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

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ: «Γενική μελέτη, με έμφαση στην ακουστική, για την κατασκευή φωνητικού θαλάμου (Vocal Booth) στο χώρο του Εργαστηρίου Ηχοληψίας Ι (Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής) »

ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΑ: ΚΟΥΡΚΟΥΛΟΥ ΕΥΤΥΧΙΑ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΞΕΝΙΚΑΚΗΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΡΕΘΥΜΝΟ 2010

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της Πτυχιακής Εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Δημήτρη Ξενικάκη, για την πολύτιμη επιστημονική του καθοδήγηση, την παροχή θεωρητικού υλικού, και κυρίως για την υποστήριξη της όλης εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Σπύρο Κουζούπη για τις συμβουλές του κατά τη διάρκεια συγγραφής της εργασίας, αλλά και τη προσφορά των επιστημονικών του γνώσεων όταν αυτές ήταν απαραίτητες. Τέλος πολύ περισσότερο θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η Πτυχιακή Εργασία επικεντρώνεται στην ακουστική μελέτη μικρών κλειστών χώρων ηχογράφησης φωνής με στόχο την εφαρμογή στο Εργαστήριο Ηχοληψίας Ι του Τ.Ε.Ι. Ρεθύμνου ενός θαλάμου φωνής (Vocal Booth).

Μελετώνται διεξοδικά αρχικά τα φαινόμενα που αναπτύσσονται μέσα σε ένα μικρό κλειστό χώρο, οι παράμετροι των φαινομένων αυτών, πώς σχετίζονται με τα φυσικά χαρακτηριστικά ενός κλειστού χώρου και κυρίως πώς διαμορφώνουν την ακουστική ποιότητα των χώρων αυτών. Αναλύεται η επίδραση του θορύβου σε ένα studio ηχογραφήσεων και η σημασία των χαρακτηριστικών των τοιχωμάτων του σε σχέση με κάθε πηγή θορύβου σε αυτό. Στη συνέχεια παρουσιάζονται και αναλύονται παραδείγματα από τη βιβλιογραφία χώρων ηχογράφησης φωνής.

Τέλος παρατίθεται το αποτέλεσμα της όλης παραπάνω μελέτης, όπου και περιγράφονται τα κατασκευαστικά και ακουστικά χαρακτηριστικά του προτεινόμενου φωνητικού θαλάμου για το Εργαστήριο Ηχοληψίας Ι του Τ.Ε.Ι. Ρεθύμνου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΜΙΚΡΩΝ ΚΛΕΙΣΤΩΝ ΧΩΡΩΝ

1.1 Εισαγωγή 2

1.2 Στάσιμα κύματα 2

1.2.1 Στάσιμα κύματα (Μονοδιάστατη μορφή) 2

1.2.2 Στάσιμα κύματα σε τρείς διαστάσεις 4

1.3 Πυκνότητα τρόπων ταλάντωσης (Modal density) 8

1.4 Εξασθένηση των τρόπων ταλάντωσης (Mode decay rate) 9

1.5 Πλάτος ζώνης συχνοτήτων των τρόπων ταλάντωσης 10

1.6 Αποστάσεις και χρωματισμοί τρόπων ταλάντωσης 11

1.7 Σχήμα και διαστάσεις ενός δωματίου και η σημασία τους 12

1.8 Το κριτήριο Bonello 18

1.9 Τρόποι έλεγχου ενοχλητικών τρόπων ταλάντωσης 18

1.10 Ακουστική μελέτη κλειστών χώρων 19

1.11 Θεωρία απορροφήσεως και ηχοαπορροφητές 21

1.11.1 Πορώδη απορροφητικά υλικά 22

1.11.2 Απορροφητικά τύπου μεμβράνης 24

1.11.3 Συνηχητές 25

1.11.4 Διάτρητες επιφάνειες 25

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΠΗΓΕΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΘΟΡΥΒΟΥ

2.1 Καμπύλες σταθμισμένου κριτηρίου θορύβου (BNC) 27

2.2 Μετάδοση θορύβου σε κλειστούς χώρους 28

2.3 Δείκτης ηχομείωσης (R) 29

2.4 Υπολογισμός ηχομείωσης αερόφερτου θορύβου (μετάδοση σε κλειστό χώρο) 30

2.5 Νόμος της μάζας 30

2.5.1 Κάθετη πρόσπτωση 30

2.5.2 Τυχαία πρόσπτωση 31

2.6 Το φαινόμενο της σύμπτωσης 32

2.7 Το φαινόμενο του συντονισμού 35
2.8 Ηχομονωτική συμπεριφορά απλών επιφανειών 36
2.9 Ηχομονωτική συμπεριφορά διπλών επιφανειών 39
2.10 Θεωρία διπλών τοιχωμάτων 40
2.11 Συχνότητα συντονισμού του διάκενου 40
2.12 Η συχνότητα f_1 41
2.13 Πρακτικός υπολογισμός ηχομείωσης διπλών επιφανειών 42
2.14 Σταθμισμένος δείκτης ηχομείωσης (R_w) 43
2.15 Ταξινόμηση της μετάδοσης του ήχου (STC) 44
2.16 Επίδραση της απορρόφησης στην ηχομείωση 48
2.17 Επίδραση των συνδέσμων στην ηχομείωση 48
2.18 Επίδραση των ανοιγμάτων στην ηχομείωση 49
2.19 Επίδραση της απόσβεσης στην ηχομείωση 50
2.20 Αρχές λειτουργίας συστήματος HVAC σε ένα studio ηχογραφήσεων 50
2.21 Πηγές θορύβου συστημάτων κλιματισμού 51
2.22 Θόρυβος ανεμιστήρων 52
2.23 Έλεγχος θορύβου ανεμιστήρων 53
2.24 Σιγαστήρες 54
2.25 Εξασθένηση θορύβου στους αγωγούς 56
2.26 Μόνωση δονήσεων 58

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - STUDIO ΗΧΟΓΡΑΦΗΣΗΣ ΦΩΝΗΣ

3.1 Εισαγωγή 60
3.2 Studio ηχογράφησης υπέρθεσης φωνής (voice - over studio) 61
3.2.1 Ακουστική του studio 61
3.2.2 "Μαλακή" και "σκληρή" επένδυση 62
3.2.3 Έλεγχος τρόπων ταλάντωσης 63
3.2.4 Σχέδιο κατασκευής studio με "μαλακή" και "σκληρή" επένδυση 63
3.2.5 Χρόνος αντήχησης 65
3.3 Μικρός θάλαμος εκφώνησης (small announce booth) 65
3.3.1 Το πρόβλημα του μικρού χώρου 65
3.3.2 Παράδειγμα 1: Παραδοσιακός θάλαμος ομιλίας (traditional talk booth) 66
3.3.3 Παράδειγμα 2: Θάλαμος φωνής με Tube Traps 67

3.3.4 Παράδειγμα 3: Θάλαμος φωνής με διαχυτές 69
3.4 Studio με νεκρό άκρο και ενεργό άκρο (LEDE) 70

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Ο ΦΩΝΗΤΙΚΟΣ ΘΑΛΑΜΟΣ ΤΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΗΧΟΛΗΨΙΑΣ Ι
4.1 Βασικό σχήμα και διαστάσεις θαλάμου 72
4.2 Δομικά στοιχεία τοιχωμάτων φωνητικού θαλάμου 72
4.3 Παράθυρο 74
4.4 Πόρτα 75
4.5 Μελέτη συστήματος εξαερισμού 75
4.6 Μελέτη συχνοτήτων τρόπων ταλάντωσης φωνητικού θαλάμου 76
4.7 Τρόπος βελτίωσης της ακουστικής του θαλάμου 80
4.8 Συμπεράσματα 83

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 84

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Σχήμα 1.1. Απεικόνιση των αξονικών (a), εφαπτομενικών (b) και πλάγιων (c) τρόπων ταλάντωσης δωματίου με την έννοια των ακτίνων. 7

Σχήμα 1.2. Πλάτος ζώνης συχνοτήτων τρόπων ταλάντωσης. 11

Σχήμα 1.3. Σύγκριση των μετρήσιμων ηχητικών πεδίων σε δισδιάστατο ορθογώνιο δωμάτιο και μη, ίδιας επιφάνειας. 13

Σχήμα 1.4. Ευνοϊκές αναλογίες διαστάσεων δωματίου για να πετύχουμε ομογενή κατανομή συχνοτήτων τρόπων ταλάντωσης σε δωμάτιο. Η διακεκομμένη γραμμή περικλείει την περιοχή Bolt. Τα γράμματα αναφέρονται στον Πίνακα 1.1. 14

Σχήμα 1.5. Γραφικές παραστάσεις της κατανομής των αξονικών τρόπων ταλάντωσης για τις οκτώ "καλύτερες " αναλογίες δωματίων του Πίνακα 1.2. Οι μικροί αριθμοί δείχνουν το πλήθος των τρόπων ταλάντωσης που συμπίπτουν στις συγκεκριμένες συχνότητες. Θεωρούμε ότι το δωμάτιο έχει ύψος 3m. 17

Σχήμα 1.6. Διάγραμμα Bolt, Beranek, Newman, ελεγκτής της σταθερής κατάστασης της ακουστικής απόκρισης δωματίου. 19

Σχήμα 1.7. Βέλτιστη θέση απορροφητικού υλικού. 23

Σχήμα 1.8. Συντελεστής απορρόφησης πορώδους υλικού. 23

Σχήμα 1.9. Συντελεστής απορρόφησης απορροφητικού υλικού τύπου μεμβράνης. 24

Σχήμα 1.10. Συνηχητής. 25

Σχήμα 1.11. Διάφοροι τύποι διατρήσεων. 26

Πίνακας 1.1. Αναλογίες διαστάσεων ορθογωνίου δωματίου για ευνοϊκή κατανομή τρόπων ταλάντωσης. 15

Πίνακας 1.2. Κατάλληλη φόρμα δεδομένων για μελέτη της επίδρασης των αναλογιών δωματίου στην κατανομή των αξονικών τρόπων ταλάντωσης. 16

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Σχήμα 2.1. BCN καμπύλες. 27

Σχήμα 2.2.	Τρόποι μετάδοσης θορύβου.	28
Σχήμα 2.3.	Φαινόμενο σύμπτωσης σε εύκαμπτες επιφάνειες.	32
Σχήμα 2.4.	Δείκτης ηχομείωσης συναρτήσει της συχνότητας σε απλές επιφάνειες.	39
Σχήμα 2.5.	Πρότυπη καμπύλη κατάταξης δείκτη ηχομείωσης.	44
Σχήμα 2.6.	Καμπύλη αναφοράς υπολογισμού STC.	47
Σχήμα 2.7.	Παράδειγμα προσαρμογής της καμπύλης αναφοράς στις τιμές του δείκτη ηχομείωσης. (STC 25).	47
Σχήμα 2.8.	Ηχομείωση από απλή επιφάνεια Α από διπλή επιφάνεια χωρίς απορροφητικό υλικό Β και διπλής επιφάνειας με απορροφητικό υλικό Γ.	48
Σχήμα 2.9.	Μείωση του συντελεστή ηχομείωσης συναρτήσει του % ποσοστού του ανοίγματος.	49
Σχήμα 2.10.	Μετάδοση του θορύβου μέσω συστήματος κλιματισμού.	52
Σχήμα 2.11.	Τυπικά φάσματα εκπομπής θορύβου διαφόρων τύπων ανεμιστήρα.	53
Σχήμα 2.12.	Παραγωγή και εξασθένηση του θορύβου κατά μήκος διάταξης κλιματισμού (Πηγή Beranek Noise reduction, [1]).	54
Σχήμα 2.13.	Επίδραση της τμηματικής διασταυρωμένης περιοχής του αγωγού στην εξασθένηση του θορύβου του συστήματος θέρμανσης, κλιματισμού και εξαερισμού.	56
Σχήμα 2.14.	Μετρούμενη εξασθένηση θορύβου σε ορθογώνιους αγωγούς.	57
Σχήμα 2.15.	Εξασθένηση του θορύβου στις γωνίες ένωσης των σωλήνων των τετράγωνων αγωγών του συστήματος θέρμανσης, κλιματισμού και εξαερισμού χωρίς την στροφή των πτερυγίων.	58
Σχήμα 2.16.	Ο θόρυβος προερχόμενος από τον εξοπλισμό του συστήματος θέρμανσης, κλιματισμού και εξαερισμού μπορεί να μειωθεί με πλαίσια μόνωσης ή μπορεί στην πραγματικότητα να ενισχυθεί.	59
Πίνακας 2.1.	Παράγοντας απωλειών για διάφορα υλικά.	37
Πίνακας 2.2.	Τιμές αναφοράς.	43
Πίνακας 2.3.	Σταθμισμένος δείκτης ηχομείωσης (STC) για διάφορα κτιριακά χωρίσματα.	46

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Σχήμα 3.1.	Πρώτες ανακλάσεις.	61
Σχήμα 3.2.	Studio φωνής.	62
Σχήμα 3.3.	Studio με "μαλακή" επένδυση.	63
Σχήμα 3.4.	Studio με "σκληρή" επένδυση.	64
Σχήμα 3.5.	Παράδειγμα 1.	66
Σχήμα 3.6.	Tube Trap.	68
Σχήμα 3.7.	Παράδειγμα 2.	68
Σχήμα 3.8.	Παράδειγμα 3.	70
Σχήμα 3.9.	Θάλαμος φωνής για ήχο υψηλής ποιότητας. Οι πρώτες ανακλάσεις απαλείφονται από το απορροφητικό πίσω άκρο και ο διαχυτής εξασφαλίζει πυκνή εξασθένηση στον χώρο.	71

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Σχήμα 4.1.	Δομή τοιχωμάτων φωνητικού θαλάμου, [9].	73
Σχήμα 4.2.	Διάγραμμα ηχητικής απώλειας διάδοσης τοιχώματος, [9].	73
Σχήμα 4.3.	Διάγραμμα ηχομείωσης παράθυρου φωνητικού θαλάμου.	74
Σχήμα 4.4.	Ηχητική απώλεια διάδοσης ξύλινης πόρτας 44mm (34.2 kg/sq m), [9].	75
Σχήμα 4.5.	Συντελεστής απορρόφησης βαρύ χαλιού με υπόβαθρο τσόχας.	80
Σχήμα 4.6.	Απορρόφηση ακουστικών πλακιδίων.	81
Σχήμα 4.7.	Συντελεστής απορρόφησης σχηματοποιημένου αφρού Sonex.	82
Σχήμα 4.8.	Sonex.	82
Πίνακας 4.1.	Συχνότητες τρόπων ταλάντωσης φωνητικού θαλάμου.	76
Πίνακας 4.2.	Φόρμα ανάλυσης αξονικών τρόπων ταλάντωσης.	79

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο φωνητικός θάλαμος είναι μια αυτόνομη και εσώκλειστη κατασκευή ποικίλου μεγέθους και γεωμετρικού σχήματος. Χρησιμοποιείται κυρίως για την ηχογράφηση φωνής και σε μερικές περιπτώσεις για την ηχογράφηση ενισχυτή ηλεκτρικής κιθάρας.

Στο Εργαστήριο Ηχοληψίας Ι του Τ.Ε.Ι. Ρεθύμνου, βασικός στόχος του οποίου είναι η πρακτική εκμάθηση της δρομολόγησης ενός σήματος μικροφώνου στην κονσόλα, δεν υπάρχει ειδικά απομονωμένος χώρος ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί πλήρης αναπαράσταση της δρομολόγησης αυτής χωρίς να υπάρχει καμία αλληλεπίδραση του σήματος με το χώρο του εργαστηρίου (ανάδραση).

Σκοπός της Πτυχιακής Εργασίας είναι η ακουστική μελέτη για την πιθανή κατασκευή και τοποθέτησή στο χώρο του εργαστηρίου ενός φωνητικού θαλάμου (Vocal Booth) στόχος του οποίου είναι να καλύψει την παραπάνω ανάγκη και μόνο.

Στο 1^{ο} Κεφάλαιο αναλύεται διεξοδικά το φαινόμενο των στάσιμων κυμάτων. Συγκεκριμένα πως συμπεριφέρονται σε ένα κλειστό χώρο, πώς επιδρούν στην διαμόρφωση της ακουστικής του, ποιοι παράγοντες επηρεάζουν τη δράση τους και πως καθορίζουν το μέγεθος ενός κλειστού χώρου. Τέλος αναλύεται η έννοια της απορρόφησης, τα είδη των ηχοαπορροφητών και πως λειτουργούν.

Στο 2^{ο} Κεφάλαιο μελετώνται οι Καμπύλες Κριτηρίου Θορύβου (BNC) και ο ρόλος τους καθώς και ο Δείκτης Ηχομείωσης (R) μιας επιφάνειας και οι παράγοντες που τον καθορίζουν. Επίσης αναλύεται ο τρόπος ταξινόμησης της ηχομονωτικής ικανότητας μιας και πολλαπλών επιφανειών και ποιά από τα χαρακτηριστικά τους διαμορφώνουν το αποτέλεσμα. Τέλος παρουσιάζονται οι αρχές λειτουργίας ενός συστήματος κλιματισμού – εξαερισμού ενός studio ηχογραφήσεων καθώς και οι τρόποι ελέγχου των πηγών θορύβου του συστήματος αυτού.

Στο 3^{ο} Κεφάλαιο αναλύονται διεξοδικά, παραδείγματα χώρων ηχογράφησης φωνής, βάση βιβλιογραφίας και η λειτουργικότητα κάθε χώρου. Συγκεκριμένα αναλύονται οι διαστάσεις του, ο τρόπος και ο λόγος ακουστικής επένδυσης κάθε τοιχώματος του και τέλος τα θετικά και αρνητικά κάθε χώρου.

Στο 4^{ο} Κεφάλαιο περιγράφονται οι διαστάσεις, το σχήμα του φωνητικού θαλάμου, μελετώνται οι συχνότητες των τρόπων ταλάντωσης και προτείνεται ένας τρόπος βελτίωσης της ακουστικής του. Τέλος συνοψίζονται τα συμπεράσματα της όλης ακουστικής μελέτης για την κατασκευή του φωνητικού θαλάμου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΜΙΚΡΩΝ ΚΛΕΙΣΤΩΝ ΧΩΡΩΝ

1.1 - Εισαγωγή

Ο ήχος καθώς διαδίδεται σε ένα κλειστό χώρο συμπεριφέρεται διαφορετικά από ότι εάν διαδίδεται σε ένα ανοικτό χώρο. Προσπίπτει και ανακλάται διαδοχικά στα τοιχώματα του χώρου με αποτέλεσμα να αλλοιώνεται η αρχική κυματομορφή του εκπεμπόμενου ήχου και ο ήχος που φτάνει τελικά στο δέκτη να είναι το άθροισμα του απευθείας ήχου μαζί με τα στοιχεία του χώρου. Η αντήχηση, φαινόμενο σύμφωνα με το οποίο το ηχητικό πεδίο ενός χώρου διατηρείται και μετά το σταμάτημα της ηχητικής πηγής, είναι το κύριο χαρακτηριστικό των κλειστών χώρων. Οι διαστάσεις του χώρου, η γεωμετρία του και τα υλικά σύμφωνα με τα οποία είναι κατασκευασμένες όλες οι επιφάνειές του, είναι παράγοντες που την επηρεάζουν.

Οι κλειστοί χώροι διακρίνονται ακουστικά σε μεγάλους και μικρούς κλειστούς χώρους. Στους μικρούς κλειστούς χώρους, οι διαστάσεις των οποίων είναι συγκρίσιμες με το μήκος κύματος του μεταδιδόμενου ήχου, είναι έντονο το κυματικό φαινόμενο της δημιουργίας στάσιμων κυμάτων, τα οποία και είναι υπεύθυνα για την διαμόρφωση του ηχητικού πεδίου του χώρου.

1.2 - Στάσιμα κύματα

Όταν μια ενεργή ηχητική πηγή βρίσκεται σε ένα κλειστό χώρο τα προσπίπτον και ανακλώμενα ηχητικά κύματα συμβάλλουν μεταξύ τους προκαλώντας είτε την ενίσχυση είτε την ακύρωση αυτών με αποτέλεσμα να δημιουργούνται τα λεγόμενα **στάσιμα κύματα**. Τα στάσιμα κύματα πραγματοποιούνται σε συχνότητες (modes) μοναδικές για κάθε χώρο εξαρτώμενες από το σχήμα και τις διαστάσεις του χώρου, είναι ακίνητα στο χώρο και χαρακτηρίζονται από μεγάλες διακυμάνσεις της ηχητικής στάθμης πίεσης από σημείο σε σημείο του χώρου, διακυμάνσεις οι οποίες είναι αντιληπτές καθώς ο ακροατής κινείται διαμέσου του χώρου.

1.2.1 - Στάσιμα κύματα (Μονοδιάστατη μορφή)

Δύο επίπεδα ηχητικά κύματα συμβάλουν σε κάποιο σημείο του χώρου. Η ακουστική πίεση στο σημείο αυτό περιγράφεται από την μονοδιάστατη εξίσωση του Helmotz και δίνεται από την σχέση:

$$\frac{\partial^2 p(x)}{\partial x^2} + k^2 p(x) = 0 \qquad (1.1)$$

Η γενική λύση της εξίσωσης αυτής είναι της μορφής:

$$p(x) = A\cos kx + B\sin kx \tag{1.2}$$

όπου A, B είναι προσδιορισμένες αυθαίρετες σταθερές που προσδιορίζονται από τις αρχικές συνθήκες και $k = \omega/c$ όπου k ο κυματάριθμος, ω η κυκλική συχνότητα και c η ταχύτητα του ήχου.

Εφαρμόζοντας τα παραπάνω, έστω ότι ένα επίπεδο ηχητικό κύμα διαδίδεται κάθετα σε δύο ανένδοτες παράλληλες επιφάνειες με μηδενική απορρόφηση. Το ηχητικό κύμα ανακλάται στις επιφάνειες και συμβάλλει με το προσπίπτον ηχητικό κύμα δημιουργώντας στάσιμα κύματα. Εφόσον οι επιφάνειες είναι ανένδοτες ικανοποιούν τις συνθήκες:

$$\left.\frac{dp(x)}{dx}\right|_{x=0,L} = 0 \tag{1.3}$$

Διαφορίζοντας την εξίσωση (1.2) προκύπτει:

$$\left.\frac{dp(x)}{dx}\right| = -kA\sin kx + kB\cos kx \tag{1.4}$$

Με εφαρμογή των αρχικών συνθηκών παίρνουμε:

για $x = 0$ τότε $0 = Bk$ άρα $B=0$

για $x = L$ τότε $0 = AksinkL$ άρα $k = \frac{n\pi}{L}$ όπου $n = 0, 1, 2, 3, \ldots$

Αντικαθιστώντας στη σχέση $k = \frac{n\pi}{L}$ όπου $k = \omega/c$ όπου $\omega = 2\pi f$ προκύπτει η σχέση:

$$f = \frac{nc}{2L},\ n = 0, 1, 2, 3,\ldots \tag{1.5}$$

Η παραπάνω σχέση δηλώνει τις συχνότητες (modes) που δημιουργούνται στάσιμα κύματα μεταξύ δύο παράλληλων επιφανειών όπου f η συχνότητα του στάσιμου κύματος, n η τάξη του στάσιμου κύματος και L η απόσταση μεταξύ των δύο

επιφανειών. Η απόσταση μεταξύ των παράλληλων επιφανειών καθορίζει τις συχνότητες σχηματισμού των στάσιμων κυμάτων. Η χαμηλότερη συχνότητα f_0 (όπου n=1 και $L = \lambda/2$) ονομάζεται **θεμελιώδης συχνότητα** του χώρου μεταξύ των ανένδοτων παράλληλων επιφανειών και συνοδεύεται από ένα συρμό τρόπων ταλάντωσης ($2f_0$, $3f_0$,…) όπου κάθε ένας από αυτούς εμφανίζει συντονισμό, [1].

1.2.2 - Στάσιμα κύματα σε τρείς διαστάσεις

Συντονισμοί υπό μορφή στάσιμων κυμάτων μπορούν να εμφανιστούν λόγω ανακλάσεων των ηχητικών κυμάτων σε παραπάνω από δύο επιφάνειες.

Σε κάποιο σημείο ενός κλειστού χώρου φτάνουν δύο σφαιρικά ηχητικά κύματα, τα κύματα συμβάλουν και κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις σχηματίζονται στάσιμα κύματα. Η εξίσωση που περιγράφει τα κύματα αυτά είναι η τρισδιάστατη εξίσωση του Helmholtz της ακουστικής πίεσης, η μορφή της οποίας είναι:

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \tag{1.6}$$

Λόγω των στάσιμων κυμάτων που δημιουργούνται μπορούμε να υποθέσουμε ότι η λύση της εξίσωσης (1.6) είναι της μορφής:

$$p(x, y, z) = p(x)\ p(y)\ p(z) \tag{1.7}$$

Με παραγώγιση της εξίσωσης (1.7) λαμβάνοντας υπόψη την σχέση (1.6) προκύπτει η εξίσωση:

$$\frac{1}{p(x)}\frac{d^2 p(x)}{dx^2} + \frac{1}{p(y)}\frac{d^2 p(y)}{dy^2} + \frac{1}{p(z)}\frac{d^2 p(z)}{dz^2} + k^2 = 0 \tag{1.8}$$

Οι λύσεις της παραπάνω εξίσωσης είναι οι εξής:

$$p(x) = A_x \cos k_x x + B_x \sin k_x x \tag{1.9}$$

$$p(y) = A_y \cos k_y y + B_y \sin k_y y \tag{1.10}$$

$$p(z) = A_z \cos k_z Z + B_z \sin k_z Z \tag{1.11}$$

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η εφαρμογή των παραπάνω σχέσεων σε χώρους σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου, διότι οι χώροι αυτοί για συγκεκριμένες συχνότητες συντονίζονται, συνεπώς δημιουργούνται σε αυτούς στάσιμα κύματα.

Έστω ότι έχουμε ένα χώρο σχήματος **ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου** διαστάσεων l_x, l_y, l_z όπου τα τοιχώματά του είναι άκαμπτα, στον οποίο διαδίδεται αρμονικό ηχητικό κύμα. Το ηχητικό κύμα προσπίπτει στα τοιχώματα του χώρου και συμβάλει με τις ανακλάσεις σχηματίζοντας στάσιμα κύματα. Οι αρχικές συνθήκες που ισχύουν είναι οι εξής:

$$\left.\frac{dp(x)}{dx}\right|_{x=0,l_x} = 0, \qquad \left.\frac{dp(y)}{dy}\right|_{y=0,l_y} = 0, \qquad \left.\frac{dp(z)}{dz}\right|_{z=0,l_z} = 0$$

Με παραγώγιση της εξίσωσης (1.9) προκύπτει:

$$\frac{dp(x)}{dx} = -A_x k_x \sin k_x x + B_x k_x \cos k_x x \tag{1.12}$$

Εφαρμόζοντας τις αρχικές συνθήκες στην (1.12) προκύπτει:

για $\chi = 0$ τότε $0 = k_x B_x$ άρα $B_x = 0$ (1.13)

για $\chi = l_x$ τότε $0 = A_x k_x \sin k_x l_x$ άρα $k_x = \dfrac{n_x \pi}{l_x}$ (1.14)

Πραγματοποιώντας την ίδια διαδικασία για τις εξισώσεις (1.10), (1.11) προκύπτουν:

$$B_y = 0, \qquad k_y = \frac{n_y \pi}{l_y}, \qquad B_z = 0, \qquad k_z = \frac{n_z \pi}{l_z} \tag{1.15}$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (1.9), (1.10), (1.11) στην σχέση (1.7) λαμβάνοντας υπόψη τις (1.13), (1.15) προκύπτει η σχέση:

$$p(x, y, z) = A_{n_x n_y n_z} \cos k_x x \cos k_y y \cos k_z z \tag{1.16}$$

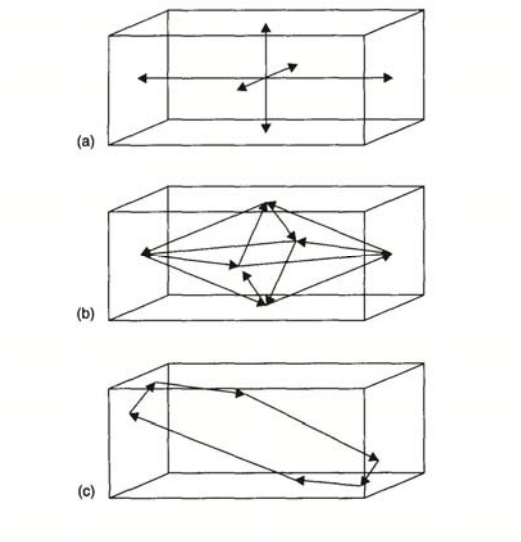
Η παραπάνω σχέση περιγράφει τη μορφή που σχηματίζουν τα στάσιμα κύματα στο χώρο. Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (1.14), (1.15) στην σχέση (1.8) προκύπτει η εξίσωση:

$$k = k_{n_x n_y n_z} = \pi \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \tag{1.17}$$

Η παραπάνω εξίσωση περιγράφει τον τύπο των τρόπων ταλάντωσης σε ένα χώρο σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου οι οποίοι είναι τρείς:

1. Οι **Αξονικοί** (axial modes), δημιουργούνται από τις ανακλάσεις μεταξύ δύο απέναντι επιφανειών. Περιέχουν τη μεγαλύτερη ηχητική ενέργεια του αντηχητικού πεδίου.
2. Οι **Εφαπτομενικοί** (tangential modes), δημιουργούνται από τις ανακλάσεις μεταξύ τεσσάρων επιφανειών (τοίχοι στο ίδιο επίπεδο). Ενεργειακά έχουν την μισή ηχητική ενέργεια σε σχέση με τους αξονικούς (-3dB).
3. Οι **Πλάγιοι** (oblique modes), δημιουργούνται από τις ανακλάσεις μεταξύ οχτώ επιφανειών (από όλους τους τοίχους του δωματίου). Η ηχητική τους ενέργεια είναι το ¼ της αντίστοιχης των αξονικών τρόπων ταλάντωσης (-6dB).

Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται οι βασικές διαδρομές των τρόπων ταλάντωσης με την έννοια των ακτίνων. Μια τέτοια είδους προσέγγιση καταρρίπτεται, με τις ακτίνες να χάνουν κάθε έννοια όταν μελετάμε την ακουστική συμπεριφορά ενός κλειστού χώρου του οποίου οι διαστάσεις του είναι της τάξης μεγέθους του μήκους κύματος του ήχου που ενεργεί σε αυτόν. Η ανάλυση της κυματικής συμπεριφοράς του ήχου είναι αυτή που εφαρμόζεται σε αυτούς τους χώρους.



Σχήμα 1.1. *Απεικόνιση των αξονικών (a), εφαπτομενικών (b) και πλάγιων (c) τρόπων ταλάντωσης δωματίου με την έννοια των ακτίνων.*

Κάθε είδος τρόπου ταλάντωσης έχει τον δικό του συρμό τρόπων ταλάντωσης, με τη διαφορά ότι σε ένα χώρο οι αξονικοί τρόποι ταλάντωσης διαθέτουν τρείς θεμελιώδεις αξονικές συχνότητες, μια για κάθε ζεύγος παράλληλων τοίχων, οπού κάθε μία έχει τον δικό της συρμό τρόπων ταλάντωσης.

Η διαφορετικότητα ως προς την ενέργεια των παραπάνω τύπων τρόπων ταλάντωσης είναι εμφανής σε χώρους συγκεκριμένης ακουστικής συμπεριφοράς. Στην πράξη, είναι απαραίτητο να υπολογίζουμε και να λαμβάνουμε σοβαρά υπόψη τους αξονικούς τρόπους ταλάντωσης, αν αναλογιστούμε μάλιστα ότι το πλήθος τους είναι μικρότερο των άλλων, ρίχνοντας βέβαια μια "ματιά" και στους εφαπτομενικούς τρόπους ταλάντωσης οι οποίοι μερικές φορές αποτελούν σημαντικό παράγοντα, σε αντίθεση με τους πλάγιους τρόπους ταλάντωσης οπού σπανίως η δράση τους είναι αρκετή ώστε να συνεισφέρουν στην αποδοτικότητα ενός χώρου.

Οι συχνότητες όλων των πιθανών τρόπων ταλάντωσης (modes) που μπορούν να δημιουργηθούν σε ένα χώρο σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου υπολογίζονται από τη σχέση:

$$f_{n_X n_Y n_Z} = \frac{c}{2}\sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \qquad (1.18)$$

όπου f η συχνότητα του τρόπου ταλάντωσης, c η ταχύτητα του ήχου (344m/s στους 20°C), L_x, L_y, L_z οι διαστάσεις μήκος, πλάτος, ύψος του χώρου και n_χ, n_y, n_z σταθερές που παίρνουν ανεξάρτητα η κάθε μια τις ακέραιες τιμές 0, 1, 2, 3,…κ.λπ. Ο συντελεστής n_x μας δείχνει την διάδοση του κύματος παράλληλα προς τον άξονα x και αντίστοιχα οι n_y, n_z παράλληλα προς τον άξονα y και άξονα z αντίστοιχα. Για τους αξονικούς τρόπους ταλάντωσης έχουμε (n_x , 0, 0), (0, n_y , 0), (0, 0, n_z), για τους εφαπτομενικούς έχουμε (n_x , n_y , 0), (0, n_y , n_z), (n_x, 0, n_z) και για τους πλάγιους έχουμε (n_x , n_y , n_z), [1]. Εάν οι διαστάσεις του δωματίου είναι σε σχέση πολλαπλότητας μεταξύ τους τότε οι συχνότητες των τρόπων ταλάντωσης του δωματίου όχι μόνο θα ταυτίζονται αλλά θα είναι και σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους.

Συνεπώς σε ένα χώρο σχήματος ορθογώνιου παραλληλεπιπέδου, στον οποίο βρίσκεται μια ενεργή ηχητική πηγή, ο χώρος μπορεί και αναπτύσσει μόνο ορισμένες συχνότητες, αυτές στις οποίες συντονίζεται, κάτι το οποίο είναι αντιληπτό όταν η πηγή τεθεί εκτός λειτουργίας μέχρι η ενέργειά των κυμάτων απορροφηθεί από τα τοιχώματα του χώρου. Ως αποτέλεσμα, οι υπόλοιπες συχνότητες να ακούγονται σχετικά "ξερές" συγκριτικά με τις συχνότητες συντονισμού του χώρου, λόγω του ότι δεν συνοδεύονται από τη διάρκεια εκείνη που δημιουργεί ο συντονισμός του χώρου.

Κάτω από αυτές τις συνθήκες η ενέργεια του δωματίου θα έχει την τάση να συγκεντρώνεται σε μερικούς τρόπους ταλάντωσης, με αποτέλεσμα τον έντονο χρωματισμό του ήχου του δωματίου.

Η στάθμη πίεσης σε κάποιο σημείο του χώρου είναι συνάρτηση των συντεταγμένων του σημείου και του χρόνου και δίνεται από τη σχέση:

$$p(x,y,z,t) = \sum_{n_x=1}^{\infty} \sum_{n_y=1}^{\infty} \sum_{n_z=1}^{\infty} A_{n_x n_y n_z} \cos k_x x \cos k_y y \cos k_z z \qquad (1.19)$$

όπου $A_{n_x n_y n_z}$ προσδιοριστέα σταθερά .

1.3 - Πυκνότητα τρόπων ταλάντωσης (Modal density)

Το πλήθος των συχνοτήτων συντονισμού ενός κλειστού χώρου αυξάνεται με την συχνότητα και τις διαστάσεις του χώρου.

Για ένα χώρο σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου ο αριθμός των τρόπων ταλάντωσης, ανά ζώνη εύρους συχνοτήτων df, εκφράζεται από τη σχέση:

$$dN = \left[\frac{4\pi f^2 V}{c^3} + \frac{\pi f S}{2c^2} + \frac{L}{8c} \right] df \qquad (1.20)$$

όπου N ο αριθμός των τρόπων ταλάντωση, V ο όγκος του χώρου (m^3), $S=2\ (L_xL_y + L_yL_z + L_x L_z)$ η συνολική επιφάνεια του χώρου (m^2), $L= 4\ (L_x + L_y + L_z)$ το άθροισμα των ακμών, f η συχνότητα (Hz) και c η ταχύτητα του ήχου (m/s).

Όταν η συχνότητα είναι μεγάλη ($f \rightarrow \infty$) η παραπάνω σχέση ισχύει όχι μόνο για χώρους σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου αλλά και για χώρους οποιουδήποτε σχήματος. Ολοκληρώνοντας την σχέση (1.20) προκύπτει η παρακάτω σχέση βάση της οποίας υπολογίζεται ο αριθμός των τρόπων ταλάντωσης ενός χώρου από 0 Hz έως τη συχνότητα f.

$$\mathrm{N} = \frac{4\pi f^3 V}{3c^3} + \frac{\pi f^2 S}{4c^2} + \frac{fL}{8c} \qquad (1.21)$$

Ομοίως, για τις υψηλές συχνότητες ο παραπάνω τύπος εφαρμόζεται ανεξαρτήτως του σχήματος του χώρου.

1.4 - Εξασθένηση των τρόπων ταλάντωσης (Mode decay rate)

Το ανθρώπινο αυτί είναι ένα όργανο πολύ ευαίσθητο σε παροδικά φαινόμενα. Τόσο η ομιλία όσο και η μουσική είναι παροδικά φαινόμενα ευρείας ζώνης συχνοτήτων τα οποία μπορούν να διεγείρουν και να συντονίσουν ένα κλειστό χώρο.

Διεγείροντας ένα κλειστό χώρο, το ηχητικό του πεδίο απαρτίζεται από ένα μεγάλο πλήθος τρόπων ταλάντωσης όπου κάθε ένας εξασθενεί με τον δικό του ρυθμό, αποτελώντας την μικροδομή του αντηχητικού πεδίου του χώρου. Η εξέταση του ρυθμού εξασθένησης κάθε τρόπου ταλάντωσης αποτελεί βασική προϋπόθεση για την κατανόηση του τρόπου εξασθένησης του ήχου στο χώρου.

Ο **ρυθμός πτώσης** των τρόπων ταλάντωσης ορίζεται ως ο ρυθμός μείωσης σε dB ανά δευτερόλεπτο ενός συγκεκριμένου τρόπου ταλάντωσης και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$d = \frac{60}{RT_{60}} \qquad (1.22)$$

όπου d ο ρυθμός μείωσης σε dB ανά δευτερόλεπτο και RT_{60} ο χρόνος αντήχησης του χώρου. Ο ρυθμός πτώσης των τρόπων ταλάντωσης μοιάζει με το χρόνο αντήχησης αλλά στην πραγματικότητα είναι δύο διαφορετικά ποσά.

Οι εξισώσεις υπολογισμού του χρόνου αντήχησης εφαρμόζονται σε μεγάλους και ζωντανούς χώρους οπού υπάρχουν αντηχητικά πεδία, επομένως δεν είναι εφαρμόσιμοι σε μικρούς και σχετικά πολύ απορροφητικούς χώρους. Στους χώρους αυτούς βρίσκει εφαρμογή ο ρυθμός πτώσης τρόπου ταλάντωσης.

1.5 - Πλάτος ζώνης συχνοτήτων των τρόπων ταλάντωσης

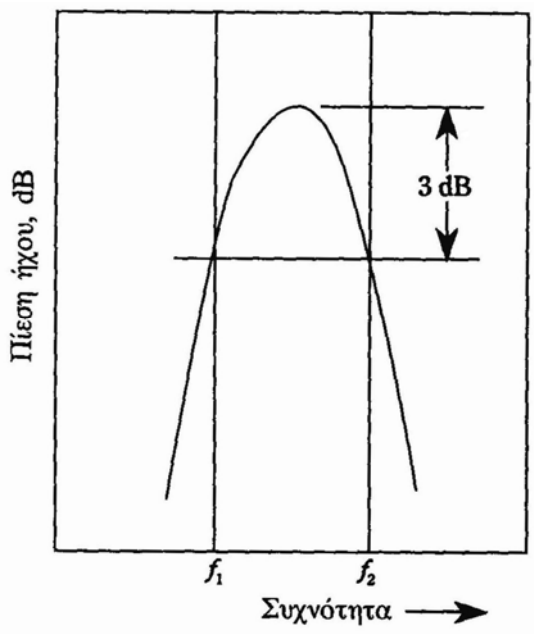
Σε κλειστούς χώρους οι διαστάσεις των οποίων είναι της τάξης μεγέθους του μήκους κύματος του ακουστού ήχου, εμφανίζεται το πρόβλημα της υπερβολικής απόστασης μεταξύ των τρόπων ταλάντωσης, κυρίως στις χαμηλές συχνότητες, οδηγώντας σε μια ακανόνιστη απόκριση του χώρου και αυτό διότι η απόκριση του χώρου αποτελείται από συνδυασμένες αποκρίσεις των τρόπων ταλάντωσης.

Κάθε τρόπος ταλάντωσης έχει μια καμπύλη συντονισμού, μικρού, αλλά πεπερασμένου πλάτους ζώνης συχνοτήτων όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2., καθορίζοντας εν μέρη πόσο αντιληπτοί είναι οι τρόποι ταλάντωσης.

Το εύρος συχνοτήτων της καμπύλης συντονισμού (bandwidth) εξαρτάται από τον όγκο και την απορρόφηση του χώρου στην εν λόγω συχνότητα. Ορίζεται από τα σημεία στα οποία η στάθμη είναι χαμηλότερη κατά 3 dB από τη μέγιστη στάθμη του τρόπου ταλάντωσης και δίδεται από τη σχέση:

$$f_2 - f_1 = \frac{2.2}{RT_{60}} \tag{1.23}$$

Σε συνηθισμένα studio τα πλάτη ζώνης συχνοτήτων των τρόπων ταλάντωσης είναι της τάξης των 5 Hz.



Σχήμα 1.2. *Πλάτος ζώνης συχνοτήτων τρόπων ταλάντωσης.*

1.6 - Αποστάσεις και χρωματισμοί τρόπων ταλάντωσης

Η απόσταση των συχνοτήτων των τρόπων ταλάντωσης που αναπτύσσει ένας κλειστός χώρος, αποτελεί εξίσου σημαντικό παράγοντα καθορισμού της ποιότητας του ήχου στο χώρο αυτό. Βέβαια τα ίδια τα ακουστικά χαρακτηριστικά του χώρου είναι αυτά που καθορίζουν ποιες είναι αυτές οι συχνότητες, οι αποστάσεις των οποίων προκαλούν ενόχληση στο ανθρώπινο αυτί.

Ο Gilford εκφράζοντας τη γνώμη του αναφέρει ότι ένας αξονικός τρόπος ταλάντωσης που χωρίζεται με περισσότερα από 20 Hz από τον επόμενο αξονικό τρόπο ταλάντωσης θα έχει την τάση να είναι απομονωμένος ακουστικά. Θα έχει την τάση να μην διεγείρεται μέσω σύζευξης λόγω υπερκαλυπτόμενων ορίων, αλλά θα έχει την τάση να ενεργεί ανεξάρτητα. Σ'αυτή την απομονωμένη κατάσταση μπορεί να αντιδράσει σε μια συνιστώσα του σήματος που βρίσκεται κοντά στην δική του συχνότητα και να δώσει στην συνιστώσα αυτή μια αδικαιολόγητη μεγάλη ενίσχυση με συντονισμό. Αναφέρει επίσης ότι οι χρωματισμοί είναι ίσως ακουστοί όταν ένας αξονικός τρόπος ταλάντωσης συμπίπτει με ένα θεμελιώδη ή με την πρώτη μορφή τουλάχιστον ενός ήχου φωνήεντος ομιλίας, και βρίσκονται στην περιοχή ενέργειας ομιλίας. Τέτοιοι χρωματισμοί έχουν βρεθεί κατά προσέγγιση στην περιοχή συχνοτήτων από 75-200Hz με κορύφωση στην συχνοτική περιοχή 250-300Hz. Χρωματισμοί ομιλίας κάτω από τα 80Hz είναι σπάνιοι επειδή σ'αυτό το τμήμα του φάσματος υπάρχει πολύ λίγη ενέργεια ομιλίας. Ουσιαστικά δεν υπάρχουν

χρωματισμοί ομιλίας πάνω από τα 300Hz είτε για ανδρικές είτε για γυναικείες ομιλίες. Οι χρωματισμοί των τρόπων ταλάντωσης είναι περισσότερο καταφανείς στην ομιλία παρά στην μουσική.

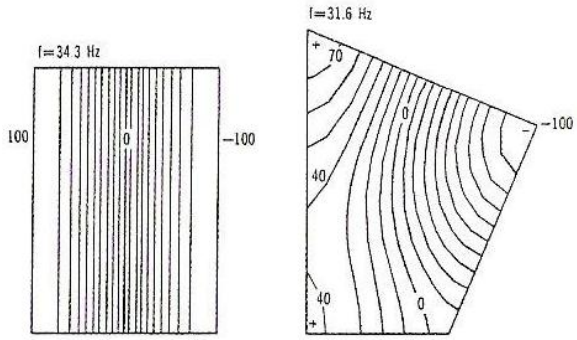
Κατά τον Bonello ο οποίος εξετάζει και τους τρείς τύπους τρόπων ταλάντωσης, αναφέρει ότι είναι επιθυμητό να έχουμε όλες τις συχνότητες των τρόπων ταλάντωσης σε μια κρίσιμη ζώνη τουλάχιστον 5% μακριά από την συχνότητά τους. Για παράδειγμα, μια συχνότητα τρόπου ταλάντωσης στα 20Hz και μία άλλη στα 21Hz θα ήταν μόλις αποδεκτές. Μια παρόμοια απόσταση 1Hz, ωστόσο, δεν θα ήταν αποδεκτή στα 40Hz (το 5% των 40Hz είναι 2Hz). Έτσι βλέπουμε ότι η έννοια του Gilford ήταν κύρια πόσο μακριά σε συχνότητα πρέπει να βρίσκονται μεταξύ τους οι αξονικοί τρόποι ταλάντωσης για να αποφύγουμε τα προβλήματα που προκύπτουν από ανεξάρτητη και μη συζευγμένη δράση των τρόπων ταλάντωσης. Η προσπάθεια του Bonello έχει να κάνει με διαχωρισμούς για να αποφεύγονται φαινόμενα εκφυλισμού (σύμπτωσης).

Μια συνηθισμένη πηγή διαχωρισμού είναι η μηδενική απόσταση μεταξύ συχνοτήτων των τρόπων ταλάντωσης. Μηδενική απόσταση σημαίνει ότι οι συχνότητες δύο τρόπων ταλάντωσης συμπίπτουν (αυτό ονομάζεται εκφυλισμός από τους επιστήμονες της ακουστικής), και αυτοί οι εκφυλισμοί έχουν την τάση να υπερτονίζουν τις συνιστώσες των σημάτων στην συχνότητα αυτή, [6].

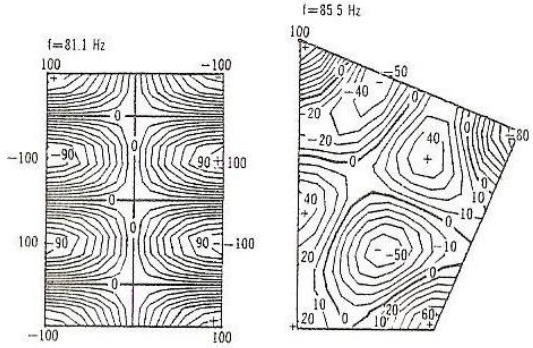
1.7 - Σχήμα και διαστάσεις ενός δωματίου και η σημασία τους

Όταν σχεδιάζουμε ένα χώρο, στόχος μας είναι η δημιουργία ενός ομοιόμορφου ηχητικού πεδίου το οποίο επιτυγχάνεται με τη βέλτιστη ισοκατανομή των τρόπων ταλάντωσης του δωματίου. Το σχήμα και οι διαστάσεις του χώρου είναι στοιχεία που βοηθούν στην επίτευξη του στόχου αυτού, ομαλοποιώντας τα όποια προβλήματα του χώρου, χωρίς βέβαια να τα εξαλείφουν.

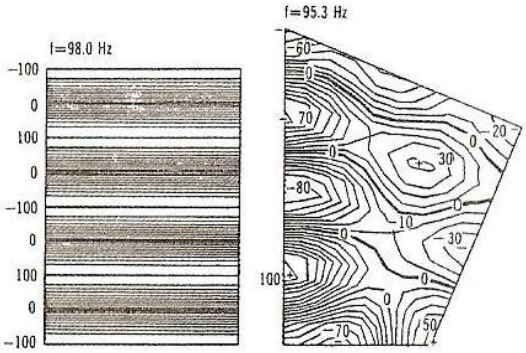
Το ακουστικό όφελος από τη χρήση χώρων με ακανόνιστο σχήμα είναι αμφιλεγόμενο. Η στρέβλωση δύο ή και περισσοτέρων τοίχων του δωματίου είναι μόνο ένας τρόπος βελτίωσης της γενικής διάχυσης του δωματίου, με το αποτέλεσμα μάλιστα να είναι μικρό. Το παρακάτω σχήμα αναπαριστά με ακρίβεια τα αποτελέσματα μελέτης που βασίζεται στην προσέγγιση πεπερασμένων στοιχείων, αποκαλύπτοντας την παραμόρφωση του ηχητικού πεδίου σε μη ορθογώνια δωμάτια, αποτέλεσμα της υπερβολικής στρέβλωσης των επιφανειών του δωματίου.



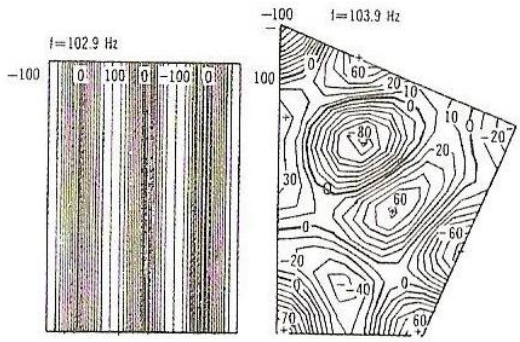
Α. Το ηχητικό πεδίο του τρόπου ταλάντωσης 1,0 είναι παραμορφωμένο στο μη ορθογώνιο δωμάτιο και η συχνότητα του στάσιμου κύματος έχει μετατοπιστεί λίγο.



Β. Το ηχητικό πεδίο του τρόπου ταλάντωσης 1,3 είναι παραμορφωμένο στο μη ορθογώνιο δωμάτιο και η συχνότητα του στάσιμου κύματος έχει μετατοπιστεί λίγο.



C. Η μεγάλη παραμόρφωση στο ορθογώνιο δωμάτιο συνοδεύεται από μετατόπιση της συχνότητας συντονισμού.



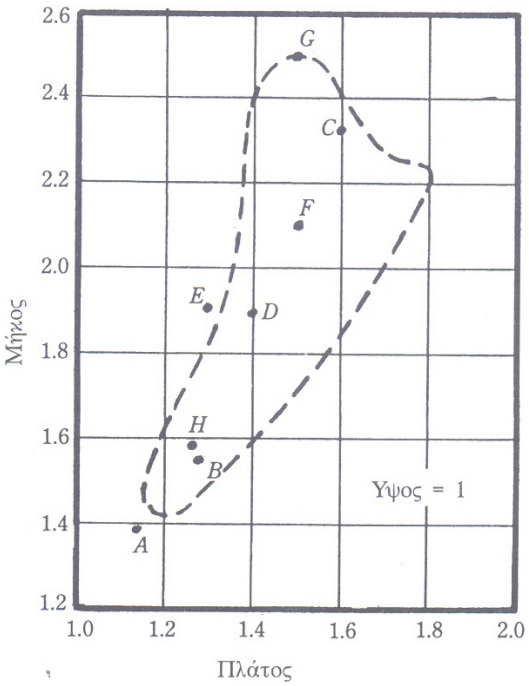
D. Η παραμόρφωση της μορφής των τρόπων ταλάντωσης είναι ακόμα μεγαλύτερη.

Σχήμα 1.3. *Σύγκριση των μετρήσιμων ηχητικών πεδίων σε δισδιάστατο ορθογώνιο δωμάτιο και μη, ίδιας επιφάνειας.*

Μελετώντας το παραπάνω σχήμα διαπιστώνουμε πρώτον ότι οι ενοχλητικοί τρόποι ταλάντωσης δεν εξαφανίστηκαν και δεύτερον ότι δεν υπάρχει ουσιαστική αλλαγή της συχνότητας των τρόπων ταλάντωσης αλλά ούτε και ως προς την κατανομή των τρόπων ταλάντωσης σε σχέση με τη συχνότητα.

Τα ορθογώνια δωμάτια είναι αυτά που επικρατούν. Βασικό στοιχείο της ακουστικής τους είναι η αναλογία των διαστάσεών τους. Παρακάτω αναφέρονται κάποιες αναλογίες δωματίων που προσφέρουν καλή κατανομή των τρόπων ταλάντωσης, όχι όμως και την ιδανική και είναι αποτέλεσμα στατιστικών αναλύσεων.

Ο Bolt δίνει μια περιοχή αναλογιών δωματίου που παράγουν τις απαλότερες χαρακτηριστικές καμπύλες δωματίου σε χαμηλές συχνότητες σε μικρά ορθογώνια δωμάτια (Σχήμα 1.4.). Αρχικά βρίσκουμε τη μια διάσταση (μήκος ή πλάτος) στον άξονα y και στην συνέχεια την διάσταση που μένει στον άξονα χ. Εάν το σημείο ένωσης των δυο αριθμών βρίσκεται εντός του "αποτυπώματος" του διαγράμματος τότε οι διαστάσεις του δωματίου θεωρούνται ιδανικές.



Σχήμα 1.4. *Ευνοϊκές αναλογίες διαστάσεων δωματίου για να πετύχουμε ομογενή κατανομή συχνοτήτων τρόπων ταλάντωσης σε δωμάτιο. Η διακεκομμένη γραμμή περικλείει την περιοχή Bolt. Τα γράμματα αναφέρονται στον Πίνακα 1.1.*

Στον παρακάτω Πίνακα 1.1. αναφέρονται οι ιδανικές αναλογίες δωματίου κατά τη γνώμη διαφόρων ερευνητών, αποτέλεσμα των ερευνών τους. Για να συγκριθούν τα αποτελέσματα αυτών με την ευνοϊκή περιοχή που πρότεινε ο Bolt, έχουν σχεδιαστεί στο παραπάνω σχήμα. Οι περισσότερες από τις αναλογίες πέφτουν μέσα ή κοντά στην περιοχή Bolt. Αυτό σημαίνει ότι κάθε αναλογία μέσα στην περιοχή Bolt θα δίνει

λογική ποιότητα δωματίου σε μικρή συχνότητα όσον αφορά στην κατανομή των συχνοτήτων των αξονικών τρόπων ταλάντωσης.

Πίνακας 1.1. Αναλογίες διαστάσεων ορθογωνίου δωματίου για ευνοϊκή κατανομή τρόπων ταλάντωσης .

ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ		**ΥΨΟΣ**	**ΠΛΑΤΟΣ**	**ΜΗΚΟΣ**	**Μέσα στην περιοχή Bolt;**
SEPMEYER	A	1.00	1.14	1.39	ΟΧΙ
	B	1.00	1.28	1.54	ΝΑΙ
	C	1.00	1.60	2.33	ΝΑΙ
LOUDEN	D	1.00	1.40	1.90	ΝΑΙ
	E	1.00	1.30	1.90	ΟΧΙ
	F	1.00	1.50	2.50	ΝΑΙ
VOLKMAN	G	1.00	1.50	2.50	ΝΑΙ
BONER	H	1.00	1.26	1.59	ΝΑΙ

Βλέποντας τις αναλογίες διαστάσεων δωματίου δεν μπορούμε να πούμε αν το δωμάτιο είναι επιθυμητό ή όχι.

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε δωμάτιο με ύψος 3 μέτρα και έχοντας και τις άλλες δύο διαστάσεις μπορεί να γίνει για την κάθε μια ανάλυση αξονικών τρόπων ταλάντωσης όπως στον Πίνακα 1.2. και σχεδιασμό τους όπως παριστάνονται στο Σχήμα 1.5.

Πίνακας 1.2. Κατάλληλη φόρμα δεδομένων για μελέτη της επίδρασης των αναλογιών δωματίου στην κατανομή των αξονικών τρόπων ταλάντωσης.

	Length L = 19 ft 5 in L = 19.417 ft $f_1 = 565/L$	Width W = 14 ft 2 in W = 14.17 ft $f_1 = 565/W$	Height H = 8 ft H = 8.92 ft $f_1 = 565/H$
f_1	29.1	39.9	63.3
f_2	58.1	79.7	126.7
f_3	87.3	119.6	190.0
f_4	116.4	159.5	253.4
f_5	145.5	199.4	316.7
f_6	174.6	239.2	
f_7	203.7	279.1	
f_8	232.8	319.0	
f_9	261.9		
f_{10}	291.0		
f_{11}	320.1		
f_{12}			
f_{13}			
f_{14}			
f_{15}			

Arranged in ascending order	Diff
29.1	
	10.8
39.9	
	18.3
58.2	
	5.1
63.3	
	16.4
79.7	
	7.6
87.3	
	29.1
116.4	
	3.2
119.6	
	7.1
126.7	
	18.8
145.5	
	14.0
159.5	
	15.1
174.6	
	15.4
190.0	
	9.4
199.4	
	4.3
203.7	
	29.1
232.8	
	6.4
239.2	
	14.2
253.4	
	8.5
261.9	
	17.2
279.1	
	11.9
291.0	
	25.7
316.7	

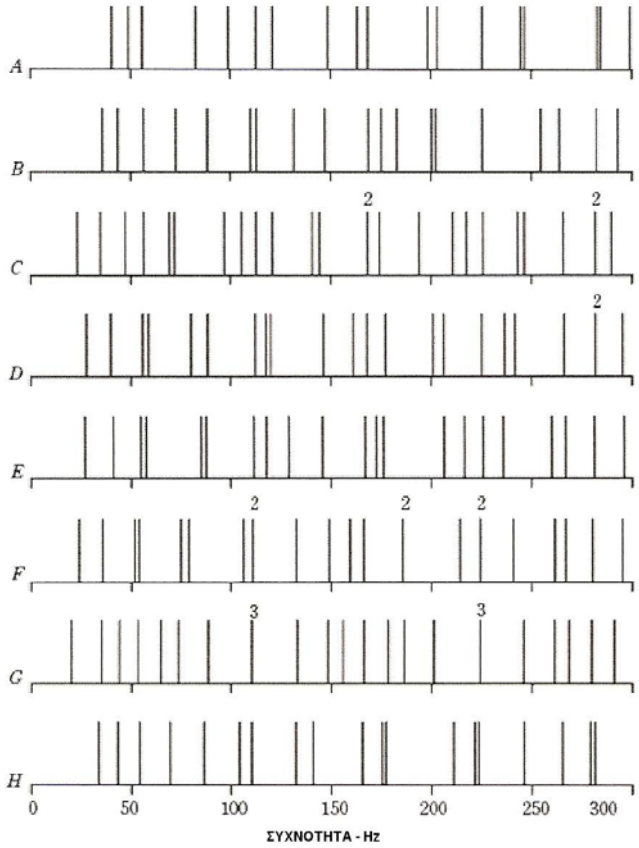
Όλα είναι σχετικά μικρά δωμάτια και γι'αυτό έχουν αποστάσεις συχνότητας αξονικών τρόπων ταλάντωσης μεγαλύτερες απ'αυτές που θέλουμε. Οι εκφυλισμοί, ή συμπτώσεις τρόπων ταλάντωσης, είναι ένα πιθανό πρόβλημα και αναγνωρίζονται με τα 2 ή 3 από πάνω τους για να φανεί το πλήθος των συντονισμών που έχουν συγκεντρωθεί. Τρόποι ταλάντωσης που είναι πολύ κοντά μεταξύ τους αν και δεν συμπίπτουν πραγματικά, μπορεί και αυτοί να παρουσιάσουν προβλήματα. Ακολουθώντας τους παραπάνω κανόνες μπορούμε να υπολογίσουμε ποιες από τις κατανομές του παραπάνω πίνακα είναι καλύτερες και ποιες οι χειρότερες.

Πρώτον απορρίπτουμε την G με δύο τριπλές συμπτώσεις που έχουν μεγάλες αποστάσεις από τις γειτονικές. Απαλείφεται η F εξαιτίας τριών διπλών συμπτώσεων που έχουν σχέση με μερικές αρκετά μεγάλες αποστάσεις. Δεν μπορούμε να αγνοήσουμε την επίδραση των διπλών συμπτώσεων κοντά στα 280 Hz στην C και D επειδή οι χρωματισμοί σπάνια εμφανίζονται πάνω από τα 200Hz. Πέρα από τις δύο

που απορρίφθηκαν, υπάρχει μικρή δυνατότητα επιλογής μεταξύ των υπολοίπων. Όλες έχουν σφάλματα. Ίσως όλες θα εξυπηρετούσαν αρκετά καλά, αφού έχουμε υπόψη μας τα πιθανά προβλήματα εδώ κι εκεί.

Αυτή η απλή προσέγγιση μελέτης της κατανομής των αξονικών τρόπων ταλάντωσης έχει το πλεονέκτημα ότι προσέχουμε τους κύριους αξονικούς τρόπους ταλάντωσης γνωρίζοντας ότι οι ασθενέστεροι εφαπτομενικοί και πλάγιοι τρόποι ταλάντωσης μπορούν να βοηθήσουν μόνο συμπληρώνοντας ενδιάμεσα τους αξονικούς τρόπους που έχουν μεγαλύτερες αποστάσεις συχνοτήτων.

Κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων του Πίνακα 1.2. βασικός σκοπός είναι να αποφύγουμε την σύμπτωση των αξονικών τρόπων ταλάντωσης. Παρά το γεγονός ότι οι αναλογίες του συγκεκριμένου δωματίου βάση της παραπάνω μελέτης, δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ως οι καλύτερες δυνατές, με την κατάλληλη επεξεργασία των τοιχωμάτων του, το δωματίου θα δίνει καλό ήχο, χωρίς χρωματισμούς, [6].



Σχήμα 1.5. *Γραφικές παραστάσεις της κατανομής των αξονικών τρόπων ταλάντωσης για τις οκτώ "καλύτερες " αναλογίες δωματίων του Πίνακα 1.2. Οι μικροί αριθμοί δείχνουν το πλήθος των τρόπων ταλάντωσης που συμπίπτουν στις συγκεκριμένες συχνότητες. Θεωρούμε ότι το δωμάτιο έχει ύψος 3m.*

Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι σε μερικές περιπτώσεις είναι πιθανό οι διαστάσεις ενός χώρου να είναι ιδανικές σύμφωνα με το σχήμα αλλά να μην συμφωνούν με το κριτήριο Bonello το οποίο περιγράφεται παρακάτω.

1.8 - Το κριτήριο Bonello

Ο Bonello πρότεινε μια νέα μέθοδο προσδιορισμού των αναλογιών ορθογώνιου δωματίου με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Με τη μέθοδο αυτή διαιρεί το κάτω άκρο του ακουστικού φάσματος σε ζώνες με πλάτος της οκτάβας και θεωρεί το πλήθος των τρόπων ταλάντωσης σε κάθε ζώνη κάτω από 200Hz. Οι ζώνες της οκτάβας επιλέγονται επειδή κατά προσέγγιση είναι οι κρίσιμες ζώνες του ανθρώπινου αυτιού. Κάθε 1/3 της οκτάβας, για να ικανοποιηθεί το κριτήριο Bonello, πρέπει να έχει περισσότερους τρόπους ταλάντωσης από το προηγούμενο, ή τουλάχιστον το ίδιο πλήθος. Δεν υπάρχει ανοχή για συμπτώσεις τρόπων ταλάντωσης εκτός και αν στην ζώνη υπάρχουν τουλάχιστον 5 τρόποι ταλάντωσης, [6].

1.9 - Τρόποι έλεγχου ενοχλητικών τρόπων ταλάντωσης

Το ηχητικό πεδίο ενός κλειστού χώρου διαμορφώνεται από τα κυματικά φαινόμενα που δημιουργούνται σε αυτόν, με κυρίαρχο τα στάσιμα κύματα, φαινόμενο που επιδρά αρνητικά στην ακουστική ποιότητα του χώρου, με την ηχητική ενέργεια να κατανέμεται ανομοιόμορφα στα τοιχώματα του χώρου ενισχύοντας συγκεκριμένες περιοχές του ακουστικού φάσματος οδηγώντας σε μια ακανόνιστη απόκριση του χώρου, "χρωματίζοντας" τον ήχο.

Μελετώντας τα σημεία του χώρου όπου η ηχητική πίεση είναι μέγιστη, μπορούμε να τοποθετήσουμε ηχοαπορροφητικά υλικά με μέγιστη απορρόφηση τη συχνότητα συντονισμού ώστε το πλάτος της καμπύλης συντονισμού να μειωθεί και πάψει να δημιουργεί προβλήματα.

Εάν έχουμε τη δυνατότητα εξαρχής να σχεδιάσουμε ένα χώρο τότε βασική πρόνοια είναι η αναλογία των διαστάσεων του χώρου, ενώ έχει παρατηρηθεί πως χώροι με ακανόνιστο σχήμα διαχέουν καλύτερα τον ήχο, προϋποθέσεις που αναλύθηκαν λεπτομερώς παραπάνω.

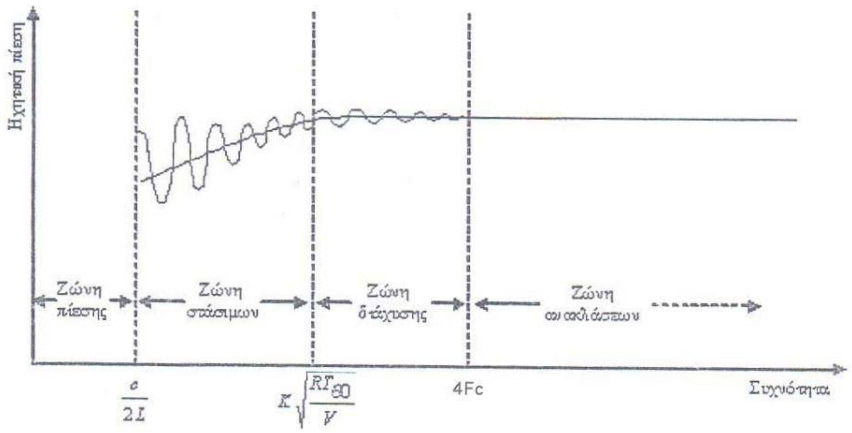
Το γενικό συμπέρασμα πάντως είναι ότι χώροι μεγάλων διαστάσεων έχουν καλύτερη ακουστική από τους μικρούς διότι οι συντονισμοί τους είναι πιο πυκνοί και λιγότερο ευδιάκριτοι.

1.10 - Ακουστική μελέτη κλειστών χώρων

Η ακουστική μελέτη των μεγάλων κλειστών χώρων πραγματοποιείται βάση των αρχών της **γεωμετρικής ακουστικής** και της στατιστικής, διαδικασία πολύπλοκη που πραγματοποιείται με τη χρήση υπολογιστών καθώς απαιτείται λεπτομερής μελέτη της πορείας των ανακλάσεων των ηχητικών ακτίνων στο χώρο. Στους μικρούς κλειστούς χώρους, όπως προαναφέραμε, επικρατεί έντονα το κυματικό φαινόμενο της δημιουργίας στάσιμων κυμάτων. Εδώ εφαρμόζονται οι αρχές της **κυματικής ακουστικής** όπου μελετάται η κυματική φύση του ήχου. Ο διαχωρισμός μεταξύ μεγάλου και μικρού κλειστού χώρου γίνεται βάση της **συχνότητας αποκοπής** f_c (cut – off frequency) και ορίζεται ως τη συχνότητα πάνω από την οποία δημιουργούνται ένας μεγάλος αριθμός στάσιμων κυμάτων στο χώρο στην συχνότητα της πηγής, με το χώρο να συμπεριφέρεται ομοιόμορφα σε όλες τις συχνότητες. Η συχνότητα αποκοπής προκύπτει από τον τύπο:

$$f_c = K\sqrt{\frac{RT_{60}}{V}} \tag{1.24}$$

όπου K είναι σταθερά (2000 S.I. και 11885 U.S.), RT_{60} ο χρόνος αντήχησης του χώρου (sec) και V ο όγκος του χώρου (m^3). Οι Bolt, Beranek και Newman δημιούργησαν το παρακάτω διάγραμμα το οποίο ονομάζεται «ελεγκτής της σταθερής κατάστασης της ακουστικής απόκρισης δωματίου» και διαχωρίζει τη συμπεριφορά του χώρου σε σχέση με τη συχνότητα .



Σχήμα 1.6. *Διάγραμμα Bolt, Beranek, Newman, ελεγκτής της σταθερής κατάστασης της ακουστικής απόκρισης δωματίου.*

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα το ακουστικό φάσμα διαχωρίζεται σε τέσσερις συχνοτικές περιοχές:

1) **Ζώνη Πίεσης (pressure zone/cut off region):** από 0 Hz μέχρι τη συχνότητα $f = \frac{c}{2L}$ όπου L η μεγαλύτερη διάσταση του χώρου. Πρόκειται για περιοχή πολύ χαμηλών συχνοτήτων που βρίσκεται κάτω από την κατώτατη συχνότητα συντονισμού του χώρου f, δηλαδή στην περιοχή όπου οι διαστάσεις του χώρου είναι μικρότερες από το μισό μήκος κύματος του ήχου. Οι συχνότητες της περιοχής αυτής μπορούν να υπάρχουν στο χώρο αλλά δεν ενισχύονται από τους συντονισμούς του χώρου καθώς στη περιοχή αυτή δεν υπάρχουν συντονισμοί.

2) **Ζώνη των στάσιμων (modal zone):** από τη συχνότητα $f = \frac{c}{2L}$ μέχρι την συχνότητα αποκοπής f_c . Είναι η περιοχή όπου το μήκος κύματος του ήχου είναι της τάξης μεγέθους του χώρου, είναι η περιοχή που εμφανίζονται τα στάσιμα κύματα και συγκεκριμένα στην περιοχή ανάμεσα στην κατώτατη συχνότητα συντονισμού, f, και τη συχνότητα αποκοπής f_c . Στην περιοχή αυτή εφαρμόζουμε τις αρχές της Κυματικής Ακουστικής.

3) **Ζώνη διάχυσης (diffusion zone):** από τη συχνότητα αποκοπής f_c μέχρι τη συχνότητα $4f_c$. Είναι η περιοχή μετάβασης μεταξύ της ζώνης στάσιμων και της ζώνης ανακλάσεων. Πρόκειται για μια δύσκολη συχνοτική περιοχή, γιατί ο χώρος θεωρείται αρκετά μικρός για τη χρήση της γεωμετρικής ακουστικής και της στατιστικής εφόσον εμφανίζονται ακόμη έντονοι συντονισμοί, αλλά και αρκετά μεγάλος για την εφαρμογή των αρχών της κυματικής ακουστικής, σύμφωνα με το μήκος κύματος.

4) **Ζώνη ανακλάσεων (specular reflection zone):** μεγαλύτερη ή ίση της συχνότητας $4f_c$. Σε αυτή τη περιοχή τα κυματικά φαινόμενα εξασθενούν καθώς το μήκος κύματος του ήχου είναι πολύ μικρό σε σχέση με τις διαστάσεις του χώρου. Επικρατούν οι τυχαίες ανακλάσεις με τη γωνία πρόσπτωσης να είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης, ο ήχος διαδίδεται σε ευθείες – ακτίνες και εφαρμόζονται πλέον οι αρχές της Γεωμετρικής Ακουστικής.

1.11 - Θεωρία απορροφήσεως και ηχοαπορροφητές

Κυρίαρχο ρόλο στην διαμόρφωση της ακουστικής συμπεριφορά των κλειστών χώρων και ιδιαιτέρως των μικρών παίζει η απορρόφηση. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ηχοαπορροφητών, υλικών δηλαδή που έχουν μεγάλη ικανότητα απορρόφησης του ήχου και τα οποία χρησιμοποιούνται για εκπληρώσουν έναν από του ακόλουθους στόχους:

- Για την προσαρμογή της αντήχησης του δωματίου.
- Για την καταστολή ανεπιθύμητων ηχητικών ανακλάσεων από μακρινούς τοίχους οι οποίες μπορεί να ακουστούν σαν ηχώ.
- Για τη μείωση της ακουστικής ενέργειας, έντασης.

Όταν ένα ηχητικό κύμα προσπίπτει σε μια επιφάνεια τότε, ένα μέρος της ενέργειάς του ανακλάται, ένα άλλο απορροφάται από το υλικό και ένα άλλο μέρος συνεχίζει να διαδίδεται. Ο συντελεστής απορρόφησης α ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που απορροφάται από μια επιφάνεια, W_a, προς την προσπίπτουσα ενέργεια, W_i:

$$a_a = \frac{W_a}{W_i} \tag{1.25}$$

Ο συντελεστής απορρόφησης μιας επιφάνειας (A) ορίζεται ως εξής:

$$A = s\,a \tag{1.26}$$

όπου s το εμβαδό της επιφάνειας και α ο συντελεστής απορρόφησής της και μετράται σε Sabine.

Σε ένα κλειστό χώρο βρίσκει εφαρμογή ο μέσος συντελεστής απορρόφησης, ο οποίος ορίζεται ως:

$$\bar{a} = \frac{a_1 s_1 + a_2 s_2 + \ldots + a_n s_n}{s_1 + s_2 + \ldots + s_n} \tag{1.27}$$

όπου $a_1, a_2, ..., a_n$ οι συντελεστές απορρόφησης κάθε υλικού και $s_1, s_2, ..., s_n$ το εμβαδόν κάθε επιμέρους επιφάνειας.

Ο συντελεστής απορρόφησης ενός υλικού μεταβάλλεται ανάλογα με τη συχνότητα και τη γωνία πρόσπτωσης του ηχητικού κύματος πάνω στην επιφάνεια ενώ ορίζεται, όπως και η απορρόφηση, για την κεντρική συχνότητα της χρησιμοποιούμενης ζώνης.

Τρείς είναι οι βασικές κατηγορίες ηχοαπορροφητών. Κάθε κατηγορία στηρίζει την απορροφητική του ικανότητα σε διαφορετικό μηχανισμό λειτουργίας, δρώντας σε διαφορετικό εύρος συχνοτήτων, έχοντας βέβαια ως βασική αρχή λειτουργίας την μετατροπή της ηχητικής ενέργειας σε θερμότητα. Είναι τα πορώδη (υψηλές και μεσαίες συχνότητες), απορροφητές τύπου μεμβράνης (χαμηλές συχνότητες) και οι συνηχητές (χαμηλές και μεσαίες συχνότητες).

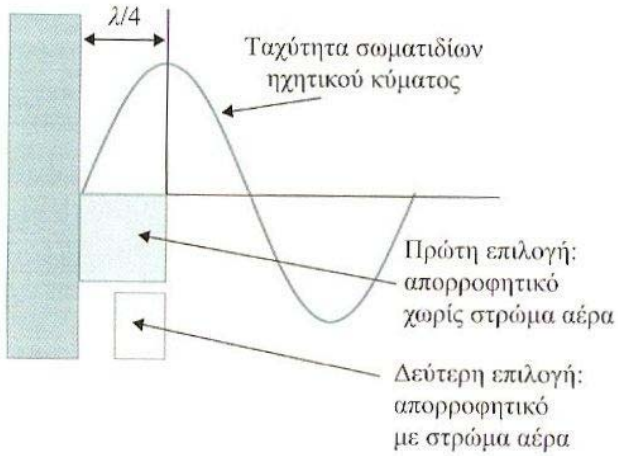
Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά οι παραπάνω κατηγορίες ηχοαπορροφητών, ενώ θα επικεντρωθούμε περισσότερο στους ηχοαπορροφητές μεσαίων και υψηλών συχνοτήτων.

1.11.1 - Πορώδη απορροφητικά υλικά

Με τον όρο πορώδη ηχοαπορροφητικά υλικά εννοούμε τους ηχοαπορροφητές εκείνους οι ικανότητες των οποίων οφείλονται στην ύπαρξη των πόρων που συνδέουν την επιφάνεια με το εσωτερικό του υλικού, με την ηχοαπορρόφηση να επιτυγχάνεται λόγω τριβών καθώς ο αέρας κινείται στους πόρους.

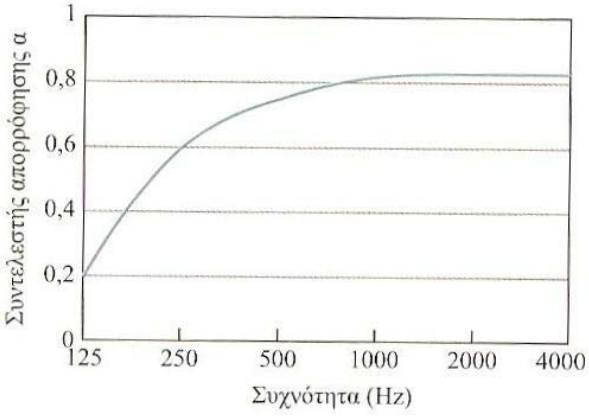
Η αποτελεσματικότητα των υλικών αυτών εξαρτάται από το πάχος του υλικού, το διάκενο αέρος (απόσταση απορροφητικού υλικού και ανακλαστικής επιφάνειας), την πυκνότητα του και φυσικά από τη συχνότητα του ήχου που προσπίπτει σε αυτό. Αρχικά το πάχος του υλικού πρέπει να είναι τουλάχιστον το 1/8 του μήκους κύματος της συχνότητας που θέλουμε να απορροφήσουμε. Τοποθετώντας το απορροφητικό υλικό σε απόσταση λ/4 από την ανακλαστική επιφάνεια επιτυγχάνουμε μέγιστη απορρόφηση διότι στην απόσταση αυτή η ταχύτητα ταλάντωσης των σωματιδίων του στάσιμου κύματος είναι μέγιστη (Σχήμα 1.7.). Τέλος η πυκνότητα του απορροφητικού υλικού πρέπει να είναι 2-3 φορές μεγαλύτερη από αυτή του αέρα.

Προκύπτει λοιπόν ότι η απορρόφηση είναι μέγιστη όταν το πάχος του υλικού είναι της τάξης του λ/4 του κύματος που δημιουργείται εντός αυτού και όχι με την τοποθέτησή του επί του τοίχου αλλά σε απόσταση λ/4 από αυτόν.



Σχήμα 1.7. *Βέλτιστη θέση απορροφητικού υλικού.*

Βάση των δεδομένων αυτών σε συνδυασμό με τα συνήθη πάχη των υλικών αυτών συμπεραίνεται ότι αξιόλογη απορρόφηση εμφανίζεται σε συχνότητες 2kHz και πάνω, και για το λόγο αυτό τα πορώδη απορροφητικά υλικά χαρακτηρίζονται ως απορροφητικά υψηλών συχνοτήτων.



Σχήμα 1.8. *Συντελεστής απορρόφησης πορώδους υλικού.*

Η υπερβολική χρήση πορώδων απορροφητών, από τα πρώτα ραδιοφωνικά στούντιο εκπομπών μέχρι και σήμερα, προκαλεί υπεραπορρόφηση της ηχητικής ενέργειας σε υψηλές συχνότητες, δίχως να λύνει ένα μεγάλο πρόβλημα της ακουστικής δωματίου δηλ. τα στάσιμα κύματα σε χαμηλές συχνότητες.

1.11.2 - Απορροφητικά τύπου μεμβράνης

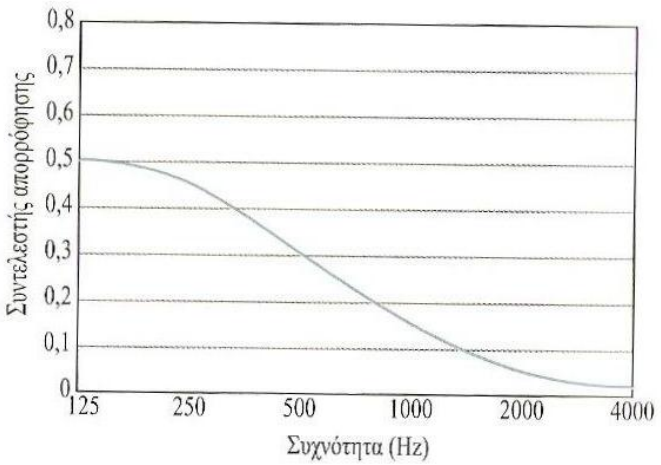
Είναι υλικά τα οποία αποτελούνται από μια λεπτή μεμβράνη, συνήθως από ύφασμα, η οποία βρίσκεται σε κάποια απόσταση από ένα συμπαγές υλικό. Όταν ο ήχος προσπίπτει στη μεμβράνη τη διεγείρει θέτοντάς την σε ταλάντωση και η απώλεια της ηχητικής ενέργειας οφείλεται στην εσωτερική τριβή του υλικού.

Ο συντελεστής απορρόφησης των υλικών αυτών είναι μεγάλος σε χαμηλές συχνότητες, με μέγιστο στην περιοχή που συμπίπτει με τη φυσική συχνότητα ταλάντωσης της μεμβράνης, με το πλάτος του μεγίστου να αυξάνεται αν τοποθετηθεί πορώδες υλικό πίσω από το απορροφητικό υλικό, ενώ όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο απορροφητής, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ακαμψία του, κατεπέκταση περιορίζεται η δυνατότητα ταλάντωσης της μεμβράνης, συνεπώς μικραίνει η απορροφητική του ικανότητα. Η συχνότητα συντονισμού των υλικών αυτών δίνεται από τη σχέση:

$$f_r = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\rho c^2}{m L}} \tag{1.28}$$

όπου m η μάζα ανά μονάδα επιφάνειας σε kg/m^2, L η απόσταση από το τοίχο σε m, ρ η πυκνότητα του αέρα και c η ταχύτητα του ήχου.

Οι συχνότητες που απορροφούν είναι μεταξύ 50 και 500kHz με μέγιστα κάτω από τα 300Hz και μετακινούνται σε χαμηλότερες συχνότητες καθώς το βάρος του υλικού αυξάνεται.



Σχήμα 1.9. *Συντελεστής απορρόφησης απορροφητικού υλικού τύπου μεμβράνης.*

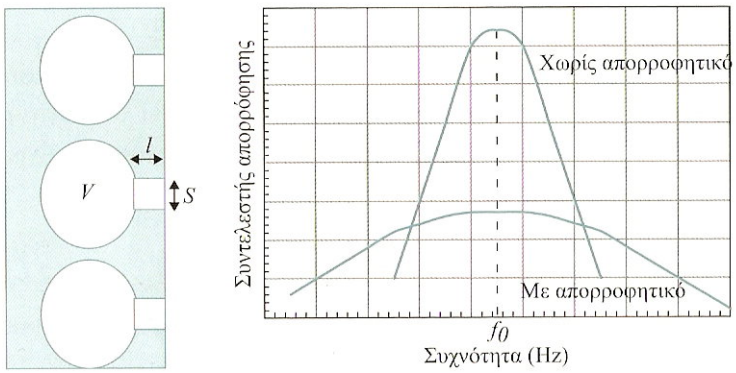
1.11.3 - Συνηχητές

Ο συνηχητής είναι στην πραγματικότητα μια κοιλότητα στο υλικό. Καθώς ο ήχος προσπίπτει στο στόμιο της κοιλότητας διεγείρει τον αέρα που βρίσκεται στο συντονιστή και η απώλεια ενέργειας οφείλεται και πάλι στις αποσβέσεις των ταλαντώσεων λόγω τριβών των σωματιδίων του αέρα. Ο συντελεστής απορρόφησης των υλικών αυτών έχει μέγιστη απορρόφηση γύρω από τη συχνότητα συντονισμού f_0, η οποία δίνεται από τον τύπο:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{s}{V\,l}} \tag{1.29}$$

όπου s το εμβαδόν του λαιμού, l το μήκος του λαιμού και V ο όγκος της κοιλότητας.

Στο παρακάτω σχήμα αναπαριστάται η καμπύλη συντονισμού των κοιλοτήτων. Εισάγοντας απορροφητικό υλικό στο εσωτερικό των κοιλοτήτων διευρύνεται το πλάτος της καμπύλης συντονισμού ενώ ταυτόχρονα μειώνεται το μέγιστο αυτής.



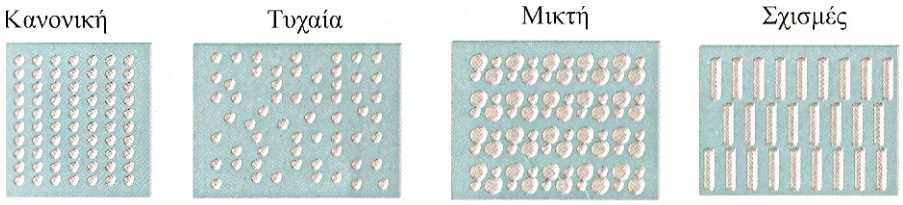
Σχήμα 1.10. *Συνηχητής*.

Ο συντονιστής ενδείκνυται για χώρους όπου υπάρχουν τόνοι χαμηλής συχνότητας.

1.11. 4 - Διάτρητες επιφάνειες

Πρόκειται για μια μορφή συνηχητών που χρησιμοποιούνται για την απορρόφηση του ήχου σε κλειστούς και ανοιχτούς χώρους. Μπορεί να έχουν σχήμα κυκλικό ή σχήμα σχισμών όπου κάθε τρύπα δρα σαν το λαιμό ενός συντονιστή Helmholtz. Η συχνότητα συντονισμού των διάτρητων επιφανειών δίνεται από τη παραπάνω σχέση. Όταν θέλουμε να έχουμε μέγιστη απορρόφηση σε διαφορετικές συχνότητες

χρησιμοποιούμαι δύο ή περισσότερα είδη διατρήσεων στην ίδια ή σε διαφορετικές επιφάνειες. Η διάτρηση μπορεί να είναι συμμετρική ή τυχαία, με το ποσοστό διάτρησης να μην υπερβαίνει σε καμία περίπτωση το 20%, γιατί η επιφάνεια μετατρέπεται ηχοδιαπερατό υλικό.



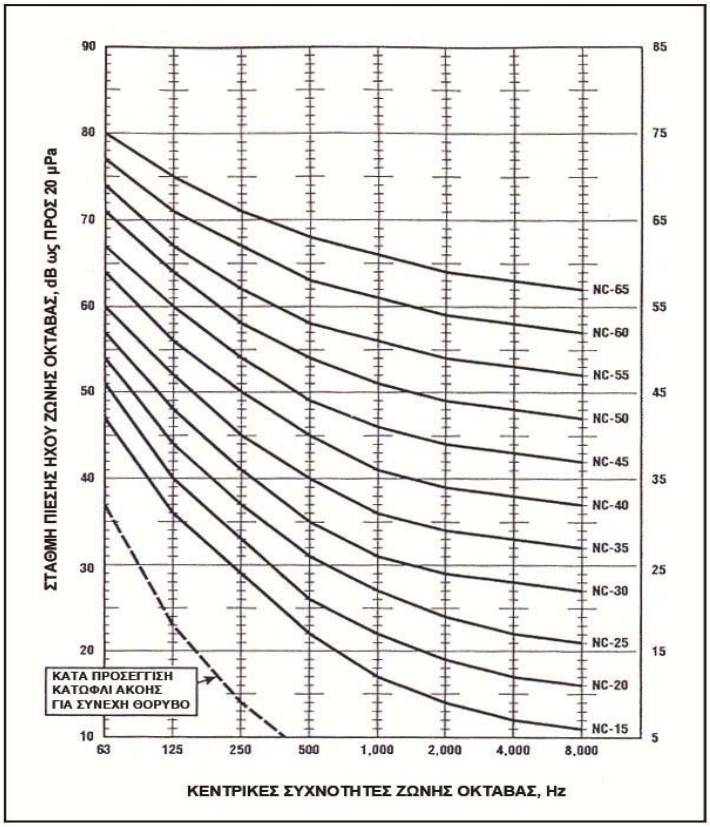
Σχήμα 1.11. *Διάφοροι τύποι διατρήσεων*.

Στην ουσία οι διάτρητες επιφάνειες αποτελούν ένα συνδυασμό των τριών τύπων απορροφητών ενώ στο εσωτερικό του συντονιστή υπάρχει απορροφητικό υλικό. Η διάτρητη επιφάνεια λειτουργεί ως απορροφητής τύπου μεμβράνης, οι οπές σαν συντονιστές και το ενδιάμεσο υλικό ως πορώδης απορρροφητής. Οι οπές μειώνουν την απόδοση της μεμβράνης στις χαμηλές συχνότητες και την ενισχύουν στις μεσαίες, μειώνοντας επίσης την απόδοση των πορώδων υλικών στις μεσαίες συχνότητες. Με την επιλογή οπών μικρής διαμέτρου βελτιώνεται η απόδοσή τους στις υψηλές συχνότητες, [1].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΘΟΡΥΒΟΣ ΚΑΙ ΗΧΟΜΟΝΩΣΗ

2.1 - Καμπύλες σταθμισμένου κριτηρίου θορύβου (BNC)

Σύμφωνα με τον κανονισμό ΕΛΟΤ 263.1 (1.201), **θόρυβος** ονομάζεται κάθε δυσάρεστος ή ανεπιθύμητος ήχος. Σε ένα studio ηχογραφήσεων πρέπει να εξετάζεται και να ελέγχεται ο θόρυβος από έξω καθώς και μέσα σε αυτό. Βασικός παράγοντας είναι η επιλογή της επιτρεπόμενης στάθμης θορύβου σε αυτό. Η προσέγγιση στο θέμα αυτό γίνεται με τις καμπύλες **Σταθμισμένου Κριτηρίου Θορύβου (BNC)**.



Σχήμα 2.1. *BCN καμπύλες.*

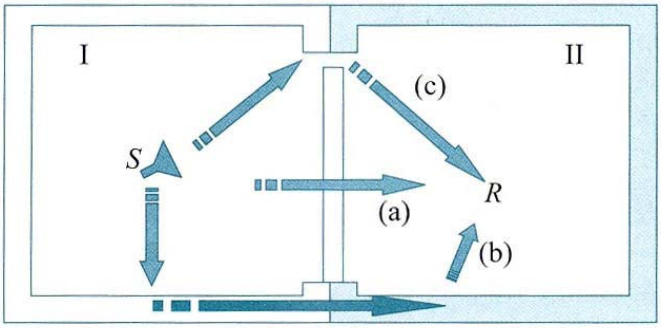
Η επιλογή μιας από αυτές τις καμπύλες ορίζει το στόχο της μέγιστης επιτρεπτής στάθμης πίεσης ήχου σε κάθε ζώνη οκτάβας. Αν ο στόχος θορύβου οριστεί με βάση τις καμπύλες σταθμισμένου κριτηρίου θορύβου μπορεί να μετρηθεί εύκολα από όργανα. Οι καμπύλες σταθμισμένου κριτηρίου θορύβου χρησιμοποιούνται:

- Πριν την κατασκευή του χώρου έτσι ώστε να οριστούν τα αποδεκτά όρια θορύβου ανά οκτάβα.
- Μετά την κατασκευή όταν θελήσουμε να ορίσουμε το επίπεδο θορύβου, την επίδραση του στην ομιλία – επικοινωνία καθώς και πόσα dB μείωση θορύβου απαιτείται ανά οκτάβα.

Στο Σχήμα 2.1. η κλίση των καμπύλων δείχνει, από την μία την μικρότερη ευαισθησία του ανθρώπινου αυτιού στις χαμηλές συχνότητες και από την άλλη το γεγονός ότι οι περισσότεροι θόρυβοι με κατανεμημένη ενέργεια εξασθενούν με την συχνότητα, [15].

2.2 - Μετάδοση θορύβου σε κλειστούς χώρους

Όταν μια ενεργή ηχητική πηγή βρίσκεται σε κλειστό χώρο ο ήχος ακολουθεί διάφορους δρόμους μετάδοσης, είτε μέσω του αέρα είτε μέσω της κατασκευής. Όταν ο ήχος μεταδίδεται μέσω της κατασκευής διαδίδεται με μεγαλύτερη ταχύτητα και μικρότερη απόσβεση απ'όταν διαδίδεται στον αέρα με αποτέλεσμα να δημιουργούνται δευτερογενής πηγές παραγωγής θορύβου. Η μετάδοση του θορύβου σε κλειστούς χώρους όπως παριστάνεται στο παρακάτω σχήμα, μπορεί να γίνει με του εξής τρόπους, [1]:



Σχήμα 2.2. *Τρόποι μετάδοσης θορύβου*.

- Μέσω των τοιχωμάτων με απευθείας διάδοση (a).
- Με διέγερση των δομικών στοιχείων των τοιχωμάτων προς ταλάντωση. Τα τοιχώματα στην περίπτωση αυτή όταν υπάρχουν οι κατάλληλες συνθήκες γίνονται δευτερογενής πηγές θορύβου (b).

- Με μετάδοση από ανοίγματα, αρμούς και σχισμές (c). Λόγω του φαινομένου της περίθλασης, που είναι ιδιαίτερα έντονο στον ήχο, η μετάδοση μέσω σχισμών χαραμάδων κ.λ.π. είναι σχετικά εύκολη.

Όσον αφορά την ηχομόνωση ανάλογα με τον τρόπο διάδοσης του θορύβου αυτός διακρίνεται σε:

Αερόφερτο που είναι ο ήχος που διαδίδεται μέσω αέρα.

Στερεόφερτο που είναι ο ήχος που διαδίδεται μέσω στερεών, δηλαδή της κατασκευής.

Κρυπτογενή που είναι ο ήχος που παράγεται από πρόσκρουση στερεών σωμάτων, και είναι κατά κανόνα στερεόφερτος.

Η μόνωση μιας κατασκευής για να είναι αποδοτική, πρέπει να λαμβάνει υπόψη της τον τρόπο διάδοσης και παραγωγής του ήχου.

2.3 - Δείκτης ηχομείωσης (R)

Ο όρος δείκτης *R* ή απώλεια διάδοσης (TL, Transmission Loss) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της διάδοσης του αερόφερτου θορύβου. Εκφράζει σε dB το ποσοστό της ηχητικής ενέργειας που διέρχεται μέσα από τα τοιχώματα σε σχέση μ'αυτήν που προσπίπτει και ορίζεται για την κεντρική συχνότητα κάθε 1/1 ή 1/3 οκτάβας και για την περιοχή των συχνοτήτων από 125Hz έως 8kHz. Ο δείκτης ηχομείωσης δίδεται από τη σχέση, [1]:

$$R = 10\log\frac{W_i}{W_t} = 10\log\frac{1}{\tau} \tag{2.1}$$

όπου τ ο μέσος συντελεστής διάδοσης για όλες τις δυνατές γωνίες πρόσπτωσης και W_i, W_t οι ενέργειες προσπίπτουσας και διαδιδόμενης ακτίνας.

Ανάλογα με τον τρόπο μέτρησης των ποσοτήτων που αναφέρονται στη σχέση (2.1) για τον δείκτη ηχομείωσης χρησιμοποιούνται διαφορετικές ονομασίες. Σε πολλές εφαρμογές ιδιαίτερα στη χρήση σιγαστήρων χρησιμοποιείται ο όρος απώλεια εισαγωγής (*IL*), (Insertion Loss) που ορίζεται ως η διαφορά της στάθμης σε κάποιο

σημείο χωρίς το μηχανισμό μείωσης και της στάθμης στο ίδιο σημείο μετά την εφαρμογή του μηχανισμού μείωσης. Δηλαδή:

$$IL = L_P - L'_P \tag{2.2}$$

2.4 - Υπολογισμός ηχομείωσης αερόφερτου θορύβου (μετάδοση σε κλειστό χώρο)

Μια ενεργή πηγή θορύβου βρίσκεται σε κλειστό χώρο όπου το ηχητικό πεδίο είναι 100% διάχυτο και το σημείο λήψης βρίσκεται και αυτό σε κλειστό χώρο, που γειτνιάζει με τον χώρο της πηγής με μια επιφάνεια. Η έκφραση για τη στάθμη στο σημείο λήψης δίδεται από τη σχέση:

$$L_{P2} = L_{P1} - R + 10\log\frac{A_w}{A_N} \tag{2.3}$$

όπου A_W το εμβαδόν της διαχωριστικής επιφάνειας και A_N η απορρόφηση του χώρου λήψης κατά Norris – Eyring. Βασικό ρόλο στην παραπάνω σχέση παίζει ο συντελεστής ηχομείωσης, ο υπολογισμός του οποίου είναι πολύπλοκος και γι'αυτό δίνεται με ικανοποιητική ακρίβεια από πίνακες για διάφορα υλικά που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές. Επομένως αν σκοπός μας είναι η αισθητή μείωση του αερόφερτο θόρυβο τότε θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε υλικά με μεγάλο δείκτη ηχομείωσης, [1].

2.5 - Νόμος της μάζας

Οι παράγοντες που καθορίζουν την ηχομονωτική συμπεριφορά μιας επιφάνειας και κατεπέκταση καθορίζουν τον δείκτη ηχομείωσής της είναι η συχνότητα του ήχου που προσπίπτει σε αυτή, η γωνία με την οποία προσπίπτει σε αυτή και οι φυσικές ιδιότητες του υλικού, [1].

2.5.1 - Κάθετη πρόσπτωση

Όταν ένα ηχητικό κύμα προσπίπτει σε μια επιφάνεια απείρων διαστάσεων ο δείκτης ηχομείωσης για κάθετη πρόσπτωση δίδεται από τη σχέση:

$$R_0 = 20\log fm - 43 \tag{2.4}$$

όπου f η συχνότητα του προσπίπτοντος κύματος (Hz), m η επιφανειακή πυκνότητα (kg/m^2).

2.5.2 - Τυχαία πρόσπτωση

Όταν το ηχητικό κύμα προσπίπτει σε μια επιφάνεια με συγκεκριμένη γωνία θ τότε ο δείκτης ηχομείωσης δίδεται από τη σχέση:

$$R_\theta = 10\log\left[1+\left(\frac{\omega m\cos\theta}{2\rho c}\right)^2\right] \tag{2.5}$$

όπου $\omega = 2\pi f$, ρ η πυκνότητα του υλικού (kg/m^3) και c η ταχύτητα του ήχου στο μέσο διάδοσης (m/s^2). Για γωνίες πρόσπτωσης από θ = 0°-90° η παραπάνω σχέση καταλήγει στην σχέση:

$$R = R_0 - 10\log(0.23R_0) \tag{2.6}$$

Για γωνίες πρόσπτωσης από θ = 0°-78° γράφουμε προσεγγιστικά τη σχέση:

$$R = 20\log(fm) - 47 \tag{2.7}$$

όπου f η συχνότητα του ήχου (Hz) και m η επιφανειακή πυκνότητα του υλικού (kg/m^2).

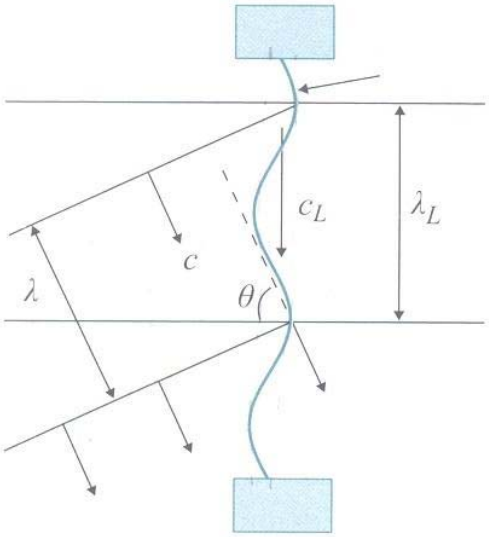
Η ποσότητα R ονομάζεται δείκτης ηχομείωσης για τυχαία πρόσπτωση. Επειδή όμως στην πράξη ο ήχος προσπίπτει στις επιφάνειες υπό τυχαία γωνία, η σχέση (2.5) είναι η κατεξοχήν χρησιμοποιούμενη. Αν το τοίχωμα είναι συμπαγές και άκαμπτο με μεγαλύτερη επιφανειακή πυκνότητα (μεγαλύτερη από 100 kg/m^2) ο δείκτης ηχομείωσης δίδεται με αρκετά ικανοποιητική προσέγγιση από την σχέση (2.7) και αποτελεί τον νόμο της μάζας. Ο νόμος της μάζας για δεδομένο υλικό δηλώνει ότι η ηχομείωση του υλικού είναι ανάλογη του λογάριθμου της συχνότητας και για δεδομένη συχνότητα είναι ανάλογη της επιφανειακή πυκνότητας. Πιο συγκεκριμένα ο νόμος της μάζας δηλώνει ότι για δεδομένη συχνότητα η ηχομείωση αυξάνει κατά 6dB για κάθε διπλασιασμό της επιφανειακής μάζας και για την ίδια επιφάνεια 6dB για κάθε διπλασιασμό της συχνότητας. Επί προσθέτως δηλώνει ότι σε χαμηλές

συχνότητες οι ηχομονωτικές ιδιότητες των υλικών είναι πτωχές. Η ηχομονωτική συμπεριφορά των διαφόρων υλικών στην πράξη και σε ορισμένες συχνότητες αποκλίνει απ'αυτήν που προβλέπει ο νόμος της μάζας. Δύο φαινόμενα, το φαινόμενο της **σύμπτωσης** και το φαινόμενο του **συντονισμού** είναι κυρίως υπεύθυνα για τη μείωση της ηχομονωτικής ικανότητας των διαφόρων υλικών, [1].

2.6 - Το φαινόμενο της σύμπτωσης

Εάν το τοίχωμα μιας επιφάνειας είναι εύκαμπτο τότε σε αυτό διαδίδονται καμπτικά κύματα κατά μήκος της επιφάνειάς του με μια συγκεκριμένη συχνότητα. Η εξίσωση κίνησης των επίπεδων επιφανειών όταν σ'αυτές διαδίδονται καμπτικά κύματα δίνεται από τη σχέση:

$$\nabla^4 y + \frac{12}{(hc_L)^2}\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \tag{2.8}$$



Σχήμα 2.3. *Φαινόμενο σύμπτωσης σε εύκαμπτες επιφάνειες.*

όπου y η κάθετη, στην επιφάνεια της πλάκας, μετατόπιση, h το πάχος της πλάκας και c_L η ταχύτητα διάδοσης των καμπτικών κυμάτων που δίνεται από τη σχέση:

$$c_L{}^2 = 2\pi f h\sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\sigma^2)}} \tag{2.9}$$

όπου σ είναι ο λόγος του Poisson, E το μέτρο του Young και ρ η πυκνότητα πλάκας σε kg/m^3. Όταν η συχνότητα του προσπίπτοντος ήχου συμπέσει με τη συχνότητα ταλάντωσης (δηλαδή όταν η προβολή του μήκους κύματος του ήχου συμπέσει με το μήκος κύματος της επιφάνειας που ταλαντώνεται) ή όταν η προβολή της ταχύτητας των κυμάτων συμπέσει με την ταχύτητα διάδοσης των καμπτικών κυμάτων, τότε ο ήχος διεγείρει την επιφάνεια. Αυτό συμβαίνει όταν:

$$c_L = \frac{c}{\sin\theta} \ , \ \lambda_L = \frac{\lambda}{\sin\theta} \tag{2.10}$$

όπου θ η γωνία πρόσπτωσης, λ το μήκος κύματος του ήχου, λ_L το μήκος κύματος των καμπτικών κυμάτων. Συνέπεια αυτής της διέγερσης είναι ένα μέρος του ήχου να διαδίδεται κατά μήκος της, οπότε και συμβαίνει μέγιστη απορρόφηση της ηχητικής ενέργειας, με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της ηχομονωτικής ικανότητας του τοιχώματος για την συγκεκριμένη συχνότητα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **φαινόμενο σύμπτωσης.** Το μήκος κύματος και κατά συνέπεια η συχνότητα που συμβαίνει το φαινόμενο αυτό, που ονομάζεται **συχνότητα σύμπτωσης**, εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης της ηχητικής ακτίνας. Η συχνότητα σύμπτωσης δίνεται από τη σχέση:

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi h \sin^2\theta}\sqrt{\frac{12\rho\left(1-\sigma^2\right)}{\mathrm{E}}} \tag{2.11}$$

Όταν η γωνία πρόσπτωσης γίνει 90° τότε η επιφάνεια δεν προσφέρει καμία αντίσταση στην διέλευση του ηχητικού κύματος. Η συχνότητα που αντιστοιχεί στην πρόσπτωση αυτή είναι η χαμηλότερη συχνότητα σύμπτωσης και ονομάζεται **κρίσιμη συχνότητα**. Λόγω του ότι για τα περισσότερα υλικά το $\sigma < 1$ (συνήθης τιμή $\sigma = 0.3$), αν θέσουμε όπου $1-\sigma^2 \approx 1$ η κρίσιμη συχνότητα στην πράξη δίνεται από τη σχέση:

$$f_c = \frac{c^2}{1.8h}\sqrt{\frac{\rho}{\mathrm{E}}} = \frac{c^2}{1.8hc_1} \tag{2.12}$$

όπου h το πάχος του τοιχώματος, c η ταχύτητα του ήχου στο μέσο διάδοσης, c_1 η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων (διαμηκών) στο υλικό του τοιχώματος, E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού και ρ η πυκνότητα του υλικού.

Οι σχέσεις (2.11) και (2.12), ισχύουν όταν το πάχος του τοιχώματος είναι τουλάχιστον 6 φορές μικρότερο από το μήκος κύματος του ήχου. Η κρίσιμη συχνότητα είναι συνεπώς η μικρότερη συχνότητα που συντονίζεται το χώρισμα με τον προσπίπτοντα ήχο. Στη συχνότητα αυτήν έχουμε τη μικρότερη ηχομείωση. Στην περίπτωση που η επιφάνεια δεν είναι ομογενής αλλά αποτελείται από δύο στρώματα διαφορετικών υλικών η συμπεριφορά της στο φαινόμενο της σύμπτωσης είναι δύσκολο να περιγραφεί, ωστόσο η κρίσιμη συχνότητα με αρκετά καλή προσέγγιση δίνεται από τη σχέση:

$$f_c = \frac{c^2}{1.8H}\sqrt{\frac{\rho'}{\mathrm{E}'}} \tag{2.13}$$

όπου H το ολικό πάχος του συστήματος των δύο τοιχωμάτων ($H = h_1+h_2$), ρ' η ανηγμένη πυκνότητα και E' το ανηγμένο μέτρο ελαστικότητας.

Η ανηγμένη πυκνότητα δίνεται από τη σχέση:

$$\rho' = \frac{\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2}{H} \tag{2.14}$$

όπου ρ_1, ρ_2 οι πυκνότητες των δύο μέσων.

Το ανηγμένο μέτρο ελαστικότητας δίνεται από τη σχέση:

$$E' = \frac{E_1 h_1 + E_2 h_2}{H} \tag{2.15}$$

όπου E_1, E_2 το μέτρο ελαστικότητας των δύο μέσων.

Ο Cremer έδειξε ότι σε συχνότητες μεγαλύτερες από την κρίσιμη συχνότητα η ηχομείωση δίνεται από τον τύπο:

$$R = R_0 + 10\log\left(\frac{f}{f_c} - 1\right) + 10\log n - 2 \qquad (2.16)$$

όπου n ο παράγοντας απωλειών που σχετίζεται με την απόσβεση των κυμάτων στην επιφάνεια.

Η παραπάνω σχέση δηλώνει ότι η ηχομείωση αυξάνει κατά 10 dB για κάθε διπλασιασμό της συχνότητας και ότι η απόσβεση παίζει σπουδαίο ρόλο στην ηχομόνωση των τοιχωμάτων για συχνότητες μεγαλύτερες από την κρίσιμη συχνότητα, [1].

2.7 - Το φαινόμενο του συντονισμού

Σε πολύ μικρές συχνότητες η σκληρότητα των υλικών τα εμποδίζει να ταλαντώνονται. Ο συνδυασμός της σκληρότητας με τη μάζα των τοιχωμάτων δρα όπως το σύστημα μάζα-ελατηρίου, με συγκεκριμένη συχνότητα συντονισμού. Για ορισμένες συχνότητες συμβαίνει συντονισμός του διαδιδόμενου ήχου με την ταλάντωση των τοιχωμάτων και για το λόγο αυτό έχουμε μέγιστη απορρόφηση ενέργειας, με συνέπεια τη μείωση της ηχομονωτικής ικανότητας του χωρίσματος. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **φαινόμενο συντονισμού** και έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση μερικών βυθισμάτων στις χαμηλές κυρίως συχνότητες στην καμπύλη που εκφράζει την ηχομονωτική ικανότητα των υλικών συναρτήσει της συχνότητας, [1].

Για μια επιφάνεια σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου που στερεώνεται και στις τέσσερις πλευρές, η συχνότητα συντονισμού δίνεται από τη σχέση:

$$f_r = \frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{B}{m}}\left[\frac{n_x^{\ 2}}{L_x^{\ 2}} + \frac{n_y^{\ 2}}{L_y^{\ 2}}\right] \qquad (2.17)$$

όπου L_x, L_y οι διαστάσεις της επιφάνειας, B το μέτρο συμπιεστότητας ανά μονάδα μήκους και n_x, n_y μικροί ακέραιοι αριθμοί που δείχνουν την τάξη του συντονισμού (n_x, n_y = 1,2,3,4,..). Η μικρότερη συχνότητα συντονισμού αντιστοιχεί σε n_x, n_y = 1. Όταν η επιφάνεια είναι ομοιόμορφη μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη σχέση:

$$f_r = 0.458 c_L h (1-\sigma^2)^{1/2}\left[\frac{n_x^{\ 2}}{L_x^{\ 2}} + \frac{n_y^{\ 2}}{L_y^{\ 2}}\right] \qquad (2.18)$$

όπου c_L η ταχύτητα του ήχου με μέσο διάδοσης την επιφάνεια, σ ο λόγος του Poisson και h το πάχος της επιφάνειας (m), [1].

2.8 - Ηχομονωτική συμπεριφορά απλών επιφανειών

Οι ταλαντώσεις που εκτελούν οι απλές επιφάνειες είναι ο κύριος λόγος μετάδοσης της ακουστικής ενέργειας. Το φαινόμενο της απόσβεσης των ταλαντώσεων συνεπώς θα παίζει σπουδαίο ρόλο στη μείωση του θορύβου και αυτό διότι μετατρέπει ένα μέρος της ηχητικής ενέργειας σε θερμότητα. Η επίδραση του φαινομένου της απόσβεσης είναι έντονη όταν το πάχος του υλικού είναι μικρότερο από 0,6 εκατοστά. Στη μελέτη της απόσβεσης πρέπει να έχουμε υπόψη μας τα εξής, [1]:

- Οι ταλαντώσεις των επιφανειών, συμβαίνουν συνήθως στις συχνότητες συντονισμού και η απόσβεση έχει μικρή επίδραση σε περιοχές συχνοτήτων μακριά από τις συχνότητες αυτές.

- Οι ταλαντώσεις των επιφανειών πρέπει να είναι σε θέση να δημιουργήσουν ηχητικά κύματα.

- Η συνεισφορά της απόσβεσης μετριέται με τον παράγοντα απωλειών(Loss Factor).

Ο παράγοντας απωλειών εκφράζει την ενέργεια που μετριέται σε θερμότητα και δίνεται από τη σχέση:

$$n = \frac{D}{2\pi W_0} \tag{2.19}$$

όπου D η ενέργεια που χάνεται ανά κύκλο ταλάντωσης και W_o η μέση ολική (κινητική και δυναμική) ενέργεια του ταλαντωμένου συστήματος. Μια άλλη έκφραση για τον παράγοντα απωλειών είναι η παρακάτω:

$$n = \frac{\Delta}{27.3 f} \tag{2.20}$$

όπου Δ ο ρυθμός εξασθένησης της ταλάντωσης σε dB/sec. και f η συχνότητα ταλάντωσης.

Πίνακας 2.1. Παράγοντας απωλειών για διάφορα υλικά.

ΥΛΙΚΟ	ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ
Μέταλλα (γενικά)	0.0001-0.001
Αλουμίνιο	0.0001
Μόλυβδος	0.015
Χάλυβας	0.0001-0.0006
Λαμαρίνα	0.002
Χαλκός	0.002
Χυτοσίδηρος	0.001
Γυαλί	0.001
Plexiglass	0.002
Μπετόν,Τούβλο	0.015
Άμμος	0.01-0.05
Σοβάς	0.005
Γυψοσανίδα	0.1
Ξύλο, μοριοσανίδα	0.01-0.02
Κόντρα πλακέ	0.015
Πλαστικά (γενικά)	0.0001-10
PVC	0.3

Συνοψίζοντας αυτά που είδαμε μέχρι στιγμής, **η ηχομονωτική συμπεριφορά των διαφόρων υλικών εξαρτάται από τον νόμο της μάζας, το φαινόμενο της σύμπτωσης και το φαινόμενο του συντονισμού**. Τα δύο τελευταία φαινόμενα είναι υπεύθυνα για σοβαρές αποκλίσεις από το νόμο της μάζας. Το διάγραμμα του Σχήματος 2.4. δίνει στην πράξη την τιμή του δείκτη ηχομείωσης συναρτήσει της συχνότητας για μία πραγματική ομογενή επιφάνεια. Στο διάγραμμα διακρίνουμε τρείς περιοχές, [1]:

Περιοχή Ι (περιοχή σκληρότητας)

Η περιοχή αυτή εκτείνεται από 0-2f_r, όπου f_r η χαμηλότερη τάξης συχνότητα συντονισμού. Στην περιοχή αυτή που βρίσκεται σε χαμηλές συχνότητες η ηχομείωση

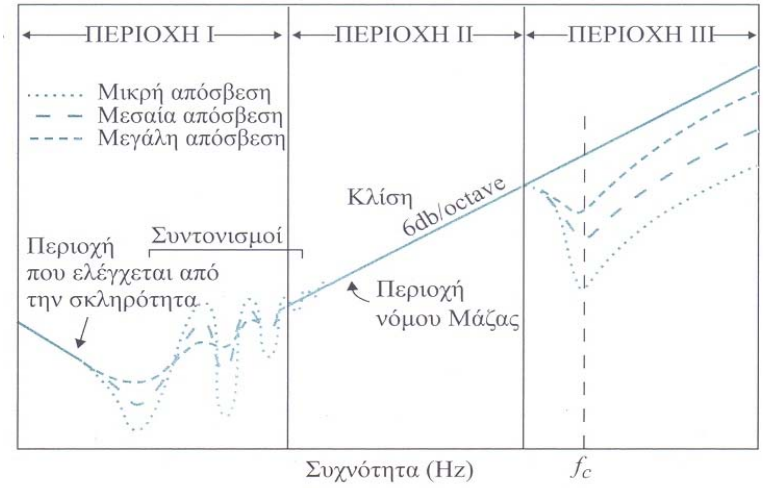
είναι συνάρτηση της σκληρότητας του υλικού. Αύξηση της σκληρότητας του υλικού συνεπάγεται αύξηση του δείκτη ηχομείωσης κατά 6dB για κάθε διπλασιασμό της σκληρότητας, αν η συχνότητα διατηρηθεί σταθερή. Για το ίδιο υλικό ο δείκτης ηχομείωσης μειώνεται με την συχνότητα κατά 6dB ανά οκτάβα. Στην πράξη αυτό σημαίνει ότι αν θέλουμε να έχουμε σημαντική ηχομείωση σε χαμηλές συχνότητες θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε σκληρά υλικά. Στην ίδια περιοχή σε σχετικά μεγαλύτερες συχνότητες είναι δυνατόν να συμβεί το φαινόμενο του συντονισμού λόγω των διαστάσεων του υλικού και ο δείκτης ηχομείωσης να παρουσιάζει διακυμάνσεις.

Περιοχή ΙΙ (περιοχή νόμου μάζας)

Στην περιοχή αυτή που αρχίζει αμέσως μετά την περιοχή Ι και εκτείνεται μέχρι τη συχνότητα $f_c/2$ όπου f_c η συχνότητα σύμπτωσης, ο δείκτης ηχομείωσης αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας και του επιφανειακού βάρους, σύμφωνα με το νόμο της μάζας. Θεωρητικά ο δείκτης ηχομείωσης, θα πρέπει να αυξάνει κατά 6dB για κάθε διπλασιασμό του επιφανειακού βάρους, στην πράξη όμως η αύξηση είναι μικρότερη δηλαδή έχουμε αύξηση 4-5dB για κάθε διπλασιασμό του επιφανειακού βάρους. Για την ίδια επιφάνεια η ηχομείωση αυξάνεται κατά 6dB για κάθε διπλασιασμό της συχνότητας. Το εύρος αυτής της περιοχής είναι δύο ή τρείς φορές μεγαλύτερο από τη χαμηλότερη συχνότητα συντονισμού. Ο νόμος της μάζας ισχύει ικανοποιητικά για σώματα με επιφανειακό βάρος μεγαλύτερο από 100kg/m^2.

Περιοχή ΙΙΙ (περιοχή σύμπτωσης)

Στην περιοχή αυτή που αρχίζει αμέσως μετά την περιοχή του νόμου μάζας, για συχνότητες κοντά στη κρίσιμη συχνότητα έχουμε μια μεγάλη μείωση του δείκτη ηχομείωσης λόγω του φαινομένου της σύμπτωσης. Για συχνότητες μεγαλύτερες από την κρίσιμη συχνότητα αλλά κοντά σ’αυτήν έχουμε σχετικά μεγάλη αύξηση του δείκτη ηχομείωσης με τη συχνότητα περίπου 10dB ανά οκτάβα, για την ίδια επιφάνεια. Σε μεγαλύτερες συχνότητες, έχουμε μια σταδιακή ελάττωση της αύξησης μέχρι την τιμή των 6dB ανά οκτάβα. Αν θέλουμε να επιτύχουμε σημαντική ηχομείωση σε μέσες και μεγάλες συχνότητες θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε υλικά με μεγάλο επιφανειακό βάρος.



Σχήμα 2.4. *Δείκτης ηχομείωσης συναρτήσει της συχνότητας σε απλές επιφάνειες.*

2.9 - Ηχομονωτική συμπεριφορά διπλών επιφανειών

Σε γενικές γραμμές η επίτευξη υψηλών δεικτών ηχομείωσης απαιτεί σχεδιασμό υλικών με μεγάλο επιφανειακό βάρος όπως προκύπτει με την εφαρμογή του νόμου της μάζας. Με την χρήση όμως διπλών και τριπλών τοιχωμάτων μπορούμε να επιτύχουμε μεγάλους δείκτες ηχομείωσης με σχετικά ελαφρές κατασκευές.

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε μια επιφάνεια με άπειρες διαστάσεις η οποία έχει δείκτη ηχομείωσης R = 30dB. Αυτό σημαίνει ότι αν από τη μια πλευρά της επιφάνειας η στάθμη είναι 100dB, από την άλλη θα είναι 70dB. Αν τώρα σε επαφή με την παραπάνω επιφάνεια υπάρχει και δεύτερη όμοια, σύμφωνα με τον νόμο της μάζας η ολική ηχομείωση του συστήματος θα είναι μόλις κατά 6dB μεγαλύτερη δηλαδή $R+6$ = 36dB. Αν η δεύτερη επιφάνεια βρίσκεται σε πολύ μεγάλη απόσταση από την πρώτη και δεν υπάρχει σύζευξη των δύο επιφανειών, η κάθε επιφάνεια θα μειώσει κατά 30dB την στάθμη του ήχου δηλαδή η τελική ηχομείωση θα είναι $R+R$ = 60dB. Στην πράξη όμως ούτε μεγάλες αποστάσεις μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αλλά και ούτε τέλεια μόνωση των επιφανειών μπορούμε να πετύχουμε και για τον λόγο αυτό η τελική ηχομείωση ενός διπλού χωρίσματος που αποτελείται από όμοιες επιφάνειες, αν δεν λάβουμε υπόψη μας την απορρόφηση του υλικού που υπάρχει ενδιάμεσα των επιφανειών, βρίσκεται μεταξύ των οριακών τιμών: $R+6$ και $2R$.

Βασική προϋπόθεση για να επιτύχουμε καλή ηχομόνωση με την χρήση πολλαπλών επιφανειών είναι να μονώσουμε ακουστικά και μηχανικά τις επιφάνειες μεταξύ τους. **Μηχανική ηχομόνωση** επιτυγχάνουμε όταν παρεμβάλουμε μεταξύ των διάφορων στρωμάτων υλικά απορροφητικά των κραδασμών, όταν χρησιμοποιούμαι

διαφορετικά σημεία στήριξης κ.λ.π. **Ακουστική μόνωση** μπορούμε επίσης να έχουμε με τη δημιουργία κενού μεταξύ των τοιχωμάτων όπου αυτό είναι κατορθωτό (διπλοί υαλοπίνακες). Ενώ στις απλές επιφάνειες (σύνθετες ή μη) υπάρχουν δύο συχνότητες που επηρεάζουν την ακουστική συμπεριφορά τους, η συχνότητα σύμπτωσης και η συχνότητα συντονισμού, στην περίπτωση **διπλών τοιχωμάτων** κύριο ρόλο παίζουν η **συχνότητα συντονισμού του διάκενου** και η **συχνότητα f_1** που ορίζονται παρακάτω, [1].

2.10 - Θεωρία διπλών τοιχωμάτων

Στην περίπτωση που έχουμε διπλή επιφάνεια ο δείκτης ηχομείωσης είναι πολύ μεγαλύτερος από αυτόν των απλών τοιχωμάτων και δίνεται από τον τύπο:

$$R = 10\log\left[1 + 4\left(\frac{\omega m}{2\rho c}\right)^2\left(\cos kd - \left(\frac{\omega m}{2\rho c}\right)\sin kd\right)^2\right] \tag{2.21}$$

2.11 - Συχνότητα συντονισμού του διάκενου

Η σχέση (2.21) μηδενίζεται όταν η ποσότητα

$$\left(\cos kd - \left(\frac{\omega m}{2\rho c}\right)\sin kd\right)^2 = 0 \tag{2.22}$$

όπου και δίνει *log1*=0, τότε ο δείκτης ηχομείωσης των διπλών επιφανειών μηδενίζεται (στην πράξη ελαχιστοποιείται), δηλαδή το διπλό τοίχωμα παρουσιάζει μικρή ηχομείωση. Ο μηδενισμός συμβαίνει στην συχνότητα ω_0 που ικανοποιείται από τη σχέση:

$$\tan kd = \frac{2\rho c}{\omega_0 m} \tag{2.23}$$

Σε χαμηλές συχνότητες όπου το μήκος κύματος του ήχου είναι μεγάλο όταν αυτό είναι πολύ μεγαλύτερο από την απόσταση των επιφανειών, η ποσότητα *kd* είναι μικρή και εφαπτομένη μπορεί να γραφεί:

$$\tan kd \cong kd, \frac{\omega_0}{c} d = \frac{2\rho c}{\omega_0 m} \tag{2.24}$$

Λύνοντας ως προς την συχνότητα θα πάρω:

$$\omega_0{}^2 = \frac{2\rho c^2}{md}, f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{2\rho c^2}{md}} \tag{2.25}$$

Η συχνότητα αυτή ονομάζεται **συχνότητα συντονισμού του διάκενου**.

Όταν οι επιφάνειες είναι διαφορετικές η παραπάνω συχνότητα δίνεται από τη σχέση:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1.8\gamma P(m_1 + m_2)}{dm_1 m_2}} \tag{2.26}$$

όπου m_1, m_2 οι επιφανειακές μάζες σε kg/m^2, d το πάχος του διάκενου σε m, γ ο λόγος των ειδικών θερμοτήτων για τον αέρα και P η στατική πίεση σε Pa.

Στη παραπάνω σχέση προστέθηκε η αριθμητική σταθερά 1.8 για καλύτερη συμφωνία των πειραματικών τιμών με τις προβλεπόμενες από την εξίσωση. Αν για τον αέρα σε συνθήκες δεχτούμε τις τιμές γ = 1.41 και P = 101.3 x 10^{3}Pa τότε η παραπάνω σχέση καταλήγει στην:

$$f_0 = \frac{113}{\sqrt{Md}} \tag{2.27}$$

όπου d η απόσταση των επιφανειών σε μέτρα, M η ανηγμένη επιφανειακή πυκνότητα που δίνεται από τη σχέση:

$$M = \frac{2m_1 m_2}{m_1 + m_2} \tag{2.28}$$

2.12 - Η συχνότητα f_1

Στη σχέση (2.22) για συχνότητες που ικανοποιούν την συνθήκη:

$$k_n d = (2n-1)\frac{\pi}{2}, \text{ n=1,2,3,..} \tag{2.29}$$

το συνημίτονο μηδενίζεται ενώ το ημίτονο παίρνει την τιμή 1, οπότε η ποσότητα της σχέσης (2.22) μεγιστοποιείται. Δηλαδή:

$$\left(\cos kd - \left(\frac{\omega m}{2\rho c}\right)\sin kd\right)^2 = \left(\frac{\omega m}{2\rho c}\right)^2 \tag{2.30}$$

και η ηχομείωση παρουσιάζει μέγιστο.

Η ηχομείωση παρουσιάζει συνεπώς μέγιστο στις συχνότητες:

$$f_1 = \frac{(2n-1)c}{4d}, n = 1,2,3,... \tag{2.31}$$

Η ηχομείωση τότε δίνεται από τη σχέση:

$$R_W \cong 40\log\left(\frac{\omega m}{2\rho c}\right) + 6 \tag{2.32}$$

Στην πράξη για την συχνότητα f_1 χρησιμοποιούμαι την σχέση:

$$f_1 = \frac{c}{2\pi d} = \frac{55}{d} \tag{2.33}$$

2.13 - Πρακτικός υπολογισμός ηχομείωσης διπλών επιφανειών

Πρακτικά, όταν θέλουμε να υπολογίσουμε τον δείκτη ηχομείωσης, αγνοώντας αρχικά την επίδραση των στηριγμάτων των επιφανειών για επιφάνειες με μεγάλες διαστάσεις, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις σχέσεις:

$$R = 20\log(mf) - 47 \quad f < f_0 \tag{2.34}$$

$$R = R_1 + R_2 + 20\log(fd) - 29 \quad f_0 < f < f_1 \tag{2.35}$$

$$R = R_1 + R_2 + 6 \quad f > f_1 \tag{2.36}$$

όπου m (kg/m^2) το άθροισμα των επιφανειακών μαζών των υλικών ($m = m_1 + m_2$), οι συχνότητες f_1, f_0 δίνονται από τις σχέσεις (2.33) και (2.27) και d το πάχος του διάκενου (m), το οποίο πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 2,5cm. Γενικά η αύξηση του διάκενου μετακινεί τη συχνότητα συντονισμού σε χαμηλότερες συχνότητες. Διαφοροποιώντας το επιφανειακό βάρος των υλικών επιτυγχάνουμε μετατόπιση των κρίσιμων συχνοτήτων κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι κρίσιμες συχνότητες να μη βρίσκονται στην ίδια περιοχή συχνοτήτων. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η επίδραση του φαινομένου της σύμπτωσης στην ηχομείωση. Στην περίπτωση των παράθυρων π.χ. λόγω του ότι το τζάμι παρουσιάζει χαμηλή ηχομείωση, η χρήση διπλών τζαμιών με διαφορετικό πάχος και κενό μεταξύ τους αυξάνει σημαντικά την ηχομείωσή τους, [1].

2.14 - Σταθμισμένος δείκτης ηχομείωσης (R_w)

Για τον καθορισμό του δείκτη ηχομείωσης μια επιφάνειας απαιτούνται τόσοι αριθμοί όσες είναι και οι ζώνες 1/3 οκτάβας. Για λόγους απλούστευσης και κυρίως για να εκφράζεται η ηχομείωση μιας επιφάνειας με ένα μόνο αριθμό ώστε να είναι δυνατή σύγκριση των διαφόρων υλικών μεταξύ τους χρησιμοποιείται ο σταθμισμένος δείκτης ηχομείωσης (Rating of Sound Insulation), αντιστοίχως σε κάθε επιφάνεια ένα μόνο αριθμό, σύμφωνα με τον κανονισμό ISO R 717/1 1982 και ΕΛΟΤ 461.1. Με τα αμερικανικά πρότυπα ο συντελεστής αυτός ορίζεται από την Αμερικανική Εταιρεία Δοκιμασίας Υλικών (ASTM), ονομάζεται STC (Sound Transmission Class) και διαφέρει ελάχιστα από τον αντίστοιχο Ευρωπαϊκό (ISO). Η κατάταξη της ηχομείωσης μιας επιφάνειας γίνεται ως εξής:

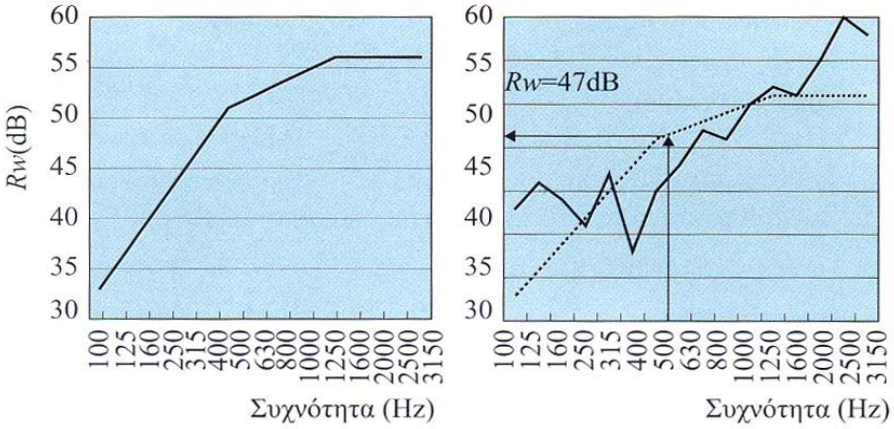
Σε διαφανές χαρτί με κατάλληλη κλίμακα σχεδιάζεται η γραμμή που διέρχεται από τα σημεία του Πίνακα 2.2. Σε αδιαφανές χαρτί με την ίδια κλίμακα τοποθετούνται οι τιμές του δείκτη ηχομείωσης στις κεντρικές συχνότητες κάθε τριτοκτάβας.

Πίνακας 2.2. Τιμές αναφοράς.

Κατάταξη Ηχομείωσης αερόφερτου θορύβου

Συχνότητα	**100**	**125**	**160**	**200**	**250**	**315**	**400**	**500**
R′	33	36	39	42	42	48	51	52
Συχνότητα	**630**	**800**	**1000**	**1250**	**1600**	**2000**	**2500**	**3150**
R′	53	54	55	56	56	56	56	56

Η γραμμή αυτή με τις τιμές αναφοράς τοποθετείται επάνω στο διάγραμμα που δίνει το δείκτη ηχομείωσης συναρτήσει της συχνότητας και μετατοπίζεται παράλληλα ανά 1dB έτσι ώστε σε κάποια θέση η μέγιστη μέση τιμή των διαφορών των τιμών για όλες τις κεντρικές συχνότητες μεταξύ της πρότυπης καμπύλης και της πειραματικής, να μην είναι μεγαλύτερη από 2dB.



Σχήμα 2.5. *Πρότυπη καμπύλη κατάταξης δείκτη ηχομείωσης.*

Η μέγιστη απόλυτη διαφορά σε οποιαδήποτε συχνότητα δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 8dB για μετρήσεις σε τριτοκτάβες και τα 5dB για μετρήσεις σε οκτάβες. Η τιμή της πρότυπης καμπύλης στα 500Hz δίδει την τιμή του R_w, [1].

2.15 - Ταξινόμηση της μετάδοσης του ήχου (STC)

Για τα Αμερικανικά Πρότυπα η διαδικασία κατάταξης της ηχομονωτικής ικανότητας μιας επιφάνειας γίνεται ως εξής:

Σε διαφανές χαρτί με κατάλληλη κλίμακα σχεδιάζεται η καμπύλη του συντελεστή STC όπως αναπαριστάται στο Σχήμα 2.6.

Σε αδιαφανές χαρτί με την ίδια κλίμακα τοποθετούνται οι τιμές του δείκτη ηχομείωσης στις κεντρικές συχνότητες κάθε τριτοκτάβας.

Η καμπύλη STC συγκρίνεται με τις μετρούμενες τιμές του δείκτη ηχομείωσης, σύροντας της καμπύλη κάθετα έως ότου να πληρούνται τα εξής κριτήρια:

1. Η μέγιστη απόλυτη διαφορά σε οποιαδήποτε συχνότητα δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 8dB.

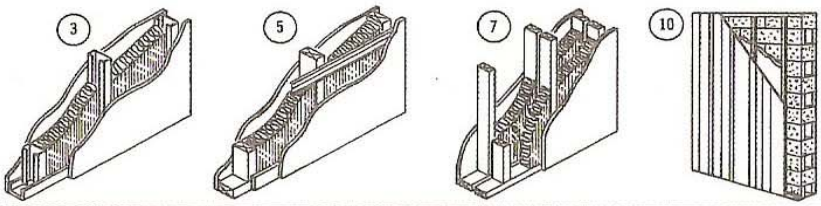
2. Το άθροισμα όλων των ελλείψεων (η διαφορά μεταξύ των τιμών της καμπύλης του STC και των τιμών του δείκτη ηχομείωσης εκατέρωθεν αυτής) δεν πρέπει να ξεπερνά τα 32dB.

Όταν η καμπύλη βρίσκεται στο ύψιστο σημείο της σύμφωνα με τα παραπάνω κριτήρια όπως αναπαριστάται στο Σχήμα 2.7., η εκτίμηση του συντελεστή STC είναι η τιμή του δείκτη ηχομείωση στο σημείο όπου η καμπύλη του συντελεστή διασχίζει τη συχνότητα των 500Hz.

Παρατηρώντας την καμπύλη του συντελεστή STC βλέπουμε ότι η χρησιμότητα του συντελεστή έγκειται ως προς την εκτίμηση της ηχομονωτικής ικανότητας μιας επιφάνειας ή μιας κατασκευής στο να "αντιστέκεται" σε ήχους συχνοτικού εύρους 125Hz - 4kHz (π.χ. ανθρώπινη ομιλία).

Για το λόγο αυτό ο συντελεστής STC δεν ενδείκνυται για την εκτίμηση της ηχομονωτικής ικανότητας μιας επιφάνειας ή μιας κατασκευής η οποία θα χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο μετάδοσης ήχων χαμηλών συχνοτήτων (π.χ. μουσική).

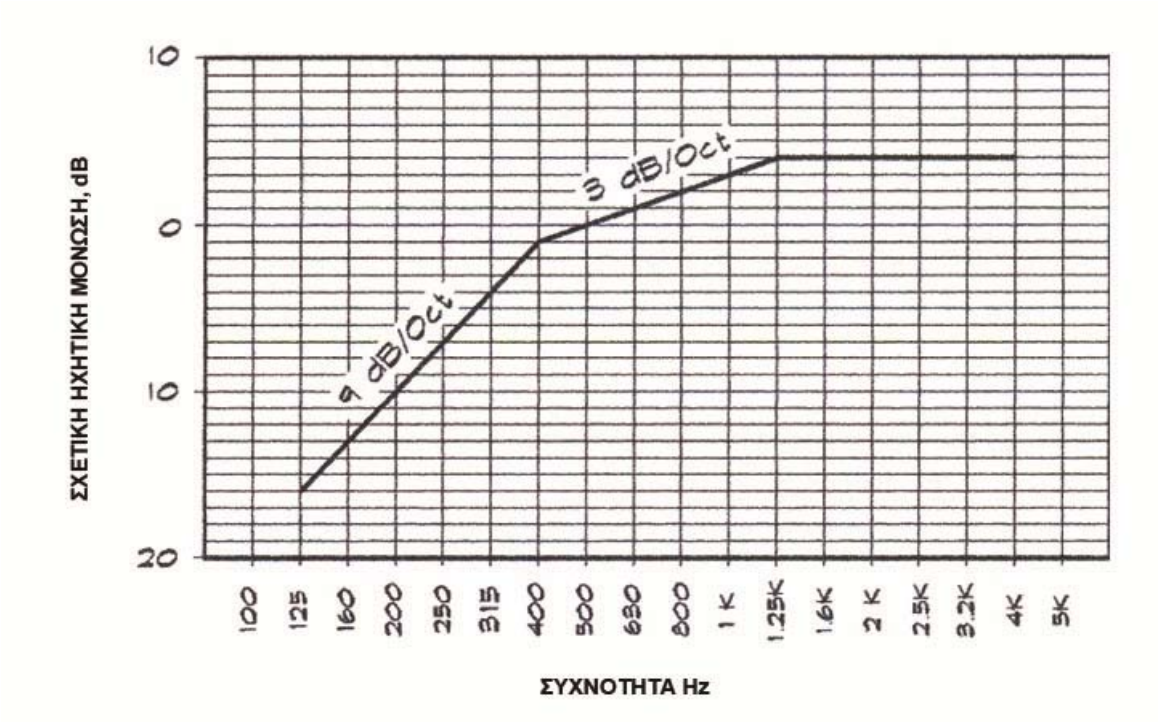
Πίνακας 2.3. Σταθμισμένος δείκτης ηχομείωσης (STC) για διάφορα κτιριακά χωρίσματα.



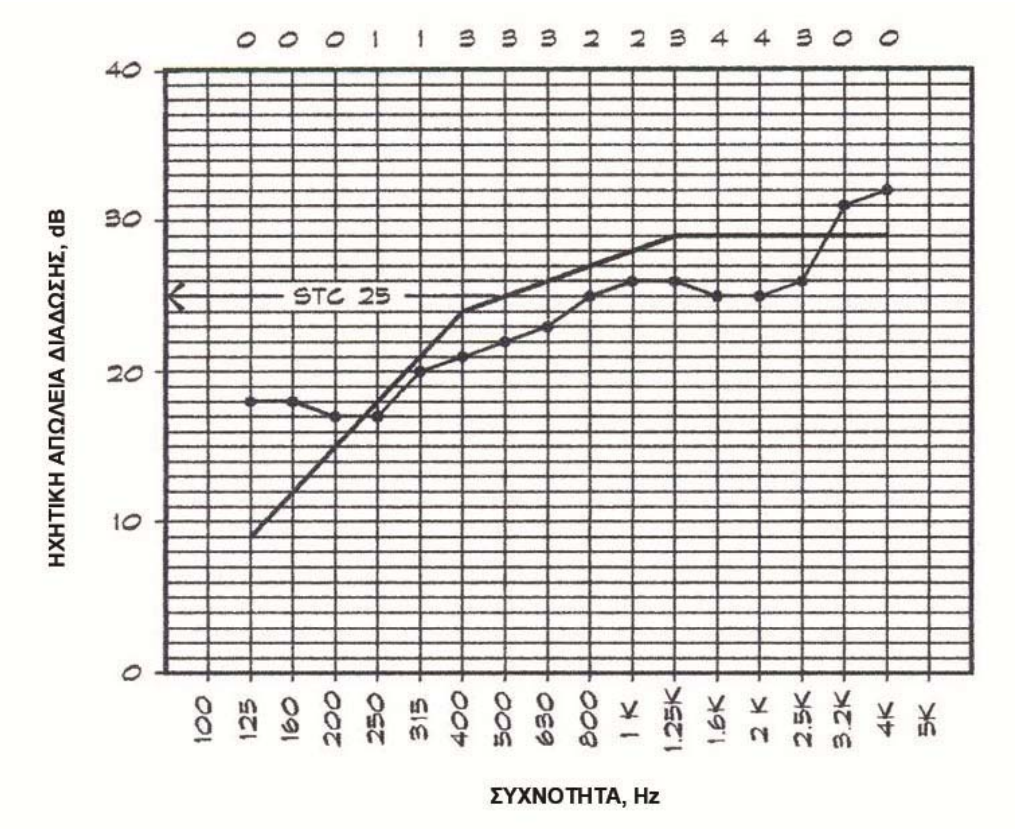
Wall System	Test Sponsor[1]	Laboratory Test Reference	Surface Weight, lb/ft²	STC Rating: No Cavity Absorption	STC Rating: Cavity Absorption
1. Single-row 2 x 4 wood stud (16-inch on center), single-layer $\frac{5}{8}$-in gypsum board panels each side, *direct attached*	OCF	OCF 424 & OCF 423	—	34	36 ($3\frac{1}{2}$-inch glass fiber)
	NGC	NGC 2403 & NGC 2166	6.1	35	38 ($3\frac{1}{2}$-inch glass fiber)
2. *Same as 1*, except double-layer $\frac{1}{2}$-inch gypsum board each side	OCF	OCF W-23-69 & OCF W-25-69	—	39	45 ($3\frac{1}{2}$-inch glass fiber)
3. Single-row 24-gage $3\frac{5}{8}$-inch steel stud (24-inch on center) single $\frac{5}{8}$-in gypsum board panels each side, *direct attached*	NGC	NGC 2385 & NGC 2386	5.2	42	47 ($2\frac{1}{2}$-inch glass fiber)
4. *Same as 3*, except double-layer $\frac{1}{2}$-inch gypsum board each side	NGC	NGC 2282 & NGC 2288	8.9	48	53 (3-inch glass fiber)
5. Single-row 2 x 4 wood stud, single-layer $\frac{5}{8}$-inch gypsum board panels, *direct attached* one side, attached to metal *resilient channels* other side	FPL	TL-73-72	6.4	—	47 ($2\frac{1}{2}$-inch glass fiber)
	OCF	OCF 431 & OCF 427	—	40	46 ($3\frac{1}{2}$-inch glass fiber)
	GA	TL 77-138	—	—	50 ($3\frac{1}{2}$-inch glass fiber)
6. *Same as 5*, except double-layer $\frac{5}{8}$-inch gypsum board each side	USG	TL 67-212 & TL 67-239	10.6	49	59 ($3\frac{1}{2}$-inch mineral fiber)
	NGC	NGC 2368 & NGC 2365	11.3	50	54 ($3\frac{1}{2}$-inch glass fiber)
7. Double-row 2 x 4 wood stud, 1-inch plate separation, single layer $\frac{5}{8}$-inch gypsum board each side	FPL	TL 75-83	7.6	—	57 (double $3\frac{1}{2}$-inch glass fiber)
	OCF	OCF W-43-69 & OCF 448	—	45	56 (3-inch glass fiber)
8. *Same as 7*, except double-layer gypsum board each side	FPL	TL 75-82	12.2	—	63 (double $3\frac{1}{2}$-inch glass fiber)
	OLF	OCF W-42-69 & OCF W-40-69	—	58	62 ($1\frac{1}{2}$-inch glass fiber)
9. 8-inch lightweight hollow concrete block both sides sealed with latex paint	ABPA	TL 70-16	34	46	—
10. *Same as 9*, with addition of furred out wall: $1\frac{5}{8}$-inch 24-gage metal studs, runners placed $\frac{1}{4}$-inch from concrete wall, covered with $\frac{1}{4}$-inch prefinished hardboard facing	ABPA	TL 70-14	36	—	57 ($1\frac{1}{2}$-inch mineral fiber)

[1] OCF—Owens-Corning Fiberglas Corporation
NGC—Gold Bond Building Products Division
FPL—USDA Forest Products Laboratory
GA—Gypsum Association, 1603 Orrington Ave
USG—United States Gypsum
ABPA—American Board Products Association

*Source: Reference[9]



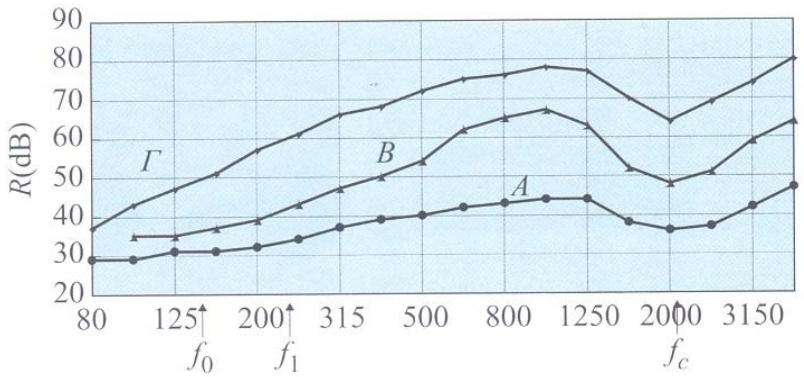
Σχήμα 2.6. *Καμπύλη αναφοράς υπολογισμού STC.*



Σχήμα 2.7. *Παράδειγμα προσαρμογής της καμπύλης αναφοράς στις τιμές του δείκτη ηχομείωσης. (STC 25).*

2.16 - Επίδραση της απορρόφησης στην ηχομείωση

Το διάκενο μεταξύ των επιφανειών στις χαμηλές συχνότητες δρα σαν αποσβεστήρας των ταλαντώσεων που κάνουν, εφόσον βέβαια η απόσταση των επιφανειών είναι πολύ μεγαλύτερη από το μήκος κύματος του ήχου. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή σε αποστάσεις συγκρίσιμες με το μήκος κύματος, σχηματίζονται στάσιμα κύματα πράγμα που δίνει μεγάλες αποκλίσεις της προβλεπόμενης από την πραγματική ηχομείωση. Όταν μεταξύ των επιφανειών δεν υπάρχει απορροφητικό υλικό το πλάτος των στάσιμων κυμάτων είναι μεγάλο και η εκπομπή (διέλευση) του ήχου σημαντική. Η προσθήκη απορροφητικού υλικού στο διάκενο σε γενικές γραμμές βελτιώνει την ηχομόνωση στις χαμηλές συχνότητες. Η βελτίωση αυτή είναι σημαντική σε ελαφρές κατασκευές (π.χ. γυψοσανίδες) ενώ λίγο συμβάλει σε βαριές κατασκευές (π.χ. πέτρινοι τοίχοι). Σε περίπτωση που δεν μπορούμε να γεμίσουμε το διάκενο με απορροφητικό υλικό (π.χ. διπλά παράθυρα), το απορροφητικό μπορεί να τοποθετηθεί περιμετρικά στο παράθυρο. Όσο μεγαλύτερο το πάχος του απορροφητικού τόσο καλύτερη η ηχομόνωση στις χαμηλές πάντα συχνότητες. Στα διπλά παράθυρα πάντως πρέπει να αποφεύγονται τα τετράγωνα σχήματα, [1].



Σχήμα 2.8. *Ηχομείωση από απλή επιφάνεια Α από διπλή επιφάνεια χωρίς απορροφητικό υλικό Β και διπλής επιφάνειας με απορροφητικό υλικό Γ.*

2.17 - Επίδραση των συνδέσμων στην ηχομείωση

Στην περίπτωση των διπλών και τριπλών επιφανειών εάν υπάρχουν γέφυρες ήχου τότε για μια συχνότητα f_b και επάνω που ονομάζεται συχνότητα ηχογέφυρας (bridging frequency) και που βρίσκεται μεταξύ των συχνοτήτων f_0 και f_1, ο δείκτης ηχομείωσης δίδεται από τη σχέση:

$$R = R + \Delta R_m \tag{2.37}$$

όπου ΔR_m η επίδραση της γέφυρας ήχου και δίδεται από τη σχέση:

1. Για σημειακές συνδέσεις:

$$\Delta R_m = 20\log(ef_c) + 20\log\frac{m_1}{m_1 + m_2} - 45 \tag{2.38}$$

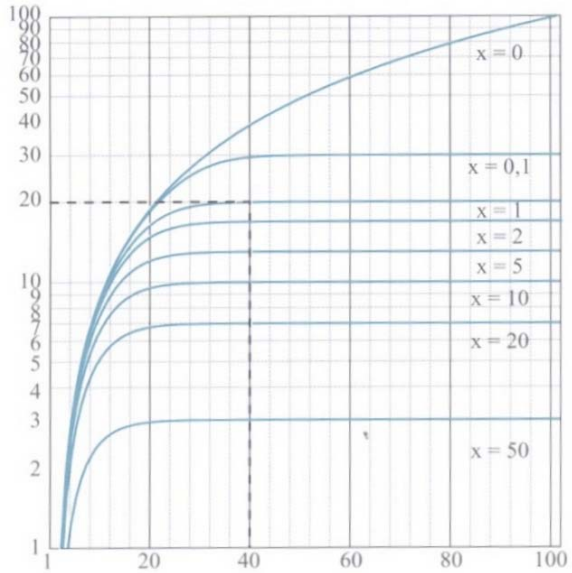
2. Για γραμμικές συνδέσεις:

$$\Delta R_m = 10\log(bf_c) + 20\log\frac{m_1}{m_1 + m_2} - 18 \tag{2.39}$$

όπου f_c η μέγιστη κρίσιμη συχνότητα και e, b η οριζόντια απόσταση των σημείων στήριξης σε μέτρα, [1].

2.18 - Επίδραση των ανοιγμάτων στην ηχομείωση

Όταν σε μια επιφάνεια υπάρχουν ανοίγματα τότε αυτά περιορίζουν σε σημαντικό βαθμό την ηχομείωση των επιφανειών. Η μείωση της ηχομείωσης εξαρτάται από το εμβαδόν των ανοιγμάτων σε σχέση με το εμβαδόν των επιφανειών. Το παρακάτω σχήμα δίδει την μεταβολή της ηχομείωσης ενός χωρίσματος σε συνάρτηση το % ποσοστό του ανοίγματος (σε σχέση με το συνολικό εμβαδόν της επιφάνειας).



Σχήμα 2.9 *Μείωση του συντελεστή ηχομείωσης συναρτήσει του % ποσοστού του ανοίγματος.*

Η οριζόντια κλίμακα δίδει την ηχομείωση χωρίς ανοίγματα ενώ η κατακόρυφη την αντίστοιχη ηχομείωση ανάλογα με το ποσοστό του ανοίγματος. Από το σχήμα αυτό προκύπτει ότι σ'ένα χώρισμα με δείκτη ηχομείωσης 40dB αν υπάρχει άνοιγμα που να καλύπτει το 1% του συνολικού εμβαδού, τότε η ηχομείωση μειώνεται στα 20 dB, [1].

2.19 - Επίδραση της απόσβεσης στην ηχομείωση

Υπάρχει άμεση σχέση του παράγοντα απωλειών και συνεπώς της απόσβεσης με την ηχομείωση των επιφανειών. Η επίδραση αυτή είναι ιδιαίτερα έντονη για συχνότητες μεγαλύτερες από την κρίσιμη συχνότητα καθώς και στην περιοχή του συντονισμού (περιοχές I και III στο Σχήμα 2.4). Από το σχήμα αυτό φαίνεται ότι αύξηση της απόσβεσης σημαίνει αύξηση της ηχομείωσης για συχνότητες μεγαλύτερες της κρίσιμης συχνότητας. Σώματα με μεγάλη σκληρότητα και αντοχή π.χ. ατσάλι, αλουμίνιο κ.λ.π. (που έχουν καλή συμπεριφορά στις χαμηλές συχνότητες) συνήθως έχουν μικρή απόσβεση ενώ αντίθετα σώματα με μικρή σκληρότητα και μικρή αντοχή π.χ. πλαστικά, ελαστικά σώματα, έχουν μεγάλη απόσβεση. Αύξηση της απόσβεσης μπορούμε να επιτύχουμε σε σκληρά σώματα με την προσθήκη βρισκοελαστικού πολυμερούς (viscoelastic polymer) στην επιφάνεια που δονείται. Για καλύτερη απόδοση, ένας πρακτικός κανόνας είναι να κολληθεί του πολυμερές στην εν λόγω επιφάνεια, το δε πάχος του θα πρέπει να είναι περίπου τριπλάσιο από το πάχος της επιφάνειας και το βάρος του τουλάχιστον κατά 20% μεγαλύτερο από το βάρος της επιφάνειας, [1].

2.20 - Αρχές λειτουργίας συστήματος HVAC σε ένα studio ηχογραφήσεων

Το σύστημα θέρμανσης, κλιματισμού και εξαερισμού (HVAC) ενός χώρου ηχογράφησης, δωματίου ελέγχου και γενικά ενός ηχοευαίσθητου χώρου είναι υπεύθυνο για την δημιουργία θορύβου και διανομή αυτού, μέσω του συστήματος, στο χώρο, εξασθενώντας μερικές φορές την όποια προσπάθεια για μόνωση του χώρου. Οι αρχές λειτουργίας ενός σωστού συστήματος εξαερισμού και κλιματισμού σε ένα studio ηχογραφήσεων είναι, [15]:

1. Θα πρέπει να εξαερίζει το χώρο.
2. Θα πρέπει να κλιματίζει το χώρο.

3. Θα πρέπει ο θόρυβος των κλιματιστικών μονάδων να μην μεταφέρεται στο studio ηχογραφήσεων και να αποφευχθούν όσο το δυνατόν οι αεροδυναμικοί θόρυβοι.
4. Θα πρέπει να μην μεταφέρεται ο ήχος του περιβάλλοντος στο studio.
5. Αντιστρόφως θα πρέπει ο ήχος του studio να μην μεταφέρεται στο περιβάλλον.
6. Θα πρέπει να μην μεταφέρεται ήχος από το ένα δωμάτιο στο άλλο.

2.21 - Πηγές θορύβου συστημάτων κλιματισμού

Ένα κτίριο το οποίο διαθέτει σύστημα κλιματισμού τότε κατά γενικό κανόνα μειώνεται ο θόρυβος που προέρχεται από το περιβάλλον. Αν η κατασκευή είναι θερμομονωτική (π.χ. διαθέτει διπλά παράθυρα) τότε η μείωση του εξωτερικού θορύβου είναι ακόμη μεγαλύτερη. Οι συσκευές κλιματισμού όμως δημιουργούν τα εξής προβλήματα:

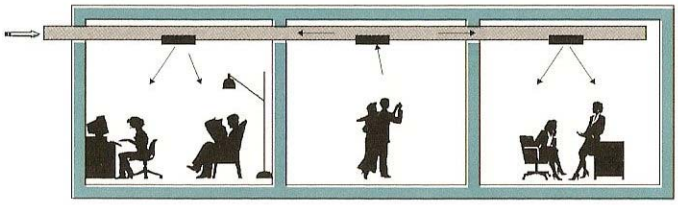
- Προσθέτουν νέες πηγές θορύβου.
- Μεταδίδουν εύκολα τον παραγόμενο θόρυβο μέσω των αεραγωγών στους διαφόρους χώρους.

Οι κυριότερες πηγές θορύβου των κλιματιστικών μηχανημάτων είναι ο θόρυβος του **συμπιεστή**, ο θόρυβος των **ανεμιστήρων**, ο θόρυβος των **αεραγωγών** και ο θόρυβος που προέρχεται από τις **γρίλιες εξόδου** του αέρα. Η στάθμη ισχύος του θορύβου που προέρχεται από τις γρίλιες εξόδου των αεραγωγών είναι ανάλογη με την $6^{η}$ δύναμη της ταχύτητας ροής και μπορεί να προσεγγισθεί με την σχέση:

$$L_W \cong 30 + 60 \log u dB / m^2 \qquad (2.40)$$

Η παραπάνω σχέση δίνει τη στάθμη ισχύος ανά m^2 στομίου εξόδου. Το παρακάτω σχήμα δείχνει ένα σύστημα κλιματισμού στο οποίο ο θόρυβος που παράγεται στο χώρο Α μαζί με αυτόν που μεταφέρεται από το συμπιεστή μεταδίδονται μέσω των αεραγωγών στους υπόλοιπους χώρους. Στις ενώσεις στα σημεία καμπής και γενικότερα στα σημεία ασυνέχειας των αεραγωγών δημιουργείται θόρυβος του οποίου η στάθμη είναι ανάλογη με την $5^{η}$ ή $6^{η}$ δύναμη της ταχύτητας ροής. Ο

θόρυβος αυτός μειώνεται με την ταχύτητα ροής. Προτεινόμενες τιμές της ταχύτητας ροής είναι μεταξύ 5 και 10m/sec. Για αποτελεσματικότερη μείωση του θορύβου απαιτείται περιορισμός των ταλαντώσεων των αεραγωγών, [1].



Σχήμα 2.10. *Μετάδοση του θορύβου μέσω συστήματος κλιματισμού.*

2.22 - Θόρυβος ανεμιστήρων

Η επιλογή του καλύτερου ανεμιστήρα από πλευράς εκπεμπόμενου θορύβου είναι συνάρτηση της στατικής πίεσης την οποία πρέπει να αντιμετωπίσει ο ανεμιστήρας προκειμένου να λειτουργήσει (αύξηση της στατικής πίεσης συνεπάγεται αύξηση του θορύβου του ανεμιστήρα) και της παροχής.

Κατασκευαστικά ένας ανεμιστήρας αποτελείται από τρία κύρια τμήματα, τον κινητήρα, τη φτερωτή και το κέλυφος οπού αποτελούν και τις κύριες πηγές παραγωγής θορύβου. Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες ανεμιστήρων:

1. **Αξονικοί** - Η κατεύθυνση κίνησης του αέρα είναι κατά μήκους του άξονα περιστροφής του ανεμιστήρα και της φτερωτής. Έχουν μεγάλες ταχύτητες περιστροφής και αριθμό πτερυγίων από 8 μέχρι 30. Ο θόρυβος που εκπέμπουν έχει τονικά χαρακτηριστικά λόγω της περιοδικής διαταραχής που προκαλείται από την περιστροφή των πτερυγίων, οι συχνότητες της οποίας συνδέεται άμεσα με τη συχνότητα περιστροφής του ανεμιστήρα και τις αρμονικές αυτής και γι'αυτό είναι δύσκολο να καταπολεμηθεί.

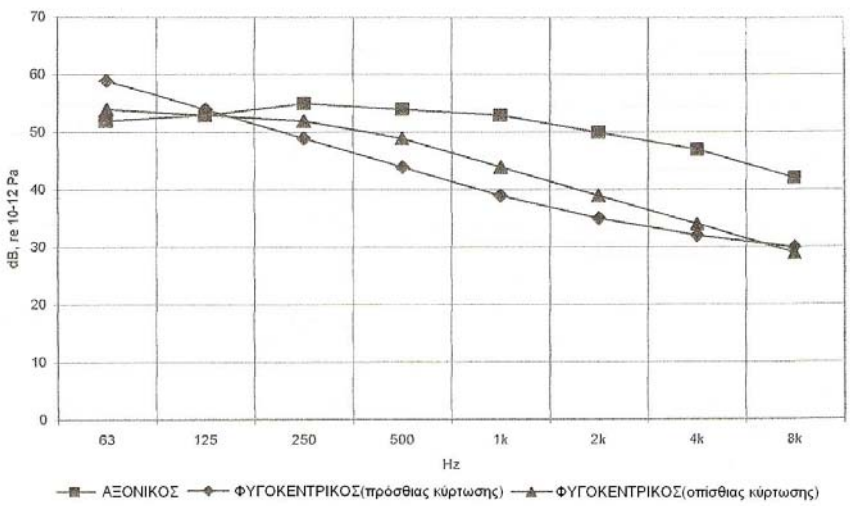
2. **Φυγοκεντρικοί** – Χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες, πρόσθιας και οπίσθιας κύρτωσης των πτερυγίων. Η κατεύθυνση κίνησης του αέρα είναι κάθετη στον άξονα περιστροφής των πτερυγίων του ανεμιστήρα. Ο θόρυβος που εκπέμπουν όλοι οι φυγοκεντρικοί ανεμιστήρες αποτελείται από δύο συνιστώσες. Το θόρυβο ο οποίος αποτελείται από ορισμένους τόνους

συγκεκριμένης συχνότητας και ο οποίος παράγεται από τις φτερωτές. Η συχνότητα των τόνων δίνεται από τη σχέση:

$$f_n = \frac{nBN}{60} \tag{2.41}$$

όπου B ο αριθμός των πτερυγίων, N η συχνότητα περιστροφής και n η τάξη των αρμονικών, $n = 1,2,3,\ldots$

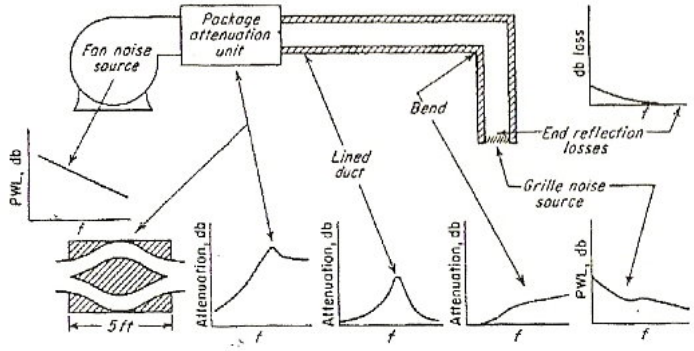
Η δεύτερη συνιστώσα αποτελείται από έναν αεροδυναμικό θόρυβο ο οποίος εκτείνεται σε ευρεία περιοχή συχνοτήτων και οφείλεται στη διαταραχή της πίεσης του αέρα λόγω της περιστροφής.



Σχήμα 2.11. *Τυπικά φάσματα εκπομπής θορύβου διαφόρων τύπων ανεμιστήρα.*

2.23 - Έλεγχος θορύβου ανεμιστήρων

Πρόκειται για μια δύσκολη διαδικασία. Η χρήση απορροφητικών, παράλληλων κυκλικών σιγαστήρων είναι κατάλληλη για τη μείωση του θορύβου. Το παρακάτω σχήμα δείχνει μια διάταξη ηχομόνωσης φυγοκεντρικών ανεμιστήρων.



Σχήμα 2.12. *Παραγωγή και εξασθένηση του θορύβου κατά μήκος διάταξης κλιματισμού (Πηγή Beranek Noise reduction*, [1]).

Στην παραπάνω διάταξη έχουν χρησιμοποιηθεί δύο σιγαστήρες, ένας στην είσοδο και ένας στην έξοδο του αέρα. Η σύνδεση των σιγαστήρων έχει γίνει με κατάλληλες εύκαμπτες συνδέσεις ενώ η μείωση του θορύβου γίνεται ακόμη μεγαλύτερη αν χρησιμοποιηθούν ράβδοι εξάρτησης που απορροφούν τους κραδασμούς. Στο παραπάνω σχήμα αναπαριστάται επίσης το φάσμα των πηγών θορύβου καθώς και την εξασθένηση από τα διάφορα εξαρτήματα σ'ένα σύστημα κλιματισμού του οποίου οι πηγές θορύβου είναι ο ανεμιστήρας και οι γρίλιες εξόδου του αέρα. Το πρώτο και το τελευταίο διάγραμμα δίνουν τα φάσματα του θορύβου των παραπάνω πηγών ενώ τα υπόλοιπα δίνουν την εξασθένηση συναρτήσει της συχνότητας, [1].

2.24 - Σιγαστήρες

Πρόκειται για ειδικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται για τη μείωση του θορύβου που μεταφέρεται διαμέσου σωληνώσεων και αεραγωγών. Ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους διακρίνονται σε **απορροφητικούς** (absorptive), **αντίδρασης** (reactive), **διάχυσης** (diffusion).

Η λειτουργία των απορροφητικών σιγαστήρων στηρίζεται στις απορροφητικές ιδιότητες των υλικών τα οποία τοποθετούνται κατά μήκος της διαδρομής μετάδοσης του θορύβου ώστε να απορροφούν τα ηχητικά κύματα.

Στους σιγαστήρες τύπου αντίδρασης η ηχομείωση επιτυγχάνεται λόγω των φαινομένων ανάκλασης και συμβολής των ηχητικών κυμάτων που δημιουργούνται κάθε φορά που παρουσιάζεται μεταβολή της εμπέδησης κατά μήκος της διαδρομής διάδοσης του ηχητικού κύματος, ενώ διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τους σιγαστήρες εκτόνωσης και συντονιστές.

Οι σιγαστήρες τύπου διάχυσης επιτυγχάνουν μείωση του θορύβου με διάχυση των αερίων υψηλών ταχυτήτων σε αντίστοιχα χαμηλότερης ταχύτητας.
Κάθε τύπος σιγαστήρα εμφανίζει διαφορετικού τύπου καμπύλη ηχομείωσης, γι'αυτό σε πολλές εφαρμογές χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα συνδυασμοί των παραπάνω τύπων. Η απόδοση ενός σιγαστήρα στη μείωση θορύβου χαρακτηρίζεται από την τιμή της Δυναμικής Απώλειας Μετάδοσης (Dynamic Insertion Loss, IL) του σιγαστήρα, η οποία μετριέται σε κάθε συχνοτική περιοχή και σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου, πριν και μετά την εισαγωγή του σιγαστήρα στο δίκτυο, υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας, ενώ δίνεται από τον τύπο:

$$IL = 10\log\frac{(p_i)^2}{(p_0)^2} \tag{2.42}$$

όπου p_i η ακουστική πίεση πριν την εισαγωγή του σιγαστήρα και p_0 η ακουστική πίεση μετά την εισαγωγή του σιγαστήρα.
Επιλέγοντας τον κατάλληλο σιγαστήρα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι εξής παράμετροι:

- Η Δυναμικής Απώλειας Μετάδοσης του σιγαστήρα.
- Η πτώση της πίεσης των αερίων στην έξοδο του σιγαστήρα.

Η ταχύτητα των αερίων κατά την έξοδό τους από τον σιγαστήρα καθορίζει την στάθμη θορύβου που παράγει ο σιγαστήρας. Στις περισσότερες συχνότητες ο διπλασιασμός της ταχύτητας εξόδου αυξάνει κατά 20 περίπου dB την παραγόμενη στάθμη. Το στόμιο εξόδου μπορεί να θεωρηθεί ως μια σημειακή πηγή με μεγάλη κατευθυντικότητα κατά την προέκταση του άξονα του σιγαστήρα κυρίως στις υψηλές συχνότητες.
Η πτώση πίεσης που δημιουργείται με την εφαρμογή του σιγαστήρα αυξάνει και αυτή με την αύξηση της ταχύτητας ροής. Σε περιπτώσεις όπου η πτώση πίεσης δεν είναι επιθυμητή αυξάνουμε τη διατομή του σιγαστήρα. Ένας πρακτικός κανόνας είναι η διατομή του σιγαστήρα να ληφθεί 1.25 έως 1.5 φορές μεγαλύτερη από τη διατομή του αεραγωγού.

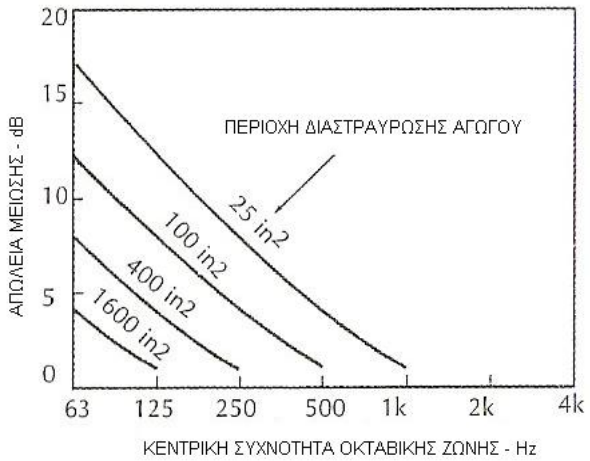
Βασική ποσότητα στην μελέτη των σιγαστήρων είναι η αντίσταση του, η οποία και ονομάζεται σύνθετη αντίσταση όγκου. Όταν ένα ηχητικό κύμα διαδίδεται κατά μήκος ενός αγωγού, η ακουστική σύνθετη αντίσταση Z δίνεται από τη σχέση:

$$Z = \frac{p}{Su} = \frac{\rho c}{S} \tag{2.43}$$

όπου *Su* είναι η παροχή.

2.25 - Εξασθένηση θορύβου στους αγωγούς

Οι μεταλλικοί αγωγοί εξασθενούν τον θόρυβο του ανεμιστήρα σε ένα συγκεκριμένο βαθμό χωρίς καμία εσωτερική επένδυση. Καθώς ο αγωγός διαχωρίζεται, ένα μέρος της ενέργειας του θορύβου του ανεμιστήρα κατευθύνεται στις επιμέρους διακλαδώσεις. Η δόνηση του αγωγού τοίχου απορροφά ένα μέρος της ενέργειας, και κάποια ασυνέχεια (όπως μια κλίση) αντανακλά ορισμένο ποσό ενέργειας κατευθείαν πίσω στην πηγή. Μια αρκετά μεγάλη ασυνέχεια, όπως η έξοδος του κατακλύσματος του αγωγού μαζί με τον τοίχο, αντανακλά σημαντική ενέργεια κατευθείαν πίσω στην πηγή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εξασθένηση του θορύβου που εισέρχεται στο δωμάτιο όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.13. Σε αντίθεση με πολλά άλλα συστήματα στην ακουστική, αυτό είναι ένα είδος εξασθένησης μεγαλύτερο στις χαμηλές συχνότητες απ'ότι στις υψηλές.

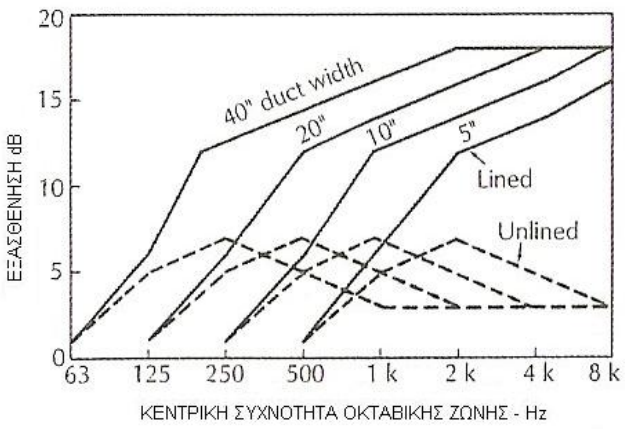


Σχήμα 2.13. *Επίδραση της τμηματικής διασταυρωμένης περιοχής του αγωγού στην εξασθένηση του θορύβου του συστήματος θέρμανσης, κλιματισμού και εξαερισμού.*

Η εσωτερική επένδυση ενός αγωγού αυξάνει την εξασθένηση πρωτίστως στην υψηλή ακουστική περιοχή συχνοτήτων. Το Σχήμα 2.14. παριστάνει την μετρούμενη εξασθένηση αγωγού εσωτερικής επένδυσης 2,54 εκατοστών και στις τέσσερις πλευρές του.

Σχήμα 2.14. *Μετρούμενη εξασθένηση θορύβου σε ορθογώνιους αγωγούς.*

Οι διαστάσεις που παρουσιάζονται είναι για την ελεύθερη περιοχή μέσα στον αγωγό. Αυτή η επίδραση της εξασθένησης στον τοίχο είναι μεγαλύτερη στους μικρότερους αγωγούς. Για συχνότητες μεσαίας περιοχής, ένας αγωγός μήκους 3,048 μέτρων μπορεί να λογαριαστεί για 40 ή 50dB εξασθένησης για αγωγούς 60,96 εκατοστών ή μικρότερων. Υπάρχει μια εξισορρόπηση, ωστόσο, καθώς μειώνεται η διασταύρωση του αγωγού αυξάνοντας την ταχύτητα του αέρα ο οποίος κινείται μέσω του. Υψηλότερες ταχύτητες αέρα παράγουν μεγαλύτερο θόρυβο στροβιλισμού στην σχάρα/στον διαχυτή. Δίνεται συχνά αρκετά μεγάλη έμφαση στην εξασθένηση η οποία συμβάλλεται από τις κλίσεις της δεξιάς γωνίας, οι οποίες είναι τοποθετημένες εν σειρά με τον αγωγό. Το Σχήμα 2.15. αποτιμά την εξασθένηση του θορύβου στις ευθυγραμμισμένες κλίσεις. Μόνο η εσωτερική επένδυση στις πλευρές είναι αποτελεσματική, η οποία είναι ο τρόπος που οι γωνίες ένωσης των σωλήνων του παρακάτω σχήματος ευθυγραμμίζονται.



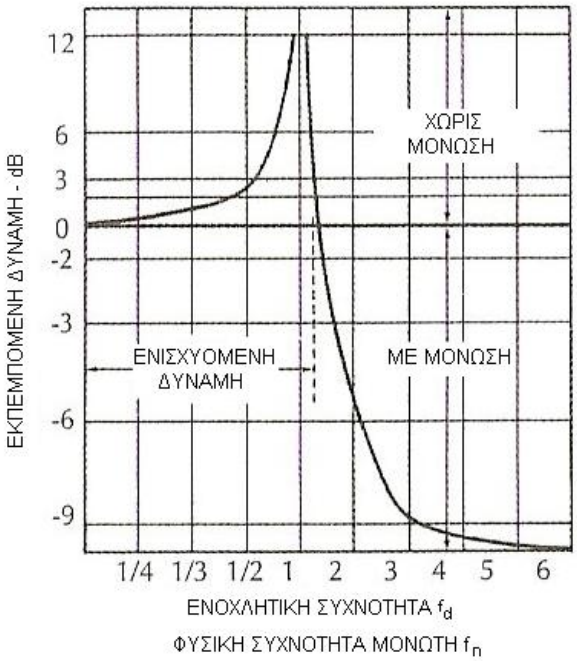
Σχήμα 2.15. *Εξασθένηση του θορύβου στις γωνίες ένωσης των σωλήνων των τετράγωνων αγωγών του συστήματος θέρμανσης, κλιματισμού και εξαερισμού χωρίς την στροφή των πτερυγίων.*

Και εδώ η εξασθένηση είναι μεγαλύτερη στις υψηλές ακουστικές συχνότητες. Τα ενδεικνυόμενα πλάτη των αγωγών είναι καθαρές μετρήσεις μέσα στην εσωτερική επένδυση. Η στρώση της εσωτερικής επένδυσης είναι το 10% του πλάτους του αγωγού και εκτείνεται ως δύο πλάτη αγωγού μπροστά και δύο πλάτη αγωγού μετά την κλίση. Είναι εμφανές ότι η εσωτερική επένδυση συνεισφέρει πολύ στην εξασθένηση του θορύβου που κατεβαίνει τον αγωγό, αλλά λιγότερο στις χαμηλές συχνότητες. Κι εδώ επίσης, υπάρχει μια εξισορρόπηση. Κάθε κλίση, ευθυγραμμισμένη ή όχι, αυξάνει τον στροβιλισμό και συνεπώς τον θόρυβο, [15].

2.26 - Μόνωση δονήσεων

Ο γενικός κανόνας είναι πρώτα να κάνουμε ότι είναι λογικό να γίνει στην πηγή της δόνησης. Η απλή ενέργεια της τοποθέτησης σε τοίχο του εξοπλισμού του συστήματος θέρμανσης, κλιματισμού και εξαερισμού σε τέσσερα δονούμενα πλαίσια μπορεί να βοηθήσει στην μείωση της εκπεμπόμενης δόνησης, ίσως να μην έχει καμία γενική συνέπεια, ή μπορεί στην πραγματικότητα να ενισχύσει τις δονήσεις, εξαρτώμενη από την καταλληλότητα των πλαισίων για την συγκεκριμένη δουλειά. Η αποδοτικότητα της μόνωσης είναι καθαρά μια λειτουργία της σχέσης μεταξύ συχνότητας της ενοχλητικής πηγής f_d με την φυσική συχνότητα της μόνωσης f_n. Εάν $f_d = f_n$, επικρατεί μια κατάσταση συντονισμού και η μέγιστη δόνηση διαδίδεται. Η μόνωση αρχίζει να εμφανίζεται όταν το κλάσμα f_d / f_n είναι ίσο ή μεγαλύτερο του 2. Όταν

βρεθεί μέσα σε αυτήν την περιοχή μόνωσης, κάθε φορά που η ποσότητα f_d / f_n διπλασιάζεται, η μεταφορά της δόνησης μειώνεται 4-6dB, [15].



Σχήμα 2.16. *Ο θόρυβος προερχόμενος από τον εξοπλισμό του συστήματος θέρμανσης, κλιματισμού και εξαερισμού μπορεί να μειωθεί με πλαίσια μόνωσης ή μπορεί στην πραγματικότητα να ενισχυθεί.*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - STUDIO ΗΧΟΓΡΑΦΗΣΗΣ ΦΩΝΗΣ

3.1 - Εισαγωγή

Σχεδόν κάθε studio ηχογραφήσεων, επαγγελματικό και μη διαθέτει έναν ειδικά απομονωμένο χώρο για την ηχογράφηση φωνής. Σκοπός κάθε τέτοιου χώρου είναι η ομοιόμορφη καταγραφή του σήματος φωνής ή του συνόλου φωνών χωρίς την αλληλεπίδραση του σήματος με τα κυματικά φαινόμενα που δημιουργούνται στο χώρο.

Μπορεί να αποτελεί ξεχωριστό δωμάτιο ενός studio με πρόσβαση είτε από το κυρίως studio ηχογραφήσεων είτε από το δωμάτιο ελέγχου ή μπορεί να είναι της τάξης μεγέθους ενός θαλάμου, προσαρμοσμένος συνήθως στο δωμάτιο ελέγχου. Γενικά το μοντέλο λειτουργίας οπουδήποτε χώρου ηχογράφησης φωνής ποικίλει ανάλογα με τις ανάγκες και το σκοπό του όλου studio ηχογραφήσεων.

Η ακουστική των χώρων ηχογράφησης φωνής ποικίλει προσφέροντας ένα περιβάλλον περισσότερο ανακλαστικό (ζωντανό) ή απορροφητικό (νεκρό) από αυτό του κυρίως studio ηχογραφήσεων.

Τα προβλήματα που προκύπτουν σχεδιάζοντας ένα μικρό χώρο για την ηχογράφηση φωνής είναι αρχικά ο χρωματισμός του ήχου ο οποίος προκαλείται από φαινόμενα συντονισμού και φίλτρου τύπου χτένας. Με τον ήχο να μην μπορεί να αναπτυχθεί στο χώρο μόνη λύση είναι η ισοστάθμιση του, υποβαθμίζοντας όμως τα φυσικά χαρακτηριστικά της φωνής του τραγουδιστή. Ειδικά σε πολύ μικρού μεγέθους δωμάτια καθιστάτε ουσιαστικά αδύνατο η δημιουργία ενός ακουστικά ουδέτερου χώρου, με μόνη διέξοδο την προσπάθεια να απορροφήσουμε τα πάντα παρέχοντας με τεχνητό τρόπο λίγες διακριτές ανακλάσεις. Βέβαια στην περίπτωση όπου θέλουμε απλά και μόνο να "συλλάβουμε" τα φωνητικά δεν χρειαζόμαστε ένα πολύ ανακλαστικό χώρο.

Την απαιτούμενη ουδετερότητα προσφέρουν τα μεγάλα δωμάτια. Στην μέση των δωματίων αυτών τα φωνητικά αποδίδουν καλύτερα καθώς υπάρχουν λίγες πρώτες ανακλάσεις. Μεγάλο μέρος της ενέργειας των φωνητικών δεν έχει την τάση να κατευθύνεται προς το πάτωμα και επιστρέφοντας να δημιουργεί προβλήματα, πάραυτα εάν οι ανακλάσεις από το πάτωμα αποτελέσουν πρόβλημα τότε επιλύεται με την τοποθέτηση χαλιών ενώ τα επιλεγμένα πολικά των μικροφώνων είναι συνήθως είτε καρδιοειδή είτε figure of 8 και ως εκ τούτου έχουν την τάση να αγνοούν τις ανακλάσεις από το πάτωμα.. Τέλος από κατασκευαστικής άποψης θα πρέπει να

αποφεύγεται η είσοδος στο χώρο ήχων από το εξωτερικό του περιβάλλον καθώς και από το δωμάτιο ελέγχου.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται και αναλύονται παραδείγματα χώρων ηχογράφησης φωνής που υπάρχουν στην βιβλιογραφία, διαφορετικών διαστάσεων και ακουστικής συμπεριφοράς με έμφαση στον τρόπο ακουστικής επένδυσης των χώρων ανάλογα με το σκοπό που εξυπηρετούν.

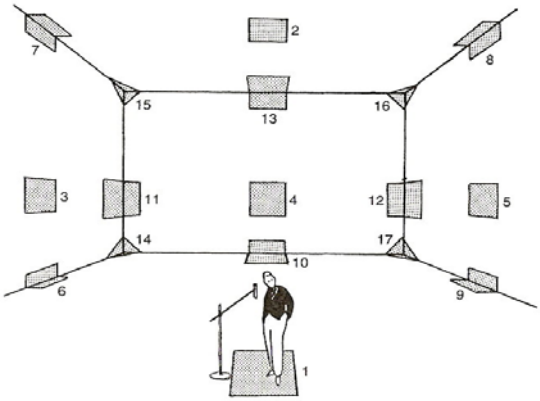
3.2 - Studio ηχογράφησης υπέρθεσης φωνής (voice - over studio)

Πρόκειται για χώρους με κύριο σκοπό την ηχογράφηση φωνής και τη μετέπειτα μίξη της με μουσική με ή χωρίς ηχητικά εφφέ, ή απλά την ηχογράφηση αυτής και μόνο. Τα studio αυτά ονομάζονται studio φωνής. Οι χώροι αυτοί έχουν τα δικά τους ιδιαίτερα ακουστικά χαρακτηριστικά, γι'αυτό και η κατασκευή τους είναι μια πολύπλοκη και ξεχωριστή διαδικασία.

Όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 1, σε ένα πολύ μικρό χώρο οι χαμηλές συχνότητες δεν μπορούν να ενισχυθούν και οι αποστάσεις των τρόπων ταλάντωσης που δημιουργούνται είναι μεγάλες. Για τους λόγους αυτούς οι μηχανικοί του BBC βάση της εμπειρίας τους έχουν προτείνει να μην κατασκευάζονται studio ηχογράφησης φωνής μικρότερα των $42m^2$, [7].

3.2.1 - Ακουστική του studio

Η φωνή ενός εκφωνητή λαμβάνεται από το μικρόφωνο και επιστρέφει σε αυτό ενισχυμένο λόγω των ανακλάσεων αυτού στις επιφάνειες και γωνίες του χώρου όπως παριστάνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.1. *Πρώτες ανακλάσεις.*

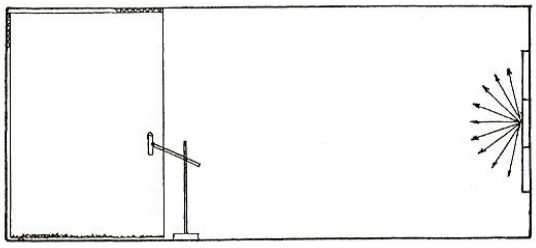
Η πρώτη ανάκλαση που επιστρέφει στο μικρόφωνο είναι αυτή από το πάτωμα, ανάκλαση 1. Η δεύτερη ανάκλαση που επιστρέφει στο μικρόφωνο είναι από την οροφή, ανάκλαση 2. Οι τρεις κατακόρυφοι τοίχοι γύρω από τον εκφωνητή στέλνουν τις ανακλάσεις 3, 4 και 5 πίσω στο μικρόφωνο. Οι γωνιακές ανακλάσεις 6 έως 13 προέρχονται από γωνίες δύο επιφανειών, ενώ οι γωνιακές ανακλάσεις 14 έως 17 από γωνίες τριών επιφανειών. Σε κάθε ανάκλαση, μέρος της ενέργεια του ήχου χάνεται, επομένως οι γωνιακές ανακλάσεις (6 έως 17) έχουν χαμηλότερη στάθμη όταν επιστρέφουν στο μικρόφωνο από τις αρχικές πρώτες ανακλάσεις (1 έως 5), [7].

3.2.2 - "Μαλακή" και "σκληρή" επένδυση

Στο Σχήμα 3.2. αναπαριστάται η πλάγια όψη ενός studio φωνής, διαστάσεων περίπου 3,05 x 4,88 x 7,10m οπού σκοπός του είναι το μικρόφωνο να λαμβάνει το άμεσο ηχητικό σήμα.

Στο δεξί άκρο του studio έχουν τοποθετηθεί διαχυτές. Οι διαχυτές αυτοί προσφέρουν τρισδιάστατη διάχυση και βασίζονται στην ακολουθία πρωτεύουσας ρίζας.

Το αριστερό άκρο του studio διαμορφώνεται με δύο τρόπους, την "μαλακή" και "σκληρή" επένδυση, οι οποίες έχουν ως κύριο παρανομαστή τον έλεγχο των πρώτων ανακλάσεων του ήχου στο χώρο.



Σχήμα 3.2. *Studio φωνής.*

Το σχέδιο της "μαλακής" επένδυσης περιλαμβάνει την κάλυψη ολόκληρης της αριστερής επιφάνειας του studio με ηχοαπορροφητικό υλικό. Με αυτό τον τρόπο θα μειωθεί το πλάτος των πρώτων ανακλάσεων η επίδραση των οποίων, όπως έχει αποδειχτεί, τα πρώτα 60ms είναι καθοριστική για την ποιότητά του άμεσου ηχητικού σήματος, με κίνδυνο την αύξηση της συνολικής απορροφητικότητας του studio μετατρέποντάς το ηχητικά νεκρό.

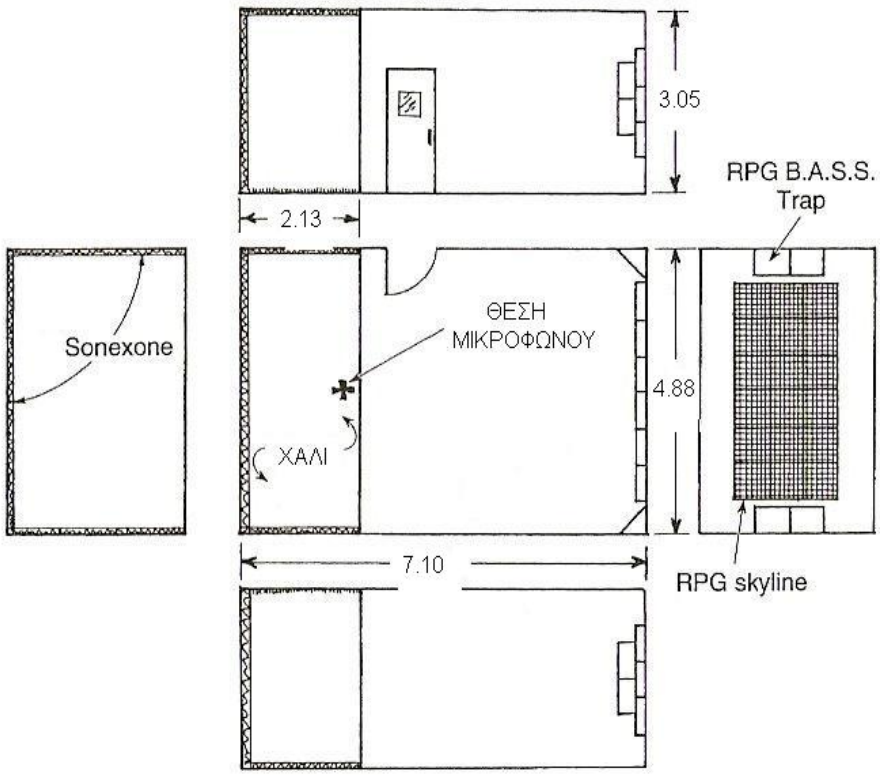
Το σχέδιο της "σκληρής" επένδυσης περιλαμβάνει την τοποθέτηση απορροφητών σε συγκεκριμένα μόνο σημεία από όπου προέρχονται οι πέντε πρώτες ανακλάσεις (τοίχους, πάτωμα, οροφή) ενώ χαλί τοποθετείται κάτω από το μικρόφωνο προς μείωση των ανακλάσεων από το πάτωμα, [7]

3.2.3 - Έλεγχος τρόπων ταλάντωσης

Η καλύτερη προσέγγιση για την παροχή ενός γενικού ελέγχου των χαμηλών συχνοτήτων των τρόπων ταλάντωσης είναι η τοποθέτηση απορροφητικών υλικών ή κατασκευών στις γωνίες του δωματίου. Για το λόγο αυτό στις γωνίες του δωματίου τοποθετούνται ηχοπαγίδες χαμηλών συχνοτήτων.

3.2.4 - Σχέδιο κατασκευής studio με "μαλακή" και "σκληρή" επένδυση

Στο Σχήμα 3.3 αναπαριστάται το σχέδιο κατασκευής του studio με "μαλακή" επένδυση. Η βασική κατασκευή του εσωτερικού χώρου υποτίθεται ότι είναι από γυψοσανίδα και το πάτωμα ξύλινο. Υποτίθεται επίσης ότι οι τοίχοι, βάση των προδιαγραφών, είναι επαρκής ως προς την ηχομονωτική τους ικανότητα από εξωτερικούς θορύβους, [7].

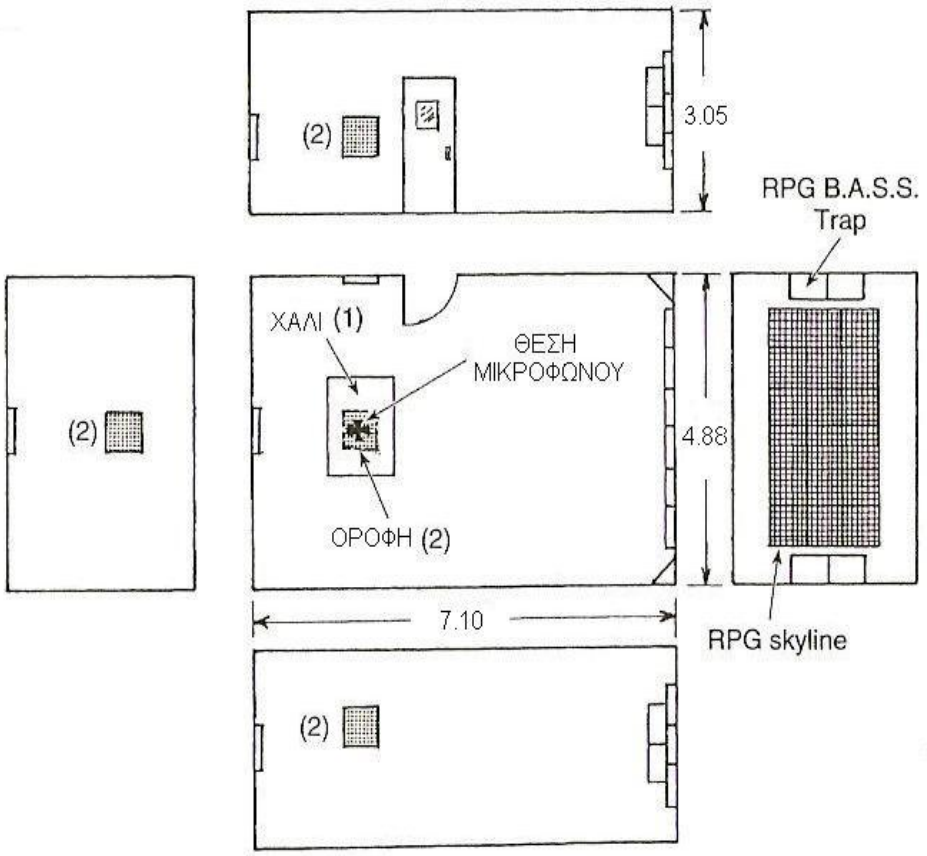


Σχήμα 3.3. *Studio με "μαλακή" επένδυση.*

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την επένδυση του εσωτερικού του studio είναι:

- Βαρύ χαλί.
- 0.05m SONEXone, απορροφητικό υλικό από την Illbruck Acoustic Products.
- Ηχοπαγίδες χαμηλών συχνοτήτων της RPG (RPG B.A.S.S. traps).
- Διαχυτές της RPG (RPG skyline).

Στο παρακάτω Σχήμα 3.4 αναπαριστάται το σχέδιο κατασκευής του studio με "σκληρή" επένδυση η κατασκευή του οποίου είναι ίδια με το παραπάνω.



Σχήμα 3.4. *Studio με "σκληρή" επένδυση.*

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την επένδυση του εσωτερικού του studio είναι:

1. Βαρύ χαλί.
2. Απορροφητικό υλικό διαστάσεων 0.61x0.61m περίπου.
3. Ηχοπαγίδες χαμηλών συχνοτήτων της RPG (RPG B.A.S.S. traps).
4. Διαχυτές της RPG (RPG skyline).

3.2.5 - Χρόνος αντήχησης

Ο υπολογισμός του χρόνου αντήχησης πραγματοποιείται με τη χρήση της εξίσωσης του Sabine:

$$RT_{60} = \frac{0.049V}{Sa} \tag{3.1}$$

όπου RT_{60} ο χρόνος αντήχησης (sec), V ο όγκος του χώρου (m^3), S η συνολική επιφάνεια του χώρου (m^2), a ο μέσος συντελεστής απορρόφησης των επιφανειών του δωματίου, Sa η συνολική απορρόφηση σε sabin.

Η εφαρμογή του τύπου του Sabine είναι αμφιλεγόμενη γι'αυτού του μεγέθους studio. Παρόλα αυτά η περιορισμένη χρήση της σχέσης 3.1 σε τέτοιους μικρούς χώρους είναι αποδεκτή όταν θέλουμε να κάνουμε μια πρόχειρη προσέγγιση της ακουστικής αντιμετώπισης του χώρου, έχοντας βέβαια πλήρη γνώση αυτών των περιορισμών. Με άλλα λόγια ο χρόνος αντήχησης λαμβάνεται ως δοκιμαστικός οδηγός.

3.3 - Μικρός θάλαμος εκφώνησης (small announce booth)

Ο όρος θάλαμος εκφώνησης (announce booth) είναι ένας όρος προερχόμενος πιθανόν από τις πρώιμες ημέρες των ραδιοφωνικών μεταδόσεων, ενώ ο όρος "θάλαμος" χρησιμοποιείται αναμφισβήτητα λόγω του συγκριτικού του μεγέθους.

Σήμερα οι μικρές αυτές κατασκευές, επονομαζόμενες και ως "θάλαμοι εκφώνησης" ή "θάλαμοι ομιλίας" βρίσκονται στις περισσότερες ραδιοφωνικές ή τηλεοπτικές εγκαταστάσεις.

3.3.1 - Το πρόβλημα του μικρού χώρου

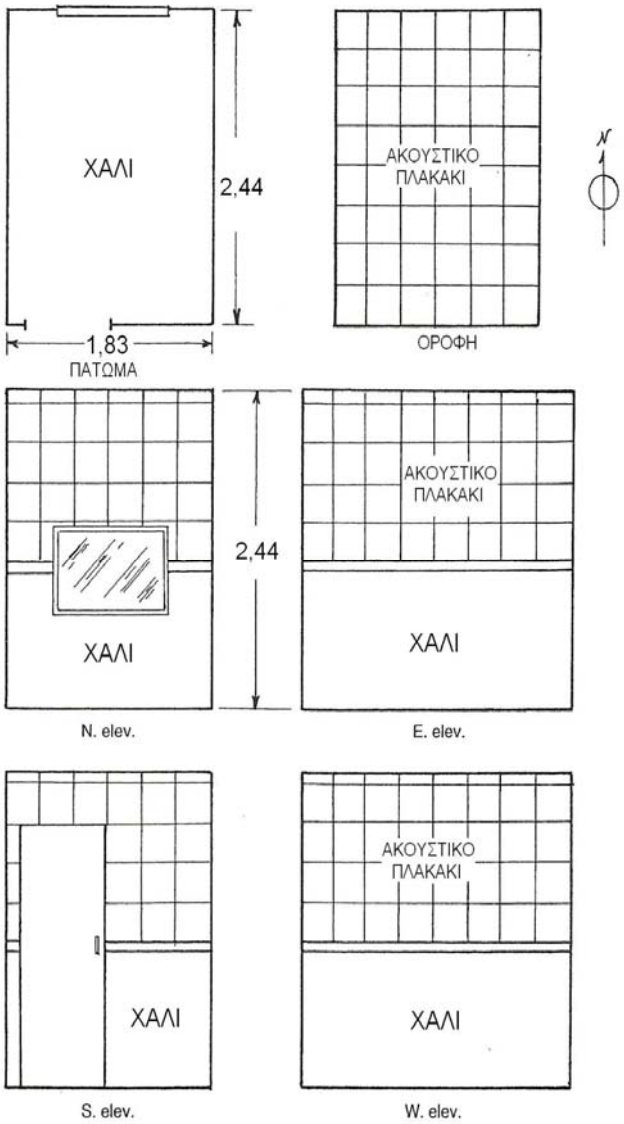
Τρία παραδείγματα φωνητικού θαλάμου θα μελετηθούν παρακάτω έχοντας ως αναφορά δωμάτιο μήκους 1,83m, πλάτους 2,44m, και ύψους 2,44m.

Μελετώντας τις συχνότητες των αξονικών τρόπων ταλάντωσης του δωματίου προκύπτει ότι πέραν της συχνότητας των 300Hz ελαχιστοποιούνται οι χρωματισμοί του ήχου. Επίσης η "ανισσόροπη" συχνοτική απόσταση των γειτονικών τρόπων ταλάντωσης οδηγεί σε μια ακανόνιστη συχνοτική απόκριση του δωματίου κάτω της συχνότητας των 300Hz, πράγμα που σημαίνει ότι για τον έλεγχο των αξονικών τρόπων ταλάντωσης παραπάνω απορρόφηση πρέπει να παρέχεται στο δωμάτιο.

3.3.2 - Παράδειγμα 1: Παραδοσιακός θάλαμος ομιλίας (traditional talk booth)

Σκοπός δεν είναι η παρουσίαση ενός studio προς κατασκευή αλλά η ανάλυση των προβλημάτων που προκύπτουν προσομοιώνοντας ουσιαστικά όλα εκείνα τα ακουστικά στοιχεία που χαρακτηρίζουν τους περισσότερους ενεργούς θαλάμους ομιλίας (ακουστικό πλακάκι, βαρύ χαλί) στον παραπάνω διαστάσεων θάλαμο.

Ο υποτιθέμενος αυτός θάλαμος επεξηγείται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.5. *Παράδειγμα 1.*

Πρόκειται για ένα μικρό ορθογώνιο χώρο διαστάσεων 1,83m, πλάτους 2,44m, και ύψους 2,44m, διαμορφωμένος με κοινό 2 x 4 πλαίσιο καλυπτόμενο και από τις δύο μεριές με 1/2" (1,27m) γυψοσανίδα, παρέχοντας παρά τις όποιες ελλείψεις της

κατασκευής, επαρκή μόνωση από εξωτερικούς θορύβους εκτός ακραίων καταστάσεων. Το ταβάνι καλύπτεται με ακουστικό πλακάκι όπως και ένα μέρος των τοίχων, ενώ βαρύ χαλί καλύπτει το πάτωμα και μέρος των τοίχων.

Από ακουστικής άποψης το ηχητικό πεδίο του θαλάμου κυριαρχείται από συντονισμούς με την ηχητική στάθμη πίεσης να αυξομειώνεται από σημείο σε σημείο του χώρου. Καθώς ο εκφωνητής κινείται στο χώρο προς αναζήτηση της καλύτερης θέσης λήψης, το μικρόφωνο λαμβάνει αυτές τις διαφορές ηχητικής πίεσης με αποτέλεσμα αυτό που ακούει ο εκφωνητής να είναι πολύ διαφορετικό από αυτό που "ακούει" το μικρόφωνο, [7].

Χρόνος αντήχησης

Η εφαρμογή του χρόνου αντήχησης σε ένα τέτοιο μικρό χώρο στον οποίο δεν μπορεί να αναπτυχθεί αντηχητικό πεδίο, είναι αντιφατική. Πάραυτα η εφαρμογή του είναι χρήσιμη ως προς την μελέτη της κατανομής της απορρόφησης στο θάλαμο. Ο χρόνος αντήχησης υπολογίζεται από τη σχέση 3.1.

Προβλήματα που χαρακτηρίζουν τον παραδοσιακό θάλαμο ομιλίας του Παραδείγματος 1:

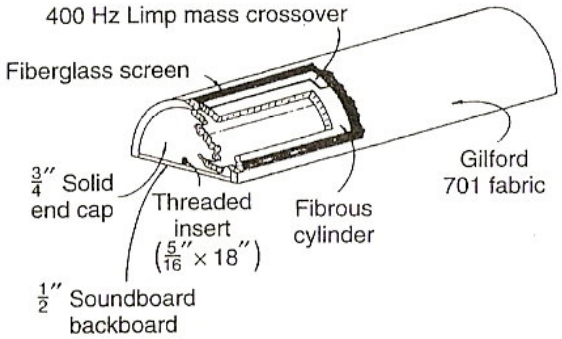
1. Οι αξονικοί τρόποι ταλάντωσης δημιουργούν ένα ακανόνιστο ηχητικό πεδίο. Η απορρόφηση με διαφράγματα που προσφέρουν οι τοίχοι και το πάτωμα ίσως είναι ανεπαρκής ως προς τον έλεγχο των τρόπων ταλάντωσης.
2. Υπερβολική απορρόφηση των μεσαίων και υψηλών συχνοτήτων μετατρέπουν τον χώρο πολύ "νεκρό".
3. Απαιτείται διάχυση του ήχου στο χώρο προς καλύτερη μίξη του.

3.3.3 - Παράδειγμα 2: Θάλαμος φωνής με Tube Traps

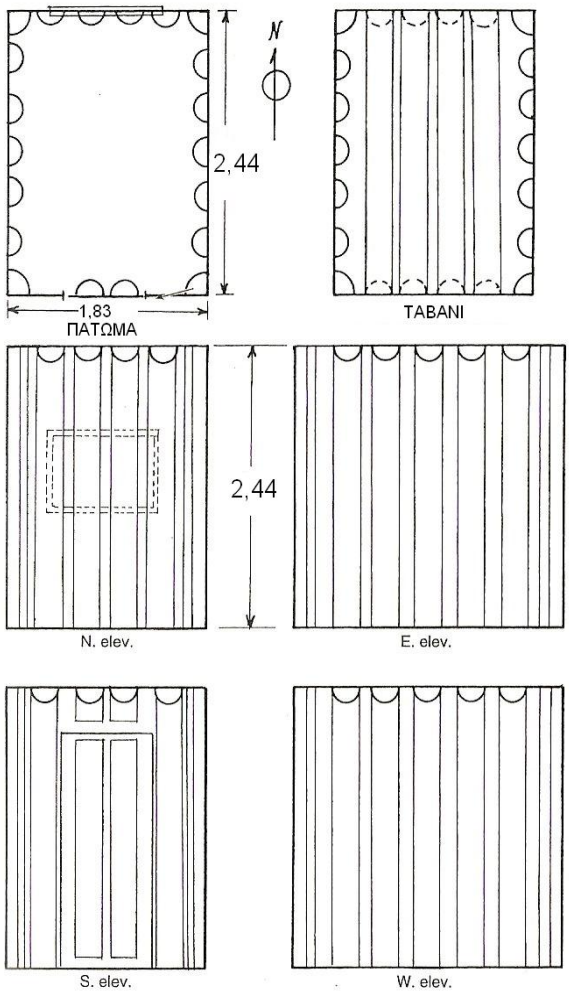
Η όλη αντιμετώπιση της ακουστικής του δωματίου του παραδείγματος 2 βασίζεται στην έννοια του Πεδίου Γρήγορου Ήχου (ενεργού αλλά ξηρού) και πραγματοποιείται βάση των προϊόντων της ASC (Acoustic Sciences Inc.), τα χαρακτηριστικά κατασκευής των οποίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.6.

Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.7 στις γωνίες του δωματίου έχουν τοποθετηθεί σωληνωτές παγίδες 90^0 για να υπάρχει απορρόφηση και έλεγχος των κανονικών τρόπων ταλάντωσης σε κάθε τομή τοίχου και οροφής τοίχου. Στους τέσσερις τοίχους

και το ταβάνι έχουν τοποθετηθεί μισές σωληνωτές παγίδες παρέχοντας από κοινού απορρόφηση και διάχυση του ήχου στο δωμάτιο, διάχυση η οποία επιτυγχάνεται με τις γυμνές λωρίδες τοίχου μεταξύ των σωληνωτών παγίδων. Το πάτωμα παραμένει χωρίς επεξεργασία.



Σχήμα 3.6. *Tube Trap*.



Σχήμα 3.7. *Παράδειγμα 2*.

Σε συνήθη studio, οι πρώτες ανακλάσεις από τις επιφάνειες του δωματίου κυριαρχούν στο χώρο αλληλεπιδρώντας μεταξύ τους δημιουργώντας χρωματισμούς από φαινόμενα φίλτρου τύπου κτένας. Στο παράδειγμα αυτό όμως οι ανακλάσεις που δημιουργούνται αντισταθμίζουν η μια την άλλη ώστε οι χρωματισμοί που δημιουργούνται να είναι ακουστοί όχι ως χρωματισμοί αλλά ως κάτι ευχάριστο. Μικρή επίδραση στην ποιότητα του ήχου έχει η μετακίνηση του μικροφώνου, [7].

Χρόνος αντήχησης

Βάση της εξίσωσης 3.1 υπολογίζουμε το χρόνο αντήχησης του φωνητικού θαλάμου. Οι χρόνοι αντήχησης του παραδείγματος 1 και 2 είναι παρόμοιοι με τη μόνη διαφορά ότι τα "νεκρά" χαρακτηριστικά των σωληνωτών παγίδων ακολουθεί άκρως διαχεόμενος ήχος.

Ο εκφωνητής βρισκόμενος σε ένα τόσο "νεκρό" χώρο θα έχει λίγη ακουστική ανάδραση της φωνής του, την οποία χρειάζεται προς προσανατολισμό της φωνής του. Αν αποτελεί αυτό αποτελεί πρόβλημα για τον εκφωνητή, μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση ακουστικών.

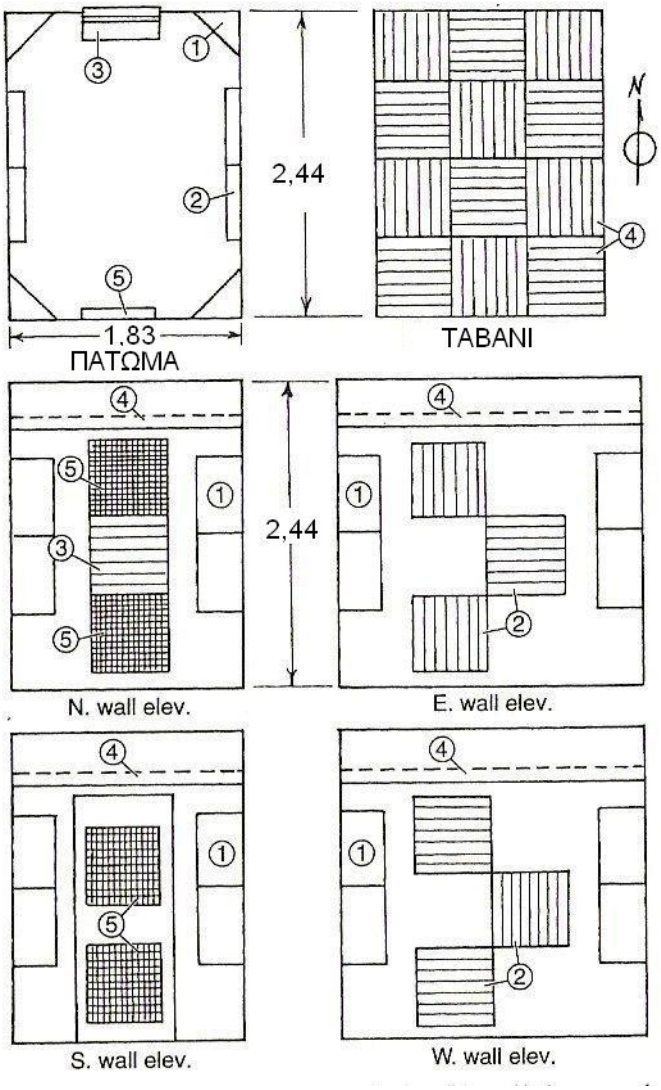
Το παράδειγμα αυτό αποτελεί μια νέα προσέγγιση προς την ποιοτική ηχογράφηση φωνητικών σημάτων σε τόσο μικρούς χώρους.

3.3.4 - Παράδειγμα 3: Θάλαμος φωνής με διαχυτές

Ο θάλαμος αυτού του παραδείγματος αποτελεί ένα ακόμα παράδειγμα δημιουργίας ικανοποιητικών συνθηκών προς ηχογράφηση, κυρίως μέσω της χρήσης διαχυτών RPG. Η διάταξή τους αναπαριστάται στο παρακάτω σχήμα και είναι η εξής, [7]:

1. $2' \times 2' \times 11''$ ($60 \times 60 \times 27{,}94\,cm$) B.A.S.S traps, δύο σε κάθε γωνία του δωματίου, προς απορρόφηση χαμηλών συχνοτήτων.
2. $2' \times 2' \times 4''$ ($60 \times 60 \times 10{,}16\,cm$) Abffusors, απορροφητής και διαχυτής του ήχου, τρείς στον ανατολικό και δυτικό τοίχο του δωματίου.
3. $2' \times 2' \times 9''$ ($60 \times 60 \times 22{,}86\,cm$) Diviewsor, διαχυτής με plexiglass πλαίσια, τοποθετημένος πάνω από το παράθυρο παρακολούθησης.
4. $2' \times 2' \times 4''$ ($60 \times 60 \times 10{,}16\,cm$) Formedffusor, διαχυτής τετραγωνικών στοιχείων, 12 στοιχεία συναρμολογημένα κάθετα μεταξύ τους σε όλο το ταβάνι, πραγματοποιώντας εξίσου την διάχυση και απορρόφηση του ήχου.

5. $2' \times 2' \times 6''$ ($60 \times 60 \times 15{,}24cm$) Skyline, διαχυτές δύο διαστάσεων τοποθετημένοι δύο στην πόρτα και δύο στον νότιο τοίχο του δωματίου.



Σχήμα 3.8. *Παράδειγμα 3*.

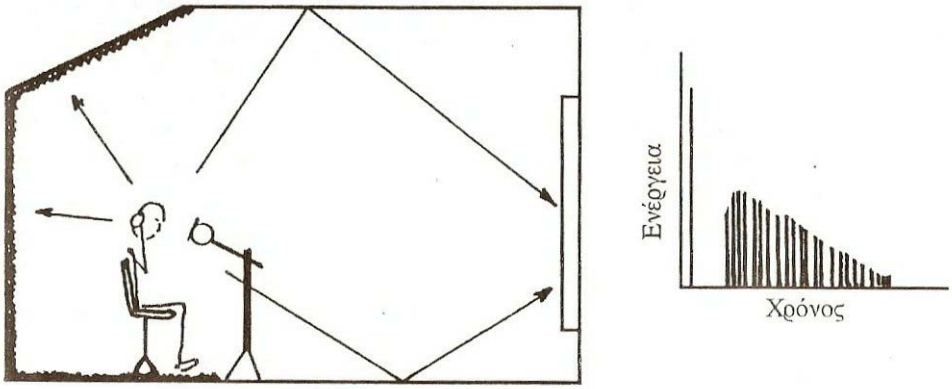
Χρόνος αντήχησης

Ο χρόνος αντήχησης είναι περίπου στα 0,3sec., επαρκής για ένα τόσο μικρό studio, με τον εκφωνητή να έχει την αίσθηση ότι βρίσκεται σε ένα μεγάλο χώρο οπού ο ήχος είναι γεμάτος και καθαρός, αντιλαμβάνοντος την φωνή του με απόλυτη φυσικότητα.

3.4 - Studio με νεκρό άκρο και ενεργό άκρο (LEDE)

Για να αντικαταστήσουμε το "θάλαμο φωνής" χρειάζεται λίγος ακόμη χώρος. Σκοπός είναι να πάρουμε καθαρό άμεσο ήχο, ελεύθερο από πρώτες ανακλάσεις,

ακολουθούμενο από κανονική εξασθένηση του στον χώρο. Μια προσέγγιση είναι αυτή του παρακάτω σχήματος.



Σχήμα 3.9. *Θάλαμος φωνής για ήχο υψηλής ποιότητας. Οι πρώτες ανακλάσεις απαλείφονται από το απορροφητικό πίσω άκρο και ο διαχυτής εξασφαλίζει πυκνή εξασθένηση στον χώρο.*

Το μικρόφωνο τοποθετείται σε σχέση με το απορροφητικό υλικό έτσι ώστε να μη το φτάνουν ανακλάσεις εκτός από εκείνες που διαχέονται από το ενεργό άκρο του δωματίου. Όλοι οι τοίχοι στο ακουστικά νεκρό άκρο πρέπει να είναι απορροφητικοί καθώς και το πάτωμα. Θα υπάρχει ένα μικρό αρχικό χάσμα χρόνου μεταξύ του χρόνου άφιξης του άμεσου ήχου και της άφιξης του πρώτου ήχου με μεγάλη διάχυση από το ενεργό άκρο. Με την διάταξη αυτή λαμβάνουμε μια πολύ καθαρή ηχογράφηση φωνής. Αυτό το είδος επεξεργασίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για σκοπούς μόνωσης, [6].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Ο ΦΩΝΗΤΙΚΟΣ ΘΑΛΑΜΟΣ ΤΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΗΧΟΛΗΨΙΑΣ Ι

4.1 - Βασικό σχήμα και διαστάσεις θαλάμου.

Το σχήμα του φωνητικού θαλάμου θα είναι ορθογώνιο. Βασικό κριτήριο επιλογής του σχήματος είναι η πρώτον η ευκολία ως προς τον υπολογισμό και τη μελέτη της κατανομής των συχνοτήτων των τρόπων ταλάντωσης του θαλάμου (διαδικασία η οποία στην περίπτωση όπου οι τοίχοι του θαλάμου ήταν στρεβλοί θα ήταν δύσκολη διότι έχουμε να κάνουμε με ένα ακανόνιστο ηχητικό πεδίο πίεσης όπου οι τρόποι ταλάντωσης του έχουν όλοι τρισδιάστατο χαρακτήρα) και δεύτερον το ότι το κόστος κατασκευής ενός θαλάμου ορθογώνιου σχήματος είναι μικρότερο.

Λαμβάνοντας υπόψη τις διαστάσεις του εργαστηρίου Ηχοληψίας Ι και της απαιτούμενης ηχομόνωσης και εργονομίας του θαλάμου, προέκυψαν οι διαστάσεις του θαλάμου οι οποίες είναι **1,16m** μήκος, **0,85m** πλάτος, **2,00m** ύψος. Βασικός στόχος ως προς την επιλογή των διαστάσεων του θαλάμου ήταν να μην ακέραια πολλαπλάσια μεταξύ τους.

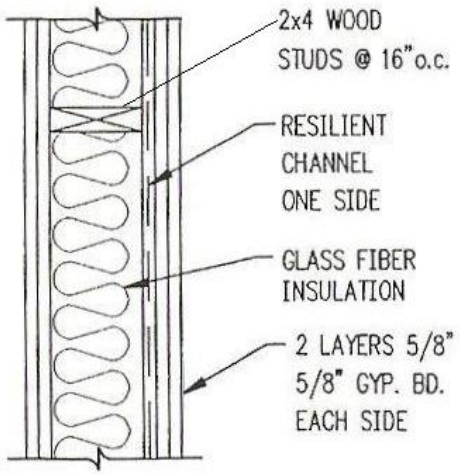
4.2 - Δομικά στοιχεία τοιχωμάτων φωνητικού θαλάμου

Τα ακουστικά χωρίσματα είναι πολύπλοκες κατασκευές, με τους τοίχους να επιδεικνύουν διαφορετικό βαθμό ηχομόνωσης σε διαφορετικά τμήματα του φάσματος. Συνεπώς είναι επιτακτική ανάγκη να γνωρίζουμε ποιες συχνότητες θέλουμε να απομονώσουμε.

Λαμβάνοντας υπόψη το σκοπό λειτουργίας του φωνητικού θαλάμου και παρά τις περιορισμένες δραστηριότητές του, στόχος μας είναι η καμπύλη BNC-20. Με τη στάθμη θορύβου στο studio Ηχοληψίας Ι να μην ξεπερνά τη στάθμη των 70dB, το ποσό της απαιτούμενης απώλειας μετάδοσης για την επίτευξη της επιθυμητής καμπύλης BNC-20 ενδείκνυται στα 50dB.

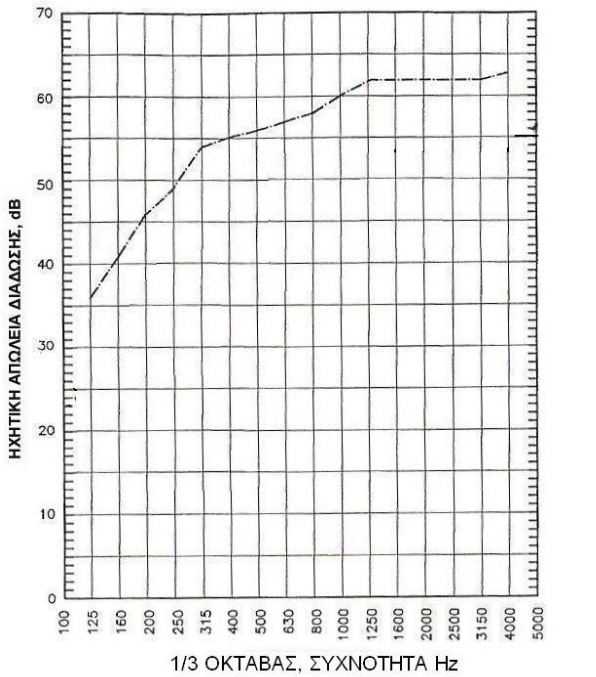
Στο σχήμα 4.1 αναπαριστάται η δομή του επιλεγμένου τοιχώματος για την κατασκευή του φωνητικού θαλάμου, από τους τοίχους μέχρι την οροφή και το πάτωμα.

Αναφορικά ως προς το πάτωμα του φωνητικού θαλάμου, στην επιφάνεια του θα υπάρχει βαρύ χαλί προς αποφυγή αφενός του όποιου θορύβου από βηματισμούς και αφετέρου για λόγους ακουστικής οι οποίοι αναλύονται παρακάτω.



Σχήμα 4.1. *Δομή τοιχωμάτων φωνητικού θαλάμου,* [9].

Τα κριτήρια επιλογής της συγκεκριμένης κατασκευής είναι πρώτον ότι καλύπτει τις ανάγκες της απαιτούμενης ηχητικής απώλειας διάδοσης (STC 58) και δεύτερον το διάγραμμα ηχητικής απώλειας διάδοσής του (Σχήμα 4.2), καθώς απομονώνει μεγάλο εύρος συχνοτήτων της ανθρώπινης φωνής.



ΗΧΗΤΙΚΗ ΑΠΩΛΕΙΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ, dB

100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	STC RATING
--	36	41	46	49	54	55	56	57	58	60	62	62	62	62	62	63	--	58

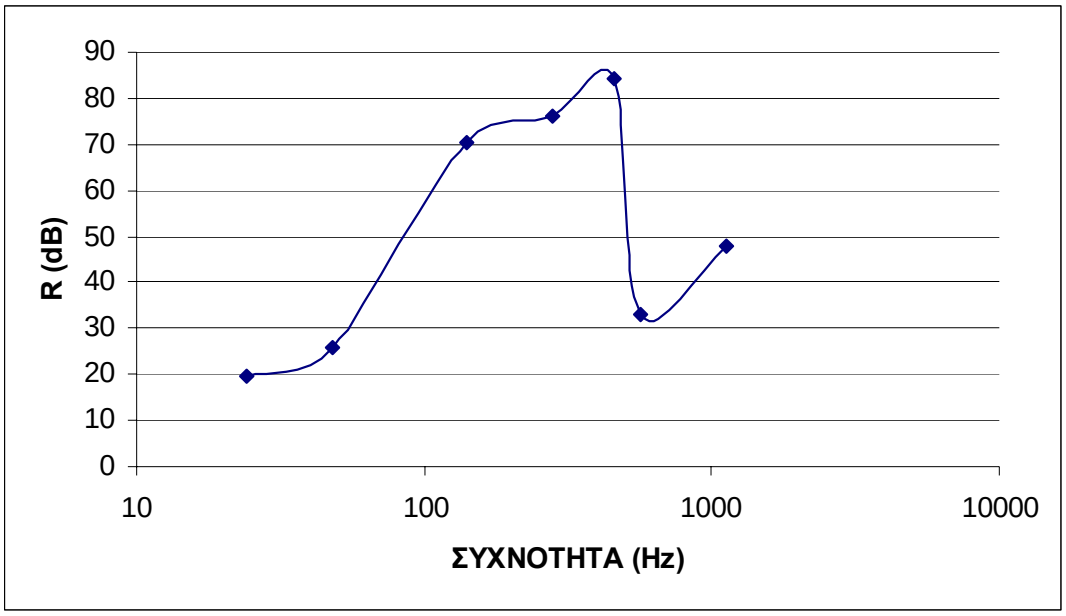
Σχήμα 4.2. *Διάγραμμα ηχητικής απώλειας διάδοσης τοιχώματος,* [9].

4.3 - Παράθυρο

Εύκολα η ύπαρξη ενός παράθυρου μπορεί να έχει αρνητική επίδραση στην όλη απώλεια διάδοσης ενός τοιχώματος ακόμη και αν πρόκειται για την πιο προσεγμένη σχεδιαστικά και κατασκευαστικά εγκατάσταση. Κατά το πόσο το παράθυρο επιδρά στην όλη απώλεια διάδοσης του τοιχώματος εξαρτάται από την πραγματική απώλεια του τοιχώματος, την ηχητική απώλεια διάδοσης του παράθυρου μόνο, τις σχετικές επιφάνειες των δύο και φυσικά η προσοχή η οποία δόθηκε ως προς τη μόνωση του παράθυρου με το τοίχωμα.

Η οπτική επαφή του εκφωνητή, στη συγκεκριμένη περίπτωση, με το εργαστήριο ηχοληψίας είναι απαραίτητη κυρίως αν αναλογιστούμε το μέγεθος του θαλάμου, στην αντίθετη περίπτωση η ατμόσφαιρα σε αυτόν θα ήταν αποπνικτική.

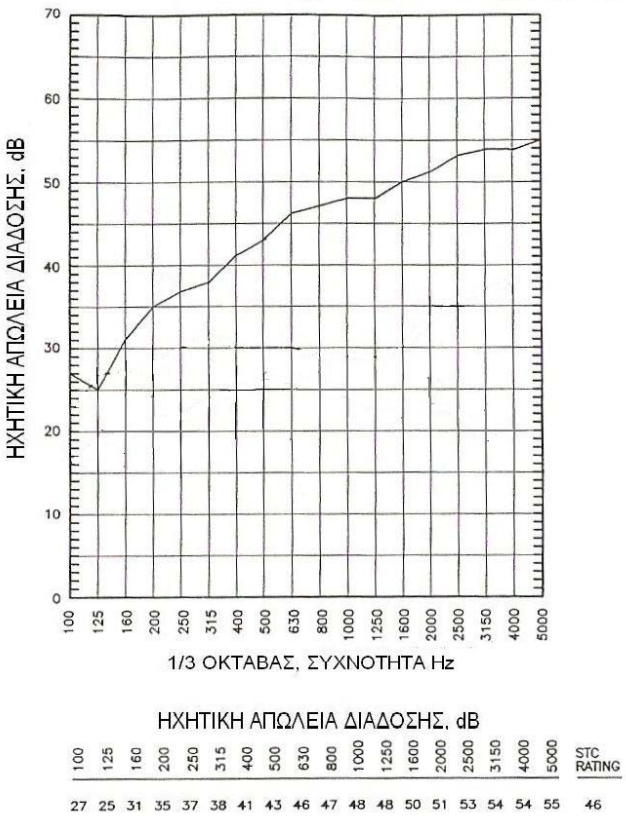
Μελετώντας την επίδραση μονών γυάλινων φύλλων και γυάλινων φύλλων σε απόσταση, επιλέχτηκε για τις ανάγκες του θαλάμου η χρήση δυο γυάλινων φύλλων πάχους 19mm, τα οποία βρίσκονται σε απόσταση 120mm. Βάση της θεωρίας περί διπλών τοιχωμάτων, όπως αυτή αναλύεται στο Κεφάλαιο 2, υπολογίστηκαν οι τιμές της παρακάτω γραμμής ηχομείωσης του παράθυρου. Θα πρέπει να τονίσουμε ότι ο υπολογισμός της γραμμής είναι προσεγγιστικός και είναι δυνατόν στην πράξη να υπάρξουν σημαντικές αποκλίσεις.



Σχήμα 4.3. *Διάγραμμα ηχομείωσης παράθυρου φωνητικού θαλάμου.*

4.4 - Πόρτα

Οι παράγοντες που καθορίζουν την απώλεια διάδοσης μιας πόρτας είναι η μάζα της, η ακαμψία της και το πόσο αεροστεγής είναι. Για τις ανάγκες του θαλάμου επιλέχτηκε η χρήση ξύλινης πόρτας 44mm (34.2 kg/sq m).



Σχήμα 4.4. *Ηχητική απώλεια διάδοσης ξύλινης πόρτας 44mm (34.2 kg/sq m),* [9].

4.5 - Μελέτη συστήματος εξαερισμού

Σε μικρότερα δωμάτια όπως είναι τα δωμάτια ηχογράφησης φωνής, όπου λίγοι άνθρωποι είναι πιθανόν να παίζουν την ίδια στιγμή, ένα απλό σύστημα εξαερισμού είναι το μόνο που απαιτείται μερικές φορές.

Με σκοπό να πάρουμε το καλύτερο από ένα σύστημα εξαερισμού υπάρχουν μερικά σημεία μεγάλης σημασίας τα οποία αξίζει να λάβουμε υπόψη. Ένας από τους μεγαλύτερους κανόνες είναι ποτέ να μην εξάγουμε μόνο αέρα από το δωμάτιο διότι θα βρίσκεται σε μια κατάσταση υποπίεσης, μερικού κενού. Θα πρέπει πάντα ο βαθμός ροής του συστήματος εξαγωγής να μην ξεπερνά αυτό του συστήματος εισαγωγής.

Δια μέσω οποιαδήποτε διαθέσιμης διαδρομής ο αέρας απορροφάται στο δωμάτιο. Ο αέρας αυτός θα είναι βρώμικος επειδή δεν θα μπορεί να φιλτραριστεί. Σκόνη και βρωμιά και γενικά μόλυνση θα εισέλθει στο δωμάτιο μαζί με τον αέρα πιθανόν επηρεάζοντας το λαιμό των τραγουδιστών και αφήνοντας σκόνη παντού. Σε δωμάτια μόνο χαμηλής στάθμης ροής αέρα, όπως είναι τα δωμάτια φωνητικών, ο κανονικός τρόπος εξαερισμού είναι εισάγοντας αέρα από έξω μέσω ενός συστήματος φιλτραρισμού. Αυτό συνήθως συνιστάται είτε από ένα φίλτρο μόνο, είτε από μία σειρά φίλτρων με μεταβλητά στοιχεία τα οποία εύκολα μπορούν να καθαριστούν ή αντικατασταθούν. Ο αέρας στη συνέχεια θα περάσει στη γραμμή του ανεμιστήρα και στη συνέχεια σε ένα σιγαστήρα ή σε μία σειρά από σιγαστήρες πριν μπεί στο δωμάτιο. Με αυτό τον τρόπο κρατείται σε υπερπίεση. Τέτοια συστήματα κρατούν τα δωμάτια καθαρά και εξασφαλίζουν ότι ο αέρας που μπαίνει στα δωμάτια είναι πάντα καθαρός.

Βάση της παραπάνω μελέτης καθώς επίσης και περί συστημάτων εξαερισμού και κλιματισμού (Κεφάλαιο 2), η εφαρμογή ακόμη και ενός απλού συστήματος εξαερισμού στον φωνητικό θάλαμο, πολύ πιθανόν να έχει αρνητικά αποτελέσματα στο όλο σύστημα ηχομόνωσης του θαλάμου. Αν αναλογιστούμε μάλιστα και το γεγονός ότι ο φωνητικός θάλαμος δεν προορίζεται για ηχογράφηση φωνητικών άρα ο εκφωνητής δεν θα βρίσκεται σε αυτόν για μεγάλο χρονικό διάστημα, η εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος καλό θα ήταν να αποφευγθεί.

4.6 - Μελέτη συχνοτήτων τρόπων ταλάντωσης φωνητικού θαλάμου

Οι τρόποι ταλάντωσης του θαλάμου και γενικά κάθε δωματίου είναι δυνατοί όταν τα n_x, n_y, n_z είναι ακέραιοι αριθμοί ή μηδέν καθώς σύμφωνα με τη συνθήκη αυτή δημιουργείται στάσιμο κύμα. Οι συνδυασμοί ακέραιων είναι πολλοί. Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται μερικοί από τους συνδυασμούς αυτών καθώς επίσης και η προκύπτουσα συχνότητα των τρόπων ταλάντωσης για κάθε συνδυασμό, ο υπολογισμός της οποίας πραγματοποιείται με τη χρήση της σχέσης (1.18).

Πίνακας 4.1. Συχνότητες τρόπων ταλάντωσης φωνητικού θαλάμου.

Α/Α	$\mathbf{n_x}$	$\mathbf{n_y}$	$\mathbf{n_z}$	**Αξονικός (Hz)**	**Εφαπτομενικός (Hz)**	**Πλάγιος (Hz)**
1	0	0	1	**86.1**		

2	1	0	0	**148.5**		
3	1	0	1		**171.6**	
4	0	0	2	**172.2**		
5	0	1	0	**202.6**		
6	0	1	1		**220.1**	
7	1	0	2		**227.4**	
8	1	1	0		**251.2**	
9	0	0	3	**258.3**		
10	1	1	1			**265.5**
11	0	1	2		**265.9**	
12	2	0	0	**296.9**		
13	1	0	3		**297.9**	
14	1	1	2			**304.5**
15	2	0	1		**309.2**	
16	0	1	3		**328.3**	
17	2	0	2		**343.2**	
18	0	0	4	**344.4**		
19	2	1	0		**359.5**	
20	1	1	3			**360.3**
21	2	1	1			**369.6**
22	1	0	4		**375.1**	
23	2	0	3		**393.6**	
24	2	1	2			**398.6**
25	0	1	4		**399.6**	
26	0	2	0	**405.2**		
27	0	2	1		**414.3**	
28	0	0	5	**430.5**		
29	1	2	0		**431.5**	
30	1	2	1			**440.1**
31	0	2	2		**440.3**	
32	2	1	3			**442.6**
33	3	0	0	**445.4**		

34	3	0	1		**453.6**	
35	2	0	4		**454.7**	
36	1	0	5		**455.4**	
37	1	2	2			**464.6**
38	0	1	5		**475.8**	
39	3	0	2		**477.5**	
40	0	2	3		**480.5**	
41	3	1	0		**489.3**	
42	3	1	1			**496.8**
43	2	1	4			**497.8**
44	1	1	5			**498.4**
45	2	2	0		**502.3**	
46	1	2	3			**503.0**
47	2	2	1			**509.7**
48	3	0	3		**514.9**	
49	0	0	6	**516.6**		
50	3	1	2			**518.7**
51	2	0	5		**523.0**	
52	2	2	2			**531.0**
53	0	2	4		**531.8**	
54	1	0	6		**537.5**	
55	1	2	4			**552.1**
56	3	1	3			**553.3**
57	0	1	6		**554.9**	
58	2	1	5			**560.9**
59	3	0	4		**563.0**	
60	2	2	3			**564.9**
61	1	1	6			**574.5**
62	0	2	5		**591.2**	
63	4	0	0	**593.8**		
64	2	0	6		**595.9**	
65	3	1	4			**598.4**

66	4	0	1			**600.0**

Η μικρότερη φυσική συχνότητα του θαλάμου είναι 86.1 Hz, πρόκειται για αξονικό τρόπο ταλάντωσης και αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη διάσταση του θαλάμου και συγκεκριμένα στο ύψος του, L_z.

Με τους περισσότερους χρωματισμούς του ήχου να ανιχνεύονται σε αξονικούς τρόπους ταλάντωσης εξετάζουμε με λεπτομέρεια τις συχνοτικές αποστάσεις αυτών όπως παρουσιάζονται με απλή μορφή στον παρακάτω πίνακα, βάση των αποτελεσμάτων του Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.2. Φόρμα ανάλυσης αξονικών τρόπων ταλάντωσης.

Συντονισμοί αξονικών τρόπων ταλάντωσης (Hz)				**Σε αύξουσα σειρά (Hz)**	**Αποστάσεις αξονικών τρόπων ταλάντωσης (Hz)**
	Μήκος L = 1,16m	**Πλάτος W = 0,85m**	**Ύψος H = 2,00m**		
f_1	148.5	202.6	86.1	86.1	62.4
f_2	296.9	405.2	172.2	148.5	23.7
f_3	445.4		258.3	172.2	30.4
f_4	593.8		344.4	202.6	55.7
f_5			430.5	258.3	38.6
f_6			516.6	296.9	47.5
				344.4	60.8
				405.2	25.3
				430.5	14.9
				445.4	71.2
				516.6	77.2
				593.8	

Μελετώντας τα αποτελέσματα των παραπάνω πινάκων παρατηρούμε τα εξής:

1. Μεγάλη συχνοτική απόσταση μεταξύ των αξονικών τρόπων ταλάντωσης, μεγαλύτερη από την επιθυμητή, ακανόνιστης αναλογίας, με αποτέλεσμα κάθε

αξονικός τρόπος ταλάντωσης να ενεργεί ανεξάρτητα, δημιουργώντας ένα ακανόνιστο ηχητικό πεδίο.

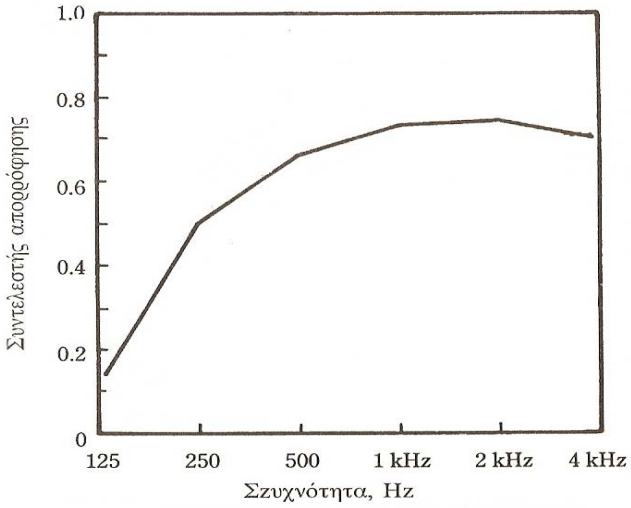
2. Έντονο το φαινόμενο του εκφυλισμού μεταξύ των περισσοτέρων συχνοτήτων των τρόπων ταλάντωσης.

Τα παραπάνω αποτελέσματα είναι αναμενόμενα βάση του όγκου του φωνητικού θαλάμου. Με γνώμονα το σκοπό λειτουργίας του, περιγράφεται παρακάτω ο τρόπος ακουστικής επένδυσης κάθε τοιχώματος του εσωτερικού του θαλάμου με στόχο την ομαλοποίηση των παραπάνω φαινομένων και την "καθαρή" λήψη της φωνής του εκφωνητή.

4.7 - Τρόπος βελτίωσης της ακουστικής του θαλάμου

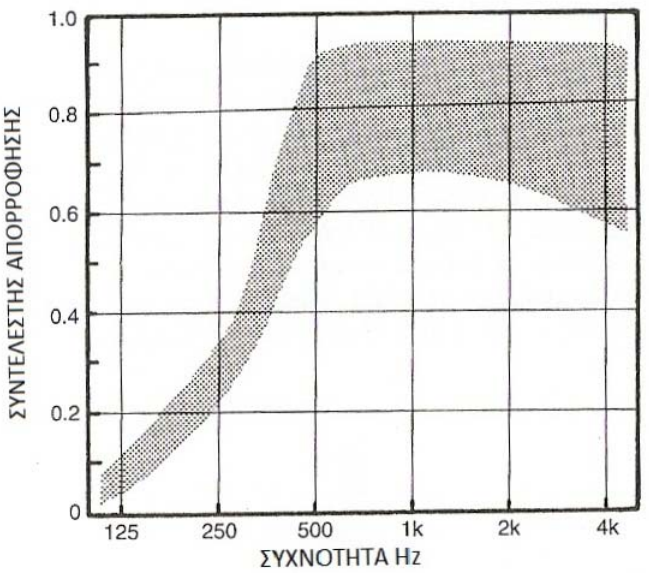
Με την ενέργεια των τρόπων ταλάντωσης να τερματίζει στα τοιχώματα του φωνητικού θαλάμου (μεγάλο μέρος στο πάτωμα και την οροφή), η όλη μελέτη επικεντρώνεται στην απορρόφηση κυρίως των μεσαίων και υψηλών συχνοτήτων, δίνοντας μικρή προσοχή στην απορρόφηση των χαμηλών συχνοτήτων. Προτείνονται λοιπόν τα εξής:

- Η τοποθέτηση στο **πάτωμα** πορώδους ηχοαπορροφητικού υλικού και συγκεκριμένα βαρύ χαλί με υπόβαθρο τσόχας από τρίχες με σκοπό την απορρόφηση των υψηλών συχνοτήτων. Στον παρακάτω πίνακα δίνεται ο συντελεστής απορρόφησης του χαλιού, [6].



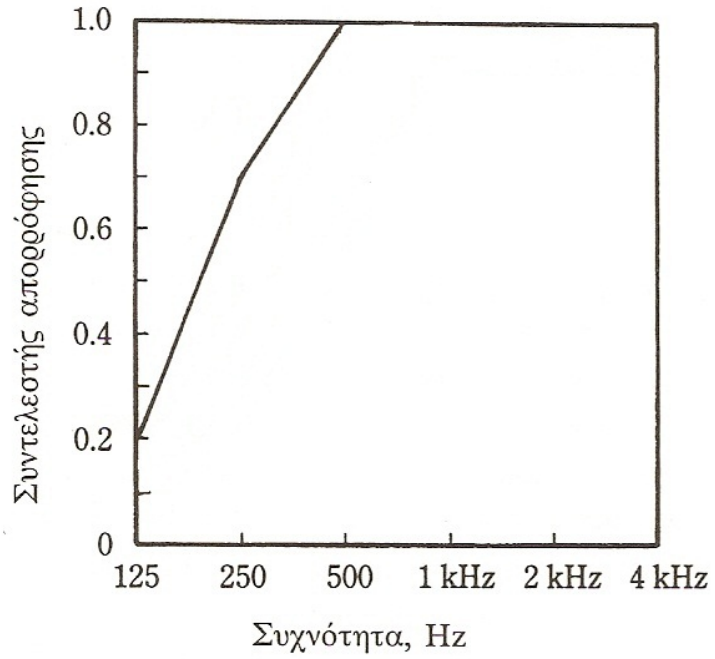
Σχήμα 4.5. *Συντελεστής απορρόφησης βαρύ χαλιού με υπόβαθρο τσόχας.*

- Η τοποθέτηση στην **οροφή** ακουστικών πλακιδίων. Τα ακουστικά πλακίδια χρησιμοποιούνται ακόμη και σήμερα, όχι βέβαια σε μεγάλο βαθμό, απορροφώντας κατά γενικό κανόνα συχνότητες άνω των 500Hz, παρ'όλα αυτά συχνά δεν είναι διαθέσιμες οι πληροφορίες περί των χαρακτηριστικών απορρόφησής τους. Στο παρακάτω σχήμα παριστάνεται το εύρος τιμών ακουστικού πλακιδίου πάχους 2cm μεταξύ οκτώ διαφορετικών εταιρειών.



Σχήμα 4.6. *Συντελεστής απορρόφησης ακουστικών πλακιδίων*.

- Οι υπόλοιπες επιφάνειες του φωνητικού θαλάμου καλύπτονται η κάθε μια εν μέρει από δύο διαφορετικά ηχοαπορροφητικά υλικά. Ένα μέρος κάθε επιφάνειας καλύπτεται με ακουστικό πλακάκι από την οροφή μέχρι και λίγο πιο κάτω από το ύψος του μικροφώνου, και το υπόλοιπο μέρος με σχηματοποιημένο αφρό Sonex πάχους 10cm. Πρόκειται για ένα είδος ολοκληρωμένου ηχοαπορροφητικού υλικού το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί απευθείας στον τοίχο.



Σχήμα 4.7. *Συντελεστής απορρόφησης σχηματοποιημένου αφρού Sonex.*

Σχήμα 4.8. *Sonex.*

- Η χρήση κατευθυντικών μικροφώνων είναι ένας περαιτέρω τρόπος ελέγχου της ακουστικής καθώς δεν θα ανταποκρίνεται στις ανακλάσεις της φωνής, οι οποίες θα απορροφούνται από το ηχοαπορροφητικό υλικό στο μέρος της οποίας δείχνει το μικρόφωνο. Στη πραγματικότητα όμως τα πράγματα είναι κάπως διαφορετικά, διότι με σκοπό να παρέχουμε υψηλού ελέγχου ακουστική με ένα κατευθυντικό μικρόφωνο επαρκώς μακριά από το στόμα του ηθοποιού ώστε να αποφύγουμε προβλήματα με φαινόμενα εγγύτητας, το μέγεθος του

φωνητικού θαλάμου δεν επαρκεί. Ένας λόγος παραπάνω για την απορρόφηση των χαμηλών συχνοτήτων.

4.8 - Συμπεράσματα

Πρώτο συμπέρασμα είναι ότι η εφαρμογή του φωνητικού θαλάμου στο εργαστήριο Ηχοληψίας Ι είναι εφικτή πληρώντας τις προϋποθέσεις του σκοπού του. Δεύτερο συμπέρασμα της όλης ακουστικής μελέτης είναι ότι λόγο υψηλού κόστους κατασκευής δεν είναι εφικτή η τοποθέτηση του. Συνεπώς δεν μπορεί να υπάρξει περεταίρω μελέτη επί του πρακτέου.

Παρά το γεγονός ότι ο φωνητικός θάλαμος δεν προορίζεται για την ηχογράφηση φωνής θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν σε αυτόν υποτυπώδεις ηχογραφήσεις (φωνής ή ακόμα και μικρού ενισχυτή κιθάρας) με τη χρήση ακουστικών, για καθαρά πρακτικούς λόγους εκμάθησης όχι μόνο ως προς την δρομολόγηση ενός σήματος στην κονσόλα, αλλά την εγγραφή του και περαιτέρω επεξεργασία του.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΒΙΒΛΙΑ

[1] Σκαρλάτος, Σ. 2003, *Εφαρμοσμένη Ακουστική*, 2η έκδοση, Φιλομάθεια, Πάτρα.

[2] Ballou, G.M. 2002, *Handbook For Sound Engineers*, 3η έκδοση, Elsevier.

[3] Bies, D.A. and Hansen, C.H. 2003, *Engineering Noise Control Theory And Practice*, 3η έκδοση, Spon Press.

[4] Davis, G. and Jones, R. 1990, *Sound System Engineering*, 2η έκδοση, Hal Leonard Corporation, Η.Π.Α.

[5] David, M.H. and Robert E.R 2005, *Modern Recording Techniques*, 6η έκδοση, Focal Press.

[6] Everest, F.A. 2003, *Εγχειρίδιο Ακουστικής*, 3η έκδοση, Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.

[7] Everest, F.A. 1997, *Sound Studio Construction On A Budget*, 1η έκδοση, McGraw-Hill.

[8] Gervais, R. 2006, *Home Recording Studio: Build It Like Pros*, Artist Pro Publishing.

[9] Leland, K. and Roy, L. 1998, Acoustics *And Noise Control Handbook For Architects And Builders*, Krieger Publishing Company, Florida.

[10] Long, M. 2006, *Architectural Acoustics*, Elsevier.

[11] Newell, P. 2008, *Recording Studio Design* , 2η έκδοση, Focal Press.

[12] Owsinski, B. 2009, *The Recording Engineer's Handbook*, 2η έκδοση, Course Technology Cengage Learning.

[13] Talbot-Smith, M. 1999, *Audio Engineer's Reference Book*, 2η, Focal Press.

ΠΤΥΧΙΑΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

[14] Θεοδώρου, Ε. (2005). «Μελέτη ακουστικής βελτίωσης studio ηχογραφήσεων». Πτυχιακή εργασία, Α.Τ.Ε.Ι. Κρήτης – Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής.

[15] Μήλλιου, Κ. and Μήτσου Α. (2006) «Το νέο studio ηχογραφήσεων του Α.Τ.Ε.Ι. Ρεθύμνου: μετατροπή, καταγραφή και χαρτογράφηση συσκευών και σημάτων. Μετρήσεις και τελικές ρυθμίσεις». Πτυχιακή εργασία, Α.Τ.Ε.Ι. Κρήτης – Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής.

ΑΡΘΡΑ

[16] Noxon, A., 1987, Controlled reflection isolation booth.
Διαθέσιμο: www.tubetrap.com/articles/controlled-reflection-isolation.pdf[08.07.2008]

[17] Noxon, A., 1990, Sound fusion and the acoustic presence effect.
Διαθέσιμο: www.tubetrap.com/articles/aessf-1.htm[13.02.2008]

[18] Hubach, F.J., Edwards B. 1992. Empirical determination of sound isolation requirements for recording studio isolation booths. AES E-Library, 3409