαφέρουν από χώρο σε χώρο. Σε κάποιες περιπτώσεις αυτό μπορεί να είναι επιθυμητό, όπως όταν πρέπει ο ακροατής να εντοπίζει το σημείο της πηγής. Στις περισσότερες εφαρμογές η διάχυση χρησιμοποιείται για να προσφέρει αποτελεσματική κατανομή του ήχου και να εξασφαλίσει όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη απόκριση του δωματίου. Συχνά, είναι δύσκολο να εξασφαλιστεί επαρκής διάχυση, συγκεκριμένα σε χαμηλές συχνότητες, καθώς σε αυτές τις συχνότητες κάνουν πιο έντονη την εμφάνισή τους τα στάσιμα κύματα. Ο στόχος στις περισσότερες ακουστικές μελέτες, είναι να επιτευχθεί η ακανόνιστη διασπορά ηχητικής ενέργειας στο ακουστικό εύρος συχνοτήτων, σε όλο το δωμάτιο [8].

Το πλήρως διάχυτο ηχητικό πεδίο

Η πρόταση των Randal και Ward για να θεωρείται ένα ηχητικό πεδίο διάχυτο, περιλαμβάνει έξι προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούνται. Αυτές είναι:

- 1) Ο ρυθμός μείωσης της ηχητικής ενέργειας όταν μηδενιστεί η πηγή, να είναι ομαλός.
- 2) Ο ρυθμός μείωσης της ηχητικής ενέργειας μετά την παύση της πηγής να είναι καθαρά εκθετικός (ή ευθεία γραμμή σε λογαριθμική κλίμακα).
- 3) Ο χρόνος αντήχησης να είναι ο ίδιος σε όλες τις θέσεις του χώρου.
- 4) Ο ρυθμός μείωσης του ήχου να είναι ίδιος, ανεξαρτήτως της συχνότητας.
- 5) Ο ρυθμός μείωσης να μην εξαρτάται από την κατευθυντικότητα του χρησιμοποιούμενου μικροφώνου.
- 6) Οι αποκλίσεις από τη μόνιμη κατάσταση (steady state) της ηχητικής ενέργειας σε διαφορετικές συχνότητες να είναι αμελητέες.

Οι παραπάνω έξι προϋποθέσεις αποτελούν μία κατεύθυνση για τον ορισμό του διάχυτου πεδίου. Σε πιο θεωρητική βάση, το διάχυτο πεδίο μπορεί να οριστεί με όρους όπως μία ιδανική κατάσταση, όπου ένας άπειρος αριθμός ευθύγραμμων

συνεχών κυμάτων έχει την ίδια ενέργεια. Παρ' όλα αυτά, οι έξι αυτές προϋποθέσεις μας υποδεικνύουν έναν πρακτικό τρόπο εντοπισμού της ύπαρξης ή μη, διάχυτου πεδίου στο χώρο [3].

Διασπορά της ηχητικής ενέργειας

Λόγω του φαινομένου της περίθλασης γίνεται κατανοητό ότι συντελούνται αλλαγές στην κατεύθυνση διάδοσης του ήχου. Το ίδιο συμβαίνει και με τις έννοιες της ανάκλασης και της διασποράς του ήχου. Όσον αφορά την πρώτη, οι επιφάνειες που είναι μεγάλες σε σύγκριση με το μήκος κύματος ανακλούν τον ήχο κατοπτρικά όπως ένας καθρέφτης ανακλά το φως. Ο όρος διασπορά χρησιμοποιείται για αντικείμενα ή επιφάνειες που είναι συγκρίσιμες ή μικρότερες από το μήκος κύματος του ήχου. Επιπλέον, το φαινόμενο της διασποράς αυξάνεται, όταν αυξάνεται η συχνότητα και κατ' επέκταση το μήκος κύματος γίνεται συγκρίσιμο με τα αντικείμενα που χρησιμοποιούνται για τη διάχυση του ήχου. Η ενέργεια του μεμονωμένου κύματος αναδιανέμεται με τη χρήση διαχυτών και το ποσοστό διάχυσης εξαρτάται από το σχήμα του αντικειμένου κι από τον λόγο του μήκους κύματος προς τις διαστάσεις του αντικειμένου. Τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί μεγάλη σημασία στη διασπορά του ήχου, δηλαδή στις ανακλάσεις που προέρχονται από διαχυτικά υλικά [8].

Δείκτης διασποράς

Η διασπορά του ήχου από συμπαγή αντικείμενα ή επιφάνειες, χρήζει μεγάλου ενδιαφέροντος σε πολλούς τομείς της ακουστικής. Η δημιουργία διάχυτης ηχητικής ενέργειας, γύρω από κατασκευές διάφορων σχημάτων, για ένα μεμονωμένο κύμα ήχου, είναι αρκετά διαδεδομένη. Μία ποσότητα μεγάλου ενδιαφέροντος που έχει οριστεί από το ISO 17497, είναι η ολική μη κατοπτρική ανακλώμενη ηχητική ενέργεια σε σχέση με την ολική ανακλώμενη ηχητική ενέργεια. Ο δείκτης διασποράς (scattering coefficient) συμβολίζεται με s και εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$s = 1 - \frac{E_{spec}}{E_{total}} \quad [3.6]$$

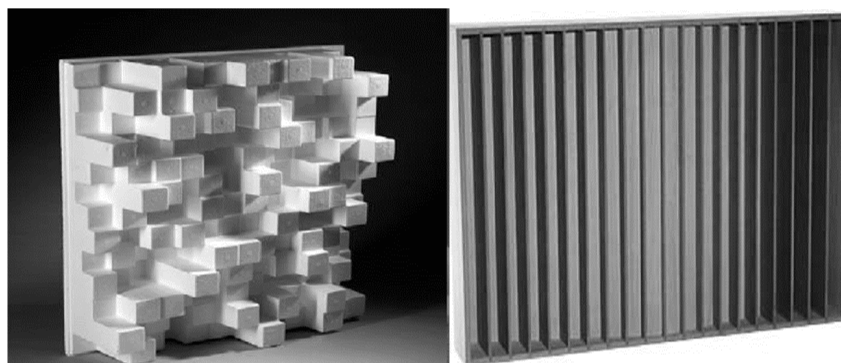
Όπου E_{spec} : ολική κατοπτρική ανακλώμενη ηχητική ενέργεια.

E_{total} : ολική ανακλώμενη ηχητική ενέργεια.

Θεωρητικά αυτή η ποσότητα μπορεί να πάρει τιμές από 0 έως 1, όπου το 0 σημαίνει ότι η επιφάνεια στην οποία αναφέρεται ανακλά εντελώς κατοπτρικά, ενώ η τιμή 1 δηλώνει μία εντελώς διάχυτική επιφάνεια. Μετρούμενη σε ένα θάλαμο αντήχησης ως μία τυχαία ποσότητα με τριτοοκταβική ή οκταβική ανάλυση, αντιπροσωπεύει μία ανάλογη ποσότητα του συντελεστή απορρόφησης του υλικού [8].

Υλικά που συντελούν στη διάχυση του ήχου

Ένα διάχυτο πεδίο μπορεί να προσεγγιστεί αν στο χώρο τοποθετηθούν ειδικές επιφάνειες που διαχέουν τον ήχο. Οι επιφάνειες αυτές μπορούν να έχουν διάφορα σχήματα (πυραμίδας, σφαίρας, πρίσματος κ.λπ.) με καθορισμένο βάθος που σχετίζεται άμεσα με το μήκος κύματος του ήχου.



Εικόνα 3.6.1: Τυπικά υλικά διάχυσης [27].

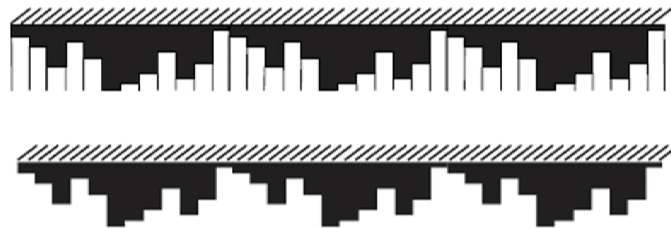
Όταν το ηχητικό κύμα προσπίπτει σε ένα διαχυτή, όπως π.χ. σε αυτούς της εικόνας 3.6.1, το κάθε στοιχείο του, λόγω του διαφορετικού βάθους που έχει προσδίδει διαφορετική καθυστέρηση στη φάση της ανακλώμενης ηχητικής ακτίνας. Σε σχετικά μεγάλη απόσταση από το διαχυτή, η συνιστάμενη ηχητική πίεση προέρχεται από τη συμβολή των επιμέρους ανακλάσεων. Καθώς η φάση της κάθε ανάκλασης είναι τυχαία, το αποτέλεσμα είναι η εξάλειψη της κατευθυντικότητας της ανακλώμενης ακτίνας.

Στους διαχυτές τύπου Schroeder, η ακολουθία των ορθογώνιων τμημάτων, τα οποία τους αποτελούν, δεν είναι τυχαία, αλλά ψευδοτυχαία, όπως ακριβώς και μία ακολουθία μεγίστου μήκους. Η ακολουθία στην οποία στηρίζεται η κατασκευή των διαχυτών QRD (quadratic residue diffusors) δίδεται από τη σχέση:

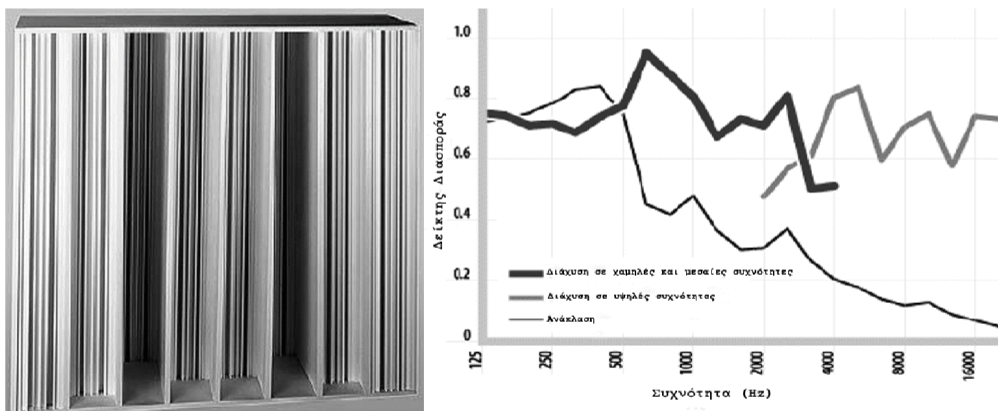
$$S_n = p^n \text{MOD } N, \quad n=1,2,3,\dots \quad [3.7]$$

Όπου n : ένας φυσικός αριθμός
 p : τυχαίος αριθμός ($p < N$)
 N : τυχαίος πρώτος αριθμός

Παρακάτω φαίνεται μια ακολουθία με $N = 13$ στην οποία απεικονίζονται τρεις περιόδοι διαχυτή τύπου PRD (primitive root diffusor), με την πρώτη κατασκευή να διαθέτει χωρίσματα μεταξύ των μερών του διαχυτή και με τη δεύτερη να μη διαθέτει χωρίσματα [8],[27].



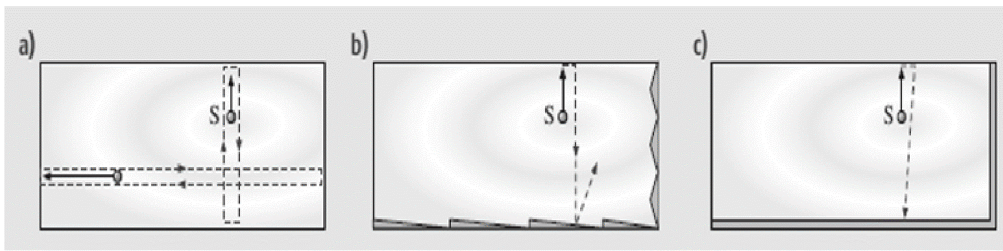
Σχήμα 3.6.1: Διαχυτές τύπου PRD [8].



Εικόνα 3.6.2: παράδειγμα διαχυτή 1- D RPG diffractal [27].

Μείωση του φαινομένου flutter echo

Το flutter echo είναι ένα ανεπιθύμητο ακουστικό φαινόμενο πολλαπλής, συνεχόμενης κι ελαφρώς αποσβένουσας ηχούς που δημιουργείται ανάμεσα σε δύο παράλληλες ανακλαστικές επιφάνειες. Το φαινόμενο μπορεί να καταπολεμηθεί είτε με επαρκή διάχυση είτε με επαρκή απορρόφηση στις επιφάνειες αυτές. Η εικόνα 3.6.3 αναπαριστά το φαινόμενο flutter echo και προτεινόμενους τρόπους αντιμετώπισής του.

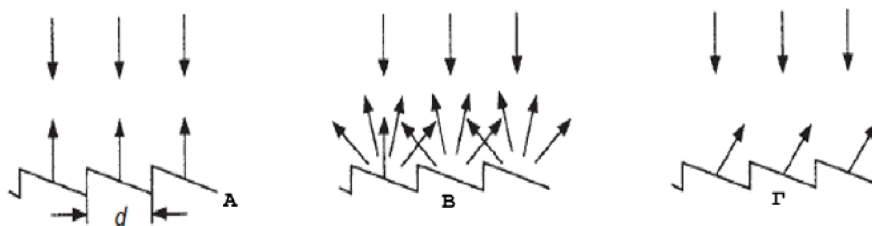


Σχήμα 3.6.2: a) φαινόμενο flutter echo, b) αντιμετώπιση με διάχυση, c) αντιμετώπιση με απορρόφηση [5].

Είναι γνωστό ότι ακανόνιστες επιφάνειες οι οποίες διαχέουν τον ήχο προσθέτουν μια ευχάριστη ακουστική ακρόαση. Ανακλάσεις από μεγάλες επίπεδες επιφάνειες προσδίδουν τραχύτητα στον ήχο και δυσκολεύουν τη διαδικασία ακρόασης.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την επίτευξη διάχυσης είναι το βάθος της ανάγλυφης επιφάνειας του διαχυτή να είναι συγκρίσιμο με το $\frac{1}{4}$ του μήκους κύματος κι ότι το μήκος του στοιχείου που θα αναπαριστά μία περίοδο (πριν αυτή επαναληφτεί), θα είναι συγκρίσιμο με το μήκος κύματος της χαμηλότερης συχνότητας που βάσει μελέτης πρέπει να υποστεί διάχυση.

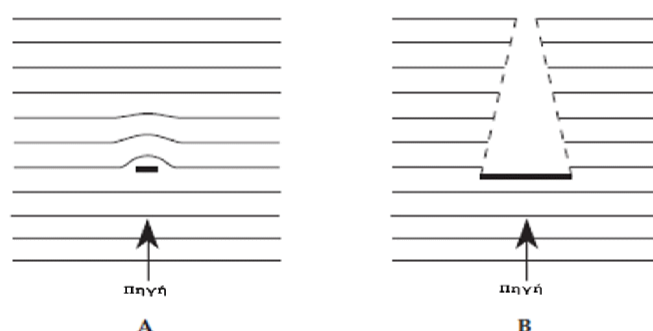
Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι αυστηρά περιοδικές κατασκευές, με έντονες άκρες κι ίση κατανομή κατά μήκος της επιφάνειας, μπορούν να προκαλέσουν τραχύτητα του ήχου για συχνότητες υψηλότερες από αυτές που έχουν σχεδιαστεί [5],[8],[10].



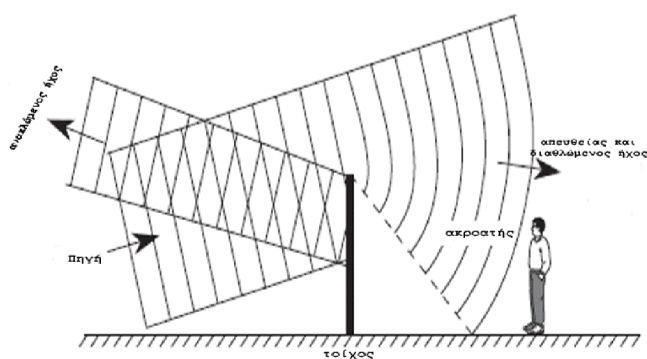
Σχήμα 3.6.3: Διάχυση από ακανόνιστες επιφάνειες τοίχων [A] $-d \ll \lambda$ [B] $-d = \lambda$ [Γ] $-d \gg \lambda$
(d: μήκος τοίχου, λ: μήκος κύματος) [10].

3.7 Περίθλαση

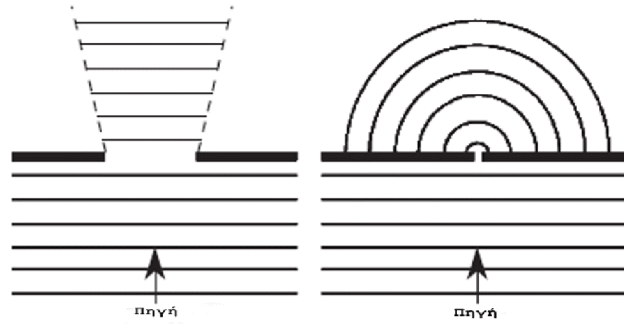
Όταν ηχητικά κύματα συναντούν ένα εμπόδιο, έχουν την τάση να το παρακάμπτουν ή να διεισδύουν από σχισμές ή γωνίες του εμποδίου και να συνεχίζουν τη διάδοσή τους. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται περίθλαση. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το μέγεθος του εμποδίου που θα συναντήσει ο ήχος σε σύγκριση με το μήκος κύματος αυτού, είναι που καθορίζει το ποσοστό της περίθλασης. Το φαινόμενο της περίθλασης είναι πιο έντονο για χαμηλές συχνότητες καθώς το μεγάλο μήκος κύματος περιθλάται ευκολότερα στην περίπτωση που συναντήσει κάποιο εμπόδιο. Κάθε συχνότητα του μετώπου κύματος που προσπερνά μία οπή ή συναντά μία γωνία περίθλασης θεωρείται μία καινούργια πηγή (δευτερογενής ηχητική πηγή), η οποία ακτινοβολεί ηχητική ενέργεια προς το σημείο σκίασης. Ο ήχος μπορεί να περιθλάται από εμπόδια, σχισμές, οπές, το ανθρώπινο κεφάλι, καμπίνες ηχείων και γενικώς από διάφορα αντικείμενα. Αυτό που ενδιαφέρει περισσότερο είναι η περίθλαση από γωνίες που δημιουργούν κοιλότητες στην αρχιτεκτονική ενός δωματίου.



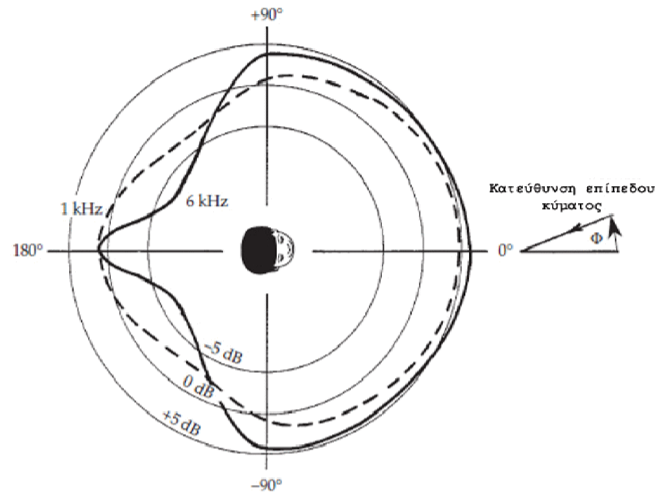
Σχήμα 3.7.1: Περίθλαση από μικρά αντικείμενα [7].



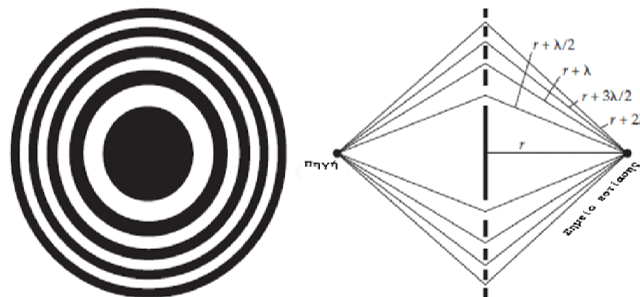
Σχήμα 3.7.2: Περίθλαση από την άκρη του τοίχου [7].



Σχήμα 3.7.3: Περίθλαση από ανοίγματα [7].



Σχήμα 3.7.4: Περίθλαση από ανθρώπινο κεφάλι [7].



Σχήμα 3.7.5: Οι σχισμές έχουν ανοιχτεί με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούνται αρκετές διαδρομές κυμάτων, που διαφέρουν μεταξύ τους πολλαπλάσια του μισού μήκους κύματος της συχνότητας. Έτσι όλες οι περιθλώμενες ακτίνες φτάνουν στο επιθυμητό σημείο σε φάση, ενεργώντας εποικοδομητικά [7].

Οι παραπάνω εικόνες παραθέτουν παραδείγματα περίθλασης του ήχου. Στη συγκεκριμένη μελέτη, όπως αναφέρθηκε, ενδιαφέρει η περίθλαση από γωνίες των τοίχων ή από μεγάλα αντικείμενα που βρίσκονται στο χώρο και δημιουργούν μια δευτερογενή πηγή εκπομπής ήχου. Αν ένα εμπόδιο είναι από ακουστικής άποψης μικρό σε σχέση με το μήκος κύματος, ο ήχος θα προσπεράσει το εμπόδιο

δημιουργώντας πολύ μικρή ή καθόλου ηχητική σκιά (εικόνα 3.7.1Α). Όταν οι διαστάσεις ενός εμποδίου είναι συγκρίσιμες με το μήκος κύματος του ήχου τότε όλος ο ήχος θα περιθλαστεί. Από την άλλη πλευρά, αν το εμπόδιο είναι μεγαλύτερο από το μήκος κύματος του ήχου, τότε ένα μέρος της ενέργειας του έχει την τάση να ανακλάται από το εμπόδιο [7].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Στάσιμα κύματα δωματίου

Όταν μία πηγή ήχου εκπέμπει σε ένα κλειστό χώρο, το αποτέλεσμα είναι ηχητικά κύματα να διαδίδονται στο χώρο προς όλες τις κατευθύνσεις. Όταν τα ηχητικά κύματα προσπίπτουν στους τοίχους του δωματίου ανακλώνται και το αποτέλεσμα είναι ο ήχος να ταξιδεύει στον χώρο προς όλες τις κατευθύνσεις. Στην πραγματικότητα όμως, υπάρχει περίπτωση να σχηματιστούν συγκεκριμένες κλειστές διαδρομές διάδοσης κυμάτων όταν ένα ακέραιο πολλαπλάσιο του μισού μήκους κύματος χωράει σε μία διάσταση του χώρου. Σε αυτή την περίπτωση δημιουργείται ένα στάσιμο κύμα που η διάδοσή του στο χώρο συμβαίνει μόνο για μία κλειστή διαδρομή [16].

4.1 Τρόποι δόνησης σε ορθογώνιο δωμάτιο

Οι τρόποι δόνησης (ή ιδιορυθμοί) συνδέονται με διαδρομές κυμάτων που επαναλαμβάνονται. Χαρακτηρίζονται από ηχητικά κύματα που ταξιδεύουν σε αντίθετες κατευθύνσεις μέσα σε μία επαναλαμβανόμενη διαδρομή. Καθώς τα ηχητικά κύματα ταξιδεύουν σε συγκεκριμένες διαδρομές με αντίθετες κατευθύνσεις, δημιουργούν στάσιμα κύματα, λόγω της συμβολής που λαμβάνει χώρα. Ουσιαστικά οι τρόποι δόνησης είναι στάσιμα κύματα που δημιουργούν στη διαδρομή τους μέγιστα κι ελάχιστα πίεσης, τα οποία ονομάζονται δεσμοί και κοιλίες αντίστοιχα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το χρωματισμό του ήχου μέσα στο χώρο καθώς σε σημεία όπου δημιουργούνται δεσμοί υπάρχει μέγιστο πλάτος ταλάντωσης για τη συγκεκριμένη συχνότητα και κατ' επέκταση μεγάλη πυκνότητα ενέργειας. Αντίθετα, σε σημεία του χώρου που δημιουργούνται κοιλίες υπάρχει η αίσθηση της απώλειας της συγκεκριμένης συχνότητας καθώς η ηχητική πίεση στα σημεία αυτά είναι ελάχιστη. Οι συχνότητες όπου εμφανίζονται τα στάσιμα κύματα σε έναν κλειστό χώρο υπολογίζονται από την παρακάτω σχέση:

$$f_n = \frac{c}{2} \sqrt{\left[\frac{n_x}{L_x}\right]^2 + \left[\frac{n_y}{L_y}\right]^2 + \left[\frac{n_z}{L_z}\right]^2} \text{ (Hz)} \quad [4.1]$$

Όπου f_n : η συχνότητα συντονισμού (Hz)

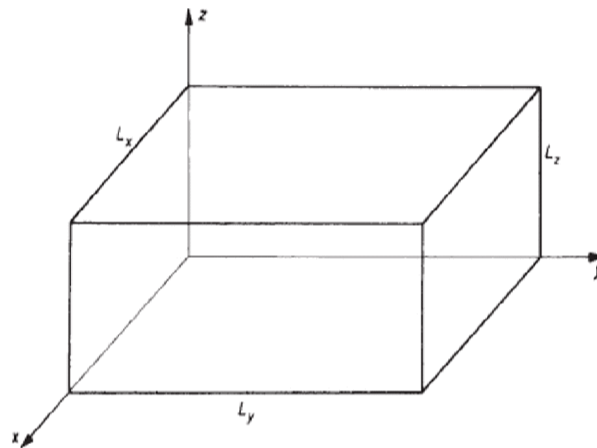
c : η ταχύτητα του ήχου στον αέρα (m/sec)

L_x, L_y, L_z : οι διαστάσεις του χώρου στους αντίστοιχους άξονες

n_x, n_y, n_z : η τάξη του στάσιμου κύματος στον αντίστοιχο άξονα

Ενώ ο υπολογισμός της ακουστικής πίεσης δίδεται από την παρακάτω σχέση [10]:

$$p = \bar{p} \cos\left[\frac{\pi n_x x}{L_x}\right] \cos\left[\frac{\pi n_y y}{L_y}\right] \cos\left[\frac{\pi n_z z}{L_z}\right] e^{j\omega t} \quad [4.2]$$



Σχήμα 4.1.1: Τυπικό ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο δωμάτιο [10].

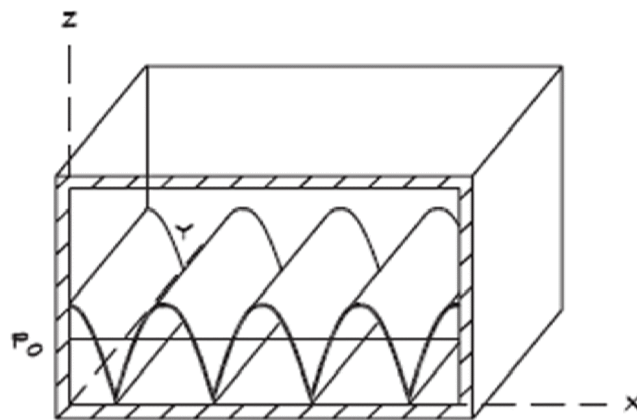
4.2 Κατηγορίες στάσιμων κυμάτων

Οι κατηγορίες των τρόπων δόνησης ή αλλιώς των στάσιμων κυμάτων που δημιουργούνται σε έναν κλειστό χώρο είναι τρεις:

Αξονικά στάσιμα κύματα (Axial modes)

Τα αξονικά στάσιμα κύματα αναπτύσσονται σε παράλληλες διαδρομές μεταξύ ενός μόνο άξονα του δωματίου ή μεταξύ ενός ζεύγους παράλληλων επιφανειών. Για παράδειγμα οι τρόποι δόνησης $(n_x, 0, 0)$, όπου n_x θετικός αριθμός, αντιστοιχούν σε παράλληλες διαδρομές των κυμάτων επί του άξονα x του χώρου. Δηλαδή, οι αξονικοί τρόποι δόνησης δημιουργούνται από τις ανακλάσεις δύο απέναντι επιφανειών, περιέχουν την μεγαλύτερη ενέργεια από όλα τα είδη στάσιμων κυμάτων κι είναι αυτά

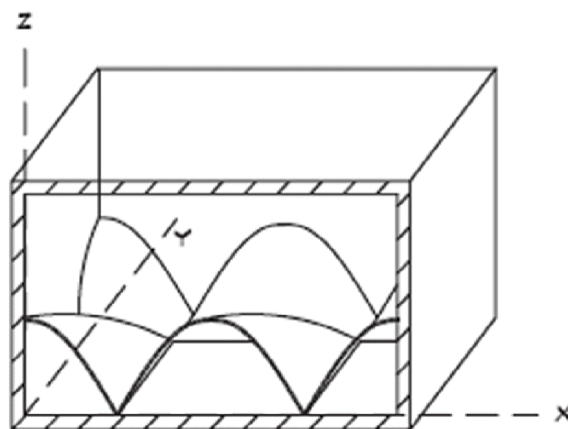
που δημιουργούν τα μεγαλύτερα προβλήματα λόγω της έντονης εμφάνισής τους σε χαμηλές συχνότητες.



Σχήμα 4.2.1: Αξονικός τρόπος δόνησης (4,0,0) [9].

Εφαπτομενικά στάσιμα κύματα (Tangential modes)

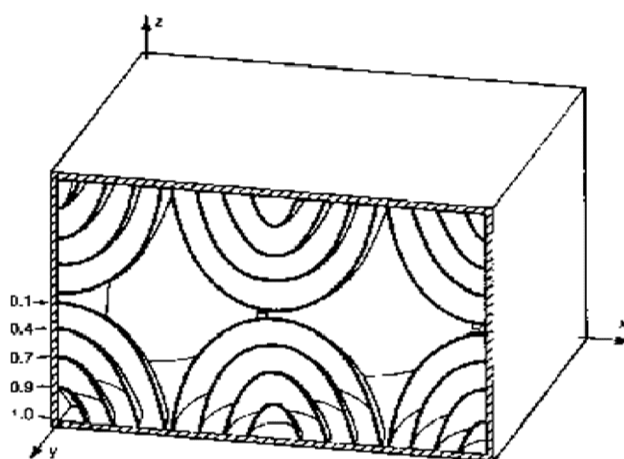
Τα εφαπτομενικά στάσιμα κύματα αναπτύσσονται μεταξύ τεσσάρων επιφανειών (δύο ζεύγη παράλληλων επιφανειών του δωματίου). Για παράδειγμα οι τρόποι δόνησης $(n_x, n_y, 0)$, όπου n_x και n_y θετικοί αριθμοί, αντιστοιχούν σε διαδρομές των ηχητικών κυμάτων μέσα στο δωμάτιο οι οποίες είναι παράλληλες του πατώματος και της οροφής και δημιουργούνται από ανακλάσεις του ήχου στους τέσσερις κάθετους τοίχους του δωματίου. Έχουν την μισή ενέργεια σε σχέση με τα αξονικά κύματα, επομένως είναι κατά 3 dB ασθενέστερα.



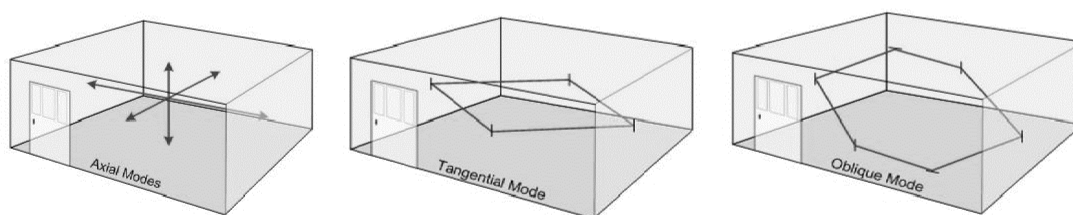
Σχήμα 4.2.2: Εφαπτομενικός τρόπος δόνησης (2,1,0) [9].

Πλάγια στάσιμα κύματα (oblique modes)

Τα πλάγια στάσιμα κύματα αναπτύσσονται σε όλες τις επιφάνειες του δωματίου. Για παράδειγμα, οι τρόποι δόνησης (n_x, n_y, n_z), όπου n_x, n_y και n_z θετικοί αριθμοί, αντιστοιχούν σε διαδρομές των ηχητικών κυμάτων, που δημιουργούνται από ανακλάσεις και στις έξι επιφάνειες του δωματίου. Η ηχητική τους ενέργεια είναι ίση με το $\frac{1}{4}$ της ενέργειας των αξονικών κυμάτων κι με το μισό της ενέργειας των εφαπτομενικών. Δηλαδή έχουν 6 dB χαμηλότερη στάθμη από τα αξονικά και 3dB χαμηλότερη στάθμη από τα εφαπτομενικά.



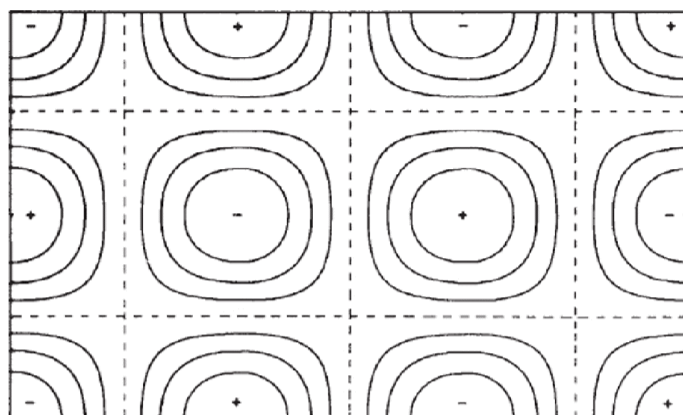
Σχήμα 4.2.3: Πλάγιος τρόπος δόνησης [9].



Σχήμα 4.2.4: Όλοι οι τρόποι δόνησης ενός ορθογώνιου παραλληλόγραμμου δωματίου [32].

Σε ένα δωμάτιο σχήματος ορθογώνιου παραλληλεπιπέδου, για κάθε τρόπο δόνησης για τον οποίο ένας εκ των καθαρών αριθμών που δείχνουν την τάξη του στάσιμου κύματος είναι περιττός αριθμός, η ηχητική πίεση είναι 0 στο κέντρο του δωματίου (βλέπε σχέση 4.1). Συνδυάζοντας όλους τους πιθανούς συνδυασμούς που μπορούν να προκύψουν σε αυτήν την ομάδα των τριών αριθμών, από περιττούς κι

άρτιους αριθμούς, προκύπτει πως μόνο το 1/8 από τους τρόπους δόνησης ενός ορθογώνιου δωματίου δεν εμφανίζει δεσμό στο κέντρο του δωματίου. Στο κέντρο μίας γωνίας που ενώνει δύο τοίχους, μόνο το 1/4 των τρόπων δόνησης δεν εμφανίζει δεσμό. Τέλος, στο κέντρο οποιουδήποτε τοίχου μόνο οι μισοί τρόποι δόνησης δεν εμφανίζουν δεσμό [10],[11],[16],[25].



Σχήμα 4.2.5: Ηχητική πίεση σε ορθογώνιο δωμάτιο για τρόπο δόνησης (3,2,0) [11].

4.3 Πυκνότητα εμφάνισης στάσιμων κυμάτων

Ένας προσεγγιστικός αριθμός των τρόπων δόνησης (N), που μπορούν να εμφανιστούν σε ένα ορθογώνιο δωμάτιο ανά συχνότητα, δίδεται από την παρακάτω σχέση (Morse and Bolt, 1944):

$$N = \frac{4\pi f^3 V}{3c^3} + \frac{\pi f^2 S}{4c^2} + \frac{fL}{8c} \quad [4.3]$$

Όπου c : η ταχύτητα του ήχου. (m/sec)

S : η ολική επιφάνεια του δωματίου. (m^2)

V : ο όγκος του δωματίου. (m^3)

L : η ολική περίμετρος του δωματίου. (m)

Έχει αποδειχθεί (Morse and Ingard, 1968), ότι η σχέση 4.3 βρίσκει εφαρμογή και σε άλλους χώρους πέρα των ορθογώνιων. Περιγράφει με καλή προσέγγιση τον αριθμό των στάσιμων κυμάτων σε χώρους οποιουδήποτε σχήματος, με το ποσοστό επιτυχίας να ανεβαίνει καθώς το σχήμα του δωματίου γίνεται περισσότερο ακανόνιστο. Παρ' όλα αυτά η σχέση 4.3 είναι προσεγγιστική κι αυτό σημαίνει ότι ο

πραγματικός αριθμός στάσιμων κυμάτων που κάνουν την εμφάνισή τους βρίσκεται είτε πάνω είτε κάτω από τον υπολογισμένο αριθμό, καθώς η συχνότητα σταδιακά αυξάνεται ή μειώνεται.

Για τον υπολογισμό του αριθμού των στάσιμων κυμάτων, που κατά μέσο όρο εμφανίζονται σε ένα στενό εύρος συχνοτήτων, χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$\frac{dN}{df} = \frac{4\pi f^2 V}{c^3} + \frac{\pi f S}{2c^2} + \frac{L}{8c} \quad [4.4]$$

Όπου df : εύρος συχνοτήτων.

f : κεντρική συχνότητα. (Hz)

c : η ταχύτητα του ήχου (m/sec)

S : η ολική επιφάνεια του δωματίου (m^2)

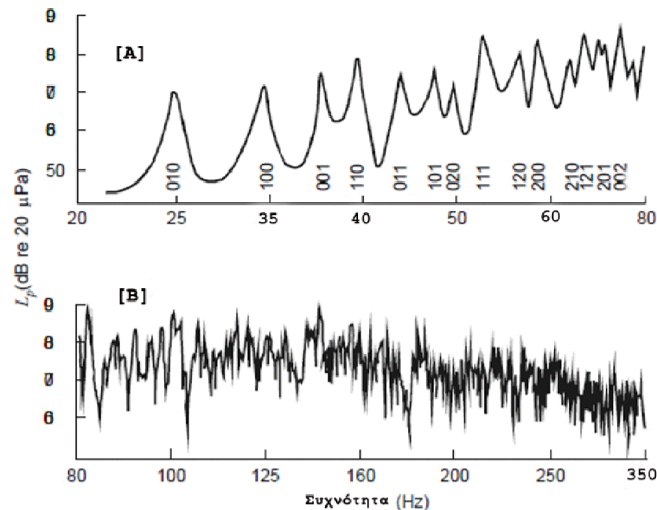
V : ο όγκος του δωματίου (m^3)

L : η ολική περίμετρος του δωματίου (m)

Η σχέση 4.4 επίσης βρίσκει εφαρμογή σε δωμάτια οποιουδήποτε σχήματος, συμπεριλαμβανομένων και κυλινδρικών.

Το συμπέρασμα που προκύπτει από την παραπάνω σχέση είναι πως σε χαμηλές συχνότητες ο αριθμός των στάσιμων κυμάτων που εμφανίζονται σε ένα στενό εύρος συχνοτήτων είναι αρκετά μικρός. Σε αντίθεση, όσο το εύρος των συχνοτήτων μετακινείται σε υψηλότερες συχνότητες, ο αριθμός των στάσιμων κυμάτων που βρίσκονται μέσα σε αυτές μεγαλώνει (βλ. σχήμα 4.3.1). Για αυτό το λόγο υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις στη στάθμη ηχητικής πίεσης σε χαμηλές συχνότητες, ενώ σε υψηλές συχνότητες οι διακυμάνσεις αυτές γίνονται μικρές και το αντηχητικό πεδίο γίνεται ομοιόμορφο.

Αυτός είναι ο λόγος που τα αξονικά στάσιμα κύματα είναι αυτά που δημιουργούν το μεγαλύτερο πρόβλημα. Σε κλειστούς χώρους τα στάσιμα κύματα δεν μπορούν να αποφευχθούν. Για αυτόν το λόγο, προτιμάται η ομοιόμορφη κατανομή τους, όσο το δυνατόν σε όλο το ηχητικό φάσμα. Όταν αυτό δεν είναι εφικτό, κυρίως στις χαμηλές συχνότητες, τότε αντιμετωπίζεται με τη χρήση απορροφητικών υλικών για τη μείωση της ενέργειας των συντονισμών [10],[11],[16].



Σχήμα 4.3.1: Συχνотική απόκριση ορθογώνιου δωματίου 180 m³ [A] – σε χαμηλές συχνότητες οι τρόποι δόνησης εμφανίζονται αραιοί και με μεγάλα πλάτη. Σε αυτή τη φάση γίνονται αντιληπτοί από τις τάξεις των στάσιμων κυμάτων και χρωματίζουν έντονα το ηχητικό αποτέλεσμα. [B] – σε υψηλότερες συχνότητες οι συντονισμοί είναι περισσότεροι και κατανέμονται με μεγαλύτερη ομοιομορφία. Το αποτέλεσμα είναι να μην υπάρχουν έντονοι χρωματισμοί [10].

f_n	n_x	n_y	n_z	f_n	n_x	n_y	n_z
36.17	1	0	0	90.47	1	2	0
41.46	0	1	0	90.78	2	0	1
54.84	0	0	1	99.42	0	2	1
55.02	1	1	0	99.80	2	1	1
65.69	1	0	1	105.79	1	2	1
68.75	0	1	1	108.51	3	0	0
72.34	2	0	0	109.68	0	0	2
77.68	1	1	1	110.05	2	2	0
82.93	0	2	0	115.49	1	0	2
83.38	2	1	0	116.16	3	1	0

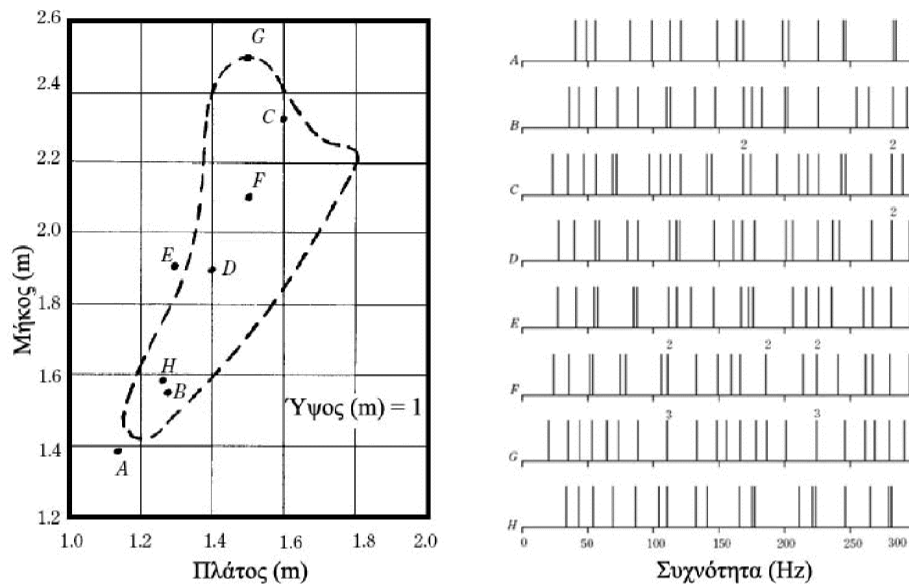
Πίνακας 4.3.1: Οι πρώτοι 20 τρόποι δόνησης ορθογώνιου δωματίου με διαστάσεις (ΜxΠxΥ) = (4.7x4.1x3.1) και συνολικού όγκου 60 m³. Οι αριθμοί προκύπτουν εφαρμόζοντας τη σχέση 4.1 [10].

4.4 Προτεινόμενες αναλογίες διαστάσεων για ορθογώνιους παραλληλεπίπεδους χώρους

Όπως έχει προαναφερθεί, τα στάσιμα κύματα δεν μπορούν να εξαληφθούν πλήρως, αλλά τα αποτελέσματά τους μπορούν να μειωθούν επιλέγοντας κατάλληλους λόγους διαστάσεων, με τους οποίους κατανέμονται ομοιόμορφα συχνотικά. Δωμάτια με παρόμοιες διαστάσεις, ή δωμάτια των οποίων οι λόγοι των διαστάσεων ανά δύο είναι μικροί ακέραιοι αριθμοί, πρέπει να αποφεύγονται. Σε τέτοια δωμάτια οι συντονισμοί γίνονται πιο έντονοι και συγκεντρώνονται σε μικρό εύρος του συχνотικού φάσματος. Ένα κυβικό δωμάτιο είναι το χειρότερο παράδειγμα, καθώς κι

οι τρεις διαστάσεις του είναι ίσες. Ένας καλός λόγος διαστάσεων δωματίου είναι ο εξής: $1:2^{1/2}:3^{1/2}$ - (Y: M: Π) ή αλλιώς $1:1.4:1.7$ (Y: M: Π).

Επίσης αποδεκτούς λόγους προτείνει κι ο Bolt (1946) στο παρακάτω διάγραμμα. Κάθε σημείο εντός του σχήματος για μήκος (x) και πλάτος (y) και με σταθερό το ύψος (z=1) δίνει αποδεκτές αποκρίσεις και μειώνει την εμφάνιση έντονων στάσιμων κυμάτων στις χαμηλές συχνότητες.



Σχήμα 4.4.1: Διάγραμμα Bolt. Αποδεκτοί λόγοι διαστάσεων σε ορθογώνια δωμάτια [9].

Στο δεξί σχήμα παρατίθεται η κατανομή των συντονισμών για κάθε σημείο του αριστερού διαγράμματος που έχει μελετηθεί [9],[12].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Έλεγχος θορύβου και ηχομείωση

Ο έλεγχος του θορύβου σε κτίρια μπορεί επιτευχθεί με έναν από τους ακόλουθους τρόπους :

1. Αντιμετωπίζοντας την πηγή του θορύβου.
2. Αντιμετωπίζοντας το χώρο που περιέχει την πηγή θορύβου.
3. Εξασφαλίζοντας ηχομόνωση από αερόφερτο θόρυβο.
4. Εξασφαλίζοντας ηχομόνωση από στερεόφερτο θόρυβο.
5. Απομονώνοντας θορύβους από μηχανικούς εξοπλισμούς.

Αυτό που ενδιαφέρει στη συγκεκριμένη μελέτη είναι η εξασφάλιση των κατηγοριών 3 και 4 για ακουστική άνεση οι οποίες θα εξηγηθούν στη συνέχεια [12].

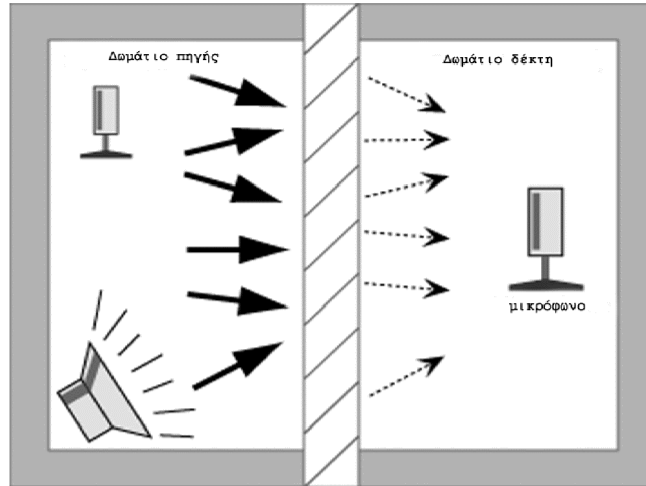
5.1 Συντελεστής ηχητικής μετάδοσης (τ) και απώλεια μετάδοσης (TL)

Όταν ένας ήχος προσπίπτει σε έναν τοίχο, ένα μέρος της ενέργειάς του ανακλάται κι ένα μέρος μεταδίδεται από το τοίχωμα στο διπλανό χώρο. Το ποσοστό της μεταδιδόμενης ενέργειας σχετικά με την αρχική ονομάζεται συντελεστής ηχητικής μετάδοσης (τ). Το δωμάτιο που εκπέμπει η πηγή λέγεται δωμάτιο εκπομπής και το δωμάτιο που δέχεται τον θόρυβο λέγεται δωμάτιο λήψης. Ο τ είναι πολύ απλά ο λόγος της μεταδιδόμενης ηχητικής ισχύος στο δωμάτιο λήψης, προς την εκπεμπόμενη στο δωμάτιο εκπομπής.

$$\tau = W_{\delta} / W_{\pi} \quad [5.1]$$

Η απώλεια μετάδοσης ενός χωρίσματος, υπολογίζεται εργαστηριακά με τη μέθοδο των δύο δωματίων (βλ. σχήμα 7.1). Εκφράζεται σε σχέση με το (τ) ως εξής:

$$TL = -10 \log \tau \quad [5.2]$$



Σχήμα 5.1.1: Μέθοδος υπολογισμού TL για αερόφερτο θόρυβο [33].

Η μέθοδος των δύο δωματίων καθορίζεται από την ASTM με την ονομασία E-90 (Test method for laboratory measurement of airborne sound transmission loss of building partitions). Η στάθμη ηχητικής πίεσης που θα φτάσει στο δωμάτιο λήψης εξαρτάται κι από την ολική απορρόφηση που αυτό έχει, οπότε προκύπτει πως η απώλεια μετάδοσης ενός δοκιμίου (τοιχίου) είναι:

$$TL = L_s - L_r + 10 \log S - 10 \log A \quad [5.3]$$

$$TL = NR = 10 \log S - 10 \log A \quad [5.4]$$

Όπου S : η ολική επιφάνεια δοκιμίου (m^2)

A : ολική απορρόφηση δωματίου λήψης (sabins)

Στην περίπτωση μίας σύνθετης επιφάνειας (π.χ. μιας επιφάνεια αποτελούμενης από ένα παράθυρο, μία πόρτα και τον τοίχο) η απώλεια ηχητικής μετάδοσης υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$TL_{combined} = -10 \log \frac{[S_1 \tau_1 + S_2 \tau_2 + \dots + S_n \tau_n]}{s} \quad [5.5]$$

Όπου $\tau_n = -10^{-TL_n/10}$

TL_n : απώλεια ηχητικής μετάδοσης εκάστοτε στοιχείου (dB)

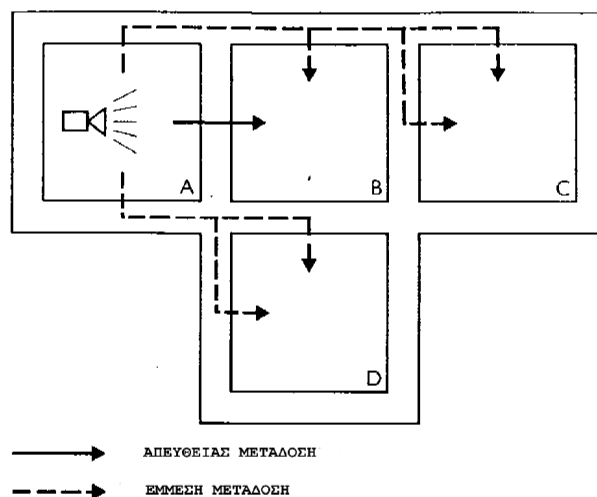
S_n : επιφάνεια εκάστοτε στοιχείου (m^2)

S : ολική επιφάνεια τοίχου (m^2)

[12],[15]

5.2 Αερόφερτος θόρυβος

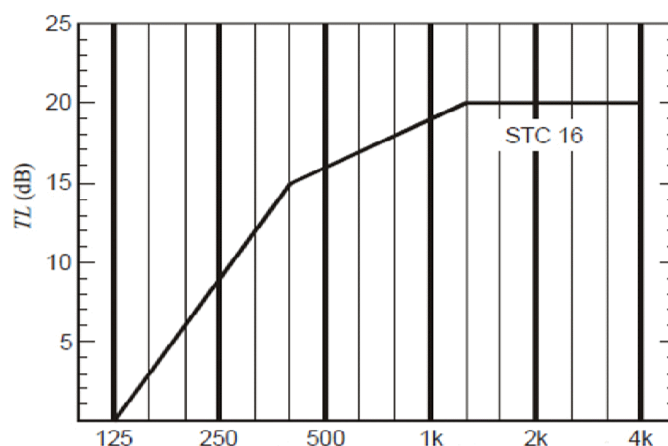
Η απώλεια μετάδοσης αερόφερτου θορύβου (υπολογίσιμη από τη σχέση 5.3) αναφέρεται σε θόρυβο που μεταδίδεται μέσω του αέρα μέχρι αυτός να συναντήσει κάποιο μεσολαβητικό στοιχείο για να εισέλθει στον χώρο. Σε αυτό το σημείο, ένα μέρος της ηχητικής ενέργειας ανακλάται, ένα άλλο μέρος απορροφάται από την επιφάνεια και τέλος ένα μέρος της ηχητικής ενέργειας μεταδίδεται στο δωμάτιο του δέκτη, διαπερνώντας το στοιχείο και συνεχίζοντας πλέον ως αερόφερτος θόρυβος στο χώρο.



Σχήμα 5.2.1: Μετάδοση αερόφερτου θορύβου [15].

Η αποτελεσματικότητα της μόνωσης ενός στοιχείου από αερόφερτο θόρυβο μπορεί να εκφραστεί και ως ένας μόνο αριθμός ο οποίος ονομάζεται STC (Sound Transmission Class) ή αλλιώς δείκτης απώλειας μετάδοσης. Δηλώνει ουσιαστικά μία κλάση ή μια κατηγορία στην οποία συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του δοκιμίου εντάσσονται. Ο αριθμός STC δίνει έμφαση στο συχνοτικό εύρος που είναι σημαντικό για την ομιλία, καθώς λαμβάνει υπ' όψιν του έξι κεντρικές συχνότητες χωρισμένες σε 1/3 της οκτάβας από τα 125 έως τα 4000 Hz. Για να προσδιοριστεί ο STC για ένα

συγκεκριμένο χώρισμα, χρησιμοποιείται μια τεχνική σχεδίασης καμπυλών. Μία τυπική καμπύλη STC απεικονίζεται στο σχήμα 5.2.2.



Σχήμα 5.2.2: Τυπική καμπύλη STC [10].

Ο σχεδιασμός των καμπυλών STC αποτελείται από μία ευθεία γραμμή, παράλληλη στον άξονα των συχνοτήτων που εκτείνεται από τα 1250 έως τα 4000 Hz. Στις μεσαίες συχνότητες από μία ευθεία γραμμή η οποία αυξάνει κατά 5 dB από τα 400 έως τα 1250 Hz (κλίση 1 dB/οκτάβα) και μία ευθεία γραμμή χαμηλών συχνοτήτων που αυξάνει κατά 15 dB από τα 125 έως τα 400 Hz (κλίση 3dB/οκτάβα). Η κλάση STC για ένα χώρισμα καθορίζεται τοποθετώντας σε σημεία τις απώλειες μετάδοσης TL του χωρίσματος (στρογγυλοποιώντας πάνω ή κάτω τον αριθμό TL στον πλησιέστερο ακέραιο) για τις συγκεκριμένες συχνότητες. Συγκρίνοντας τις καμπύλες STC με τα σημεία, για να αντιστοιχηθεί το χώρισμα σε μια καμπύλη STC πρέπει να ισχύουν δύο προϋποθέσεις.

1. Τα σημεία της καμπύλης TL δε βρίσκονται ποτέ χαμηλότερα από 8 dB από την καμπύλη STC σε οποιαδήποτε από τις προαναφερθείσες κεντρικές συχνότητες.

2. Η συνολική απόκλιση μεταξύ των καμπυλών STC και TL να μην ξεπερνά τα 32 dB ($STC_{ολικά} \text{ dB} - TL_{ολικά} \text{ dB} \leq 32 \text{ dB}$).

Όταν κι οι δυο προϋποθέσεις ισχύουν τότε η τιμή του δείκτη STC για το χώρισμα καθορίζεται με βάση την τιμή της απώλειας μετάδοσης (TL) στα 500 Hz [10],[15].

5.3 Στερεόφερτος θόρυβος

Η αντίδραση κατασκευών όπως το ταβάνι ή το πάτωμα σε κτυπογενείς ήχους διαφέρει κατά πολύ από την αντίδραση των ίδιων επιφανειών σε αερόφερτο θόρυβο. Ο όρος κτυπογενής, περιγράφει ήχους παραγόμενους έπειτα από άμεση πρόσκρουση με το υλικό, όπως μπορεί να είναι το τράβηγμα ενός επίπλου, τα έντονα βήματα ή μεγάφωνα τοποθετημένα απευθείας στο πάτωμα του δωματίου εκπομπής. Η ενέργεια της δόνησης των στερεόφερτων θορύβων μεταδίδεται απευθείας στην κατασκευή και συνήθως σε ένα μόνο σημείο της, ενώ ο αερόφερτος ήχος μεταδίδει ενέργεια σε όλη την επιφάνεια με ομοιόμορφο σχετικά τρόπο.

Η ASTM με την ονομασία E-989 (2006) έχει ορίσει συγκεκριμένη μέθοδο υπολογισμού του στερεόφερτου θορύβου χρησιμοποιώντας μία διάταξη που αποτελείται από πέντε κρουστικά σφυριά. Οι μετρήσεις στο δωμάτιο λήψης γίνονται με ανάλυση τριτοκτάβας. Η μετρούμενη στάθμη ηχητικής πίεσης πρέπει να είναι ο μέσος όρος τουλάχιστον τεσσάρων τέτοιων μετρήσεων και για τουλάχιστον τέσσερις διαφορετικές τοποθετήσεις μικροφώνων στο δωμάτιο λήψης (ένα μικρόφωνο για κάθε θέση του μηχανισμού παραγωγής στερεόφερτου θορύβου). Η στάθμη ηχητικής πίεσης για κάθε μέτρηση δίδεται από τον παρακάτω σχέση:

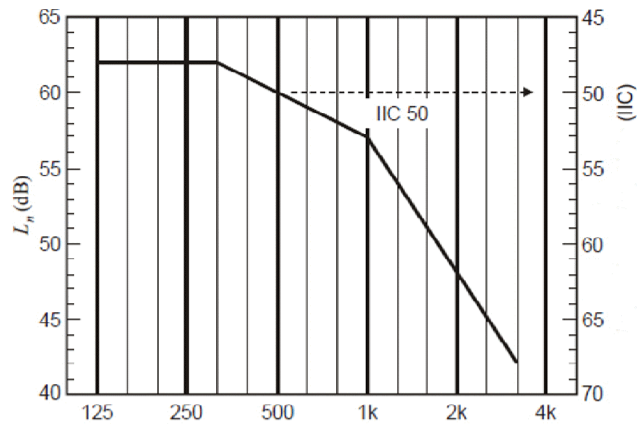
$$L_n = L_p + 10 \log\left(\frac{Sa}{10}\right) \quad [5.6]$$

Όπου Sa : η απορρόφηση του δωματίου λήψης σε m^2

L_n : η στάθμη ηχητικής πίεσης στο δωμάτιο λήψης σε dB_{SPL}

L_p : η στάθμη ηχητικής πίεσης στο δωμάτιο εκπομπής σε dB_{SPL}

Από αυτές τις μετρήσεις μπορεί να καθοριστεί ένας μόνο αριθμός που θα δηλώνει την κλάση του υλικού όσον αφορά την ηχομείωσή του σε στερεόφερτους θορύβους. Ο δείκτης απώλειας μετάδοσης IIC για στερεόφερτους θορύβους καθορίζεται παρόμοια με τον δείκτη STC. Οι στάθμες ηχητικής πίεσης στρογγυλοποιούνται είτε προς τα πάνω είτε προς τα κάτω στον πιο κοντινό ακέραιο. Έπειτα τοποθετούνται ως σημεία σε παρόμοιο τρόπο με αυτό που απεικονίζει το σχήμα 5.3.1.



Σχήμα 5.3.1: Τυπική καμπύλη IIC [10].

Η καμπύλη IIC που φαίνεται στο σχήμα 5.3.1 αρχίζει με χαμηλή στάθμη (δεξιός κάθετος άξονας) και στη συνέχεια μετατοπίζεται κάθετα με αύξουσα φορά και κλίση 1 dB/οκτάβα μέχρι να συμβούν δύο τινά:

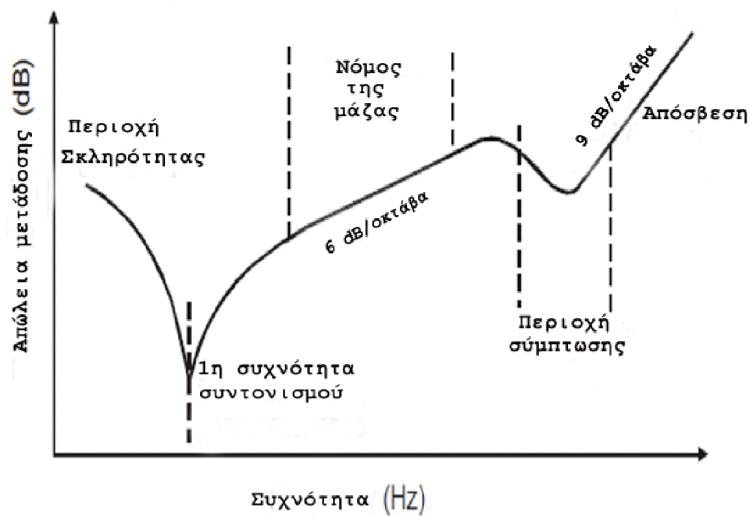
1. Η καμπύλη L_n η οποία σχηματίζεται από τις μετρημένες στάθμες στο δωμάτιο λήψης να μην ξεπερνά ποτέ τα 8 dB πάνω από τα σημεία της καμπύλης IIC για όλες τις κεντρικές συχνότητες.

2. Το άθροισμα των σημείων της καμπύλης L_n πάνω από τα σημεία της καμπύλης IIC να μην ξεπερνά τα 32 dB. Όσο πιο χαμηλά απεικονίζεται η καμπύλη IIC στο σχήμα 5.3.1 τόσο καλύτερη είναι η κλάση IIC του υλικού.

Όταν κι οι δυο παραπάνω απαιτήσεις καλύπτονται, τότε η τιμή του δείκτη STC για το χώρισμα καθορίζεται ως ο ακέραιος αριθμός στη συχνότητα των 500 Hz που βρίσκεται στη δεξιά κάθετη στήλη [10],[15].

5.4 Απώλεια μετάδοσης από απλές επιφάνειες

Μια τυπική συμπεριφορά απώλειας μετάδοσης μίας επιφάνειας φαίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί. Παρουσιάζεται η απώλεια μετάδοσης του χωρίσματος σε σχέση με τις συχνότητες του ακουστού φάσματος.



Σχήμα 5.4.1: Απώλεια μετάδοσης συναρτήσει της συχνότητας σε απλές επιφάνειες [10].

1. Περιοχή σκληρότητας: Η περιοχή αυτή βρίσκεται σε χαμηλές συχνότητες και η ηχομείωση είναι συνάρτηση της σκληρότητας του υλικού. Αύξηση της σκληρότητας του υλικού συνεπάγεται αύξηση του δείκτη ηχομείωσης κατά 6 dB για κάθε διπλασιασμό της σκληρότητας. Στη πράξη αυτό σημαίνει ότι σκληρά υλικά έχουν σημαντική ηχομείωση σε χαμηλές συχνότητες.

2. Στην ίδια περιοχή, αλλά σε σχετικά μεγαλύτερες συχνότητες, είναι δυνατόν να εμφανιστεί το φαινόμενο του συντονισμού λόγω των διαστάσεων του υλικού. Σε αυτή την περίπτωση ο δείκτης ηχομείωσης παρουσιάζει διακυμάνσεις. Ο συνδυασμός της σκληρότητας με τη μάζα του τοιχώματος δρα ως ένα σύστημα μάζας-ελατηρίου, με συγκεκριμένη συχνότητα συντονισμού. Στην περίπτωση συντονισμού του τοιχώματος λόγω του προσπίπτοντος σε αυτό ήχου, παρατηρείται μείωση της ηχομονοτικής ικανότητας του χωρίσματος. Οι συχνότητες συντονισμού ενός χωρίσματος υπολογίζονται από την παρακάτω σχέση:

$$f_r = 0.458 C_L h (1 - \sigma)^{1/2} \left[\frac{n_x}{L_x^2} + \frac{n_y}{L_y^2} \right] \quad [5.7]$$

Όπου C_L : η ταχύτητα του ήχου με μέσο διάδοσης την επιφάνεια σε m/s

σ : ο λόγος του Poisson

h : το πάχος της επιφάνειας σε m

Η χαμηλότερη συχνότητα συντονισμού (βλ σχήμα 5.4.1) αντιστοιχεί σε $n_x = n_x = 1$.

3. Περιοχή νόμου μάζας: Η περιοχή αυτή αρχίζει αμέσως μετά την περιοχή σκληρότητας και εκτείνεται μέχρι τη συχνότητα $fc/2$ (όπου fc η κρίσιμη συχνότητα). Ο δείκτης ηχομείωσης αυξάνει με την αύξηση της συχνότητας και της επιφανειακής πυκνότητας, σύμφωνα με τον νόμο της μάζας. Θεωρητικά, ο δείκτης ηχομείωσης αυξάνει κατά 6 dB για κάθε διπλασιασμό της επιφανειακής πυκνότητας. Στην πράξη όμως η αύξηση είναι μικρότερη της τάξης των 4-5 dB. Για την ίδια επιφάνεια ο δείκτης ηχομείωσης αυξάνει 6 dB για κάθε διπλασιασμό της συχνότητας. Ο νόμος της μάζας ισχύει ικανοποιητικά για υλικά με επιφανειακή συχνότητα μεγαλύτερη από 100 kg/m². Για το δείκτη ηχομείωσης υλικών και για κάθετη πρόσπτωση του ηχητικού κύματος ισχύει:

$$TL = 20 \log f_m - 43 \quad [5.8]$$

Όπου f : η συχνότητα του προσπίπτοντος ήχου σε Hz.

m : η επιφανειακή πυκνότητα (kg/m²)

Για το δείκτη ηχομείωσης υλικών και για τυχαία πρόσπτωση του ηχητικού κύματος ισχύει:

$$TL = 20 \log f_m - 47 \quad [5.9]$$

4. Περιοχή σύμπτωσης: Στην περιοχή αυτή που εκτείνεται αμέσως μετά την περιοχή του νόμου της μάζας, για συχνότητες κοντά στην κρίσιμη συχνότητα, υπάρχει μεγάλη μείωση του δείκτη ηχομείωσης λόγω του φαινομένου της σύμπτωσης. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει όταν η συχνότητα του προσπίπτοντος ήχου συμπίπτει με τη συχνότητα ταλάντωσης του υλικού ή όταν η προβολή της ταχύτητας των ηχητικών κυμάτων συμπίπτει με την ταχύτητα διάδοσης των καμπτικών (διαμηκών) κυμάτων κατά μήκος του υλικού. Σε αυτή την περίπτωση, η διέγερση που προκαλείται επιτρέπει μεγάλο μέρος του ήχου να μεταδοθεί μειώνοντας αισθητά την ηχομονωτική ικανότητα του τοίχου για τη συγκεκριμένη συχνότητα. Όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι 90° τότε η επιφάνεια δεν προσφέρει καμία αντίσταση στη διέλευση

του ηχητικού κύματος σε αυτή τη συχνότητα. Η συχνότητα αυτή ονομάζεται κρίσιμη συχνότητα (f_c) κι υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$f_c = \frac{c_2}{1.8hc_1} \quad [5.10]$$

Όπου c : η ταχύτητα του ήχου στο μέσο διάδοσης σε m/s.

h : το πάχος του τοιχώματος σε m.

c_1 : η ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών κυμάτων στο υλικό σε m/s.

5. Περιοχή ελεγχόμενη από την απόσβεση: Για συχνότητες μεγαλύτερες από την κρίσιμη συχνότητα αλλά κοντινές σε αυτή, παρατηρείται μεγάλη αύξηση του δείκτη ηχομείωσης με κλίση της τάξης των 9 dB/οκτάβα. Για υψηλότερες συχνότητες, υπάρχει μία ελάττωση της αύξησης του δείκτη ηχομείωσης μέχρι την τιμή των 6 dB/οκτάβα. Αν πρέπει να επιτευχθεί σημαντική ηχομείωση στις μεσαίες κι υψηλές συχνότητες θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν υλικά μεγάλης επιφανειακής πυκνότητας [10],[15].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Ακουστικοί δείκτες

Ανέκαθεν η κατασκευή κι η βελτίωση της ακουστικής συμπεριφοράς ενός χώρου ήταν ένας τομέας που προσέλκυε αντικρουόμενες απόψεις είτε ακουστικών είτε αρχιτεκτόνων και μηχανικών. Για αρκετά χρόνια υπήρχε σύγχυση για το τι είναι καλή ακουστική και πως αντιμετωπίζονται οι επιδράσεις του ήχου σε ένα χώρο. Με τη θέσπιση όμως των αντικειμενικών μεγεθών και δεικτών, το όλο ζήτημα προσεγγίζεται πλέον επιστημονικά και με ακρίβεια μέτρησης. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά των δεικτών που παίζουν σπουδαίο ρόλο στην καλή ακουστική ενός χώρου.

Στην παρούσα εργασία γίνεται αναφορά κι επεξήγηση των αντικειμενικών ποσοτήτων διεξοδικά και των υποκειμενικών συνοπτικά, καθώς οι πρώτες κρίνονται περισσότερο αναγκαίες και πλέον αξιοποιήσιμες.

6.1 Υποκειμενική περιγραφή του ήχου

Παρ' όλες τις αντικειμενικές τοποθετήσεις πάνω στην επιστήμη της ακουστικής, λόγω της φύσης αυτού κάθε αυτού του φαινομένου του ήχου και της καθαρά υποκειμενικής αντίληψης περί ακρόασης, έχει προκύψει η ανάγκη για τη θέσπιση υποκειμενικών δεικτών καλής ακουστικής των χώρων. Οι δείκτες αυτοί συνήθως μετρούνται όχι με τα συμβατικά όργανα της ακουστικής, αλλά με εργαλείο την άποψη, έμπειρων συνήθως, ακροατών οι οποίοι με τη συμπλήρωση κάποιου εντύπου με επίμαχες ερωτήσεις ανάλογα με το ζητούμενο αποτέλεσμα τοποθετούνται σύμφωνα με την άποψη τους.

Παρ' ότι η βιβλιογραφία πάνω στο θέμα είναι αρκετά εκτεταμένη λόγω του ότι στα πρώιμα χρόνια της ακουστικής οι υποκειμενικοί δείκτες ήταν σχεδόν οι μόνοι που υπήρχαν, οι βασικότεροι από αυτούς είναι:

- α) Η αίσθηση της ολότητας της ηχητικής πηγής (ensemble)
- β) Η αίσθηση της οικειότητας (intimacy)
- γ) Η αντιληπτότητα των συλλαβών (syllable intelligibility)
- δ) Η ευκρίνεια (clarity)
- ε) Η ακουστότητα (loudness)

Η αίσθηση της ολότητας της ηχητικής πηγής (ensemble)

Ο όρος αυτός περιγράφει το κατά πόσο οι ακροατές αντιλαμβάνονται την ηχητική πηγή (ορχήστρα ή/και τραγουδιστές) ως μία ολότητα, ένα ολοκληρωμένο σύνολο κι όχι ως μεμονωμένες πηγές. Το σύνολο (ensemble) καθορίζεται από το σχήμα της σκηνής που βρίσκονται οι ηχητικές πηγές (μουσικοί, τραγουδιστές) κι από τις ανακλαστικές επιφάνειες που βρίσκονται στην οροφή και στις πλευρικές επιφάνειες της σκηνής.

Η αίσθηση της οικειότητας (intimacy)

Η παράμετρος αυτή παίζει πολύ σημαντικό ρόλο για τους χώρους που προορίζονται τόσο για ομιλία όσο και για μουσική. Η τιμή της οικειότητας εξαρτάται από τη χρονική διαφορά μεταξύ της λήψης των ανακλώμενων ηχητικών κυμάτων που φτάνουν στον ακροατή αμέσως μετά τα απ' ευθείας. Τα χρονικά αυτά διαστήματα δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερα των 20 ms. Ο χρόνος αυτός επηρεάζεται αρκετά από την τοποθέτηση των ανακλαστικών επιφανειών στο χώρο. Αφίξεις ανακλώμενων ηχητικών κυμάτων από τις πλάγιες πλευρές του χώρου έχουν μεγαλύτερη σημασία από αυτές που προέρχονται από την οροφή.

Αντιληπτότητα των συλλαβών (syllable intelligibility)

Ο δείκτης αυτός εκφράζει την ποιότητα της ομιλίας. Με βάση το ISO TR 3352-1974(E) η αντιληπτότητα ορίζεται ως το ποσοστό επί τοις εκατό, του αριθμού των συλλαβών που γίνονται αντιληπτές από ένα μέσο ακροατή, προς το σύνολο των συλλαβών που εκφωνούνται κατά τη διάρκεια μιας συνήθους ομιλίας. Ικανοποιητικά ποσοστά για την αντιληπτότητα υπάρχουν όταν ο δείκτης ξεπερνά το 95%. Η αντιληπτότητα εξαρτάται από δύο σημαντικούς παράγοντες: το λόγο σήματος προς θόρυβο και το χρόνο αντήχησης. Η μέτρηση γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο: σε ένα χώρο εκπέμπονται ασυσχέτιστες συλλαβές και ζητείται από τους ακροατές, οι οποίοι τοποθετούνται σε διάφορες θέσεις, να γράψουν ότι έχουν ακούσει. Το ποσοστό υπολογίζεται ανάλογα με τις συλλαβές που έχουν ακούσει σωστά οι ακροατές.

Η ευκρίνεια (clarity)

Η ευκρίνεια έχει να κάνει με τις λεπτομέρειες του ήχου σε ένα χώρο. Η ευκρίνεια πρέπει να είναι τέτοιου βαθμού ώστε οι ακροατές να μπορούν να αντιληφθούν και να αναγνωρίσουν τις διάφορες αλλαγές, είτε πρόκειται για ομιλία είτε για μουσική, στην οποία είναι και πιο σημαντική.

Η ακουστότητα (loudness)

Η ακουστότητα αναφέρεται στην αντίληψη της έντασης της ηχητικής πηγής από το ακροατήριο. Η ένταση της πηγής πρέπει να έχει τέτοια στάθμη ώστε σε κάθε σημείο του ακροατηρίου να είναι ακουστή [3],[5],[8],[15].

6.2 Αντικειμενική περιγραφή

Χρόνος αντήχησης

Όταν μία ηχητική πηγή που λειτουργεί σε έναν κλειστό χώρο σταματήσει, ο ήχος αποσβαίνει ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του χώρου. Ως χρόνος αντήχησης (RT_{60}) ορίζεται ο χρόνος (σε δευτερόλεπτα) που απαιτείται ώστε η στάθμη ηχητικής πίεσης του ήχου στο χώρο να πέσει κατά 60 dB σε σχέση με την αρχική τιμή ή η πίεση να πέσει στο 1/1000 της αρχικής της τιμής. Ο χρόνος αντήχησης εξαρτάται από τη συχνότητα για αυτό οι τιμές του RT δίδονται για κεντρικές συχνότητες οκταβικής ή τριτοκταβικής ανάλυσης. Όταν δεν υπάρχει αναφορά συχνότητας εννοείται ότι η μέτρηση αναφέρεται στη συχνότητα των 500 Hz. Ο εμπειρικός τύπος του Sabine, μέσω του οποίου υπολογίζεται ο χρόνος αντήχησης ενός κλειστού χώρου, είναι:

$$RT_{60} = \frac{0.161V}{S\alpha} \quad [6.1]$$

Όπου V : ο όγκος του χώρου σε m^3

$S\alpha$: η συνολική απορρόφηση σε sabines (α μέσος συντελεστής απορρόφησης,

S συνολική επιφάνεια σε m^2)

Ο παραπάνω τύπος τύπος ισχύει για χώρους που παρουσιάζουν μικρή απορρόφηση, δηλαδή όταν $\alpha \ll 0,1$.

Ένας άλλος τύπος υπολογισμού του χρόνου αντήχησης είναι αυτός των Norris/Eyring και περιγράφεται από τη σχέση:

$$RT_{60} = \frac{0.161V}{-S \ln(1-\alpha)} \quad [6.2]$$

Όπου V : ο όγκος του χώρου σε m^3

$S\alpha$: η συνολική απορρόφηση σε sabines (α μέσος συντελεστής απορρόφησης, S συνολική επιφάνεια σε m^2)

Ο παραπάνω τύπος ισχύει για τιμές απορρόφησης με $\alpha > 0,1$

Στην περίπτωση που υπάρχει ανομοιόμορφη απορρόφηση (π.χ. λόγω ανακλαστικών επιφανειών ή απορροφητικών επιφανειών σε ένα σημείο του υπό μελέτη χώρου) χρησιμοποιείται ο τύπος του Fitzroy, ο οποίος εκφράζεται με τη σχέση:

$$RT_{60} = \frac{0.161V}{S^2} \left[\frac{2xy}{\alpha_{xy}} + \frac{2xz}{\alpha_{xz}} + \frac{2yz}{\alpha_{yz}} \right] \quad [6.3]$$

Όπου V : ο όγκος του χώρου σε m^3

S : συνολική επιφάνεια σε m^2

α : μέσος συντελεστής απορρόφησης

Στην περίπτωση που γίνεται μέτρηση σε μεγάλους χώρους, πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν κι η επίδραση του αέρα κατά τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης. Σε αυτή την περίπτωση ισχύει:

$$RT_{60} = \frac{0.161V}{S\alpha + 4mV} \quad [6.4]$$

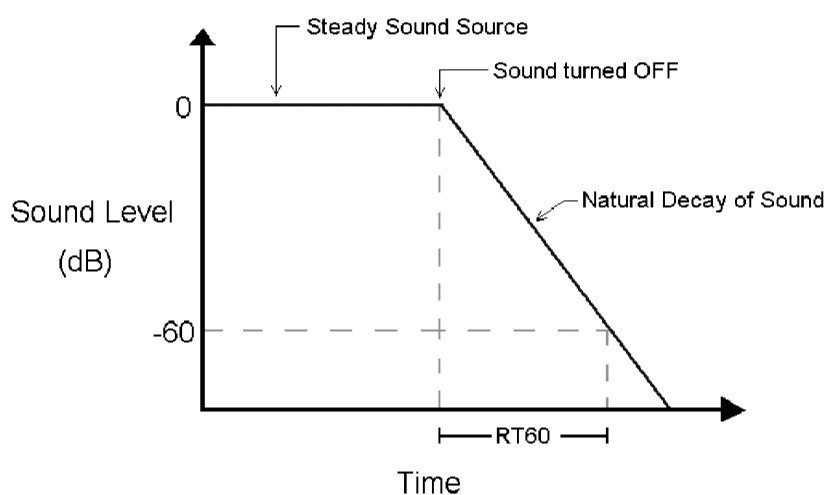
Όπου V : ο όγκος του χώρου σε m^3

S : συνολική επιφάνεια σε m^2

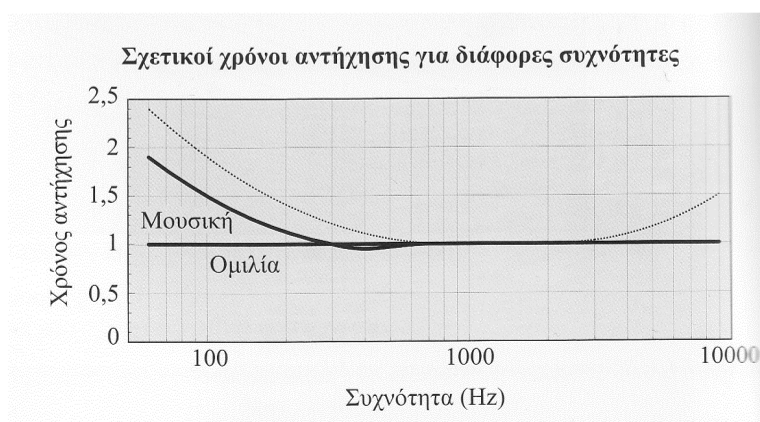
α : μέσος συντελεστής απορρόφησης

m : ο ο συντελεστής εξασθένησης της ηχητικής ενέργειας λόγω των μορίων του αέρα (εξαρτάται από συχνότητα και υγρασία)

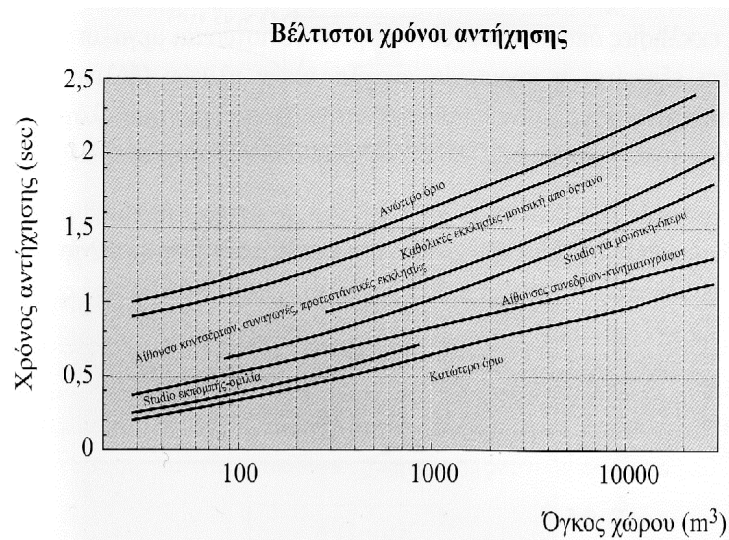
Η γνώση του χρόνου αντήχησης είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες για την εκτίμηση της ακουστικής ποιότητας ενός χώρου αφού επηρεάζει τα περισσότερα δεδομένα μια μελέτης. Η μέτρηση του χρόνου αντήχησης μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους. Μπορεί να διεγερθεί ο χώρος με ένα παλμικό ήχο και να μετρηθεί η στάθμη του ήχου συναρτήσει του χρόνου, δημιουργώντας κι ερμηνεύοντας έτσι ένα διάγραμμα πτώσης της στάθμης ηχητικής πίεσης που είναι γνωστό κι ως κρουστική απόκριση χώρου. Μπορεί να ακόμα να γίνει χρήση της μεθόδου της διακοπτόμενης πηγής, όπου μία παντοκατευθυντική πηγή εκπέμπει ηχητική ενέργεια η οποία αποθηκεύεται στο χώρο μέχρι η τιμή της ηχητικής ενέργειας στο χώρο να λάβει μία σταθερή τιμή. Έπειτα η ακτινοβολία της πηγής σταματά και ξεκινά η μέτρηση του χρόνου που χρειάζεται για την πτώση των 60 dB.



Σχήμα 6.2.1: Μέτρηση του χρόνου αντήχησης με τη μέθοδο της διακοπτόμενης πηγής [34].



Σχήμα 6.2.2: Χρόνοι αντήχησης για διάφορες συχνότητες [3].

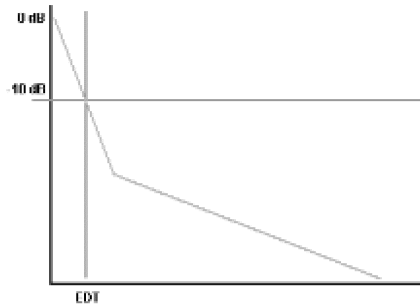


Σχήμα 6.2.3: Βέλτιστοι χρόνοι αντήχησης [3].

EDT (Early Decay Time)

Κατόπιν μελετών (π.χ. Schroder), έχει αποδειχθεί ότι συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της ακοής μας, συνδέονται άμεσα με το αρχικό κομμάτι της πτώσης της κρουστικής απόκρισης ενός χώρου που αντιπροσωπεύει τις πρώτες ανακλάσεις. Ο EDT θεωρείται ένας “σύντομος” χρόνος αντήχησης, αφού κατά τη μέτρησή του λαμβάνεται υπ’ όψιν η πτώση κατά τα πρώτα 10 dB του αρχικού σήματος. Η μέτρηση της πτώσης κατά τα πρώτα 10dB σχετίζεται με το γεγονός ότι το ανθρώπινο αυτί σπανίως μπορεί να αντιληφθεί διαφορές μεγαλύτερες από 10 dB σε δυναμικές για ένα σύνθετο σήμα.

Ο EDT σε σύγκριση με τον RT μας βοηθά να υπολογιστεί η ισορροπία μεταξύ της πρώιμης ενέργειας (πρώτων ανακλάσεων) και της συνολικής ακουστικής ενέργειας. Ο EDT είναι χρήσιμο μέγεθος γιατί λαμβάνει υπ’ όψιν του κυρίως τις πρώτες ανακλάσεις σε ένα χώρο και για αυτό το λόγο βρίσκεται πιο κοντά στην υποκειμενική κρίση των ακροατών.



Σχήμα 6.2.4: E.D.T

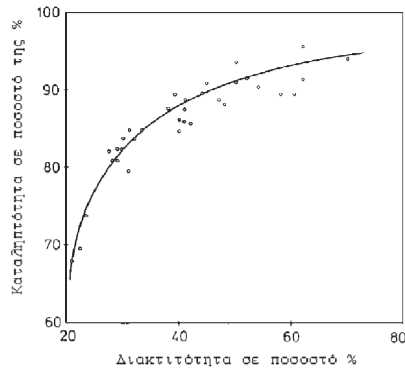
Διακριτότητα (Definition)

Η διακριτότητα παίζει κύριο ρόλο στην καταληπτότητα της ανθρώπινης ομιλίας. Η διακριτότητα ορίζεται ως ο λόγος της ηχητικής ενέργειας που φθάνει στον ακροατή στα πρώτα 50 ms, προς την συνολική ενέργεια που παράγεται από μια πηγή ήχου κι εκφράζεται ως ποσοστό επί της εκατό. Η διακριτότητα υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50ms} |p(t)|^2 dt}{\int_0^{\infty} |p(t)|^2 dt} \quad [6.5]$$

Όπου $p(t)$: η στιγμιαία ηχητική πίεση σε Pa

Η διακριτότητα κι η καταληπτότητα βρίσκονται σε άμεση σχέση μεταξύ τους. Σύμφωνα με μελέτες η σχέση εκφράζεται σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 6.2.5: Σχέση διακριτότητας με την καταληπιότητα [11].

Διαύγεια (Clarity C50,C80)

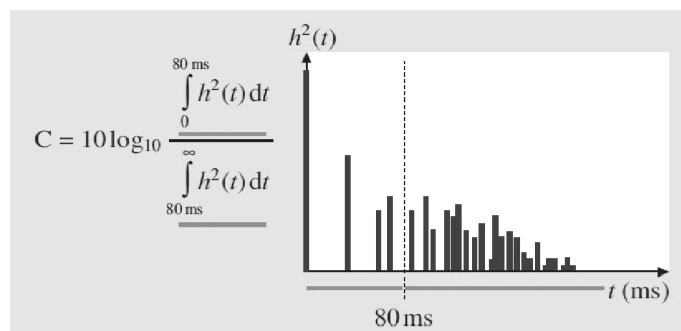
Η διαύγεια ορίζεται ως ο λόγος της πρώιμης προς την όψιμη ηχητική ενέργεια. Για μουσική, η διαύγεια σχετίζεται με την ενέργεια που περικλείεται στα πρώτα 50 ms προς τη συνολική. Για ανθρώπινη ομιλία, με την ενέργεια που περικλείεται στα πρώτα 80 ms προς τη συνολική. Η διαύγεια περιγράφει την ισορροπία μεταξύ του απευθείας ήχου και των πρώτων ανακλάσεων προς το συνολικό ηχητικό πεδίο λόγω αντήχησης. Για την εκάστοτε περίπτωση ορίζεται ως εξής:

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80ms} |p(t)|^2 dt}{\int_{80ms}^{\infty} |p(t)|^2 dt} \quad [6.6]$$

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50ms} |p(t)|^2 dt}{\int_{50ms}^{\infty} |p(t)|^2 dt} \quad [6.7]$$

Όπου $p(t)$: η στιγμιαία ηχητική πίεση σε Pa

Τα C_{50} και C_{80} μετρούνται σε dB. Οι δείκτες D_{50} και C_{50} εκφράζουν την ίδια ποσότητα αλλά στο D_{50} είναι εκφρασμένη σε ποσοστό επί της εκατό και στο C_{50} είναι σε dB.



Σχήμα 6.2.6: C80 [5].

STI – RASTI (Speech Transmission Index – RAPid Speech Transmission Index)

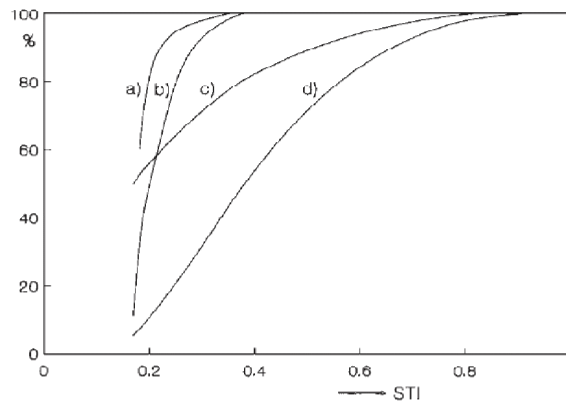
Οι δείκτες STI και RASTI χρησιμοποιήθηκαν πρώτη φορά σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Η ακολουθία ηχητική πηγή-χώρος-ακροατήριο αντιμετωπίζεται σαν ένα κανάλι μετάδοσης στο οποίο μετράται η μεταβολή του πλάτους διαμόρφωσης αργά μεταβαλλόμενων σημάτων κατά μήκος αυτής της ακολουθίας. Τα παλαιότερα χρόνια χρησιμοποιείτο για τη μέτρηση αυτών των δεικτών ένα ειδικό σήμα που είχε χαρακτηριστικά της ανθρώπινης ομιλίας, αλλά στα πιο σύγχρονα συστήματα οι μετρήσεις γίνονται μέσα από την κρουστική απόκριση του χώρου. Με τους δύο αυτούς δείκτες μετράται η καταληπτότητα του λόγου. Ο STI μετράται στη συχνοτική περιοχή 125-8000 Hz, ενώ ο RASTI στην περιοχή από 500-2000Hz. Ο STI με το RASTI έχουν διαφορά στον τρόπο μέτρησης ,εκτός από τις συχνότητες μέτρησης, στα σήματα που χρησιμοποιούνται για το καθένα (συχνοτικές ζώνες θορύβου). Οι STI-RASTI μετρούνται με τυποποιημένες διαδικασίες με βάση το IEC (60 268-16). Οι τιμές για τους δείκτες κυμαίνονται απο 0 μέχρι 1 και συμπεριλαμβάνουν την αντήχηση του χώρου στον υπολογισμό τους. Μεγαλύτερες τιμές STI δείχνουν καλύτερη αντιληπτότητα ενώ μικρότερες πιο “φτωχή”.

Για των υπολογισμό των δεικτών πρώτα υπολογίζεται η συνάρτηση διαμόρφωσης πλάτους:

$$m(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{2\pi f T}{13.8} \right]^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{\frac{-S/N}{10}}} \quad [6.7]$$

$$\frac{S}{N} = 10 \log_{10} \left(\frac{m}{1-m} \right) \quad [6.8]$$

$$RASTI = \frac{\frac{S}{N} + 15}{30} \quad [6.9]$$



Σχήμα 6.2.7: Σχέση ανάμεσα στο STI και την καταληπτότητα με α) αριθμούς και γράμματα β) μικρές προτάσεις γ) προτάσεις με ομοιοκαταληξία δ) προτάσεις με διάφορα μέτρα [11].

Καταληπτότητα ομιλίας				
κακή	φτωχή	καλή	πολύ καλή	εξαιρετική
0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,6	0,7	0,8	0,9	
Τιμή Rasti				

Σχήμα 6.2.8: Καταληπτότητα ομιλίας και τιμές RASTI [3].

Articulation loss of consonants (Alcons)

Μελέτες (Knudsen, 1932) έδειξαν ότι η αντιληπτότητα της ανθρώπινης ομιλίας εξαρτάται σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό από την κατανόηση των συμφώνων παρά από την κατανόηση των φωνηέντων. Αυτός ο δείκτης μετρά την πυκνότητα της ανακλώμενης ενέργειας κάθε στιγμή, προς την πυκνότητα της απευθείας ενέργειας. Η γενική μορφή του Alcons έχει ως εξής:

$$L = \int_0^{\infty} \frac{D_r(t)dt}{D_d} \quad [6.10]$$

Σήμερα χρησιμοποιείται η παρακάτω μορφή λόγω του ότι εμπεριέχει τη στάθμη του ελεύθερου ηχητικού πεδίου, του αντηχητικού πεδίου, του θορύβου βάθους και το χρόνο αντήχησης, μεγέθη που είναι απευθείας μετρήσιμα:

$$AL_{cons} = 100(10^{-2(A+BC-ABC)} +)0.15 \quad [6.11]$$

Όπου A, B και C: $A = -0.32 \log\left(\frac{E_R + E_N}{10E_D + E_R + E_N}\right)$

$$B = -0.32 \log\left(\frac{E_N}{10E_R + E_N}\right)$$

$$C = -0.5 \log\left(\frac{RT_{60}}{12}\right)$$

Όπου E_R, E_D, E_N : $E_R = 10^{0.1L_R}$

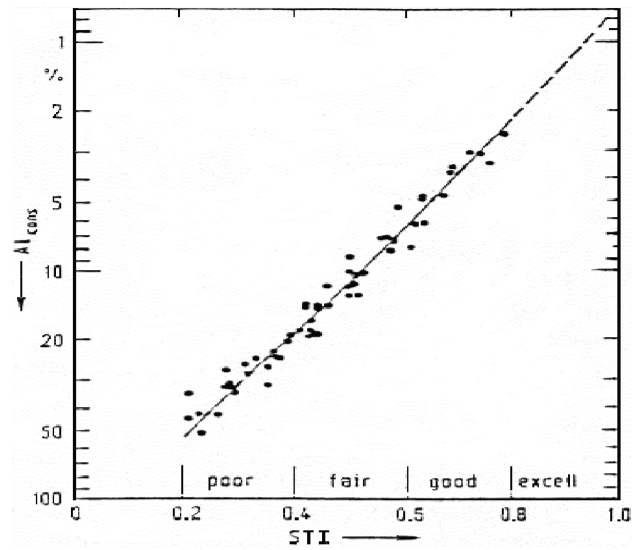
$$E_D = 10^{0.1L_D}$$

$$E_N = 10^{0.1L_N}$$

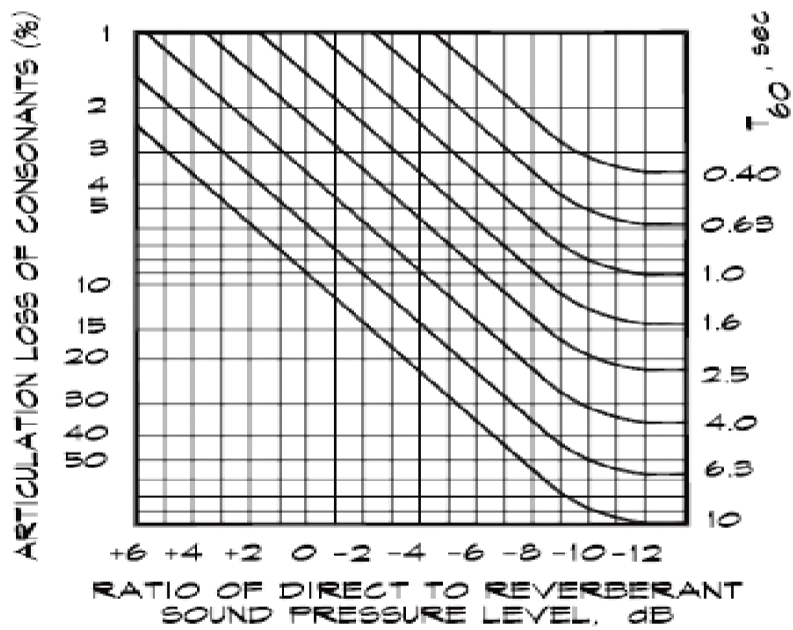
Όπου L_R : η στάθμη του αντηχητικού πεδίου σε dB_{SPL}

L_D : η στάθμη του απευθείας ήχου σε dB_{SPL}

L_N : η στάθμη του θορύβου βάθους σε dB_{SPL}



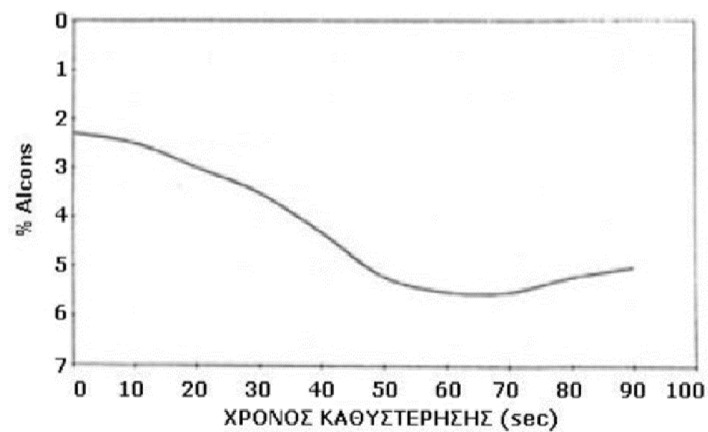
Σχήμα 6.2.9: Σχέση ανάμεσα στο STI και το Alcons [9].



Σχήμα 6.2.10: Alcons σε σχέση με το λόγο απευθείας ήχου-αντηχητικού πεδίου [9].

RASTI	%Al _{cons}	RASTI	%Al _{cons}	RASTI	%Al _{cons}
0.20	57.7	0.48	12.7	0.76	2.8
0.22	51.8	0.50	11.4	0.78	2.5
0.24	46.5	0.52	10.2	0.80	2.2
0.26	41.7	0.54	9.1	0.82	2.0
0.28	37.4	0.56	8.2	0.84	1.8
0.30	33.6	0.58	7.4	0.86	1.6
0.32	30.1	0.60	6.6	0.88	1.4
0.34	27.0	0.62	6.0	0.90	1.3
0.36	24.2	0.64	5.3	0.92	1.2
0.38	21.8	0.66	4.8	0.94	1.0
0.40	19.5	0.68	4.3	0.96	0.9
0.42	17.5	0.70	3.8	0.98	0.8
0.44	15.7	0.72	3.4	1.0	0.0
0.46	14.1	0.74	3.1		

Σχήμα 6.2.11: Σχέση μεταξύ RASTI και Alcons [3].



Σχήμα 6.2.12: Alcons σε σχέση με το χρόνο καθυστέρησης [3].

Ηχηρότητα (Sound strength ,G)

Η ακουστότητα μιας πηγής συνδέεται άμεσα και χαρακτηρίζεται από αυτό το δείκτη . Ορίζεται ως ο δεκαδικός λογάριθμος του λόγου του τετραγώνου της ηχητικής πίεσης ως προς το τετράγωνο της ηχητικής πίεσης μετρούμενης σε ελεύθερο πεδίο, σε απόσταση 10 m από την πηγή. Η ακουστότητα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} |p(t)|^2 dt}{\int_0^{\infty} |p_{10}(t)|^2 dt} \quad (\text{dB}) \quad [6.12]$$

Όπου $p(t)$: η στιγμιαία ηχητική πίεση σε Pa

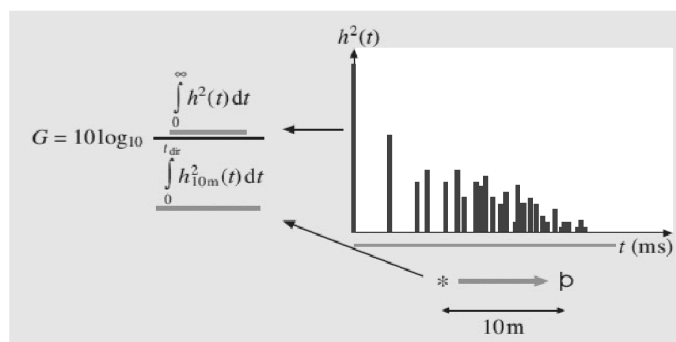
$p_{10}(t)$: η ηχητική πίεση σε Pa όταν η πηγή και ο δέκτης έχουν απόσταση 10m μεταξύ τους

Σύμφωνα με τον Barron, το G (total sound level or loudness), δηλαδή η συνολική ηχητική στάθμη μείον την ηχητική στάθμη του απευθείας ήχου στα 10 m από την πηγή, μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$G = 10 \log(p_{total}^2) - 10 \log(p_{10}^2) \quad [6.13]$$

Όπου p_{10} : η ηχητική πίεση (rms) για απευθείας ήχο σε απόσταση 10m από την πηγή, σε Pa

p_{total} : η συνολική ηχητική πίεση (rms), σε Pa



Σχήμα 6.2.13:Ορισμός του total sound level [5].

Καμπύλες στάθμισης θορύβου (Noise weighting curves)

Ο θόρυβος βάθους σε ένα χώρο παίζει πολύ μεγάλο ρόλο στην κατασκευή του και στις διάφορες ακουστικές παρεμβάσεις σε αυτόν. Για πληρέστερες μετρήσεις κι επιστημονικά τεκμηριωμένα δεδομένα στις μελέτες, έχουν θεσπιστεί οι σταθμισμένες καμπύλες θορύβου. Υπάρχουν πέντε καμπύλες θορύβου που χρησιμοποιούνται σήμερα :

- α) noise rating (NR)
- β) noise criteria (NC)
- γ) room criteria (RC)
- δ) balanced noise criteria (NCB)
- ε) room noise criteria (RNC)

Noise rating (NR)

Οι καμπύλες NR έχουν υιοθετηθεί σαν τεχνική μέτρησης από το διεθνή οργανισμό τυποποίησης (ISO) κι έχουν σκοπό τη μέτρηση περιβαλλοντικού και βιομηχανικού θορύβου. Επίσης, είχαν χρησιμοποιηθεί σε πρώιμα στάδια για τον καθορισμό επιπέδου θορύβου μηχανημάτων.

Οι καμπύλες NR κατηγοριοποιούνται σε οκταβικές ζώνες. Οι NR ενός θορύβου ισούνται με την ψηλότερη οκταβική ζώνη θορύβου η οποία ορίζεται ως εξής:

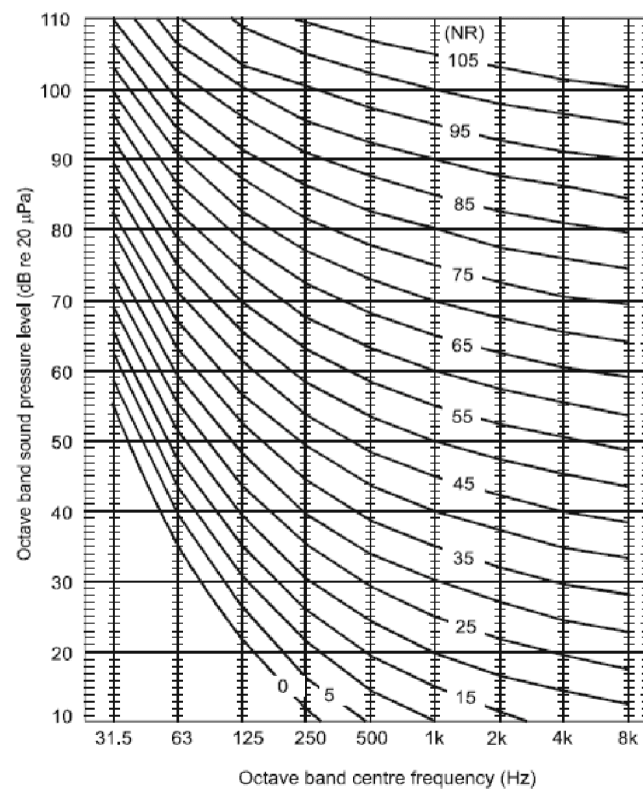
$$NR_B = \frac{L_{PB} - A_B}{B_B} \quad [6.14]$$

Όπου A_B και B_B έχουν τιμές που φαίνονται στον πίνακα παρακάτω:

Octave band centre frequency (Hz)	A_B	B_B
31.5	55.4	0.681
63	35.5	0.790
125	22.0	0.870
250	12.0	0.930
500	4.8	0.974
1000	0.0	1.000
2000	-3.5	1.015
4000	-6.1	1.025
8000	-8.0	1.030

Πίνακας 6.1: τιμές A και B για τον υπολογισμό των καμπυλών NR [10].

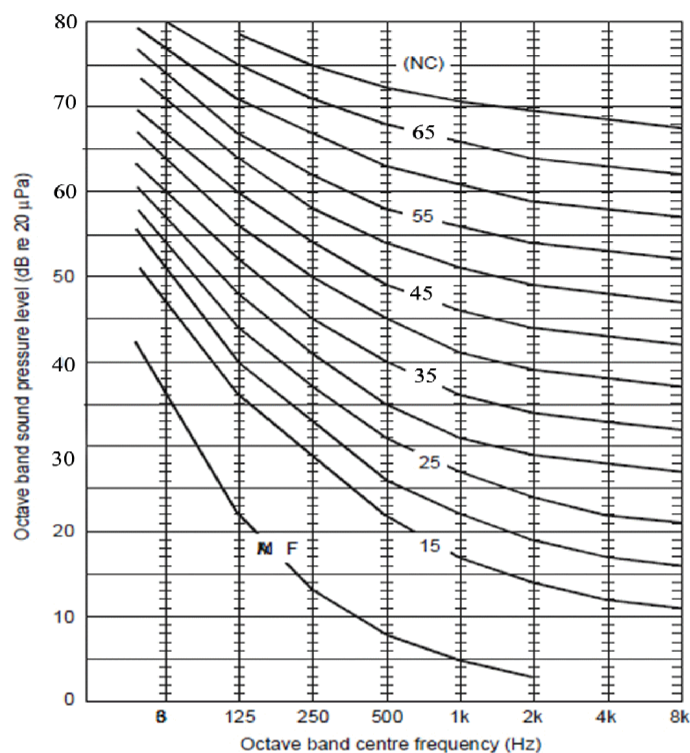
Πιο συνηθισμένη τεχνική χρήσης όμως είναι η σύγκριση των μετρήσεων με το παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 6.2.14: καμπύλες NR [10].

Noise criteria (NC)

Οι καμπύλες αυτές αναπτύχθηκαν από την ανάγκη για ορισμό του αποδεκτού θορύβου σε κατοικήσιμους χώρους με όλες τις συσκευές του χώρου να λειτουργούν. Χρησιμοποιούνται ακόμα σε κτίρια, παρ'ότι έχουν ξεπεραστεί από τις καμπύλες NCB (balanced noise criteria) και δεν ορίζονται για τα 31.5 Hz.



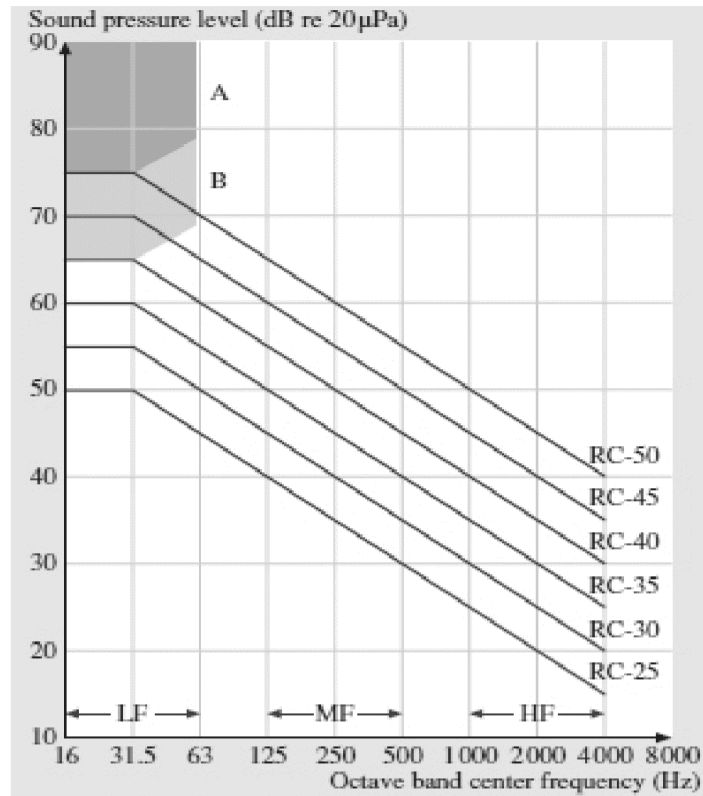
Σχήμα 6.2.15: Καμπύλες NC [10].

Room criteria (RC)

Οι καμπύλες RC αναπτύχθηκαν προς αντικατάσταση των NC (noise criteria) και περιέχουν την οκτάβα με κεντρική συχνότητα τα 16 αλλά και τα 31,5 Hz στις μετρήσεις τους. Η στάθμη L_B της κεντρικής συχνότητας f που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη καμπύλη, δίνεται από τον τύπο:

$$L_B = RC = \frac{5}{0.3} \log_{10} \left(\frac{1000}{f} \right) \text{ (dB)} \quad [6.15]$$

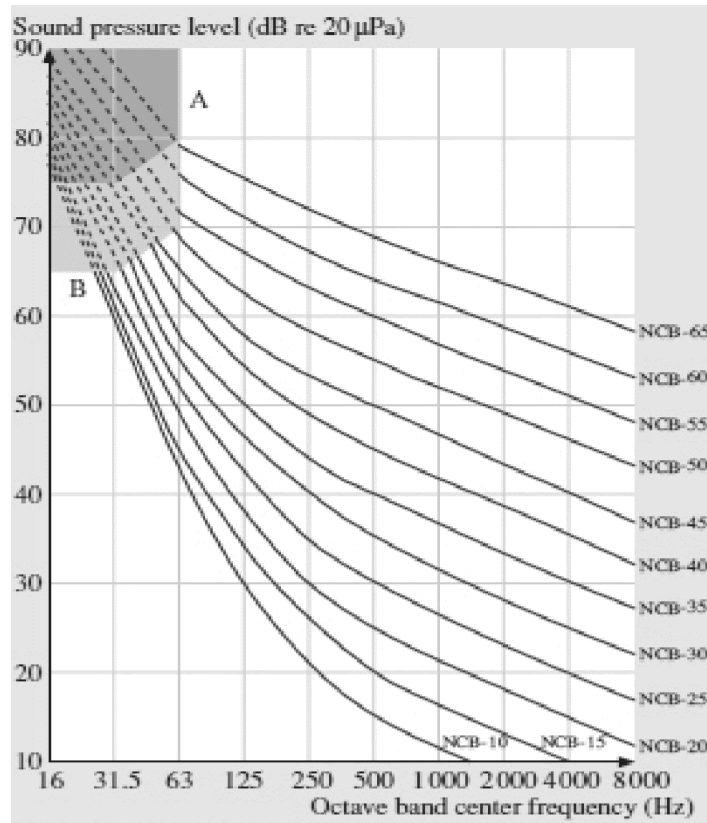
Το διάγραμμα των καμπυλών RC φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 6.2.16: Καμπύλες RC [5].

Balanced noise criteria (NCB)

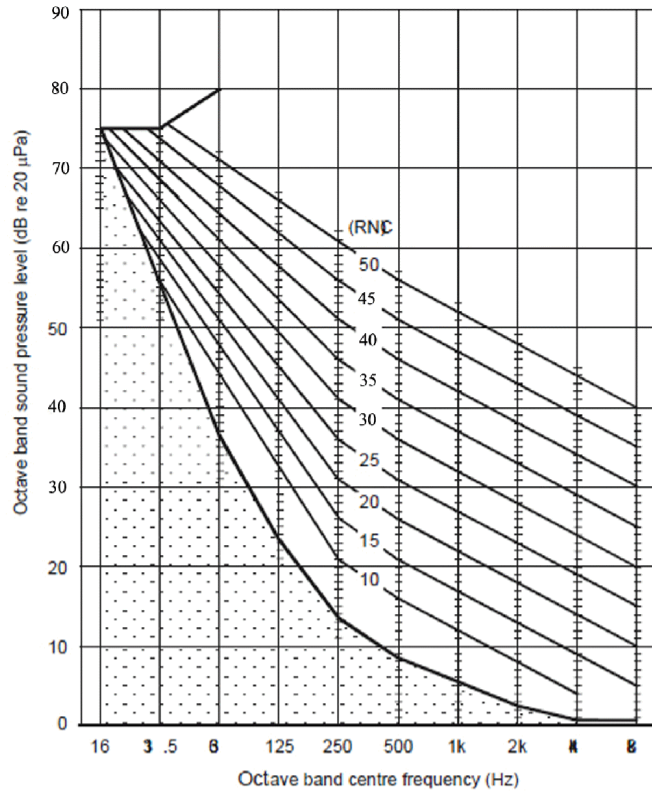
Οι καμπύλες NCB χρησιμοποιούνται για να ορίσουν τα αποδεκτά όρια θορύβου σε κατοικημένους χώρους. Στη μέτρησή τους συμπεριλαμβάνεται κι ο θόρυβος κλιματισμού κι όποιος άλλος περιβαλλοντικός θόρυβος υπάρχει. Οι καμπύλες NCB φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 6.2.17: Καμπύλες NCB [5].

Room noise criteria (RNC)

Οι καμπύλες RC και NCB έχουν κάποιους περιορισμούς οι οποίοι μπορούν να οδηγήσουν σε ανεπιθύμητα αποτελέσματα. Έτσι, το 2000 ο Schomer πρότεινε τις καμπύλες RNC, οι οποίες βρίσκονται συχνολικά πάνω από τα όρια της ανθρώπινης ακοής, ενώ την ίδια στιγμή προλαμβάνουν τα προβλήματα που δημιουργούνται από το σύστημα που παράγει το ειδικό σήμα της μέτρησης. Δύσκολα οι RNC θα τύχουν ευρείας αποδοχής λόγω της πολυπλοκότητάς τους στη βαθμονόμηση και τη χρήση. Οι καμπύλες RNC φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 6.2.18: Καμπύλες RNC [10].

Κεντρικός χρόνος (Center time)

Είναι το κέντρο βάρους κατά μήκος του άξονα του χρόνου, του τετραγώνου της κρουστικής απόκρουσης κι εισήχθη από τον Cremer. Ο κεντρικός χρόνος συνδέεται άμεσα με το χρόνο άφιξης στη θέση του ακροατή, της μέγιστης ενέργειας που εκπέμπεται από την ηχητική πηγή. Για τον κεντρικό χρόνο ισχύει ότι:

$$C = \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad [6.16]$$

Υποστήριξη σκηνής (stage support)

Το μέγεθος αυτό εκφράζει την υποστήριξη που παρέχει η σκηνή στους χρήστες της, ομιλητές αλλά κυρίως μουσικούς. Η μέτρηση για το δείκτη αυτό γίνεται πάνω στη σκηνή και σε απόσταση ενός μέτρου από την πηγή. Ο υπολογισμός γίνεται με βάση το δεκαπλάσιο δεκαδικό λογάριθμο του λόγου της συνολικής ηχητικής ενέργειας των πρώτων ανακλάσεων (χρόνος άφιξης 0,02-0,1 sec) προς την ηχητική ενέργεια του απευθείας πεδίου της πηγής (χρόνος άφιξης 0,01 sec). Οι μετρήσεις γίνονται σε τρεις θέσεις της σκηνής από τις οποίες προκύπτει ένας μέσος όρος. Οι συχνότητες για τις οποίες υπολογίζεται η υποστήριξη της σκηνής είναι τα : 250, 500 , 1000 και 2000 Hz κι ο μέσος όρος τους είναι η τιμή της υποστήριξης σκηνής.

$$ST1 = \frac{\int_{0.02}^{0.1} p^2(t) dt}{\int_0^{0.01} p^2(t) dt} \quad [6.17]$$

Πλευρικά κλάσματα

Ως πλευρικά κλάσματα αναφέρεται ο λόγος της πρώιμης πλευρικής προς τη συνολική ενέργεια του ήχου. Έχει άμεση σχέση με την αίσθηση της περικύκλωσης στο ηχητικό πεδίο. Η αναγκαιότητα για τη χρήση των δεδομένων αυτού του δείκτη προέκυψε από πειράματα ψυχοακουστικής που πραγματοποιήθηκαν σε ανηχοϊκούς θαλάμους με προσομοιώσεις πηγής κι ανακλάσεων από μεγάφωνα. Μετά από μελέτες διαπιστώθηκε ότι με τη χρήση των πλευρικών κλασμάτων αποτυπώνεται ικανοποιητικά η υποκειμενική αίσθηση του πλάτους αλλά και της βύθισης στο ηχητικό πεδίο.

Ο υπολογισμός γίνεται με βάση το λόγο ενέργειας που δέχεται ένα αμφίκατευθυντικό μικρόφωνο με τον άξονά του στραμμένο κατά γωνία 90⁰ από τον άξονα πηγή-ακροατή (θέση μέτρησης) για χρόνους από 5ms μέχρι 80 ms, προς το σύνολο της ενέργειας που μετριέται με ένα παντοκατευθυντικό μικρόφωνο στην ίδια θέση και για χρονικό διάστημα από 0 ως 80 ms. Για το early lateral sound ratio ισχύει:

$$LF = \frac{\int_0^{80ms} |p_L(t)|^2 dt}{\int_0^{80ms} |p(t)|^2 dt} \quad [6.18]$$

Interaural cross correlation

Ο δείκτης αυτός μέτρα την άφιξη του ήχου σε δύο σημεία, προσομοιώνοντας τα αυτιά του ακροατή. Μαθηματικά βασίζεται στην παρακάτω συνάρτηση:

$$IACF_{t_1, t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_L(t) p_R(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_L^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} p_R^2(t) dt}} \quad [6.19]$$

Όπου L και R αναφέρονται το δεξί και αριστερό “αυτί” του ακροατή. Η μέγιστη τιμή του δείκτη είναι 1 κι υπάρχει όταν ο ήχος και στα δύο αυτιά είναι ίδιος. Επιθυμητές τιμές είναι χαμηλές, της τάξης του 0,3 που σημαίνει ότι η άφιξη του ήχου είναι συσχετισμένη κατά 30%.

Envelopment-Late lateral sound level

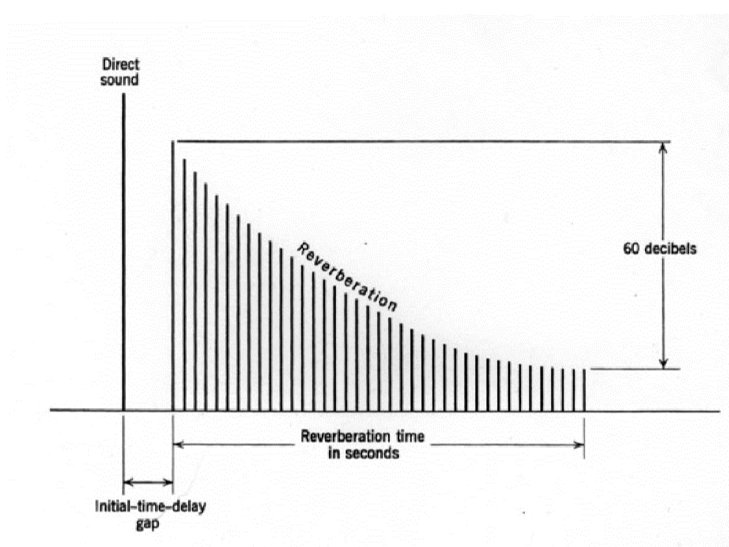
Βύθιση στο ηχητικό πεδίο (envelopment) κατά τον Barron, είναι ο λόγος της ηχητικής ενέργειας που προέρχεται από τις πλευρικές ανακλάσεις του ήχου κατά τα πρώτα 80ms ως προς την συνολική ηχητική ενέργεια στο χρόνο αυτό.

Η Late lateral sound level είναι μία στάθμη που χαρακτηρίζει τη χωρική αντίληψη κι ορίζεται ως εξής:

$$LG = \frac{\int_0^{80ms} |p_l(t)|^2 dt}{\int_0^{\infty} |p_{10}(t)|^2 dt} \quad [6.20]$$

Αρχική χρονική καθυστέρηση (Initial time delay gap)

Μετράται σε δευτερόλεπτα κι είναι ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ της άφιξης του προερχόμενου από την ηχητική πηγή απευθείας ήχου και των πρώτων ανακλάσεων. Υπολογίζεται μέσω της κρουστικής απόκρισης μεταξύ δυο θέσεων. Για αποδεκτές ακουστικές συνθήκες ο χρόνος αυτός πρέπει να είναι μικρότερος των 30 ms, διότι αυτή η τιμή διασφαλίζει την αντίληψη από τον ακροατή του απευθείας ήχου και των πρώτων ανακλάσεων ως ένα ενιαίο γεγονός.



Σχήμα 6.2.19: Initial time delay gap [37].

Κριτήριο ηχούς (Echo Criterion, TS)

Το κριτήριο της ηχούς εισήχθη για πρώτη φορά από τους Dietsch και Kraak με σκοπό τον αντικειμενικό προσδιορισμό της καταληπτότητας της ομιλίας. Ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$TS = \frac{\int_0^{\infty} t |p_l(t)|^n dt}{\int_0^{\infty} |p(t)|^n dt} \quad [6.21]$$

Όπου $n=1$ για μουσική

$n=2/3$ για ομιλία

$n=2$ έχουμε τον κεντρικό χρόνο (Centre time).

Όσο μικρότερη τιμή έχει ο TS τόσο καλύτερη είναι η καταληπτότητα της ομιλίας

Λόγος σήματος προς θόρυβο (signal to noise ratio)

Ο λόγος σήματος προς θόρυβο παρέχει το ποσοστό του θορύβου σε σχέση με το χρήσιμο σήμα. Όπως είναι ευκόλως αντιληπτό, μεγαλύτεροι λόγοι μας δίνουν πιο “καθαρό” σήμα σε σχέση με το θόρυβο. Όσον αφορά το σήμα ομιλίας, το οποίο δεν ενισχύεται από κάποιο αντίστοιχο σύστημα, η στάθμη έντασης του ήχου συνήθως δεν υπερβαίνει τα 65 dB για κανονική ομιλία (75 dB όταν ο ομιλητής μιλάει δυνατά). Συνεπάγεται πως πολύ σημαντικό ρόλο στην κατανόηση του λόγου έχει η στάθμη του θορύβου βάθους εφόσον αυτή καθορίζει την τιμή του λόγου σήματος ως προς το θόρυβο [3],[5],[8],[10],[11],[15].

6.3 Σήματα μέτρησης της κρουστικής απόκρισης

Στα πλαίσια των μετρήσεων για τον υπολογισμό των ακουστικών παραμέτρων ενός χώρου χρησιμοποιούνται κάποια ειδικά σήματα, τα οποία έχουν την ιδιότητα να διεγείρουν τον προς μέτρηση χώρο με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να εξαχθούν έγκυρα αποτελέσματα μέσω της κρουστικής απόκρισης. Η κρουστική απόκριση ενός γραμμικά μη αμετάβλητου συστήματος είναι η έξοδος του, εάν στην είσοδό του εφαρμοστεί ένας παλμός απειροστού μήκους (μαθηματικά μια συνάρτηση Δέλτα). Για τη μέτρηση της απόκρισης ενός χώρου χρειάζονται σήματα τα οποία διοχετεύουν ενέργεια στον χώρο με τέτοιο τρόπο ώστε να το διεγείρουν σε όλο το επιθυμητό συχνοτικό φάσμα ,αν είναι δυνατό. Παρακάτω πραγματοποιείται αναφορά στα πλέον διαδεδομένα γι’ αυτό το σκοπό σήματα.

Στα πλαίσια της εκπόνησης της παρούσας πτυχιακής εργασίας έχει γίνει χρήση λευκού θορύβου κι ακολουθίας μεγίστου μήκους.

Μέθοδος απειροστού παλμού

Η μέθοδος αυτή αποτέλεσε μια από τις πρώτες τεχνικές μέτρησης της κρουστικής απόκρισης ενός συστήματος. Η ιδέα γύρω από την εφαρμογή της είναι ότι στην είσοδο του συστήματος (χώρου) εφαρμόζεται ένας μοναδιαίος παλμός απειροστής διάρκειας και καταγράφεται η απόκριση της εξόδου του. Η μέθοδος

μέτρησης αυτή παρότι θεωρητικά φαίνεται άρτια, στην πράξη παρουσιάζει αρκετά προβλήματα, ειδικά αν σχετίζεται με ηλεκτροακουστικές εφαρμογές οι οποίες χρησιμοποιούνται κατά κόρον στην ακουστική επιστήμη. Τα βασικά προβλήματα αυτής της μεθόδου είναι τα εξής:

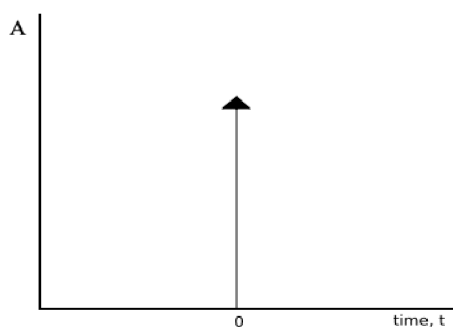
α) Λόγω της φύσης των ηλεκτρομηχανικών συστημάτων είναι πρακτικά αδύνατο να εφαρμοστεί σε αυτά ένας παλμός απειροστού πλάτους, καθώς λειτουργούν σε αυστηρά πεπερασμένα όρια κι έχουν συγκεκριμένο χρόνο αντίδρασης.

β) Σε όλα τα συστήματα και δη στα φυσικά, υπάρχει κάποιος θόρυβος. Επειδή ο απειροστός παλμός διεγείρει όλο το φάσμα των συχνοτήτων, για την εξαγωγή της κρουστικής απόκρισης, για να υπάρξει ένας σεβαστός λόγος σήματος προς θόρυβο πρέπει ο παλμός να έχει πολύ μεγάλο πλάτος. Αυτό μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την οδήγηση του συστήματος σε μη γραμμικές περιοχές λειτουργίας και σε πιο ακραίο στάδιο ακόμα και την καταστροφή του.

γ) Εάν κατά τη διάρκεια της μέτρησης με απειροστό παλμό υπάρξει κάποιο εξωτερικό γεγονός, όπως κάποιος θόρυβος, δεν είναι δυνατόν να αφαιρεθεί από τη μέτρηση ούτε ο ίδιος ούτε η επίδρασή του.

δ) Η χρήση του απειροστού παλμού για τη διέγερση του χώρου μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την καταστροφή των μονάδων αναπαραγωγής χαμηλών συχνοτήτων (woofer) λόγω της υψηλής στάθμης του σήματος.

ε) Εάν γίνει χρήση φυσικής πηγής (π.χ. πυροβολισμός, κρούση αντικειμένων), η οποία προσομοιάζει κατά πολύ τον απειροστό παλμό, όπως είναι αναμενόμενο δεν υπάρχει καμία περίπτωση επαναληψιμότητας στη μέτρηση. Ακόμα, αναλόγως με τη φυσική πηγή ίσως υπάρξει υπεροδήγηση του συστήματος.



Σχήμα 6.3.1: Γραφική αναπαράσταση απειροστού παλμού.

Μέθοδος με τη χρήση λευκού θορύβου

Ο λευκός θόρυβος είναι ένα σήμα που έχει ίση κατανομή ενέργειας ανά συχνότητα και λόγω αυτής της ιδιότητας προσομοιάζει κατά πολύ το φάσμα του απειροστού παλμού. Κατά την μέτρηση με λευκό θόρυβο καταγράφεται η είσοδος και η έξοδος του συστήματος ταυτόχρονα. Έπειτα υπολογίζεται ο μετασχηματισμός Fourier των δύο αυτών σημάτων και από τη διαίρεσή τους λαμβάνεται η συχνοτική απόκριση του υπό μέτρηση συστήματος. Μαθηματικά η παραπάνω διεργασία εκφράζεται ως εξής:

Αν ορίσουμε ως:

$x[n]$ το σήμα του λευκού θορύβου

$y[n]$ το σήμα εξόδου του συστήματος

$h[n]$ την κρουστική απόκριση του συστήματος

$F[\]$ τον μετασχηματισμό Fourier

Τότε λαμβάνουμε τα εξής:

$$y[n] = (h \cdot x)[n] \Leftrightarrow F\{y[n]\} = F\{h[n]\} \cdot F\{x[n]\}$$

$$\Leftrightarrow Y(f) = H(f) \cdot X(f) \Leftrightarrow H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)}$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι από τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier της συχνοτικής απόκρισης μπορεί να προκύψει η παλμική απόκριση του συστήματος. Όπως και στη μέθοδο του απειροστού παλμού και αυτή η μέθοδος μέτρησης παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα. Αναλυτικότερα:

α) Για την καταγραφή του σήματος εισόδου κι εξόδου απαιτείται ένα επιπλέον κανάλι καταγραφής, πράγμα που αυξάνει τις απαιτήσεις του συστήματος.

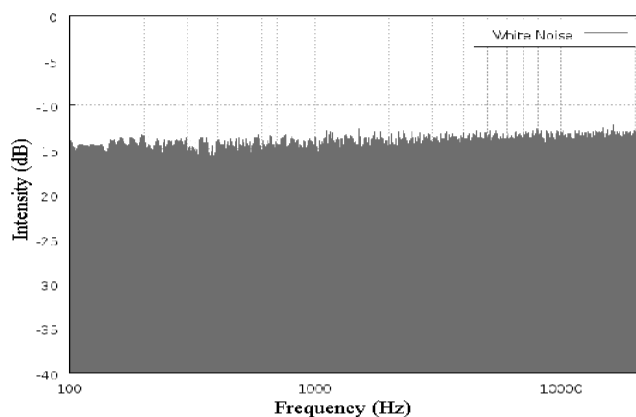
β) Εάν κατά τη διάρκεια της μέτρησης μεσολαβήσει κάποιο ηχητικό γεγονός (π.χ. εξωτερικός θόρυβος) δεν υπάρχει δυνατότητα αφαίρεσης αυτού και της επίδρασής του στη μέτρηση.

γ) Σε χώρους που ο θόρυβος βάθους είναι υψηλός, απαιτείται μεγάλος χρόνος μέτρησης, καθώς ισχύει ότι διπλασιασμός του χρόνου μέτρησης συνεπάγεται βελτίωση του λόγου σήματος προς θόρυβο (S/N ratio) κατά τρία dB.

δ) Η πολυπλοκότητα των πράξεων αλλά κι η ακρίβεια των μετρήσεων είναι ένας αρνητικός παράγοντας, αφού αφενός για να ληφθεί η κρουστική απόκριση

απαιτούνται δύο διακριτοί μετασχηματισμοί Fourier (ορθός και αντίστροφος) κι αφετέρου χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή κατά την επιλογή των δεδομένων των μετασχηματισμών (τύπος, μήκος παραθύρου, αλληλοεπικάλυψη, φίλτρα κτλ.).

ε) Λόγω του ότι οι περισσότεροι ηλεκτρακουστικοί μετατροπείς έχουν φασικές αποκλίσεις σε συχνότητες του ακουστικού φάσματος, όπως είναι φυσικό η προσθήκη άλλης μίας μονάδας καταγραφής είναι πιθανό να εντείνει το πρόβλημα.



Σχήμα 6.3.2: Συχνοστικό περιεχόμενο λευκού θορύβου.

Μέθοδος ακολουθίας μεγίστου μήκους (MLS)

Πρόκειται για την πλέον αξιόπιστη και καινοτόμο λύση στις ακουστικές μετρήσεις. Αναπτύχθηκε τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια και έθεσε νέους όρους και νέα δεδομένα στις ακουστικές μελέτες. Η μέθοδος αυτή είναι εφαρμόσιμη σε όλα τα γραμμικά μη αμετάβλητα συστήματα (ηλεκτρονικά, μηχανικά κι ακουστικά) και βασίζεται σε ένα σήμα που ονομάζεται ακολουθία μεγίστου μήκους, το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια των σύγχρονων μαθηματικών και της θεωρίας ψηφιακής επεξεργασίας σήματος. Η μέθοδος αυτή βρήκε πρώιμες εφαρμογές στις μετρήσεις μεγαφώνων, καθώς προσέφερε τη δυνατότητα “ανηχοικών” μετρήσεων χωρίς την ανάγκη ανηχοϊκού θαλάμου.

Η ακολουθία μεγίστου μήκους αποτελείται από σειρές μοναδιαίων και μηδενικών παλμών (παύσεις) που εναλλάσσονται με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε χρονική στιγμή υπάρχει πιθανότητα να εμφανιστεί παλμός ή παύση με ίση πιθανότητα 50% κι ανεξάρτητη από το προηγούμενο δείγμα. Τα χαρακτηριστικά της ακολουθίας μεγίστου μήκους είναι τα παρακάτω:

α) Η παραγωγή της είναι αυστηρά καθορισμένη με ντετερμινιστικό τρόπο.

β) Ο αριθμός των μοναδιαίων παλμών είναι ίσος με τον αριθμό των παύσεων, πλέον της μίας αρχικής μονάδας.

γ) Η συνάρτηση της αυτοσυσχέτισης (autocorrelation function) είναι σχεδόν μία Δέλτα συνάρτηση ($\delta(t)$) και αυτό γιατί το πλάτος των λοιπών όρων της ισούται με $1/N$.

δ) Ο μετασχηματισμός Fourier της ακολουθίας μεγίστου μήκους περιέχει σταθερή ενέργεια ανά συχνότητα, όπως μία συνάρτηση $\delta(t)$ ή όπως ο λευκός θόρυβος για αυτό άλλωστε και αναφέρεται ως ψευδοτυχαίος λευκός θόρυβος.

ε) Η ακολουθία μεγίστου μήκους είναι ένα σήμα με περίοδο που εξαρτάται από έναν ακέραιο N , ο οποίος ονομάζεται τάξη ακολουθίας. Η περίοδος μίας ακολουθίας τάξης N ισούται με $L = 2^N - 1$ τιμές. Μαθηματικά, η ακολουθία μεγίστου μήκους εκφράζεται ως εξής:

Αν ορίσουμε:

$x[n]$ την ακολουθία μεγίστου μήκους που εισάγεται από το σύστημα

$y[n]$ το σήμα εξόδου του συστήματος

$h[n]$ την κρουστική απόκριση του συστήματος

R_{xx} την αυτοσυσχέτιση

* την πράξη της αυτοσυσχέτισης

Για τη συνέλιξη ισχύει ότι :

$$y(t_0) = \int_{t-0}^{\infty} h(t) \cdot x(t-t_0) dt \quad [6.22]$$

και για σήματα διακριτού χρόνου:

$$y(k) = \sum_n h(n) \cdot x(n-k) \quad [6.23]$$

Για τη συχνοτική απόκριση του συστήματος (ο μετασχηματισμός Fourier της κρουστικής απόκρισης ονομάζεται συχνοτική απόκριση) μπορεί να γραφεί ότι:

$$H(f) = F\{h(t)\} \quad [6.24]$$

Όπου F ο μετασχηματισμός Fourier

κι αφού ισχύει ότι :

$$\begin{aligned} y[n] = (h * x)[n] &\Leftrightarrow F\{y[n]\} = F\{h[n]\} \cdot F\{x[n]\} \\ &\Leftrightarrow Y(f) = H(f) \cdot X(f) \Leftrightarrow H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} \end{aligned}$$

τότε για την ακολουθία MLS ισχύει ότι:

$$R_{xx}[T + kt_0] = \sum_n x[nt_0 - kt_0] \cdot x[nt_0] = \delta(t - kt_0)$$

$$y[n] = (h * x)[n] \Leftrightarrow R_{yx}[n] = (h * R_{xx})[n]$$

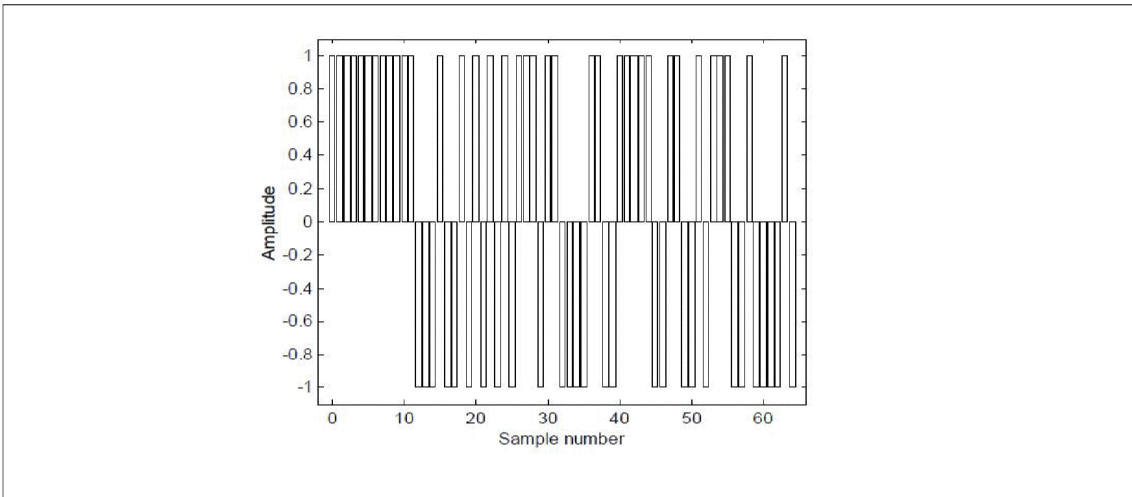
$$R_{yx}[n] = h[n]$$

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η απόκριση του συστήματος είναι ίση με την ετεροσυσχέτιση της εισόδου με την έξοδο του συστήματος. Αυτή η ιδιότητα της ακολουθίας μεγίστου μήκους την έχει καταστήσει το πλέον διαδεδομένο σήμα για την μέτρηση κρουστικών αποκρίσεων οποιουδήποτε γραμμικού και χρονικά μη αμετάβλητου συστήματος.

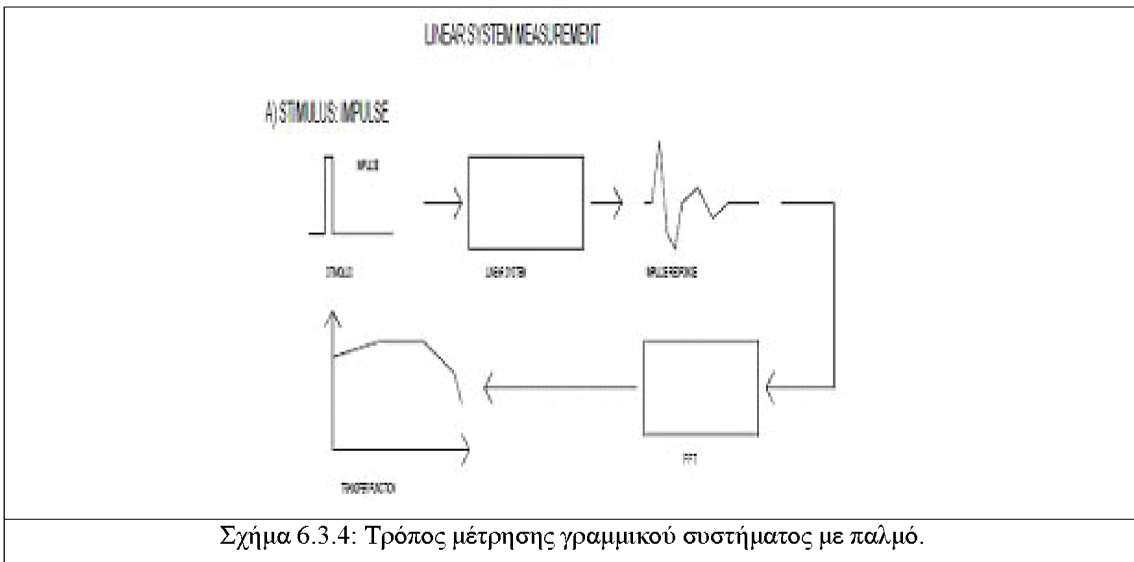
Η βασική διαφορά με το σήμα του λευκού θορύβου, έγκειται στο γεγονός ότι εν αντιθέσει με το λευκό θόρυβο, με τη χρήση ακολουθίας μεγίστου μήκους όλοι οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται στο πεδίο του χρόνου, πράγμα που απλοποιεί κατά πολύ τις πράξεις και περιορίζει τα σφάλματα καθώς δεν παρεμβάλλεται κανένας μετασχηματισμός Fourier. Ακόμα επειδή το σήμα εισόδου είναι πλήρως καθορισμένο, δηλαδή είναι γνωστή κάθε στιγμή η τιμή που εισάγεται στο σύστημα, με τη διαδικασία της ετεροσυσχέτισης αποκλείονται από την μέτρηση όλα τα γεγονότα που δε συνδέονται γραμμικά με την είσοδο του συστήματος (π.χ. εξωτερικοί θόρυβοι). Με αυτή τη διαδικασία είναι δυνατή η επίτευξη πολύ υψηλού λόγου σήματος προς θόρυβο, οπότε είναι δυνατές αξιόπιστες μετρήσεις σε αρκετά θορυβώδη περιβάλλοντα.

Ο βασικότερος περιορισμός αυτής της μεθόδου είναι ότι η ακολουθία μεγίστου μήκους πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση σε μήκος από το μήκος της προς

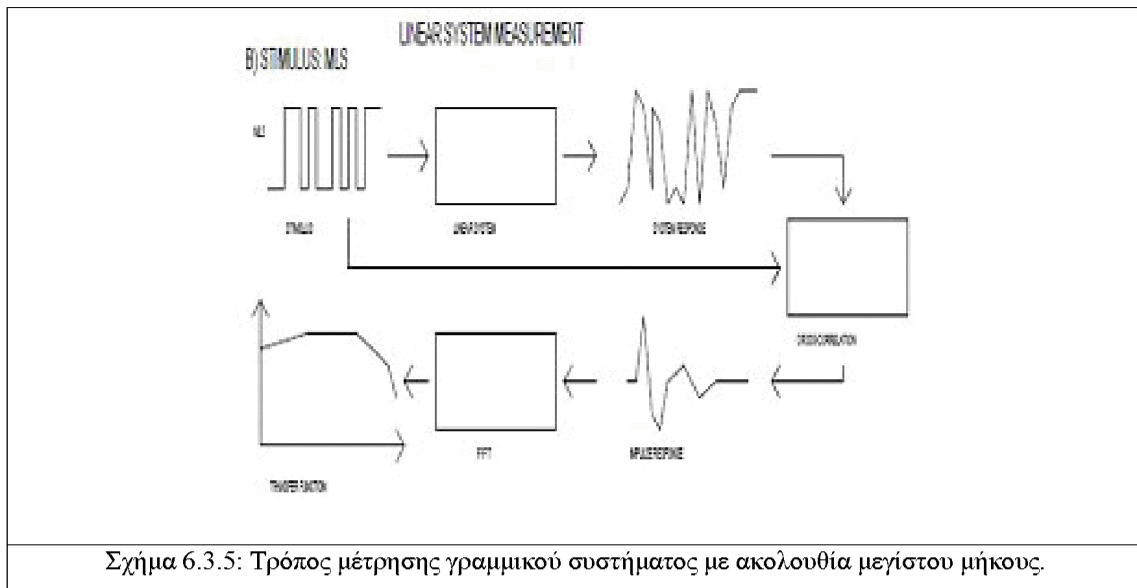
μέτρηση κρουστικής απόκρισης, ειδικά μέρη της υπολογίσιμης κρουστικής απόκρισης θα υπερκαλύψουν κάποια άλλα (φαινόμενο time-aliasing) .Ακόμα ένας περιορισμός είναι ότι η ακολουθία μεγίστου μήκους μπορεί να λειτουργήσει μόνο σε γραμμικά μη αμετάβλητα συστήματα, τουλάχιστον για τη χρονική περίοδο της μέτρησης. Όπως ισχύει και για τον λευκό θόρυβο, διπλασιασμός της περιόδου της ακολουθίας μεγίστου μήκους συνεπάγεται διπλασιασμό του λόγου σήματος προς θόρυβο [3],[5],[10],[11],[15].



Σχήμα 6.3.3: Παράδειγμα ακολουθίας μεγίστου μήκους



Σχήμα 6.3.4: Τρόπος μέτρησης γραμμικού συστήματος με παλμό.



Σχήμα 6.3.5: Τρόπος μέτρησης γραμμικού συστήματος με ακολουθία μεγίστου μήκους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Μελέτη ακουστικής συμπεριφοράς κλειστών χώρων

Υπάρχουν τρεις τρόποι μελέτης της ακουστικής συμπεριφοράς των κλειστών χώρων που διαφοροποιούνται ανάλογα με την ακουστική του ταυτότητα:

- Η κυματική ακουστική. Με την μέθοδο αυτή μελετώνται οι μικροί ακουστικά χώροι όπου τα κυματικά φαινόμενα και κυρίως αυτά της συμβολής, είναι πολύ έντονα (στάσιμα κύματα).

- Η στατιστική ακουστική. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σε μεγάλους και πολύ μεγάλους ακουστικά χώρους. Η προσέγγιση του προβλήματος γίνεται με τη βοήθεια της στατιστικής ανάλυσης κι αυτό γιατί τα κυματικά φαινόμενα είναι πολύ περίπλοκα σε τόσο μεγάλες διαστάσεις.

- Η γεωμετρική ακουστική. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται σε μεγάλους ακουστικά χώρους. Οι υπολογισμοί γίνονται με τη βοήθεια των τύπων της γεωμετρικής οπτικής απεικονίζοντας τη διάδοση του ηχητικού κύματος με τη χρήση ηχητικών ακτίνων κι είναι η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη.

7.1 Μέθοδοι προσομοίωσης ήχου σε δωμάτια

Η προσομοίωση του ήχου στους χώρους γίνεται μέσα από υπολογιστικά προγράμματα. Οι αλγόριθμοι των διάφορων λογισμικών στηρίζονται στις αρχές της γεωμετρικής ακουστικής. Στη γεωμετρική ακουστική, η περιγραφή του ηχητικού πεδίου περιορίζεται στην ενέργεια, τη μεταβολή του χρόνου και την κατεύθυνση των ακτίνων του ήχου. Αυτή η προσέγγιση είναι αρκετά ικανοποιητική όσο οι διαστάσεις του χώρου είναι μεγαλύτερες συγκριτικά με τα μήκη κύματος του ήχου. Οι υποθέσεις που γίνονται για το συγκεκριμένο μοντέλο, είναι ακριβείς σε μεγάλους χώρους και για συχνότητες μεγαλύτερες της συχνότητας αποκοπής του δωματίου.

Μέθοδος ακτινών (ray tracing)

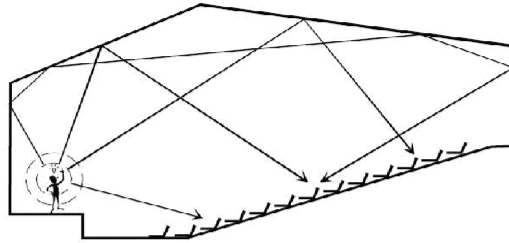
Η τεχνική του ray tracing βασίζεται στην προσομοίωση μιας σημειακής πηγής η οποία εκπέμπει ένα μεγάλο αριθμό ακτινών, οι οποίες κατανέμονται ομοιόμορφα στο χώρο. Κάθε ακτίνα αντιπροσωπεύει μία γωνία ενός υποτιθέμενου σφαιρικού εκπεμπόμενου κύματος προερχόμενου από την πηγή. Οι ακτίνες έπειτα διαχέονται

στο χώρο για ένα σημαντικό διάστημα χρόνου ή μέχρι να συναντήσουν κατά τη διάδοσή τους κάποια επιφάνεια που έχει οριστεί ως πλήρως απορροφητική (π.χ. το σημείο που βρίσκονται οι θέσεις του ακροατηρίου σε ένα θέατρο). Ο χρόνος που θεωρείται αρκετός για να υπάρξουν αποδεκτά αποτελέσματα από την όλη διαδικασία, έχει σχέση με το ποσοστό της ενέργειας που περιέχουν οι ακτίνες μετά από την αλληλεπίδρασή τους με το χώρο της προσομοίωσης. Υπάρχουν εφαρμογές κατά τις οποίες, μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, οι επιφάνειες στις οποίες έχει προσπέσει κάποια ακτίνα θεωρούνται ως νέες πηγές εκπομπής ηχητικής ενέργειας. Κατ' αυτόν τον τρόπο παρέχεται μία καλύτερη προσέγγιση του αντηχητικού πεδίου ενός χώρου.

Ένα σημαντικό πρόβλημα αυτής της μεθόδου είναι η ίδια η ακτίνα κι η φύση της. Η ακτίνα εξ' ορισμού έχει μικροσκοπικές διαστάσεις και συνεπώς πρακτικά είναι πολύ δύσκολο να χτυπήσει ένα δέκτη. Αυτό καθορίζει πως οι ανιχνευτές (μικρόφωνα), οι οποίοι καταγράφουν τις ακτίνες, όταν χτυπηθούν από αυτές, πρέπει να έχουν μεγάλη επιφάνεια. Είναι δυνατό να υλοποιηθούν εφαρμογές με συστήματα ανίχνευσης διαμέτρου ενός μέτρου. Φυσικά, μπορεί να γίνει και χρήση μεγαλύτερου αριθμού ακτινών, ο οποίος ελαχιστοποιεί το μέγεθος του ανιχνευτή-μικροφώνου, όμως αυξάνει κατά πολύ το χρόνο υπολογισμού. Μία άλλη λύση του συγκεκριμένου προβλήματος μπορεί να αποτελέσει η χρήση ακτίνων με τη μορφή κώνων ή πυραμίδων.

Μία παραλλαγή της μεθόδου μπορεί να προκύψει με τη χρήση του ακουστικού σωματιδίου αντί για την ακτίνα. Σε αυτήν την παραλλαγή της μεθόδου γίνεται εντοπισμός αυτού του σωματιδίου κι όχι της ακτίνας. Οι διαφορές του εντοπισμού του “φωνονίου”, όπως είναι γνωστό αυτό το σωματίδιο, συγκριτικά με την ακτίνα σχετίζονται κυρίως με το δέκτη, π.χ. με τον τρόπο τοποθέτησης των δεκτών και με τη μέθοδο υπολογισμού της ηχητικής ενέργειας που φτάνει σε αυτούς. Πρέπει να αναφερθεί ότι επειδή στο ray tracing λαμβάνονται υπ' όψιν μόνο κατοπτρικές ανακλάσεις, δεν μπορεί να συμπεριληφθεί στις μετρήσεις η ιδιότητα της διασποράς (scattering). Για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος, γίνεται χρήση του συντελεστή διασποράς (scattering coefficient), ο οποίος σε συνδυασμό με το συντελεστή ανάκλασης εκφράζει πλήρως μία επιφάνεια. Ο συντελεστής διασποράς είναι πολύ δύσκολο να οριστεί και να μετρηθεί με συμβατικούς τρόπους, για αυτό μπορεί να αναφερθεί ότι για μεγάλους ανακλαστήρες με μαλακές επιφάνειες, ο δείκτης διασποράς είναι περίπου 0.1, ενώ για μια επιφάνεια καλυμμένη με πολλούς

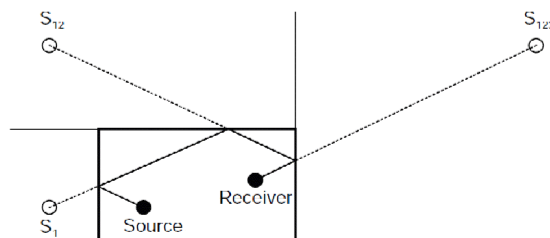
μικρό-ανακλαστές είναι 0.8-0.9. Για όλες τις άλλες επιφάνειες οι τιμές του δείκτη διασποράς βρίσκονται ανάμεσα στις προαναφερθείσες.



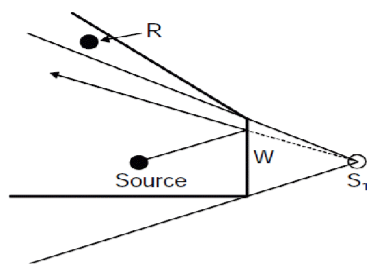
Σχήμα 7.1.1: Βασικές αρχές ray tracing [8].

Μέθοδος εικονικών πηγών (image source model)

Η μοντελοποίηση ενός χώρου με τη μέθοδο των εικονικών πηγών (ή κατοπτρικών πηγών) βασίζεται στη θεώρηση όλων των ανακλάσεων από τις συνοριακές επιφάνειες του χώρου ως συνεισφορά σε ηχητική ενέργεια από είδωλα της πραγματικής πηγής. Οι μεγάλες δυνατότητες αυτής της μεθόδου, όταν εκτελεσθεί με πολύ μεγάλη ακρίβεια, είναι ότι καλύπτει όλες τις πιθανές διαδρομές ανάμεσα στην πηγή και στο δέκτη. Μπορεί ακόμη να δώσει αποδεκτή κρουστική απόκριση για ένα χώρο, στα πλαίσια της γεωμετρικής ακουστικής. Το βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι στα πιο σύνθετα σχήματα χώρων (όχι απλά ορθογώνια παραλληλεπίπεδα ή κύβους) κάποιες εικονικές πηγές δεν είναι ορατές από τον εκάστοτε δέκτη πράγμα που τις καθιστά “άχρηστες” για το σκοπό που εξυπηρετούν. Ο καθορισμός των λειτουργικών εικονικών πηγών είναι χρονοβόρα διαδικασία, αφού σε ένα όχι πολύ μεγάλο σε όγκο και σύνθετο χώρο μπορεί να υπάρχουν μέχρι και μερικές χιλιάδες εικονικές πηγές.



Σχήμα 7.1.2: Παράδειγμα τροχιάς ανάμεσα σε δέκτη και 3ης τάξης εικονικές πηγές [8].



Σχήμα 7.1.3: Παράδειγμα εικονικής πηγής που δεν είναι ορατή από τον δέκτη στη θέση R [8].

Υβριδικά μοντέλα (hybrid models)

Σε διάφορα υπολογιστικά προγράμματα ακουστικής χρησιμοποιούνται μοντέλα που χαρακτηρίζονται ως υβριδικά. Σε αυτά χρησιμοποιούνται στοιχεία και του ray tracing αλλά και του image source. Βασικός παράγοντας για αυτό το συνδυασμό είναι ο περιορισμός της απαιτούμενης υπολογιστικής ισχύος. Μια κοινή πρακτική είναι η εύρεση διαθέσιμων για το χώρο εικονικών πηγών ακολουθώντας τροχιές ακτίνων. Έπειτα, γίνεται έλεγχος για το κατά πόσο αυτές οι ακολουθίες ανακλάσεων (από τις διάφορες εικονικές πηγές), συνεισφέρουν ενεργειακά για μια δεδομένη θέση κάποιου δέκτη. Μπορεί να γίνει χρήση ακτίνων με τη μορφή κώνων ή πυραμίδων. Σε κάθε ανάκλαση το υψηλότερο σημείο της ακτίνας αντιπροσωπεύει μια εικονική πηγή. Αυτή η προσέγγιση βοηθά στη θεώρηση ότι οι δέκτες είναι σημεία, και όχι επιφάνειες με μεγάλη έκταση.

Φυσικά και σε αυτή την τεχνική υπάρχουν περιορισμοί. Οι ακτίνες που χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς είναι σχετικά περιορισμένες σε πλήθος και σε καμία περίπτωση δεν πλησιάζουν το “άπειρο” ή ένα μεγάλο αριθμό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη μειωμένων εικονικών πηγών. Ένα άλλο πρόβλημα, είναι ότι η κάθε ακτίνα κι η ανάκλαση της είναι αποκλειστικά ορισμένη από τον άξονα της ακτίνας, πράγμα το οποίο καθορίζει ότι η ακτίνα δε θα διαχωριστεί όταν χτυπήσει δύο ή περισσότερες επιφάνειες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μερικές εικονικές πηγές να “ακτινοβολούν” και να συνεισφέρουν στην ενέργεια που λαμβάνουν οι δέκτες, χωρίς όμως να είναι ορατές από αυτούς. Αντιθέτως κάποιες πηγές που δεν “ακτινοβολούν” προς τους δέκτες, όπως θα ήταν αναμενόμενο, είναι ορατές.

Ο αναγκαστικός περιορισμός σε αριθμό ακτίνων έχει σαν αποτέλεσμα τον περιορισμό ακριβείας των υπολογισμών που πραγματοποιούνται στους διάφορους

χώρους . Έτσι θεωρείται επιβεβλημένος ο συνδυασμός των παραπάνω μεθόδων για την καλύτερη και ρεαλιστικότερη απόδοση των αποτελεσμάτων[8],[14],[29].

7.2 Catt Acoustic

Χαρακτηριστικά λογισμικού

Για την πραγματοποίηση της παρούσας μελέτης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Catt Acoustic v8 (demo version) της Σουηδικής εταιρίας CATT. Το λογισμικό αυτό παρέχει τη δυνατότητα μοντελοποίησης ενός χώρου σε περιβάλλον H/Y και στηρίζεται στη θεωρία της γεωμετρικής ακουστικής. Εισάγοντας ως δεδομένα τη γεωμετρία του χώρου, τις σχετικές θέσεις πηγής-ακροατή, καθώς και τις ακουστικές ιδιότητες των διάφορων υλικών (συντελεστές απορρόφησης και διασποράς) των επιφανειών που αποτελούν το χώρο, παρέχεται η δυνατότητα επεξεργασίας και διαμόρφωσης των ακουστικών χαρακτηριστικών του χώρου με σκοπό την ακουστική βελτίωσή του [18].

Καθορίζοντας τη γεωμετρία του χώρου δίνεται η δυνατότητα να υπολογιστούν και να εξεταστούν μέσω διαγραμμάτων διάφορες ακουστικές παράμετροι όπως ο χρόνος αντήχησης (RT_{60}), οι πρώιμες ανακλάσεις (EDT), η διακριτότητα (Definition, D_{50}), η διαύγεια (Clarity, C_{80}), η καταληπτότητα του λόγου (STI, RASTI) κ.τ.λ. που προσφέρουν σημαντικά στοιχεία σχετικά με την ακουστική συμπεριφορά και αξιολόγηση του εκάστοτε χώρου. Έχοντας τη δυνατότητα επεξεργασίας των ακουστικών χαρακτηριστικών του υπό μελέτη χώρου, μπορεί να διαπιστωθεί αν και κατά πόσο διαμορφώνονται οι παραπάνω παράμετροι έπειτα από την εκάστοτε παρέμβαση του χρήστη στο χώρο.

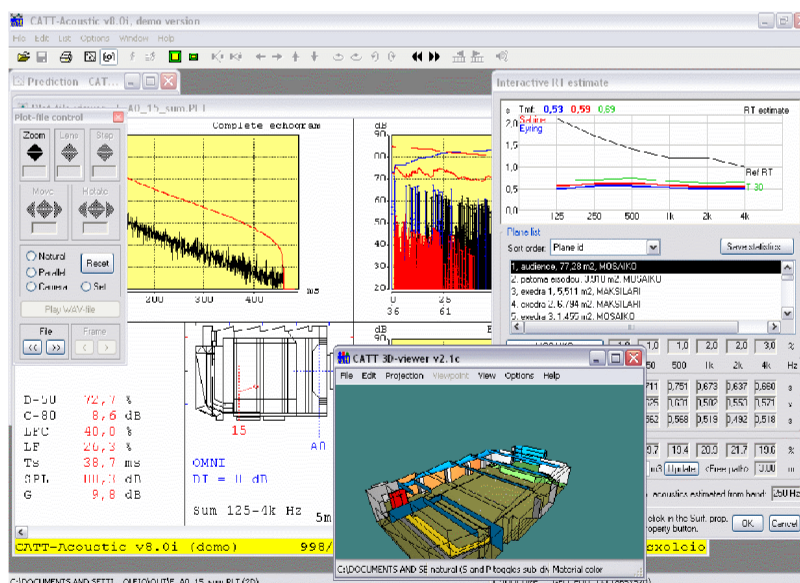
Επιπροσθέτως, οι διαγραμματικές αυτές διαπιστώσεις μπορούν να διασταυρωθούν ταυτόχρονα κι ακουστικά, εφ'όσον παρέχεται η δυνατότητα παραγωγής ηχητικών αρχείων που προσομοιάζουν την ακουστική εντύπωση εικονικών ακροατών.

Ακουστική προσομοίωση

Για τη μοντελοποίηση μιας αίθουσας στο πρόγραμμα προσομοίωσης πρώτο βήμα αποτελεί ο καθορισμός όλων των γωνιών του χώρου που σχεδιάζεται μέσω ενός συστήματος τρισδιάστατων συντεταγμένων. Κάθε γωνία ορίζεται από τρεις

συντεταγμένες στις διαστάσεις του χώρου x, y, z (μήκος, πλάτος, ύψος) με σκοπό τον ορισμό των επιφανειών που αποτελούν το χώρο με τουλάχιστον τρεις γωνίες. Στη συνέχεια για κάθε επιφάνεια ορίζονται οι συντελεστές απορρόφησης και διασποράς, ενώ τέλος ορίζονται οι θέσεις των πηγών και του ακροατηρίου. Επίσης σημαντικός παράγοντας είναι κι ο ορισμός των χαρακτηριστικών της πηγής.

Το συγκεκριμένο λογισμικό δεν μπορεί να υπολογίσει φαινόμενα διάθλασης και περίθλασης των ηχητικών κυμάτων [17], καθώς στηρίζεται στην θεωρία της γεωμετρικής ακουστικής και μπορεί να υπολογίσει μόνο τους νόμους της ανάκλασης, απορρόφησης και διάχυσης από τους τοίχους. Επίσης λόγω έλλειψης εκτενών βάσεων δεδομένων σχετικά με τις τιμές των συντελεστών διάχυσης διάφορων υλικών, δεν είναι δυνατό να δοθούν ακριβείς τιμές του συντελεστή αυτού για την προσομοίωση του από το λογισμικό, επηρεάζοντας έτσι κατά πολύ την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Για το λόγο αυτό πρέπει για όλες τις επιφάνειες να δηλώνεται ένα ποσοστό διάχυσης (έστω και πολύ μικρό) για την απόδοση πιο αξιόπιστων ακουστικών παραμέτρων [17],[18],[21].



Εικόνα 7.2.1: Επιφάνεια εργασίας λογισμικού Catt Acoustic

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Αίθουσες διδασκαλίας

Οι μη αποδεκτές ακουστικές συνθήκες σε θορυβώδεις αίθουσες διδασκαλίας είναι υπαίτιες για τη μείωση της ποιότητας της διδασκαλίας. Για να χαρακτηριστεί μία αίθουσα διδασκαλίας ως ακουστικά αποδεκτή πρέπει να διαθέτει αυξημένη τιμή καταληπτότητας της ομιλίας. Στον ελληνικό χώρο δεν έχουν γίνει συστηματικές μετρήσεις που να επιτρέπουν την εκτίμηση της κατάστασης παρόμοιων αιθουσών όσον αφορά την ακουστική τους επάρκεια. *Από σποραδικές μετρήσεις όμως σε σχολεία όλων των βαθμίδων εκπαίδευσης, δημόσιας κι ιδιωτικής, μπορεί να θεωρηθεί πως τα σχολεία παρουσιάζουν σοβαρό πρόβλημα ηχομόνωσης και χαμηλής καταληπτότητας της ομιλίας [23].*

8.1 Προδιαγραφές για αίθουσες διδασκαλίας

Το 1993 ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (W.H.O.) υιοθέτησε μια σειρά μέτρων για την σχεδίαση αιθουσών διδασκαλίας. Τα μέτρα αυτά είναι:

- *Βραχύς χρόνος αντήχησης ($RT_{60} < 0.6 \text{ sec}$) στην περιοχή συχνοτήτων από 125 έως 4000 Hz.*
- *Ο θόρυβος βάθους να μην ξεπερνάει τα 30 dB(A) L_{eq} ή τα 50 dB(C). Η τιμή αυτή προβλέπεται στο πρότυπο DIN 4109, αλλά είναι δύσκολο να εφαρμοστεί καθώς το μέτρο αυτό επιβάλλει ειδική μελέτη ηχομονώσεως.*
- *Εγκατάσταση ηλεκτρικής υποβοήθησης του ομιλητή με ασύρματο μικρόφωνο ιδιαίτερα στις περιπτώσεις αιθουσών που φιλοξενούν παιδιά με προβλήματα ακοής (στα παιδιά με προβλήματα ακοής κατανέμονται και τα παιδιά που η διδασκαλία δεν είναι στην μητρική τους γλώσσα).*

Στην Ελλάδα δεν υπάρχουν συγκεκριμένες προδιαγραφές για την ακουστική μελέτη σε χώρους διδασκαλίας. Στο άρθρο 12 του κτιριακού κανονισμού (ΑΠΟΦ. 3046/304, ΦΕΚ 59Δ') αναφέρονται τα κριτήρια ηχομόνωσης – ηχοπροστασίας για αίθουσες διδασκαλίας.

ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ	Ηχομόνωση από γειτονικό χώρο κύριας χρήσης. Ηχομόνωση από χώρους κοινής χρήσης		Ηχομόνωση κατοικίας (διαμερίσματος) από άλλο χώρο κύριας χρήσης		Ηχομόνωση ανάμεσα στους χώρους της ίδιας της κατοικίας		Ηχομόνωση κύριου χώρου από χώρους εγκαταστάσεων
	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΑΝΕΣΗΣ	R _w (dB)	L _{nw} (dB)	R _w (dB)	L _{nw} (dB)	R _w (dB)	R _w (dB)
A	57	58	58	52	-	60	45
B	50	65	55	55	-	55	50

Πίνακας 8.1.1: Κτιριακός κανονισμός, άρθρο 12 – Κριτήρια ηχομόνωσης.

Κατά το DIN 4109 σε αίθουσες διδασκαλίας η ηχομόνωση από θορυβώδεις χώρους, κλιμακοστάσια και δάπεδα τουαλέτας θα πρέπει να είναι $R_w = 55$ dB. Η ηχομόνωση μεταξύ των υπολοίπων χώρων πρέπει να είναι $R_w = 47$ dB, ενώ οι πόρτες των αιθουσών πρέπει να είναι $R_w = 32$ dB. Στο “Building Bulletin 93” η ελάχιστη ηχομόνωση ενδείκνυται στα $R_w = 40$ dB για τοίχους και παράθυρα και $R_w = 30$ dB για πόρτες. Στο πρότυπο ANSI S12.60-2002 που αφορά μόνο κριτήρια εκπαιδευτικών χώρων, ο δείκτης ηχομείωσης (STC) από εξωτερικούς χώρους είναι 50 dB για τοίχους και παράθυρα, για εσωτερικούς διαδρόμους και αίθουσες είναι 45-50 dB, για δημόσια λουτρά και τουαλέτες 53 dB ενώ οι πόρτες δεν πρέπει να έχουν τιμές μικρότερες των 30 dB [1],[27],[32].

Από τον κανονισμό παρατηρείται ότι οι προδιαγραφές που θέτονται είναι πάρα πολύ υψηλές ακόμα και για κτίρια δεύτερης κατηγορίας κι έτσι δεν μπορούν να εφαρμοστούν εύκολα. Για το λόγο αυτό δεν είναι υποχρεωτική η κατάθεση ολοκληρωμένης μελέτης ηχομόνωσης.

Για αίθουσες ομιλίας, ο J.S. Brandley προτείνει τις τιμές του παρακάτω πίνακα βασιζόμενος σε μια σχέση μεταξύ μείωσης της στάθμης της ανθρώπινης φωνής λόγω απόστασης, αντήχησης και καταληπτότητας [14],[19],[23],[27].

ΟΓΚΟΣ (m ²)	ΧΡΟΝΟΣ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ (sec)	ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΟΝ ΟΜΙΛΗΤΗ (m)	ΟΜΙΛΙΑ	ΣΤΑΘΜΗ ΗΧΗΤΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΦΩΝΗΣ ΣΕ 1m dB(A)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΣΤΑΘΜΗ ΘΟΡΥΒΟΥ ΒΑΘΟΥΣ dB(A)
300	0,5	8	Κανονική	55	34
1000	0,7	8	Κανονική	55	30
3000	0,9	16	Κανονική	55	26
3000	0,9	16	Υψωμένη	63	34
10000	1,1	16	Υψωμένη	63	30
30000	1,3	16	Υψωμένη	63	27

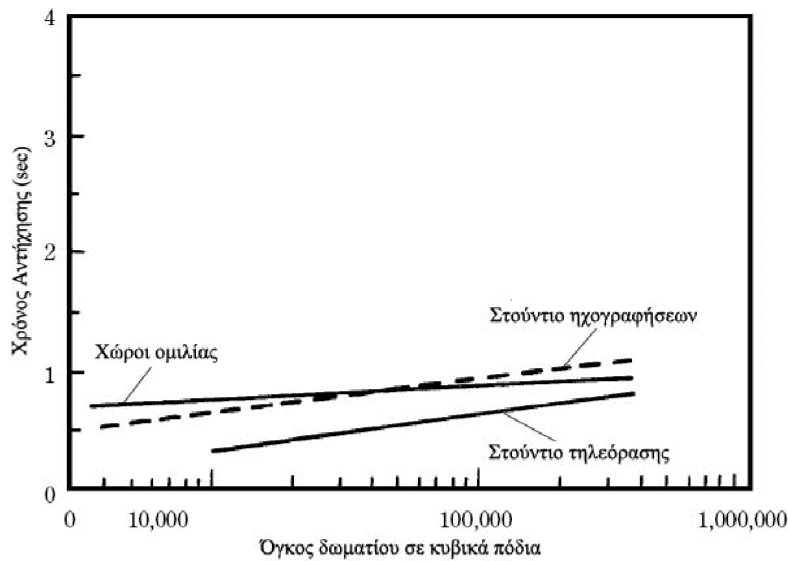
Πίνακας 8.1.2: Πρόταση μέγιστης στάθμης θορύβου σε χώρους ομιλίας [1].

8.2 Ακουστικός χαρακτήρας

Η βασική μορφή επικοινωνίας στα σχολεία είναι η ανθρώπινη ομιλία. Αυτό σημαίνει ότι το μέγεθος της καταληπτότητας έχει εξέχουσα σημασία. Η καταληπτότητα ως μέγεθος εξαρτάται από τις ακουστικές παραμέτρους του χώρου στον οποίο μετράται κι από το θόρυβο που επικρατεί σε αυτόν. Ακόμη εξαρτάται από την ποιότητα άρθρωσης του ομιλητή και την κατάσταση της ακοής του ακροατή. Στις αίθουσες διδασκαλίας τα μεγέθη που χρειάζονται ρύθμιση είναι κυρίως ο χρόνος αντήχησης κι η στάθμη των εξωτερικών θορύβων.

Χρόνος αντήχησης

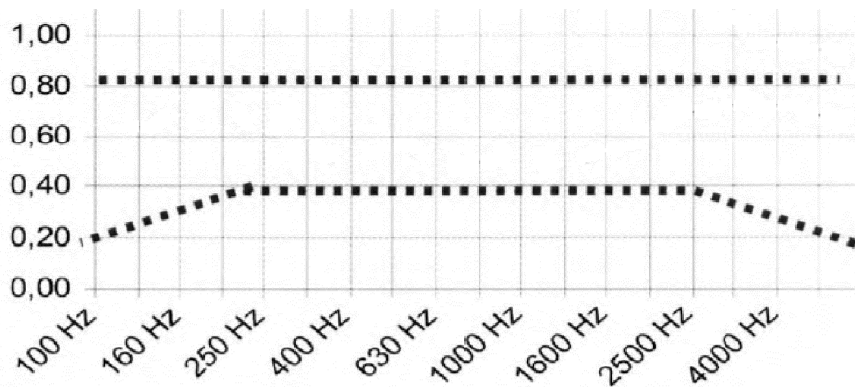
Οι βέλτιστες τιμές του χρόνου αντήχησης για αίθουσες ομιλίας, καθορίζονται ως συνάρτηση του όγκου της αίθουσας όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα. Ο χρόνος αντήχησης γενικά, στις κεντρικές συχνότητες μιας άδειας αίθουσας διδασκαλίας θα πρέπει να κυμαίνεται από 0,6–0,7 sec. Αύξηση του χρόνου αντήχησης πέραν αυτών των ορίων προκαλεί μείωση της καταληπτότητας, ενώ πτώση του κάτω από το όριο δημιουργεί προβλήματα, διότι αλλοιώνεται η χροιά του ήχου, ο δείκτης ισχύος του κι οι πλάγιες ανακλάσεις.



Σχήμα 8.2.1: Διάφορες προτάσεις για το χρόνο αντήχησης σε αίθουσες διδασκαλίας, ανάλογα με τον όγκο της αίθουσας [4].

Οι προτεινόμενες τιμές του χρόνου αντήχησης με βάση τον παραπάνω πίνακα αντιστοιχούν στη λειτουργία του χώρου υπό κανονική πληρότητα. Επομένως, πρέπει ο χρόνος αντήχησης να κυμαίνεται στα προτεινόμενα επίπεδα σε λειτουργία της αίθουσας είτε με μεγάλο βαθμό πληρότητάς είτε με πολύ χαμηλό. Αναλόγως με τη μείωση της πληρότητάς της αίθουσας, ο χρόνος αντήχησης μπορεί να μεταβάλλεται κατά 0,1–0,2 sec. Είναι πλέον κοινά αποδεκτό ότι ο βέλτιστος όγκος της αίθουσας σε σχέση με την πληρότητα της είναι 4-5 m³/άτομο.

Οι μεταβολές του χρόνου αντήχησης σε συνάρτηση με τη συχνότητα, προδιαγράφονται να είναι μικρές στο φάσμα των κεντρικών συχνοτήτων με γενικά αποδεκτή απόκλιση περίπου 25 έως 30% αύξησης του χρόνου αντήχησης στις χαμηλές και μείωση στις ψηλές συχνότητες.



Σχήμα 8.2.2: Όρια διακύμανσης του χρόνου αντήχησης [26].

Ο πρώτος χρόνος αντήχησης δεν πρέπει να διαφέρει πολύ από το χρόνο αντήχησης, αλλά πρέπει να είναι μικρότερος του. Ο λόγος τους (RT_{60}/EDT) θα πρέπει να τείνει στην μονάδα βοηθώντας στην ομοιόμορφη κατανομή της ηχητικής ενέργειας και κατά συνέπεια την καθαρότητα της ομιλίας. Ένα αποδεκτό κριτήριο είναι:

$$0.8 \cdot RT_{60} \leq EDT < RT_{60}$$

Σε χώρους με μεγάλο όγκο όπου η αρχική χρονική καθυστέρηση είναι μεγάλη, ένα σύστημα ενίσχυσης της ομιλίας καταλλήλως μελετημένο, μπορεί να βελτιώσει την καταληπτότητα σε απομακρυσμένες θέσεις ακρόασης [1],[4],[14],[23],[27].

Καταληπτότητα ομιλίας

Κύριος στόχος σε αίθουσες διδασκαλίας είναι η κατά τον δυνατόν μεγαλύτερη εξασφάλιση καταληπτότητας της ομιλίας. Ο στόχος αυτός μπορεί να επιτευχθεί με τον κατάλληλο καθορισμό των παρακάτω παραμέτρων:

- Καθορισμός του χρόνου αντήχησης όπως αναφέρθηκε παραπάνω.
- Ο δείκτης διακριτότητας να κυμαίνεται σε τιμές:

$$50 \leq D_{50} \leq 70$$

- Ο δείκτης διαύγειας να έχει τιμές:

$$4\text{dB} \leq C_{80} \leq 7\text{dB}$$

$$3\text{dB} \leq C_{50}$$

- Οι τιμές του G_M πρέπει να είναι θετικές και μεγαλύτερες των 3dB.

- Ο δείκτης STI και Alcons καθορίζει το χαρακτηρισμό της καταληπτότητας με βάση τον παρακάτω πίνακα:

Χαρακτηρισμός Καταληπτότητας	Τιμές STI	Τιμές Alcons
εξαιρετική	$1 > STI > 0.75$	$0 < Alcons < 1.5$
πολύ καλή	$0.75 \geq STI > 0.6$	$1.5 < Alcons < 7$
μέτρια	$0.6 \geq STI > 0.45$	$7 < Alcons < 15$
φτωχή	$0.45 \geq STI > 0.32$	$15 < Alcons < 35$
κακή	$0.32 \geq STI > 0$	$35 < Alcons < 60$

Πίνακας 8.2.1: Χαρακτηρισμός καταληπτότητας [1].

- Βασική παράμετρος στην εκτίμηση της καταληπτότητας είναι οι πρώιμες ανακλάσεις, οι οποίες εξαρτώνται από τις σχετικές θέσεις πηγής ακροατή αλλά και από την κατευθυντικότητα της πηγής.

Με τα παραπάνω κριτήρια επιτυγχάνεται μέγιστη καταληπτότητα. Μεγαλύτερη καθαρότητα μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του πλούτου των τόνων [1],[4],[14],[23],[27].

Θόρυβος βάθους

Σε μια αίθουσα διδασκαλίας με χαμηλή στάθμη θορύβου βάθους, η μέση στάθμη της φωνής του εκφωνητή σε απόσταση ενός μέτρου είναι 67dB(A), οπότε η αναμενόμενη στάθμη στο άλλο άκρο της αίθουσας είναι της τάξης των 50 dB(A). Υπό αυτές τις συνθήκες, η στάθμη του θορύβου βάθους στην αίθουσα δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 35 dB(A).

Η οκτάβα των 125 Hz είναι πολύ σημαντική για τα παιδιά με μειωμένη ακοή δεδομένου ότι έχουν ιδιαίτερη ευαισθησία στις χαμηλές συχνότητες. Αυτή η παράμετρος εισάγει τη χρήση της καμπύλης C κατά τη μέτρηση του θορύβου (σε συνδυασμό με την καμπύλη A [1],[4],[14],[23],[27]).

8.3 Ακουστική βελτίωση

Με τις ακόλουθες τροποποιήσεις μπορεί να επιτευχθεί στο μέγιστο η ακουστική βελτίωση αιθουσών διδασκαλίας χωρίς τη χρήση ηλεκτροακουστικής ενίσχυσης.

Κατανομή απορροφητικών υλικών

Η μεταβολή του χρόνου αντήχησης ενός χώρου μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με τη μεταβολή του όγκου είτε με τη μεταβολή της απορρόφησής του. Με τη χρήση απορροφητικών επιφανειών μπορεί να τροποποιηθεί ο χρόνος αντήχησης στα επιθυμητά όρια, αλλά η εκτεταμένη χρήση τους μπορεί να μειώσει τις πληροφορίες του απευθείας ήχου και να επηρεάσει χρήσιμες ανακλάσεις. Σε μία ακουστική μελέτη για βελτίωση αιθουσών διδασκαλίας τα απορροφητικά υλικά πρέπει να τοποθετούνται με πολύ μεγάλη προσοχή ώστε να μην επηρεάζουν τις πρώιμες ανακλάσεις που ενισχύουν τον απευθείας ήχο και να απορροφούν τις καθυστερημένες ανακλάσεις που δημιουργούν το αντηχητικό πεδίο. Για το λόγο αυτό αποφεύγεται η χρήση τους σε επιφάνειες που βρίσκονται σε μικρή απόσταση από τον ακροατή ή τον ομιλητή και ενδείκνυται η χρήση τους σε απομακρυσμένες επιφάνειες.

Σε αίθουσες διδασκαλίας, γενικά δε συνιστάται η τοποθέτηση μοκέτας. Επομένως, οι απορροφητικές επιφάνειες μπορούν να τοποθετηθούν στο ταβάνι ή/και στο πάνω μέρος των τοιχωμάτων. Χρήσιμος ήχος για την ομιλία είναι εκείνος των μεσαίων και υψηλών συχνοτήτων. Επομένως οι απορροφητές των χαμηλών θα πρέπει να τοποθετούνται στις επιφάνειες οι οποίες προορίζονται για χρήσιμες ανακλάσεις. Ως τέτοιου είδους απορροφητής μπορεί να θεωρηθεί μια ξύλινη ντουλάπα με ξύλινα ή γυάλινα θυρόφυλλα, με βάθος περίπου 40 cm. Σε μεγάλο ύψος, εκεί που η ντουλάπα δεν μπορεί να λειτουργεί ουσιαστικά, μπορούν να τοποθετηθούν ξύλινα πάνελ με ίδιο διάκενο και ορυκτοβάμβακα στο εσωτερικό τους.

Η απορρόφηση που προσδίδουν τα επενδυμένα καθίσματα παίζει σημαντικό ρόλο στην ακουστική της αίθουσας καθώς μειώνουν τις μεταβολές που μπορεί να προκύψουν στο χρόνο αντήχησης λόγω μεταβολής της πληρότητας [1],[4],[9],[27].

Χρήσιμες ανακλάσεις

Σημαντικό στοιχείο στη διαμόρφωση καλού ακουστικού χαρακτήρα παίζει η στάθμη ηχητικής ισχύος του απευθείας πεδίου. Η ανθρώπινη φωνή είναι καταληπτή σε απόσταση 10-15 m, ανάλογα με την έντασή της. Η στάθμη ηχητικής ισχύος της φωνής ενός μέσου εκφωνητή είναι 60-65 dB(A), οπότε για να βελτιωθεί η καταληπτότητα, πρέπει η στάθμη να κυμανθεί στα 70-75 dB(A). Σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζονται προβλήματα, διότι αναγκαστικά ο ομιλητής τείνει να μιλάει πιο αργά και με μεγαλύτερες παύσεις. Το όριο αυτό αυξάνει στην περίπτωση αυξημένων πρώιμων ανακλάσεων σε 18-20 m για αίθουσες διδασκαλίας και σε 25 m για θέατρα, δεδομένης της αυξημένης ισχύος της φωνής των ηθοποιών.

Τα κεφάλια των θεατών αποτελούν εμπόδιο και στοιχείο περίθλασης εμποδίζοντας τη μετάδοση του σήματος του εκφωνητή στους απομακρυσμένους θεατές. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με τη χρήση ανακλαστικών επιφανειών στην οροφή και στους πλαϊνούς τοίχους υπό κατάλληλα μελετημένες γωνίες. Μια επιπλέον λύση χωρίς τη χρήση ανακλαστήρων, δεδομένου ότι τα αυτιά βρίσκονται περίπου στο ύψος των ματιών, θα ήταν η αύξηση του ύψους των πίσω ακροατών κατά 10 cm με την κατασκευή κεκλιμένου δαπέδου [1],[4],[9],[27].

Ηχομόνωση

Για να εκπληρωθεί η ακουστική τροποποίηση, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η εξασφάλιση περιβαλλοντικής ηρεμίας. Η μείωση της επίδρασης του θορύβου στις αίθουσες είναι σημαντικός παράγοντας προς αυτήν την κατεύθυνση. Η αύξηση της ελευθερίας στη μάθηση οδηγεί σε αύξηση του θορύβου κι η ακουστική των αιθουσών πρέπει να δρα καταπραυντικά κι όχι ενισχυτικά.

Στο άρθρο του κτιριακού κανονισμού που μελετήθηκε παραπάνω για την ηχομόνωση, παρατηρήθηκε ότι οι προδιαγραφές είναι πολύ υψηλές και δεν μπορούν να επιτευχθούν εύκολα και γι'αυτό συνήθως δε λαμβάνονται υπ' όψιν. Σκοπός της ηχομόνωσης σε μια αίθουσα διδασκαλίας δεν είναι να απομονωθούν γειτονικές πηγές, κάτι που θα είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας ηχομόνωσης “στουντιακού” επιπέδου. Η ηχομόνωση σε τέτοιες αίθουσες πρέπει να είναι επιτεύξιμη και να προσφέρει μια άνετη διδασκαλία. Τα όρια αυτά μπορούν να ορισθούν σε επίπεδα ηχομείωσης των 42dB ώστε να περιορίσουν το θόρυβο βάθους στα επιθυμητά επίπεδα [1],[4],[9],[27].

TL (dB _A)	ΤΙ ΜΠΟΡΕΙ ΝΑ ΑΚΟΥΣΤΕΙ
25	Η κανονική ομιλία μπορεί να γίνει κατανοητή αρκετά εύκολα κι ευδιάκριτα μέσω του τοίχου.
30	Η δυνατή ομιλία μπορεί να γίνει κατανοητή αρκετά εύκολα. Η κανονική ομιλία ακούγεται αλλά είναι λιγότερο κατανοητή.
35	Η δυνατή ομιλία είναι ευδιάκριτη αλλά δεν είναι κατανοητή.
40	Η αρχή της απομόνωσης (onset of "privacy").
42	Η δυνατή ομιλία διακρίνεται σα μουρμουρητό. Το 90% του στατιστικού πληθυσμού δεν ενοχλείται.
45	Η δυνατή ομιλία είναι δυσδιάκριτη.
50	Οι πολύ δυνατοί ήχοι όπως τα μουσικά όργανα ή ένα στερεοφωνικό σύστημα, μπορούν να ακουστούν ασθενώς. Το 99% του πληθυσμού δεν ενοχλείται.
60	Επαγγελματική ηχομόνωση. Οι περισσότεροι ήχοι δεν ακούγονται.

Πίνακας 8.3.1: Sound transmission loss [36].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

Διαδικασία μετρήσεων

Οι μετρήσεις στις αίθουσες του ΤΕΙ Ρεθύμνου πραγματοποιήθηκαν στις 6 και 7 Νοεμβρίου 2009. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος ήταν 18 °C κι η υγρασία ήταν 65%. Οι μετρήσεις στην αίθουσα πολλαπλών χρήσεων του 14^{ου} δημοτικού σχολείου Ρεθύμνου πραγματοποιήθηκαν στις 18 Ιανουαρίου 2010 κι η θερμοκρασία ήταν 17 °C ενώ η υγρασία 70%.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση του ηχομέτρου με καθαρό τόνο 1kHz και στάθμης 94dB και γραμμική μέτρηση του θορύβου βάθους ανά οκτάβα. Το σημείο αυτό στη μελέτη είναι το μόνο που έγινε χρήση ηχομέτρου υψηλής ακρίβειας, λόγω του ότι το MLSSA δεν υπολογίζει θορύβου βάθους. Έπειτα έγινε σύνδεση του δωδεκάεδρου ηχείου με τον ενισχυτή κι από εκεί στην έξοδο της κάρτας του συστήματος MLSSA. Στη συνέχεια συνδέθηκε το μικρόφωνο στον προενισχυτή του και από την έξοδο του προενισχυτή στην είσοδο της κάρτας ήχου του συστήματος MLSSA. Κατόπιν πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση του μετρητικού προγράμματος με βρόγχο επανάληψης του ίδιου του συστήματος συνδέοντας την είσοδο με την έξοδο του. Η πολυκατευθυντική πηγή ύψους 1,5m τοποθετήθηκε σε αντιπροσωπευτική θέση στην εκάστοτε αίθουσα (14^ο δημοτικό σχολείο, ΤΕΙ Ρεθύμνου).

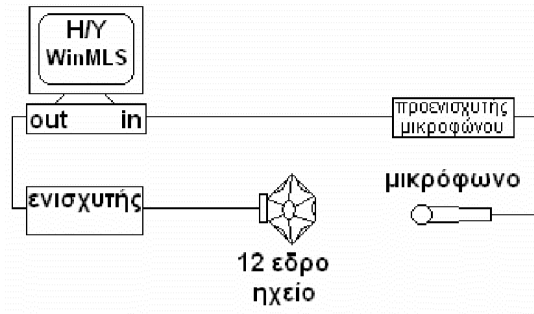
Η τοποθέτηση του μικροφώνου ύψους 1,2m έγινε σε ικανοποιητικό για την κάθε αίθουσα αριθμό θέσεων. Πραγματοποιήθηκε τέλος μέτρηση της κρουστικής απόκρισης του χώρου μέσω του προγράμματος MLSSA και την ακολουθία μέγιστου μήκους που παράγει.

Ο χρησιμοποιηθείς εξοπλισμός περιελάμβανε:

Πυκνωτικό μικρόφωνο:	Earthworks QTC40
Δωδεκάεδρο ηχείο:	01dB Stell D012
Προενίσχυση μικροφώνου:	Earthworks Preamp 1021
Ενισχυτή:	Behringer A500
H/Y που περιέχει λογισμικό:	WinMLSSA Version 10WI και κάρτα ήχου A2D-160
Ηχόμετρο:	Cesva SC310 (type 1)

Βαθμονομητή
Πηγή θορύβου:

Cirrus CR511E
01dB Stell GDB95



Σχήμα 9.1: Συνδεσμολογία μέτρησης

Μετά την πραγματοποίηση των μετρήσεων στους υπό μελέτη χώρους έγινε έρευνα και καταγραφή των υλικών και των ιδιοτήτων τους. Η καταγραφή και χρήση των δεδομένων αυτών στο πρόγραμμα μοντελοποίησης (Catt acoustic) έδωσε αξιόπιστα κι άμεσα συγκρίσιμα αποτελέσματα με αυτά των μετρήσεων. Αφού πραγματοποιήθηκε ταύτιση των ιδιοτήτων των πραγματικών χώρων με τα μοντέλα αυτών, πραγματοποιήθηκε η ακουστική παρέμβαση στο λογισμικό προσομοίωσης.

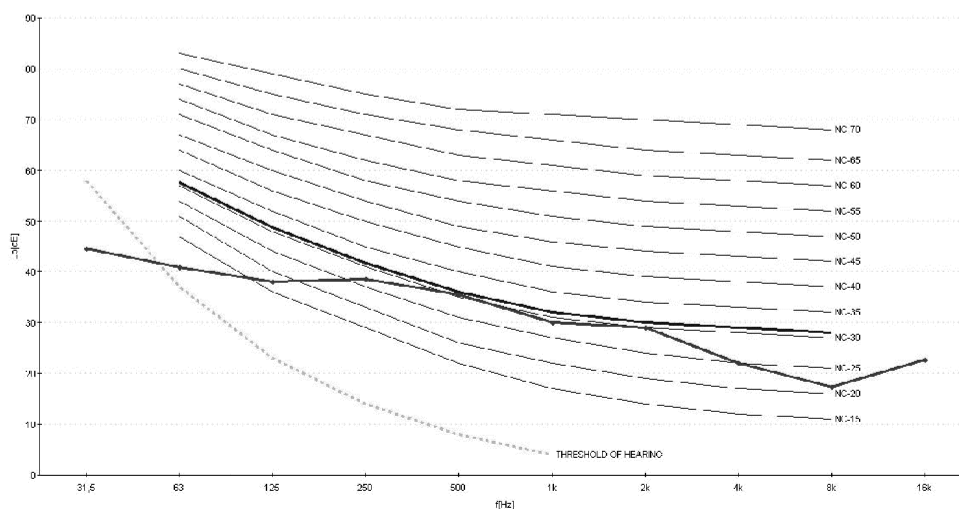
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

Ακουστική μελέτη αιθουσών διδασκαλίας κτιρίου Β και Γ στο Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας κι Ακουστικής στο Ρέθυμνο

Οι αίθουσες Β και Γ του Τ.Ε.Ι βρίσκονται στην περιοχή Περιβόλια, στο ανατολικό άκρο του Ρέθυμνου. Οι εγκαταστάσεις του Τ.Ε.Ι είναι κτισμένες σε απόσταση από τον δρόμο και ο θόρυβος βάθους είναι χαμηλός. Οι αίθουσες αυτές προορίζονται για να φιλοξενούν διαλέξεις και παραδόσεις μαθημάτων προς τους φοιτητές του τμήματος κι ως εκ τούτου μελετήθηκαν ως αίθουσες διδασκαλίας, όπου ο λόγος του ομιλητή έχει σπουδαία σημασία.

10.1 Περιγραφή αίθουσας Β

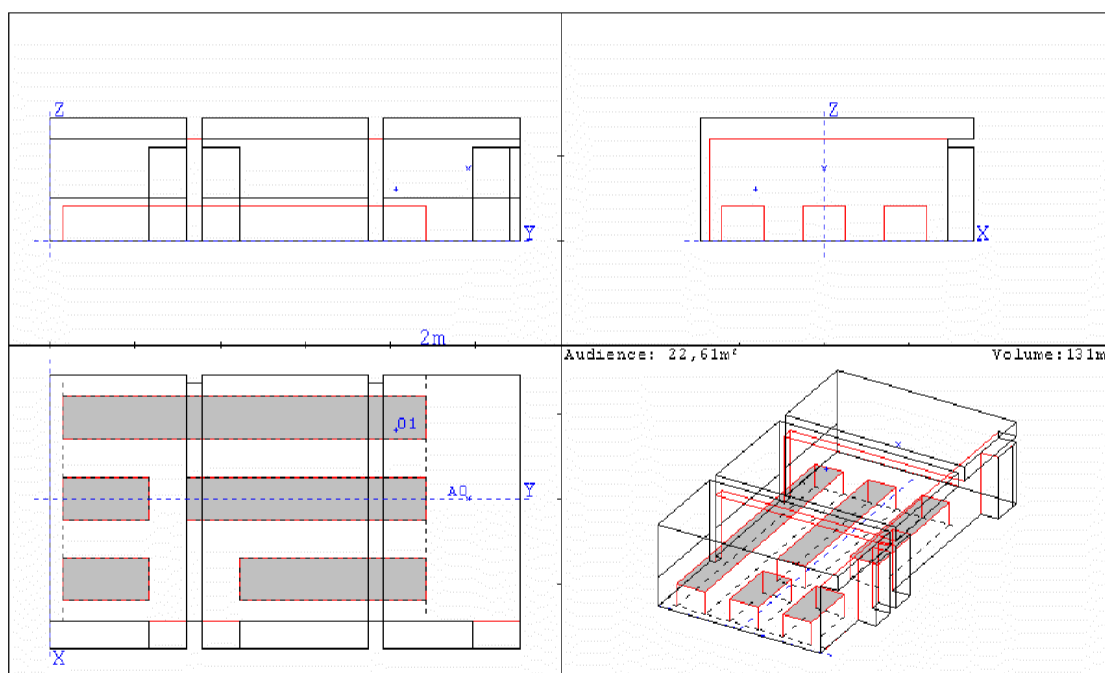
Η συγκεκριμένη αίθουσα βρίσκεται σε ισόγειο χώρο του ΤΕΙ Ρεθύμνου στο κτίριο Β. Το σχήμα της είναι ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο κι οι διαστάσεις της είναι: 11.04 m x 5.8 m x 2.9 m (Μ x Π x Υ) . Η αίθουσα αυτή αν κι απομακρυσμένη από αστικό θόρυβο, βρίσκεται ακριβώς κάτω από το studio ηχογραφήσεων του τμήματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μεταφορά στερεόφερτου θορύβου στην αίθουσα διδασκαλίας, παρεμποδίζοντας έτσι τη διαδικασία μάθησης, όταν στο χώρο του studio πραγματοποιούνται είτε πρόβες είτε ηχογραφήσεις. Ο θόρυβος βάθους έτσι όπως μετρήθηκε με ηχόμετρο απεικονίζεται στο ακόλουθο διάγραμμα:



Σχήμα 10.1.1: Θόρυβος βάθους αίθουσας Β

Ο θόρυβος βάθους στο μέσο όρο των κεντρικών συχνοτήτων αντιστοιχεί στην καμπύλη NC 31. Αυτή η τιμή είναι ικανοποιητική για διεξαγωγή διαλέξεων καθώς ανταποκρίνεται στη βιβλιογραφία.

Τα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένη η αίθουσα, είναι λείος σοβάς, ο οποίος έχει τοποθετηθεί σε τούβλα και καλύπτει τους τοίχους και το ταβάνι της αίθουσας. Μωσαϊκό το οποίο έχει τοποθετηθεί στο πάτωμα, μονό τζάμι το οποίο βρίσκεται στα παράθυρα (απλού τύπου) κατά μήκος του ενός τοίχου, όπως απεικονίζεται στη συνέχεια. Επίσης υπάρχουν τρεις πόρτες (απλού τύπου) από τις οποίες η μία δε χρησιμοποιείται και βρίσκονται στον απέναντι τοίχο από τα παράθυρα. Τέλος, υπάρχουν πλαστικά καθίσματα τα οποία είναι τοποθετημένα κατά μήκος της αίθουσας.

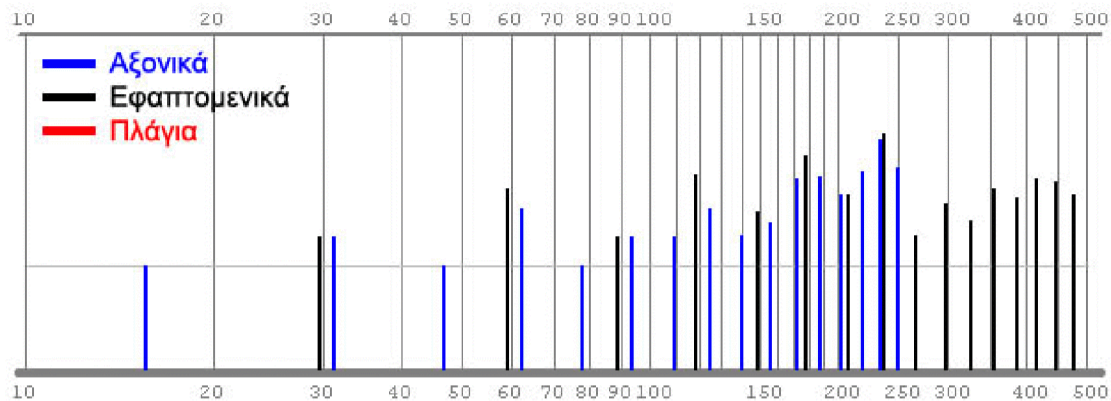


Σχήμα 10.1.2: Σχέδιο αίθουσας Β πριν την ακουστική μελέτη.

Ακουστικά προβλήματα αίθουσας

Σύμφωνα με τις πειραματικές μετρήσεις αλλά και με την προσομοίωση της αίθουσας στον πρόγραμμα “Catt acoustic”, η αρχική μορφή της αίθουσας κρίνεται ακατάλληλη για αίθουσα διδασκαλίας καθώς στοιχειώδεις παράμετροι που σχετίζονται με την καλή ακουστική του χώρου είναι χαμηλής τιμής και δε

συμφωνούν με τις προτεινόμενες τιμές από την βιβλιογραφία. Η συχνότητα αποκοπής f_c της αίθουσας υπολογίζεται στα 166Hz. Αυτό υποδηλώνει πως υπάρχει έντονη επίδραση στάσιμων κυμάτων σε χρήσιμες συχνότητες του φάσματος της ομιλίας. Έτσι προτείνονται κάποιες παρεμβάσεις για την ακουστική βελτίωση της αίθουσας.



Σχήμα 10.1.3: Στάσιμα κύματα ανά συχνότητα για την αίθουσα Β.

10.2 Περιγραφή της ακουστικής μελέτης

Οροφή

Αρχικά τοποθετήθηκε διάτρητη γυψοσανίδα της εταιρίας Knauf καλύπτοντας όλη την οροφή. Το ποσοστό διάτρησης της είναι 12.1% και διαθέτει μονωτικό υλικό ορυκτών ινών. Τοποθετήθηκε σε απόσταση 50 cm από την οροφή καλύπτοντας έτσι τα δύο δοκάρια που προεξέχουν αλλά και τις εσοχές που δημιουργεί η ένωση του ενός τοίχου με το ταβάνι κατεβάζοντας το ύψος της αίθουσας στα 2.4 m. Κατά την τοποθέτηση της γυψοσανίδας σε μεταλλικό σκελετό θα τοποθετηθούν ειδικά στηρίγματα από πολουρεθάνη τα οποία είναι κατασκευασμένα για να προσφέρουν ηχοαπομόνωση από δονήσεις και στερεόφερτο θόρυβο. Τα χαρακτηριστικά των υλικών αυτών (της γυψοσανίδας και των αντικραδασμικών στηριγμάτων) παρατίθενται αναλυτικά στο παράρτημα Γ.

Πίσω τοίχος

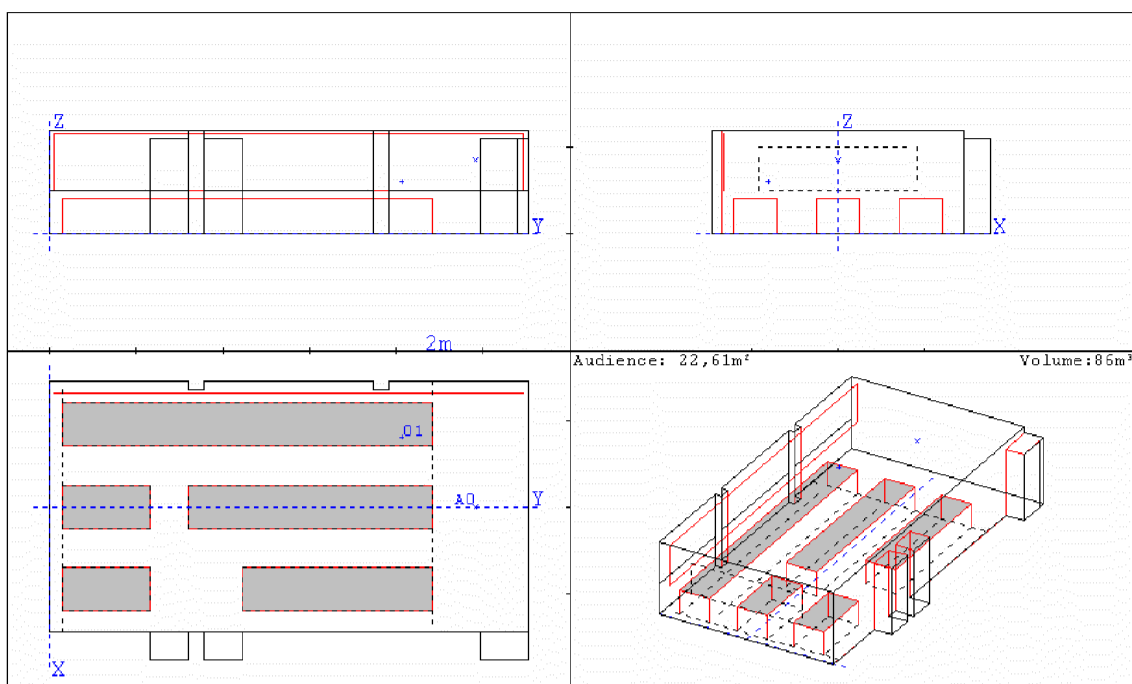
Ο πίσω τοίχος της αίθουσας λόγω και του επιμήκους σχήματος του είναι η κύρια επιφάνεια που προσφέρει πολύ καθυστερημένες ανακλάσεις στους πίσω κυρίως ακροατές. Αυτές οι ανακλάσεις ξεπερνούν κατά πολύ το όριο των 50 msec έως ότου φτάσουν στον ακροατή (δηλαδή ωφέλιμες πρώιμες ανακλάσεις). Αντίθετα ενισχύουν την αντήχηση της αίθουσας. Συγκεκριμένα φτάνουν στον ακροατή μετά από χρονικό διάστημα 120 – 150 msec. Αυτό δημιουργεί σοβαρά προβλήματα στην ακρόαση και γι' αυτό το λόγο στη συγκεκριμένη επιφάνεια τοποθετήθηκαν 4 m² απορροφητικού υλικού. Το απορροφητικό υλικό που επιλέχθηκε προσφέρει υψηλή απορρόφηση στο σύνολο των κεντρικών συχνοτήτων κι έχει δείκτη απορρόφησης NRC 1.05. Επίσης παρουσιάζει ομοιόμορφη απορρόφηση. Η τοποθέτηση του είναι απ' ευθείας στον τοίχο χωρίς διάκενο. Είναι τύπου Max Wall Panel 200 της εταιρίας Auralex. Τα χαρακτηριστικά του απορροφητικού υλικού παρατίθενται αναλυτικά στο παράρτημα Γ.

Κουρτίνα

Ο ένας από τους δύο τοίχους στη διάσταση του μήκους έχει μεγάλο μέρος της επιφάνειας του καλυμμένο με γυαλί καθώς υπάρχουν τα παράθυρα της αίθουσας σε αυτό το σημείο. Καθώς το γυαλί είναι ιδιαίτερα ανακλαστική επιφάνεια συμβάλει στη δημιουργία του φαινομένου flutter echo και γι' αυτό τον λόγο επιλέχθηκε να τοποθετηθεί κουρτίνα που να καλύπτει όλα τα παράθυρα της αίθουσας. Η κουρτίνα τοποθετήθηκε σε απόσταση 10 cm από τα παράθυρα και το πλάτος της είναι 1.5 m. Αναλυτικά τα χαρακτηριστικά της κουρτίνας παρατίθενται στο παράρτημα Γ.

Αύξηση ηχομείωσης

Όπως προαναφέρθηκε η αίθουσα βρίσκεται μακριά από αστικό θόρυβο και δεν απαιτείται αυξημένη μόνωση (με εξαίρεση την οροφή). Προτείνεται η αλλαγή των παραθύρων από μονά σε διπλά με 1cm κενό μεταξύ τους κι η αλλαγή των τριών πορτών που βρίσκονται στην αίθουσα. Η πόρτα που προτείνεται χαρακτηρίζεται από δείκτη ηχομείωσης $R_w = 42$ dB. Αναλυτικά τα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης πόρτας παρατίθενται στο παράρτημα Γ.



Σχήμα 10.2.1: Σχέδιο αίθουσας Β μετά την ακουστική μελέτη.

10.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων αίθουσα Β

Χρόνος αντήχησης T-15 και EDT

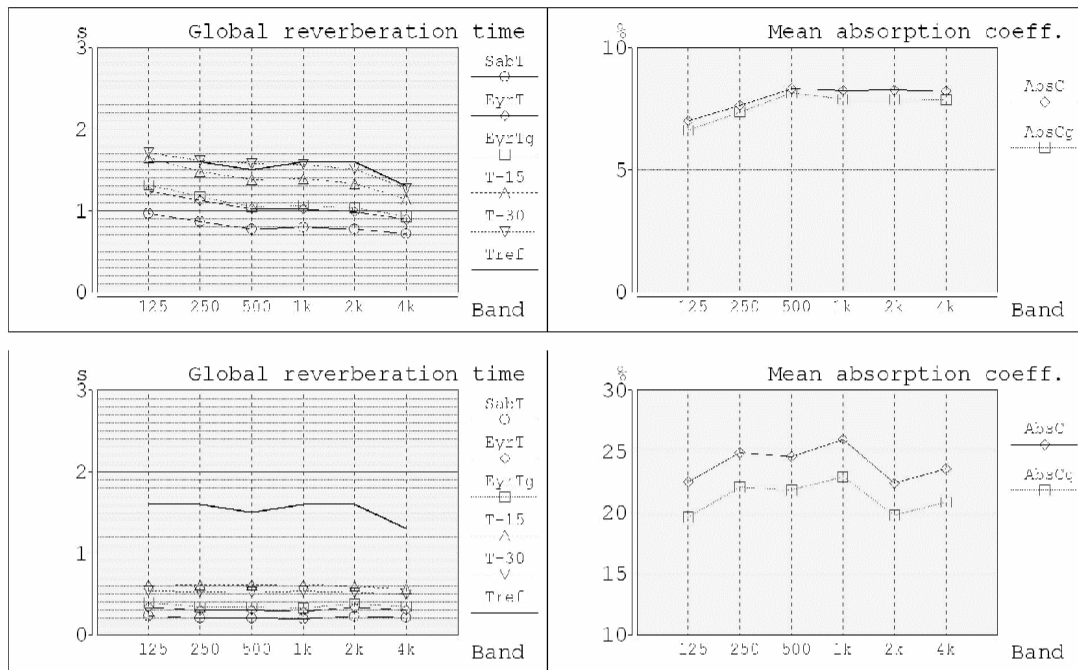
Αρχικά ο χρόνος αντήχησης ο οποίος μετρήθηκε ήταν πολύ υψηλός (της τάξης του 1.15 – 1.67 sec) με αποτέλεσμα να πρέπει να αυξηθεί η απορρόφηση μέσα στον χώρο έτσι ώστε ο χρόνος αντήχησης να μειωθεί για κεντρικές συχνότητες από 125 Hz έως 4 kHz. Αναλυτικά οι χρόνοι αντήχησης (RT-15) φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

f (Hz)	125	250	500	1kHz	2	4
T15 (sec)	1,67	1.52	1.42	1.40	1.34	1.14

Πίνακας 10.3.1: Χρόνοι αντήχησης πριν την ακουστική μελέτη

f (Hz)	125	250	500	1kHz	2	4
T15 (sec)	0.66	0.66	0.67	0.65	0.62	0.58

Πίνακας 10.3.2: Χρόνοι αντήχησης μετά την ακουστική μελέτη



Σχήμα 10.3.1: Χρόνοι αντήχησης και μέση απορρόφηση πριν και μετά την μελέτη (Tref – πειραματικές μετρήσεις)

Το EDT της αίθουσας πριν και μετά τη μελέτη φαίνεται στους παρακάτω πίνακες.

f (Hz)	125	250	500	1kHz	2	4
EDT (sec)	1.23	1.14	1.29	1.47	1.45	1.26

Πίνακας 10.3.3: Τιμές EDT πριν την ακουστική μελέτη

f (Hz)	125	250	500	1kHz	2	4
EDT (sec)	0.58	0.57	0.57	0.56	0.54	0.49

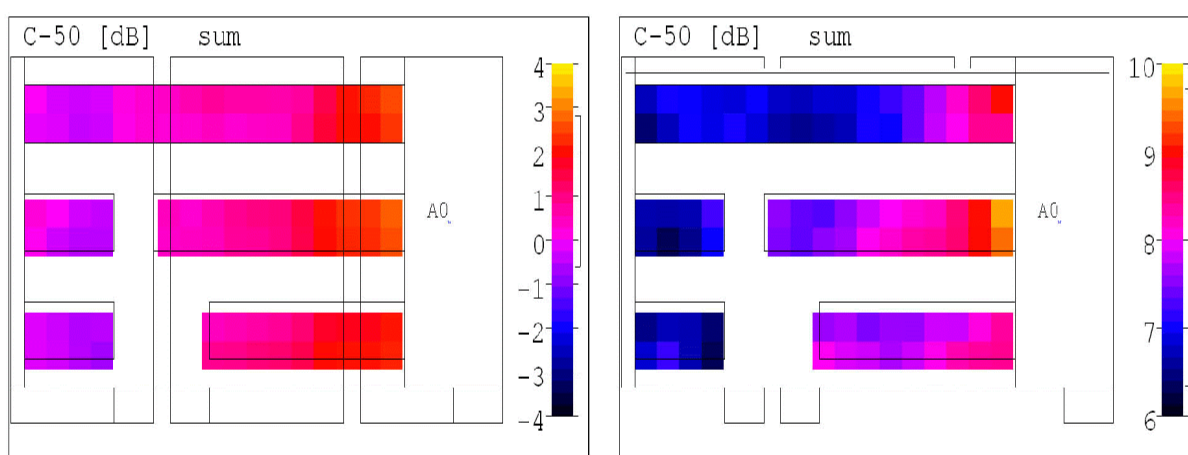
Πίνακας 10.3.4: Τιμές EDT μετά την ακουστική μελέτη

Με τη σύγκριση των τιμών του RT με τις αντίστοιχες του EDT, η σχέση ($0.8*RT < EDT < RT$), η οποία συνδέει τα δύο μεγέθη κι όταν ισχύει συμβάλλει στη καθαρότητα της ομιλίας, ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις.

Καταληπτότητα C-50, D-50, RASTI

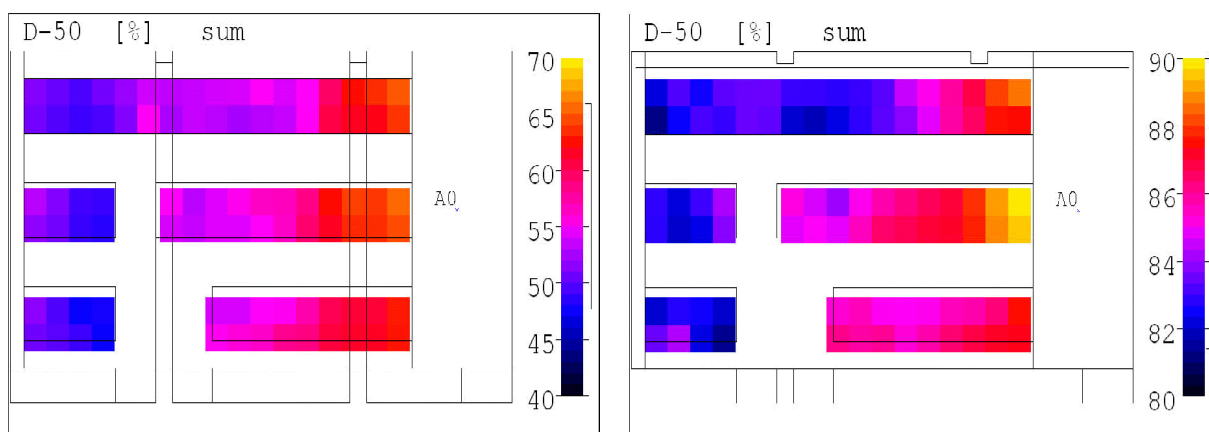
Οι βασικοί δείκτες οι οποίοι σχετίζονται με την καταληπτότητα της ομιλίας είναι η διαύγεια C-50, η ευκρίνεια D-50 και ο δείκτης RASTI. Τα παραπάνω βελτιώνονται σημαντικά μετά την ακουστική μελέτη που προαναφέρθηκε.

Παρατηρείται ότι οι τιμές του C-50 ειδικά στο πίσω μέρος της αίθουσας είναι αρκετά χαμηλές πριν την τροποποίηση. Μετά την ακουστική παρέμβαση, η οποία μείωσε τις μη επιθυμητές ανακλάσεις αλλά και το χρόνο αντήχησης, τα αποτελέσματα είναι επιθυμητά.



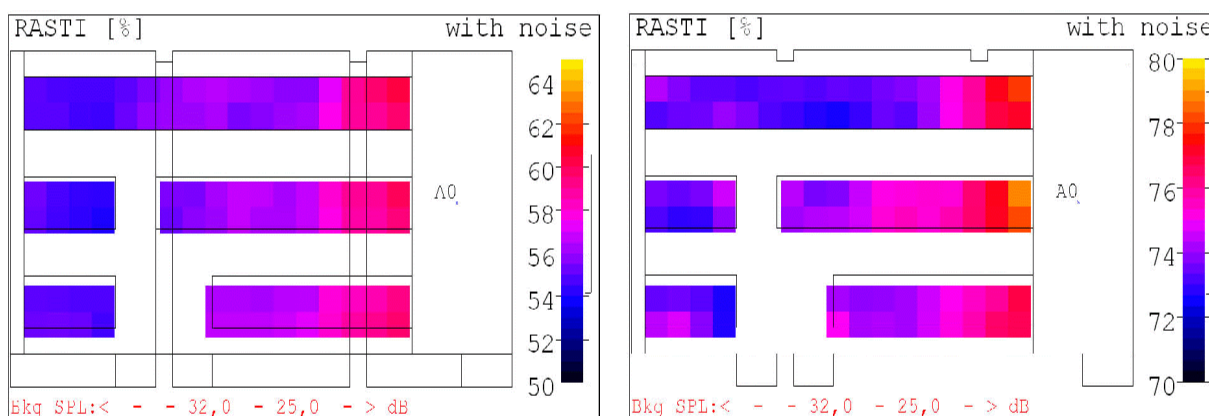
Σχήμα 10.3.2: Διαύγεια πριν και μετά την μελέτη

Οι αρχικές τιμές της ευκρίνειας D-50 είναι χαμηλές. Η επέμβαση στο χώρο βελτίωσε τις τιμές κι αυτού του δείκτη.



Σχήμα 10.3.3: Ευκρίνεια πριν και μετά την ακουστική μελέτη

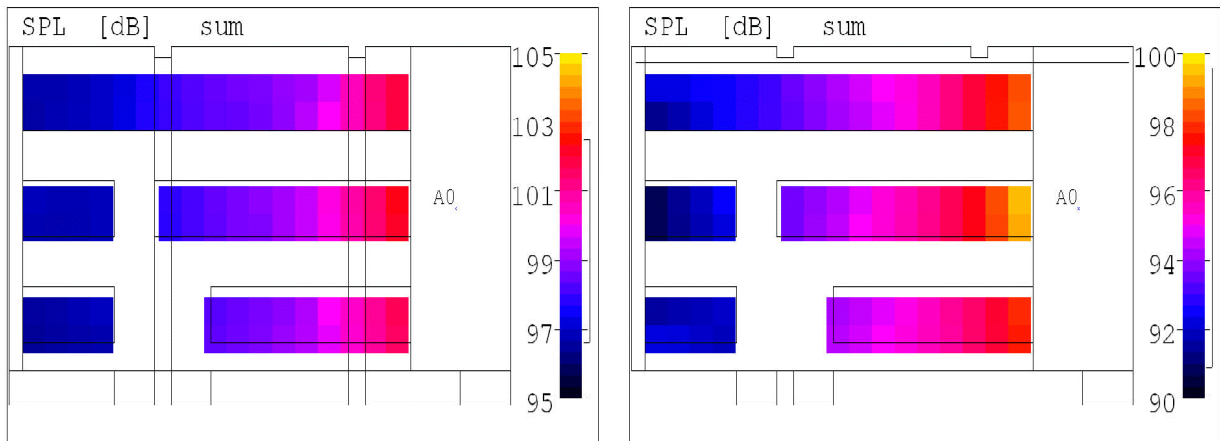
Ο δείκτης RASTI που είναι ο κυριότερος δείκτης κυμαινόνταν σε χαμηλά επίπεδα. Η ακουστική τροποποίηση του χώρου αύξησε τις τιμές του.



Σχήμα 10.3.4: RASTI πριν και μετά την ακουστική μελέτη

Ένταση ηχητικού πεδίου

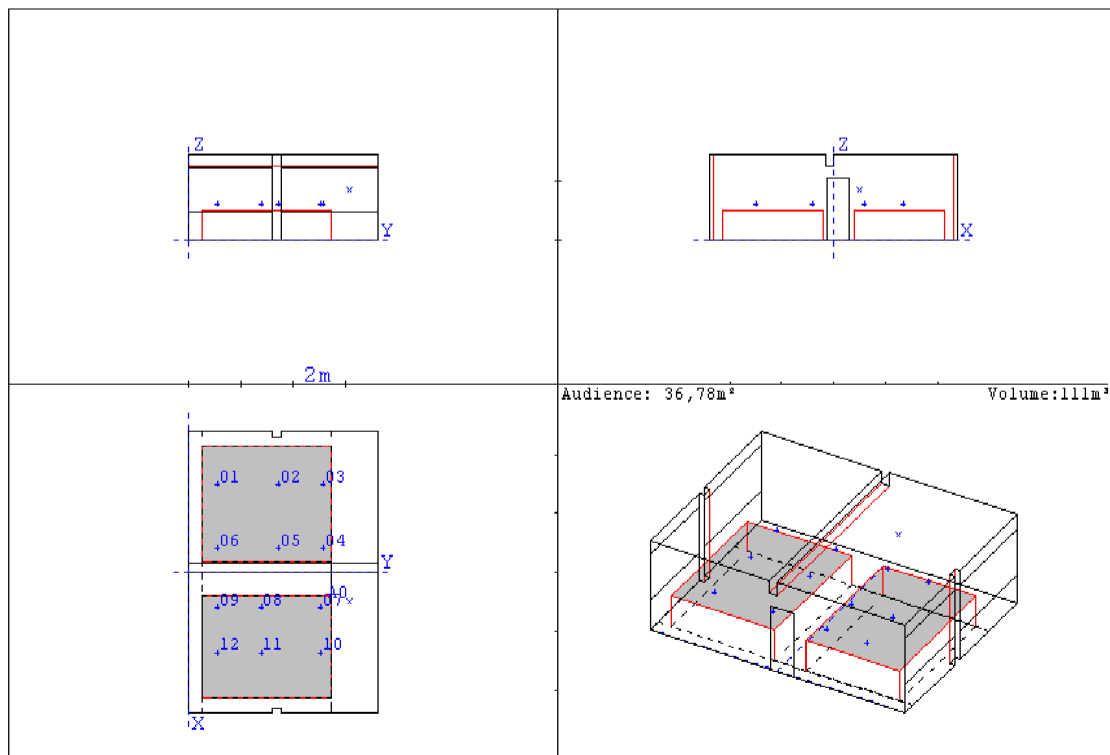
Η κατανομή της ηχητικής ενέργειας που υπήρχε στην αίθουσα πριν την παρέμβαση ήταν ικανοποιητική σε όλο το χώρο. Μετά την παρέμβαση όπως ήταν λογικό λόγω της απορρόφησης παρατηρείται μια πτώση της έντασης χωρίς αυτό να δυσχεραίνει τα επίπεδα ακρόασης. .



Σχήμα 10.3.5: Επίπεδα έντασης στην αίθουσα πριν και μετά την μελέτη

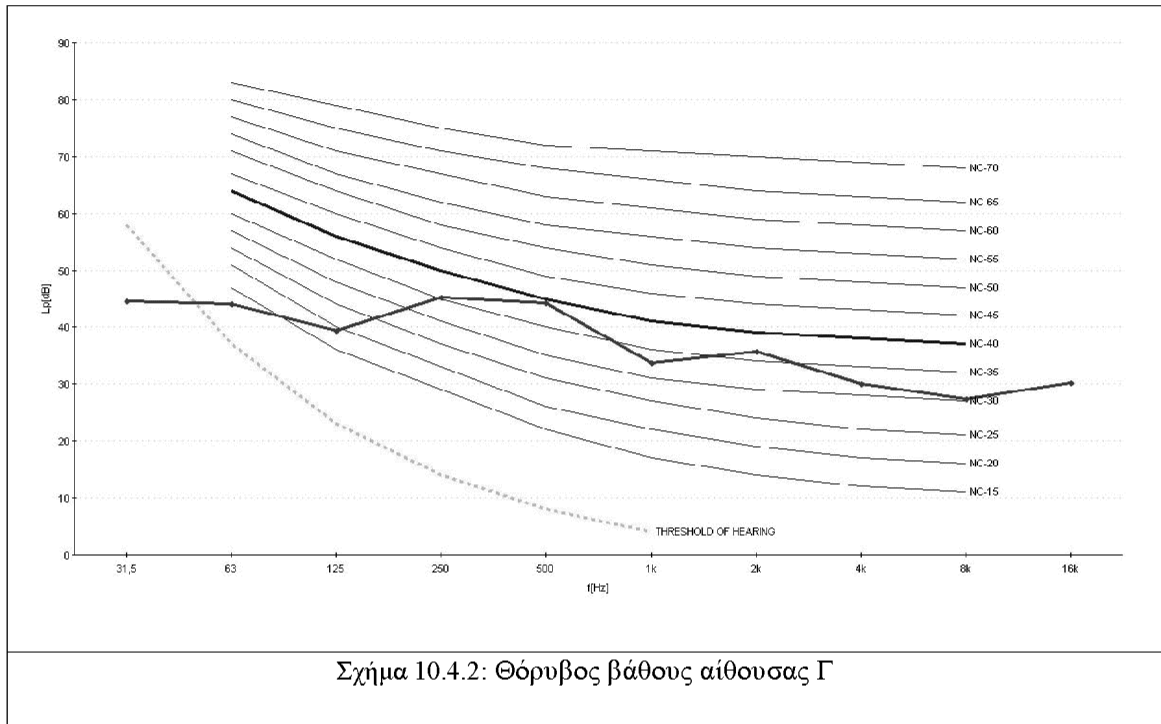
10.4 Περιγραφή αίθουσας Γ

Η αίθουσα Γ έχει ορθογώνιο σχήμα με διαστάσεις: Μήκος 7.3 m x 9.6 m x 2.9 m (Μ x Π x Υ). Τα υλικά που προϋπήρχαν στην αίθουσα αυτή είναι μωσαϊκό για το πάτωμα και σοβάς για την οροφή και τα τοιχώματα. Ένα χαρακτηριστικό αυτού του χώρου είναι τα παράθυρα που είναι τοποθετημένα κατά μήκος δύο παράλληλων τοίχων.



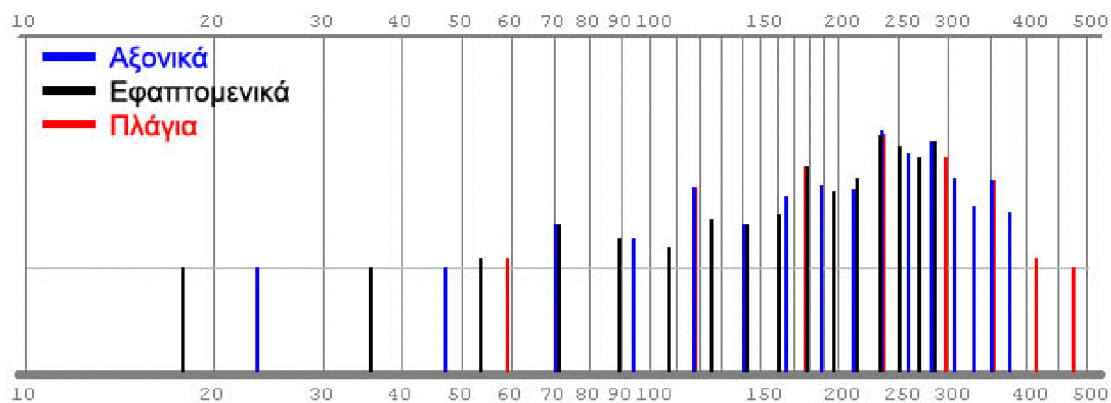
Σχήμα 10.4.1: Σχέδιο αίθουσας Γ πριν την ακουστική μελέτη

Η παρούσα αίθουσα, ανήκοντας στο κτιριακό συγκρότημα του ΤΕΙ Κρήτης βρίσκεται μακριά από τον δρόμο, πράγμα που καθιστά το θόρυβο βάθους χαμηλό. Ο θόρυβος βάθους της αίθουσας έτσι όπως μετρήθηκε με ηχόμετρο απεικονίζεται με τη μορφή διαγράμματος αμέσως μετά. Η καμπύλη στην οποία ανήκει, αντιστοιχεί στην NC- 40.



Ακουστικά προβλήματα αίθουσας

Τα σημαντικότερα προβλήματα που υπήρχαν σε αυτήν την αίθουσα ήταν ο υψηλός χρόνος αντήχησης, τα στάσιμα κύματα και το flutter echo που οφείλεται στις παράλληλες γυάλινες επιφάνειες. Τα παραπάνω προβλήματα έχουν αντίκτυπο στην καταληπτότητα της ομιλίας που είναι και το ζητούμενο γι' αυτόν το χώρο. Παρά τις μικρές διαστάσεις του χώρου η ακρόαση καθίσταται δύσκολη κι ο ομιλητής δε γίνεται άνετα αντιληπτός.



Σχήμα 10.4.3: Στάσιμα κύματα ανά συχνότητα για την αίθουσα Γ []

10.5 Περιγραφή ακουστικής μελέτης

Οροφή

Στην οροφή έγινε χρήση ακουστικής γυψοσανίδας η οποία τοποθετήθηκε στο ύψος του μεσαίου δοκαριού της αίθουσας μειώνοντας αισθητά το χρόνο αντήχησης αλλά και κατεβάζοντας το συνολικό ύψος της αίθουσας στα 2.4 m. Σημειώνεται ότι η γυψοσανίδα που χρησιμοποιήθηκε είναι η ίδια με αυτή της αίθουσας Β.

Πίσω τοίχος

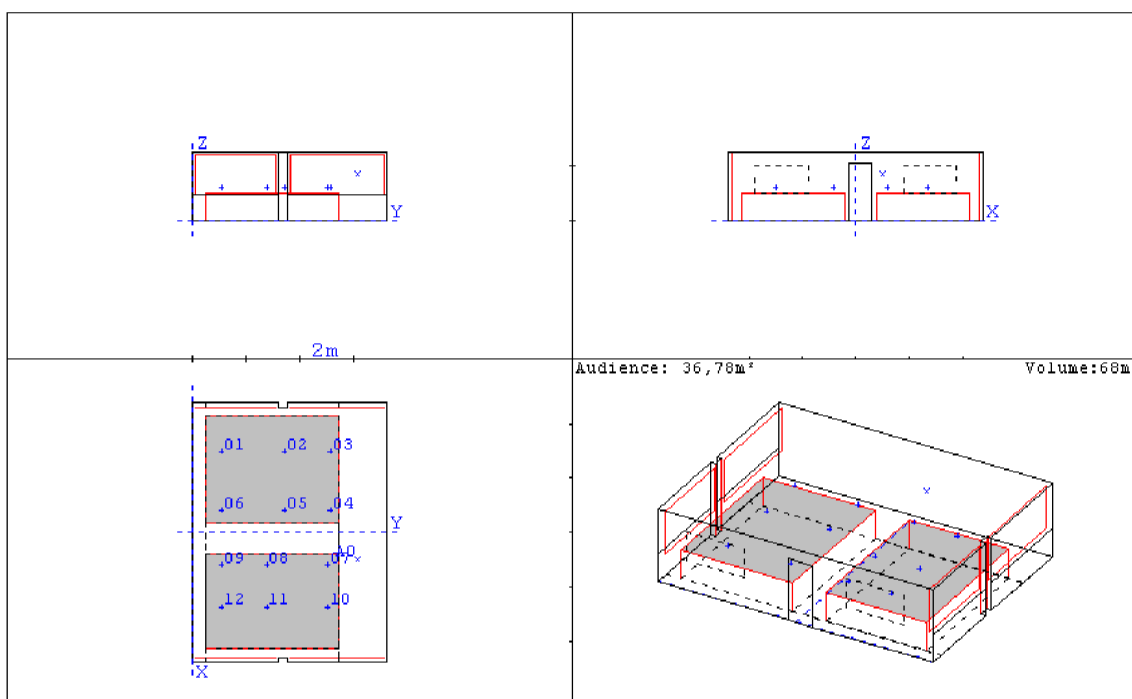
Στο πίσω τοίχωμα της αίθουσας προτείνεται τοποθέτηση ακουστικού πάνελ τύπου Max Wall Panel 200 (ίδιο υλικό με την αίθουσα Β) της εταιρίας Auralex επιφάνειας 4 m² για βελτιστοποίηση των συνθηκών ακρόασης και μείωση των μη επιθυμητών ανακλάσεων από το πίσω μέρος. Αποφεύχθηκε η κάλυψη μεγαλύτερου μέρους του πίσω τοίχου για να διατηρηθεί η συνεισφορά των χρήσιμων ανακλάσεων στους ακροατές των πίσω θέσεων.

Κουρτίνα

Η αντιμετώπιση του προβλήματος του flutter echo, σε αυτήν την αίθουσα έγινε με τη χρήση μαλακής (βελούδινης) κουρτίνας για την κάλυψη των παραθύρων σε αντίθεση με τις προϋπάρχουσες περσίδες που παρουσιάζουν ασήμαντη ακουστική συνεισφορά. Επιπροσθέτως, η χρήση της κουρτίνας βοήθησε στη μείωση του χρόνου αντήχησης στα επιθυμητά επίπεδα.

Αύξηση ηχομείωσης

Ο θόρυβος βάθους βρίσκεται λίγο πάνω από τα επιτρεπτά όρια για αίθουσα διδασκαλίας λόγω της επικοινωνίας της με την αυλή παρακείμενου σχολείου, αλλά με την προσθήκη ειδικής ακουστικής πόρτας με δείκτη ηχομείωσης $R_w=42\text{dB}$ και την τοποθέτηση διπλού τζαμιού με διάκενο 1cm ο θόρυβος βάθους μπορεί να μειωθεί σε επιθυμητά επίπεδα.



Σχήμα 10.5.1: Σχέδιο αίθουσας Γ μετά την ακουστική μελέτη

10.6 Ανάλυση αποτελεσμάτων αίθουσας Γ

Χρόνος αντήχησης T-15 και EDT

Ο αρχικός χρόνος αντήχησης της αίθουσας Γ βρισκόταν σε υψηλά επίπεδα και δεν ανταποκρίνονταν στις σχετικές απαιτήσεις για αίθουσες διδασκαλίας. Πριν την ακουστική μελέτη ο χρόνος αντήχησης σε οκταβική ανάλυση κυμαίνεται από 1.85 έως 1.62 sec, ενώ μετά την ακουστική μελέτη σε οκταβική ανάλυση ο χρόνος αντήχησης βελτιώνεται αισθητά και κυμαίνεται από 0.64 έως 0.58 sec. Επίσης αξίζει να σημειωθεί η ομαλή κατανομή του χρόνου αντήχησης ανά συχνότητα.

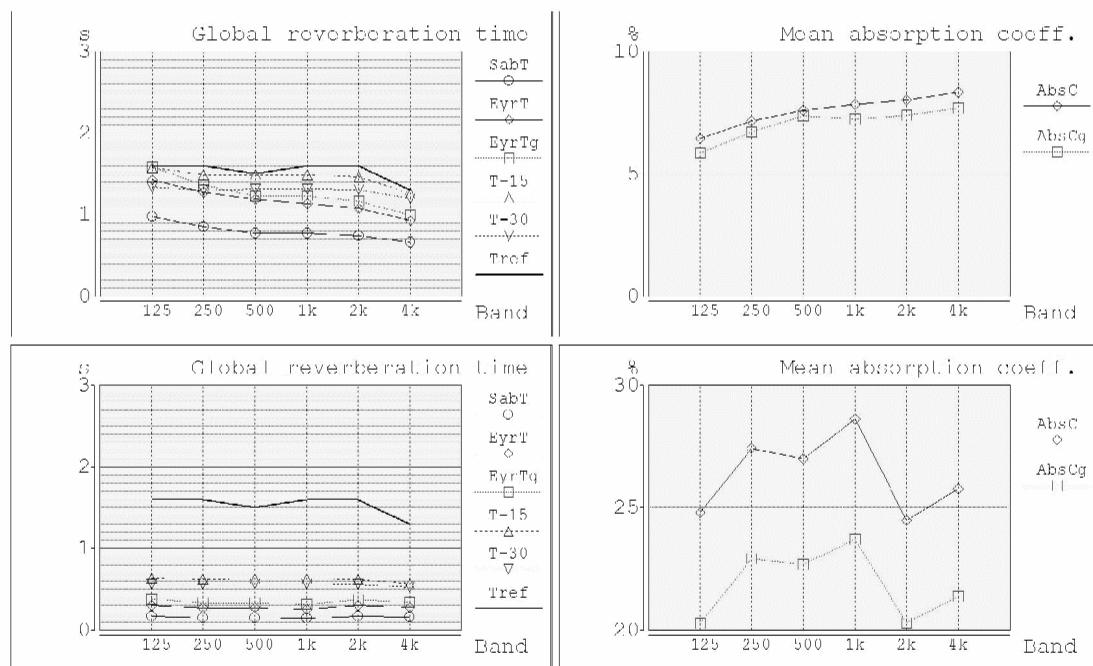
Αναλυτικά οι χρόνοι αντήχησης (T-15) απεικονίζονται στους πίνακες που ακολουθούν:

f (Hz)	125	250	500	1kHz	2	4
T-15 (sec)	1.85	1.68	1.69	1.70	1.63	1.62

Πίνακας 10.6.1: Χρόνοι αντήχησης πριν την ακουστική μελέτη

f (Hz)	125	250	500	1kHz	2	4
T-15 (sec)	0.64	0.63	0.63	0.62	0.62	0.58

Πίνακας 10.6.2: Χρόνοι αντήχησης μετά την ακουστική μελέτη



Σχήμα 10.6.1: Χρόνοι αντήχησης και μέση απορρόφηση πριν και μετά την μελέτη

Το EDT της αίθουσας πριν και μετά τη μελέτη φαίνεται στους παρακάτω πίνακες:

f (Hz)	125	250	500	1kHz	2	4
EDT (sec)	1,63	1,44	1,40	1,38	1,32	1,09

Πίνακας 10.6.3: Τιμές EDT πριν την ακουστική μελέτη

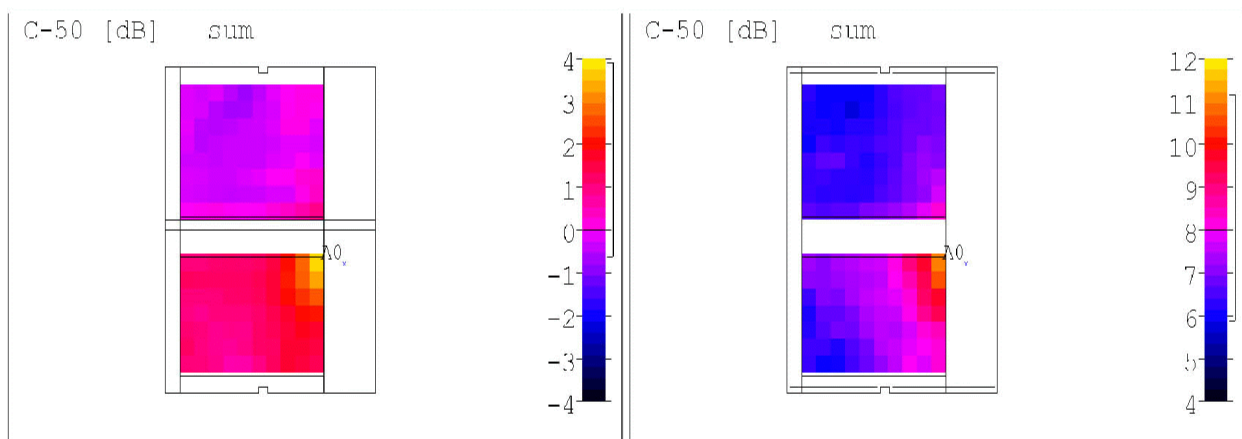
f (Hz)	125	250	500	1kHz	2	4
T-15 (sec)	0,54	0,51	0,53	0,51	0,51	0,47

Πίνακας 10.6.4: Τιμές EDT μετά την ακουστική μελέτη

Όπως μπορεί να γίνει αντιληπτό μέσω μίας σύγκρισης των τιμών του RT με τις τιμές του EDT, η σχέση ($0.8 \cdot RT < EDT < RT$), η οποία συνδέει τα δύο μεγέθη και όταν ισχύει συμβάλλει στη καθαρότητα της ομιλίας, ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις.

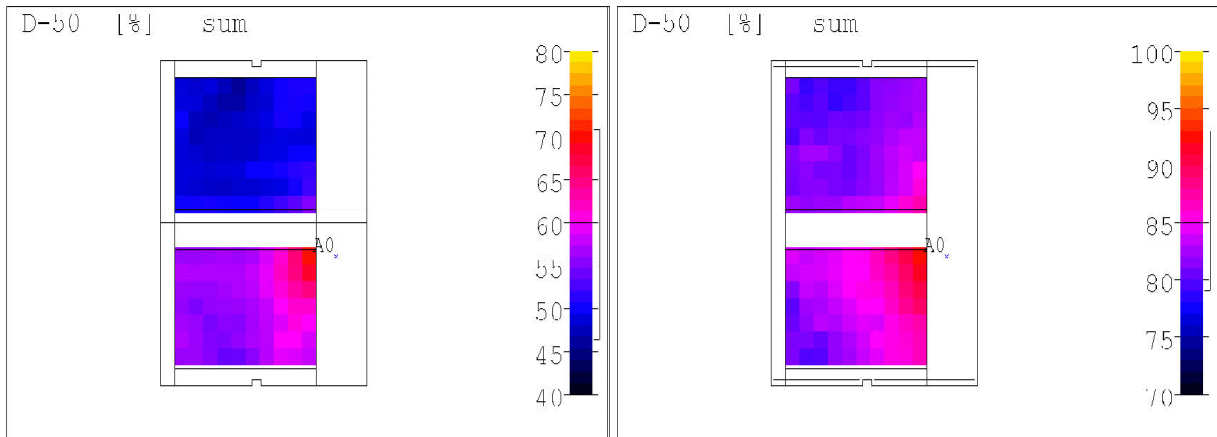
Καταληπτότητα C-50 D-50 RASTI

Ο δείκτης της διαύγειας στην αίθουσα Β βρισκόταν πριν την ακουστική παρέμβαση σε χαμηλά επίπεδα. Μετά την πτώση του χρόνου αντήχησης και τη μείωση του flutter echo τα επίπεδα είναι ικανοποιητικά όπως φαίνονται και στο παρακάτω σχήμα.



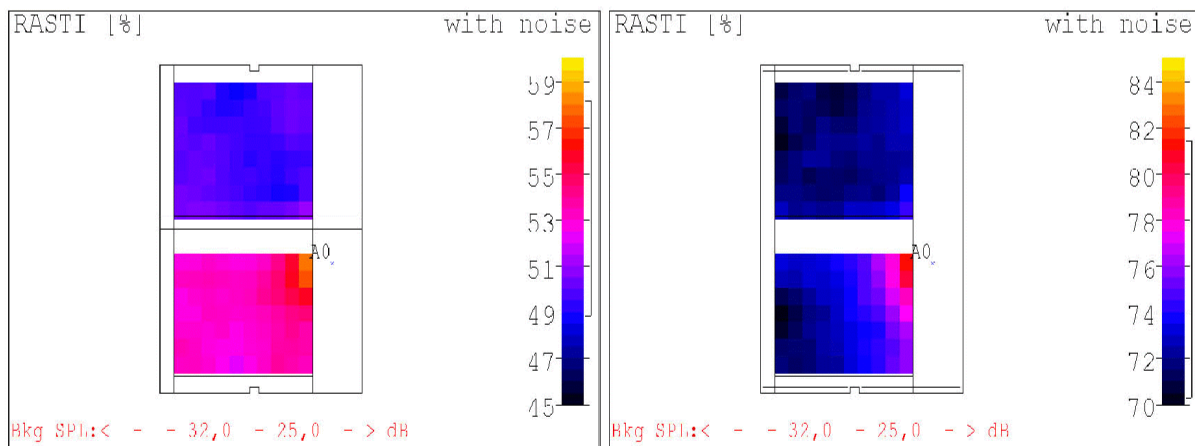
Σχήμα 10.6.2: C-50 πριν και μετά την ακουστική μελέτη

Ο δείκτης D-50 αρχικά, ήταν της τάξεως του 50% που είναι οριακά αποδεκτή τιμή. Μετά τη μελέτη παρουσιάζεται αισθητή βελτίωση η οποία συμβάλλει στην καλύτερη καταληπτότητα της ομιλίας. Επίσης, παρατηρείται μία σταθερότητα της τιμής του δείκτη για διαφορετικές θέσεις της αίθουσας.



Σχήμα 10.6.3: D-50 πριν και μετά την ακουστική μελέτη

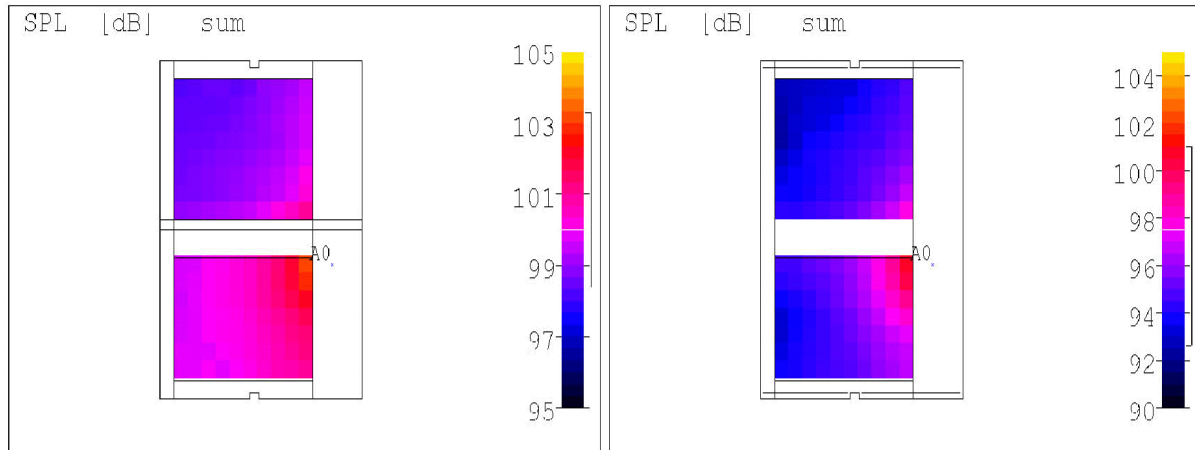
Ο δείκτης RASTI που είναι ο πλέον σημαντικός για την αντίληψη του ομιλητή από το κοινό, πριν τη βελτίωση του χώρου βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα. Μετά τη μελέτη παρατηρείται αύξηση της τιμής του RASTI, σε επίπεδα που ικανοποιούν τα απαιτούμενα όρια.



Σχήμα 10.6.4: RASTI πριν και μετά την μελέτη

Ένταση ηχητικού πεδίου

Η συνολική ηχητική ένταση του ηχητικού πεδίου λόγω των πολλών μη χρήσιμων ανακλάσεων, των οποίων η απόσβεση ήταν αργή λόγω των υλικών του χώρου, μετά την ακουστική παρέμβαση μειώνεται. Τα επίπεδα της τιμής της παραμένουν υψηλά κι αποδεκτά για άνετη ακρόαση και προσήλωση στον ομιλητή.



Σχήμα 10.6.5: Ένταση ηχητικού πεδίου πριν και μετά τη μελέτη

Κόστος εφαρμογής

Το συνολικό κόστος της εφαρμογής της ακουστικής μελέτης και για τις δύο αίθουσες του ΤΕΙ κυμαίνεται περίπου στα 18.500 ευρώ, με μία επιφύλαξη λόγω της αλλαγής των τιμών και περιγράφεται αναλυτικά στους πίνακες που ακολουθούν.

Αίθουσα Β

Γυψοσανίδα Knauf 8/18R για 125 m ² τοποθέτησης στην οροφή	1952 ευρώ
Maxwall panel της εταιρείας Auralex για 4 m ² τοποθέτησης στον πίσω τοίχο	1175 ευρώ
3 πόρτες Rw=42dB της εταιρείας porta doors	3600 ευρώ
Κουρτίνα 66 m ² (ελαφρύ βελούδου 350 g/ m ²)	550 ευρώ
Διπλά τζάμια	2697 ευρώ
52 αντικραδασμικά στηρίγματα sylomer	248 ευρώ
Σύνολικο κόστος	10222 ευρώ

Πίνακας 10.6.5: Τιμές δομικών υλικών αίθουσας Β

Στις άνωθεν τιμές συμπεριλαμβάνεται και το κόστος τοποθέτησης.

Αίθουσα Γ

Γυψοσανίδα Knauf 8/18R για 70 m ² τοποθέτησης στην οροφή	2135 ευρώ
Maxwall panel της εταιρείας Auralex για 4 m ² τοποθέτησης στον πίσω τοίχο	1175 ευρώ
1 πόρτα Rw=42dB της εταιρείας porta doors	1200 ευρώ
Κουρτίνα 90 m ² (ελαφρύ βελούδου 350 g/ m ²)	750 ευρώ
Διπλά τζάμια	3060 ευρώ
Συνολικό κόστος	8320 ευρώ

Πίνακας 10.6.6: Τιμές δομικών υλικών αίθουσας Γ

Στις άνωθεν τιμές συμπεριλαμβάνεται και το κόστος τοποθέτησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11

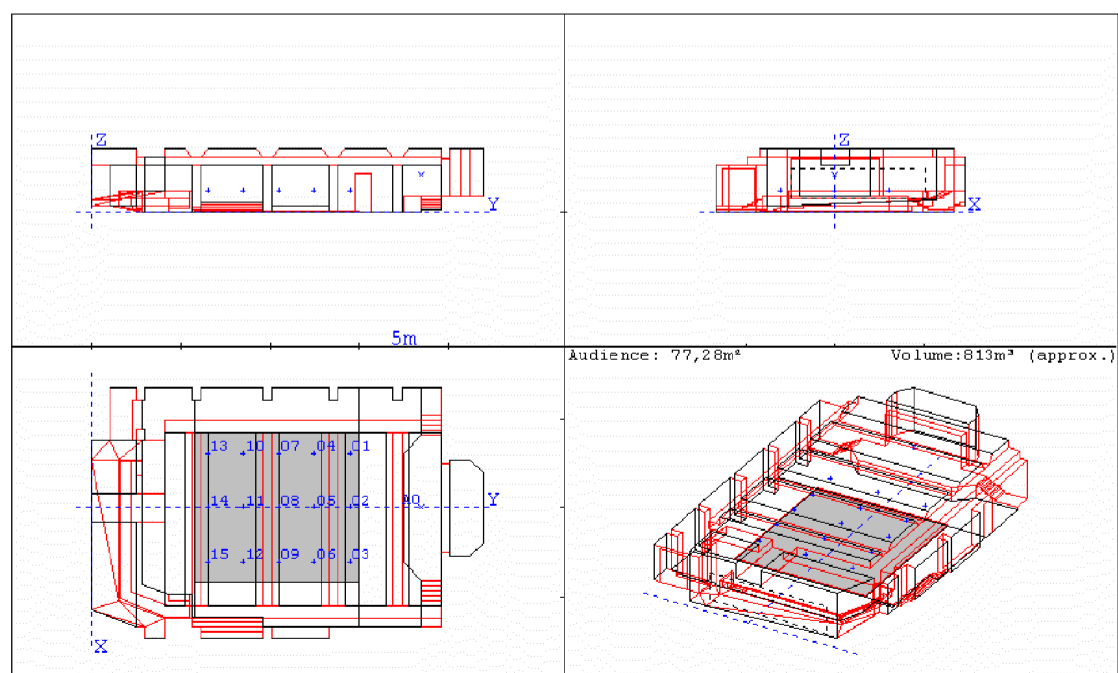
Μελέτη αίθουσας πολλαπλών χρήσεων στο 14^ο δημοτικό σχολείο

Ρέθυμνου

Το 14^ο δημοτικό σχολείο Ρεθύμνου βρίσκεται στην περιοχή Καλλιθέα του Ρέθυμνου στην οδό Βάρναλη 21. Το βασικό χαρακτηριστικό είναι ο χαμηλός περιβαλλοντικός θόρυβος στην προς μελέτη αίθουσα. Η αίθουσα που εξετάζεται στην παρούσα μελέτη βρίσκεται στο εμπρός τμήμα της σχολικής μονάδας και προορίζεται για αίθουσα πολλαπλών χρήσεων.

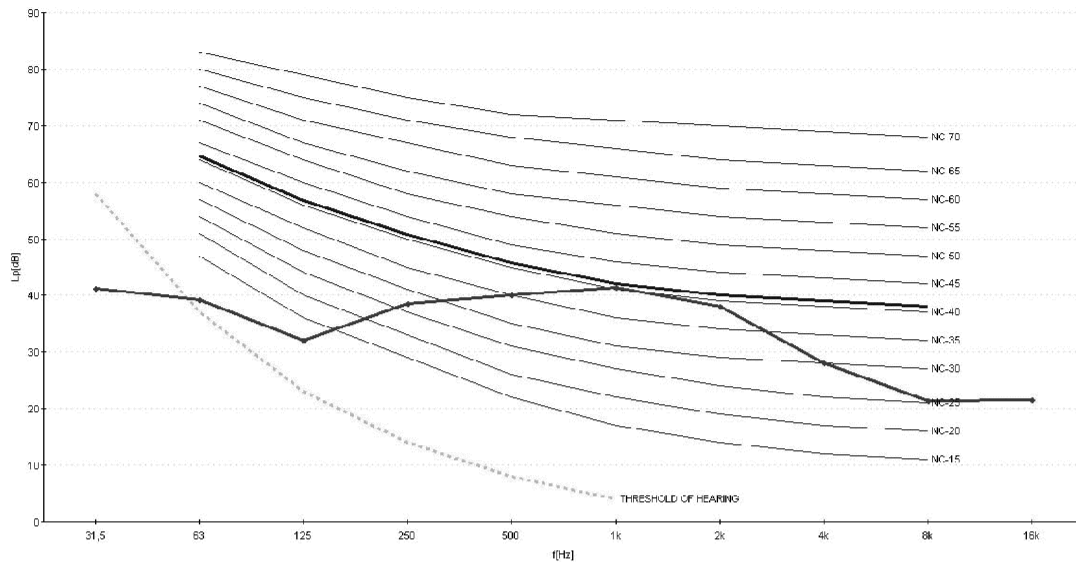
11.1 Περιγραφή αίθουσας

Η αίθουσα βρίσκεται στο ισόγειο του κτιριακού συγκροτήματος του 14^{ου} δημοτικού σχολείου. Έχει ορθογώνιο σχήμα με πολλές ακανόνιστες προεξοχές κι οι μέγιστες διαστάσεις της είναι : 24 m x 14 m x 3,6 m (Μ x Π x Υ). Στο ένα άκρο της αίθουσας βρίσκεται μία ξύλινη σκηνή, ενώ στο πίσω μέρος υπάρχει μία μαρμάρινη κερκίδα δύο επιπέδων. Τα υλικά κατασκευής της αίθουσας είναι: ξύλο για την σκηνή, μωσαϊκό για το πάτωμα, σοβάς για τα τοιχώματα και γυψοσανίδα για την οροφή. Οι είσοδοι της αίθουσας είναι ανοίγματα χωρίς πόρτα σε συνέχεια από διάδρομο του σχολείου. Το σχέδιο της αίθουσας φαίνεται παρακάτω :



Σχήμα 11.1.1: Σχέδιο αίθουσας πολλαπλών χρήσεων 14ου δημοτικού σχολείου.

Ο θόρυβος βάθους της αίθουσας όπως μετρήθηκε με το ηχόμετρο φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:



Σχήμα 11.1.2: Θόρυβος βάθους αίθουσας πολλαπλών χρήσεων 14^{ου} δημοτικού σχολείου

Ακουστικά προβλήματα αίθουσας

Τα προβλήματα που υπήρχαν στην αίθουσα λόγω του μεγάλου όγκου αλλά και του σχήματός της, ήταν ο υψηλός χρόνος αντήχησης και τα χαμηλά επίπεδα καταληπτότητας της ομιλίας. Ειδικότερα σε απομακρυσμένες από την πηγή θέσεις (μακριά από τη σκηνή) η προβληματική καταληπτότητα ήταν εντονότερη. Αυτό προέκυψε από τις πειραματικές μετρήσεις καθώς σε αυτά τα σημεία, η μέτρηση δεν ήταν εύκολα πραγματοποιήσιμη, λόγω της ταυτόχρονης άφιξης των πρώτων ανακλάσεων στο δέκτη. Επίσης το συγκεκριμένο πρόβλημα παρατηρήθηκε και στο πρόγραμμα προσομοίωσης της αίθουσας Catt acoustic κάτι το οποίο παρατίθεται στη συνέχεια. Για την αντιμετώπιση των συγκεκριμένων προβλημάτων προτείνεται η παρακάτω ακουστική μελέτη.

11.2 Περιγραφή ακουστικής μελέτης

Οροφή

Στην οροφή, αντικαταστάθηκε η παλιά γυψοσανίδα με μία ειδική ακουστική γυψοσανίδα της εταιρία Knauf. Η τοποθέτηση έγινε σε πριονωτή διάταξη, δηλαδή υπήρχε συγκεκριμένη κλίση των επιφανειών ανάμεσα στα δοκάρια της οροφής. Το σχήμα αυτό της οροφής, επιτρέπει περισσότερες χρήσιμες ανακλάσεις να στρέφονται προς τις προβληματικές πίσω θέσεις. Επίσης το ακανόνιστο του σχήματος, αποτρέπει τη δημιουργία έντονων στάσιμων κυμάτων. Η απορρόφηση του υλικού επιλέχθηκε προσεκτικά, με σκοπό την αυξημένη απορροφητικότητα στην οκτάβα των 125 Hz, καθώς ο χρόνος αντήχησης στη συγκεκριμένη οκτάβα ήταν αρκετά αυξημένος σε σχέση με τις υπόλοιπες. Αναλυτικά τα χαρακτηριστικά της ακουστικής γυψοσανίδας παρατίθενται στο παράρτημα Γ.

Πλευρικοί τοίχοι

Στους πλευρικούς τοίχους τοποθετήθηκε ειδικό διάτρητο απορροφητικό υλικό της εταιρίας Sonogamma. Το υλικό αυτό χρησιμοποιήθηκε ως πρόσοψη για τα 50 mm πετροβάμβακα που τοποθετήθηκαν από πίσω του. Μεταξύ της ορυκτής ίνας και του τοίχου υπάρχει επίσης κενό αέρος 50 mm. Με αυτόν τον τρόπο οι απορροφητικές ιδιότητες του συστήματος αυξάνονται κατακόρυφα. Κάτι τέτοιο είναι επιθυμητό, καθώς ο χρόνος αντήχησης της αίθουσας κυμαίνεται σε πολύ υψηλά επίπεδα. Τοποθετήθηκαν με κλίση, σχηματίζοντας πριονωτή διάταξη μεταξύ των τεσσάρων δοκαριών. Η διάταξη αυτή μπορεί να συνεισφέρει στην κατεύθυνση ανακλάσεων στα σημεία της αίθουσας με τη χαμηλότερη καταληπτότητα. Αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των παραπάνω υλικών παρατίθενται στο παράρτημα Γ.

Πίσω μέρος αίθουσας

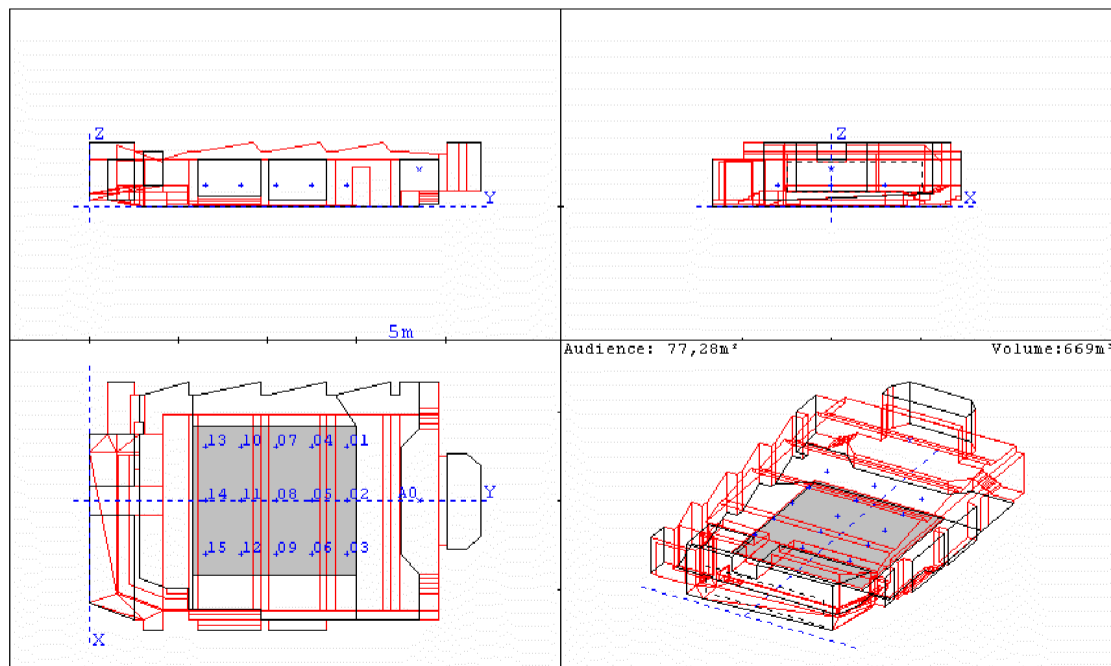
Το πίσω μέρος της αίθουσας λόγω του πολύπλοκου σχήματός του αλλά και της μεγάλης του απόστασης από την πηγή, δυσχεραίνει την καταληπτότητα σε δέκτες που βρίσκονται σε αυτά τα σημεία. Επιπλέον η χρήση του σημείου αυτού δεν είναι σημαντική (διάδρομος) και για αυτό το λόγο επιλέχθηκε η απομόνωση όλου του πίσω μέρους (διαδρόμου) από την υπόλοιπη αίθουσα. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε βαριάς επένδυσης κουρτίνα κατά μήκος όλης της αίθουσας ακριβώς πίσω από την

κερκίδα, η οποία δρα ως απορροφητική επιφάνεια μειώνοντας τα προβλήματα στα συγκεκριμένα σημεία. Αναλυτικά τα χαρακτηριστικά της κουρτίνας παρατίθενται στο παράρτημα Γ.

Ηχομόνωση

Για την προστασία της αίθουσας από τον θόρυβο βάθους που δημιουργείται στον εσωτερικό του σχολείου τοποθετήθηκε μία δίφυλλη μεταλλική πόρτα στα ανοίγματα των εισόδων. Η συγκεκριμένη πόρτα παρουσιάζει δείκτη ηχομείωσης R_w 41dB, κάτι το οποίο θα βοηθήσει σημαντικά στη μείωση του θορύβου βάθους. Αναλυτικά τα χαρακτηριστικά της πόρτας παρατίθενται στο παράρτημα Γ.

Παρακάτω φαίνεται το σχέδιο της αίθουσας μετά την ακουστική τροποποίηση.



Σχήμα 11.2.1: Σχέδιο ακουστικής μελέτης αίθουσας πολλαπλών χρήσεων 14ου δημοτικού σχολείου

11.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων αίθουσας πολλαπλών χρήσεων

Χρόνος αντήχησης T-15 και EDT

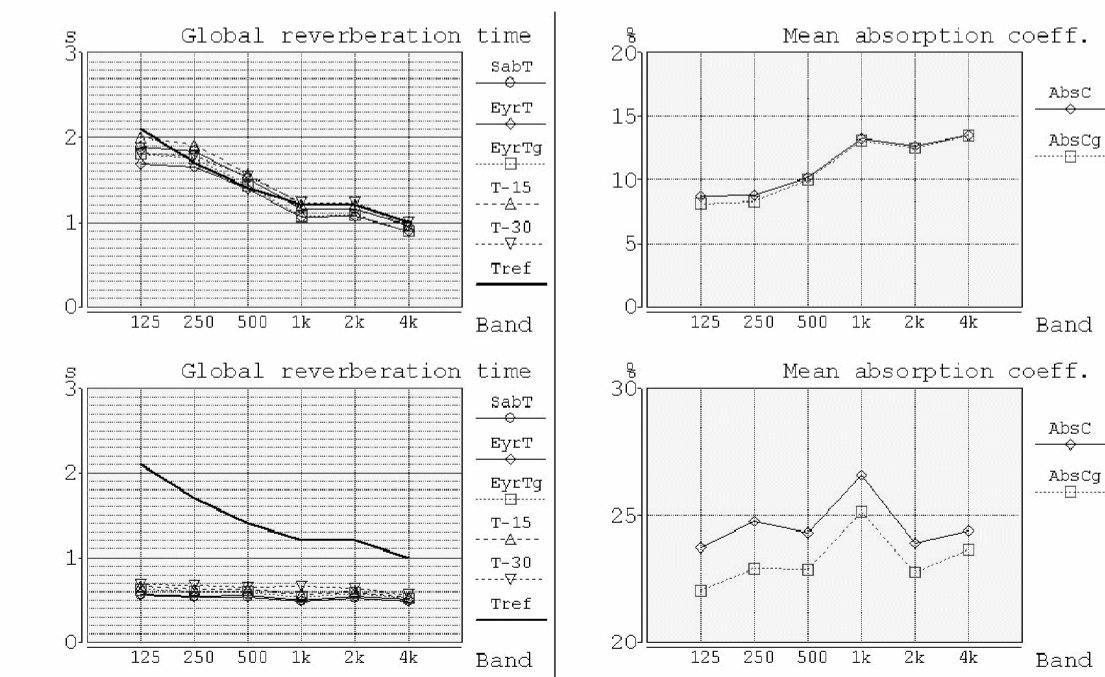
Ο αρχικός χρόνος αντήχησης της αίθουσας ήταν πολύ υψηλός. Πριν την ακουστική μελέτη ο χρόνος αντήχησης ανά οκτάβα κυμαίνεται από 2.01 έως 0.96 sec, ενώ μετά την ακουστική μελέτη για την ίδια συχνοτική ανάλυση ο χρόνος αντήχησης βελτιώνεται αισθητά και κυμαίνεται από 0.65 έως 0.54 sec. Αναλυτικά οι χρόνοι αντήχησης (T-15) απεικονίζονται στους πίνακες που ακολουθούν.

f (Hz)	125	250	500	1kHz	2	4
T-15 (sec)	2.01	1.94	1.57	1.21	1.20	0.96

Πίνακας 11.3.1: Χρόνοι αντήχησης πριν την ακουστική μελέτη

f (Hz)	125	250	500	1kHz	2	4
T-15 (sec)	0.65	0.62	0.62	0.57	0.59	0.54

Πίνακας 11.3.2: Χρόνοι αντήχησης μετά την ακουστική μελέτη



Σχήμα 11.3.1: Χρόνος αντήχησης και απορρόφηση αίθουσας πριν και μετά την ακουστική παρέμβαση.

Το EDT της αίθουσας πριν και μετά τη μελέτη φαίνεται στους παρακάτω πίνακες.

f (Hz)	125	250	500	1kHz	2	4
EDT (sec)	1,94	1,86	1,48	1,11	1,10	0,89

Πίνακας 11.3.3: Τιμές EDT πριν την ακουστική μελέτη

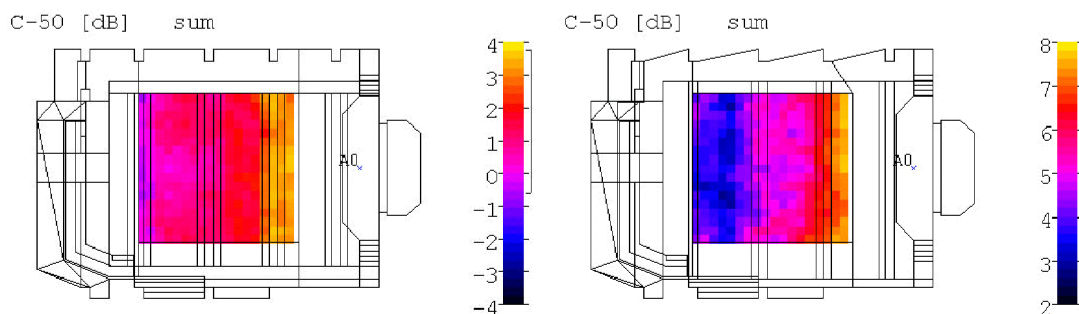
f (Hz)	125	250	500	1kHz	2	4
EDT (sec)	0,60	0,57	0,59	0,52	0,56	0,53

Πίνακας 11.3.4: Τιμές EDT μετά την ακουστική μελέτη

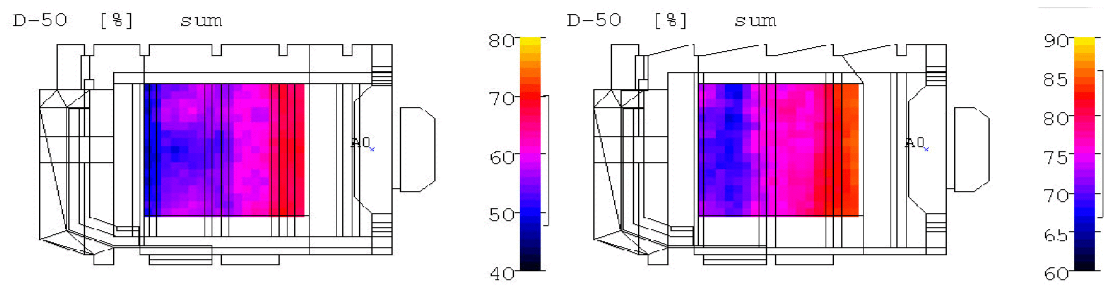
Μέσω σύγκρισης των τιμών του RT με τις τιμές του EDT, η σχέση ($0.8 \cdot RT < EDT < RT$) η οποία συνδέει τα δύο μεγέθη και όταν ισχύει συμβάλλει στη καθαρότητα της ομιλίας, ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις.

Καταληπτότητα C-50 D-50 RASTI

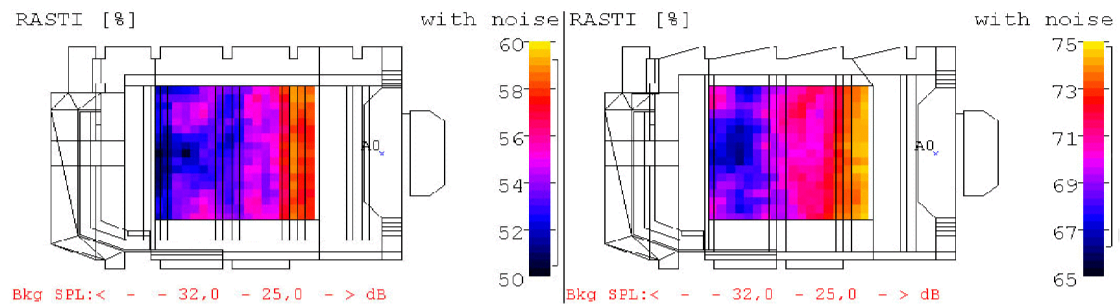
Η καταληπτότητα κι η ευκρίνεια της αίθουσας ήταν αρχικά σε χαμηλά επίπεδα. Ειδικότερα, στο πίσω μέρος της αίθουσας το απ' ευθείας σήμα ήταν χαμηλής στάθμης, ενώ οι μεγάλης τάξης ανακλάσεις υψηλής στάθμης λόγω του περίπλοκου αρχικού αρχιτεκτονικού σχεδιασμού. Η επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος επετεύχθη με την πριονωτή υπό κλίση τοποθέτηση του ακουστικού πάνελ, το οποίο συνεισφέρει στη μετάδοση μεγαλύτερου πλήθους πρώτων ανακλάσεων στο πίσω μέρος της αίθουσας και κατά συνέπεια στην αύξηση της καταληπτότητας και της ευκρίνειας. Το νέο, μη παράλληλο, σχήμα της αίθουσας συμβάλλει παράλληλα στην πιο ομοιόμορφη κατανομή των στάσιμων κυμάτων.



Σχήμα 11.3.2: Διαύγεια πριν και μετά την ακουστική παρέμβαση



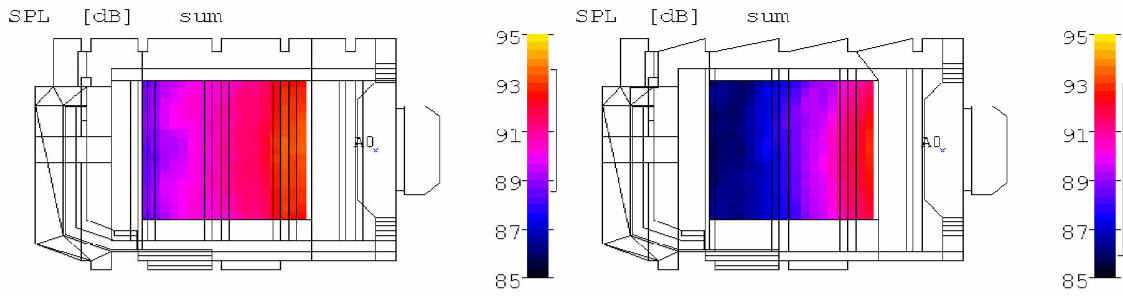
Σχήμα 11.3.3: Ευκρίνεια πριν και μετά την ακουστική παρέμβαση



Σχήμα 11.3.4: RASTI πριν και μετά την ακουστική παρέμβαση

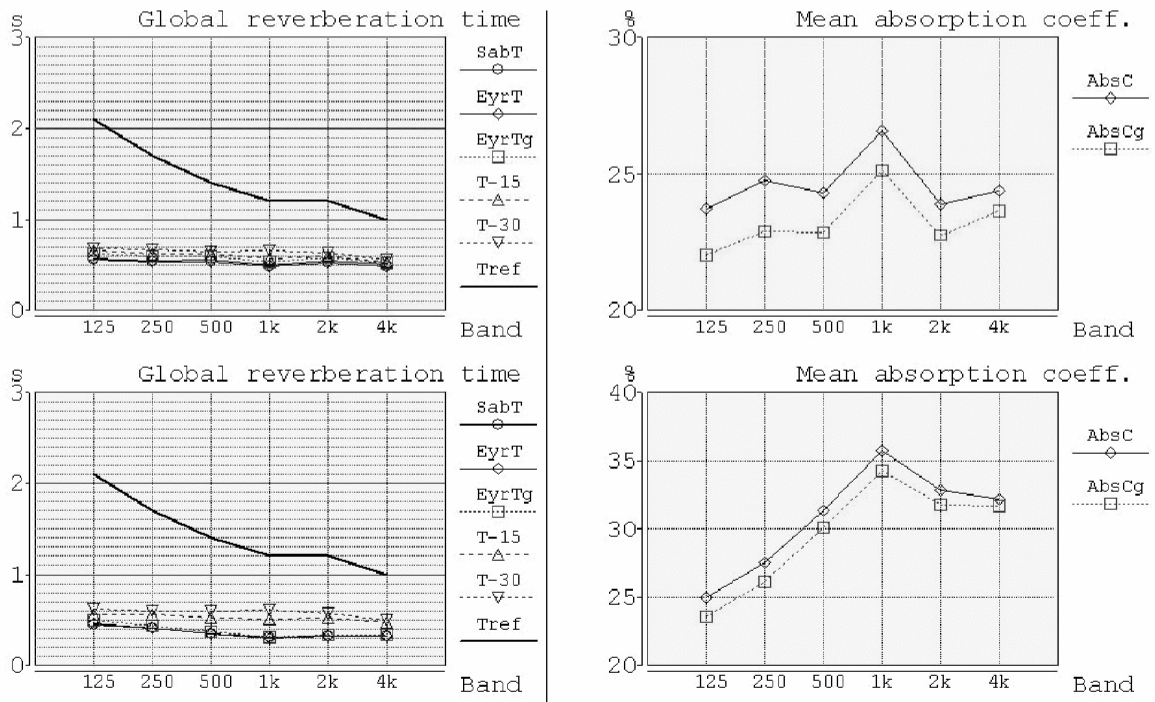
Συνολική στάθμη ηχητικής πίεσης

Η στάθμη ηχητικής πίεσης του απευθείας ήχου, δεδομένου του μεγέθους του χώρου, για ανθρώπινη φωνή, είναι ικανοποιητική. Παρατηρείται ότι πριν την ακουστική επέμβαση η συνολική στάθμη του σήματος είναι μεγαλύτερη, ενώ μετά την επέμβαση παρατηρείται μία μείωση. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της συνολικής απορρόφησης της αίθουσας. Τα επίπεδα της ακουστικής πίεσης μέσα στα όρια που έχουν ορισθεί ως χώρος ακροατηρίου (δεδομένης της έλλειψης μόνιμων καθισμάτων) είναι ικανοποιητικά, αλλά στις κερκίδες στο πίσω μέρος της αίθουσας η στάθμη της ηχητικής πίεσης μειώνεται λόγω της μεγάλης απόστασης των θέσεων από τη σκηνή. Λόγω αυτού προτείνεται η τοποθέτηση ηλεκτρακουστικού συστήματος στο πίσω κομμάτι της αίθουσας. Η παρούσα μελέτη όμως περιορίζεται μόνο στην ακουστική τροποποίηση του χώρου.

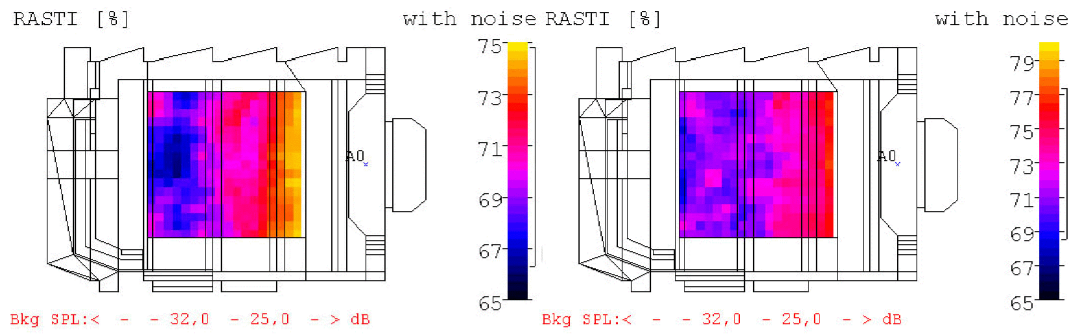


Σχήμα 11.3.5: Ένταση πηγής πριν και μετά την ακουστική παρέμβαση.

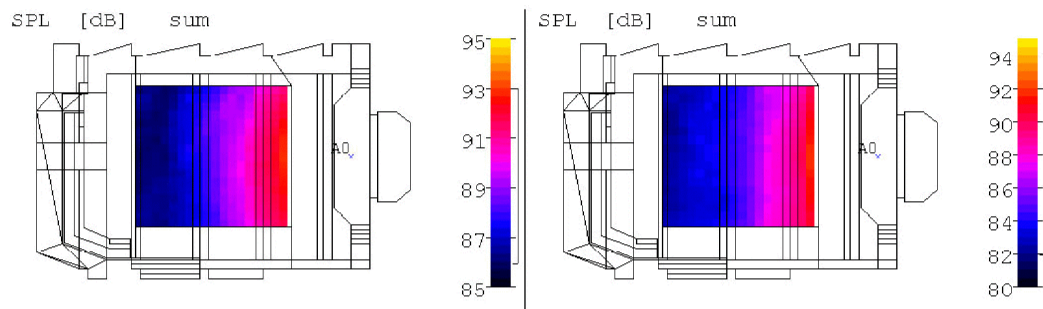
Τέλος, με βάση τον όγκο της αίθουσας, ο προτεινόμενος αριθμός ακροατών είναι περί τα 170 άτομα. Οι ακουστικές παράμετροι της αίθουσας υπολογίστηκαν με την ίθουσα άδεια, αλλά όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τα παρακάτω διαγράμματα που αναφέρονται σε γεμάτη (με το μέγιστο αριθμό ακροατών) αίθουσα, υπάρχουν αλλαγές, όπως πτώση του χρόνου αντήχησης, μείωση της στάθμης του σήματος. Τα φαινόμενα αυτά γίνονται εντονότερα στο πίσω μέρος της αίθουσας. Οι μεταβολές των ακουστικών παραμέτρων όμως είναι μικρές και μέσα στα επιθυμητά όρια.



Σχήμα 11.3.6: Χρόνος αντήχησης με μηδενική και μέγιστη πληρότητα



Σχήμα 11.3.7: RASTI με μηδενική και μέγιστη πληρότητα.



Σχήμα 11.3.8: Ένταση πηγής με μηδενική και μέγιστη πληρότητα

Κοστολόγιο μελέτης

Το συνολικό κόστος της εφαρμογής της ακουστικής μελέτης κυμαίνεται περίπου στα 16230 ευρώ με μία επιφύλαξη λόγω αλλαγής των τιμών, τα οποία αναλυτικά περιγράφονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Γυψοσανίδα Knauf 8/18R για 125 m ² τοποθέτησης στην οροφή	3812 ευρώ
Απορροφητικό Calme για 55 m ² τοποθέτησης στους τοίχους	8800 ευρώ
Πλάκες πετροβάμβακα για 55 m ² τοποθέτησης πίσω από το απορροφητικό Calme.	165 ευρώ
Δίφυλλη μεταλλική ηχομονωτική πόρτα	2450 ευρώ
Κουρτίνα βαριάς επένδυσης 90 m ² για τοποθέτηση περιμετρικά όπισθεν της κερκίδας	1000 ευρώ
Συνολικό κόστος μελέτης	16230 ευρώ

Πίνακας 11.3.5: Τιμές δομικών υλικών

Στις άνωθεν τιμές περιλαμβάνεται το κόστος τοποθέτησης.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Μετρήσεις MLSSA αίθουσας Β - Τ.Ε.Ι. Ρεθύμνου

Παράμετροι	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S (dBspl)	14.6	30.3	33.9	30	30.6	32.6	31.7	25.2
N (dBspl)	8	-0.6	-0.6	-7.6	-7.4	-1.9	2.1	-1.4
SNR (dB)	6.6	30.9	34.5	37.6	38	34.5	29.7	26.6
C50 (dB)	-6.05	-2.94	0.83	-3.6	-3.25	-2.7	-1.71	-1.05
C80 (dB)	-2.36	-0.97	2.65	-0.76	-0.35	-0.66	0.85	1.48
D50 (%)	19.9	33.7	54.8	30.9	32.1	35	40.3	44
TS (msec)	115.7	93.1	72.2	106.3	114.4	113.9	94.8	84.9
EDT-10dB(s)	1.399	1.001	1.043	1.285	1.475	1.501	1.304	1.161
RT-20dB (s)	1.550	1.511	1.238	1.329	1.438	1.41	1.293	1.088
(-5:-25) r	-0.961	-0.097	-0.997	-0.998	-0.999	-0.99	-1	-1
RT-30dB (s)	1.085	1.496	1.345	1.347	1.427	1.441	1.294	1.094
(-5:-35) r	-0.943	-0.999	-0.996	0.999	-1	0.999	-1	-1
RT-user (s)	1.103	1.529	1.248	1.338	1.397	1.398	1.314	1.101
(-10:-25) r	-0.954	-0.997	-0.998	-0.995	-0.998	-0.998	-0.999	-1

1^η μέτρηση αίθουσας Β ΤΕΙ (θέση 1)

Παράμετροι	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S (dBspl)	15.6	31.6	32.2	31.5	31.2	33	31.7	25.1
N (dBspl)	2.8	-8.1	-4.8	-7.4	-5.4	-1.1	2.6	-1.8
SNR (dB)	12.8	39.8	37	38.9	36.6	34.1	29.1	26.9
C50 (dB)	-2.32	1.4	-3.9	-1.82	-2	-1.91	-1.37	-0.1
C80 (dB)	-0.92	3.8	0.41	0.94	0.18	0.88	1.09	2.28
D50 (%)	36.9	58	29	39.7	38.7	39.2	42.2	49.4
TS (msec)	131	76.4	108.4	93	107.7	104.3	92.9	76.4
EDT-10dB(s)	1.783	1.038	1.382	1.169	1,533	1.462	1.311	1.142
RT-20dB (s)	3.451	1.394	1.124	1.231	1.495	1.429	1.297	1.151
(-5:-25) r	-0.983	-0.996	-0.996	-0.999	-0.999	-1	-1	-0.999
RT-30dB (s)	T	1.334	1.172	1.303	1.450	1.455	1.263	1.131
(-5:-35) r	T	-0.998	-0.998	-0.999	-0.999	-1	-1	-0.999
RT-user (s)	3.866	1.433	1.114	1.22	1.22	1.421	1.293	1.208
(-10:-25) r	-0.998	-0.994	-0.994	-0.997	-0.997	-0.999	-0.999	-1

2^η μέτρηση αίθουσας Β ΤΕΙ (θέση 2)

Παράμετροι	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S (dBspl)	15.9	29.9	33	31.3	31.1	33.3	33.4	27.6
N (dBspl)	-5.2	-3.3	1.1	-5.5	-1.8	4.9	10.2	7
SNR (dB)	21.1	33.3	31.9	36.7	32.9	28.5	23.1	20.7
C50 (dB)	1.93	1.51	-2.65	-2.73	-3.06	-1.25	1.24	3.42
C80 (dB)	3.52	4.62	1.93	1.28	-0.04	0.6	3.46	5.19
D50 (%)	60.9	58.6	35.2	34.8	33.1	42.8	57.1	68.7
TS (msec)	103.1	77.7	91.3	97.1	107.8	99.8	69.7	50.1
EDT-10dB(s)	2.503	1.353	1.035	1.316	1.392	1.43	1.233	1.050
RT-20dB (s)	2.064	1.467	1.267	1.375	1.476	1.5	1.264	1.057
(-5:-25) r	-0.994	-0.991	-0.998	-0.999	-0.999	-0.999	-1	-1
RT-30dB (s)	2.751	1.397	1.334	1.461	1.461	1.422	1.205	0.982
(-5:-35) r	-0.981	-0.996	-0.999	-1	-1	-0.999	-0.999	-0.996
RT-user (s)	2.163	1.3	1.356	1.458	1.458	1.422	1.247	1.046
(-10:-25) r	-0.99	-0.992	-0.998	-0.998	-0.998	-0.998	-1	-1

3^η μέτρηση αίθουσας Β ΤΕΙ (θέση 3)

Παράμετροι	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S (dBspl)	12.2	27.5	32	29.8	28.6	31.5	31	25.4
N (dBspl)	-3.5	6.4	-3.5	-8.2	-9.8	-6	-2.9	-5.5
SNR (dB)	15.7	21.1	35.6	38	38.4	37.5	33.9	30.9
C50 (dB)	-0.15	-0.15	1.49	1.56	0.39	1.75	2.58	3.66
C80 (dB)	2.22	1.73	4.94	4.17	2.74	3.82	4.57	5.75
D50 (%)	49.2	49.1	58.5	58.9	52.2	59.9	64.4	69.9
TS (msec)	117.2	74.9	63	63.8	81.9	69.9	60.3	48.2
EDT-10dB(s)	2.002	1.047	1.233	1.304	1.379	1.421	1.239	1.059
RT-20dB (s)	4.438	1.336	1.277	1.286	1.498	1.42	1.27	1.076
(-5:-25) r	-0.932	-0.989	-0.998	-0.998	-1	-1	-1	-1
RT-30dB (s)	T	1.474	1.255	1.302	1.45	1.405	1.259	1.047
(-5:-35) r	T	-0.99	-0.998	-0.999	-1	-1	-1	-1
RT-user (s)	5.645	1.375	1.244	1.317	1.487	1.394	1.284	1.058
(-10:-25) r	-0.916	-0.981	-0.996	-0.997	-0.999	-1	-1	-1

4^η μέτρηση αίθουσας Β ΤΕΙ (θέση 4)

Παράμετροι	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S (dBspl)	13.1	26.4	29.4	28.5	27.5	30.2	29.4	23.4
N (dBspl)	8.6	4.1	-2.4	-6.1	-6.2	0	5.5	1.3
SNR (dB)	4.4	22.3	31.8	34.5	33.7	30.2	23.8	22.2
C50 (dB)	-2.6	-3.13	-3.04	-1.22	-2.35	-1.3	-0.03	1.72
C80 (dB)	0.55	-0.46	2.13	1.64	0.63	1.31	2.51	4.22
D50 (%)	35.5	32.7	33.2	43	36.8	42.6	49.8	59.8
TS (msec)	96.4	104.3	86	83.7	103.6	96.4	80.6	65.8
EDT-10dB(s)	1.637	1.169	1	1.201	1.474	1.438	1.199	1.039
RT-20dB (s)	1.234	1.373	1.351	1.295	1.422	1.426	1.272	1.125
(-5:-25) r	-0.994	-0.995	-0.997	-0.996	-1	-1	-1	-0.999
RT-30dB (s)	1.174	1.317	1.389	1.350	1.456	1.443	1.204	1.177
(-5:-35) r	-0.973	-0.998	-0.998	-0.998	-1	-1	0.998	-0.999
RT-user (s)	1.166	1.414	1.357	1.385	1.454	1.424	1.271	1.107
(-10:-25) r	-0.987	-0.995	-0.996	-0.997	-0.999	-0.999	-1	-0.999

5^η μέτρηση αίθουσας Β ΤΕΙ (θέση 5)

Παράμετροι	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S (dBspl)	10.8	25.6	28.7	27.7	27.4	29.7	28.5	21.8
N (dBspl)	-3.4	5.6	-4.2	-8.4	-5.5	0.7	4.9	0.9
SNR (dB)	14.1	20	32.9	36.1	32.9	29	23.5	20.9
C50 (dB)	-6.75	-0.85	-1.87	-1.79	-1.91	-1.24	-1.01	0.1
C80 (dB)	-1.76	1.63	0.72	0.4	0.95	0.99	1.65	3.16
D50 (%)	17.5	45.1	39.4	39.8	39.2	42.9	44.2	50.6
TS (msec)	146.5	98.3	102.9	97	104.4	94.5	89.1	73.1
EDT-10dB(s)	1.559	1.372	1.345	1.302	1.49	1.364	1.315	1.144
RT-20dB (s)	6.182	1.328	1.245	1.283	1.422	1.466	1.253	1.12
(-5:-25) r	-0.939	-0.995	-0.997	-0.999	-1	-1	-1	-0.999
RT-30dB (s)	T	1.202	1.191	1.230	1.401	1.413	1.241	1,118
(-5:-35) r	T	-0.995	-0.998	-0.999	-1	-1	-1	-1
RT-user (s)	7.188	1.404	1.186	1.27	1.441	1.450	1.255	1.134
(-10:-25) r	-0.937	-0.989	-0.997	-0.999	-0.999	-1	-1	-0.999

6^η μέτρηση αίθουσας Β ΤΕΙ (θέση 6)

Παράμετροι	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S (dBspl)	10.4	26.4	30.9	28.1	28	30.2	29.9	24.3
N (dBspl)	0.8	0.9	-4.5	-8.9	-7.6	-1.9	3	-0.5
SNR (dB)	9.6	25.5	35.4	37	35.5	32.1	26.9	24.8
C50 (dB)	-1.42	-0.55	2.32	-0.61	-1.02	0.5	0.79	3
C80 (dB)	0.65	3.63	5.33	2.57	1.64	2.4	3.34	5.32
D50 (%)	41.9	46.8	6.31	46.5	44.2	52.9	54.5	66.6
TS (msec)	98.4	75.3	63.1	83.4	94	85.1	70.8	52
EDT-10dB(s)	1.768	1.126	1.042	1.338	1.564	1.548	1.227	1.035
RT-20dB (s)	1.314	1.390	1.314	1.236	1.424	1.488	1.274	1.11
(-5:-25) r	-0.978	-0.996	-0.997	-0.999	-0.999	-1	-1	-1
RT-30dB (s)	1.274	1.297	1.364	1.242	1.425	1.439	1.248	1.097
(-5:-35) r	-0.973	-0.996	-0.998	-0.999	-1	-0.999	-1	-1
RT-user (s)	1.165	1.453	1.35	1.248	1.466	1.514	1.29	1.12
(-10:-25) r	-0.968	-0.993	-0.994	-0.999	-0.999	-0.999	-1	-0.999

7^η μέτρηση αίθουσας Β ΤΕΙ (θέση 7)

Παράμετροι	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S (dBspl)	10.4	24.7	30	28.5	27.9	29.2	28.7	22.5
N (dBspl)	7.1	5.1	1.6	1	3.2	7.1	8.6	3.9
SNR (dB)	3.3	19.7	28.4	27.5	24.7	22.1	20	18.6
C50 (dB)	-4.17	-2.17	1.67	0.69	-1.28	-2.14	0.39	1.56
C80 (dB)	-0.7	3.64	4.29	2.62	1.21	0.51	2.84	3.86
D50 (%)	22.7	37.8	59.5	53.9	42.7	37.9	52.2	58.9
TS (msec)	174.4	92.9	72.7	80.4	97.4	103	77.9	63
EDT-10dB(s)	2.642	1.18	1.054	1.384	1.428	1.456	1.241	1.019
RT-20dB (s)	5.796	1.283	1.249	1.239	1.423	1.34	1.201	1.075
(-5:-25) r	-0.971	-0.991	-0.987	-0.999	-0.999	-1	-1	-1
RT-30dB (s)	5.401	1.247	1.19	1.228	1.397	1.341	1.147	3.098
(-5:-35) r	-0.947	-0.994	-0.995	-0.999	-1	-1	-0.998	-0.867
RT-user (s)	6.755	1.173	1.142	1.204	1,41	1.287	1.184	1.086
(-10:-25) r	-0.95	-0.985	-0.98	-0.998	-0.998	-1	-1	-0.999

8^η μέτρηση αίθουσας Β ΤΕΙ (θέση 8)

Παράμετροι	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S (dBspl)	6.5	24.2	28.9	27	27.4	29.1	27.9	21
N (dBspl)	-1.6	-3.9	0.7	-5.7	-1.3	4.4	8.1	3.3
SNR (dB)	8.1	28	28.2	32.7	28.7	24.7	19.8	17.6
C50 (dB)	-3.79	-0.07	0.03	-2.09	-2.9	-2.1	-1.01	0.64
C80 (dB)	-0.78	3.62	1.91	0.96	0.05	1.06	1.94	3.69
D50 (%)	29.5	49.6	50.2	38.2	33.9	38.1	44.2	53.7
TS (msec)	132.1	80.3	85	99.3	102.3	103.4	83.6	66.8
EDT-10dB(s)	1.921	1.385	1.287	1.359	1.328	1.45	1.189	1.033
RT-20dB (s)	1.864	1.397	1.367	1.24	1.437	1.459	1.26	1.089
(-5:-25) r	-0.987	-0.998	-0.999	-0.999	-0.999	-0.999	-1	-1
RT-30dB (s)	3.005	1.384	1.393	1.26	1.431	1.54	1.238	1.107
(-5:-35) r	-0.919	-0.997	-0.999	-0.999	-0.999	-0.998	-1	-0.999
RT-user (s)	1.841	1.402	1.385	1.217	1.453	1.48	1.278	1.084
(-10:-25) r	-0.98	-0.997	-0.998	-0.998	-0.999	-0.999	-1	-1

9^η μέτρηση αίθουσας Β ΤΕΙ (θέση 9)

Παράμετροι	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S (dBspl)	14.1	28.7	30.8	27.5	27.5	29.6	29.1	23.7
N (dBspl)	7.8	5.7	2.1	-6.5	-10.1	-5	-1.6	-3.9
SNR (dB)	6.4	22.9	28.7	34	37.7	34.6	30.7	27.6
C50 (dB)	1.23	0.59	3.96	-1.4	-2.69	-2.3	-0.7	1.22
C80 (dB)	3.2	3.42	5.89	1.73	0.43	0.93	1.89	3.72
D50 (%)	57	53.4	71.3	42	35	37	46	57
TS (msec)	96.7	81	58	92.7	108.2	102.8	88.2	63.7
EDT-10dB(s)	1.826	1.439	1.106	1.332	1.497	1.438	1.292	1.003
RT-20dB (s)	2.779	1.477	1.327	1.265	1.461	1.471	1.282	1.145
(-5:-25) r	-0.987	-0.996	-0.999	-0.998	-1	-1	-1	-0.999
RT-30dB (s)	3.613	1.461	1.374	1.307	1.461	1.45	1.302	1.158
(-5:-35) r	-0.976	-0.998	-0.999	-0.999	-1	-1	-1	-1
RT-user (s)	3.080	1.402	1.256	1.256	1.484	1.475	1.286	1.18
(-10:-25) r	-0.98	-0.996	-0.997	-0.997	-0.999	-1	-1	-1

10^η μέτρηση αίθουσας Β ΤΕΙ (θέση 10)

Παράμετροι	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S (dBspl)	12.7	27	29.5	27.5	27.6	29.7	28.4	21.7
N (dBspl)	-2.5	-1.9	-6.7	-8.4	-7.1	-0.5	3.4	-1
SNR (dB)	15.2	28.9	36.2	35.9	34.7	30.1	25	22.7
C50 (dB)	-3.02	-0.73	-1.8	-2.39	-2.52	-2.02	-1	-0.48
C80 (dB)	-1.71	2.6	3.96	0.5	0.09	0.23	1.51	2.2
D50 (%)	33.3	45.8	39.8	36.6	35.9	38.6	44.3	47.2
TS (msec)	141.6	80.5	83.1	97.5	111.1	105.4	92.8	81.1
EDT-10dB(s)	1.988	1.204	1.16	1.276	1.535	1.487	1.342	1.157
RT-20dB (s)	4.747	1.361	1.281	1.261	1.405	1.449	1.278	1.099
(-5:-25) r	-0.971	-0.987	-0.997	-0.997	-0.999	-1	-1	-1
RT-30dB (s)	T	1.293	1.309	1.256	1.411	1.434	1.135	1.135
(-5:-35) r	T	-0.994	-0.997	-0.999	-0.999	-1	-1	-1
RT-user (s)	5.735	1.52	1.27	1.23	1.403	1.442	1.109	1.109
(-10:-25) r	-0.982	-0.99	-0.994	-0.995	-0.998	-1	-0.999	-0.999

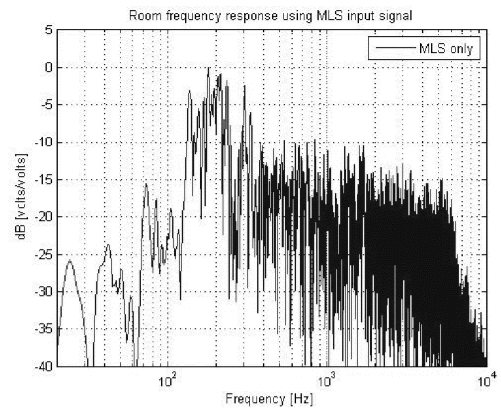
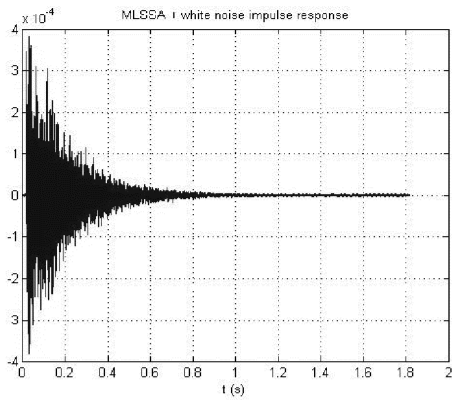
11^η μέτρηση αίθουσας Β ΤΕΙ (θέση 11)

Παράμετροι	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S (dBspl)	10.9	24	30.2	26.9	26.4	29.7	29	22.9
N (dBspl)	8.1	6.9	3.2	-2.3	-6.6	0.3	5	1.3
SNR (dB)	2.8	17.1	27	29.2	33	29.4	24	21.6
C50 (dB)	-4.28	-1.82	-1.11	-1.73	-2.89	-2.24	-1.73	0.14
C80 (dB)	-1.6	1.3	1.03	0.63	-0.98	0	0.94	2.57
D50 (%)	27.2	39.7	43.7	40.2	34	37.4	40.2	50.8
TS (msec)	129	100.6	83.8	97.8	120.3	105.5	91.7	74.1
EDT-10dB(s)	1.683	1.515	1.030	1.251	1.635	1.429	1.239	1.109
RT-20dB (s)	2.298	1.327	1.221	1.303	1.518	1.487	1.285	1.095
(-5:-25) r	-0.986	-0.986	-0.998	-0.999	-0.999	-0.999	-0.999	-1
RT-30dB (s)	2.282	1.291	1.335	1.337	1.527	1.457	1.234	1.064
(-5:-35) r	-0.986	0.992	-0.997	-0.999	-1	-1	-0.999	-1
RT-user (s)	2.327	1.448	1.259	1.327	1.587	1.535	1.327	1.101
(-10:-25) r	-0.962	-0.985	-0.998	-0.998	-0.999	-1	-0.999	-0.999

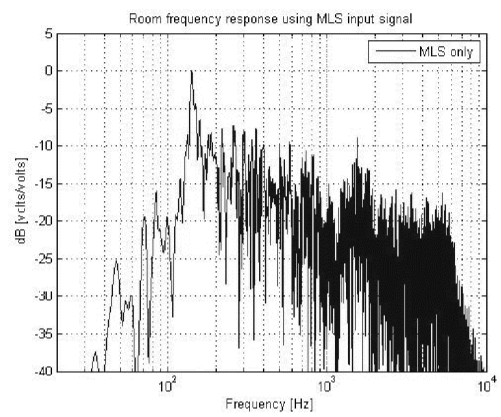
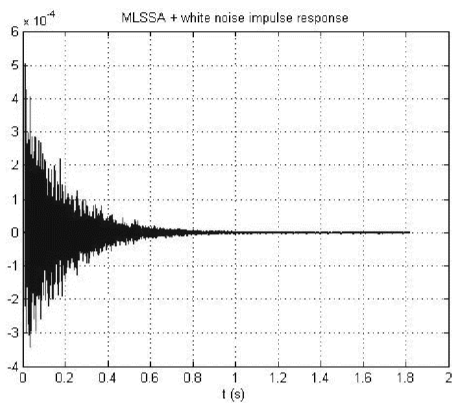
12^η μέτρηση αίθουσας Β ΤΕΙ (θέση 12)

Κρουστικές και συχνотικές αποκρίσεις αίθουσας Β - Τ.Ε.Ι. Ρεθύμνου

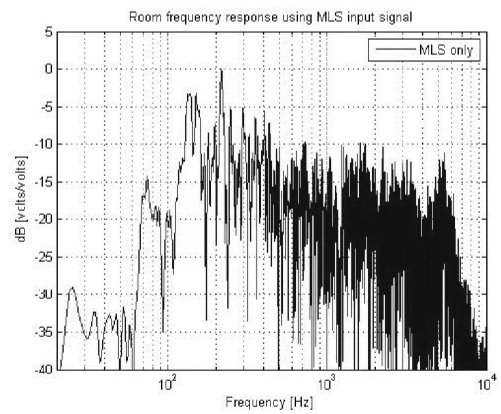
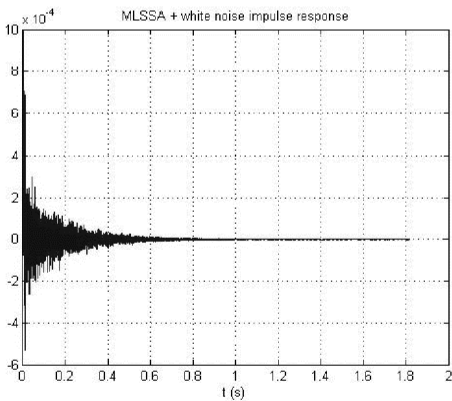
1



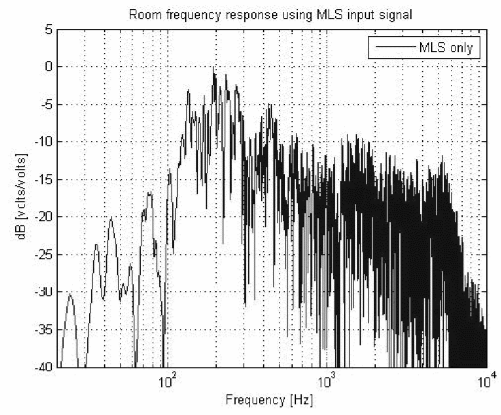
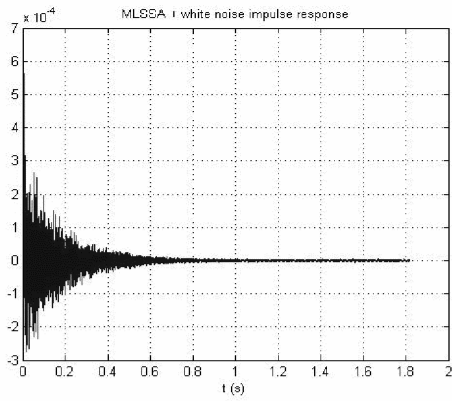
2



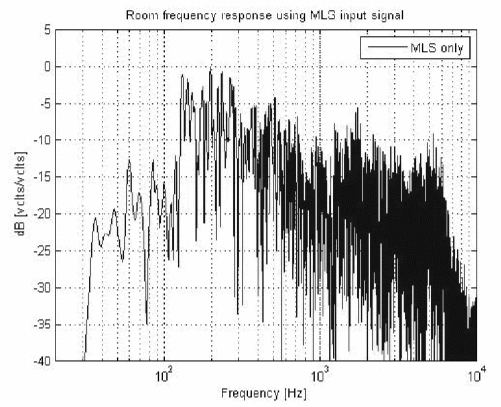
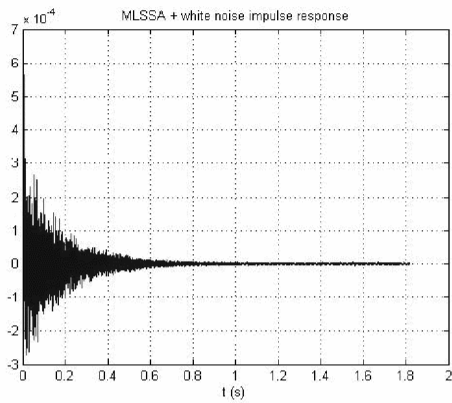
3



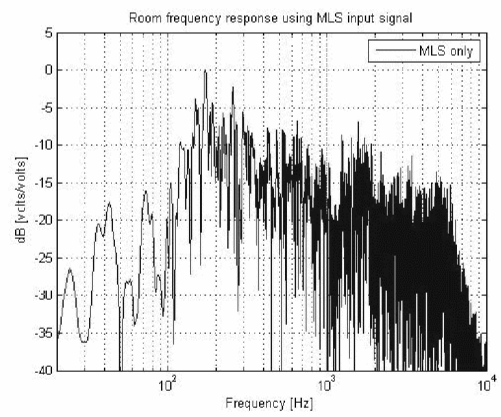
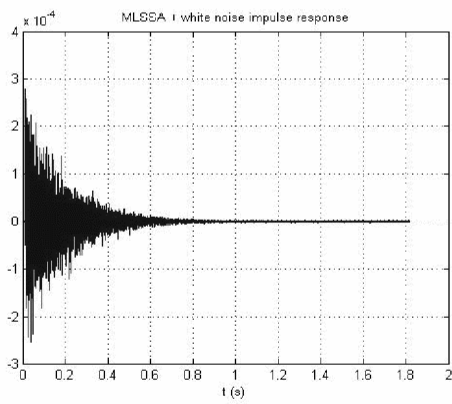
4



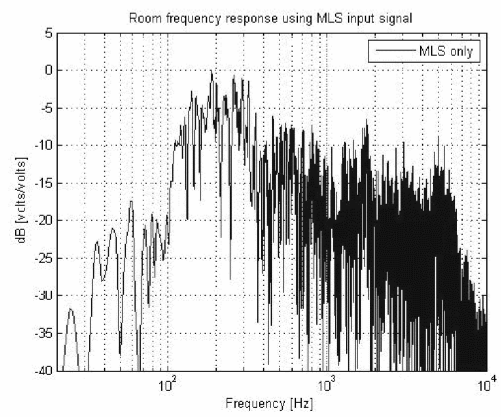
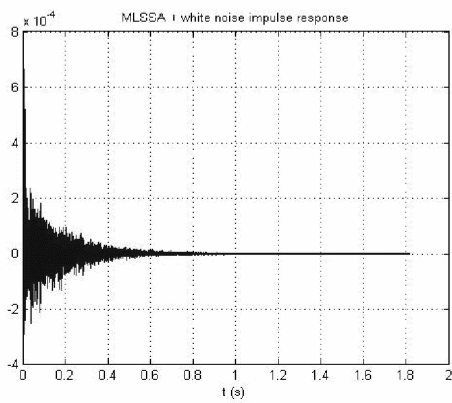
5



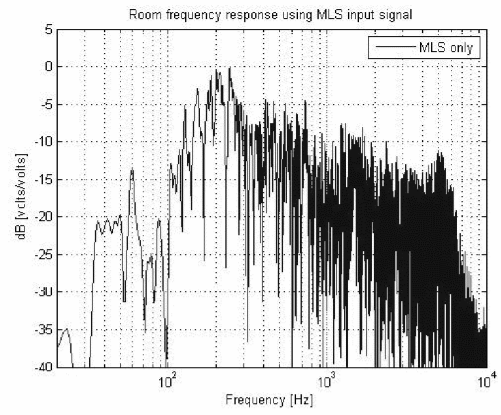
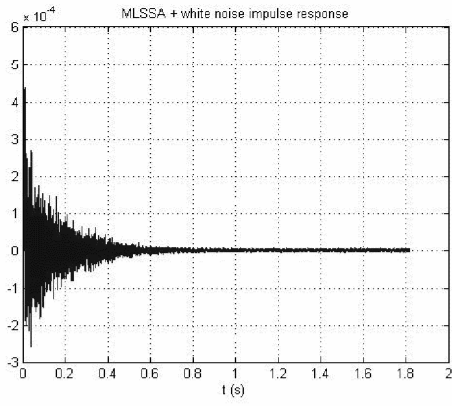
6



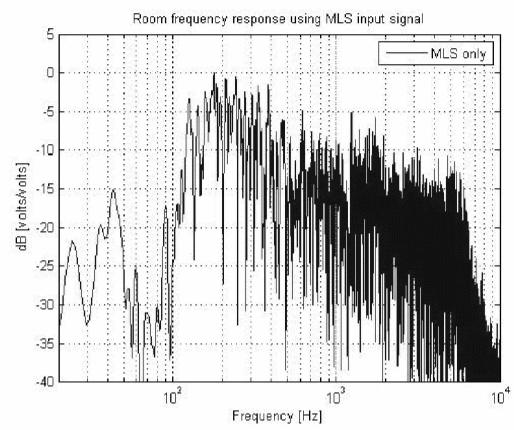
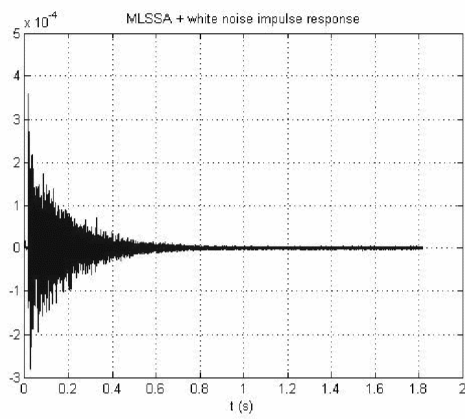
7



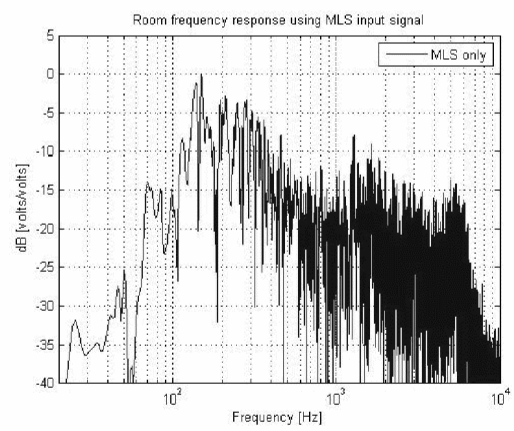
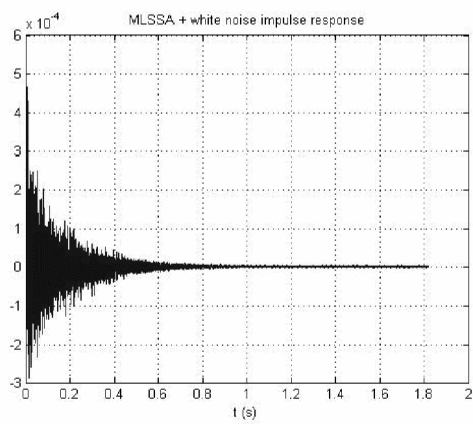
8



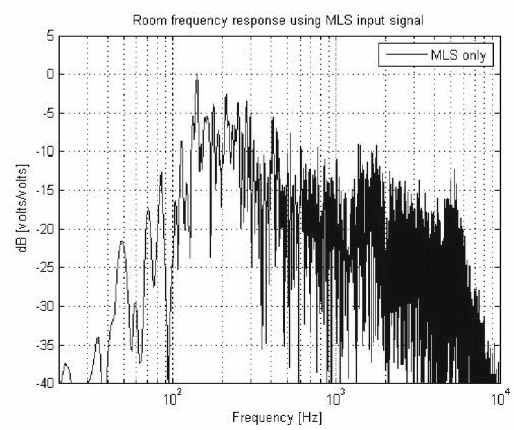
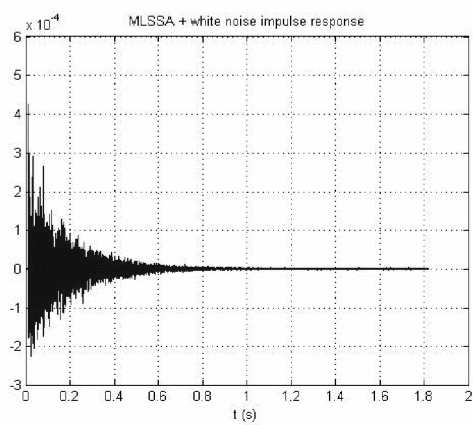
9



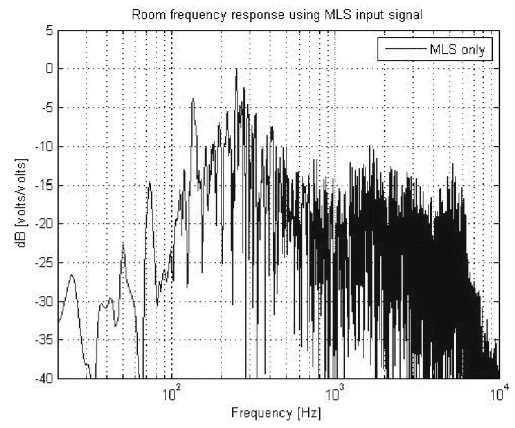
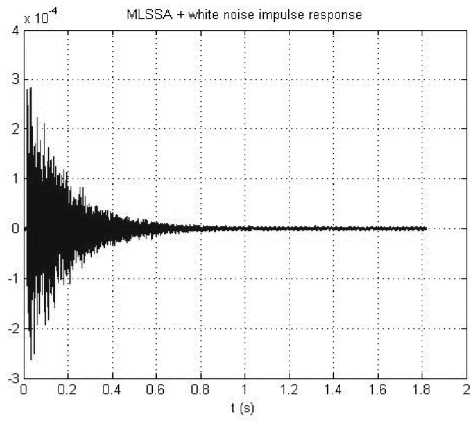
10



11



12



Μετρήσεις MLSSA αίθουσας Γ - Τ.Ε.Ι. Ρεθύμνου

Παράμετροι	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S (dBspl)	8	26.3	31.4	28	27.8	30.1	27.8	21.7
N (dBspl)	9.7	7.8	4.7	-1.3	1.5	5.4	7.4	3.1
SNR (dB)	-1.7	18.5	26.7	29.3	26.3	24.6	20.4	18.6
C50 (dB)	-3.71	1.24	0.58	-0.45	-0.9	0.12	-0.79	1.41
C80 (dB)	-2.11	2.62	3.95	1.66	1.39	2.09	1.95	4.38
D50 (%)	29.8	57.1	53.3	47.4	44.4	50.7	45.5	58
TS (msec)	189.9	86.8	72.6	95.4	103.7	90.6	87	63.3
EDT-10dB(s)	2.783	1.286	1.113	1.493	1.614	1.409	1.236	0.432
RT-20dB (s)	3.568	1.713	1.649	1.453	1.634	1.675	1.395	1.071
(-5:-25) r	-0.903	-0.996	-0.996	-0.999	-0.999	-0.999	-1	-1
RT-30dB (s)	5.413	1.838	1.511	1.509	1.621	1.725	1.595	1.101
(-5:-35) r	-0.852	-0.987	-0.997	-0.999	-1	-1	-0.994	-1
RT-user (s)	5.776	1.772	1.754	1.462	1.665	1.721	1.412	1.084
(-10:-25) r	-0.808	-0.994	-0.996	-0.999	-0.999	-0.999	-1	-0.999

1^η μέτρηση αίθουσας Γ TEI (θέση 1)

Παράμετροι	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S (dBspl)	7.1	25	28.9	27.1	26.2	28.4	26	18.3
N (dBspl)	4.4	-3.4	-5	-5.6	-2.8	3.8	6.9	2.6
SNR (dB)	2.7	28.4	34	32.7	29	24.6	19.1	15.8
C50 (dB)	-3.91	-3.47	-5.22	-3.17	-3.83	-2.28	-1.56	-0.03
C80 (dB)	-1.19	-0.58	-0.5	0.44	0.18	0.36	1.28	2.97
D50 (%)	28.9	31	23.1	32.5	32,7	37.2	41.1	49.8
TS (msec)	105.6	114.1	109.1	104	125.6	116.4	98.1	76.1
EDT-10dB(s)	1.614	1.289	1.177	1.265	1.184	1.691	1.349	1.059
RT-20dB (s)	1.411	1.643	1.475	1.574	1.793	1.703	1.44	1.137
(-5:-25) r	-0.967	-0.996	-0.998	-0.999	-0.999	-1	-1	-1
RT-30dB (s)	1.375	1.506	1.578	1.575	1.759	1.653	1.698	1.148
(-5:-35) r	-0.952	-0.997	-0.997	-0.999	-1	-1	-0.994	-1
RT-user (s)	1.032	1.568	1.416	1.636	1.746	1.703	1.452	1.125
(-10:-25) r	-0.948	-0.996	-0.998	-0.999	-0.999	-1	-1	-0.999

2^η μέτρηση αίθουσας Γ TEI (θέση 2)

Παράμετροι	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S (dBspl)	7.6	24	27.8	26.4	26.3	28	25	17
N (dBspl)	-0.7	3.2	-4.8	-6.4	-1.1	5.1	7.9	4
SNR (dB)	8.3	20.8	32.6	32.8	27.4	23	17.1	13
C50 (dB)	-3.5	-2.08	-0.72	-2.18	-3.87	-3.84	-2.09	-1.2
C80 (dB)	-1.83	0.6	1.46	0.07	-1.51	-1.21	0.75	1.41
D50 (%)	30.9	39.2	45.8	37.7	29.1	29.2	38.2	43.1
TS (msec)	193.7	111.1	107.6	109.9	127.2	127.7	102.5	85
EDT-10dB(s)	2.595	1.712	1.644	1.589	1.559	1.727	1.382	1.113
RT-20dB (s)	4.464	1.379	1.608	1.825	1.825	1.698	1.461	1.069
(-5:-25) r	-0.972	-0.994	-0.996	-0.999	-0.999	-1	-1	-0.999
RT-30dB (s)	4.101	1.287	1.620	1.746	1.746	1.7	1.485	0.982
(-5:-35) r	-0.969	-0.993	-0.998	-0.999	-0.999	-1	-1	-0.994
RT-user (s)	5.223	1.364	1.364	1.817	1.817	1.7	1.466	1.054
(-10:-25) r	-0.978	-0.993	-0.993	-0.998	-0.998	-1	-1	-0.999

3^η μέτρηση αίθουσας Γ TEI (θέση 3)

Παράμετροι	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S (dBspl)	3.2	21.5	26.2	25.4	25.5	27.8	26.1	19.1
N (dBspl)	7.3	2.3	-3.9	-7.1	-7.5	-2.2	1.8	-1.6
SNR (dB)	-4.1	19.2	30.1	32.5	33	30	24.3	20.7
C50 (dB)	-2.69	-5.07	-1.88	-4.22	-3.81	-4.27	-3.72	-2.14
C80 (dB)	0.59	-0.47	0.9	-1.77	-1.52	-1.22	-0.47	0.78
D50 (%)	35	23.7	39.3	27.5	29.4	27.2	29.8	37.9
TS (msec)	107.9	127.5	110.1	131.9	139.2	135.2	113.9	90.9
EDT-10dB(s)	1.4	1.694	1.582	1.749	1.855	1.769	1.433	1.169
RT-20dB (s)	0.679	1.62	1.542	1.435	1.743	1.742	1.421	1.117
(-5:-25) r	-0.897	-0.994	-0.998	-0.998	-0.999	-1	-1	-1
RT-30dB (s)	0.605	1.385	1.51	1.533	1.756	1.697	1.44	1.126
(-5:-35) r	-0.858	-0.992	-0.999	-0.998	-1	-1	-1	-1
RT-user (s)	0.574	1.705	1.477	1.498	1.778	1.413	1.413	1.118
(-10:-25) r	-0.716	-0.987	-0.997	-0.999	-0.999	-1	-1	-0.999

5^η μέτρηση αίθουσας Γ TEI (θέση 5)

Παράμετροι	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S (dBspl)	13.4	27.7	30.9	29.1	28.2	30.2	29.1	22.8
N (dBspl)	4.3	-3.4	-2.2	0.1	3.3	6.5	6.9	1
SNR (dB)	9.1	31.1	33.2	29	24.9	23.7	22.3	21.8
C50 (dB)	-0.64	2.8	2.37	0.26	0.17	0.9	2.07	3.4
C80 (dB)	0.19	4.72	4.43	1.8	1.97	2.67	4.26	5.83
D50 (%)	46.3	65.6	63.3	51.5	51	55.1	61.7	68.6
TS (msec)	111.2	69.1	72.3	83.9	92	86.4	64.7	51.5
EDT-10dB(s)	1.767	1.241	1.298	1.146	1.554	1.537	1.143	0.896
RT-20dB (s)	1.848	1.672	1.736	1.528	1.704	1.663	1.327	1.082
(-5:-25) r	-0.989	-0.996	-0.998	-0.997	-1	-1	-1	-1
RT-30dB (s)	1.664	1.569	1.718	1.529	1.756	1.678	1.264	1.023
(-5:-35) r	-0.984	-0.997	-0.999	-0.999	-0.999	-1	-0.998	-0.999
RT-user (s)	1.657	1.724	1.803	1.483	1.72	1.676	1.329	1.082
(-10:-25) r	-0.984	-0.993	-0.996	-0.997	-1	-1	-1	-0.999

6^η μέτρηση αίθουσας Γ TEI (θέση 6)

Παράμετροι	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S (dBspl)	9.9	25.1	28.4	28	26.9	29.1	27.4	21
N (dBspl)	4.3	-8.9	-5.3	-8.2	-4.7	0.4	4.5	1
SNR (dB)	5.7	34.1	33.7	36.2	31.6	28.7	22.9	20
C50 (dB)	-0.81	-2.2	-2.74	-2.18	-1.61	-2.31	-0.99	0.87
C80 (dB)	1.2	-0.15	1.08	0.36	-0.07	0.29	1.47	3.86
D50 (%)	45.4	37.6	34.7	37.7	40.9	37	44.3	55
TS (msec)	114.4	125	107.3	102.8	119.5	112.1	93.4	66.8
EDT-10dB(s)	2.339	1.807	1.422	1.33	1.774	1.62	1.376	1.016
RT-20dB (s)	2.196	1.514	1.777	1.448	1.673	1.635	1.313	1.062
(-5:-25) r	-0.969	-0.997	-0.997	-0.998	-1	-1	-1	-1
RT-30dB (s)	2.080	1.657	1.798	1.475	1.687	1.662	1.327	1.048
(-5:-35) r	-0.939	-0.996	-0.998	-0.999	-1	-1	-1	-0.999
RT-user (s)	1.461	1.554	1.837	1.487	1.689	1.648	1.327	1.055
(-10:-25) r	-0.970	-0.996	-0.995	-0.998	-0.999	-0.999	-1	-0.999

7^η μέτρηση αίθουσας Γ TEI (θέση 7)

Παράμετροι	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S (dBspl)	9.8	24.5	29	27.9	26.5	29.1	27.3	20.9
N (dBspl)	-0.9	-8.9	-0.7	-7.7	-10.3	-5.3	-2.8	-5.8
SNR (dB)	10.7	33.4	29.6	35.6	36.8	34.4	30.1	26.7
C50 (dB)	-4.66	-3.07	-3.96	-3.17	-4.28	-3.46	-2.35	-1.08
C80 (dB)	-0.99	-1.04	-0.23	-0.17	-1.6	-1.19	0.74	2.29
D50 (%)	25.5	33	28.7	32.5	27.2	31.1	36.8	43.8
TS (msec)	215.3	118.8	115.2	112.3	138.7	126.4	100.9	82
EDT-10dB(s)	3.269	1.482	1.429	1.403	1.873	1.686	1.311	1.095
RT-20dB (s)	5.099	1.699	1.669	1.536	1.647	1.575	1.398	1.084
(-5:-25) r	-0.972	-0.995	-0.998	-0.998	-0.999	-1	-1	-1
RT-30dB (s)	T	1.667	1.833	1.517	1.693	1.628	1.389	1.109
(-5:-35) r	T	-0.998	-0.997	-0.999	-0.999	-1	-1	-1
RT-user (s)	5.467	1.779	1.723	1.6	1.712	1.594	1.42	1.094
(-10:-25) r	-0.942	-0.989	-0.998	-0.998	-0.999	-0.999	-0.999	-1

8^η μέτρηση αίθουσας Γ TEI (θέση 8)

Παράμετροι	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S (dBspl)	8.7	23.8	31.6	28	28	30.4	29.2	22.3
N (dBspl)	9.3	3.5	6.5	9.6	11.4	14	13.5	8.2
SNR (dB)	0.6	20.2	25.1	18.4	16.6	16.4	15.7	14.1
C50 (dB)	-5.87	-1.58	3.18	0.48	1.72	1.55	2.24	3.76
C80 (dB)	2.37	3.12	5.5	3.45	3.84	4.09	5,3	6.61
D50 (%)	20.5	41	67.5	52.7	59.7	58.8	62.6	70.4
TS (msec)	125.4	91.9	60.2	76.1	72.6	69	56.1	44.6
EDT-10dB(s)	1.838	1.531	1.048	1.244	1.352	1.277	0.997	0.796
RT-20dB (s)	1.028	1.686	1.527	1.398	1.421	1.390	1.209	0.978
(-5:-25) r	-0.953	-0.996	-0.996	-0.999	-0.999	-0.999	-1	-0.999
RT-30dB (s)	0.987	1.682	1.61	1.263	1.312	1.295	1.232	0.935
(-5:-35) r	-0.922	-0.998	-0.998	-0.994	-0.996	-0.996	-1	-0.999
RT-user (s)	0.567	1.797	1.636	1.358	1.377	1.341	1.225	0.987
(-10:-25) r	-0.926	-0.991	-0.997	-0.998	-0.998	-0.999	-0.999	-0.999

11^η μέτρηση αίθουσας Γ TEI (θέση 11)

Παράμετροι	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S (dBspl)	7.9	25	30.2	27.3	27.2	28.7	26.9	19.2
N (dBspl)	7.3	1.9	-3.7	-3.1	1.7	6.1	8.7	4.9
SNR (dB)	0.7	23.2	33.9	30.4	25.5	22.6	18.1	14.3
C50 (dB)	-5.36	-8.59	-0.54	-1.54	-1.76	-1.94	0.14	1.21
C80 (dB)	-4.78	-0.85	1.8	0.96	0.45	0.45	2.38	4.18
D50 (%)	22.5	12.2	46.9	41.2	40	39	50.8	56.9
TS (msec)	223.8	120.1	90.9	98.8	109.8	109.5	80.4	62.6
EDT-10dB(s)	3.208	1.327	1.202	1.364	1.606	1.648	1.283	0.995
RT-20dB (s)	1.724	1.626	1.667	1.499	1.608	1.582	1.269	1.037
(-5:-25) r	0.956	-0.989	-0.988	-0.998	-1	-1	-1	-1
RT-30dB (s)	1.689	1.609	1.644	1.476	1.591	1.56	1.21	0.949
(-5:-35) r	-0.947	-0.994	-0.995	-0.999	-0.999	-1	-0.998	-0.994
RT-user (s)	1.343	1.794	1.873	1.49	1.598	1.559	1.261	1.029
(-10:-25) r	-0.915	-0.98	-0.993	-0.996	-1	-0.999	-1	-0.999

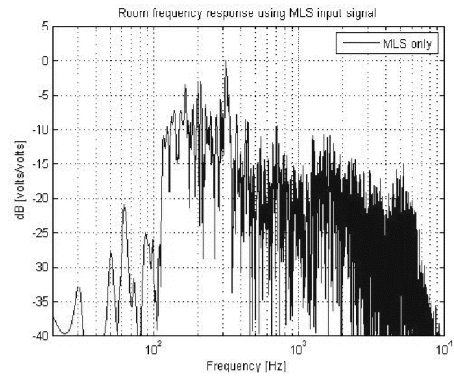
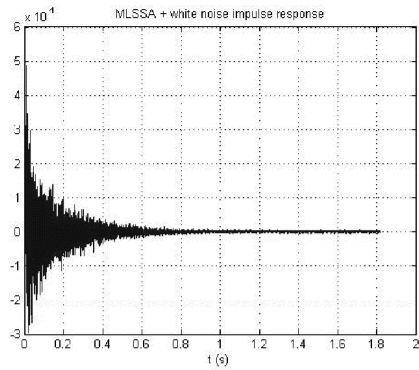
12^η μέτρηση αίθουσας Γ TEI (θέση 12)

Παράμετροι	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S (dBspl)	6.8	24.1	26.6	27.2	26.9	28.4	26.7	19.6
N (dBspl)	9.4	7.5	4	-3.1	-0.4	5.4	9.8	6.3
SNR (dB)	-2.5	16.6	22.6	30.3	27.2	22.9	16.9	13.3
C50 (dB)	-2.75	-2.38	-3.99	-0.55	-1.47	-0.99	0.94	2.65
C80 (dB)	-1.13	0.64	-1.18	0.92	0.79	1.02	3.01	5.01
D50 (%)	34.7	36.6	28.5	46.8	41.6	44.3	55.4	64.8
TS (msec)	213.9	103.8	115.4	91.8	102.7	102.8	72.1	50.4
EDT-10dB(s)	3.827	1.34	1.36	1.614	1.652	1.658	1.352	1.090
RT-20dB (s)	4.204	1.578	1.571	1.474	1.639	1.639	1.381	1.082
(-5:-25) r	-0.945	-0.991	-0.991	-0.997	-0.999	-0.999	-1	-1
RT-30dB (s)	4.371	1.593	1.457	1.492	1.671	1,616	1.372	1.005
(-5:-35) r	-0.958	-0.989	-0.995	-0.999	-1	-1	-1	-0.997
RT-user (s)	5.902	1.727	1.622	1.53	1.615	1.616	1,394	1.067
(-10:-25) r	-0.892	-0.991	-0.985	-0.994	-0.999	-0.999	-1	-1

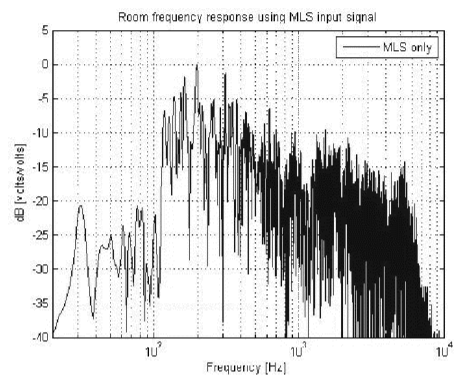
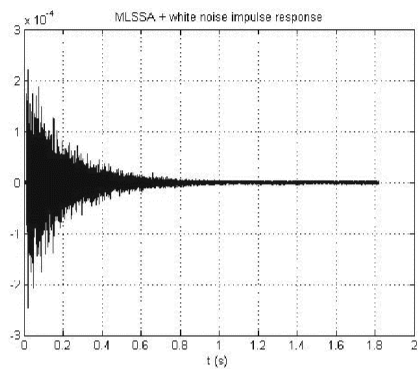
13^η μέτρηση αίθουσας Γ ΤΕΙ (θέση 13)

Κρουστική και συγχοτική απόκριση για κάθε θέση μέτρησης της αίθουσας Γ - Τ.Ε.Ι. Ρεθύμνου

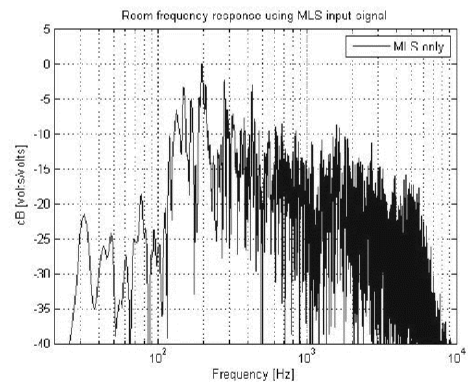
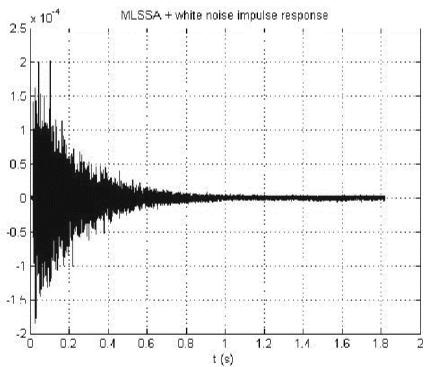
1



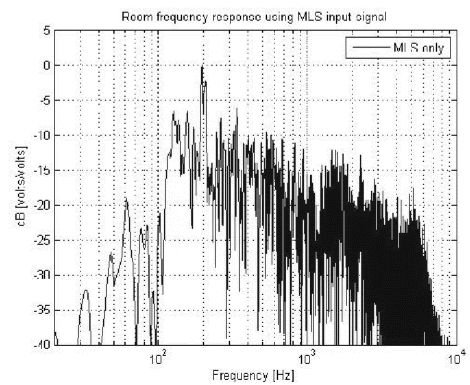
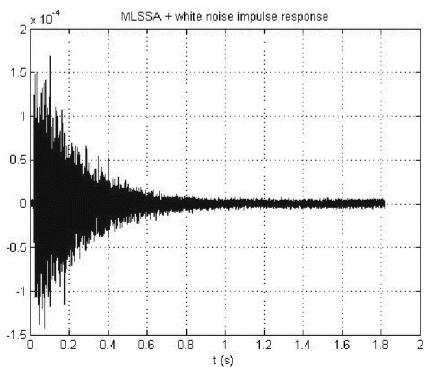
2



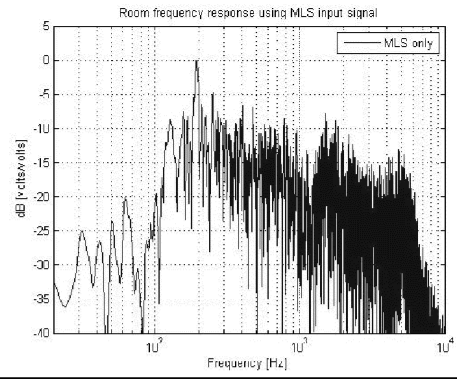
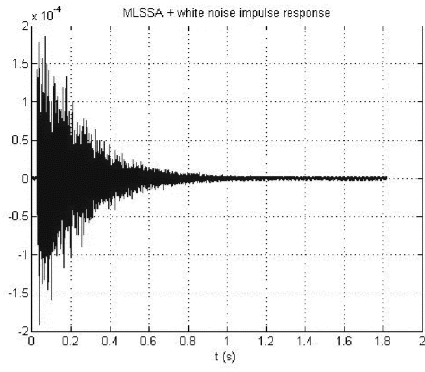
3



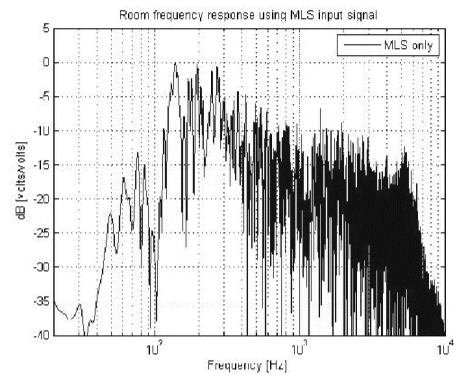
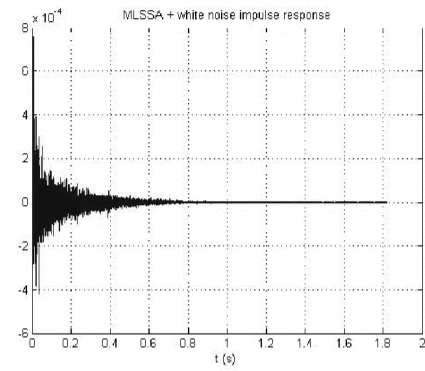
4



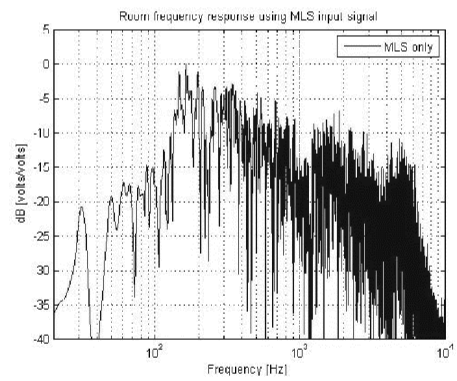
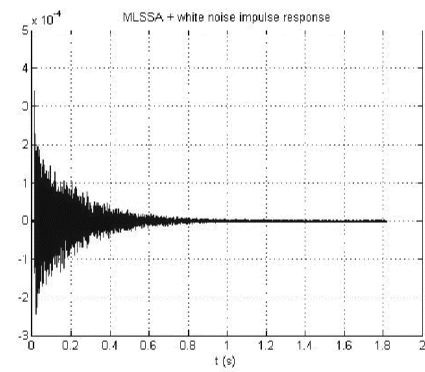
5



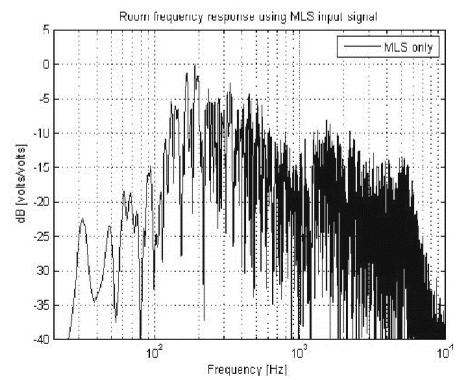
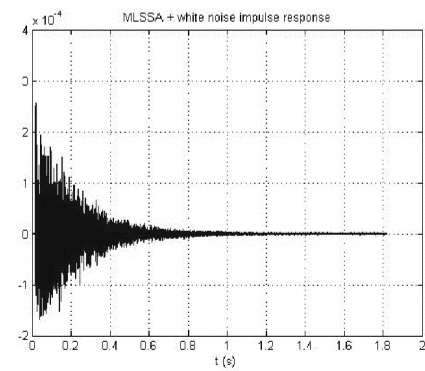
6



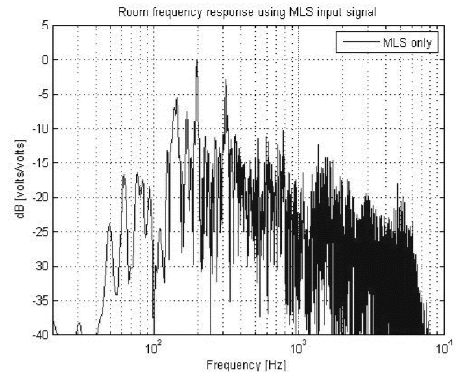
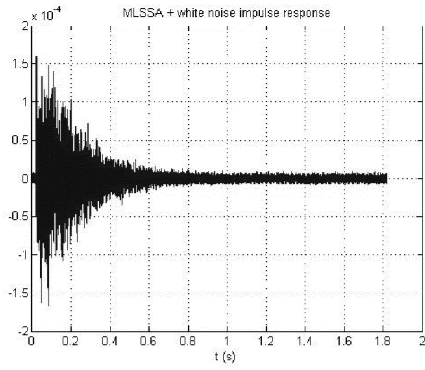
7



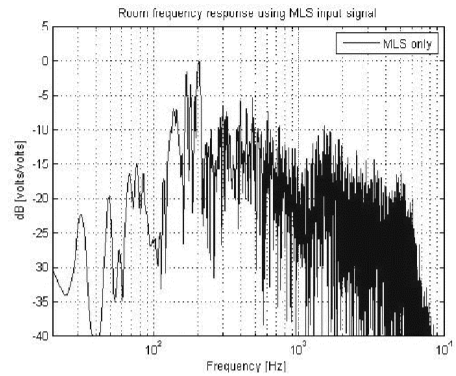
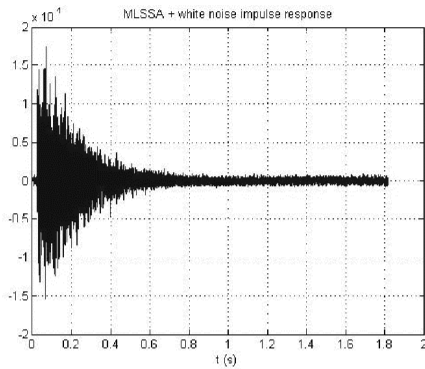
8



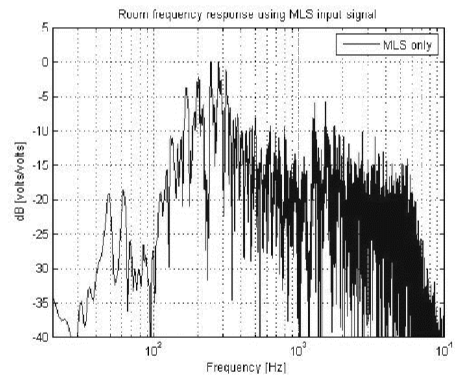
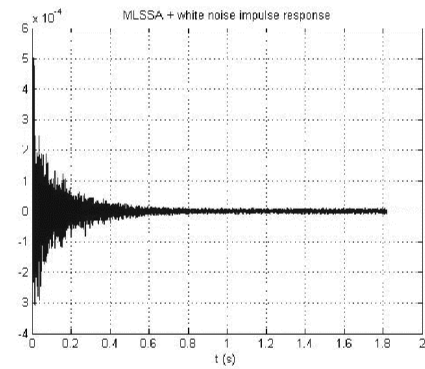
9



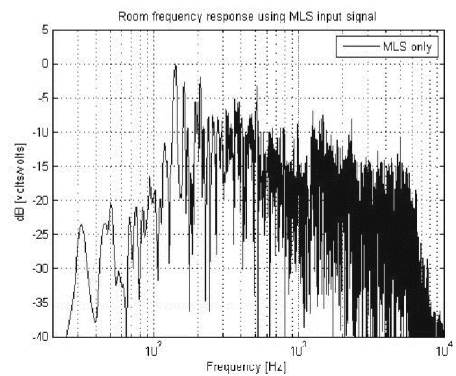
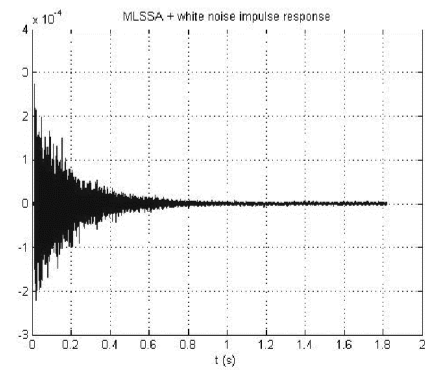
10



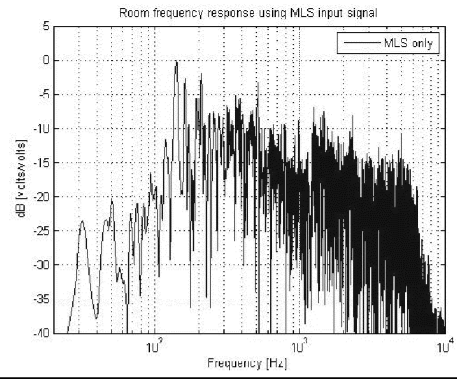
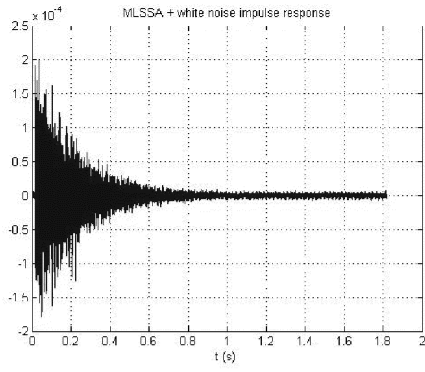
11



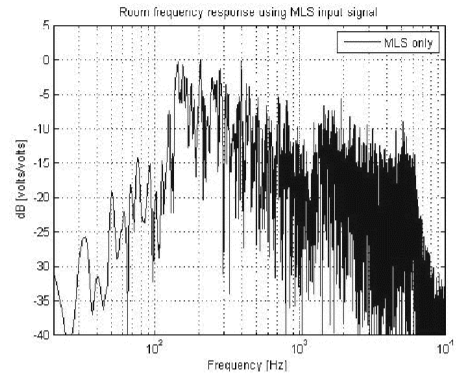
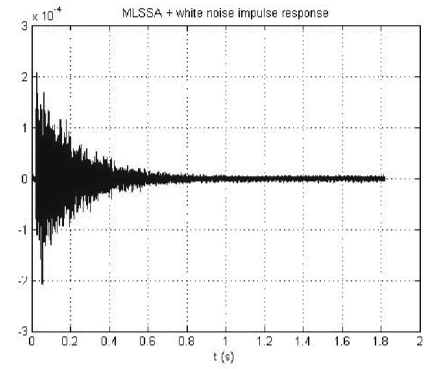
12



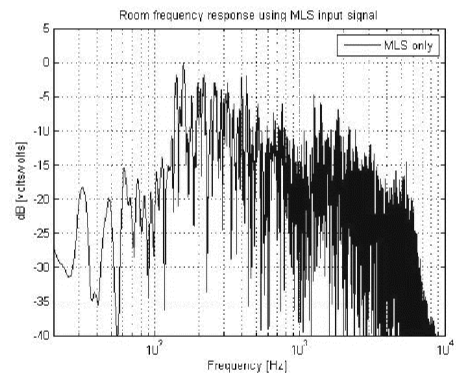
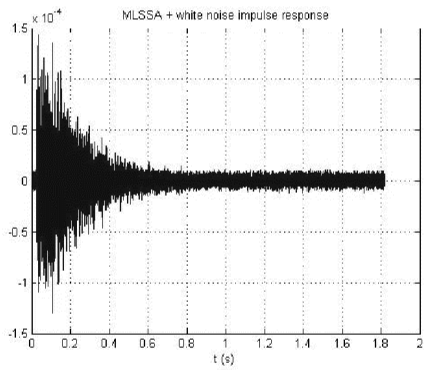
13



14



15



**Μετρήσεις MLSSA αίθουσας Πολλαπλών Χρήσεων 14^ο Δημοτικού Σχολείου
Ρεθύμνου**

Παράμετροι	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S (dBspl)	21.8	35.4	39.2	37.1	35.5	36.7	36.1	30.6
N (dBspl)	0.7	5.5	12.5	12.1	14	15.8	14.6	8.4
SNR (dB)	21.1	29.9	26.8	25	21.5	20.9	21.5	22.3
C50 (dB)	-2.8	-4.06	-3.75	0.28	2.44	3.24	4.04	5.25
C80 (dB)	0.82	-1.93	-1.31	3.72	5.06	5.62	6.9	8.78
D50 (%)	34.4	28.2	29.6	51.6	63.7	67.8	71.7	77
TS (msec)	158.4	136.4	116.9	76.2	55.7	50.5	44.3	35.3
EDT-10dB(s)	2.665	1.89	1.5	1.14	0.938	0.909	0.75	0.579
RT-20dB (s)	3.952	1.757	1.524	1.544	1.185	1.118	0.966	0.816
(-5:-25) r	-0.977	-0.998	-0.998	-0.996	-0.998	-1	-1	-0.999
RT-30dB (s)	T	2.156	1.541	3.2	1.114	1.091	1.046	0.845
(-5:-35) r	T	-0.99	-0.999	-0.931	-0.997	-1	-0.998	-0.999
RT-user (s)	4.016	1.773	1.601	1.666	1.251	1.127	0.973	0.837
(-10:-25) r	-0.924	-0.997	-0.998	-0.996	-0.998	-0.999	-0.999	-0.999

1^η μέτρηση στο 14^ο δημοτικό σχολείο

Παράμετροι	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S (dBspl)	21.4	35.9	39.5	37.7	35.2	37.4	36.3	30
N (dBspl)	6.5	5.2	11.9	13	13.2	15.3	14	7.4
SNR (dB)	15	30.7	27.6	24.8	22	22.1	22.3	22.5
C50 (dB)	-0.07	0.71	0.44	1.21	2.09	3.1	3.45	3.87
C80 (dB)	1.67	1.67	2.13	3.18	4.42	5.38	6.1	7.03
D50 (%)	49.6	54.1	52.5	56.9	61.8	67.1	68.9	70.9
TS (msec)	134.7	82.3	89.1	77.9	61.4	54.3	46.2	41.9
EDT-10dB(s)	2.611	1.301	1.551	1.281	1.115	1.033	0.82	0.702
RT-20dB (s)	3.336	1.958	1.572	1.415	1.259	1.115	0.999	0.852
(-5:-25) r	-0.985	-0.990	-0.991	-0.999	-1	-1	-1	-0.999
RT-30dB (s)	3.933	2.007	1.750	1.927	1.918	1.196	0.996	0.856
(-5:-35) r	-0.973	-0.997	-0.994	-0.983	-0.997	-0.999	-1	-1
RT-user (s)	3.898	2.183	1.773	1,455	1.275	1.114	1.022	0.881
(-10:-25) r	-0.975	-0.993	-0.995	-0.999	-0.999	-1	-1	-0.999

2^η μέτρηση στο 14^ο δημοτικό σχολείο

Παράμετροι	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S (dBspl)	17.7	33.1	38	36.6	35	35.3	35	29.9
N (dBspl)	3.2	0.7	11	12.7	13	15.2	14.2	7.7
SNR (dB)	14.5	32.4	27	24	22	20.2	20.8	22.2
C50 (dB)	-4.64	-2.75	-2.64	-1.07	1.6	0.44	2.45	4.44
C80 (dB)	-1.91	0.02	-0.22	0.89	4.98	3.52	5.46	7.95
D50 (%)	25.6	35.6	35.2	43.9	59.1	52.5	63.7	73.5
TS (msec)	163.7	124.9	115.9	92.6	62	70.8	53.7	38.8
EDT-10dB(s)	2.577	1.986	1.556	1.258	0.932	1.069	0.848	0.639
RT-20dB (s)	1.722	1.890	1.590	1.426	1.251	1.154	0.975	0.836
(-5:-25) r	-0.983	-0.995	-0.997	-0.997	-0.999	-0.999	-1	-0.999
RT-30dB (s)	1.630	2.175	1.670	1.669	1.282	1.138	0.982	0.844
(-5:-35) r	-0.986	-0.995	-0.998	-0.993	-0.999	-0.999	-0.999	-1
RT-user (s)	1.380	1.949	1.541	1.287	1.287	1.173	0.989	0.846
(-10:-25) r	-0.998	-0.991	-0.995	-0.996	-0.998	-0.999	-1	-1

3^η μέτρηση στο 14^ο δημοτικό σχολείο

Παράμετροι	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S (dBspl)	20.7	34.3	38.9	36.9	33.1	35.7	35.2	29
N (dBspl)	-2.9	2.7	8.2	9.8	11.1	13.5	12.2	5.9
SNR (dB)	23.6	31.7	30.7	27.2	22	22.2	23	23.1
C50 (dB)	-7.76	-7.02	-4.03	0.25	-1.24	-0.2	1.38	1.85
C80 (dB)	-2.94	-0.66	-1.06	2.21	1.26	3.34	4.8	6.12
D50 (%)	14.3	16.6	28.3	51.4	42.9	48.9	57.9	60.5
TS (msec)	214.8	124	116.7	85.2	89.2	75.7	59.8	50.5
EDT-10dB(s)	2.714	1.452	1.386	1.386	1.223	1.026	0.855	0.703
RT-20dB (s)	3.899	1.876	1.568	1.370	1.367	1.191	1.050	0.932
(-5:-25) r	-0.995	-0.995	-0.999	-0.999	-0.999	-0.999	-1	-0.999
RT-30dB (s)	T	1.811	1.668	1.9	1.363	1.160	1.079	0.949
(-5:-35) r	T	-0.998	0.999	0.982	-1	-0.999	-1	-1
RT-user (s)	3.868	2.011	1.548	1.402	1.359	1.152	1.065	0.971
(-10:-25) r	-0.991	-0.992	-0.977	-0.999	-0.999	-0.999	-1	-1

4^η μέτρηση στο 14^ο δημοτικό σχολείο

Παράμετροι	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S (dBspl)	23.5	35.8	38.4	35.5	33.7	35	33.9	28
N (dBspl)	0.6	1.3	7.3	10.1	9.6	12	11.5	5.4
SNR (dB)	22.9	34.5	31.1	25.4	24.4	23	22.4	22.5
C50 (dB)	-3.25	-0.27	-4.91	-2.9	-1.66	-1.13	0.33	2.6
C80 (dB)	-0.22	2.10	-1.13	0.47	1.27	2.35	3.65	5.19
D50 (%)	32.1	48.4	24.4	33.9	40.6	43.5	51.9	64.6
TS (msec)	174.1	100.7	127.6	108.6	88.6	83.2	69.3	53.6
EDT-10dB(s)	2.526	1.528	1.625	1.528	1.155	1.091	0.95	0.813
RT-20dB (s)	4.096	2.108	1.663	1.387	1.288	1.185	1.052	0.882
(-5:-25) r	-0.995	-0.995	-0.995	-0.998	-0.998	-1	-1	-1
RT-30dB (s)	T	2.081	1.657	1.328	1.36	1.293	1.061	0.856
(-5:-35) r	T	-0.997	-0.998	-0.998	-0.998	-0.998	-1	-0.999
RT-user (s)	4.201	2.241	1.815	1.314	1.286	1.190	1.072	0.901
(-10:-25) r	-0.993	-0.992	-0.997	-0.998	-0.999	-0.999	-1	-1

5^η μέτρηση στο 14^ο δημοτικό σχολείο

Παράμετροι	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S (dBspl)	19	31.2	37.1	36	32.5	33.5	32.3	26.1
N (dBspl)	0.9	5.5	11.1	19.5	19.7	18.6	16.1	8.8
SNR (dB)	18.1	25.7	26	16.5	12,8	14.9	16.1	17.2
C50 (dB)	-6.09	-6.74	-1.32	-0.03	-2.32	-1.74	0.12	0.7
C80 (dB)	-3.16	-0.84	1.52	2.07	1.38	2.08	3.23	3.62
D50 (%)	19.7	17.5	42.5	49.8	37	40.1	50.7	54
TS (msec)	245.5	147.8	111.3	85.1	89.5	86.6	72.3	66.4
EDT-10dB(s)	3.354	1.808	1.608	1.152	1.108	1.119	0.874	0.773
RT-20dB (s)	4.64	2.099	1.936	1.363	1.061	1.198	1.031	0.943
(-5:-25) r	-0.990	-0.994	-0.985	-0.997	-0.999	-0.998	-1	-0.997
RT-30dB (s)	T	2.192	3.236	1.760	1.036	1.219	0.997	2.543
(-5:-35) r	T	-0.997	-0.962	-0.981	-0.996	-0.999	0.998	-0.898
RT-user (s)	4.64	2.227	2.144	1.312	1.034	1.034	1.042	0.987
(-10:-25) r	-0.981	-0.993	-0.977	-0.997	-0.999	-0.999	-1	-0.998

6^η μέτρηση στο 14^ο δημοτικό σχολείο

Παράμετροι	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S (dBspl)	18.5	31.1	36	35.2	33.8	33.4	32.6	26
N (dBspl)	4.5	-0.8	9.9	7.5	8.9	10.7	10.7	4.4
SNR (dB)	14	32	26.2	27.7	24.8	22.7	21.9	21.7
C50 (dB)	-2.19	-5.65	-5.46	-0.91	1.01	-1.13	0.23	1.73
C80 (dB)	0.21	-2.69	-1.61	1.95	3,15	2.1	3.26	4,58
D50 (%)	37.7	21.4	22.2	44.8	55.8	43.5	51.3	59.8
TS (msec)	136.8	165.8	135.8	94.9	76.7	88.2	69.9	61.4
EDT-10dB(s)	2.193	2.312	1.72	1.392	1.162	1.193	0.922	0.81
RT-20dB (s)	1.617	1.72	1.651	1.494	1.308	1.258	1.051	0.912
(-5:-25) r	-0.99	-0.997	-0.998	-0.999	-1	-1	-1	-0.999
RT-30dB (s)	1.49	2.081	1.531	1.495	1.283	1.314	1.015	0.933
(-5:-35) r	-0.986	-0.992	-0.995	-0.999	-1	-0.999	-0.999	-0.999
RT-user (s)	1.364	1.776	1.6	1.507	1.331	1.272	1.062	1.424
(-10:-25) r	-0.991	-0.995	-0.996	-0.998	-0.999	-0.999	-1	-0.999

7^η μέτρηση στο 14^ο δημοτικό σχολείο

Παράμετροι	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S (dBspl)	19.8	35.2	36.7	35.5	32.6	34.5	33.2	27.2
N (dBspl)	1.4	1.7	8.4	10.3	10.4	12.8	11.9	5.5
SNR (dB)	18.4	33.5	28.4	25	22.1	21.7	21.3	21.7
C50 (dB)	-6.28	-6.26	-4.78	0.16	-1.07	-0.62	0.6	1.65
C80 (dB)	-4.64	-2.72	-1.81	2.19	0.97	1.78	3.46	4.32
D50 (%)	19.1	19.1	24.9	50.9	43.9	46.4	53.5	59.4
TS (msec)	249.2	131.7	143.2	90.4	95.4	84.2	69.3	57
EDT-10dB(s)	3.162	1.527	1.832	1.341	1.323	1.141	1.103	0.862
RT-20dB (s)	T	2.119	1.658	1.538	1.315	1.214	1.076	0.902
(-5:-25) r	T	-0.994	-0.998	-0.998	-0.998	-0.999	-0.999	-0.998
RT-30dB (s)	T	2.286	1.584	1.481	1.611	1.296	1.056	0.926
(-5:-35) r	T	-0.996	-0.999	-0.999	-0.991	-0.999	-1	-0.999
RT-user (s)	T	2.3	1.714	1.571	1.368	1.245	1.115	0.949
(-10:-25) r	T	-0.995	-0.994	-0.995	-0.999	-0.999	-1	-0.999

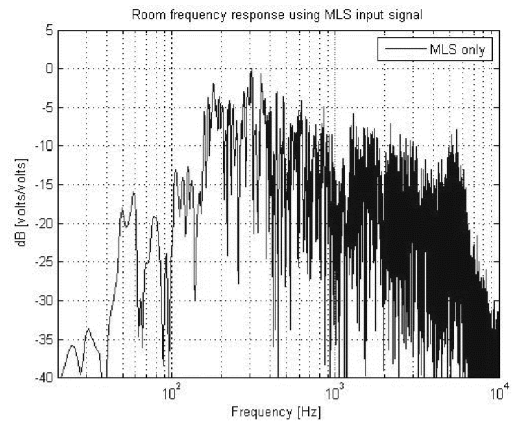
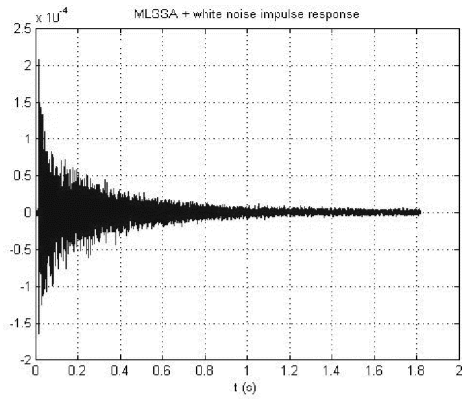
8^η μέτρηση στο 14^ο δημοτικό σχολείο

Παράμετροι	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S (dBspl)	20.4	32.9	37.7	35.6	33.1	35.2	33.5	27.5
N (dBspl)	2.7	-1.6	8.1	8.8	9.2	11.3	11.2	4.6
SNR (dB)	17.7	34.5	29.7	26.8	23.9	24	22.3	22.9
C50 (dB)	-2.06	-6.7	-3.63	-3.17	-1.43	-1.43	0.21	2.43
C80 (dB)	-0.16	-2.74	1.15	-1.11	1.05	2.03	3.32	5.44
D50 (%)	38.3	17.6	30.2	32.5	41.9	41.8	51.2	63.6
TS (msec)	171.2	155	107.3	114.4	93.8	85.7	71.9	54.2
EDT-10dB(s)	2.657	1.82	1.459	1.431	1.25	1.066	1.033	0.817
RT-20dB (s)	2.512	2.282	1.756	1.415	1.317	1.21	1.053	0.909
(-5:-25) r	-0.995	-0.995	-0.996	-0.999	-0.999	-1	-1	-0.999
RT-30dB (s)	2.437	2.281	1.691	1.61	1.981	1.619	1.034	0.941
(-5:-35) r	-0.995	-0.998	-0.999	-0.999	-0.970	-0.984	-0.999	-1
RT-user (s)	2.331	2.42	1.738	1.453	1.376	1.221	1.064	0.896
(-10:-25) r	-0.994	-0.997	-0.992	-0.998	-0.999	-0.999	-0.999	-0.999

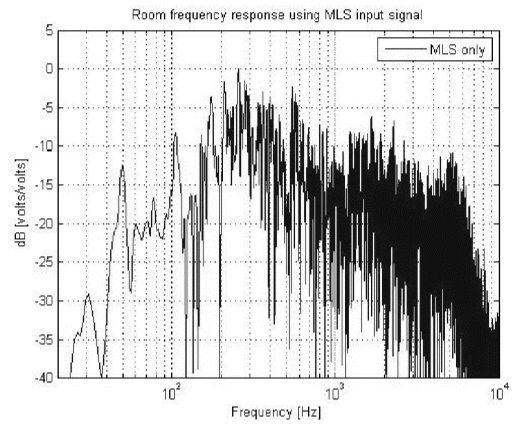
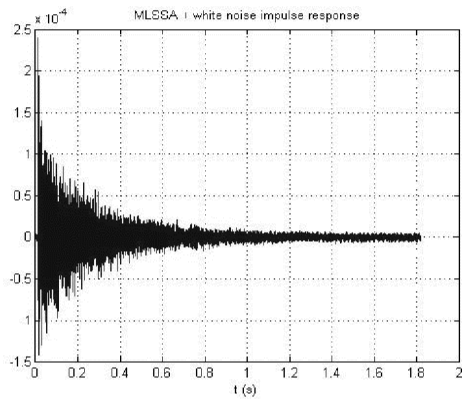
9^η μέτρηση στο 14^ο δημοτικό σχολείο

Κρουστικές και συγχοτικές αποκρίσεις αίθουσας Πολλαπλών Χρήσεων 14⁰⁰ Δημοτικού Σχολείου Ρεθύμνου

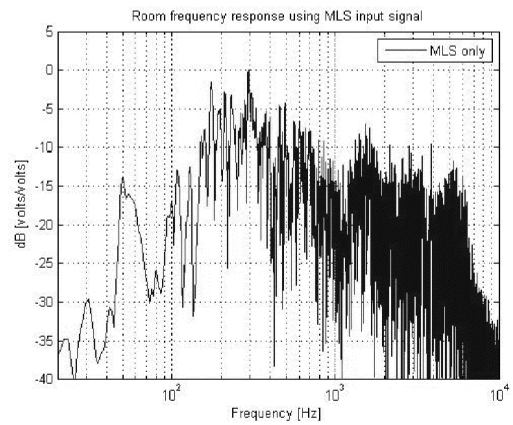
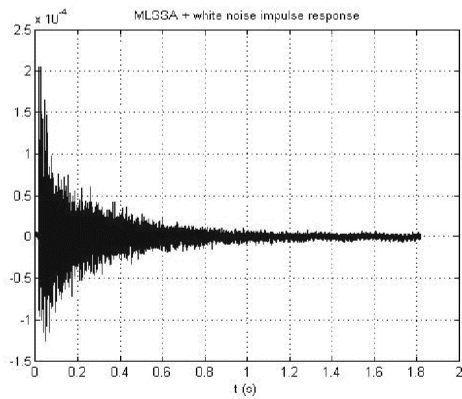
1



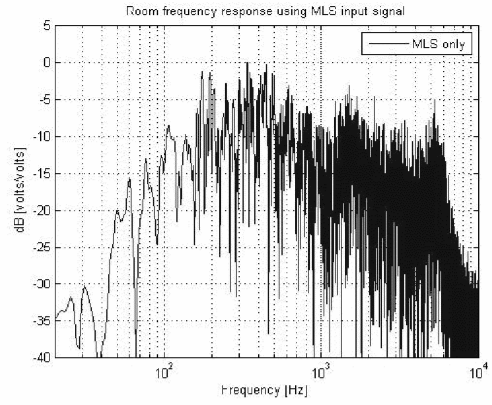
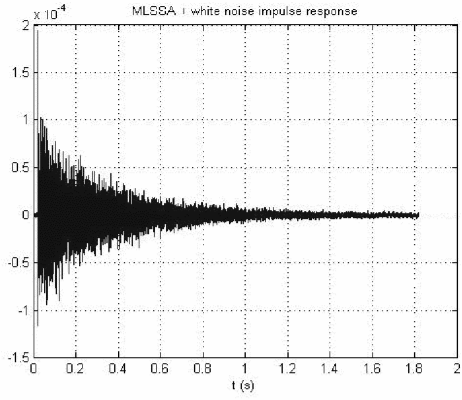
2



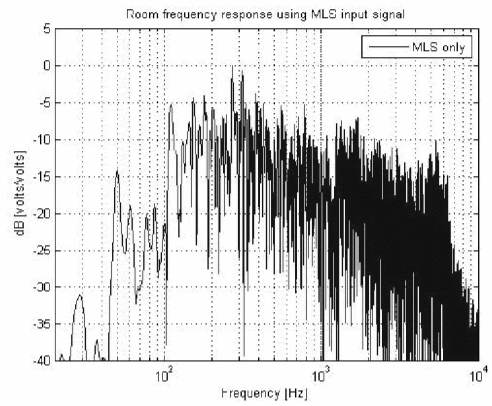
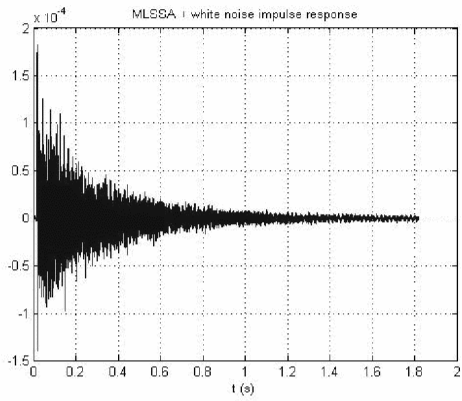
3



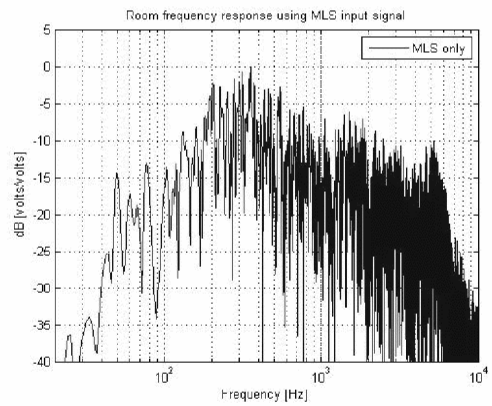
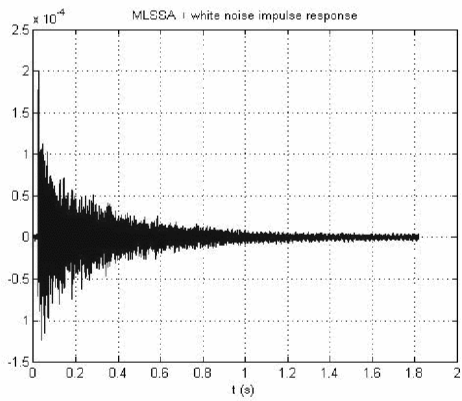
4



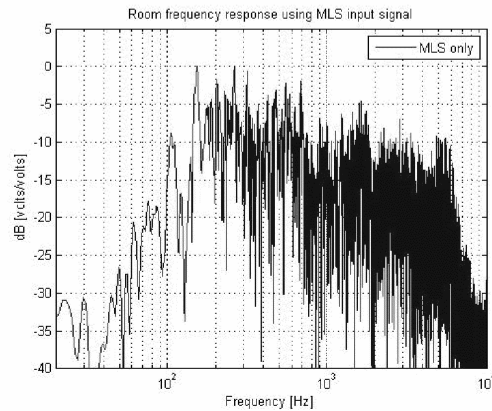
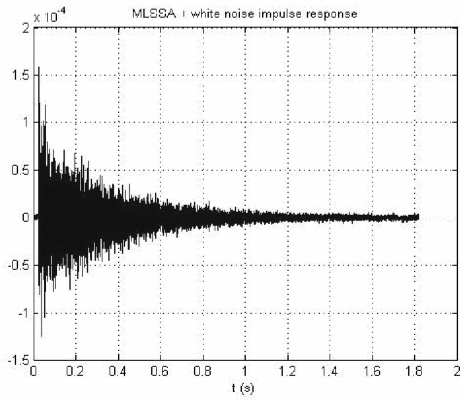
5



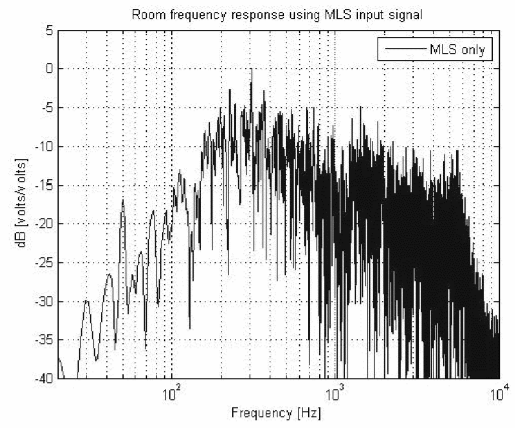
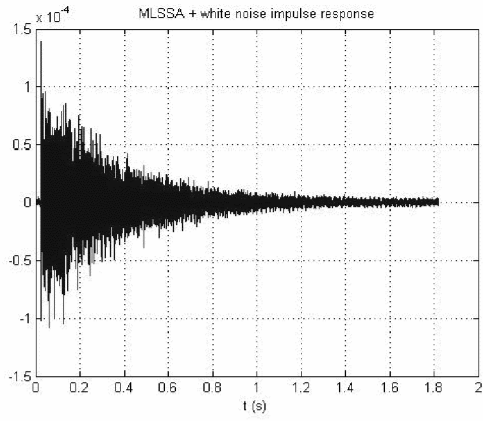
6



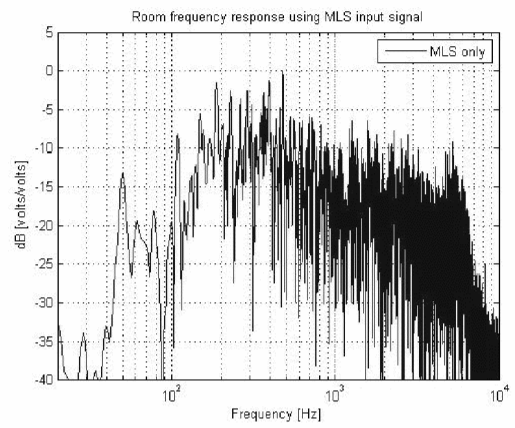
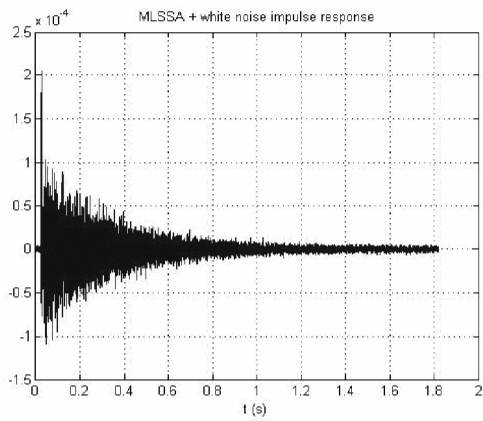
7



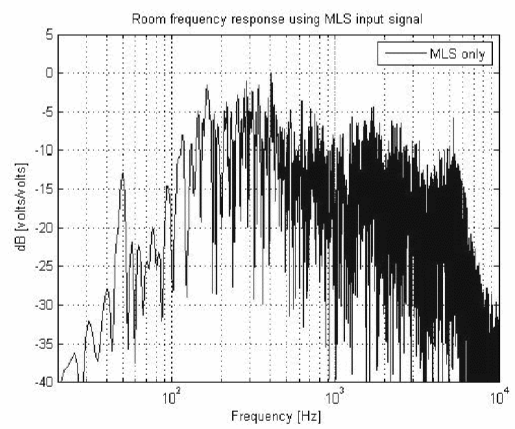
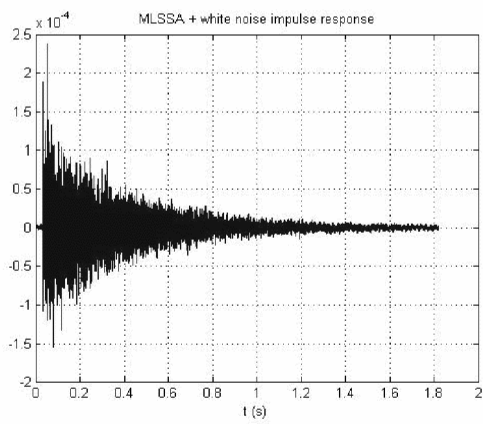
8



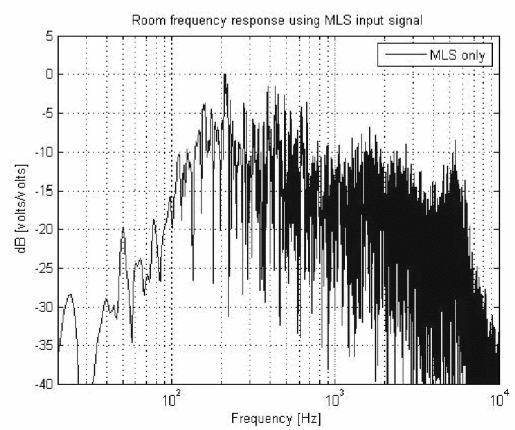
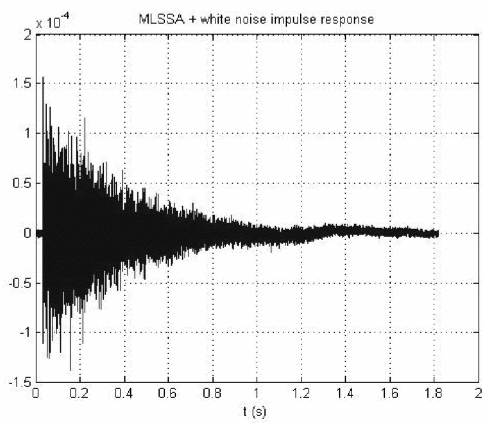
9



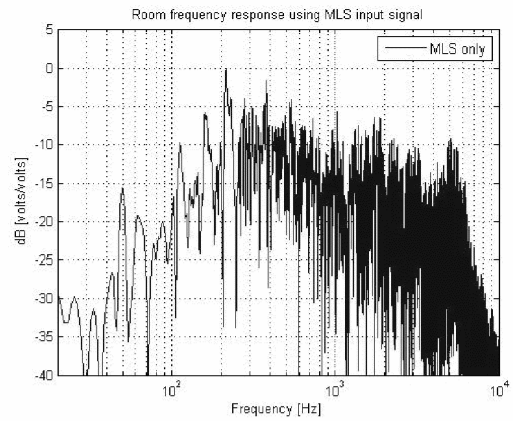
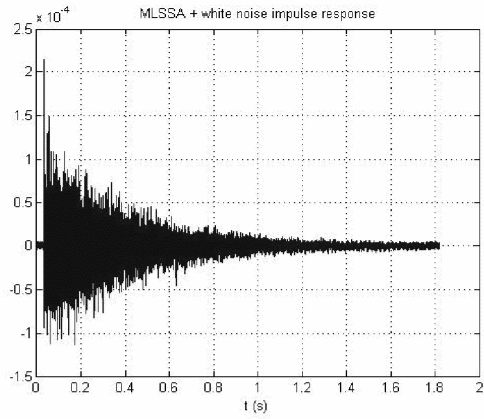
10



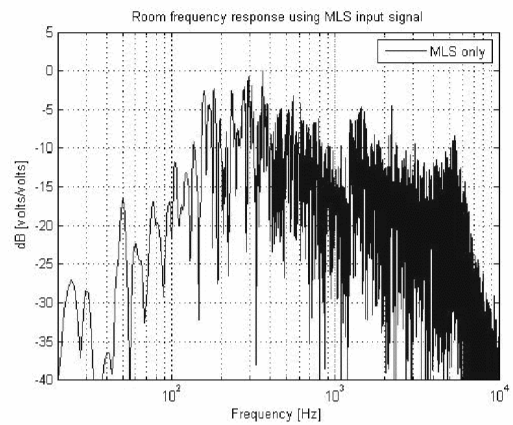
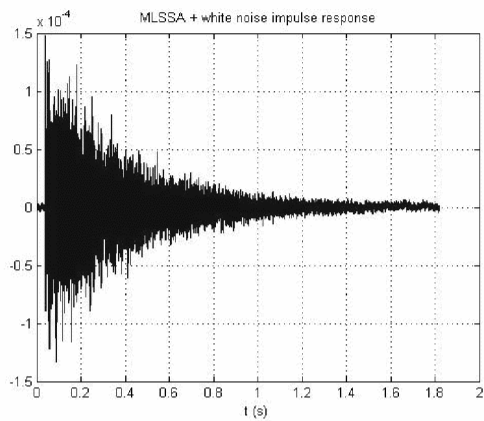
11



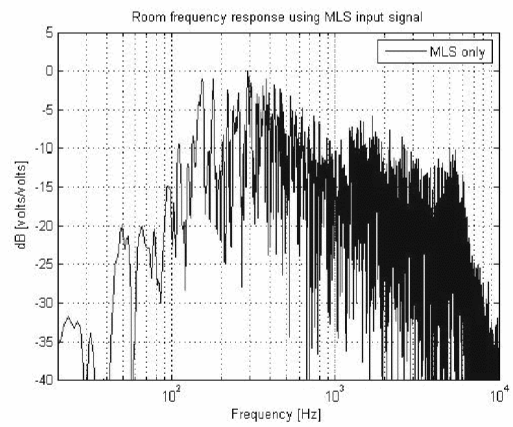
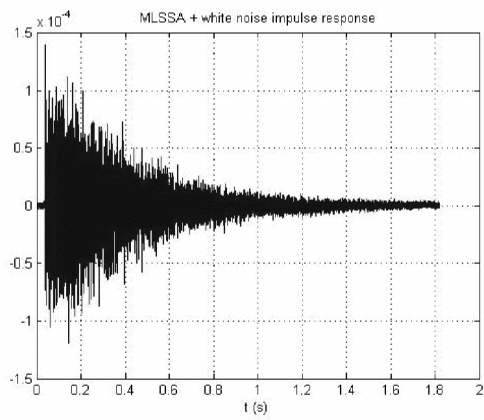
12



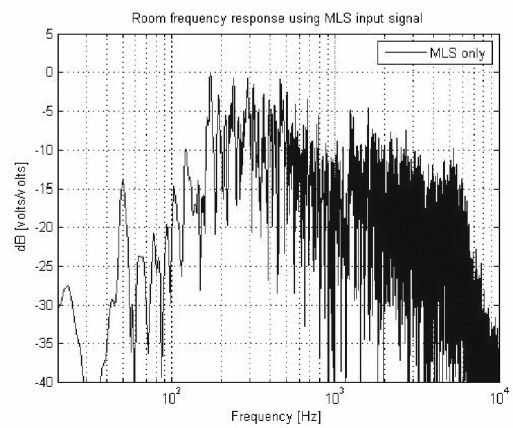
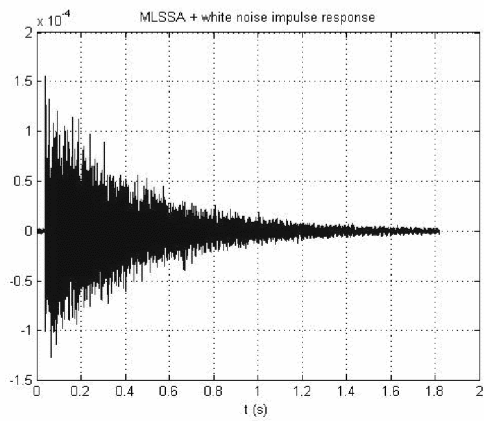
13



14



15



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Αίθουσα Β - Τ.Ε.Ι. Ρεθύμνου

Back [dB] 38,1 38,6 35,5 30,1 29,0 22,1 (background noise level)

Πριν την ακουστική μελέτη			Μετά την ακουστική μελέτη		
-----			-----		
-			-		
RASTI	With background noise		RASTI	With background noise	
-----			-----		
-			-		
01	56,6 (FAIR)	56,6 (FAIR)	01	76,0 (GOOD/EXC.)	76,0(GOOD/EXC.)
02	54,1 (FAIR)	54,1 (FAIR)	02	72,4 (GOOD)	72,4 (GOOD)
03	54,1 (FAIR)	54,1 (FAIR)	03	71,7 (GOOD)	71,7 (GOOD)
04	53,4 (FAIR)	53,4 (FAIR)	04	73,2 (GOOD)	73,2 (GOOD)
05	53,5 (FAIR)	53,5 (FAIR)	05	72,0 (GOOD)	72,0 (GOOD)
06	57,4 (FAIR)	57,4 (FAIR)	06	77,8 (EXCELLENT.)	77,8 (EXCELLENT.)
07	55,3 (FAIR)	55,3 (FAIR)	07	75,1 (GOOD/EXC)	75,1 (GOOD/EXC)
08	54,4 (FAIR)	54,4(FAIR)	08	73,2 (GOOD/EXC.)	73,2 (GOOD/EXC.)
09	52,9 (FAIR)	52,9 (FAIR)	09	73,4 (GOOD/EXC.)	73,4 (GOOD/EXC.)
10	53,7 (FAIR)	53,7 (FAIR)	10	71,5 (GOOD)	71,5 (GOOD)
11	55,9 (FAIR)	55,9 (FAIR)	11	75,5 (GOOD/EXC.)	75,5 (GOOD/EXC.)
12	54,2 (FAIR)	54,2 (FAIR)	12	73,5 (GOOD)	73,5 (GOOD)
MAX :	57,4 (FAIR)	57,4 (FAIR)	MAX :	77,8 (EXCELLENT)	77,8 (EXCELLENT)
MEAN:	54,5 (FAIR)	54,5 (FAIR)	MEAN:	73,6 (GOOD)	73,6 (GOOD)
MIN :	52,9 (FAIR)	52,9 (FAIR)	MIN :	71,5 (GOOD)	71,5 (GOOD)
-----			-----		
-			-		
STIuser	With background noise		STIuser	With background noise	
-----			-----		
-			-		
01	58,1 (FAIR)	58,1 (FAIR)	01	77,4 (EXCELLENT)	77,4 (EXCELLENT)

02	55,6 (FAIR)	55,6 (FAIR)	02	74,0 (GOOD/EXC.)	74,0 (GOOD/EXC.)		
03	55,4 (FAIR)	55,4 (FAIR)	03	72,8 (GOOD/EXC.)	72,8 (GOOD/EXC.)		
04	54,5 (FAIR)	54,5 (FAIR)	04	74,9 (GOOD/EXC.)	74,9 (GOOD/EXC.)		
05	54,7 (FAIR)	54,7 (FAIR)	05	73,8 (GOOD)	73,8 (GOOD)		
06	59,0 (FAIR)	59,0 (FAIR)	06	79,4 (EXCELLENT)	79,4 (EXCELLENT)		
07	56,6 (FAIR)	56,6 (FAIR)	07	76,2 (EXCELLENT)	76,2 (EXCELLENT)		
08	55,6 (FAIR)	55,6 (FAIR)	08	74,5 (GOOD/EXC.)	74,5 (GOOD/EXC.)		
09	54,4 (FAIR)	54,4 (FAIR)	09	74,9 (GOOD/EXC.)	74,8 (GOOD/EXC.)		
10	55,1 (FAIR)	55,0 (FAIR)	10	73,3 (GOOD)	73,3 (GOOD)		
11	57,3 (FAIR)	57,3 (FAIR)	11	76,6 (EXCELLENT)	76,6 (EXCELLENT)		
12	55,8 (FAIR)	55,8 (FAIR)	12	74,7 (GOOD/EXC.)	74,6 (GOOD/EXC.)		
MAX :	59,0 (FAIR)	59,0 (FAIR)	MAX :	79,4 (EXCELLENT)	79,3 (EXCELLENT)		
MEAN:	55,8 (FAIR)	55,8 (FAIR)	MEAN:	75,0 (GOOD/EXC.)	74,9 (GOOD/EXC.)		
MIN :	54,4 (FAIR)	54,4 (FAIR)	MIN :	72,8 (GOOD)	72,8 (GOOD)		

-							
Ts [ms]	125	250	500	1k	2k	4k	sum

-							
01	116,6	104,7	100,7	98,9	94,2	80,1	66,2
02	117,8	104,8	102,4	100,9	96,8	81,0	67,0
03	114,8	104,9	100,9	101,0	97,4	81,3	65,8
04	110,7	98,0	95,7	95,3	90,3	75,6	57,3
05	116,1	102,4	99,4	97,9	92,4	78,5	63,0
06	119,6	106,0	102,9	100,1	96,5	80,6	66,8
07	82,5	72,4	69,9	70,5	65,9	52,0	36,6
08	107,2	95,1	90,3	89,3	84,5	71,6	57,1
09	106,1	93,1	90,4	88,8	83,0	69,9	56,5
10	99,5	88,6	86,0	84,2	80,5	65,2	49,5
11	107,2	95,9	92,7	91,1	87,1	72,3	57,7
12	106,1	94,6	91,8	89,0	85,9	72,3	58,0
MAX :	119,6	106,0	102,9	101,0	97,4	81,3	

-							
Ts [ms]	125	250	500	1k	2k	4k	sum

-							
01	34,3	32,8	33,7	32,9	34,3	31,4	26,1
02	32,4	31,2	31,9	30,3	33,9	29,5	24,5
03	31,4	29,2	30,1	28,9	31,1	27,9	23,1
04	23,7	22,3	22,9	21,0	24,1	21,2	16,1
05	28,1	26,7	28,0	26,1	28,1	24,9	20,2
06	32,8	30,8	31,2	30,9	32,4	29,4	24,3
07	15,1	13,8	14,2	13,0	15,5	13,0	9,5
08	28,6	26,7	27,8	27,1	27,9	25,7	20,2
09	32,0	30,1	31,2	30,6	31,3	28,5	23,5
10	21,2	18,9	20,3	18,5	21,3	19,2	14,6
11	27,2	26,4	27,1	26,3	29,0	24,8	19,9
12	35,0	32,3	35,1	32,5	33,8	31,1	25,6
MAX :	35,0	32,8	35,1	32,9	34,3	31,4	

MEAN: 108,7	96,7	93,6	92,3	87,9	73,4			MEAN: 28,5	26,7	27,8	26,5	28,6	25,5		
MIN : 82,5	72,4	69,9	70,5	65,9	52,0			MIN : 15,1	13,8	14,2	13,0	15,5	13,0		
-----								-----							
-								-							
D-50 [%]	125	250	500	1k	2k	4k	sum	D-50 [%]	125	250	500	1k	2k	4k	sum
-----								-----							
-								-							
01	50,3	51,8	53,8	54,1	56,1	58,5	68,7	01	79,9	81,4	80,2	83,5	81,5	84,5	89,0
02	39,9	43,5	46,3	45,6	47,3	50,9	58,4	02	74,6	78,1	75,2	78,1	76,1	79,4	84,8
03	38,8	41,2	44,1	44,6	46,8	48,2	56,2	03	72,1	72,5	73,1	72,5	74,1	77,0	81,8
04	38,5	40,6	42,9	45,1	43,2	45,9	53,2	04	75,2	76,8	75,6	77,9	77,3	80,6	85,1
05	36,7	40,6	42,2	42,8	43,3	45,8	52,6	05	73,4	74,5	72,7	74,3	74,7	78,2	82,8
06	51,4	54,7	57,5	57,4	57,4	62,2	70,5	06	84,4	84,9	84,6	76,8	85,3	87,1	91,5
07	44,8	47,8	50,6	49,8	49,3	55,7	63,5	07	80,0	81,6	82,2	82,8	81,8	84,9	88,9
08	38,3	42,7	45,3	45,0	46,5	49,9	57,5	08	76,8	78,7	77,6	78,9	79,4	81,5	85,9
09	36,2	37,5	40,8	40,2	40,2	46,7	53,6	09	75,9	78,6	77,8	78,2	77,5	81,9	85,6
10	36,1	39,4	41,3	42,8	42,2	47,9	53,3	10	70,6	72,6	71,8	72,4	73,4	78,1	82,1
11	49,2	52,5	52,6	53,4	54,4	57,5	66,8	11	79,2	79,6	79,0	81,2	81,0	83,5	88,2
12	44,7	45,3	48,6	46,3	49,8	50,8	60,5	12	76,2	78,9	77,9	79,8	79,0	82,1	86,5
MAX :	51,4	54,7	57,5	57,4	57,4	62,2		MAX :	84,4	84,9	84,6	86,8	85,3	87,1	
MEAN:	42,1	44,8	47,1	47,2	48,0	51,7		MEAN:	76,0	77,6	77,0	78,5	78,0	81,3	
MIN :	36,1	37,5	40,8	40,2	40,2	45,8		MIN :	70,6	72,5	71,8	72,4	73,4	77,0	
-----								-----							
-								-							
C-80 [dB]	125	250	500	1k	2k	4k	sum	C-80 [dB]	125	250	500	1k	2k	4k	sum
-----								-----							
-								-							
01	1,9	2,5	2,9	2,9	3,1	3,8	5,7	01	10,3	10,7	10,2	11,2	10,7	12,1	14,0
02	0,8	1,2	1,7	1,7	2,0	2,8	4,3	02	8,3	9,3	8,5	9,4	9,0	10,4	12,0
03	0,9	1,4	1,9	2,1	2,2	3,0	4,4	03	7,8	8,0	7,7	7,7	8,3	9,1	10,6
04	0,0	0,6	1,2	1,2	1,4	2,0	3,4	04	7,9	8,3	7,9	8,3	8,7	10,0	11,8

05	-0,1	0,4	0,8	1,0	1,2	1,7	3,0	05	7,6	7,9	7,7	7,9	8,1	9,2	10,6												
06	2,4	2,9	3,4	3,3	3,5	4,4	6,3	06	11,0	11,3	11,1	12,0	11,6	12,7	14,9												
07	1,1	1,7	2,3	2,3	2,4	3,4	5,0	07	9,3	9,7	9,7	9,9	9,9	11,2	13,0												
08	0,7	1,4	1,9	1,8	2,1	3,0	4,4	08	7,8	8,6	8,2	8,7	8,9	9,9	11,4												
09	0,0	0,6	1,1	1,1	1,2	2,1	3,5	09	8,0	8,8	8,6	8,9	8,7	10,2	11,6												
10	0,3	0,9	1,4	1,3	1,6	2,4	3,6	10	7,7	8,3	8,0	8,2	8,2	9,7	11,0												
11	1,9	2,3	2,8	2,6	2,8	3,7	5,6	11	9,4	9,7	9,5	10,0	10,1	11,2	13,0												
12	0,9	1,5	1,9	1,9	2,0	2,8	4,4	12	8,3	9,1	8,7	9,2	9,1	10,2	11,9												
MAX :								2,4	2,9	3,4	3,3	3,5	4,4	MAX :								11,0	11,3	11,1	12,0	11,6	12,7
MEAN:								0,8	1,3	1,8	1,8	2,0	2,8	MEAN:								8,4	8,9	8,7	9,1	9,1	10,3
MIN :								-0,1	0,4	0,8	1,0	1,2	1,7	MIN :								7,3	7,6	7,7	7,7	8,0	9,1

-																											
LF [%]	125	250	500	1k	2k	4k	sum	LF [%]	125	250	500	1k	2k	4k	sum												

-																											
01	33,0	34,8	36,2	35,5	36,1	35,9	36,4	01	35,4	34,6	34,1	35,4	35,1	34,6	33,6												
02	28,2	28,9	29,0	29,8	30,3	29,1	28,7	02	30,8	30,6	30,9	30,0	31,5	33,1	29,5												
03	23,4	23,0	22,7	23,2	22,8	21,1	20,1	03	21,1	21,6	21,0	21,7	21,0	20,2	18,9												
04	19,0	19,9	19,8	19,9	20,0	19,2	17,0	04	14,6	13,4	14,3	14,0	15,1	14,1	11,5												
05	24,2	25,6	25,2	26,1	26,9	26,8	25,0	05	23,7	24,7	25,4	23,1	23,9	23,8	21,2												
06	28,0	29,2	30,9	30,6	31,6	30,9	29,8	06	31,0	29,3	30,6	31,1	31,0	30,7	29,0												
07	13,9	15,0	15,2	15,6	16,1	15,2	13,2	07	11,3	11,3	10,9	10,7	12,1	10,9	9,2												
08	19,4	20,8	21,4	22,6	22,6	23,4	21,7	08	22,9	22,4	23,6	23,5	23,5	23,6	21,7												
09	18,6	19,1	20,5	20,8	21,5	21,3	20,0	09	23,4	23,2	24,6	24,0	24,6	23,7	21,3												
10	21,7	21,2	21,9	21,6	21,5	21,0	18,8	10	16,0	15,6	17,0	15,5	19,1	15,6	14,2												
11	24,2	24,9	26,3	26,3	27,0	26,6	26,0	11	31,6	28,7	32,0	32,3	31,8	30,7	29,3												
12	25,1	26,3	27,2	27,7	29,2	28,4	27,5	12	37,1	39,4	37,1	37,8	37,1	37,8	34,1												
MAX :								33,0	34,8	36,2	35,5	36,1	35,9	MAX :								37,1	39,4	37,1	37,8	37,1	37,8
MEAN:								23,2	24,1	24,7	25,0	25,5	24,9	MEAN:								24,9	24,6	25,1	24,9	25,5	24,9
MIN :								13,9	15,0	15,2	15,6	16,1	15,2	MIN :								11,3	11,3	10,9	10,7	12,1	10,9

-----								-----							
-								-							
G [dB]	125	250	500	1k	2k	4k	sum	G [dB]	125	250	500	1k	2k	4k	sum
-----								-----							
-								-							
01	22,9	22,4	22,3	22,1	22,0	21,3	20,4	01	15,9	15,3	15,6	15,1	16,2	15,6	15,2
02	23,1	22,7	22,5	22,4	22,3	21,7	20,8	02	17,1	16,4	16,8	16,2	17,2	17,0	16,5
03	23,7	23,3	23,2	23,3	23,0	22,4	21,6	03	17,8	17,4	17,7	17,3	18,5	18,1	17,7
04	24,3	24,1	23,9	24,0	23,9	23,3	22,8	04	20,0	19,6	19,9	19,6	20,4	20,0	20,2
05	23,6	23,3	23,1	23,0	22,9	22,2	21,5	05	18,1	17,8	18,1	17,7	18,7	18,3	18,2
06	23,0	22,6	22,5	22,3	22,1	21,5	20,6	06	17,0	16,4	16,5	16,1	17,4	16,8	16,3
07	26,4	26,1	25,9	25,9	25,8	25,5	25,4	07	22,6	22,3	22,4	22,2	22,8	22,6	23,1
08	24,7	24,2	24,0	23,9	23,7	23,1	22,4	08	17,9	17,5	17,8	17,3	18,5	18,0	17,8
09	24,3	23,8	23,6	23,4	23,2	22,6	21,9	09	17,1	16,5	16,8	16,3	17,4	17,0	16,6
10	25,5	25,1	24,9	24,9	24,8	24,3	23,9	10	20,2	20,1	20,0	19,7	20,8	20,2	20,5
11	24,7	24,2	24,0	23,8	23,7	23,1	22,4	11	17,6	17,1	17,5	17,1	17,9	17,6	17,5
12	24,4	23,9	23,6	23,5	23,3	22,7	21,9	12	16,1	15,6	15,7	15,3	16,6	16,0	15,5
MAX :	26,4	26,1	25,9	25,9	25,8	25,5		MAX :	22,6	22,3	22,4	22,2	22,8	22,6	
MEAN:	24,2	23,8	23,6	23,5	23,4	22,8		MEAN:	18,1	17,7	17,9	17,5	18,5	18,1	
MIN :	22,9	22,4	22,3	22,1	22,0	21,3		MIN :	15,9	15,3	15,6	15,1	16,2	15,6	
-----								-----							
-								-							
SPL [dB]	125	250	500	1k	2k	4k	sum	SPL [dB]	125	250	500	1k	2k	4k	sum
-----								-----							
-								-							
01 (A)	72,9	75,4	78,2	81,1	83,9	96,0	97,4	01 (A)	65,9	68,3	71,5	74,1	78,1	90,3	91,7
02 (A)	73,1	75,7	78,5	81,4	84,2	96,4	97,8	02 (A)	67,1	69,4	72,8	75,2	79,1	91,7	93,0
03 (A)	73,7	76,3	79,1	82,2	84,9	100,2	98,5	03 (A)	67,8	70,4	73,7	76,3	80,4	92,8	94,2

04 (A)	74,3	77,1	79,9	82,9	85,8	101,3	99,4		04 (A)	70,0	72,6	75,9	78,6	82,3	94,7	96,1
05 (A)	73,5	76,3	79,0	82,0	84,8	100,0	98,3		05 (A)	68,1	70,8	74,1	76,7	80,6	93,0	94,4
06 (A)	73,0	75,6	78,4	81,3	84,0	96,2	97,6		06 (A)	67,0	69,4	72,5	75,0	79,3	91,5	92,9
07 (A)	76,4	79,1	81,9	84,8	87,7	103,9	101,6		07 (A)	72,6	75,3	78,4	81,2	84,7	101,6	98,7
08 (A)	74,7	77,2	80,0	82,8	85,6	100,9	99,2		08 (A)	67,9	70,5	73,8	76,2	80,4	92,7	94,1
09 (A)	74,3	76,8	79,5	82,3	85,1	100,4	98,7		09 (A)	67,1	69,5	72,8	75,2	79,4	91,7	93,0
10 (A)	75,5	78,1	80,9	83,9	86,7	102,4	100,4		10 (A)	70,1	73,1	76,0	78,6	82,7	94,9	96,3
11 (A)	74,7	77,2	79,9	82,8	85,6	100,9	99,2		11 (A)	67,6	70,1	73,4	76,0	79,8	92,3	93,7
12 (A)	74,4	76,9	79,6	82,5	85,2	100,4	98,8		12 (A)	66,1	68,5	71,7	74,2	78,5	90,7	92,1
MAX :	76,4	79,1	81,9	84,8	87,7	100,2			MAX :	72,6	75,3	78,4	81,2	84,7	97,3	
MEAN:	74,2	76,8	79,6	82,5	85,3	97,5			MEAN:	68,1	70,7	73,9	76,4	80,4	92,8	
MIN :	72,9	75,4	78,2	81,1	83,9	96,0			MIN :	65,9	68,3	71,5	74,1	78,1	90,3	
-----									-----							
-									-							
EDT [s]	125	250	500	1k	2k	4k	sum		EDT [s]	125	250	500	1k	2k	4k	sum
-----									-----							
-									-							
01	1,44	1,31	1,21	1,22	1,16	1,03	---		01	0,64	0,65	0,64	0,65	0,62	0,55	---
02	1,47	1,34	1,24	1,24	1,18	1,03	---		02	0,67	0,67	0,69	0,66	0,63	0,58	---
03	1,47	1,33	1,22	1,21	1,18	1,03	---		03	0,65	0,65	0,68	0,64	0,65	0,59	---
04	1,48	1,34	1,24	1,24	1,20	1,06	---		04	0,65	0,66	0,66	0,67	0,62	0,58	---
05	1,46	1,33	1,23	1,23	1,18	1,05	---		05	0,69	0,67	0,69	0,67	0,62	0,59	---
06	1,43	1,29	1,19	1,22	1,18	1,03	---		06	0,64	0,64	0,64	0,63	0,61	0,53	---
07	1,45	1,31	1,21	1,21	1,18	1,03	---		07	0,67	0,64	0,69	0,65	0,63	0,57	---
08	1,48	1,34	1,23	1,23	1,19	1,04	---		08	0,67	0,65	0,69	0,66	0,65	0,57	---
09	1,47	1,34	1,25	1,25	1,22	1,07	---		09	0,70	0,68	0,69	0,68	0,63	0,58	---
10	1,45	1,32	1,23	1,23	1,19	1,04	---		10	0,66	0,68	0,69	0,68	0,63	0,58	---
11	1,44	1,29	1,19	1,22	1,19	1,03	---		11	0,65	0,66	0,67	0,65	0,63	0,56	---
12	1,47	1,32	1,22	1,22	1,19	1,04	---		12	0,66	0,64	0,67	0,62	0,63	0,55	---

04	1,71	1,67	1,61	1,58	1,52	1,28	---	04	0,55	0,56	0,54	0,56	0,52	0,51	---
05	1,73	1,69	1,65	1,60	1,54	1,29	---	05	0,59	0,57	0,58	0,56	0,55	0,53	---
06	1,74	1,66	1,60	1,59	1,52	1,27	---	06	0,58	0,58	0,59	0,59	0,57	0,52	---
07	1,75	1,69	1,64	1,60	1,52	1,28	---	07	0,57	0,57	0,59	0,55	0,54	0,51	---
08	1,75	1,69	1,65	1,60	1,53	1,29	---	08	0,59	0,56	0,58	0,58	0,56	0,51	---
09	1,74	1,69	1,65	1,61	1,54	1,29	---	09	0,61	0,59	0,64	0,60	0,57	0,52	---
10	1,76	1,71	1,69	1,63	1,55	1,30	---	10	0,57	0,61	0,61	0,59	0,57	0,54	---
11	1,71	1,63	1,58	1,57	1,52	1,28	---	11	0,56	0,58	0,60	0,59	0,57	0,52	---
12	1,71	1,65	1,60	1,57	1,51	1,28	---	12	0,58	0,57	0,58	0,55	0,56	0,51	---
MAX :	1,76	1,71	1,69	1,63	1,55	1,30		MAX :	0,61	0,63	0,64	0,60	0,58	0,54	
MEAN:	1,73	1,67	1,62	1,59	1,52	1,28		MEAN:	0,58	0,58	0,59	0,578	0,56	0,52	
MIN :	1,71	1,63	1,58	1,57	1,50	1,27		MIN :	0,55	0,56	0,54	0,55	0,52	0,51	

Αίθουσα Γ - Τ.Ε.Ι. Ρεθύμνου

Back [dB] 39,4 45,3 44,3 33,7 35,7 30,1 (background noise level)

Πριν την ακουστική μελέτη			Μετά την ακουστική μελέτη		
-----			-----		
-			-		
RASTI	With background noise		RASTI	With background noise	
-----			-----		
-			-		
01	52,2 (FAIR)	52,2 (FAIR)	01	73,8 (GOOD)	73,8 (GOOD)
02	51,4 (FAIR)	51,4 (FAIR)	02	73,0 (GOOD)	73,0 (GOOD)
03	51,5 (FAIR)	51,4 (FAIR)	03	74,6 (GOOD/EXC.)	74,6 (GOOD/EXC.)
04	51,3 (FAIR)	51,3 (FAIR)	04	76,5 (EXCELLENT)	76,5 (EXCELLENT)
05	51,8 (FAIR)	51,8 (FAIR)	05	75,3 (GOOD/EXC.)	75,3 (GOOD/EXC.)
06	51,8 (FAIR)	51,8 (FAIR)	06	74,3 (GOOD/EXC.)	74,3 (GOOD/EXC.)
07	58,9 (FAIR)	58,9 (FAIR)	07	82,1 (EXCELLENT)	82,1 (EXCELLENT)
08	54,5 (FAIR)	54,5 (FAIR)	08	75,8 (GOOD/EXC.)	75,8 (GOOD/EXC.)
09	55,1 (FAIR)	55,1 (FAIR)	09	74,3 (GOOD/EXC.)	74,3 (GOOD/EXC.)
10	55,2 (FAIR)	55,2 (FAIR)	10	79,1 (EXCELLENT)	79,1 (EXCELLENT)
11	54,1 (FAIR)	54,1 (FAIR)	11	75,3 (GOOD/EXC.)	75,3 (GOOD/EXC.)
12	54,5 (FAIR)	54,5 (FAIR)	12	71,6 (GOOD)	71,6 (GOOD)
MAX :	58,9 (FAIR)	58,9 (FAIR)	MAX :	82,1 (EXCELLENT)	82,1 (EXCELLENT)
MEAN:	53,5 (FAIR)	53,5 (FAIR)	MEAN:	75,5 (GOOD/EXC.)	75,5 (GOOD/EXC.)
MIN :	51,3 (FAIR)	51,3 (FAIR)	MIN :	71,6 (GOOD)	71,6 (GOOD)
-----			-----		
-			-		
STIuser	With background noise		STIuser	With background noise	
-----			-----		
-			-		
01	54,2 (FAIR)	54,2 (FAIR)	01	74,8 (GOOD/EXC.)	74,7 (GOOD/EXC.)
02	53,5 (FAIR)	53,5 (FAIR)	02	74,4 (GOOD/EXC.)	74,3 (GOOD/EXC.)
03	53,5 (FAIR)	53,5 (FAIR)	03	75,7 (GOOD/EXC.)	75,6 (GOOD/EXC.)
04	53,4 (FAIR)	53,4 (FAIR)	04	77,8 (EXCELLENT)	77,7 (EXCELLENT)

05	53,6 (FAIR)	53,5 (FAIR)	05	76,5 (EXCELLENT)	76,5 (EXCELLENT)		
06	53,9 (FAIR)	53,9 (FAIR)	06	75,3 (GOOD/EXC.)	75,2 (GOOD/EXC.)		
07	61,1 (GOOD)	61,1 (GOOD)	07	83,3 (EXCELLENT)	83,3 (EXCELLENT)		
08	56,3 (FAIR)	56,3 (FAIR)	08	76,6 (EXCELLENT)	76,6 (EXCELLENT)		
09	57,0 (FAIR)	57,0 (FAIR)	09	75,2 (GOOD/EXC.)	75,2 (GOOD/EXC.)		
10	57,4 (FAIR)	57,4 (FAIR)	10	80,3 (EXCELLENT)	80,2 (EXCELLENT)		
11	56,2 (FAIR)	56,2 (FAIR)	11	76,7 (EXCELLENT)	76,6 (EXCELLENT)		
12	56,6 (FAIR)	56,6 (FAIR)	12	72,9 (GOOD)	72,7 (GOOD)		
MAX :	61,1 (GOOD)	61,1 (GOOD)	MAX :	83,3 (EXCELLENT)	83,3 (EXCELLENT)		
MEAN:	55,6 (FAIR)	55,6 (FAIR)	MEAN:	76,6 (EXCELLENT)	76,6 (EXCELLENT)		
MIN :	53,4 (FAIR)	53,4 (FAIR)	MIN :	72,9 (GOOD)	72,7 (GOOD)		

-							
Ts [ms]	125	250	500	1k	2k	4k	sum

-							
01	116,6	104,7	100,7	98,9	94,2	80,1	66,2
02	117,8	104,8	102,4	100,9	96,8	81,0	67,0
03	114,8	104,9	100,9	101,0	97,4	81,3	65,8
04	110,7	98,0	95,7	95,3	90,3	75,6	57,3
05	116,1	102,4	99,4	97,9	92,4	78,5	63,0
06	119,6	106,0	102,9	100,1	96,5	80,6	66,8
07	82,5	72,4	69,9	70,5	65,9	52,0	36,6
08	107,2	95,1	90,3	89,3	84,5	71,6	57,1
09	106,1	93,1	90,4	88,8	83,0	69,9	56,5
10	99,5	88,6	86,0	84,2	80,5	65,2	49,5
11	107,2	95,9	92,7	91,1	87,1	72,3	57,7
12	106,1	94,6	91,8	89,0	85,9	72,3	58,0
MAX :	119,6	106,0	102,9	101,0	97,4	81,3	
MEAN:	108,7	96,7	93,6	92,3	87,9	73,4	
MIN :	82,5	72,4	69,9	70,5	65,9	52,0	

-							
Ts [ms]	125	250	500	1k	2k	4k	sum

-							
01	34,3	32,8	33,7	32,9	34,3	31,4	26,1
02	32,4	31,2	31,9	30,3	33,9	29,5	24,5
03	31,4	29,2	30,1	28,9	31,1	27,9	23,1
04	23,7	22,3	22,9	21,0	24,1	21,2	16,1
05	28,1	26,7	28,0	26,1	28,1	24,9	20,2
06	32,8	30,8	31,2	30,9	32,4	29,4	24,3
07	15,1	13,8	14,2	13,0	15,5	13,0	9,5
08	28,6	26,7	27,8	27,1	27,9	25,7	20,2
09	32,0	30,1	31,2	30,6	31,3	28,5	23,5
10	21,2	18,9	20,3	18,5	21,3	19,2	14,6
11	27,2	26,4	27,1	26,3	29,0	24,8	19,9
12	35,0	32,3	35,1	32,5	33,8	31,1	25,6
MAX :	35,0	32,8	35,1	32,9	34,3	31,4	
MEAN:	28,5	26,7	27,8	26,5	28,6	25,5	
MIN :	15,1	13,8	14,2	13,0	15,5	13,0	

-----								-----							
-								-							
D-50 [%]	125	250	500	1k	2k	4k	sum	D-50 [%]	125	250	500	1k	2k	4k	sum
-----								-----							
-								-							
01	34,9	38,0	39,5	40,4	41,9	46,8	55,2	01	76,9	78,8	78,0	78,0	77,3	80,4	85,1
02	35,5	39,0	39,4	40,3	41,4	47,2	55,5	02	76,5	77,4	77,5	78,7	75,6	79,8	84,3
03	37,1	38,4	40,6	40,5	42,6	47,6	56,7	03	79,4	81,7	81,2	81,2	80,0	83,2	87,2
04	39,7	43,2	43,7	44,2	46,1	50,2	61,5	04	85,0	86,0	86,0	87,3	84,3	87,2	91,1
05	37,2	40,5	41,5	42,0	44,7	48,9	58,6	05	81,8	83,1	81,8	83,7	82,0	85,0	88,8
06	34,5	37,8	38,8	40,6	41,1	46,5	55,2	06	77,9	79,6	79,4	79,6	78,5	81,4	85,9
07	56,0	59,1	59,9	59,6	61,9	67,5	76,9	07	90,8	91,5	91,1	92,0	90,1	92,1	94,9
08	41,5	45,1	47,5	48,0	49,7	54,1	63,1	08	82,2	84,3	83,2	83,4	82,8	84,6	89,2
09	43,1	47,1	48,5	49,0	51,8	56,0	64,4	09	79,1	81,1	80,2	81,1	80,0	82,3	86,7
10	47,4	50,6	51,8	53,1	54,2	60,0	69,4	10	86,4	88,2	87,3	88,9	86,6	87,3	91,7
11	41,5	44,9	46,2	46,9	48,1	53,6	62,6	11	82,7	83,0	83,2	83,4	80,7	84,6	88,9
12	41,5	44,8	46,2	47,4	47,9	52,4	61,6	12	76,5	79,2	76,7	79,2	78,0	80,3	84,6
MAX :	56,0	59,1	59,9	59,6	61,9	67,5		MAX :	90,8	91,5	91,1	92,0	90,1	92,1	
MEAN:	40,8	44,0	45,3	46,0	47,6	52,6		MEAN:	81,3	82,8	82,1	83,0	81,3	84,0	
MIN :	34,5	37,8	38,8	40,3	41,1	46,5		MIN :	76,5	77,4	76,7	78,0	75,6	79,8	
-----								-----							
-								-							
C-80 [dB]	125	250	500	1k	2k	4k	sum	C-80 [dB]	125	250	500	1k	2k	4k	sum
-----								-----							
-								-							

08	1,0	1,7	2,2	2,3	2,6	3,6	5,3	08	9,5	10,0	9,8	9,8	10,0	10,8	12,6
09	1,2	2,0	2,3	2,4	2,8	3,8	5,4	09	8,7	9,1	9,1	9,1	9,2	10,0	11,6
10	1,6	2,2	2,4	2,7	2,9	4,1	6,1	10	11,3	12,3	11,8	12,3	11,7	12,5	14,7
11	1,1	1,8	2,1	2,2	2,5	3,6	5,3	11	9,8	10,1	10,0	10,2	9,7	11,0	12,8
12	1,2	1,8	1,9	2,2	2,5	3,5	5,1	12	8,3	9,5	8,4	9,0	9,0	9,7	11,2
MAX :	2,8	3,5	3,8	3,8	4,1	5,5	MAX :	13,1	13,7	13,6	14,0	13,2	14,6		
MEAN:	0,9	1,5	1,8	2,0	2,3	3,3	MEAN:	9,8	10,3	10,0	10,3	10,1	11,0		
MIN :	-0,1	0,7	0,9	1,1	1,3	2,4	MIN :	8,3	9,0	8,4	9,0	8,9	9,7		
-----								-----							
-								-							
LF [%]	125	250	500	1k	2k	4k	sum	LF [%]	125	250	500	1k	2k	4k	sum
-----								-----							
-								-							
01	33,0	34,8	36,2	35,5	36,1	35,9	36,4	01	35,4	34,6	34,1	35,4	35,1	34,6	33,6
02	28,2	28,9	29,0	29,8	30,3	29,1	28,7	02	30,8	30,6	30,9	30,0	31,5	33,1	29,5
03	23,4	23,0	22,7	23,2	22,8	21,1	20,1	03	21,1	21,6	21,0	21,7	21,0	20,2	18,9
04	19,0	19,9	19,8	19,9	20,0	19,2	17,0	04	14,6	13,4	14,3	14,0	15,1	14,1	11,5
05	24,2	25,6	25,2	26,1	26,9	26,8	25,0	05	23,7	24,7	25,4	23,1	23,9	23,8	21,2
06	28,0	29,2	30,9	30,6	31,6	30,9	29,8	06	31,0	29,3	30,6	31,1	31,0	30,7	29,0
07	13,9	15,0	15,2	15,6	16,1	15,2	13,2	07	11,3	11,3	10,9	10,7	12,1	10,9	9,2
08	19,4	20,8	21,4	22,6	22,6	23,4	21,7	08	22,9	22,4	23,6	23,5	23,5	23,6	21,7
09	18,6	19,1	20,5	20,8	21,5	21,3	20,0	09	23,4	23,2	24,6	24,0	24,6	23,7	21,3
10	21,7	21,2	21,9	21,6	21,5	21,0	18,8	10	16,0	15,6	17,0	15,5	19,1	15,6	14,2
11	24,2	24,9	26,3	26,3	27,0	26,6	26,0	11	31,6	28,7	32,0	32,3	31,8	30,7	29,3
12	25,1	26,3	27,2	27,7	29,2	28,4	27,5	12	37,1	39,4	37,1	37,8	37,1	37,8	34,1
MAX :	33,0	34,8	36,2	35,5	36,1	35,9	MAX :	37,1	39,4	37,1	37,8	37,1	37,8		
MEAN:	23,2	24,1	24,7	25,0	25,5	24,9	MEAN:	24,9	24,6	25,1	24,9	25,5	24,9		
MIN :	13,9	15,0	15,2	15,6	16,1	15,2	MIN :	11,3	11,3	10,9	10,7	12,1	10,9		

-----								-----							
-								-							
G [dB]	125	250	500	1k	2k	4k	sum	G [dB]	125	250	500	1k	2k	4k	sum
-----								-----							
-								-							
01	22,9	22,4	22,3	22,1	22,0	21,3	20,4	01	15,9	15,3	15,6	15,1	16,2	15,6	15,2
02	23,1	22,7	22,5	22,4	22,3	21,7	20,8	02	17,1	16,4	16,8	16,2	17,2	17,0	16,5
03	23,7	23,3	23,2	23,3	23,0	22,4	21,6	03	17,8	17,4	17,7	17,3	18,5	18,1	17,7
04	24,3	24,1	23,9	24,0	23,9	23,3	22,8	04	20,0	19,6	19,9	19,6	20,4	20,0	20,2
05	23,6	23,3	23,1	23,0	22,9	22,2	21,5	05	18,1	17,8	18,1	17,7	18,7	18,3	18,2
06	23,0	22,6	22,5	22,3	22,1	21,5	20,6	06	17,0	16,4	16,5	16,1	17,4	16,8	16,3
07	26,4	26,1	25,9	25,9	25,8	25,5	25,4	07	22,6	22,3	22,4	22,2	22,8	22,6	23,1
08	24,7	24,2	24,0	23,9	23,7	23,1	22,4	08	17,9	17,5	17,8	17,3	18,5	18,0	17,8
09	24,3	23,8	23,6	23,4	23,2	22,6	21,9	09	17,1	16,5	16,8	16,3	17,4	17,0	16,6
10	25,5	25,1	24,9	24,9	24,8	24,3	23,9	10	20,2	20,1	20,0	19,7	20,8	20,2	20,5
11	24,7	24,2	24,0	23,8	23,7	23,1	22,4	11	17,6	17,1	17,5	17,1	17,9	17,6	17,5
12	24,4	23,9	23,6	23,5	23,3	22,7	21,9	12	16,1	15,6	15,7	15,3	16,6	16,0	15,5
MAX :	26,4	26,1	25,9	25,9	25,8	25,5		MAX :	22,6	22,3	22,4	22,2	22,8	22,6	
MEAN:	24,2	23,8	23,6	23,5	23,4	22,8		MEAN:	18,1	17,7	17,9	17,5	18,5	18,1	
MIN :	22,9	22,4	22,3	22,1	22,0	21,3		MIN :	15,9	15,3	15,6	15,1	16,2	15,6	
-----								-----							
-								-							
SPL [dB]	125	250	500	1k	2k	4k	sum	SPL [dB]	125	250	500	1k	2k	4k	sum
-----								-----							
-								-							
01 (A)	72,9	75,4	78,2	81,1	83,9	96,0	97,4	01 (A)	65,9	68,3	71,5	74,1	78,1	90,3	91,7
02 (A)	73,1	75,7	78,5	81,4	84,2	96,4	97,8	02 (A)	67,1	69,4	72,8	75,2	79,1	91,7	93,0
03 (A)	73,7	76,3	79,1	82,2	84,9	100,2	98,5	03 (A)	67,8	70,4	73,7	76,3	80,4	92,8	94,2
04 (A)	74,3	77,1	79,9	82,9	85,8	101,3	99,4	04 (A)	70,0	72,6	75,9	78,6	82,3	94,7	96,1
05 (A)	73,5	76,3	79,0	82,0	84,8	100,0	98,3	05 (A)	68,1	70,8	74,1	76,7	80,6	93,0	94,4

06 (A)	73,0	75,6	78,4	81,3	84,0	96,2	97,6		06 (A)	67,0	69,4	72,5	75,0	79,3	91,5	92,9
07 (A)	76,4	79,1	81,9	84,8	87,7	103,9	101,6		07 (A)	72,6	75,3	78,4	81,2	84,7	101,6	98,7
08 (A)	74,7	77,2	80,0	82,8	85,6	100,9	99,2		08 (A)	67,9	70,5	73,8	76,2	80,4	92,7	94,1
09 (A)	74,3	76,8	79,5	82,3	85,1	100,4	98,7		09 (A)	67,1	69,5	72,8	75,2	79,4	91,7	93,0
10 (A)	75,5	78,1	80,9	83,9	86,7	102,4	100,4		10 (A)	70,1	73,1	76,0	78,6	82,7	94,9	96,3
11 (A)	74,7	77,2	79,9	82,8	85,6	100,9	99,2		11 (A)	67,6	70,1	73,4	76,0	79,8	92,3	93,7
12 (A)	74,4	76,9	79,6	82,5	85,2	100,4	98,8		12 (A)	66,1	68,5	71,7	74,2	78,5	90,7	92,1
MAX : 76,4 79,1 81,9 84,8 87,7 100,2									MAX : 72,6 75,3 78,4 81,2 84,7 97,3							
MEAN: 74,2 76,8 79,6 82,5 85,3 97,5									MEAN: 68,1 70,7 73,9 76,4 80,4 92,8							
MIN : 72,9 75,4 78,2 81,1 83,9 96,0									MIN : 65,9 68,3 71,5 74,1 78,1 90,3							

-																
EDT [s]	125	250	500	1k	2k	4k	sum		EDT [s]	125	250	500	1k	2k	4k	sum

-																
01	1,63	1,46	1,39	1,38	1,31	1,11	---		01	0,54	0,52	0,53	0,52	0,53	0,48	---
02	1,64	1,46	1,40	1,40	1,33	1,12	---		02	0,56	0,56	0,57	0,54	0,54	0,50	---
03	1,65	1,47	1,43	1,42	1,38	1,14	---		03	0,56	0,52	0,52	0,52	0,52	0,46	---
04	1,67	1,49	1,43	1,43	1,36	1,14	---		04	0,51	0,48	0,50	0,46	0,50	0,44	---
05	1,66	1,44	1,40	1,36	1,31	1,09	---		05	0,53	0,51	0,52	0,51	0,50	0,46	---
06	1,65	1,46	1,40	1,38	1,32	1,09	---		06	0,56	0,57	0,57	0,57	0,54	0,48	---
07	1,60	1,41	1,36	1,37	1,30	1,06	---		07	0,45	0,45	0,45	0,44	0,45	0,41	---
08	1,61	1,43	1,37	1,36	1,30	1,08	---		08	0,55	0,50	0,51	0,52	0,50	0,47	---
09	1,62	1,42	1,39	1,36	1,29	1,06	---		09	0,60	0,56	0,55	0,55	0,53	0,48	---
10	1,63	1,44	1,40	1,40	1,33	1,09	---		10	0,48	0,42	0,45	0,41	0,43	0,44	---
11	1,60	1,43	1,38	1,37	1,30	1,08	---		11	0,52	0,52	0,51	0,50	0,52	0,46	---
12	1,61	1,42	1,39	1,36	1,30	1,07	---		12	0,62	0,53	0,63	0,58	0,55	0,52	---
MAX : 1,67 1,49 1,43 1,43 1,38 1,14									MAX : 0,62 0,57 0,63 0,58 0,55 0,52							
MEAN: 1,63 1,44 1,40 1,38 1,32 1,09									MEAN: 0,54 0,51 0,53 0,51 0,51 0,47							

MIN :	1,60	1,41	1,36	1,36	1,29	1,06			MIN :	0,45	0,42	0,45	0,41	0,43	0,41		
-----									-----								
-									-								
T-15 [s]	125	250	500	1k	2k	4k	sum		T-15 [s]	125	250	500	1k	2k	4k	sum	
-----									-----								
-									-								
01	1,85	1,67	1,70	1,68	1,63	1,33	---		01	0,60	0,57	0,61	0,56	0,58	0,56	---	
02	1,85	1,67	1,71	1,70	1,67	1,34	---		02	0,58	0,59	0,60	0,60	0,60	0,56	---	
03	1,85	1,68	1,69	1,75	1,69	1,35	---		03	0,65	0,62	0,63	0,62	0,63	0,57	---	
04	1,86	1,69	1,69	1,74	1,66	1,33	---		04	0,64	0,63	0,65	0,62	0,62	0,58	---	
05	1,87	1,69	1,69	1,67	1,61	1,30	---		05	0,63	0,63	0,61	0,60	0,61	0,57	---	
06	1,89	1,70	1,71	1,68	1,60	1,30	---		06	0,60	0,61	0,61	0,60	0,58	0,56	---	
07	1,82	1,63	1,64	1,67	1,59	1,29	---		07	0,63	0,60	0,61	0,57	0,59	0,54	---	
08	1,84	1,69	1,70	1,68	1,60	1,31	---		08	0,67	0,67	0,65	0,65	0,65	0,61	---	
09	1,86	1,69	1,70	1,68	1,59	1,30	---		09	0,66	0,65	0,67	0,66	0,64	0,61	---	
10	1,86	1,69	1,67	1,73	1,66	1,33	---		10	0,68	0,64	0,66	0,68	0,65	0,59	---	
11	1,85	1,70	1,71	1,71	1,65	1,34	---		11	0,64	0,65	0,67	0,63	0,63	0,58	---	
12	1,84	1,69	1,70	1,68	1,61	1,32	---		12	0,67	0,64	0,65	0,69	0,65	0,62	---	
MAX :	1,89	1,70	1,71	1,75	1,69	1,35			MAX :	0,68	0,67	0,67	0,69	0,65	0,62		
MEAN:	1,85	1,68	1,69	1,70	1,63	1,32			MEAN:	0,64	0,63	0,63	0,62	0,62	0,58		
MIN :	1,82	1,63	1,64	1,67	1,59	1,29			MIN :	0,58	0,57	0,60	0,56	0,58	0,54		
-----									-----								
-									-								
T-30 [s]	125	250	500	1k	2k	4k	sum		T-30 [s]	125	250	500	1k	2k	4k	sum	
-----									-----								
-									-								
01	1,83	1,79	1,83	1,79	1,77	1,51	---		01	0,52	0,51	0,53	0,50	0,51	0,49	---	
02	1,82	1,77	1,81	1,79	1,77	1,52	---		02	0,53	0,53	0,54	0,54	0,54	0,51	---	
03	1,83	1,76	1,79	1,81	1,78	1,54	---		03	0,59	0,55	0,58	0,54	0,56	0,52	---	
04	1,85	1,78	1,81	1,82	1,78	1,53	---		04	0,58	0,55	0,57	0,57	0,56	0,54	---	
05	1,85	1,79	1,83	1,80	1,76	1,51	---		05	0,55	0,57	0,54	0,55	0,56	0,54	---	
06	1,86	1,81	1,85	1,82	1,76	1,50	---		06	0,55	0,56	0,57	0,56	0,54	0,52	---	

07	1,86	1,78	1,81	1,83	1,78	1,50	---	07	0,58	0,56	0,56	0,57	0,55	0,54	---
08	1,85	1,79	1,83	1,81	1,76	1,51	---	08	0,58	0,59	0,59	0,58	0,58	0,55	---
09	1,86	1,82	1,86	1,82	1,76	1,50	---	09	0,60	0,61	0,61	0,60	0,59	0,57	---
10	1,86	1,80	1,82	1,83	1,78	1,53	---	10	0,59	0,58	0,58	0,62	0,58	0,54	---
11	1,84	1,80	1,83	1,80	1,76	1,51	---	11	0,59	0,59	0,62	0,60	0,58	0,55	---
12	1,85	1,82	1,85	1,81	1,76	1,50	---	12	0,61	0,59	0,60	0,64	0,58	0,59	---
MAX :	1,86	1,82	1,86	1,83	1,78	1,54		MAX :	0,61	0,61	0,62	0,64	0,59	0,59	
MEAN:	1,85	1,79	1,83	1,81	1,77	1,51		MEAN:	0,57	0,57	0,57	0,57	0,56	0,54	
MIN :	1,82	1,76	1,79	1,79	1,76	1,50		MIN :	0,52	0,51	0,53	0,50	0,51	0,49	

Αίθουσα Πολλαπλών Χρήσεων 14^ο Δημοτικού Σχολείου Ρεθύμνου

Back [dB] 32,1 38,5 40,1 41,1 38,0 28,0 (background noise level)

Πριν την ακουστική μελέτη			Μετά την ακουστική μελέτη		
-----			-----		
-			-		
RASTI	With background noise		RASTI	With background noise	
-----			-----		
-			-		
01	56,8 (FAIR)	56,8 (FAIR)	01	73,3 (GOOD)	73,3 (GOOD)
02	57,0 (FAIR)	57,0 (FAIR)	02	73,9 (GOOD)	73,9 (GOOD)
03	56,9 (FAIR)	56,9 (FAIR)	03	74,3(GOOD/EXC.)	74,3 (GOOD/EXC.)
04	56,0 (FAIR)	56,0 (FAIR)	04	71,3 (GOOD)	71,3 (GOOD)
05	53,4 (FAIR)	53,4 (FAIR)	05	70,6 (GOOD)	70,6 (GOOD)
06	55,2 (FAIR)	55,2 (FAIR)	06	72,5 (GOOD)	72,4 (GOOD)
07	51,9 (FAIR)	51,9 (FAIR)	07	70,2 (GOOD)	70,2 (GOOD)
08	52,5 (FAIR)	52,5 (FAIR)	08	68,4 (GOOD)	68,4 (GOOD)

09	53,2 (FAIR)	53,2 (FAIR)	09	70,3 (GOOD)	70,2 (GOOD)
10	51,9 (FAIR)	51,9 (FAIR)	10	68,1 (GOOD)	68,1 (GOOD)
11	52,8 (FAIR)	52,8 (FAIR)	11	67,8 (GOOD)	67,8 (GOOD)
12	52,2 (FAIR)	52,2 (FAIR)	12	68,4 (GOOD)	68,4 (GOOD)
13	51,3 (FAIR)	51,3 (FAIR)	13	69,1 (GOOD)	69,1 (GOOD)
14	51,7 (FAIR)	51,7 (FAIR)	14	67,0 (GOOD)	67,0 (GOOD)
15	51,9 (FAIR)	51,9 (FAIR)	15	68,8 (GOOD)	68,8 (GOOD)
MAX :	57,0 (FAIR)	57,0 (FAIR)	MAX :	74,3(GOOD/EXC.)	74,3 (GOOD/EXC.)
MEAN:	53,7 (FAIR)	53,6 (FAIR)	MEAN:	70,3 (GOOD)	70,3 (GOOD)
MIN :	51,3 (FAIR)	51,3 (FAIR)	MIN :	67,0 (GOOD)	67,0 (GOOD)
-----			-----		
-			-		
STIuser	With background noise		STIuser	With background noise	
-----			-----		
-			-		
01	58,7 (FAIR)	58,6 (FAIR)	01	74,4 (GOOD/EXC.)	74,3 (GOOD/EXC.)
02	59,2(FAIR/GOOD)	59,2 (FAIR/GOOD)	02	74,9 (GOOD/EXC.)	74,8 (GOOD/EXC.)
03	58,7 (FAIR)	58,7 (FAIR)	03	74,8 (GOOD/EXC.)	74,7 (GOOD/EXC.)
04	57,1 (FAIR)	57,0 (FAIR)	04	71,9 (GOOD)	71,6 (GOOD)
05	55,5 (FAIR)	55,4 (FAIR)	05	71,9 (GOOD)	71,7 (GOOD)
06	56,6 (FAIR)	56,6 (FAIR)	06	73,4 (GOOD)	73,2 (GOOD)
07	53,9 (FAIR)	53,9 (FAIR)	07	71,6 (GOOD)	71,3 (GOOD)
08	53,9 (FAIR)	53,8 (FAIR)	08	69,9 (GOOD)	69,6 (GOOD)
09	54,7 (FAIR)	54,7 (FAIR)	09	71,7 (GOOD)	71,5 (GOOD)
10	53,8 (FAIR)	53,8 (FAIR)	10	68,4 (GOOD)	68,0 (GOOD)
11	54,1 (FAIR)	54,1 (FAIR)	11	69,6 (GOOD)	69,2 (GOOD)
12	53,5 (FAIR)	53,4 (FAIR)	12	69,5 (GOOD)	69,0 (GOOD)
13	53,0 (FAIR)	53,0 (FAIR)	13	69,5 (GOOD)	68,9 (GOOD)
14	52,8 (FAIR)	52,7 (FAIR)	14	67,8 (GOOD)	67,3 (GOOD)
15	53,6 (FAIR)	53,5 (FAIR)	15	70,2 (GOOD)	69,8 (GOOD)
MAX :	59,2(FAIR/GOOD)	59,2 (FAIR/GOOD)	MAX :	74,9 (GOOD/EXC.)	74,8 (GOOD/EXC.)

MEAN:	55,3 (FAIR)							55,2 (FAIR)	MEAN:	71,3 (GOOD)							71,0 (GOOD)								
MIN :	52,8 (FAIR)							52,7 (FAIR)	MIN :	67,8 (GOOD)							67,3 (GOOD)								
-----													-----												
-													-												
Ts [ms]	125	250	500	1k	2k	4k	sum	Ts [ms]	125	250	500	1k	2k	4k	sum										
-----													-----												
-													-												
01	115,5	110,5	91,5	64,9	64,5	53,3	43,3	01	33,1	33,8	33,6	28,6	31,1	28,1	23,6										
02	112,9	111,2	87,2	61,4	63,2	48,8	38,8	02	30,0	30,2	30,3	27,2	29,9	27,1	21,8										
03	119,0	113,4	90,3	66,3	66,2	52,7	43,2	03	34,8	32,8	32,8	30,5	31,7	27,6	24,3										
04	128,2	117,8	93,5	72,5	71,3	60,3	50,8	04	39,5	38,9	38,0	30,9	34,7	34,0	28,4										
05	131,3	127,5	98,5	74,9	77,4	59,3	50,0	05	37,6	37,4	37,5	32,6	35,9	32,6	27,0										
06	133,2	123,6	98,4	73,6	74,0	58,7	50,5	06	38,2	36,5	35,7	30,1	34,4	31,8	27,2										
07	138,1	132,1	109,4	80,7	80,6	63,6	54,7	07	41,1	40,8	39,2	36,6	40,4	34,8	30,8										
08	135,6	129,1	106,7	78,8	79,7	64,6	55,7	08	43,9	40,7	42,2	34,8	41,8	38,6	32,7										
09	135,4	130,9	104,3	78,9	79,9	66,1	56,0	09	40,0	39,9	40,2	37,1	41,2	37,6	31,8										
10	137,3	136,5	110,0	81,5	83,8	69,1	59,5	10	48,1	46,3	47,2	43,4	44,4	44,2	38,3										
11	140,7	137,6	106,9	82,2	84,1	69,5	61,7	11	46,4	46,1	45,7	38,5	45,7	40,4	36,4										
12	140,9	133,8	109,5	84,1	83,4	69,0	61,0	12	47,3	43,5	46,0	42,0	45,2	41,1	36,3										
13	143,8	141,8	118,8	91,1	89,9	72,2	65,1	13	50,1	45,3	47,8	40,5	44,4	44,0	38,9										
14	145,9	144,2	115,9	87,5	87,1	76,1	67,3	14	50,1	49,9	47,9	43,6	48,3	44,5	40,1										
15	139,4	134,7	113,0	88,7	86,1	73,0	65,0	15	47,8	45,8	47,1	40,8	43,5	40,8	36,3										
MAX :	145,9	144,2	118,8	91,1	89,9	76,1		MAX :	50,1	49,9	47,9	43,6	48,3	44,5											
MEAN:	133,1	128,3	103,6	77,8	78,1	63,7		MEAN:	41,9	40,5	40,7	35,8	39,5	36,5											
MIN :	112,9	110,5	87,2	61,4	63,2	48,8		MIN :	30,0	30,2	30,3	27,2	29,9	27,1											
-----													-----												
-													----												
D-50 [%]	125	250	500	1k	2k	4k	sum	D-50 [%]	125	250	500	1k	2k	4k	sum										
-----													-----												
-													---												
01	44,4	44,2	46,3	58,2	59,5	62,6	70,2	01	78,6	77,2	77,0	81,3	80,9	83,5	87,2										
02	46,7	44,6	50,7	61,2	59,6	67,7	74,7	02	80,7	81,0	79,7	81,1	80,2	81,7	87,1										
03	44,4	44,9	49,9	57,6	57,9	65,4	72,1	03	77,3	78,4	78,6	80,5	80,5	82,0	85,4										

04	36,5	39,9	45,8	52,0	52,0	58,3	65,4	04	70,5	69,9	68,5	78,1	74,3	74,3	79,9
05	33,2	34,1	40,9	49,5	47,7	58,7	65,5	05	69,9	69,6	71,1	75,1	71,7	76,4	81,6
06	35,8	38,2	42,2	51,7	53,2	60,4	66,3	06	72,4	75,3	75,3	80,4	78,0	78,8	82,8
07	32,1	31,4	35,1	45,6	47,2	54,6	61,7	07	70,7	70,1	72,1	74,4	69,3	75,0	79,1
08	32,1	32,6	36,8	45,3	46,1	53,0	59,5	08	66,4	70,1	70,2	74,1	66,9	72,1	76,8
09	31,6	33,7	38,8	47,9	46,5	51,4	60,2	09	71,9	73,1	71,2	72,4	69,9	72,7	78,5
10	30,8	27,5	33,1	44,3	43,1	48,7	56,5	10	63,1	60,8	61,8	65,6	63,8	63,7	69,8
11	29,2	28,3	38,8	45,6	43,0	50,4	56,4	11	65,1	66,0	63,7	73,2	66,0	69,5	73,2
12	26,8	30,7	32,5	41,6	42,4	49,9	56,0	12	64,4	68,3	65,1	67,6	67,7	68,9	73,1
13	27,5	25,0	27,0	38,4	38,6	48,7	54,2	13	60,3	68,9	62,6	71,7	70,0	67,6	72,3
14	27,7	26,2	31,7	42,2	42,0	44,3	51,9	14	63,2	62,0	63,6	69,3	62,3	66,8	71,0
15	29,7	30,0	33,6	40,0	42,6	45,7	52,3	15	63,4	63,8	63,9	72,0	68,2	70,3	75,2
MAX :	46,7	44,9	50,7	61,2	59,6	67,7		MAX :	80,7	81,0	79,7	81,3	80,9	83,5	
MEAN:	33,9	34,1	38,9	48,1	48,1	54,7		MEAN:	69,2	70,3	69,6	74,4	71,3	73,5	
MIN :	26,8	25,0	27,0	38,4	38,6	44,3		MIN :	60,3	60,8	61,8	65,6	62,3	63,7	
-----								-----							
-								-							
C-80 [dB]	125	250	500	1k	2k	4k	sum	C-80 [dB]	125	250	500	1k	2k	4k	sum
-----								-----							
-								-							
01	1,2	1,2	2,0	4,2	4,2	5,3	6,9	01	8,7	9,4	9,0	10,4	10,0	10,9	12,5
02	1,1	1,1	2,4	4,4	4,3	5,7	7,4	02	9,4	10,1	9,6	10,6	9,9	10,7	12,5
03	0,7	1,0	2,1	4,0	3,9	5,5	7,0	03	9,2	9,5	9,7	10,6	10,1	11,2	12,7
04	0,2	0,7	2,1	3,6	3,7	4,7	6,1	04	7,8	8,0	8,3	10,0	8,9	9,1	10,6
05	-0,2	-0,2	1,4	3,1	2,7	4,7	6,0	05	8,1	8,5	8,1	9,2	8,5	8,9	10,7
06	-0,2	0,2	1,6	3,4	3,2	4,8	6,1	06	8,6	8,8	8,5	10,5	9,2	9,7	11,1
07	-0,7	-0,5	0,5	2,4	2,4	4,1	5,5	07	7,8	8,1	8,1	9,0	8,1	9,1	10,3
08	-0,3	-0,1	0,6	2,7	2,4	3,9	5,2	08	7,1	8,2	6,9	9,4	7,7	8,0	9,5
09	-0,5	-0,4	0,8	2,7	2,5	3,8	5,2	09	8,0	8,2	7,9	8,9	7,8	8,6	10,2
10	-0,6	-1,0	0,5	2,7	2,4	3,6	5,0	10	6,7	7,5	7,1	8,1	7,5	7,7	9,0
11	-1,1	-1,2	0,7	2,4	2,0	3,4	4,6	11	6,6	6,7	6,6	8,4	7,0	8,0	9,0
12	-1,2	-0,6	0,4	2,2	2,2	3,4	4,6	12	6,6	7,5	6,8	7,4	7,1	7,8	8,9

13	-1,3	-1,4	-0,5	1,5	1,6	3,3	4,2	13	6,5	7,4	7,0	8,2	7,4	7,6	8,8
14	-1,6	-1,7	-0,4	1,6	1,7	2,4	3,6	14	6,2	6,5	6,7	7,5	6,2	7,7	8,6
15	-1,0	-0,9	-0,1	1,4	1,7	2,9	3,9	15	6,4	6,7	6,7	8,0	7,5	8,3	9,2
MAX :	1,2	1,2	2,4	4,4	4,3	5,7		MAX :	9,4	10,1	9,7	10,6	10,1	11,2	
MEAN:	-0,4	-0,2	0,9	2,8	2,7	4,1		MEAN:	7,6	8,1	7,8	9,1	8,2	8,9	
MIN :	-1,6	-1,7	-0,5	1,4	1,6	2,4		MIN :	6,2	6,5	6,6	7,4	6,2	7,6	
-----								-----							
-								-							
LF [%]	125	250	500	1k	2k	4k	sum	LF [%]	125	250	500	1k	2k	4k	sum
-----								-----							
-								-							
01	22,4	24,2	21,9	20,5	22,0	19,7	18,0	01	16,1	15,7	13,0	14,7	15,6	13,9	13,0
02	22,4	24,8	21,7	20,7	20,5	17,6	15,8	02	20,7	19,4	19,2	16,4	16,8	13,8	13,0
03	24,9	24,8	26,0	21,7	24,3	21,5	19,3	03	26,0	26,4	25,2	22,9	22,9	18,2	17,7
04	30,6	28,5	30,0	27,8	27,1	23,5	23,1	04	18,4	19,7	16,9	16,7	15,7	14,5	13,7
05	29,4	29,2	28,2	26,7	27,7	24,2	22,0	05	24,2	22,2	20,0	19,7	18,7	18,8	16,6
06	33,0	29,9	30,1	28,7	27,4	26,5	25,2	06	32,7	28,3	24,3	26,7	24,3	24,6	21,9
07	22,6	22,3	20,7	23,6	18,7	16,9	16,4	07	19,5	17,4	21,9	18,5	15,6	17,2	17,0
08	28,7	30,2	29,2	26,5	26,7	23,6	22,2	08	24,1	20,8	20,3	18,3	19,6	17,4	16,5
09	27,8	28,8	25,7	27,3	27,0	22,4	21,3	09	24,6	22,8	21,1	21,9	20,9	20,0	18,1
10	29,0	27,9	27,0	27,3	27,5	27,0	24,8	10	28,6	28,2	24,7	25,3	21,8	24,2	22,9
11	26,1	26,7	23,6	24,6	24,0	21,6	19,7	11	23,6	22,1	19,8	19,0	20,3	18,2	18,3
12	30,5	29,7	31,6	29,6	28,6	28,1	25,4	12	24,0	25,0	21,0	17,7	20,8	19,1	19,4
13	24,8	24,9	23,4	24,5	26,6	20,6	20,2	13	23,7	19,5	18,5	17,2	18,1	17,6	16,6
14	21,2	23,0	22,4	21,1	21,6	18,8	17,7	14	23,6	24,6	17,6	15,7	18,4	20,5	18,3
15	27,6	26,8	26,0	26,1	26,1	25,4	22,9	15	25,0	26,8	22,8	21,8	22,5	23,1	22,4
MAX :	33,0	30,2	31,6	29,6	28,6	28,1		MAX :	32,7	28,3	25,2	26,7	24,3	24,6	
MEAN:	26,7	26,8	25,8	25,1	25,1	22,5		MEAN:	23,7	22,6	20,4	19,5	19,5	18,8	
MIN :	21,2	22,3	20,7	20,5	18,7	16,9		MIN :	16,1	15,7	13,0	14,7	15,6	13,8	

-----								-----							
-								-							
G [dB]	125	250	500	1k	2k	4k	sum	G [dB]	125	250	500	1k	2k	4k	sum
-----								-----							
-								-							
01	18,1	18,2	17,3	16,4	16,4	16,0	15,4	01	14,5	14,3	13,8	13,7	14,6	14,5	14,2
02	18,2	18,1	17,4	16,5	16,5	16,4	15,9	02	15,2	15,4	15,2	14,4	15,2	15,0	15,1
03	17,9	18,1	17,3	16,3	16,4	16,0	15,5	03	15,0	14,7	14,8	14,2	14,9	15,0	14,5
04	17,3	17,5	16,8	15,3	15,6	14,8	14,0	04	12,8	12,6	12,7	12,5	13,3	12,6	12,2
05	17,3	17,1	16,6	15,2	15,2	15,0	14,2	05	13,8	13,5	13,2	12,7	13,5	13,2	12,8
06	17,2	17,3	16,6	15,5	15,5	14,9	14,1	06	13,4	13,4	13,4	13,3	13,6	13,1	12,5
07	16,7	16,7	15,6	14,4	14,5	13,9	13,0	07	11,9	11,7	11,5	10,5	11,4	11,7	10,8
08	17,1	17,0	16,0	14,9	15,0	14,2	13,3	08	11,6	11,2	11,2	11,2	11,6	11,3	10,6
09	17,0	16,8	16,1	14,7	14,8	13,9	13,1	09	12,4	11,8	11,7	10,9	11,7	11,4	10,8
10	16,4	16,2	15,2	14,0	13,9	13,0	12,1	10	10,3	10,4	10,2	9,4	10,3	9,7	8,9
11	16,4	16,2	15,4	14,0	14,1	13,3	12,2	11	10,7	9,8	10,0	9,7	10,4	10,3	9,2
12	16,3	16,2	15,3	13,9	14,0	13,0	11,9	12	10,0	10,5	10,1	8,9	10,0	9,7	8,7
13	15,9	15,6	14,4	12,8	12,9	12,3	10,9	13	9,6	9,4	9,3	8,9	9,7	9,2	8,2
14	15,7	15,5	14,6	13,1	13,3	12,1	10,9	14	9,5	9,1	9,7	8,6	9,3	9,4	8,3
15	15,9	15,7	14,5	12,9	13,2	12,1	10,9	15	10,3	9,9	9,7	9,4	10,2	9,6	8,6
MAX :	18,2	18,2	17,4	16,5	16,5	16,4		MAX :	15,2	15,4	15,2	14,4	15,2	15,0	
MEAN:	16,9	16,8	15,9	14,7	14,7	14,1		MEAN:	12,1	11,8	11,8	11,2	12,0	11,7	
MIN :	15,7	15,5	14,4	12,8	12,9	12,1		MIN :	9,5	9,1	9,3	8,6	9,3	9,2	
-----								-----							
-								-							
SPL [dB]	125	250	500	1k	2k	4k	sum	SPL [dB]	125	250	500	1k	2k	4k	sum
-----								-----							
-								-							
01 (A)	68,1	71,2	73,3	75,3	78,3	90,7	92,0	01 (A)	64,5	67,2	69,8	72,7	76,5	89,2	90,5
02 (A)	68,2	71,1	73,4	75,5	78,4	91,1	92,4	02 (A)	65,2	68,4	71,1	73,4	77,1	89,7	91,1
03 (A)	67,9	71,0	73,3	75,3	78,3	90,7	92,1	03 (A)	65,0	67,6	70,8	73,1	76,8	89,7	91,0

04 (A)	67,3	70,5	72,8	74,3	77,5	89,5	91,0		04 (A)	62,8	65,5	68,7	71,5	75,2	87,3	88,7
05 (A)	67,3	70,1	72,6	74,2	77,1	89,7	91,1		05 (A)	63,8	66,5	69,2	71,7	75,4	87,9	89,2
06 (A)	67,2	70,3	72,5	74,5	77,4	89,6	91,0		06 (A)	63,4	66,4	69,4	72,3	75,5	87,8	89,1
07 (A)	66,7	69,7	71,6	73,4	76,4	88,6	90,0		07 (A)	61,9	64,6	67,4	69,5	73,3	86,4	87,7
08 (A)	67,1	70,0	72,0	73,8	76,9	89,0	90,4		08 (A)	61,6	64,1	67,2	70,2	73,5	86,0	87,3
09 (A)	67,0	69,8	72,0	73,7	76,7	88,6	90,1		09 (A)	62,4	64,8	67,7	69,9	73,6	86,1	87,5
10 (A)	66,4	69,2	71,2	72,9	75,8	87,7	89,2		10 (A)	60,3	63,4	66,2	68,4	72,2	84,4	85,8
11 (A)	66,4	69,2	71,4	73,0	76,0	88,0	89,4		11 (A)	60,7	62,8	66,0	68,7	72,3	85,0	86,3
12 (A)	66,3	69,2	71,3	72,9	75,9	87,7	89,2		12 (A)	60,0	63,5	66,1	67,9	71,9	84,4	85,7
13 (A)	65,8	68,6	70,4	71,7	74,8	87,0	88,4		13 (A)	59,6	62,4	65,2	67,8	71,6	83,9	85,3
14 (A)	65,7	68,4	70,6	72,0	75,2	86,8	88,2		14 (A)	59,5	62,1	65,7	67,6	71,2	84,1	85,4
15 (A)	65,9	68,7	70,5	71,8	75,1	86,8	88,3		15 (A)	60,3	62,9	65,6	68,3	72,1	84,3	85,7
MAX :	68,2	71,2	73,4	75,5	78,4	91,1			MAX :	65,2	68,4	71,1	73,4	77,1	89,7	
MEAN:	66,9	69,8	71,9	73,6	76,6	88,8			MEAN:	62,1	64,8	67,7	70,2	73,9	86,4	
MIN :	65,7	68,4	70,4	71,7	74,8	86,8			MIN :	59,5	62,1	65,2	67,6	71,2	83,9	
-----								-----								
-								-								
EDT [s]	125	250	500	1k	2k	4k	sum	EDT [s]	125	250	500	1k	2k	4k	sum	
-----								-----								
-								-								
01	1,97	1,83	1,43	1,03	1,04	0,82	---	01	0,57	0,51	0,57	0,48	0,46	0,43	---	
02	1,99	1,88	1,49	1,09	1,10	0,89	---	02	0,55	0,50	0,52	0,50	0,50	0,49	---	
03	2,01	1,86	1,44	1,05	1,07	0,84	---	03	0,50	0,50	0,47	0,45	0,46	0,43	---	
04	1,98	1,84	1,44	1,07	1,02	0,87	---	04	0,59	0,57	0,58	0,50	0,55	0,54	---	
05	1,96	1,88	1,46	1,10	1,12	0,85	---	05	0,61	0,58	0,61	0,55	0,58	0,55	---	
06	2,00	1,87	1,45	1,06	1,09	0,86	---	06	0,54	0,52	0,56	0,45	0,50	0,49	---	
07	1,99	1,87	1,50	1,12	1,15	0,91	---	07	0,58	0,56	0,58	0,52	0,56	0,52	---	

08	1,98	1,87	1,47	1,11	1,10	0,89	---	08	0,64	0,58	0,64	0,52	0,60	0,57	---
09	1,97	1,91	1,47	1,12	1,10	0,91	---	09	0,56	0,55	0,58	0,52	0,57	0,53	---
10	1,94	1,86	1,49	1,10	1,13	0,91	---	10	0,64	0,56	0,59	0,55	0,58	0,56	---
11	1,95	1,86	1,49	1,10	1,12	0,90	---	11	0,64	0,66	0,65	0,54	0,61	0,57	---
12	1,94	1,89	1,45	1,11	1,11	0,93	---	12	0,66	0,58	0,61	0,61	0,64	0,58	---
13	1,95	1,85	1,48	1,16	1,13	0,91	---	13	0,64	0,60	0,62	0,54	0,57	0,56	---
14	1,97	1,91	1,50	1,15	1,12	0,97	---	14	0,67	0,63	0,63	0,58	0,67	0,57	---
15	1,93	1,85	1,50	1,17	1,15	0,94	---	15	0,65	0,63	0,64	0,56	0,60	0,54	---
MAX : 2,01 1,91 1,50 1,17 1,15 0,97								MAX : 0,67 0,66 0,65 0,61 0,67 0,58							
MEAN: 1,97 1,87 1,47 1,10 1,10 0,89								MEAN: 0,60 0,57 0,59 0,52 0,56 0,53							
MIN : 1,93 1,83 1,43 1,03 1,02 0,82								MIN : 0,50 0,50 0,47 0,45 0,46 0,43							

-															
T-15 [s] 125 250 500 1k 2k 4k sum								T-15 [s] 125 250 500 1k 2k 4k sum							

-															
01	2,04	1,96	1,58	1,22	1,21	0,96	---	01	0,63	0,62	0,60	0,54	0,57	0,53	---
02	2,03	1,96	1,58	1,22	1,21	0,97	---	02	0,67	0,61	0,60	0,54	0,57	0,54	---
03	2,05	1,95	1,60	1,21	1,20	0,97	---	03	0,64	0,58	0,59	0,56	0,57	0,50	---
04	2,04	1,97	1,57	1,23	1,21	0,96	---	04	0,64	0,61	0,63	0,57	0,55	0,54	---
05	2,03	1,95	1,57	1,23	1,19	0,97	---	05	0,62	0,59	0,59	0,53	0,56	0,54	---
06	2,03	1,94	1,58	1,20	1,19	0,96	---	06	0,65	0,62	0,60	0,56	0,60	0,52	---
07	2,01	1,95	1,56	1,21	1,19	0,96	---	07	0,66	0,61	0,62	0,59	0,59	0,55	---
08	2,01	1,95	1,58	1,23	1,20	0,97	---	08	0,66	0,68	0,63	0,57	0,59	0,55	---
09	2,02	1,95	1,57	1,22	1,20	0,95	---	09	0,66	0,63	0,62	0,57	0,61	0,54	---
10	2,01	1,93	1,55	1,20	1,18	0,97	---	10	0,66	0,61	0,64	0,59	0,62	0,54	---
11	2,00	1,95	1,58	1,23	1,18	0,96	---	11	0,65	0,65	0,62	0,59	0,60	0,55	---
12	2,01	1,94	1,57	1,20	1,19	0,96	---	12	0,70	0,61	0,63	0,62	0,63	0,54	---
13	2,01	1,93	1,55	1,20	1,19	0,96	---	13	0,67	0,64	0,65	0,60	0,61	0,56	---
14	2,02	1,94	1,56	1,20	1,18	0,95	---	14	0,65	0,65	0,60	0,60	0,59	0,53	---
15	2,01	1,94	1,56	1,19	1,18	0,96	---	15	0,63	0,63	0,64	0,57	0,59	0,54	---

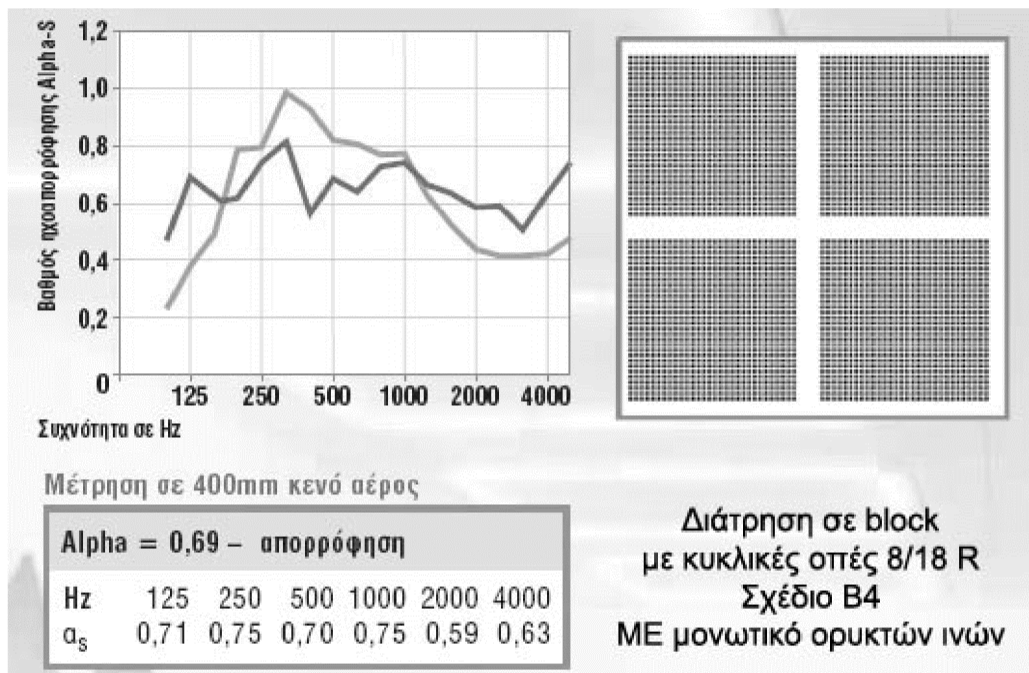
MAX :	2,05	1,97	1,60	1,23	1,21	0,97			MAX :	0,70	0,68	0,65	0,62	0,63	0,56
MEAN:	2,02	1,95	1,57	1,21	1,19	0,96			MEAN:	0,65	0,62	0,62	0,57	0,59	0,54
MIN :	2,00	1,93	1,55	1,19	1,18	0,95			MIN :	0,62	0,58	0,59	0,53	0,55	0,50
-----								-----							
-								-							
T-30 [s]	125	250	500	1k	2k	4k	sum	T-30 [s]	125	250	500	1k	2k	4k	sum
-----								-----							
-								-							
01	1,90	1,87	1,58	1,27	1,21	0,98	---	01	0,66	0,67	0,64	0,65	0,62	0,57	---
02	1,90	1,86	1,58	1,28	1,23	0,99	---	02	0,68	0,66	0,63	0,61	0,61	0,55	---
03	1,90	1,86	1,57	1,26	1,21	0,98	---	03	0,66	0,66	0,65	0,62	0,64	0,55	---
04	1,90	1,86	1,57	1,26	1,21	0,98	---	04	0,67	0,67	0,62	0,64	0,62	0,57	---
05	1,89	1,85	1,57	1,27	1,22	0,99	---	05	0,66	0,67	0,64	0,61	0,61	0,56	---
06	1,89	1,85	1,57	1,25	1,20	0,99	---	06	0,70	0,69	0,62	0,63	0,64	0,55	---
07	1,88	1,84	1,56	1,25	1,20	0,98	---	07	0,68	0,67	0,65	0,68	0,63	0,57	---
08	1,88	1,85	1,57	1,27	1,22	1,00	---	08	0,69	0,68	0,65	0,67	0,62	0,56	---
09	1,88	1,84	1,56	1,25	1,20	0,98	---	09	0,68	0,67	0,62	0,64	0,63	0,56	---
10	1,87	1,83	1,56	1,24	1,21	0,98	---	10	0,69	0,68	0,67	0,70	0,65	0,59	---
11	1,87	1,83	1,56	1,26	1,21	0,99	---	11	0,68	0,66	0,66	0,69	0,63	0,56	---
12	1,87	1,83	1,55	1,25	1,21	0,99	---	12	0,69	0,68	0,64	0,66	0,65	0,55	---
13	1,86	1,82	1,56	1,24	1,21	0,98	---	13	0,67	0,67	0,67	0,69	0,65	0,58	---
14	1,87	1,81	1,55	1,26	1,22	0,99	---	14	0,69	0,65	0,64	0,68	0,63	0,55	---
15	1,86	1,82	1,55	1,23	1,20	0,98	---	15	0,67	0,67	0,64	0,64	0,64	0,55	---
MAX :	1,90	1,87	1,58	1,28	1,23	1,00		MAX :	0,70	0,69	0,67	0,70	0,65	0,59	
MEAN:	1,88	1,84	1,56	1,26	1,21	0,98		MEAN:	0,68	0,67	0,64	0,65	0,63	0,56	
MIN :	1,86	1,81	1,55	1,23	1,20	0,98		MIN :	0,66	0,65	0,62	0,61	0,61	0,55	

--	--

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

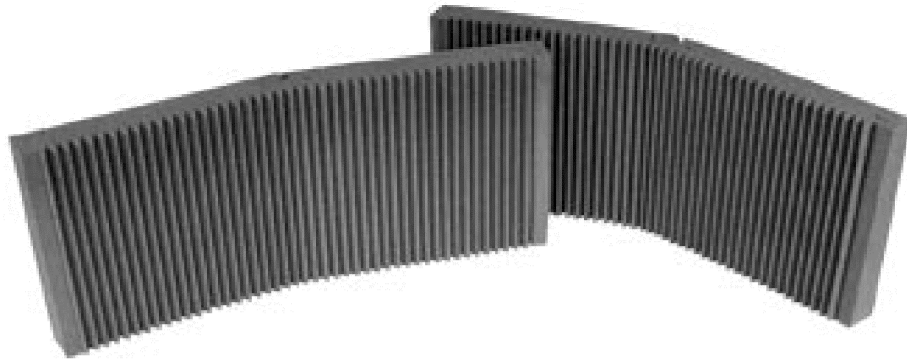
Προτεινόμενα προς χρήση υλικά για την ακουστική τροποποίηση κάθε αίθουσας

Δομικά υλικά ακουστικής μελέτης αίθουσας διαλέξεων κτιρίου Β και Γ



Γυψοσανίδα KNAUF 8/18 R

Προμηθευτής: Knauf Γυψοποιία Α.Β.Ε.Ε., Ενριπίδων 10, 176 74 Καλλιθέα, Τηλ.: 210-9310567



Συχνότητα (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
a (sabine)	0.81	1.02	1.06	1.05	1.02	1.02

Max Wall panel 200 της Auralex

Προμηθευτής: Βενέδικτος Στόλλας, Νέα Εθνική Οδός 155, 26442 Πάτρα, Τηλ: 2610-435400

Συχνότητα (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
a (sabine)	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
Κουρτίνα (ελαφρύ βελούδου 350 g/ m ²)σε απόσταση 20 cm						

Flush

Απλή πόρτα-χωρίς σχέδιο

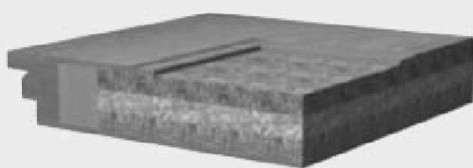
Rw=42dB

Ηχομείωση 46 dB / Πυροπροστασία EI 30 / Προστασία καπνού S60

Αυτό το είδος της πόρτας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δημόσιους χώρους υψηλών απαιτήσεων καθώς και σε χώρους κατοικιών.

Το φύλλο της πόρτας παρέχεται ολοκληρωμένο με μεταλλική ή ξύλινη κάσα, με στοιχεία πυραντοχής 30 λεπτών και προστασίας από καπνό S60.

Στην περίπτωση της ξύλινης κάσας, το σετ έχει μόνο προστασία καπνού S60.



πυρήνας:
πολυστρωματικός ηχομονωτικός πυρήνας (42 dB)

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΦΥΛΛΟΥ ΠΟΡΤΑΣ Rw=42 dB

Το φύλλο της πόρτας αποτελείται από εξωτερική ξυλεία με πολυστρωματικό ηχομονωτικό πυρήνα, είναι επικαλυμμένο και από τις δύο πλευρές από υψηλής πυκνότητας ινοσανίδα.

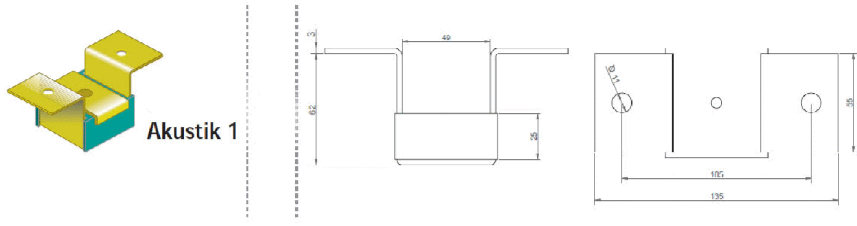
Ακουστική πόρτα ηχομείωσης της Portadoors

Προμηθευτής: Porta doors, Σπάτα Αττική, Βασ. Παύλου 80, Τηλ. 210 6664906



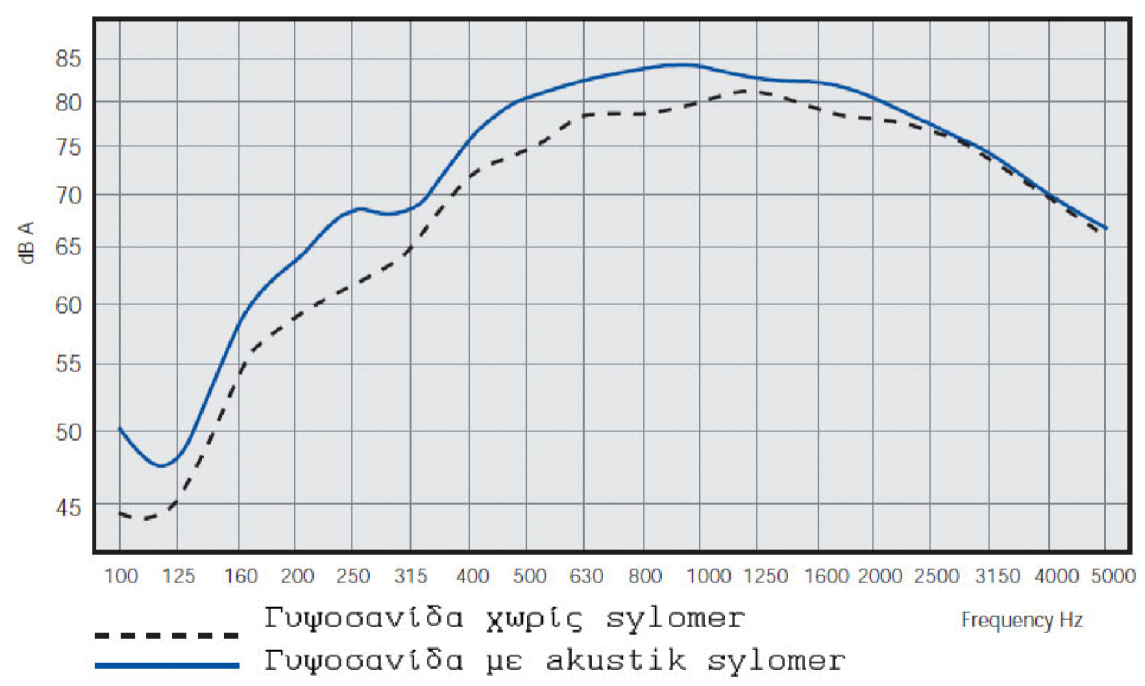
Διπλά παράθυρα και τζάμια σε απόσταση 1 cm με κουφώματα αλουμινίου

Προμηθευτής: Europrofil Αλουμίνιο Α.Β.Ε, Οινόφυτα Βοιωτίας, Τηλ: 22620 32202

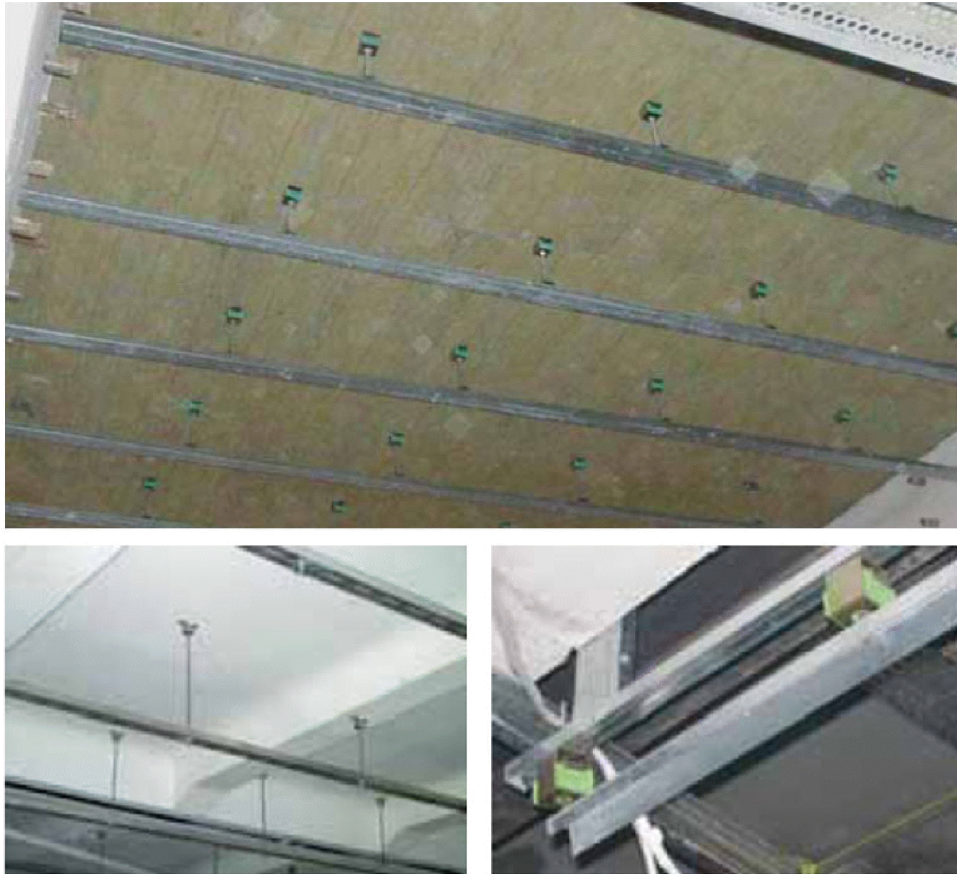


Description	(kg)	Ref.
	Max. Load.	
Akustik 1 + Sylomer® 30 Type A	30	23501

Sylomer, πάνω:σχέδιο // κάτω:μέγιστο φορτίο-αριθμός αναφοράς



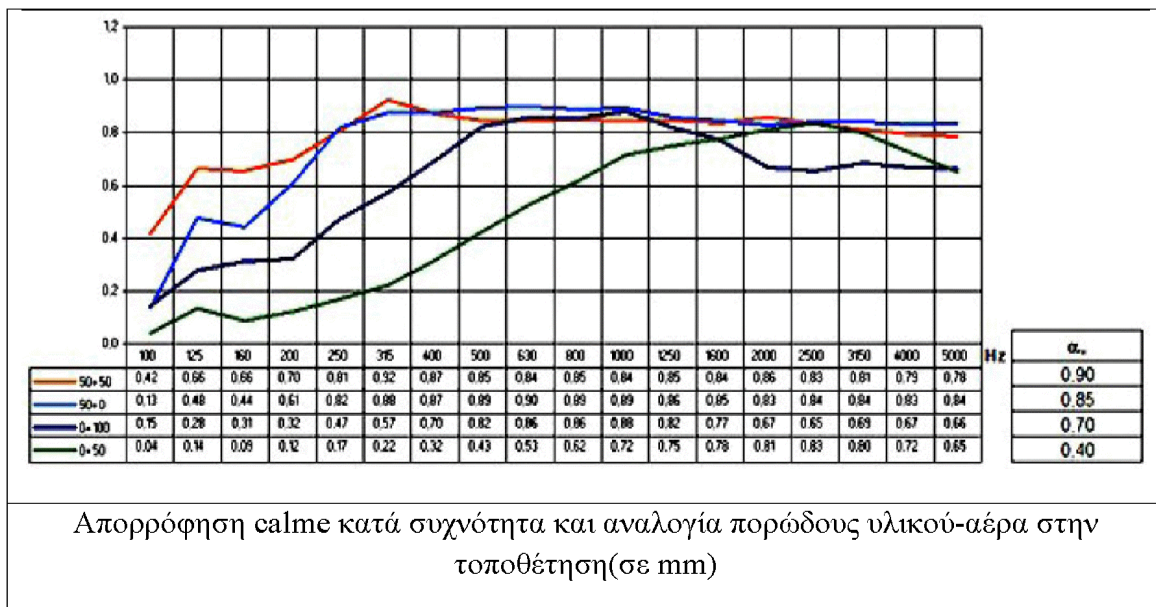
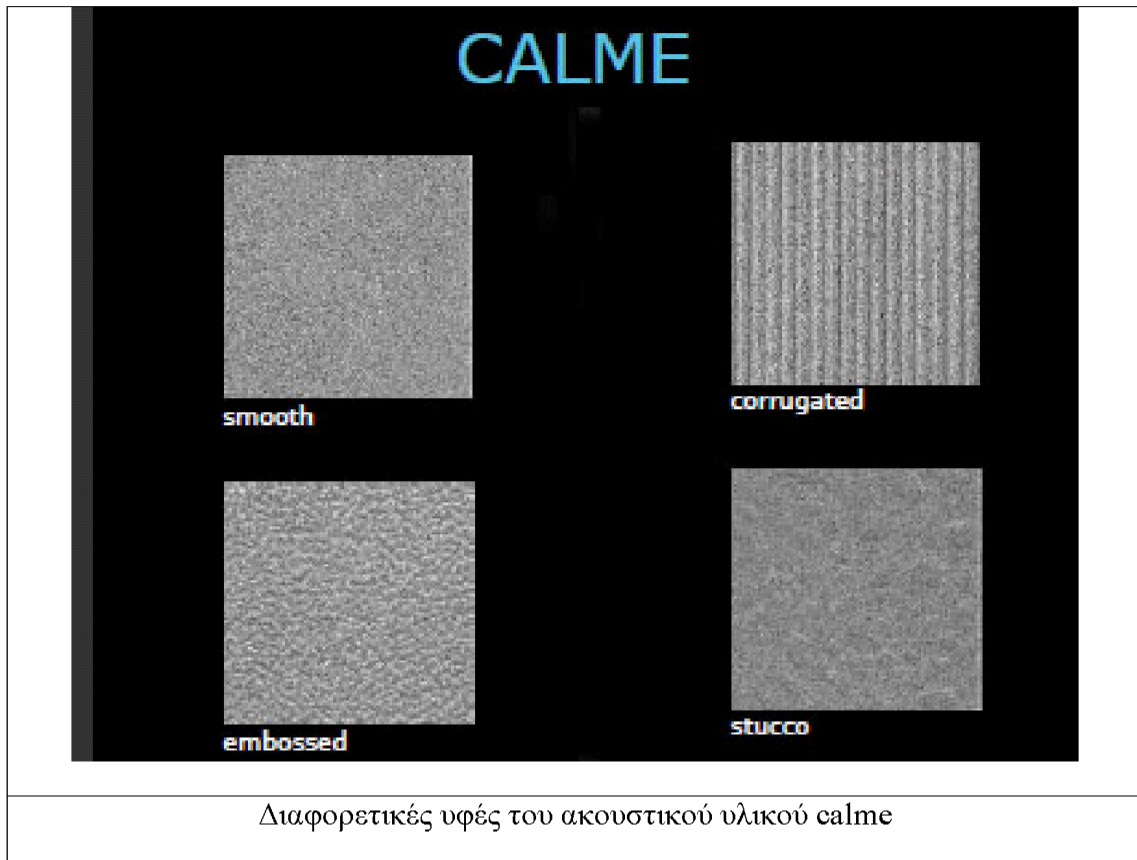
Ηχοαπομόνωση με και χωρίς sylomer (τοποθέτηση σε γυψοσανίδα)

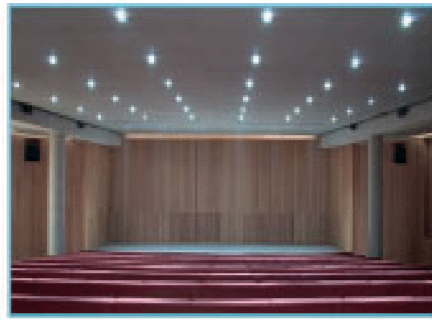


Τρόπος τοποθέτησης sylomer σε οροφή

Προμηθευτής: Εργασκουστική Ε.Π.Ε., Πανόρμου 71-73, 115-24 Αθήνα, Τηλ: 210 6980601

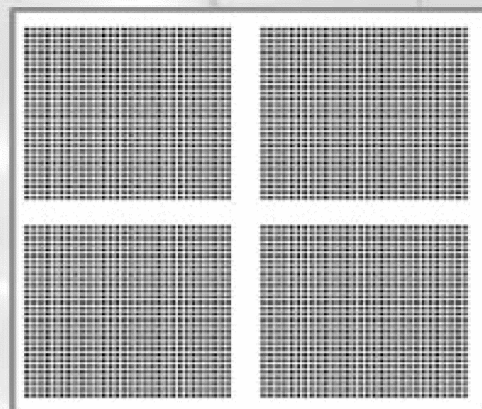
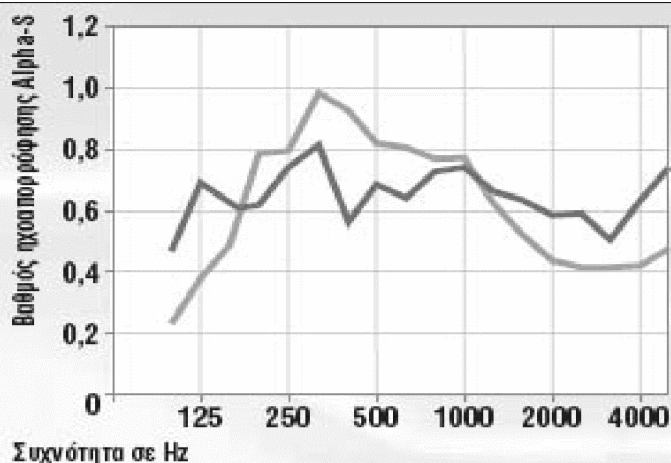
Δομικά υλικά ακουστικής μελέτης αίθουσας πολλαπλών χρήσεων δημοτικού





Τρόποι τοποθέτησης calme

Προμηθευτής: Acou, Κωλλέτη 11 & Εμμ Μπενάκη, Τηλ: 210 3806003.



Μέτρηση σε 400mm κενό αέρος

Alpha = 0,69 – απορρόφηση

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
α_s	0,71	0,75	0,70	0,75	0,59	0,63

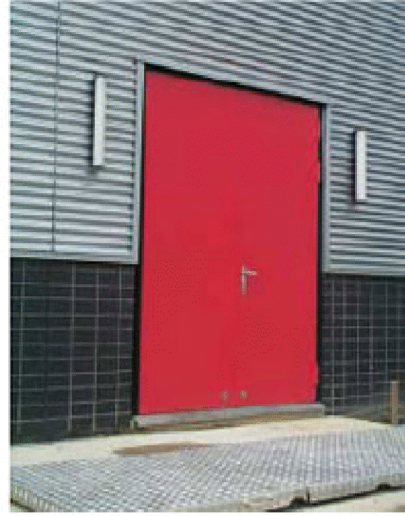
Διάτρηση σε block
με κυκλικές οπές 8/18 R
Σχέδιο B4
ΜΕ μονωτικό ορυκτών ινών

Γυψοσανίδα KNAUF 8/18 R

Προμηθευτής: Knauf Γυψοποιία Α.Β.Ε.Ε., Ευριπίδων 10, 176 74 Καλλιθέα, Τηλ.: 210-9310567

Συχνότητα (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
απορρόφηση κουρτίνας (sabine)	0,14	0,35	0,55	0,72	0,7	0,65
Κουρτίνα (βαρύ βελούδου 650 g/ m ²)						

MN41



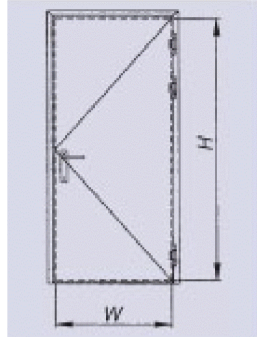
Συαχρότητα (Hz)	Ηχοαπομόνωση (dB)*	Διαστάσεις μονή	Διπλή
63	15	Max. width – 1435 mm	Max. width – 2905 mm
125	22	Max. height – 3010 mm	Max. height – 3010 mm
250	36		
500	44		
1000	41		
2000	42		
4000	46		
8000	49		

Ηχοαπομόνωση
 $R_w = 41$ dB

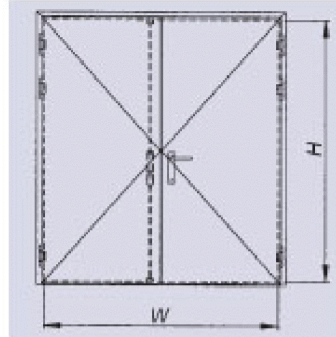
Ειδική ακουστική πόρτα merford MN41

Λεπτομέρειες της ακουστικής πόρτας MN41

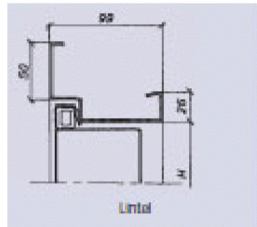
Single leaf



Double leaf

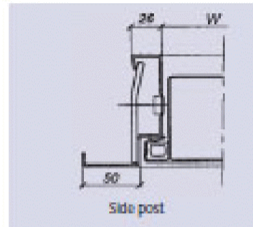


Top view



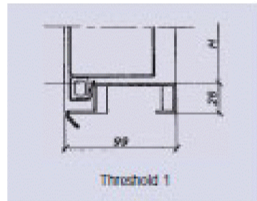
Lintel

Side view

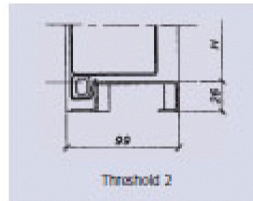


Side post

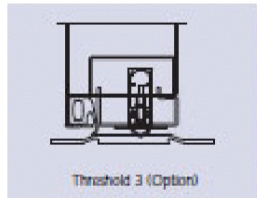
Bottom view



Threshold 1



Threshold 2



Threshold 3 (Option)



Left opening

Right opening

Σχεδιαστικές λεπτομέρειες ειδικής ακουστικής πόρτας MN41

Προμηθευτής: Εργοακουστική Ε.Π.Ε., Πανόρμον 71-73, 115-24 Αθήνα, Τηλ: 210 6980601



Πλάκες πετροβάμβακα RF 50-0

Διαθέσιμες διαστάσεις, θερμική αντίσταση και συσκευασία

Τύπος	Πάχος (mm)	Διαστάσεις (μήκος x πλάτος σε cm.)	Θερμική αντίσταση (m ² K/ W)	m ² / συσκευασία
RF 5030-0	30	120 x 60	0,83	10,08
RF 5040-0	40	120 x 60	1,11	7,20
RF 5050-0	50	120 x 60	1,38	5,76
RF 5060-0	60	120 x 60	1,66	5,04
RF 5080-0	80	120 x 60	2,22	3,60

Άλλες διαστάσεις και πάχη παράγονται κατόπιν παραγγελίας

Τεχνικά χαρακτηριστικά

Ιδιότητες	Σύμβολο	Μονάδα Μέτρησης	Τιμή	Πρότυπο
Πυκνότητα	d	kg/ m ³	50	DIN 18165
Επικάλυψη	-	-	Χωρίς επικάλυψη*	-
Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας στους 10 °C	λ _D	W/ mK	0,036	EN 13162
Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας	-	°C	750	ASTM C 447 - 85
Ειδική θερμοχωρητικότητα	C _p	kJ/ kgK	0,84	
Αντίσταση στη διάχυση υδρατμών	μ	-	1	DIN 52615
Συμπεριφορά στην υγρασία	Υλικό υδροαπωθητικό (water repellend)			
Συμπεριφορά στη φωτιά	Υλικό άκαυστο, κατηγορίας A1			
Συμπεριφορά στα χημικά	Χημικά αδρανές σε οξέα και βάσεις			

* Διατίθεται και με επικάλυψη αλουμινίου ή μαύρου υαλοπλήγματος

Χαρακτηριστικά πλάκας πετροβάμβακα RF 50-0

Προμηθευτής: ISOREN Κρικζώνης Α.Ε., Ντάλιας 11 Αχαρνάι, Αττική, Τηλ: 210 2402006

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Διονύσιος Ευθυμιάτος, *Ακουστική & Κτιριακές Εφαρμογές*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2007, ISBN: 978-960-7530-94-3
2. John M. Eargle, *Μουσική Ακουστική Τεχνολογία*, εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα 1999, ISBN: 960-405-939-4
3. Δημήτρης Σκαρλάτος, *Εφαρμοσμένη Ακουστική*, εκδόσεις Φιλομάθεια, Πάτρα 2003, ISBN: 960-87710-1-3
4. F. Alton Everest, *Εγχειρίδιο ακουσικής*, Εκδόσεις Α. Τζιόλα Ε. Θεσσαλονίκη 1998, ISBN: 960-7219-67-8
5. Thomas D Rossing , *Springer handbook of acoustics*, 1^η έκδοση, Springer, 2007, ISBN 0-387-30425-0
6. Daniel R Raichel, *The science and applications of acoustics*, 1^η έκδοση, springer, 2006, ISBN 0-387-26062-5
7. F. Alton Everest & Ken C. Polhman, *Masters handbook of acoustics*, 5^η έκδοση, USA, 2009, The McGraw- Hill companies, ISBN 978-0-07-160333-1
8. Tor Eric Vigran, *Building acoustics*, 1^η έκδοση, USA, 2008, Taylor & Francis, ISBN 978-0-415-42853-8
9. Marshall Long, *Architectural acoustics*, 1^η έκδοση, UK, 2006, Elsevier Academic Press, ISBN 978-0-12-455551-8
10. David A. Bies, Colin H. Hansen, *Engineering noise control*, 4^η έκδοση, London UK, 2009, Spon Press, ISBN 978-0-415-48706 – 1
11. Heinrich Kuttruff, *Room acoustics*, 5^η έκδοση, USA, 2009, Spon Press, ISBN 978-0-415-48021-5
12. Leland k. Irvine & Roy L. Richards, *Acoustics and noise control handbook for architects and builders*, 1^η έκδοση, Florida USA, 1998, Krieger publishing company, ISBN 0-89464-922-1
13. Rossing Moore & Wheeler, *The science of sound*, 3^η έκδοση, USA, 2002, ISBN 0-8053-8565-7
14. Vorlander M, *Auralization*, 1^η έκδοση, Berlin Germany, 2008, ISBN 978-3-540-48829-3
15. Κουζούπης Σ, *Σημειώσεις θεωρίας Εφαρμοσμένης Ακουστικής II*, ΤΕΙ Κρήτης, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας κι Ακουστικής, Φεβρουάριος 2008, Ρέθυμνο

16. Σηφάκης Μ. Πασχαλίδου Σ, *Εργαστηριακές σημειώσεις Εφαρμοσμένης ακουστικής Ι*, ΤΕΙ Κρήτης, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας κι Ακουστικής, 2007, Ρέθυμνο
17. Γ. Χατζηγεωργίου, *Ακουστική προσομοίωση, πρότυπες μετρήσεις και ανάλυση της ακουστικής του αμφιθεάτρου διδασκαλίας "Nelson Haden Auditorium"*, πρακτικά συνεδρίου ΕΛ.ΙΝ.Α 2006
18. Χ. Σπυρίδης - Ι. Μαλαφής - Α. Ακριτίδης- Κ. Δασκαλάκη - Σ. Δασκαλάκη – Χ. Κόχυλας – Σ. Παναγιωτοπούλου – Ν. Παπάς – Σ. Σιγάλας, *Μελέτη για την βελτίωση των ακουστικών ιδιοτήτων αμφιθεάτρου*, πρακτικά συνεδρίου ΕΛ.ΙΝ.Α 2006.
19. Ν. Τσιτσινάς, *Ακουστικός σχεδιασμός μουσικού Γυμνασίου Γιαννιτσών*, πρακτικά συνεδρίου ΕΛ.ΙΝ.Α 2006.
20. Α. Παπαστεφάνου – Χ. Σεβαστιάδης – Γ. Καλλίρης – Γ. Παπανικολάου, *Επαλήθευση αποτελεσμάτων της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων στον υπολογισμό των ιδιοσυχνοτήτων αμφιθεατρικής αίθουσας μεσαίου μεγέθους*, πρακτικά συνεδρίου ΕΛ.ΙΝ.Α 2006.
21. Γ. Βαλλάς – Χ. Σεβαστιάδης – Γ. Καλλίρης – Γ. Παπανικολάου, *Μοντελοποίηση και μετρήσεις αμφιθεατρικής αίθουσας διαλέξεων*, πρακτικά συνεδρίου ΕΛ.ΙΝ.Α 2006
22. Τ. Ζακυνθινός – Δ. Σκαρλάτος, *Ένας νέος δείκτης μέτρησης της ακουστικής ποιότητας των κλειστών χώρων*, πρακτικά συνεδρίου ΕΛ.ΙΝ.Α. 2006
23. Γ. Ε. Καμπουράκης, *Η ακουστική των αιθουσών διδασκαλίας και οι επιπτώσεις της στην επικοινωνία*, πρακτικά συνεδρίου ΕΛ.ΙΝ.Α. 2006
24. Ε. Τζεκάκης - Ν. Τσινικάς, *Ακουστική αιθουσών*, πρακτικά συνεδρίου Ελληνικής Ακουστικής Εταιρίας 1984
25. Κ. Καπλάνη, *Ακουστική μεγάλων κλειστών χώρων (θεάτρων, αιθουσών συναυλιών, συνεδριακών χώρων)*, πτυχιακή εργασία Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Ρέθυμνο 2008
26. Α. Τσομάκου, *Ακουστική μελέτη μικρών δωματίων ακρόασης*, πτυχιακή εργασία Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Ρέθυμνο 2007
27. R. Schubert, *Ακουστική σχολικών αιθουσών*, Κύκλος διαλέξεων ακουστικής, IEMA 2010, www.iema.gr/lecturesiema/acoustics
28. Μωραΐτης Χ, *Studio design*, Κύκλος διαλέξεων ακουστικής IEMA 2010, www.iema.gr/lecturesiema/acoustics

29. Murray Hodgson - Galen Wong, *Ray-tracing prediction of optimal conditions for speech in realistic classrooms*, Acoustics and Noise Research Group, University of British Columbia, 2009
30. Building Bulletin '93

ΣΕΛΙΔΕΣ ΣΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

31. www.personal.cityu.edu.hk , τελευταία επίσκεψη στις 27/02/2010
32. www.soundproofingcompany.com , τελευταία επίσκεψη στις 27/02/2010
33. www.avmentor.gr , τελευταία επίσκεψη στις 02/03/2010
34. home.gte.net/mjarzo/articlez.htm , τελευταία επίσκεψη στις 11/03/2010
35. <http://www.realtraps.com> , τελευταία επίσκεψη στις 15/04/2010
36. http://en.wikipedia.org/wiki/Sound_transmission_class , τελευταία επίσκεψη στις 27/02/2010
37. http://wilsonaudio.com/product_images/alex_decaychart_large.jpg , τελευταία επίσκεψη στις 11/03/2010