



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

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟ ΝΕΟ STUDIO ΗΧΟΓΡΑΦΗΣΕΩΝ ΤΟΥ Α.Τ.Ε.Ι. ΡΕΘΥΜΝΟΥ:
ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ, ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ
ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΣΗΜΑΤΩΝ,
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΤΕΛΙΚΕΣ ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ.

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΑ ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΩΝ:

ΜΗΛΛΙΟΥ ΚΥΡΙΑΚΗ Α.Μ. : 336
ΜΗΤΣΟΥ ΑΘΗΝΑ Α.Μ. : 78

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ. ΚΟΥΖΟΥΠΗΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ

ΡΕΘΥΜΝΟ 2006

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση αυτής της πτυχιακής εργασίας θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Κουζούπη Σπύρο, καθώς και τους καθηγητές κ. Ξενικάκη Δημήτρη, κ. Κεφαλογιάννη Νίκο και κ. Βενιέρη Μανώλη για την πολύτιμη βοήθεια και συμπαράστασή τους. Τέλος, ευχαριστούμε ιδιαίτερα το συμφοιτητή και φίλο μας Μπρέζα Σπύρο για τη βοήθειά του.

<u>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</u>	9
------------------------------	---

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΥ ΜΕΡΟΥΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

<u>1.1 ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΜΙΚΡΩΝ ΧΩΡΩΝ</u>	11
<u>1.1.1 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΜΙΚΡΩΝ ΔΩΜΑΤΙΩΝ</u>	13
<u>1.2 ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΩΝ ΗΧΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ</u>	14
<u>1.2.1 ΣΤΑΣΙΜΑ ΚΥΜΑΤΑ (ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗ ΜΟΡΦΗ)</u>	14
<u>1.2.2 ΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΕΝΟΣ STUDIO ΗΧΟΓΡΑΦΗΣΕΩΝ</u>	16
<u>1.2.3 ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΣ ΣΤΟ ΧΩΡΟ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ</u>	17
<u>1.2.4 ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ (MODAL DENSITY)</u>	19
<u>1.2.5 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΤΡΟΠΩΝ ΔΟΝΗΣΗΣ</u>	21
<u>1.2.6 ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΔΩΜΑΤΙΟΥ</u>	22
<u>1.2.7 ΠΕΡΙΛΗΠΤΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΙΣ ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΤΩΝ ΤΡΟΠΩΝ ΔΟΝΗΣΗΣ</u>	23
<u>1.2.8 ΠΟΛΩΣΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ ΤΟΥ ΗΧΟΥ</u>	24
<u>1.2.9 ΔΙΑΘΛΑΣΗ ΤΟΥ ΗΧΟΥ</u>	25
<u>1.3 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΗΧΟΥ ΣΕ ΜΙΚΡΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ</u>	25
<u>1.3.1 ΧΡΟΝΟΣ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ</u>	27
<u>1.3.2 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ ΚΑΤΑ SABINE</u>	28
<u>1.3.3 ΧΡΟΝΟΣ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ ΓΙΑ ΜΕΓΑΛΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ ΚΑΤΑ NORRIS EYRING</u>	28
<u>1.3.4 ΣΧΕΣΗ ΤΟΥ FITZROY</u>	29
<u>1.3.5 ΣΧΕΣΗ ΤΩΝ SETTE – MILLINGTON</u>	30
<u>1.3.6 EDT (EARLY DECAY TIME)</u>	30
<u>1.3.7 T_{10}, T_{20}, T_{30}</u>	31

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

<u>2.1 ΑΝΑΚΛΑΣΗ, ΔΙΑΔΟΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΤΟΥ ΗΧΟΥ</u>	33
<u>2.1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ</u>	33
<u>2.1.2 ΜΕΣΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ</u>	34
<u>2.1.3 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΥΛΙΚΩΝ</u>	34
<u>2.2 ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΕΣ</u>	35
<u>2.2.1 ΠΟΡΩΔΗ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ</u>	35
<u>2.2.2 ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΤΥΠΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ</u>	38
<u>2.2.3 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ</u>	39
<u>2.3 ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΕΣ</u>	40
<u>2.3.1 ΔΙΑΤΡΗΤΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΣ</u>	41
<u>2.4 ΔΙΑΧΥΤΕΣ</u>	42
<u>2.4.1 ΔΙΑΧΥΤΕΣ ΤΥΠΟΥ SCHRÖEDER</u>	43
<u>2.4.2 ΔΙΑΧΥΤΕΣ ΠΡΩΤΕΥΟΥΣΑΣ ΡΙΖΑΣ</u>	45

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

<u>3.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΝΟΣ STUDIO ΗΧΟΓΡΑΦΗΣΕΩΝ</u>	48
<u>3.2 ΣΤΑΘΜΗ ΘΟΡΥΒΟΥ ΒΑΘΟΥΣ ΣΕ ΕΝΑ STUDIO ΗΧΟΓΡΑΦΗΣΕΩΝ</u>	49
<u>3.3 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΟΥΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΕΝΟΣ ΜΙΚΡΟΥ ΧΩΡΟΥ ΓΙΑ ΔΩΜΑΤΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ (CONTROL ROOM)</u>	51
<u>3.4 Ο ΧΩΡΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ (CONTROL ROOM) ΕΝΟΣ STUDIO ΗΧΟΓΡΑΦΗΣΕΩΝ</u>	52
<u>3.5 Η ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΤΟΥ ΔΩΜΑΤΙΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ (CONTROL ROOM)</u>	53
<u>3.5.1 ΤΟ ΑΡΧΙΚΟ ΧΑΣΜΑ ΧΡΟΝΟΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ (INITIAL TIME DELAY GAP)</u>	53

3.5.2 Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΔΩΜΑΤΙΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	55
3.5.3 ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΚΑΙ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΛΗΜΑ ΤΟΥ ΔΩΜΑΤΙΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	56
3.6 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΝΑΛΟΓΙΩΝ ΟΡΘΟΓΩΝΙΩΝ ΔΩΜΑΤΙΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	56
3.6.1 ΑΝΑΛΟΓΙΕΣ ΔΩΜΑΤΙΟΥ ΟΡΘΟΓΩΝΙΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ.....	56
3.6.2 ΤΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ BONELLO.....	58
3.7 ΕΙΔΗ ΔΩΜΑΤΙΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ (CONTROL ROOM)	59
3.7.1 ΔΩΜΑΤΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΒΑΣΙΣΜΕΝΑ ΣΤΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ.....	59
3.7.2 ΔΩΜΑΤΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΥΠΟΥ JENCEN.....	60
3.7.3 ΤΟ NON-ENVIRONMENT ΔΩΜΑΤΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	60
3.7.4 ΔΩΜΑΤΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΥΠΟΥ LIVE-END, DEAD-END (LEDE)	62
3.7.5 ΔΩΜΑΤΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΥΠΟΥ RFZ (REFLECTION FREE ZONE)	64
3.7.6 EARLY SOUND SCATTERING ΔΩΜΑΤΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	67
3.8 ΣΥΣΤΗΜΑ MONITORING ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ (CLOSE FIELD MONITORING)	68
3.9 ΔΩΜΑΤΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΜΙΞΗΣ ΔΥΟ ΚΑΝΑΛΙΩΝ (STEREO).....	70

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

4.1 ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΥ.....	74
4.1.1. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ, ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ ΓΙΑ ΧΑΜΗΛΟ ΘΟΡΥΒΟ.....	74
4.1.2 ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΩΝ ΘΟΡΥΒΟΥ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ, ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ.....	75
4.1.3 ΠΗΓΕΣ ΘΟΡΥΒΟΥ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ.....	77
4.1.4 ΘΟΡΥΒΟΣ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΩΝ.....	78
4.1.5 ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗ ΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ ΣΤΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ.....	81
4.1.6 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ ΤΩΝ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΩΝ.....	83
4.1.7 ΜΟΝΩΣΗ ΔΟΝΗΣΕΩΝ.....	84

<u>4.1.8 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ, ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ.....</u>	85
<u>4.1.9 ΟΙ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ (ΗΝΑC) ΣΕ STUDIO ΗΧΟΓΡΑΦΗΣΗ.....</u>	85
<u>4.1.10 ΤΟ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΥ.....</u>	89
<u>4.1.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ, ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ.....</u>	92

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

<u>5.1 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ.....</u>	96
<u>5.2 ΔΕΙΚΤΗΣ ΗΧΟΜΕΙΩΣΗΣ.....</u>	97
<u>5.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΗΧΟΜΕΙΩΣΗΣ ΑΕΡΟΦΕΡΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ.....</u>	98
<u>5.3.1 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟ ΧΩΡΟ.....</u>	98
<u>5.4 ΝΟΜΟΣ ΤΗΣ ΜΑΖΑΣ.....</u>	98
<u>5.4.1 ΚΑΘΕΤΗ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗ.....</u>	99
<u>5.4.2 ΤΥΧΑΙΑ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗ.....</u>	99
<u>5.5 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΣΥΜΠΤΩΣΗΣ.....</u>	101
<u>5.6 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ.....</u>	103
<u>5.7 ΗΧΟΜΟΝΩΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΑΠΛΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ.....</u>	104
<u>5.7.1 ΠΕΡΙΟΧΗ I (ΠΕΡΙΟΧΗ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ)</u>	106
<u>5.7.2 ΠΕΡΙΟΧΗ II (ΠΕΡΙΟΧΗ ΝΟΜΟΥ ΜΑΖΑΣ)</u>	107
<u>5.7.3 ΠΕΡΙΟΧΗ III (ΠΕΡΙΟΧΗ ΣΥΜΠΤΩΣΗΣ)</u>	107
<u>5.8 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΗ ΗΧΟΜΕΙΩΣΗΣ ΑΠΛΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ.....</u>	108
<u>5.9 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΗ ΗΧΟΜΕΙΩΣΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ.....</u>	109
<u>5.10 ΗΧΟΜΟΝΩΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΔΙΠΛΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ.....</u>	109
<u>5.10.1 ΘΕΩΡΙΑ ΔΙΠΛΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ.....</u>	111

5.10.2 ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΔΙΑΚΕΝΟΥ.....	112
5.10.3 Η ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ f_1	113
5.10.4 ΠΡΑΚΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΗΧΟΜΕΙΩΣΗΣ ΔΙΠΛΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ.....	114
<u>5.11 ΗΧΟΜΕΙΩΣΗ ΤΡΙΠΛΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ.....</u>	116
<u>5.12 ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΗΧΟΜΕΙΩΣΗ.....</u>	117
5.12.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ.....	117
5.12.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ.....	118
5.12.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΑΝΟΙΓΜΑΤΩΝ.....	119
5.12.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ.....	120
<u>5.13 ΣΤΑΘΜΙΣΜΕΝΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΗΧΟΜΕΙΩΣΗΣ.....</u>	120

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΡΑΚΤΙΚΟΥ ΜΕΡΟΥΣ

<u>1. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΥ.....</u>	122
1.1 <u>ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ – ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΥ (HVAC) ΠΡΙΝ ΤΙΣ ΔΟΜΙΚΕΣ ΑΛΛΑΓΕΣ ΣΤΟ ΧΩΡΟ ΤΟΥ STUDIO ΗΧΟΓΡΑΦΗΣΕΩΝ.....</u>	122
1.2 <u>ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ – ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΥ (HVAC) ΤΟΥ ΝΕΟΥ STUDIO ΗΧΟΓΡΑΦΗΣΕΩΝ.....</u>	123
<u>2. ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΣΗΜΑΤΩΝ.....</u>	127
<u>3. ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΩΝ ΣΤΟΝ ΧΩΡΟ ΤΟΥ STUDIO ΗΧΟΓΡΑΦΗΣΕΩΝ.....</u>	132
<u>4. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....</u>	134
<u>4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</u>	134
<u>4.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....</u>	135
4.2.1. <u>ΔΩΜΑΤΙΟ 1^ο (ΠΑΛΙΟ ΔΩΜΑΤΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ)</u>	135
4.2.1.1 <u>ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ MLSSA.....</u>	135
4.2.1.2 <u>ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ 01 dB SYMPHONY.....</u>	138

<u>4.2.2 ΔΩΜΑΤΙΟ 2^ο (ΧΩΡΟΣ ΗΧΟΓΡΑΦΗΣΕΩΝ)</u>	140
<u>4.2.2.1 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ MLSSA</u>	140
<u>4.2.2.2 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ 01 dB SYMPHONY</u>	141
<u>4.2.3 ΔΩΜΑΤΙΟ 3^ο (ΝΕΟ ΔΩΜΑΤΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ)</u>	143
<u>4.2.3.1 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ MLSSA</u>	143
<u>4.2.3.2 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ SPECTRALAB</u>	145
<u>4.2.3.3 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ 01 dB SYMPHONY</u>	152
<u>4.2.3.4 ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΝΕΟΥ ΔΩΜΑΤΙΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ</u>	153
<u>4.2.3.5 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΝΑΚΛΑΣΕΩΝ ΤΟΥ ΝΕΟΥ ΔΩΜΑΤΙΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ</u>	155
<u>4.2.3.6 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΗΧΟΠΑΓΙΔΩΝ ΓΙΑ ΧΑΜΗΛΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ</u>	160
<u>4.2.3.7 ΔΙΑΤΡΗΤΗ ΓΥΨΟΣΑΝΙΔΑ 15/30R ΜΕ ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ</u>	162
<u>4.2.4 ΔΩΜΑΤΙΟ 4^ο (ΚΕΝΟ ΔΩΜΑΤΙΟ)</u>	166
<u>4.2.4.1 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΦΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ MLSSA</u>	166
<u>5. ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</u>	168
<u>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α</u>	171

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για την ορθότερη και αποδοτικότερη εκμετάλλευση του υπάρχοντος εξοπλισμού του Τμήματος Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, για εκπαιδευτικούς και επαγγελματικούς σκοπούς, κρίθηκε απαραίτητο να γίνει μετατροπή του studio ηχογραφήσεων. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η καταγραφή των προβλημάτων, κάτω από τους περιορισμούς που τίθονταν, η καταγραφή των προτεινόμενων λύσεων, των ακουστικών μετρήσεων στους χώρους, πριν και μετά τις αλλαγές και των τελικών ρυθμίσεων.

Η πτυχιακή εργασία περιλαμβάνει: 1) Μία θεωρητική ανάπτυξη για την ακουστική μικρών χώρων 2) Μετρήσεις στους χώρους πριν γίνουν οι μετατροπές (ώστε να εξετάσουμε τα χαρακτηριστικά των χώρων όταν ήταν άδειοι) 3) Καταγραφή των δομικών αλλαγών στους χώρους 4) Χαρτογράφηση όλων των καλωδιώσεων και των σημάτων μεταξύ των συσκευών και μεταξύ των χώρων που εμπλέκονται. 5) Περιγραφή και καταγραφή των αλλαγών στο σύστημα εξαερισμού (χαρτογράφηση του δικτύου των καναλιών και συνοπτική περιγραφή της μελέτης εξαερισμού) 6) Ακουστικές μετρήσεις στους τελικά διαμορφωμένους χώρους με έμφαση στη θέση του ηχολήπτη.

Η κατασκευή ενός χώρου που καλείται να στεγάσει ένα studio ηχογραφήσεων διέπεται από κάποιους περιορισμούς. Συνήθως κρίνεται αναγκαία η επίλυση θεμάτων όπως η ηχομόνωση του χώρου, το κόστος των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν, όπως και το κόστος του εξοπλισμού. Ένας άλλος παράγοντας που θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη είναι το μέγεθος των δωματίων ελέγχου και το μέγεθος του χώρου ηχογραφήσεων. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να γνωρίζουμε τις ανάγκες των μουσικών και των τεχνικών που θα εργάζονται στο χώρο αυτό.

Από τη στιγμή που κάποιος αναλαμβάνει να κατασκευάσει ένα studio ηχογραφήσεων ως την ολοκλήρωση της εργασίας και την

παράδοση του χώρου απαιτείται κοπιαστική δουλειά και προσεκτική μελέτη. Στην περίπτωση που κρίνεται αναγκαία η ανακατασκευή ενός ήδη υπάρχοντος studio ηχογραφήσεων η όλη διαδικασία γίνεται, σε ορισμένες περιπτώσεις, δυσκολότερη μιας και τα μειονεκτήματα του δωματίου ελέγχου ή του χώρου ηχογραφήσεων είναι πολλές φορές ήδη υπαρκτά και πρέπει να επιλυθούν.

Στο πλαίσιο αυτό εξελίχθηκε και η εργασία μας, μιας και έπρεπε να φτιαχτεί ένα νέο δωμάτιο ελέγχου και να γίνουν βελτιώσεις στους υπόλοιπους χώρους. Μέσα από τον περιορισμένο προϋπολογισμό, που είχαμε, μας δόθηκε η δυνατότητα της μελέτης της ακουστικής συμπεριφοράς των δωματίων, μέσω των μετρήσεων, καθώς και η δυνατότητα να βελτιώσουμε την ακουστική. Με τη βοήθεια των καθηγητών καταφέραμε να κατανοήσουμε καλύτερα τα όσα ήδη γνωρίζαμε αλλά και να μάθουμε καινούργια πράγματα. Το αποτέλεσμα της συνεργασίας αυτής παρουσιάζεται παρακάτω.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

1.1 ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΜΙΚΡΩΝ ΧΩΡΩΝ

Τα ηχητικά συστήματα εγκαθίστανται συχνότερα σε χώρους όπου οι στατιστικές εξισώσεις δεν βρίσκουν εφαρμογή απ' ότι σε χώρους όπου ισχύουν. Συνεπώς, η σημαντική χρήση της ακουστικής απορρόφησης δεν περιορίζεται στη στατιστική της χρήση. Χρησιμοποιούμε την απορρόφηση για να ελέγξουμε την ιδιαίτερη κατοπτρική ανάκλαση σε ημιαντηχητικούς και πολύ νεκρούς χώρους παρά το γεγονός ότι το υλικό δεν έχει καμία πραγματική στατιστική σημασία. Ακόμη και σε χώρους όπου οι στατιστικές εξισώσεις ισχύουν, η καταληπτότητα μπορεί να αλλοιωθεί από μια κατοπτρική ανάκλαση που πρέπει να απομονωθεί και να διορθωθεί άμεσα, όχι στατιστικά. Επομένως, καθώς εξετάζουμε τις ιδιότητες της ακουστικής μικρών δωματίων, λαμβάνουμε υπ' όψιν ότι πολλά μεγάλα δωμάτια έχουν τις ιδιότητες μικρών δωματίων σε ορισμένες συχνότητες (ειδικά αν αναφερόμαστε σε κατοπτρικές ανακλάσεις).

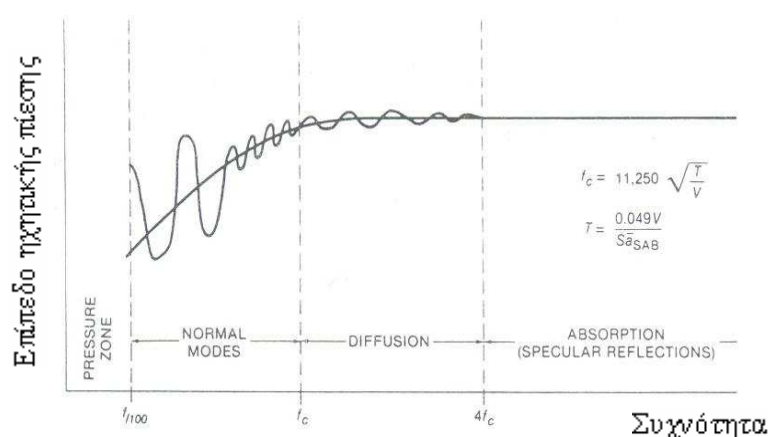
Το ακουστικό μέγεθος ενός δωματίου είναι ένα συχνοτικά εξαρτώμενο φαινόμενο:

$$F_L = K \sqrt{\frac{T_{60}}{V}} \quad (1)$$

Αυτή η εξίσωση περιγράφει τη συχνότητα μεγάλου δωματίου (F_L). Κάτωθεν της F_L έχουμε τα μικρά δωμάτια υπό την ακουστική έννοια ότι εξετάζουμε τους τρόπους δόνησής τους παρά ένα στατιστικά αντηχητικό ηχητικό πεδίο.

Προφανώς αυτό δεν περιλαμβάνει ένα μεικτό, ομοιογενή, στατιστικά αντηχητικό πεδίο. Πράγματι, οι απεικονίσεις το καταδεικνύουν αυτό αρκετά αποτελεσματικά.

Ο Bolt, ο Beranek και ο Newman έχουν αναπτύξει ένα σημαντικό διάγραμμα, το οποίο προβλέπει τους ελεγκτές σταθερής κατάστασης της ακουστικής απόκρισης ενός δωματίου (σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1: Ελεγκτές ακουστικής απόκρισης σταθερής κατάστασης δωματίου. (Courtesy Bolt, Beranek and Newman)

Η συχνότητα f_c είναι η ακουστική συμβολή μεταξύ των μεγάλων και μικρών δωματίων. Στα φυσικά μικρά δωμάτια, η συχνότητα f_c μπορεί να πέσει αρκετά έως και στα 500 Hz, ενώ πέφτει κάτω από τα 30 Hz στα φυσικά μεγάλα δωμάτια.

Η εξάρτηση της συχνότητας της ζώνης πίεσης, η ρυθμική ζώνη, η ζώνη διάχυσης, και η κατοπτρική ζώνη ανάκλασης καθορίζουν πώς χρησιμοποιείται η μεταχείριση των δωματίων. Σε δωμάτια που είναι και φυσικά και ακουστικά μικρά, η ζώνη πίεσης μπορεί να είναι χρήσιμη κοντά στα 100 Hz.

Η συχνότητα f_c συμπίπτει με τη διάσταση του δωματίου που είναι ίση με το χαμηλότερο μήκος κύματος που μπορεί πλήρως να αναπτυχθεί σε εκείνη την διάσταση. Η εφαρμογή μιας καλής τεχνικής σε μια ανακριβή συχνότητα είναι τόσο καταστρεπτική όσο και η επιλογή της λανθασμένης τεχνικής.

1.1.1 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΜΙΚΡΩΝ ΔΩΜΑΤΙΩΝ

Κατ' αρχάς, η χρήση του T_{60} , μέσω ελεύθερης διαδρομής, καθώς και άλλων στατιστικών εξισώσεων του Sabine δεν βρίσκει εφαρμογή σε

αυτούς τους μικρούς χώρους. Είναι βασικά λάθος να εφαρμοστούν οι εξισώσεις του Sabine σε ένα μικρό δωμάτιο. Οποιαδήποτε στοιχεία μπορούμε να τα μεταχειριστούμε με αυτές τις τεχνικές, εάν υποψιαζόμαστε ότι θα χρησιμοποιηθούν για μικρούς νεκρούς ακουστικά χώρους. Αυτό δεν σημαίνει ότι δεν χρησιμοποιούμε την ακουστική απορρόφηση σε τέτοιους χώρους. Αντ' αυτού, την χρησιμοποιούμε για να ελέγξουμε μια συγκεκριμένη επιστροφή ενέργειας παρά ως έναν απορροφητή για να αλλάξουμε ένα επίπεδο στατιστικού ηχητικού πεδίου. Ένα συχνό λάθος στα μικρά δωμάτια είναι η ακανόνιστη διανομή των απορροφητικών υλικών με την λανθασμένη πεποίθηση ότι ένα αντηχητικό πεδίο είναι παρών. Με την χρήση αποτελεσματικών εργαλείων μέτρησης οδηγούμαστε σε συγκεκριμένη τοποθέτηση τέτοιων υλικών μόνο στις συγκεκριμένες περιοχές όπου μπορεί πραγματικά να ελεγχθεί μια συγκεκριμένη επιστροφή ενέργειας.¹

1.2 ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΩΝ ΗΧΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

1.2.1 ΣΤΑΣΙΜΑ ΚΥΜΑΤΑ (ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗ ΜΟΡΦΗ)

Όταν μια πηγή βρίσκεται σε ένα κλειστό χώρο σε κάθε σημείο η ηχητική πίεση θα είναι το άθροισμα της ηχητικής πίεσης που προέρχεται από την πηγή και αυτών που προέρχονται από διάφορες ανακλάσεις. Όταν ο χώρος είναι μικρός εμφανίζονται φαινόμενα συμβολής τα οποία είναι τόσο εντονότερα όσο οι διαστάσεις του χώρου μικραίνουν, με αποτέλεσμα η πίεση σε κάποιο σημείο να αποκλίνει από την προβλεπόμενη τιμή που υπολογίζουμε χρησιμοποιώντας τους νόμους της γεωμετρικής διάδοσης. Κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις όπως η κατάλληλη γεωμετρία του χώρου, η κατάλληλη συχνότητα του ήχου, ο χώρος συμπεριφέρεται σαν ένας συντονιστής και σχηματίζονται

¹ Don Davis - Carolyn Davis, (1997) *Small Room Acoustics. Sound System Engineering*. 2nd ed. Focal Press, pp. 209 - 211.

στάσιμα κύματα με συγκεκριμένους τρόπους δόνησης (ιδιορυθμούς). Το φαινόμενο αυτό είναι έντονο όταν η συχνότητα του ήχου είναι χαμηλή και στον ήχο επικρατούν τόνοι.

Στην περίπτωση που σε κάποιο σημείο του χώρου φθάνουν δυο επίπεδα κύματα, τότε τα κύματα συμβάλλουν. Η εξίσωση που περιγράφει την ακουστική πίεση του σημείου είναι η μονοδιάστατη εξίσωση του Helmholtz και δίνεται από την σχέση:

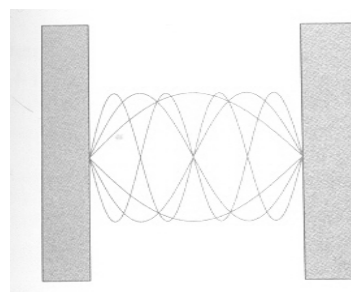
$$\frac{\partial^2 p(x)}{\partial x^2} + k^2 p(x) = 0 \quad (2)$$

Η γενική λύση της εξίσωσης είναι της μορφής:

$$p(x) = A \cos kx + B \sin kx \quad (3)$$

όπου A, B προσδιοριστέες αυθαίρετες σταθερές που προσδιορίζονται από τις αρχικές συνθήκες.

Προχωρώντας λίγο παραπέρα, εξετάζουμε τι συμβαίνει μεταξύ δυο παράλληλων επιφανειών. Έστω δύο παράλληλες επίπεδες ανένδοτες επιφάνειες με μηδενική απορρόφηση. Κάθετα στις επιφάνειες διαδίδεται ένα επίπεδο ηχητικό κύμα το οποίο ανακλάται στις επιφάνειες και συμβάλλει με το προσπίπτον δημιουργώντας στάσιμα κύματα. Οι επιφάνειες εφ' όσον είναι ανένδοτες ικανοποιούν τις συνθήκες:



Σχήμα 1.2: Συντονισμός σε παράλληλους τοίχους

$$\left. \frac{dp(x)}{dx} \right|_{x=0, L} = 0 \quad (4)$$

Διαφορίζοντας την λύση της εξίσωσης του Helmholtz (εξίσωση 3) προκύπτει:

$$\frac{dp(x)}{dx} = -k A \sin kx + k B \cos kx \quad (5)$$

Με εφαρμογή των αρχικών συνθηκών παίρνουμε

$$x = 0 \quad \Rightarrow \quad 0 = Bk \quad \Rightarrow \quad B = 0 \quad (6)$$

$$x = L \quad \Rightarrow \quad 0 = A k \sin kL \quad \Rightarrow \quad k = \frac{n\pi}{L} \quad n = 0,1,2,3\dots$$

Η δεύτερη σχέση δηλώνει ότι για συχνότητες που ικανοποιούν την συνθήκη

$$f = \frac{nc}{2L}, \quad n = 0,1,2,3\dots \quad (7)$$

σχηματίζονται στάσιμα κύματα, ή όπως λέμε στις συχνότητες αυτές συμβαίνει συντονισμός. Για τις συχνότητες αυτές χρησιμοποιούνται οι ονομασίες modes (ιδιορυθμοί), eigentones, natural frequencies, κ.λπ.

1.2.2 ΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΕΝΟΣ STUDIO ΗΧΟΓΡΑΦΗΣΕΩΝ

Κάθε συχνότητα συντονισμού ενός δωματίου έχει ένα συγκεκριμένο εύρος ζώνης (Q). Η ιδανική περίπτωση είναι να έχουμε παρακείμενους (γειτονικούς) συντονισμούς (θεμελιώδεις ή αρμονικούς) επαφιόμενους με τους γειτονικούς μέσω συντονιζόμενων περιφερειών. Αυτό καταλήγει σε συστατικά σήματος διαρκώς κυμαινόμενης συχνότητας τα οποία επεξεργάζονται ομοιόμορφα. Εάν η απόσταση αυτών των συντονισμών είναι μεγάλη, ένα μέρος της ενέργειας του σήματος ενισχύεται από τους συντονισμούς ενώ ένα άλλο, το οποίο «βρίσκεται σε εγκοπές», παύει να υφίσταται. Από την άλλη πλευρά, εάν τρεις ή τέσσερις συντονισμοί συμπίπτουν στην ίδια συχνότητα ή βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους, η ενέργεια του σήματος σε αυτό το μέρος του φάσματος λαμβάνει μια ασυνήθιστη ενίσχυση. Τέτοιες «συγκρούσεις» συνοδεύονται αναπόφευκτα από κενά κάπτου αλλού μέσα στο φάσμα. Ένας αρκετά καλός ήχος για studio απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή σε αυτές τις συχνότητες συντονισμού οι οποίες είναι, διαδοχικά, ελεγχόμενες από τις διαστάσεις και τις αναλογίες του δωματίου.

Το μέγεθος του δωματίου καθορίζει την αντιμετώπιση των χαμηλών συχνοτήτων. Όσο μεγαλύτερο είναι το δωμάτιο, τόσο χαμηλότερες συχνοτικές συνιστώσες μπορεί να υποστηρίξει. Τα μικρά δωμάτια επακολουθούνται από μεγάλη απόσταση μεταξύ των τρόπων δόνησής τους.²

1.2.3 ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΣ ΣΤΟ ΧΩΡΟ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ

Στην περίπτωση που σε κάποιο σημείο του χώρου φθάνουν δύο σφαιρικά κύματα, τα κύματα αυτά συμβάλλουν και κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις σχηματίζονται στάσιμα κύματα. Η εξίσωση που περιγράφει τα κύματα αυτά είναι η τρισδιάστατη εξίσωση του Helmholtz η οποία παίρνει την μορφή:

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (8)$$

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση χώρων με σχήμα ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου. Οι χώροι αυτοί για συγκεκριμένες συχνότητες συντονίζονται οπότε και σχηματίζονται στάσιμα κύματα.

Έστω χώρος σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου διαστάσεων l_x, l_y, l_z με άκαμπτα τοιχώματα. Έστω ότι στον χώρο διαδίδεται αρμονικό ηχητικό κύμα. Το κύμα αυτό συμβάλλει με τις ανακλάσεις από τα τοιχώματα του χώρου και σχηματίζει στάσιμα κύματα. Αν l_x, l_y, l_z οι διαστάσεις του χώρου οι αρχικές συνθήκες μπορούν να γραφούν:

$$\left. \frac{dp(x)}{dx} \right|_{x=0, l_x} = 0, \quad \left. \frac{dp(y)}{dy} \right|_{y=0, l_y} = 0, \quad \left. \frac{dp(x)}{dx} \right|_{x=0, l_x} = 0, \quad (9)$$

Με παραγωγή της εξίσωσης $p(x) = A_x \cos k_x x + B_x \sin k_x x$ προκύπτει ότι

$$\frac{dp(x)}{dx} = -A_x k_x \sin k_x x + B_x k_x \cos k_x x \quad (10)$$

² Everest F. Alton and Shea Mike (2002) My Studio – How Big and What Shape?. How To Build A Small Budget Recording Studio From Scratch. 3rd edition. United States of America, McGraw-Hill Companies, pp. 3-4.

Αν στην σχέση (10) θέσουμε τις αρχικές συνθήκες για $x = 0$ η σχέση τότε δίνει:

$$0 = k_x B_x \rightarrow B_x = 0 \quad (11)$$

Για $x = l_x$ έχουμε

$$0 = A_x k_x \sin k_x l_x \rightarrow k_x = \frac{n_x \pi}{l_x} \quad (12)$$

Ομοίως και για τις άλλες μεταβλητές

$$B_y = 0, \quad k_y = \frac{n_y \pi}{l_y}, \quad B_x = 0, \quad k_z = \frac{n_z \pi}{l_z}, \quad (13)$$

Με αντικατάσταση των σχέσεων $p(x) = A_x \cos k_x x + B_x \sin k_x x$, $p(y) = A_y \cos k_y y + B_y \sin k_y y$, $p(z) = A_z \cos k_z z + B_z \sin k_z z$, στην σχέση $p(x, y, z) = p(x)p(y)p(z)$, αν λάβουμε υπόψη μας τις σχέσεις (11) και (13), προκύπτει:

$$p(x, y, z) = A_{n_x n_y n_z} \cos k_x x \cos k_y y \cos k_z z \quad (14)$$

με αντικατάσταση των σχέσεων (12), (13) στην σχέση

$$\frac{d^2 p(x)}{dx^2} + k_x^2 p(x) = 0, \quad \frac{d^2 p(y)}{dy^2} + k_y^2 p(y) = 0, \quad \frac{d^2 p(z)}{dz^2} + k_z^2 p(z) = 0 \quad \text{προκύπτει:}$$

$$k = k_{n_x n_y n_z} = \pi \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (15)$$

Η εξίσωση (14) περιγράφει τη μορφή των στάσιμων κυμάτων που σχηματίζονται στο χώρο.

Ο τύπος των τρόπων δόνησης εξαρτάται από την πορεία που ακολουθεί η ανακλώμενη δέσμη. Οι κύριοι τρόποι δόνησης – ιδιορυθμοί (modes) για χώρο σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου είναι τρεις: οι αξονικοί (axial), παράλληλοι σε κάποια διάσταση και που σχηματίζονται μετά από διαδοχικές ανακλάσεις σε ζεύγη παράλληλων επιφανειών, εφαπτομενικοί (tangential), εφαπτόμενοι σε ζεύγη επιφανειών που σχηματίζονται μετά από διαδοχικές ανακλάσεις σε δυο

ζεύγη παράλληλων επιφανειών και πλάγιοι (oblique), που σχηματίζονται μετά από διαδοχικές ανακλάσεις στα τρία ζεύγη παράλληλων επιφανειών.

Οι φυσικές αυτές συχνότητες δόνησης του χώρου προκύπτουν από τη σχέση (16),

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (16)$$

όπου n_x, n_y, n_z σταθερές που παίρνουν ανεξάρτητα η κάθε μια τις ακέραιες τιμές 0, 1, 2, 3,... κ.λπ. Για τις αξονικές συχνότητες, μόνο μια από τις σταθερές είναι διάφορη του μηδενός, για τις εφαπτομενικές συχνότητες δύο και για τις πλάγιες συχνότητες και οι τρεις σταθερές είναι διάφορες του μηδενός και l_x, l_y, l_z είναι οι διαστάσεις του χώρου.

Η στάθμη πίεσης σε κάποιο σημείο είναι συνάρτηση τόσο των συντεταγμένων του σημείου όσο και του χρόνου και δίδεται από τη σχέση:

$$p(x, y, z, t) = \sum_{n_x=1}^{\infty} \sum_{n_y=1}^{\infty} \sum_{n_z=1}^{\infty} A_{n_x, n_y, n_z} \cos k_x x \cos k_y y \cos k_z z \quad (17)$$

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

Το σχήμα 1.4 δείχνει τους τρόπους δόνησης - ιδιορυθμούς (modes) ενός κλειστού χώρου, τους (2,0,0) (2,1,0) και (1,1,0). Στο σχήμα αυτό φαίνονται καθαρά τα μέγιστα των στάσιμων κυμάτων.

Για να υπολογίσουμε τις συχνότητες συντονισμού ενός χώρου δεν έχουμε παρά να δώσουμε στις μεταβλητές n_x, n_y, n_z τις τιμές 0,1,2,3 κ.λπ.

1.2.4 ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ (MODAL DENSITY)

Όπως είναι γνωστό σε ένα τρισσορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων $Oxyz$ αν x, y, z οι συντεταγμένες ενός σημείου P τότε η σχέση:

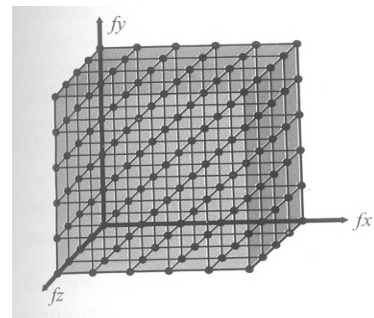
$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (18)$$

δίδει την απόσταση του σημείο P από την αρχή. Αν τροποποιήσουμε την σχέση (16) ως εξής,

$$f = \sqrt{\left(\frac{cn_x}{2l_x}\right)^2 + \left(\frac{cn_y}{2l_y}\right)^2 + \left(\frac{cn_z}{2l_z}\right)^2} \quad (19)$$

σε ένα τρισσορθογώνιο σύστημα αξόνων με άξονες τους f_x, f_y, f_z το οποίο ονομάζεται σύστημα συχνοτήτων διαστήματος (frequency - space) η παραπάνω σχέση δίνει το «μέτρο» της συχνότητας. Εφόσον οι αριθμοί n_x, n_y, n_z παίρνουν μόνο ακέραιες τιμές κάθε συχνότητα συντονισμού θα αντιστοιχεί σε ένα σημείο του συστήματος, που βρίσκεται στην κορυφή ενός πλέγματος (σχήμα 1.3). Το κάθε ένα στοιχείο του πλέγματος θα είναι κύβος με ακμή: $c/2l$

Από το σχήμα μπορούμε να υπολογίσουμε τον αριθμό των συχνοτήτων που συντονίζεται ένας χώρος μέχρι την συχνότητα f . Για συχνότητες από 0 μέχρι f ο αριθμός των τρόπων δόνησης όπως προκύπτει με την παραπάνω μέθοδο ανάγεται στον προσδιορισμό των κορυφών του πλέγματος στο διάγραμμα συχνότητας και δίδεται από την σχέση:



Σχήμα 1.3: Υπολογισμός πυκνότητας ιδιορυθμών

$$N_f = \frac{\frac{\pi k^3}{6}}{\frac{\pi^3}{V}} = \frac{4\pi}{3} V \left(\frac{f}{c}\right)^3 \quad (20)$$

Για δεδομένο εύρος συχνοτήτων ο αριθμός των ιδιορυθμών που αντιστοιχεί είναι:

$$dN = \frac{4\pi f^2 V}{c^3} df \quad (21)$$

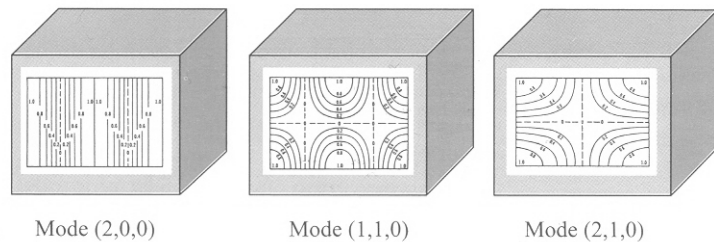
Ο υπολογισμός των ιδιορυθμών με την μέθοδο αυτή περιέχει σφάλματα που προέρχονται κυρίως από τον τρόπο υπολογισμού των κορυφών του πλέγματος και ισχύει κυρίως για υψηλές συχνότητες. Μια πιο

ακριβής έκφραση για τον αριθμό των ιδιορυθμών που ισχύει για όλες τις συχνότητες είναι η παρακάτω,

$$dN = \left(\frac{4\pi f^2 V}{c^3} + \frac{\pi f S}{2c^2} + \frac{L}{8c} \right) df \quad (22)$$

όπου $S = 2(l_x l_y + l_y l_z + l_z l_x)$ η ολική επιφάνεια του χώρου, $L = 4(l_x + l_y + l_z)$ το άθροισμα των ακμών και $V = l_x l_y l_z$ ο όγκος του χώρου.

Όταν η συχνότητα είναι μεγάλη ($f \rightarrow \infty$) οι παραπάνω τύποι δεν ισχύουν μόνο για χώρους με σχήμα ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου αλλά



Σχήμα 1.4: Κατανομή ηχητικών πιέσεων σε

διάφορους ιδιορυθμούς

και για χώρους με οποιοδήποτε σχήμα. Το γεγονός αυτό δεν εκπλήσσει διότι κάθε χώρος μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό ορθογώνιων χώρων. Ο αριθμός των τρόπων δόνησης ενός χώρου μέχρι την συχνότητα f προκύπτει από τον τύπο (22) με ολοκλήρωση:

$$N = \frac{4\pi f^3 V}{3c^3} + \frac{\pi f^2 S}{4c^2} + \frac{f L}{8c} \quad (23)$$

Για υψηλές συχνότητες όπως είπαμε παραπάνω είναι ανεξάρτητος του σχήματος του χώρου.

1.2.5 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΤΡΟΠΩΝ ΔΟΝΗΣΗΣ

Αν μελετήσουμε τις αξονικές συχνότητες και τις σειρές των αρμονικών του studio θα πρέπει να αναρωτηθούμε εάν αυτές οι συχνότητες είναι κατάλληλα κατανεμημένες. Για να απαντήσουμε σε αυτό το ερώτημα, κάθε συχνότητα θα πρέπει να επεξεργασθεί και να εξετασθεί.

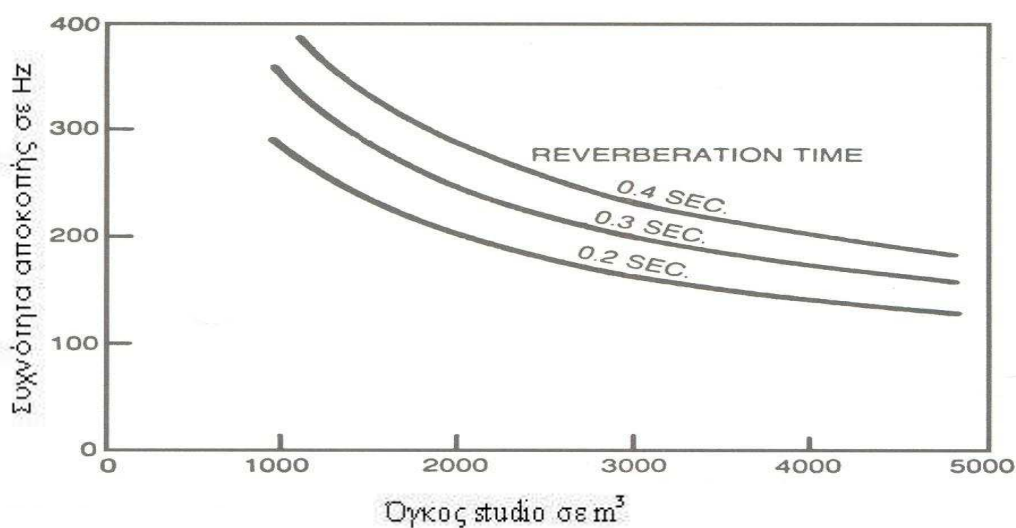
1.2.6 ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΔΩΜΑΤΙΟΥ

Κάθε studio ηχογραφήσεων έχει μια συχνότητα πάνω από τις ρυθμικές, η οποία τείνει στο να συγχωνευθεί σε μια στατιστική ακολουθία. Αυτή καλείται συχνότητα αποκοπής δωματίου. Σε συχνότητες υψηλότερες της συχνότητας αποκοπής, ποικίλα συστατικά του σήματος θα αναπτυχθούν περισσότερο ή λιγότερο ομοιόμορφα και το δωμάτιο θα συμπεριφέρεται πιο πολύ ως ένα μεγάλο αμφιθέατρο. Σε συχνότητες χαμηλότερες της συχνότητας αποκοπής, υπάρχει ιδιαίτερα μεγάλη απόσταση των τρόπων δόνησης έχοντας ως αποτέλεσμα ακανόνιστη μεταχείριση των συστατικών του σήματος.

Η συχνότητα αποκοπής ενός δωματίου συνδέει μόνο τον χρόνο αντήχησης και τον όγκο του και μπορεί περίπου να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\text{Συχνότητα αποκοπής} = 20.000 \sqrt{\frac{T_{60}}{V}} \quad (24)$$

όπου T_{60} = χρόνος αντήχησης σε δευτερόλεπτα (sec), V = όγκος του δωματίου σε κυβικά μέτρα (m^3)



Σχήμα 1.5: Συχνότητα αποκοπής δωματίου

Το σχήμα 1.5 κατασκευάστηκε βάσει της θεμελιώδους εξίσωσης για όγκους και χρόνους αντήχησης κοινούς σε μικρά κυρίως studios ηχογραφήσεων. Όσο μεγαλύτερο και «νεκρό» είναι ένα studio

ηχογραφήσεων, τόσο χαμηλότερη είναι η συχνότητα αποκοπής και ακόμη λιγότερη η δυσκολία του χειρισμού των χαμηλών άκρων του ακουστικού φάσματος.

1.2.7 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ ΤΗΣ ΕΝΝΟΙΑΣ ΤΩΝ ΤΡΟΠΩΝ ΔΟΝΗΣΗΣ

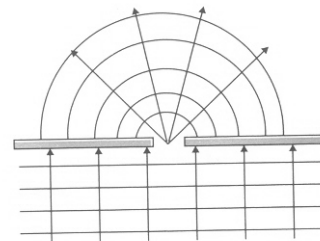
- Δωμάτια μικρότερα των 1500 κυβικών ποδών (42,4753 m³) υποβάλλονται εύκολα σε ανυπέρβλητα προβλήματα που αφορούν τους τρόπους δόνησης δωματίου και θα πρέπει να αποφεύγονται για ποιοτικά studios ηχογραφήσεων και control rooms (δωμάτια ελέγχου). Όσο μεγαλύτερο είναι ένα δωμάτιο, τόσο πιο κοντινή είναι η μέση απόσταση των ρυθμικών συχνοτήτων και τόσο πιο ομοιόμορφη είναι η μεταχείριση των διάφορων συστατικών του σήματος.
- Μόλις οι συμπωτικές συχνότητες μειώνονται ή εξαλείφονται είναι ανώφελο να φέρουμε ρυθμικές αναλύσεις σε πλεονασμούς διότι κατάλοιπα, έπιπλα, και άλλων ειδών ανωμαλίες του δωματίου καταλήγουν σε αρκετά μεγάλες αποκλίσεις από την ιδανική θεωρητική κατάσταση.
- Η κλίση των τοίχων του studio προς τα έξω μπορεί να χρησιμεύει στην μείωση του τρεμοπαιξίματος της ηχούς, αλλά οι ρυθμικές συχνότητες μεταβάλλονται μόνο σε μερικές άγνωστες τιμές. Η κλίση αυτή των τοίχων προς τα έξω τείνει να διασπάσει αυτές τις συμπωτικές συχνότητες σε ένα διαφορετικό συμμετρικό δωμάτιο, διατηρώντας όμως τον έλεγχο των πραγμάτων με την επιλογή κατάλληλων διαστάσεων ενός ορθογωνίου δωματίου είναι μια ικανοποιητική προσέγγιση εάν το τρεμοπαίξιμο της ηχούς και η διάχυση ελέγχονται από πρέπουσα τοποθέτηση απορροφητικών υλικών.

- Για την ορθότερη μεταχείριση ενός χρωματισμού ένας κουρδισμένος συντονιστής Helmholtz μπορεί να εισαχθεί για να μειώσει αισθητά την συμπωτική συχνότητα. Η οξύτητα του κουρδίσματος ίσως χρειαστεί να ελέγξει ούτως ώστε να αποφευχθεί η αργή εξασθένηση του ήχου σε μια δομή υψηλού δείκτη Q .³

1.2.8 ΠΟΛΩΣΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ ΤΟΥ ΗΧΟΥ

Ο ήχος όταν μεταδίδεται στον αέρα δεν παρουσιάζει το φαινόμενο της πόλωσης, διότι μεταδίδεται με διαμήκη κύματα. Είναι δυνατό όμως να παρουσιαστεί το φαινόμενο της πόλωσης κατά την διάδοση του ήχου σε στερεά.

Ο ήχος όπως ακριβώς και το φως, παρουσιάζει το φαινόμενο της περίθλασης δηλαδή μεταδίδεται και πίσω από εμπόδια ή διεισδύει μέσα από σχισμές και φθάνει σε σημεία τα οποία βρίσκονται στην γεωμετρική «σκιά», όταν αυτά έχουν διαστάσεις συγκρίσιμες με το μήκος κύματος. Το φαινόμενο της περίθλασης είναι ιδιαίτερα αισθητό στην ακουστική διότι το μήκος κύματος του ήχου είναι σχετικά μεγάλο. Επιφάνειες όπως οι πόρτες, τα μισάνοικτα παράθυρα παρουσιάζουν έντονα το φαινόμενο αυτό.



Σχήμα 1.6: Περίθλαση των ηχητικών κυμάτων από ανοίγματα

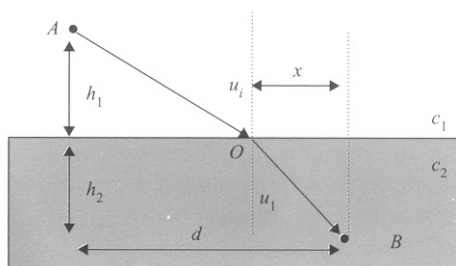
³ Everest F. Alton and Shea Mike (2002), 'My Studio – How Big and What Shape?. How To Build A Small Budget Recording Studio From Scratch', 3rd edition, United States of America, McGraw-Hill Companies, pp. 4-5, 9-11.

1.2.9 ΔΙΑΘΛΑΣΗ ΤΟΥ ΗΧΟΥ

Ο ήχος, όπως ακριβώς και το φως όταν μεταβαίνει από ένα υλικό με ταχύτητα c_1 σε κάποιο άλλο όπου η ταχύτητα είναι c_2 , διαθλάται, αλλάζει δηλαδή πορεία. Η διάθλαση του ήχου περιγράφεται από τον νόμο του Snell, που περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\sin u_t = \sin u_i \frac{c_2}{c_1} \quad (25)$$

Ο νόμος του Snell είναι συνέπεια της αρχής των ελαχίστων χρόνων των Ήρωνος – Fermat.⁴



Σχήμα 1.7: Αρχή Ήρωνος Fermat

1.3 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΗΧΟΥ ΣΕ ΜΙΚΡΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ

Στους μικρούς χώρους όπως είδαμε και προηγουμένως, κυριαρχούν τα κυματικά φαινόμενα του ήχου. Ας υποθέσουμε ότι σε ένα μικρό χώρο υπάρχει πηγή που εκπέμπει ήχο σε μια μόνο συχνότητα. Στον χώρο σχηματίζονται στάσιμα κύματα. Ας υποθέσουμε επίσης ότι η συχνότητα της πηγής είναι κοντά στην συχνότητα ενός τρόπου δόνησης. Η στάθμη του ήχου στον χώρο αυξάνεται μέχρι η μέση τιμή της πίεσης (χωρική και χρονική) φθάσει την τιμή:

$$|p_n| = \frac{2K\omega}{\sqrt{4\omega_n^2 k_n^2 (\omega^2 - \omega_n^2)^2}} \quad (26)$$

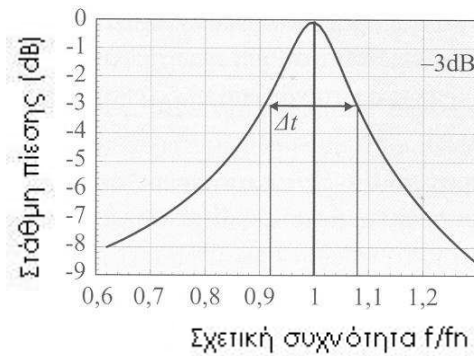
⁴ Σκαρλάτος Δημήτρης (2005) Κυματικά Φαινόμενα. Εφαρμοσμένη Ακουστική. 2η έκδοση. Πάτρα, Εκδόσεις Φιλομάθεια, σελ. 117-118, 120.

όπου K σταθερά που εξαρτάται από την ακουστική ισχύ της πηγής,
 k_n σταθερά που εξαρτάται από την απορρόφηση του χώρου και
υπολογίζεται παρακάτω (σχέση 29)

ω η συχνότητα της πηγής, T

ω_n η συχνότητα του τρόπου δόνησης.

Το σχήμα 1.8 δείχνει την
στάθμη πίεσης σε συνάρτηση
με την συχνότητα της πηγής.
Όπως φαίνεται στο σχήμα η
στάθμη παίρνει την μέγιστη τιμή
όταν η συχνότητα της πηγής
είναι ίδια με την συχνότητα
συντονισμού.



Σχήμα 1.8: Συντονισμός για ένα
τρόπο δόνησης

Η καμπύλη αυτή όταν δεν υπάρχουν αποσβέσεις, είναι οξεία ενώ όταν υπάρχουν αμβλύνεται. Στην ακουστική των κλειστών χώρων το ρόλο της απόσβεσης τον παίζει η απορρόφηση του χώρου. Το εύρος συχνοτήτων (bandwidth) συντονισμού που ορίζεται από τα σημεία στα οποία η στάθμη είναι χαμηλότερη κατά 3dB από την στάθμη του μεγίστου δίδεται από την σχέση,

$$\Delta f = \frac{2,2}{T_{60}} \quad (27)$$

όπου T_{60} είναι ο χρόνος αντήχησης για τον συγκεκριμένο τρόπο δόνησης.

Ας υποθέσουμε ότι ο χώρος συντονίζεται σε μια μόνο συχνότητα. Αν μετά την αποκατάσταση της ισορροπίας η πηγή μηδενισθεί, δεν μηδενίζεται και η στάθμη στο σημείο παρατήρησης αμέσως αλλά φθίνει με τον χρόνο, σύμφωνα με την σχέση:

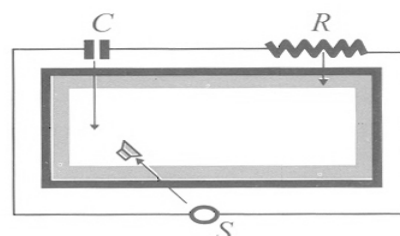
$$p(t) = \frac{K}{k_n} e^{-k_n t} \cos \omega_n t \quad (28)$$

Η σταθερά k_n με τον χρόνο αντήχησης συνδέεται με την σχέση:

$$k_n = \frac{6.91}{T_{60}} \quad (29)$$

1.3.1 ΧΡΟΝΟΣ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ

Όταν έχουμε ένα κλειστό χώρο με μια πηγή που τροφοδοτεί με ηχητική ενέργεια τον χώρο, ο χώρος συμπεριφέρεται όπως ο συνδυασμός πυκνωτή – αντίστασης σε ηλεκτρικό κύκλωμα. Οι ηχητικές ακτίνες πριν απορροφηθούν πλήρως από τα τοιχώματα διατηρούν την ηχητική ενέργεια στον χώρο. Συνεπώς ο όγκος του χώρου ενεργεί όπως η χωρητικότητα ενός πυκνωτή σε ηλεκτρικό κύκλωμα. Η απώλεια της ηχητικής ενέργειας (λόγω απορρόφησης) γίνεται όπως ακριβώς η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στην ηλεκτρική αντίσταση.



Σχήμα 1.9: Ηλεκτρικό ανάλογο κλειστού χώρου

Όταν η πηγή μηδενισθεί δεν μηδενίζεται η ηχητική ενέργεια στον χώρο ακαριαία, αλλά διατηρείται για λίγο χρόνο, φθίνοντας εκθετικά με αυτόν. Η μείωση της ηχητικής ενέργειας μετά τον μηδενισμό της πηγής περιγράφεται με τον χρόνο αντήχησης (reverberation time), που αντιστοιχεί στην σταθερά χρόνου των ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Ο χρόνος αντήχησης αποτελεί την βασικότερη παράμετρο που σχετίζεται με την ακουστική συμπεριφορά των κλειστών χώρων.

Ως χρόνος αντήχησης (T_{60}) ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται ώστε η στάθμη θορύβου (L_p) σε κάποιο σημείο να ελαττωθεί κατά 60 dB, μετά το μηδενισμό του εκπεμπόμενου θορύβου από την πηγή.

Ο υπολογισμός του χρόνου αντήχησης παίζει πάρα πολύ σπουδαίο ρόλο στην ακουστική των κλειστών χώρων, διότι σχετίζεται με την ακουστική ποιότητα των χώρων. Ο χρόνος αυτός για τον ίδιο χώρο εξαρτάται από τη συχνότητα του ήχου, για το λόγο αυτό ορίζεται για τις

κεντρικές συχνότητες κάθε οκτάβας ή τριτοκτάβας όπως ακριβώς και ο συντελεστής απορρόφησης. Ο χρόνος αντήχησης μετρείται σε sec. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή του χρόνου αντήχησης για μια δεδομένη συχνότητα είναι η απορρόφηση του χώρου και ο όγκος του.

1.3.2 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ ΚΑΤΑ SABINE

Αν στη σχέση $L_p(t) = L_p(0) - 4.34 \frac{A_s c}{4V} t$ θέσουμε όπου $L_p(t) - L_p(0) = -60$ ο χρόνος t είναι σύμφωνα με τον ορισμό ο χρόνος αντήχησης T_{60} . Η σχέση αυτή τότε καταλήγει στην μορφή,

$$60 = \frac{4.34 c A_s}{4V} T_{60} \quad (30)$$

και λύνοντας ως T_{60} έχουμε:

$$T_{60} = \frac{0.161 V}{A_s} \quad (31)$$

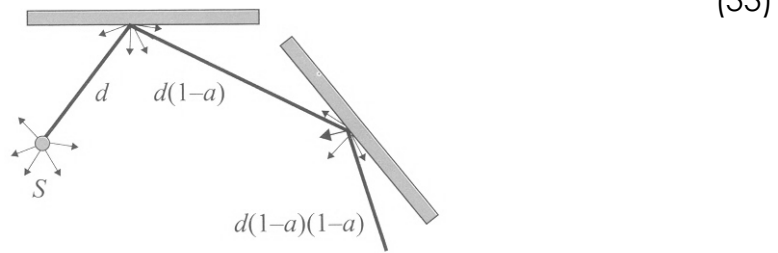
Η απορρόφηση του δωματίου A_s δίνεται από τη σχέση $A_s = a_1 s_1 + a_2 s_2 + a_3 s_3 + \dots + a_n s_n$. Η σχέση (30) δίδει μια πρώτη προσέγγιση στον χρόνο αντήχησης και ονομάζεται **προσεγγιστική σχέση του Sabine**. Ισχύει ικανοποιητικά για χώρους με μικρή απορρόφηση.

1.3.3 ΧΡΟΝΟΣ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ ΓΙΑ ΜΕΓΑΛΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ ΚΑΤΑ NORRIS EYRING

Μια πιο λεπτομερής μελέτη της ακουστικής συμπεριφοράς των μεγάλων χώρων έγινε από τους Norris – Eyring. Σύμφωνα με τους παραπάνω ερευνητές, ο χρόνος αντήχησης με αρκετά καλή προσέγγιση δίνεται από την σχέση,

$$T_{60} = \frac{0.161 V}{A_N} \quad (32)$$

όπου V ο όγκος του χώρου και A_N η ολική απορρόφηση που δίνεται από την σχέση:



Σχήμα 1.10: Πορεία ηχητικών ακτίνων με διαδοχικές ανακλάσεις

Ο τύπος των Norris – Eyring υπολογίζει με μεγάλη ακρίβεια τον χρόνο αντήχησης των κλειστών χώρων, όταν η απορρόφηση όλων των επιφανειών που περικλείουν τον χώρο είναι ίδια.

1.3.4 ΣΧΕΣΗ ΤΟΥ FITZROY

Στην περίπτωση ανομοιομορφης απορρόφησης (δηλαδή στην περίπτωση ύπαρξης σε μία ή περισσότερες κατευθύνσεις ισχυρά ανακλαστικών επιφανειών όπως οι υαλοπίνακες) για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης χρησιμοποιούμε τον προσεγγιστικό τύπο του Fitzroy,

$$T = \frac{s_x}{s} \left[\frac{0.161V}{s \ln(1-\bar{a}_x)^{-1}} \right] + \frac{s_y}{s} \left[\frac{0.161V}{s \ln(1-\bar{a}_y)^{-1}} \right] + \frac{s_z}{s} \left[\frac{0.161V}{s \ln(1-\bar{a}_z)^{-1}} \right] \quad (34)$$

όπου:

s_x το εμβαδόν των τοίχων που βρίσκονται παράλληλα στη διάσταση του μήκους,

s_y : το εμβαδόν των τοίχων που βρίσκονται παράλληλα στη διάσταση του πλάτους,

s_z : το εμβαδόν του πατώματος και της οροφής αντίστοιχα,

a_x, a_y, a_z : οι αντίστοιχοι μέσοι συντελεστές απορρόφησης.

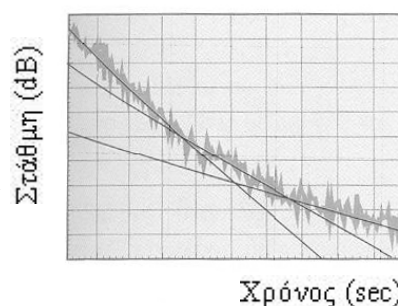
1.3.5 ΣΧΕΣΗ ΤΩΝ SETTE – MILLINGTON

Όταν στον κλειστό χώρο υπάρχουν επιφάνειες με πολύ μεγάλο συντελεστή απορρόφησης ($\alpha > 0.63$), ο τύπος των Norris – Eyring, αν χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του συντελεστή απορρόφησης, δίνει συντελεστές απορρόφησης μεγαλύτερους από την μονάδα. Στις περιπτώσεις αυτές μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο τύπος των Sette – Millington που δίνει πάντοτε συντελεστή απορρόφησης μικρότερο από την μονάδα. Επίσης ο τύπος αυτός δίνει καλά αποτελέσματα και στην περίπτωση που οι επιφάνειες που περιορίζουν τον χώρο έχουν συντελεστές απορρόφησης που διαφέρουν πολύ.

$$T_{60} = \frac{0.161V}{\sum_i s_i \ln(1-a_i)^{-1}} \quad (35)$$

1.3.6 EDT (EARLY DECAY TIME)

Η ανακλώμενη ηχητική ενέργεια που παίζει ουσιαστικό ρόλο στην διαμόρφωση της ακουστικής των κλειστών χώρων είναι αυτή που αντιστοιχεί στις πρώτες ανακλάσεις του ήχου. Οι καθυστερημένες ανακλάσεις έχουν χάσει αρκετή από την ενέργεια που μεταφέρουν και δεν έχουν μεγάλη επίδραση στην ακουστική του χώρου. Όταν η κλίση του ρυθμού πτώσης δεν είναι ομαλή (όπως συμβαίνει στις περισσότερες περιπτώσεις) χρησιμοποιούμε τον πρώιμο ρυθμό μείωσης EDT. Ο χρόνος αυτός που λαμβάνει υπόψη του τις πρώτες ανακλάσεις, ορίζεται ως *έξι φορές η χρονική περίοδος που χρειάζεται ώστε ο ήχος να μειωθεί κατά 10 dB μετά τον μηδενισμό της πηγής*. Ο EDT είναι μικρότερος του RT και του T_{60} .



Σχήμα 1.11: Ρυθμός μείωσης
θορύβου για χώρους με
ανισότροπη απορρόφηση

1.3.7 T_{10} , T_{20} , T_{30}

Ο χρόνος T_{30} ορίζεται ως δυο φορές ο χρόνος που απαιτείται ώστε ο ήχος να ελαττωθεί από -5 έως -35 dB μετά τον μηδενισμό της πηγής, από την αρχική τιμή. Με ανάλογο τρόπο ορίζονται και οι χρόνοι T_{10}, T_{20} . Για τον ορισμό τους λαμβάνεται υπόψη το τμήμα της καμπύλης από -5 έως -15 και -5 έως -25 dB από την αρχική τιμή.

Όλοι οι χρόνοι ορίζονται όπως ακριβώς και ο T_{60} για κάθε συχνότητα. Το σχήμα 1.11 δίδει τη μείωση της στάθμης του ήχου στην περίπτωση ασύμμετρης απορρόφησης.

Στο σχήμα αυτό φαίνεται ότι οι χρόνοι T_{60} , EDT, T_{30} έχουν διαφορετικές τιμές πράγμα το οποίο δεν συμβαίνει όταν η ηχητική ενέργεια είναι τελείως διάχυτη. Θα πρέπει να σημειώσουμε εδώ ότι για τον ίδιο χώρο ο χρόνος αντήχησης μπορεί να παίρνει διάφορες τιμές για διάφορες θέσεις του δέκτη. Το γεγονός αυτό έχει να κάνει με το είδος των πεδίων που υπάρχουν στο χώρο. Στην πράξη όταν θέλουμε να υπολογίσουμε τον χρόνο αντήχησης μιας αίθουσας, παίρνουμε μετρήσεις σε διαφορετικά σημεία και υπολογίζουμε το μέσο χρόνο αντήχησης.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Σκαρλάτος Δημήτρης (2005) Εφαρμοσμένη Ακουστική, 2η έκδοση. Πάτρα, Εκδόσεις Φιλομάθεια.

Everest F. Alton and Shea Mike (2002) How To Build A Small Budget Recording Studio From Scratch, 3rd edition. United States of America, McGraw-Hill Companies.

Newell Philip (2003) Recording Studio Design, First Published 2003, Reprinted 2004. Burlington, Focal Press.

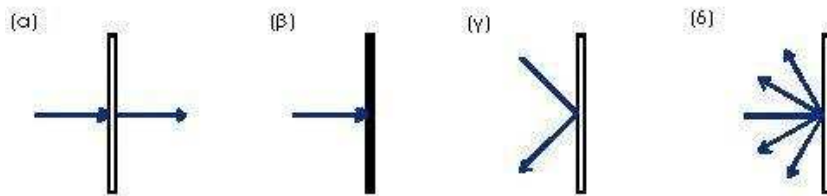
Don Davis – Carolyn Davis (1997) Sound System Engineering, 2nd edition. Focal Press.
Egan M. David (1988) Architectural Acoustics. McGraw-Hill, Inc.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

2.1 ΑΝΑΚΛΑΣΗ, ΔΙΑΔΟΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΤΟΥ ΗΧΟΥ

2.1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ

Όταν ένα ηχητικό κύμα προσπίπτει πάνω σε μια επιφάνεια, ένα μέρος της ενέργειας που μεταφέρει ανακλάται ενώ ένα μέρος του απορροφάται ή διαδίδεται μέσω του υλικού της επιφάνειας στην άλλη πλευρά του (σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1: (α) Διάδοση, (β) Απορρόφηση, (γ) Ανάκλαση, (δ) Διάχυση

Συντελεστής ανάκλασης α_r

Προκύπτει από το λόγο της ανακλώμενης, από την επιφάνεια, ηχητικής ενέργειας (W_r) προς την προσπίπτουσα (W_i).

$$\alpha_r = \frac{W_r}{W_i} = \frac{I_r}{I_i} \quad (36)$$

Συντελεστής διάδοσης τ

Προκύπτει από το λόγο της ενέργειας που διαδίδεται από την μια πλευρά της επιφάνειας στην άλλη (W_τ), προς την προσπίπτουσα ηχητική ενέργεια (W_i).

$$\tau = \frac{W_\tau}{W_i} = \frac{I_\tau}{I_i} \quad (37)$$

Συντελεστής απορρόφησης α

Προκύπτει από το λόγο της ενέργειας που απορροφάται από μια επιφάνεια (W_α), προς την προσπίπτουσα ενέργεια (W_i).

$$\alpha = \frac{W_\alpha}{W_i} = \frac{I_\alpha}{I_i} \quad (38)$$

2.1.2 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΥΛΙΚΩΝ

Ο συντελεστής εκείνος που προσδιορίζει την ικανότητα μιας επιφάνειας, συγκεκριμένου υλικού, να απορροφά τον ήχο ονομάζεται συντελεστής απορρόφησης. Ο συντελεστής απορρόφησης ενός υλικού μεταβάλλεται ανάλογα τη συχνότητα του ηχητικού κύματος και τη γωνία πρόσπτωσης του πάνω στο υλικό.

Στις περισσότερες περιπτώσεις η γωνία πρόσπτωσης είναι άγνωστη ή μπορεί να μεταβάλλεται. Ο συντελεστής απορρόφησης εξάγεται από την εξίσωση του χρόνου αντήχησης κατά Sabine.

$$T_{60} = \frac{0.161V}{A} \quad (39)$$

όπου V ο όγκος του δωματίου και A το γινόμενο του εμβαδού μιας επιφάνειας επί τον συντελεστή απορρόφησης της ($A=sa$). Την απορρόφηση των υλικών των επιφανειών τη μετράμε σε Sabine.

2.1.3 ΜΕΣΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ

Σε ένα κλειστό χώρο ο μέσος συντελεστής απορρόφησης για μια δεδομένη συχνότητα δίνεται από τη σχέση :

$$\bar{a} = \frac{\alpha_1 s_1 + \alpha_2 s_2 + \alpha_3 s_3 + \dots + \alpha_n s_n}{s_1 + s_2 + s_3 + \dots + s_n} \quad (40)$$

όπου s_1, s_2, s_3, \dots το εμβαδόν κάθε επί μέρους επιφάνειας και $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$ οι αντίστοιχοι συντελεστές απορρόφησης για συγκεκριμένη συχνότητα.

Η ποσότητα στον αριθμητή ονομάζεται απορρόφηση δωματίου. Τόσο η απορρόφηση όσο και ο μέσος συντελεστής απορρόφησης ορίζονται για την κεντρική συχνότητα της χρησιμοποιούμενης ζώνης.

2.2 ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΕΣ

Η απορρόφηση του ήχου από μια επιφάνεια συγκεκριμένου υλικού, οφείλεται σε δυο φαινόμενα,

- Καθώς το ηχητικό κύμα εισχωρεί στο υλικό της επιφάνειας (συνήθως πορώδες), το μέσο διάδοσης (συνήθως ο αέρας) χάνει ενέργεια κατά την εκτέλεση των ταλαντώσεων λόγω τριβών. Έτσι η ηχητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια.
- Το ηχητικό κύμα διεγείρει προς ταλάντωση τα μόρια του απορροφητικού υλικού και κατά συνέπεια η ενέργεια του ηχητικού κύματος μειώνεται.

Σε έναν κλειστό χώρο, η χρήση των απορροφητικών υλικών γίνεται με στόχο την βελτιστοποίηση της ακουστικής του συμπεριφοράς, ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζεται. Τα απορροφητικά υλικά μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες : τα πορώδη απορροφητικά υλικά, τα απορροφητικά τύπου μεμβράνης και στους συντονιστές. Τα παραπάνω απορροφητικά υλικά ονομάζονται παθητικοί απορροφητές.

2.2.1 ΠΟΡΩΔΗ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Στα πορώδη απορροφητικά υλικά, η απορρόφηση επιτυγχάνεται μέσω των δυνάμεων τριβής που μετατρέπουν την ηχητική ενέργεια σε θερμότητα. Επίσης, λόγω της τριβής του αέρα στους πόρους του υλικού υπάρχει απώλεια ενέργεια και κατά συνέπεια απορρόφηση. Εξαιτίας του ότι η τριβή είναι ανάλογη της δυναμικής πίεσης του κινούμενου αέρα, τα πορώδη υλικά προκαλούν μεγαλύτερη

απορρόφηση όταν βρίσκονται σε θέσεις όπου η ταχύτητα των σωματιδίων του ηχητικού κύματος είναι μέγιστη.

Όταν το ηχητικό κύμα προσπίπτει σε ανένδοτη επιφάνεια (π.χ. μπετόν) δημιουργούνται στάσιμα κύματα. Σε αποστάσεις από την επιφάνεια $\lambda/4, 3\lambda/4$ κ.τ.λ. η ταχύτητα ταλάντωσης παίρνει τη μέγιστη της τιμή. Κατά συνέπεια, όταν το πορώδες υλικό τοποθετείται σε επαφή με μια ανακλαστική επιφάνεια όπου η ταχύτητα των σωματιδίων είναι μικρή η απορρόφηση είναι αμελητέα. Αντιθέτως, μεγάλη απορρόφηση επιτυγχάνεται όταν το ίδιο υλικό τοποθετηθεί σε απόσταση $\lambda/4$ από την επιφάνεια.

Η τιμή του συντελεστή απορρόφησης για ένα απορροφητικό υλικό τοποθετημένο μπροστά από μια ανένδοτη επιφάνεια σε απόσταση d από αυτήν δίνεται από τη σχέση,

$$a_f = \frac{4R_f}{\left[\frac{R_f}{pc}\right]^2 + \cot^2\left[\frac{2\pi f d}{c}\right]^2} \quad (41)$$

όπου R_f η αντίσταση ροής που δίνεται από τη σχέση,

$$R_f = \frac{\Delta p}{u} \quad (42)$$

και Δp η διαφορά πίεσης στις δύο επιφάνειες του υλικού και u η ταχύτητα των σωματιδίων.

Για την αποτελεσματική απορρόφηση του ήχου θα πρέπει ο συντελεστής ανάκλασης των υλικών αυτών να είναι μικρός. Σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις,

$$\alpha_r = \frac{(z_2 - z_1)^2}{(z_2 + z_1)^2} \quad \text{για κάθετη πρόσπτωση} \quad (43)$$

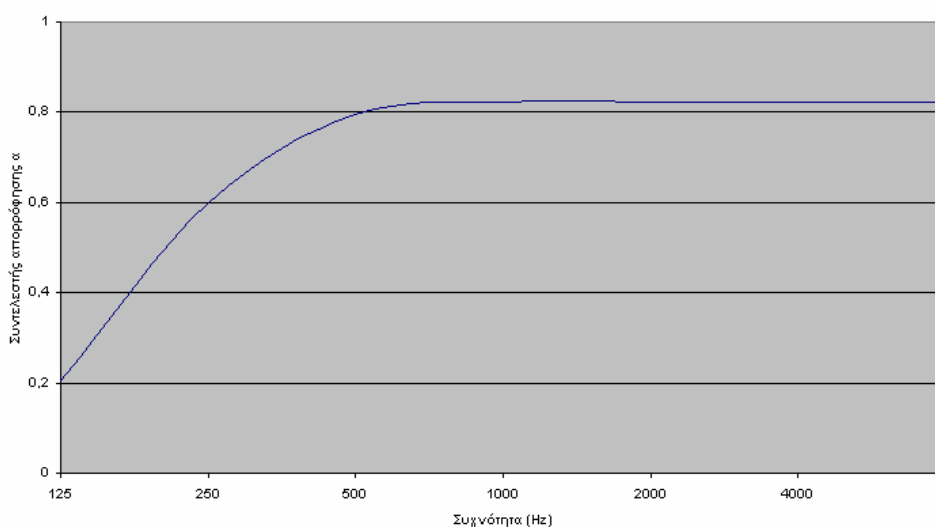
$$\alpha_r = \frac{(z_2 \cos \theta_i - z_1 \cos \theta_t)^2}{(z_2 \cos \theta_i + z_1 \cos \theta_t)^2} \quad \text{για πλάγια πρόσπτωση} \quad (44)$$

γίνεται κατανοητό ότι όσο πιο μικρή διαφορά έχουν οι εμπεδήσεις του αέρα και του υλικού, τόσο μικρότερη η ανάκλαση και συνεπώς μεγαλύτερη η διάδοση. Κατά συνέπεια η πυκνότητα αυτών των υλικών θα πρέπει να είναι μικρή, πρακτικά 2 ή 3 φορές μεγαλύτερη από αυτήν του αέρα και η διάμετρος των πόρων να είναι μεγαλύτερη από το μήκος κύματος του ήχου γεγονός που καθιστά τους πορώδη απορροφητές αποδοτικότερους στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες (π.χ. υαλοβάμβακας).

Τα πορώδη απορροφητικά υλικά που βρίσκουν χρήση ως απορροφητές του ήχου είναι συνήθως ινώδη υλικά με τη μορφή ταμπλώ, αφρού, υφασμάτων και χαλιών. Στη περίπτωση που οι ίνες είναι πολύ αραιές, δεν υπάρχει μεγάλη απορρόφηση μιας και η ενέργεια που χάνεται σαν θερμότητα είναι λίγη. Από την άλλη πλευρά, εάν οι ίνες του υλικού είναι πολύ πυκνές, δεν υπάρχει εισχώρηση του ήχου και η κίνηση του αέρα δεν μπορεί να προκαλέσει τόσο μεγάλη τριβή ώστε να είναι αποτελεσματική. Συνεπώς, η αποτελεσματικότητα ενός απορροφητικού υλικού εξαρτάται από το πάχος του υλικού, το μέγεθος των πόρων και από την πυκνότητα των ινών του υλικού.

Η απορροφητική ικανότητα στα πορώδη υλικά εξαρτάται από τη συχνότητα και αυξάνει με αυτήν.

Συντελεστής απορρόφησης πορώδους υλικού



Σχήμα 2.2 : Συντελεστής απορρόφησης πορώδους υλικού.

2.2.2 ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΤΥΠΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ

Τα υλικά αυτά αποτελούνται από μια λεπτή μεμβράνη, συνήθως από ύφασμα, που βρίσκεται σε μικρή απόσταση από κάποιο σκληρό υλικό (π.χ. τοίχος). Όταν ο ήχος προσπίπτει στη μεμβράνη τότε τη διεγείρει σε ταλάντωση και η απώλεια της ηχητικής ενέργειας οφείλεται στην εσωτερική τριβή του υλικού. Ο συντελεστής απορρόφησης αυτών των υλικών είναι μεγάλος σε χαμηλές συχνότητες.

Τα απορροφητικά τύπου μεμβράνης διεγείρονται από τον προσπίπτοντα ήχο σε ταλαντώσεις, όπως αναφέρθηκε. Η συχνότητα συντονισμού των υλικών αυτών και συνεπώς η συχνότητα που η απορρόφηση γίνεται μέγιστη δίνεται από τη παρακάτω σχέση,

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho c^2}{mL}} \quad (45)$$

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

Σε περίπτωση που το υλικό είναι ελαστικό και επιτρέπει τη διάδοση καμπικών κυμάτων, η συχνότητα συντονισμού για αυτά τα υλικά όταν καταλαμβάνουν ορθογώνια επιφάνεια δίνεται από τη σχέση,

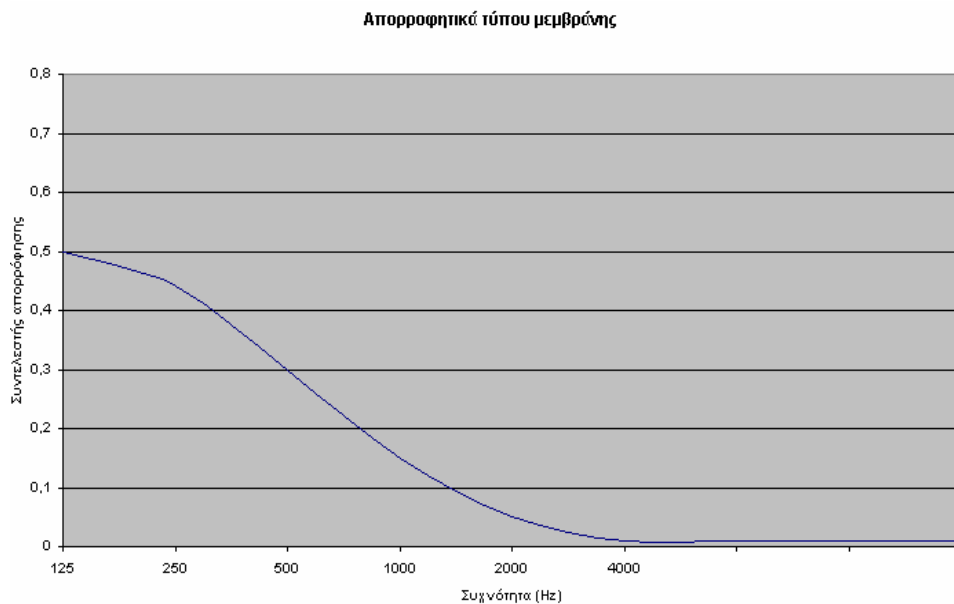
$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho c^2}{mL} + \frac{\pi^4}{m} \left[\left(\frac{p}{\alpha} \right)^2 + \left(\frac{q}{b} \right)^2 \right] \frac{E h^3}{12(1-\sigma^2)}} \quad (46)$$

όπου p, q αυθαίρετες σταθερές, E το μέτρο του Young της μεμβράνης και σ ο λόγος του Poisson.

Τα απορροφητικά τύπου μεμβράνης έχουν τις εξής ιδιότητες,

- Όσο πιο λεπτό το απορροφητικό τόσο μεγαλύτερη η απορρόφηση διότι δονούνται πιο εύκολα.
- Οι συχνότητες τις οποίες απορροφούν αυτού του είδους οι απορροφητές είναι μεταξύ 50 και 500 Hz. Τα μέγιστα της

απορρόφησης βρίσκονται κάτω από τα 300 Hz και μετακινούνται σε χαμηλότερες συχνότητες καθώς το βάρος του υλικού αυξάνει.



Σχήμα 2.3 : Συντελεστής απορρόφησης μεμβράνης

Αν τοποθετηθεί πορώδες υλικό πίσω από το απορροφητικό τύπου μεμβράνης, η αποτελεσματικότητά τους αυξάνει. Το βάρος των απορροφητών τύπου μεμβράνης είναι συνήθως μεταξύ 3 έως 15 $\frac{kg}{m^2}$.

Οι μεμβράνες χαμηλού βάρους χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ακουστικής ενώ αυτές μεγαλύτερου βάρους είναι πολύ αποτελεσματικές για ηχομόνωση.

2.2.3 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η τοποθέτηση των ηχοαπορροφητικών υλικών σε τυχαίες θέσεις έχει σημαντική συνεισφορά στην διάχυση του ήχου. Σε περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται αρκετά είδη ηχοαπορροφητικών συνιστάται να τοποθετηθούν στις γωνίες, στους πλαϊνούς τοίχους καθώς και στο ταβάνι. Σε ορθογώνια δωμάτια η τοποθέτηση των απορροφητικών υλικών στα σημεία που αναφέρθηκαν παραπάνω έχει επίδραση στους

τρόπους ταλάντωσης του δωματίου (αξονικοί, εφαπτομενικοί και πλάγιοι).

Σε studio ομιλιών τα απορροφητικά υλικά θα πρέπει να τοποθετούνται στο ύψος του κεφαλιού του ομιλητή, στους πλαϊνούς τοίχους, με στόχο την επίδραση αυτού στις μεγαλύτερες ακουστικά συχνότητες.

2.3 ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΕΣ

Ένας συντονιστής (ή συνηχητής) είναι ουσιαστικά μια κοιλότητα μέσα σε κάποιο υλικό. Όταν ο ήχος πέσει στο στόμιο της κοιλότητας διεγείρει τον αέρα που βρίσκεται μέσα στο συντονιστή και η απώλεια ενέργειας οφείλεται και πάλι στις αποσβέσεις των ταλαντώσεων λόγω των τριβών. Ο συντελεστής απορρόφησης των υλικών αυτών έχει ένα οξύ μέγιστο γύρω από μια συχνότητα, την συχνότητα συντονισμού f_0 , που βρίσκεται συνήθως στις χαμηλές συχνότητες, ενώ για τις υπόλοιπες συχνότητες είναι σχεδόν μηδέν. Με την προσθήκη απορροφητικού υλικού στο εσωτερικό των κοιλοτήτων, πλαταίνει η καμπύλη συντονισμού και το μέγιστο μειώνεται.

Η συχνότητα συντονισμού της κοιλότητας δίνεται από την σχέση,

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{s}{Vl}} \quad (47)$$

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

Ο συντονιστής συμπεριφέρεται όπως το σύστημα ελατήριο – μάζα και ενδείκνυται για χώρους όπου υπάρχουν τόνοι χαμηλής συχνότητας. Ο συντονιστής εκπέμπει ξανά τον ήχο στο χώρο, ο οποίος ήχος όμως δεν είναι ακουστός διότι ο ρυθμός μείωσης του είναι μεγαλύτερος από αυτόν του δωματίου. Οι επανεκπεμπόμενοι ήχοι είναι ακουστοί μόνο σε ανοικτό χώρο.

2.3.1 ΔΙΑΤΡΗΤΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ

Οι διάτρητες επιφάνειες είναι μια μορφή συντονιστών και χρησιμοποιούνται συχνά για την απορρόφηση του ήχου τόσο σε κλειστούς χώρους όσο και σε ανοικτούς χώρους.

Οι διάτρητες επιφάνειες κατασκευάζονται από διάφορα υλικά όπως το κόντρα πλακέ, το hardboard, η λαμαρίνα κ.α. Οι διατρήσεις μπορεί να είναι κυκλικές ή να έχουν σχήμα σχισμών. Κάθε οπή ή σχισμή λειτουργεί σαν αντηχείο Helmholtz. Η συχνότητα συντονισμού των διάτρητων επιφανειών δίνεται από τη σχέση 47.

Όταν είναι επιθυμητό να υπάρχει μέγιστη απορρόφηση σε διαφορετικές συχνότητες, χρησιμοποιούμε δυο ή περισσότερα είδη διατρήσεων στην ίδια επιφάνεια ή σε διαφορετικές επιφάνειες. Με την προσθήκη απορροφητικού υλικού κάτω από την διάτρητη επιφάνεια πλαταίνει η καμπύλη συντονισμού όπως και στους συντονιστές. Η διάτρηση μπορεί να είναι συμμετρική ή τυχαία. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι το ποσοστό της διάτρησης να μην υπερβαίνει το 20% γιατί τότε η επιφάνεια είναι διαφανής ως προς τον ήχο.

Κυκλικές οπές

Η συχνότητα συντονισμού για τις κυκλικές οπές δίνεται από τη σχέση,

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{L(l-\delta)}} \quad (48)$$

όπου P το ποσοστό διάτρησης, L η απόσταση της επιφάνειας από τον τοίχο, l το μήκος του λαιμού κάθε οπής σε m , $\delta=0.8d$ και d η διάμετρος του λαιμού

Σχισμές

Η συχνότητα συντονισμού για τις σχισμές δίνεται από τη σχέση,

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{L(l+Kb)}} \quad (49)$$

όπου $K = \frac{1}{\pi} + \frac{2}{\pi} \ln \frac{2a}{b}$ για την περίπτωση σχισμών πεπερασμένου μήκους

και $K = \frac{2}{\pi} \ln \left(\cos ec \frac{\pi}{2} P \right)$ για την περίπτωση σχισμών απείρου μήκους.

Οι διάτρητες επιφάνειες είναι ουσιαστικά ένας συνδυασμός των τριών τύπων απορροφητών που αναφέρθηκαν παραπάνω και συνήθως 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 απορροφητής. Οι οπές μειώνουν την απόδοση της μεμβράνης στις χαμηλές συχνότητες και την ενισχύουν στις μέσες. Επίσης μειώνουν την απόδοση των πορώδων υλικών στις υψηλές συχνότητες. Η απόδοση στις υψηλές συχνότητες βελτιώνεται με την επιλογή οπών μικρής διαμέτρου.

2.4 ΔΙΑΧΥΤΕΣ

Αν σε ένα χώρο η στάθμη ηχητικής πίεσης είναι ίση σε όλα τα σημεία του και τα ηχητικά κύματα κατευθύνονται προς όλες τις διευθύνσεις, τότε λέμε ότι το ηχητικό πεδίο είναι ομοιογενές ή διάχυτο.

Ένα ηχητικό πεδίο για να θεωρείται διάχυτο θα πρέπει να πληρεί τις παρακάτω προϋποθέσεις⁵ :

- Ο ρυθμός μείωσης της ηχητικής ενέργειας να είναι ομαλός μετά το μηδενισμό της πηγής.
- Ο ρυθμός μείωσης να είναι καθαρά εκθετικός (ή ευθεία γραμμή σε λογαριθμική κλίμακα).
- Ο χρόνος αντήχησης να είναι ο ίδιος σε όλες τις θέσεις του χώρου.
- Ο ρυθμός μείωσης του ήχου να είναι ο ίδιος ανεξάρτητα από τη συχνότητα.

⁵ Σκαρλάτος Δημήτρης (2005) Απορρόφηση – Διάχυση του ήχου. Εφαρμοσμένη Ακουστική. 2^η έκδοση. Πάτρα, Εκδόσεις Φιλομάθεια, σελ. 137-140.

- Ο ρυθμός μείωσης να μην εξαρτάται από την κατευθυντικότητα του χρησιμοποιούμενου μικροφώνου.
- Οι αποκλίσεις από την μόνιμη (Steady state) κατάσταση σε διαφορετικές συχνότητες να είναι αμελητέες.

Η επαρκής διάχυση του ήχου είναι ένα απαραίτητο χαρακτηριστικό για ορισμένους χώρους όπως αίθουσες συναυλιών, studio ηχογραφήσεων γιατί έτσι επιτυγχάνεται ομοιογενής κατανομή του ήχου με αποτέλεσμα την απόδοση των φυσικών χαρακτηριστικών της μουσικής και της ομιλίας.

Ένα πεδίο 100% διάχυτο είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί, ωστόσο μπορεί να προσεγγιστεί με ικανοποιητική ακρίβεια αν στο χώρο τοποθετηθούν ειδικές επιφάνειες που διαχέουν τον ήχο. Οι επιφάνειες αυτές έχουν διάφορα σχήματα (πυραμίδας, σφαίρας, πρίσματος κ.α.) με καθορισμένο βάθος που σχετίζεται με το μήκος κύματος του ήχου.

Όταν ένα ηχητικό κύμα πέσει πάνω σε ένα διαχυτή, το κάθε στοιχείο του (λόγω του διαφορετικού βάθους που έχει) θα δίνει διαφορετική καθυστέρηση στην φάση της ανακλώμενης ηχητικής ακτίνας. Σε σχετικά μεγάλη απόσταση από το διαχυτή, η συνιστάμενη ηχητική πίεση θα προέλθει από την συμβολή των επιμέρους ανακλάσεων. Εφόσον η φάση του κάθε ενός από αυτές είναι τυχαία, το αποτέλεσμα θα είναι η καταστροφή της κατευθυντικότητας της ανακλώμενης ακτίνας.

Όπως και οι απορροφητές έτσι και οι διαχυτές συνδέουν το μέγεθός τους με τις συχνότητες πάνω στις οποίες αναμένεται να επιδράσουν. Ένας διαχυτής χαμηλών συχνοτήτων απαιτείται να έχει βάθος ίσο με το ένα τέταρτο του μήκους κύματος για να διαχέει τον ήχο αποτελεσματικά.

2.4.1 ΔΙΑΧΥΤΕΣ ΤΥΠΟΥ SCHRÖEDER

Ο M. R. Schröder δημιούργησε ένα ακουστικό διαχυτή βασιζόμενος στη θεωρία αριθμών. Οι ακολουθίες μεγίστου μήκους που

χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ψευδο-τυχαίου θορύβου δημιουργούνται με ακολουθίες των +1 και -1. Το φάσμα ισχύος αυτού του θορύβου είναι ουσιαστικά επίπεδο. Πλατύ και επίπεδο φάσμα ισχύος έχει σχέση με συντελεστές και γωνίες ανάκλασης και το γεγονός αυτό δημιούργησε την ιδέα ότι η εφαρμογή των +1 και -1 σε ακολουθία μεγίστου μήκους θα έδινε ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Το -1 έδινε την αίσθηση της ανάκλασης από το βάθος μιας εγκοπής σε τοίχο, η οποία έχει βάθος ενός τετάρτου μήκους κύματος. Η ανάκλαση +1 είναι ανάκλαση από τον τοίχο χωρίς εγκοπή. Οι διαχυτές μεγίστου μήκους όμως έχουν πολλούς περιορισμούς και για αυτό ο Schröder δημιούργησε μια άλλη σειρά διαχυτών αυτού του τύπου.

Θεωρώντας ότι ένα ηχητικό κύμα το οποίο προσπίπτει πάνω σε ένα φράγμα φάσης ανάκλασης διαχέεται σχεδόν ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις, παίρνουμε τις φασικές ή χρονικές μετατοπίσεις με μια διάταξη φρεάτων με μέγιστο βάθος που καθορίζεται από το μεγαλύτερο μήκος κύματος που θα διαχυθεί. Το πλάτος του φρέατος είναι περίπου μισό μήκος κύματος στο μικρότερο μήκος κύματος που πρόκειται να διαχυθεί. Τα βάθη της ακολουθίας φρέατος καθορίζονται από την σχέση,

παράγων αναλογίας φρέατος = $n^2 \text{ modulo } p$

όπου p ο πρώτος αριθμός και n ακέραιος αριθμός μεταξύ μηδέν και απείρου.

Ο πρώτος αριθμός ορίζεται σαν ο αριθμός (εκτός 0 ή ±1) που δεν διαιρείται χωρίς υπόλοιπο από οποιονδήποτε άλλο αριθμό (εκτός του ±1 και του ± του ίδιου του αριθμού). Παραδείγματα τέτοιων αριθμών είναι το 5, το 7, το 11, το 13 κ.τ.λ. Το modulo αναφέρεται απλά στο υπόλοιπο.

Πίνακας 2.1 : Ακολουθίες τετραγωνικού υπολοίπου

Ακολουθίες τετραγωνικού υπολοίπου

n	p						
	5	7	11	13	17	19	23
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1
2	4	4	4	4	4	4	4
3	4	2	9	9	9	9	9
4	1	2	5	3	16	16	16
5	0	4	3	12	8	6	2
6		1	3	10	2	17	13
7		0	5	10	15	11	3
8			9	12	13	7	18
9			4	3	13	5	12
10			1	9	15	5	8
11			0	4	2	7	6
12				1	8	11	6
13				0	16	17	8
14					9	6	12
15					4	16	18
16					1	9	3
17					0	4	13
18						1	2
19						0	16
20							9
21							4
22							1
23							0

Βάθος φρέατος ή αναλογία = $n^2 \text{ modulo } p$
 n = ακέραιος
 p = πρώτος αριθμός

Παρακάτω βλέπουμε έναν διαχυτή τετραγωνικού υπολοίπου μιας διάστασης (Φωτογραφία 1) και έναν διαχυτή τετραγωνικού υπολοίπου δυο διαστάσεων (Φωτογραφία 2).



Φωτογραφία 1: 1D Q.R.D



Φωτογραφία 2 : 2D Q.R.D

2.4.2 ΔΙΑΧΥΤΕΣ ΠΡΩΤΕΥΟΥΣΑΣ ΡΙΖΑΣ

Οι διαχυτές πρωτεύουσας ρίζας χρησιμοποιούν διαφορετική ακολουθία της θεωρίας των αριθμών, ως εξής,

Παράγων αναλογίας βάθους φρέατος = $g^n \text{ modulo } p$
 όπου p ο πρώτος αριθμός και g η ελάχιστη πρωτεύουσα ρίζα του p .

Ο πίνακας που ακολουθεί περιλαμβάνει ακολουθίες πρωτεύουσας ρίζας για έξι διαφορετικούς συνδυασμούς των p και g . Παρατηρούμε ότι τα σχήματα στο κάτω μέρος της κάθε στήλης δεν είναι συμμετρικά όπως στους διαχυτές τετραγωνικού υπολοίπου.

Πίνακας 2.2 : Ακολουθίες πρωτεύουσας ρίζας

Ακολουθίες πρωτεύουσας ρίζας

n	$p=5$ $g=2$	$p=7$ $g=3$	$p=11$ $g=2$	$p=13$ $g=2$	$p=17$ $g=3$	$p=19$ $g=2$
1	2	3	2	2	3	2
2	4	2	4	4	9	4
3	3	6	8	3	10	8
4	1	4	5	3	13	16
5		5	10	6	5	13
6		1	9	12	15	7
7			7	10	11	14
8			3	9	16	9
9			6	5	14	18
10			1	10	8	17
11				7	7	15
12				1	4	11
13					12	3
14					2	6
15					6	12
16					1	5
17						10
18						1

Βάθος φρέατος ή αναλογία = $g^n \text{ modulo } p$

p = πρώτος αριθμός

g = ελάχιστη πρωτεύουσα ρίζα του p

Ένα ακουστικό πρόβλημα με τους διαχυτές πρωτεύουσας ρίζας είναι ότι ο κατοπτρικός τρόπος ταλάντωσης δεν καταπνίγεται τόσο καλά όσο με χρήση διαχυτών τετραγωνικού υπολοίπου.

Στη φωτογραφία παρακάτω βλέπουμε ένα διαχυτή πρωτεύουσας ρίζας.



Φωτογραφία 3 : Διαχυτής πρωτεύουσας ρίζας

Βιβλιογραφικές αναφορές

Everest F. Alton (1998) Εγχειρίδιο Ακουστικής, 3^η Έκδοση. Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Τζιόλα.

Σκαρλάτος Δημήτρης (2005) Εφαρμοσμένη Ακουστική, 2^η έκδοση. Πάτρα, Εκδόσεις Φιλομάθεια.

Newell Philip (2003) Recording Studio Design, First Published 2003, Reprinted 2004. Burlington, Focal Press.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

3.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΝΟΣ STUDIO ΗΧΟΓΡΑΦΗΣΕΩΝ

Μερικά στοιχεία τα οποία χαρακτηρίζουν ένα επαγγελματικό studio ηχογραφήσεων, εκτός βέβαια από την ποιότητα του εξοπλισμού που διαθέτει, αναφέρονται παρακάτω⁶.

- Η δυνατότητα να βρίσκεται σε συνεχή 24ωρη λειτουργία τις επιθυμητές ώρες, χωρίς να ενοχλεί τους περίοικους ή να ενοχλείται από αυτούς.
- Ένα studio ηχογράφησης θα πρέπει να εκτελεί το ημερήσιο πρόγραμμα του χωρίς καθυστερήσεις.
- Ένας επαγγελματικός χώρος ηχογράφησης θα πρέπει να δίδει μια αίσθηση σιγουριάς σε όσους εμπλέκονται σε κάθε ηχογράφηση, μουσικούς και τεχνικούς.
- Η ποιότητα της κάθε ηχογράφησης δεν θα πρέπει να περιορίζεται από τυχόν ατέλειες στο σχεδιασμό της ηχητικής εγκατάστασης.
- Στο χώρο ενός studio ηχογράφησης θα πρέπει να υπάρχει συνεχής και επαρκής παροχή φρέσκου αέρα καθώς και κατάλληλη θερμοκρασία.

Αναλύοντας λίγο περισσότερο τους παραπάνω παράγοντες, θα αρχίσουμε με τον πρώτο από αυτούς, την ηχομόνωση. Ο περισσότερο προφανής λόγος που επιδιώκουμε ένα σωστά ηχομονωμένο studio ηχογραφήσεων είναι η αποφυγή παρενοχλήσεων στους περίοικους από ήχους που παράγονται εντός του χώρου κατά τη διάρκεια των ηχογραφήσεων. Επιπροσθέτως, ένα σωστά ηχομονωμένο studio ηχογραφήσεων αποτρέπει εξωτερικούς θορύβους να εισέλθουν στο

⁶ Newell Phillip (2003) General requirements and common errors. Recording Studio Design. Focal Press. United States of America. pp 1-2.

περιβάλλον του. Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι η ηχομόνωση ορίζει και το δυναμικό εύρος λειτουργίας του studio.

Όταν επιλέγεται ένας χώρος για να στεγάσει ένα studio ηχογραφήσεων, το πρώτο πράγμα που θα πρέπει να ελεγχθεί είναι εάν το όλο οικοδόμημα είναι αρκετά γέρο για να υποστηρίξει το βάρος της κατασκευής του studio. Επιπλέον, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι μετά την τοποθέτηση των απαιτούμενων ηχομονωτικών υλικών, ο ήδη υπάρχων χώρος θα περιοριστεί. Κατά συνέπεια ένας χώρος ο οποίος προορίζεται για να στεγάσει ένα studio ηχογράφησης θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος.

3.2 ΣΤΑΘΜΗ ΘΟΡΥΒΟΥ ΒΑΘΟΥΣ ΣΕ ΕΝΑ STUDIO ΗΧΟΓΡΑΦΗΣΕΩΝ

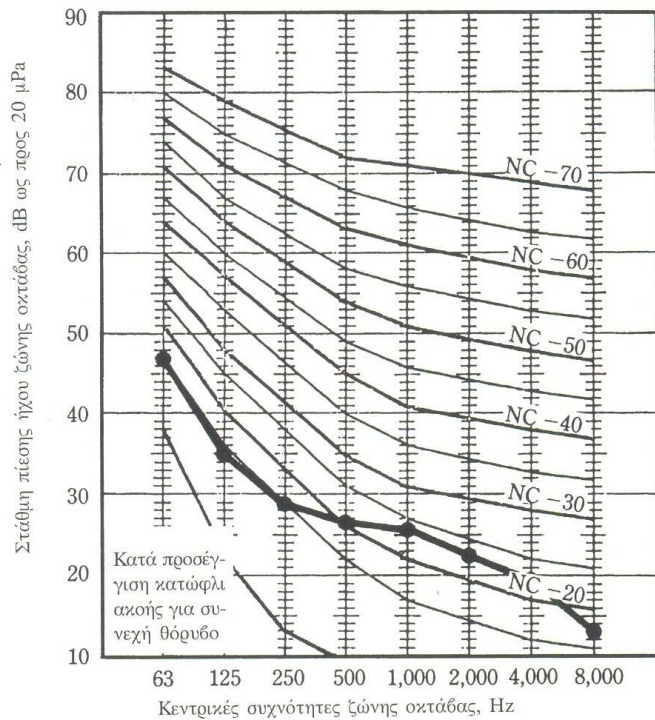
Η στάθμη θορύβου βάθους σε studio ηχογραφήσεων, σε δωμάτια ελέγχου αλλά και σε δωμάτια ακρόασης θα πρέπει να διατηρείται υπό έλεγχο εάν θέλουμε αυτά να χαρακτηρίζονται ως ποιοτικά. Μέσα σε ένα studio ηχογραφήσεων, οι ηχητικές παρεμβολές μπορεί να προέρχονται από τον εξοπλισμό του δωματίου ελέγχου που λειτουργεί σε υψηλές στάθμες ή από άλλα μηχανήματα που λειτουργούν σε κοντινές περιοχές. Αναφορικά με το δωμάτιο ελέγχου, ο θόρυβος δημιουργείται από τα μηχανήματα ηχογράφησης και τους ανεμιστήρες ψύξης αλλά πολλές φορές ο θόρυβος εισέρχεται από το εξωτερικό περιβάλλον. Μια άλλη πηγή θορύβου είναι ο ήχος από τους διαχυτές ή τις γρίλιες κλιματισμού.

Η σημαντικότερη απόφαση σχετικά με το θόρυβο βάθους είναι η επιλογή του στόχου για την στάθμη θορύβου. Η προσέγγιση στο θέμα αυτό περιέχεται στις καμπύλες *Σταθμισμένου Κριτηρίου Θορύβου (Balanced Noise Criterion, BNC)*. 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 της 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.

Παρακολουθώντας το σχήμα που ακολουθεί βλέπουμε ότι η κλίση των καμπυλών δείχνει, από την μια την μικρότερη ευαισθησία του ανθρώπινου αυτιού στις χαμηλές συχνότητες και από την άλλη το γεγονός ότι οι περισσότεροι θόρυβοι με κατανεμημένη ενέργεια εξασθενούν



Σχήμα 3.1 : BNC καμπύλες

Θέλοντας να καθορίσουμε αν ο θόρυβος σε δεδομένο δωμάτιο ικανοποιεί την επιλεγμένη καμπύλη, λαμβάνουμε ενδείξεις της στάθμης πίεσης ήχου ανά οκτάβα και σχεδιάζουμε την γραφική παράσταση όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα.

Λαμβάνοντας υπόψη της δραστηριότητες και το σκοπό λειτουργίας ενός studio ηχογραφήσεων, η καμπύλη BNC-20 θα πρέπει να είναι το υψηλότερο περίγραμμα που θα έχουμε ως στόχο ενώ η καμπύλη BNC-10 είναι ιδανική για ένα τέτοιο χώρο αν και είναι δύσκολα πραγματοποιήσιμη.

3.3 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΟΥΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΕΝΟΣ ΜΙΚΡΟΥ ΧΩΡΟΥ ΓΙΑ ΔΩΜΑΤΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ (CONTROL ROOM)

Ένα δωμάτιο ελέγχου, για να θεωρηθεί ως μικρό, θα πρέπει οι διαστάσεις του να είναι μεταξύ 24 και 40 τετραγωνικών μέτρων (m²). Όταν ένας χώρος, μέσα σε αυτά τα όρια, επιλεγεί ως δωμάτιο ελέγχου θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι παρακάτω παράγοντες.

Οι ανακλάσεις που επιστρέφουν από τους τοίχους και τις επιφάνειες των συσκευών, φτάνουν γρηγορότερα απ' ό τι σε ένα μεγαλύτερο δωμάτιο, επειδή διανύουν μικρότερη απόσταση. Επιπλέον, τα ηχητικά κύματα ανακλώνται συχνότερα, συνεπώς στα μικρά δωμάτια οι ανακλάσεις είναι περισσότερες απ' ό τι στα μεγάλα. Αυτές οι ανακλάσεις, οι οποίες επιστρέφουν γρηγορότερα, έχοντας μεγαλύτερη ενέργεια, τείνουν να αναμειγνύονται με τον απευθείας ήχο, να χρωματίζουν τον ήχο των ηχείων και να καταστρέφουν την στερεοφωνική εικόνα.

Τα προβλήματα που προκύπτουν λόγω των ανακλάσεων θα πρέπει να αντιμετωπίζονται με μέσα όπως οι διαχυτές και οι απορροφητές. Σε μικρά δωμάτια είναι δυσκολότερη η τοποθέτηση απορροφητικών και διαχυτικών υλικών μιας και οι επιφάνειες είναι περιορισμένες και τα προβλήματα, από ακουστικής πλευράς, είναι δυσκολότερο να αντιμετωπιστούν. Στα μικρά δωμάτια είναι προτιμότερη η χρήση απορροφητών μιας και οι διαχυτές διατηρούν την στερεοφωνική εικόνα σε μεγαλύτερη περιοχή και επιτρέπουν την επιστροφή μεγαλύτερου ποσοστού ενέργειας στη θέση ακρόασης, πράγμα που χρωματίζει τον ήχο των ηχείων.

Τα ανακλώμενα ηχητικά κύματα που επιστρέφουν στη θέση ακρόασης, τείνουν να είναι μεγαλύτερα σε ένταση μιας και έχουν διανύσει μικρότερη απόσταση. Υπάρχει λοιπόν μεγαλύτερη πιθανότητα να επεμβαίνουν στο απευθείας σήμα των ηχείων. Η επαρκής απορρόφηση συμβάλλει στην εξασθένιση των κανονικών ιδιορυθμών

του δωματίου και στη διεύρυνση της συχνοτικής τους εξάπλωσης. Αυτά τα φαινόμενα οδηγούν σε μικρότερο χρωματισμό του ήχου.

Τα δωμάτια με περιορισμένο χώρο δίνουν μικρά περιθώρια τοποθέτησης απορροφητικών υλικών ή διαχυτών μιας και το βάθος των οπών ενός απορροφητή ή διαχυτή είναι δεδομένο, ανάλογα με τη συχνότητα που καλείται να επέμβει.

3.4 Ο ΧΩΡΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ (CONTROL ROOM) ΕΝΟΣ STUDIO ΗΧΟΓΡΑΦΗΣΕΩΝ

Ο χώρος ελέγχου αποτελεί ένα ιδανικό περιβάλλον αναπαραγωγής και ακρόασης του ήχου. Έχοντας σαν στόχο την αναπαραγωγή του ηχητικού υλικού με τη μεγαλύτερη δυνατή πιστότητα, ο χώρος ελέγχου θα πρέπει να έχει σχεδιαστεί και κατασκευασθεί σωστά σ' ότι αφορά το σχήμα, τις διαστάσεις, την τοποθέτηση των διάφορων ηχοαπορροφητικών υλικών αλλά και την τοποθέτηση των ηχείων.

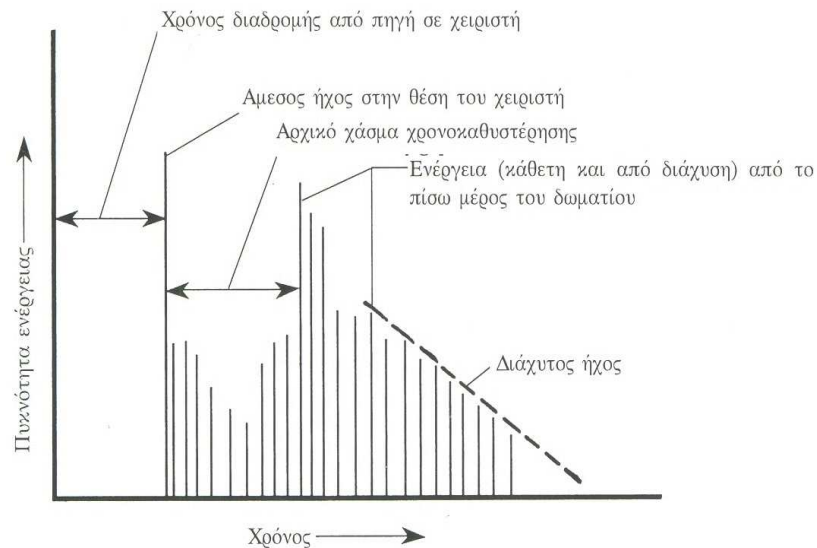
Το σχήμα του δωματίου και οι διαστάσεις παίζουν σπουδαίο ρόλο στην κατανομή των κανονικών ιδιορυθμών του δωματίου και η σωστή κατανομή τους στο χώρο αποτελεί έναν από τους βασικότερους κανόνες στο σχεδιασμό ενός χώρου ελέγχου. Με την έκφραση «σωστή κατανομή των κανονικών ιδιορυθμών του δωματίου» εννοούμε ότι οι συχνότητες συντονισμού του χώρου οι οποίες αναπτύσσονται λόγω των διαστάσεων και του σχήματος του χώρου θα πρέπει να καλύπτουν ομοιόμορφα τη ζώνη συχνοτήτων μεταξύ 20 – 300 Hz, χωρίς να παρουσιάζονται μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους ή να συμπίπτουν πολλοί τρόποι δόνησης σε μια συγκεκριμένη συχνότητα.

3.5 Η ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΤΟΥ ΔΩΜΑΤΙΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ (CONTROL ROOM)

3.5.1 ΤΟ ΑΡΧΙΚΟ ΧΑΣΜΑ ΧΡΟΝΟΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ (INITIAL TIME DELAY GAP)

Ο χώρος μέσα στον οποίο πραγματοποιείται μια ηχογράφιση αποτελεί σημαντικό στοιχείο της. Σε σχετική έρευνα που διεξήχθη σε αίθουσες συναυλιών⁷ παρατηρήθηκε ότι εκείνες που εκτιμούνταν περισσότερο από τους μουσικούς είχαν ορισμένες τεχνικές ομοιότητες. Μια από αυτές τις ομοιότητες είναι και αυτό που ονομάστηκε αρχικό χάσμα χρονοκαθυστέρησης (initial time delay gap). Ο όρος που προαναφέρθηκε αναφέρεται στη διαφορά χρόνου άφιξης του απευθείας ήχου της πηγής και στο χρόνο άφιξης των πρώτων ανακλάσεων. Αξίζει να αναφερθεί ότι οι αίθουσες που χαρακτηρίστηκαν ως καλές από άποψη ακουστικής συμπεριφοράς διέθεταν ένα συγκεκριμένο χάσμα χρονοκαθυστέρησης ίσο με 20 msec περίπου.

Το σχήμα που ακολουθεί βοηθά στην κατανόηση του αρχικού χάσματος χρονοκαθυστέρησης :

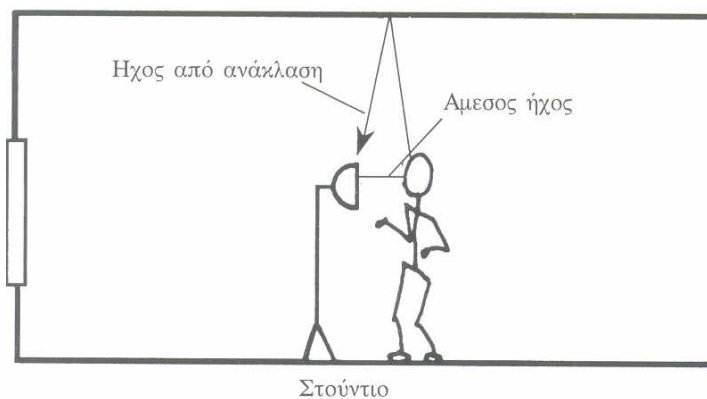


Σχήμα 3.2 : Αρχικό χάσμα χρονοκαθυστέρησης

Σε μια δεύτερη έρευνα που επικεντρώθηκε στη μελέτη του φαινομένου του αρχικού φάσματος χρονοκαθυστέρησης σε studio ηχογραφήσεων

⁷ Beranek L. L. (1962) Music, Acoustics and Architecture.

και δωμάτια ελέγχου⁸ παρουσιάστηκαν οι παράγοντες που δημιουργούν το αρχικό χάσμα χρονοκαθυστέρησης σε ένα studio ηχογραφήσεων. Με τη βοήθεια του σχήματος που ακολουθεί,



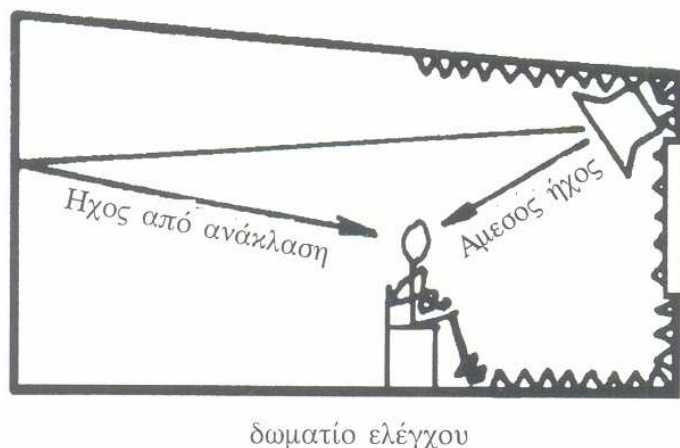
Σχήμα 3.3 : Άμεσος ήχος και ήχος από ανάκλαση

παρατηρούμε ότι ο άμεσος ήχος κινείται σε μικρή απόσταση από την πηγή μέχρι το μικρόφωνο. Επιπροσθέτως, ο ήχος που ανακλάται από το πάτωμα, την οροφή και από άλλα κοντινά αντικείμενα φτάνει στο μικρόφωνο. Το χρονικό χάσμα μεταξύ του απευθείας και του ανακλώμενου ήχου καθορίζεται από την συγκεκριμένη γεωμετρική διάταξη του κάθε studio ηχογραφήσεων. Το χάσμα καθυστέρησης σε ένα studio, αν και είναι διαφορετικό σε κάθε περίπτωση, βρίσκεται μέσα σε αρκετά στενή περιοχή τιμών.

Σε ένα συμβατικό δωμάτιο ελέγχου, ο μηχανικός ήχου δεν μπορεί να ακούσει το αρχικό χάσμα χρονοκαθυστέρησης του studio επειδή αυτό καλύπτεται από τις πρώτες ανακλάσεις στο δωμάτιο ελέγχου. Η ίδια έρευνα έδειξε ότι ο τρόπος για να επιτραπεί στον μηχανικό ήχου να ακούσει το χάσμα χρονοκαθυστέρησης ήταν με την εξάλειψη ή την ελάττωση των πρώτων ανακλάσεων στο δωμάτιο ελέγχου. Η συγκεκριμένη έρευνα αποκάλυψε και τα φαινόμενα φίλτρου κτένας που δημιουργούνται από ανακλάσεις σε επιφάνειες κοντά στα μεγάφωνα και από την πρόσοψη της κονσόλας.

⁸ Davis Don (1979) The role of the Initial Time Delay Gap in the acoustic design of control rooms for recording and reinforcing systems. 64th Convention, Audio Eng. Soc.

Αυτή η διευκρίνιση του προβλήματος οδήγησε στην λύση της τοποθέτησης απορροφητικού υλικού στις επιφάνειες γύρω από τα μεγάφωνα στο εμπρός μέρος του δωματίου ελέγχου.



Σχήμα 3.4 : Δωμάτιο ελέγχου και ανακλάσεις στη θέση του ηχολήπτη

3.5.2 Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΔΩΜΑΤΙΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

Η περιοχή συχνοτήτων σε ένα δωμάτιο ελέγχου είναι αρκετά μεγάλη και κάθε εξάρτημα το οποίο εξαρτάται από τη συχνότητα θα πρέπει να εκτελεί τη λειτουργία του στην περιοχή αυτή. Η συνήθως αποδεκτή συχνοτική περιοχή υψηλής πιστότητας είναι από 20 Hz έως 20 kHz σε έκταση 10 οκτάβων ή 3 δεκάδων. Η περιοχή αυτή αντιπροσωπεύει μια περιοχή μηκών κύματος από περίπου 17.5 μέτρα έως 1.5 εκατοστά. Το κάθε δωμάτιο ελέγχου θα πρέπει να κατασκευάζεται με βάση αυτό το γεγονός.

Η χαμηλότερη συχνότητα τρόπων ταλάντωσης έχει σχέση με τη μεγαλύτερη διάσταση του δωματίου, η οποία είναι η διαγώνιος. Κάτω από τη συχνότητα αυτή δεν υπάρχει υποστήριξη του ήχου με συντονισμό από τους κανονικούς ιδιορυθμούς του δωματίου. Επιπροσθέτως, κάτω από την συχνότητα αυτή η απόκριση του δωματίου πέφτει απότομα και μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο,

$$\frac{c}{2L} = f \quad (50)$$

όπου $c = 344 \text{ m/s}$ και L η διαγώνιος του δωματίου.

3.5.3 ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΚΑΙ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΛΗΜΑ ΤΟΥ ΔΩΜΑΤΙΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

Το μέγεθος, το σχήμα και οι αναλογίες του εξωτερικού περιβλήματος του δωματίου ελέγχου καθορίζουν το πλήθος των κανονικών ιδιορυθμών αλλά και τη διανομή τους στο χώρο. Υπάρχουν δυο απόψεις σχετικά με αυτό το θέμα. Η μια προτείνει στρέβλωση των τοίχων του εξωτερικού περιβλήματος με στόχο την διάσπαση των τρόπων ταλάντωσης ενώ η άλλη προτιμά το ορθογώνιο σχήμα. Δυνατή όμως είναι μόνο μια μέτρια απόκλιση από το ορθογώνιο σχήμα προς ένα τραπεζοειδές σχήμα. Αυτό δεν απαλλάσσει από τις μορφές των κανονικών ιδιορυθμών του δωματίου αλλά τις παραμορφώνει σε απρόβλεπτη μορφή. Το σίγουρο είναι ότι για να περικλείσουμε την ηχητική ενέργεια χαμηλών συχνοτήτων που έχει σχέση με τις δραστηριότητες του δωματίου ελέγχου, χρειάζονται παχύς τοίχοι, πιθανότατα από μπετόν της τάξης των 30 εκατοστών.

Το εσωτερικό περίβλημα του δωματίου ελέγχου έχει ως στόχο να παρέχει στον ηχολήπτη το κατάλληλο σχήμα ανακλάσεων. Συνεπώς η κατασκευή του μπορεί να είναι σχετικά ελαφριά. Το κυριότερο χαρακτηριστικό του εσωτερικού περιβλήματος είναι το σχήμα του.

3.6 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΝΑΛΟΓΙΩΝ ΟΡΘΟΓΩΝΙΩΝ ΔΩΜΑΤΙΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ

3.6.1 ΑΝΑΛΟΓΙΕΣ ΔΩΜΑΤΙΟΥ ΟΡΘΟΓΩΝΙΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ

Σε κάθε περίπτωση όπου θέλουμε να επιτύχουμε επαρκή κατανομή των ιδιορυθμών, θα πρέπει να δώσουμε μεγάλη έμφαση στις αναλογίες του δωματίου. Είναι δεδομένο ότι τα δωμάτια σε σχήμα κύβου είναι η χειρότερη επιλογή, μιας και οι τρεις τύποι ιδιορυθμών συμπίπτουν αλλά και έχουν μεγάλη απόσταση μεταξύ τους. Ωστόσο πολλοί ερευνητές έχουν προτείνει αναλογίες οι οποίες, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των

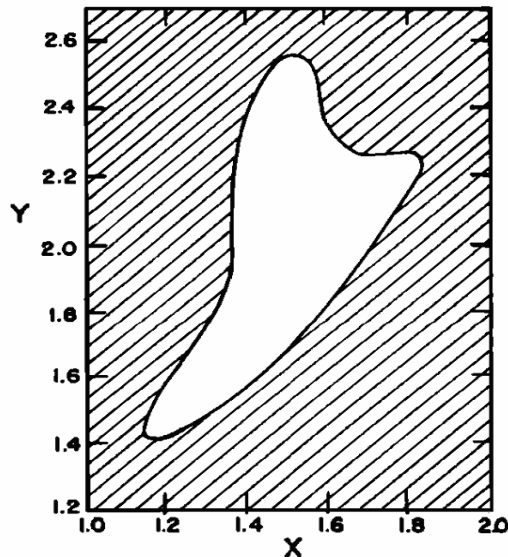
ερευνών τους, είναι ιδανικές. Ο πίνακας που ακολουθεί είναι ενδεικτικός αυτών των αναλογιών και χρησιμοποιείται ως βάση, όπου οι αναλογίες του δωματίου είναι μείζονος σημασίας.

Πίνακας 3.1: Αναλογίες ορθογώνιων δωματίων ελέγχου

	Ύψος	Πλάτος	Μήκος
Sepmeyer	1.00	1.14	1.39
	1.00	1.28	1.54
	1.00	1.60	2.33
Louden	1.00	1.40	1.90
	1.00	1.30	1.90
	1.00	1.50	2.50
Volkman	1.00	1.50	2.50
Boner	1.00	1.26	1.59

Συμπληρωματικά του πίνακα αυτού, το σχήμα που ακολουθεί ορίζει με ένα διαφορετικό τρόπο τις ιδανικές αναλογίες ενός ορθογωνίου δωματίου⁹. Θέλοντας να χρησιμοποιήσουμε το παρακάτω σχήμα θα πρέπει να βρούμε τη μια διάσταση (μήκος ή πλάτος) στον γ άξονα, έπειτα την διάσταση που υπολείπεται στον x άξονα. Εάν το σημείο ένωσης των δυο αριθμών βρίσκεται μέσα στην λευκή περιοχή τότε οι διαστάσεις του δωματίου θεωρούνται ιδανικές. Σημειώνουμε ότι σε μερικές περιπτώσεις είναι πιθανό οι διαστάσεις του δωματίου να είναι ιδανικές σύμφωνα με το σχήμα αλλά να μην συμφωνούν με το κριτήριο Bonello που αναφέρεται στην παράγραφο που ακολουθεί.

⁹ Bolt R. H. (1946) Note on Normal Frequency Statistics for Rectangular Rooms. J. Acous. Soc. Am., 18,1, pp. 130-133.



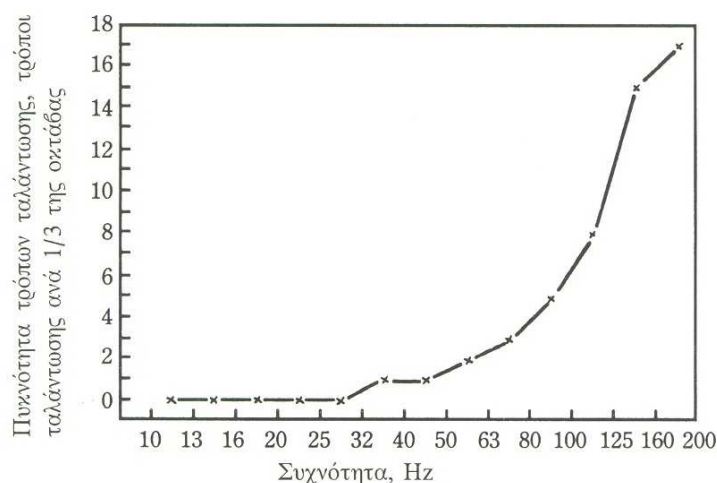
Σχήμα 3.5: Το διάγραμμα Bolt

3.6.2 TO ΚΡΙΤΗΡΙΟ BONELLO

Το συγκεκριμένο κριτήριο προσδιορισμού των αναλογιών ενός ορθογωνίου δωματίου βασίζεται στον υπολογισμό, με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, της κατανομής των κανονικών ιδιορυθμών ενός δωματίου. Βρίσκει χρήση σε κάθε περίπτωση όπου απαιτείται η ακριβής κατασκευή ενός δωματίου με στόχο την ποιοτική ακρόαση.

Η μέθοδος αυτή λειτουργεί ως εξής : αρχικά χωρίζεται το κάτω άκρο του ακουστού φάσματος σε ζώνες με πλάτος μιας οκτάβας και θεωρείται το πλήθος των τρόπων ταλάντωσης σε κάθε ζώνη κάτω από 200 Hz. Οι ζώνες οκτάβας επιλέγονται γιατί, κατά προσέγγιση, είναι οι κρίσιμες ζώνες του ανθρώπινου αυτιού. Στη συνέχεια εισάγονται όλοι οι τρόποι δόνησης του δωματίου (αξονικοί, εφαπτομενικοί και πλάγιοι) σε σχέση με την συχνότητα και εξετάζεται εάν η συγκεκριμένη καμπύλη που σχηματίζεται αυξάνει μονοτονικά. Κάθε 1/3 της οκτάβας θα πρέπει να έχει περισσότερους τρόπους δόνησης από την προηγούμενη ή τουλάχιστον το ίδιο πλήθος για να ικανοποιείται το κριτήριο Bonello. Δεν θα πρέπει να υπάρχει σύμπτωση κανονικών ιδιορυθμών εκτός και αν στη ίδια ζώνη υπάρχουν τουλάχιστον πέντε τρόποι ταλάντωσης.

Εφαρμόζοντας τις παραμέτρους που αναφέρονται παραπάνω σε ορθογώνιο δωμάτιο συγκεκριμένων διαστάσεων θα πρέπει η καμπύλη που θα σχηματιστεί να έχει τη μορφή που παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 3.6: Παράμετροι του κριτηρίου Bonello

3.7 ΕΙΔΗ ΔΩΜΑΤΙΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ (CONTROL ROOM)

3.7.1 ΔΩΜΑΤΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΒΑΣΙΣΜΕΝΑ ΣΤΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

Η προσπάθεια για τη δημιουργία δωματίων ελέγχου συγκεκριμένου σχεδίου ξεκίνησε περίπου το 1970. Ο στόχος ήταν η δημιουργία control rooms όπου τα χαρακτηριστικά της κάθε ηχογράφησης δεν θα άλλαζαν ανάλογα με το χώρο όπου γινόταν η ακρόαση. Μια από τις πρώτες προσπάθειες να δημιουργηθεί ένα συγκεκριμένου τύπου control room έγινε από τον Tom Hidley στο Westlake Audio της Καλιφόρνια, Η.Π.Α. Ο σχεδιασμός ήταν βασισμένος στην παντελή έλλειψη παράλληλων επιφανειών, για την τέλεια εξάλειψη των αξονικών στασίμων κυμάτων τα οποία και περιέχουν το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας. Αυτού του τύπου τα δωμάτια ελέγχου ήταν σχεδιασμένα ώστε να έχουν χρόνο αντήχησης μικρότερο από 0.3 sec.

Χαρακτηριστικό τους η τοποθέτηση μεγάλων ηχοπαγίδων σε μια προσπάθεια να συνδυαστούν οι χρόνοι αντήχησης χαμηλών και μεσαίων συχνοτήτων έτσι ώστε να αποφευχθούν στάσιμα κύματα χαμηλής συχνότητας.

3.7.2 ΔΩΜΑΤΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΥΠΟΥ JENSEN

Παράλληλα, στα μέσα του 1970 στην Ευρώπη, κατασκευάστηκαν από τον W.W Jensen δωμάτια ελέγχου με τα εξής χαρακτηριστικά:

Χρήση «πριονωτών» απορροφητών, οι οποίοι απορροφούν το μεγαλύτερο μέρος του ήχου που εκπέμπεται από τα ηχεία. Στα δωμάτια αυτά υπήρχαν ανακλαστικές επιφάνειες τοποθετημένες σε τέτοιες γωνίες ώστε να ανακλούν ήχους που δημιουργούνται μέσα στο δωμάτιο, όπως ομιλίες. Αυτές οι ανακλαστικές επιφάνειες όμως δεν ανακλούσαν τον ήχο που προέρχονταν από τα ηχεία. Ο πίσω τοίχος ήταν συνήθως ανακλαστικός, παρόλο που στα περισσότερα από τα control room που κατασκευάστηκαν με αυτή τη μέθοδο, ο πίσω τοίχος ήταν περισσότερο απορροφητικός.

Το ενδιαφέρον που παρατηρείται σε αυτού του τύπου τα δωμάτια είναι το ότι έκαναν ξεκάθαρη τη διαφορά μεταξύ των ακουστικών συνθηκών που απαιτούνται για την ακρόαση (ουδέτερος χαρακτήρας του δωματίου) και των ακουστικών συνθηκών που απαιτούνται έτσι ώστε να δίνεται η αίσθηση της άνεσης μέσα στο δωμάτιο (σχετικά «ζωντανός» χαρακτήρας του δωματίου).

Σε αυτού του είδους τα δωμάτια χρησιμοποιούνταν συνήθως ηχεία εντοιχισμένα στον εμπρόσθιο τοίχο (build-in monitor), κατασκευασμένα ειδικά για τις ανάγκες του χώρου.

3.7.3 ΤΟ NON-ENVIRONMENT ΔΩΜΑΤΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ

Τη δεκαετία του '70 και μετά την εμφάνιση της στερεοφωνίας, εισήχθη ένας νέος τρόπος κατασκευής δωματίων ελέγχου. Σύμφωνα με

αυτόν τον τρόπο κατασκευής ο μπροστά τοίχος(συνήθως από πέτρα) και το πάτωμα ήταν υψηλά ανακλαστικές επιφάνειες ενώ το πίσω μέρος του δωματίου, οι πλαϊνοί τοίχοι και το ταβάνι ήταν υψηλά απορροφητικές επιφάνειες. Επίσης, ο μπροστά τοίχος, οι πλαϊνοί τοίχοι καθώς και το ταβάνι κατασκευάζονταν με μια ελαφριά κλίση για την αποφυγή φαινομένων τρεμοπαιξίματος ηχούς (flutter echoes). Τυπικοί χρόνοι αντήχησης(T_{60}) για ένα τέτοιου τύπου control room είναι 380 ms για ένα δωμάτιο με όγκο 100 m³ και 430 ms για ένα δωμάτιο συνολικού όγκου 200 m³.

Οι δυο ανακλαστικές επιφάνειες, εμπρός τοίχος και πάτωμα, μαζί με τις σκληρές επιφάνειες των συσκευών του εξοπλισμού παρέχουν ως ένα βαθμό, ένα «ζωντανό» περιβάλλον για τους ήχους που παράγονται μέσα στο δωμάτιο, μειώνοντας την αίσθηση του ανηχοϊκού θαλάμου. Ο εμπρός τοίχος λειτουργεί ως ένα διαχωριστικό έναντι του οποίου μπορούν τα ηχεία να πιέζουν βοηθώντας στην αποδοτικότερη και ομαλότερη διασπορά των χαμηλών συχνοτήτων .

Τα ηχεία βρίσκονταν ενσωματωμένα στον εμπρός τοίχο (build-in monitor) με στόχο την μείωση των ανακλάσεων από τα άκρα και θεωρούνταν ως στοιχείο της περιμέτρου του χώρου. Επιπροσθέτως, με την τοποθέτηση των ηχείων σε αυτό το σημείο μειώνονται τα φαινόμενα φίλτρου κτένας (comb filtering) μεταξύ των ηχείων και των πρώτων ανακλάσεων από τον μπροστά τοίχο. Κατά συνέπεια, η ενσωμάτωση των ηχείων στον τοίχο εξαλείφει κάθε ανομοιομορφία στην απόκριση των που μπορεί να προκαλείται από την καμπύνα ή από τη διαφορά διαδρομής μεταξύ του απευθείας ήχου από τα ηχεία και των χαμηλής συχνότητας ηχητικών κυμάτων που ανακλώνται από τον τοίχο που βρίσκεται πίσω από τα ηχεία όταν αυτά δεν είναι ενσωματωμένα.

Εκτός από το πάτωμα και τις συσκευές του εξοπλισμού, τα ηχεία «βλέπουν» σε ένα ημι-ανηχοϊκό θάλαμο. Τα ακουστικά λοιπόν χαρακτηριστικά του δωματίου εξαρτώνται από το αν ο ήχος παράγεται μέσα στο δωμάτιο ή από κάποιο σημείο της περιμέτρου του. Τυχόν

προβλήματα ανακλάσεων από τα ηχητικά κύματα που προσπίπτουν στις συσκευές, μπορούν να αντιμετωπιστούν με την τοποθέτηση αυτών με κατάλληλη κλίση. Ο στόχος σε αυτού του είδους τα δωμάτια είναι η ακρόαση του ηχητικού υλικού από τα ηχεία και τίποτα περισσότερο.

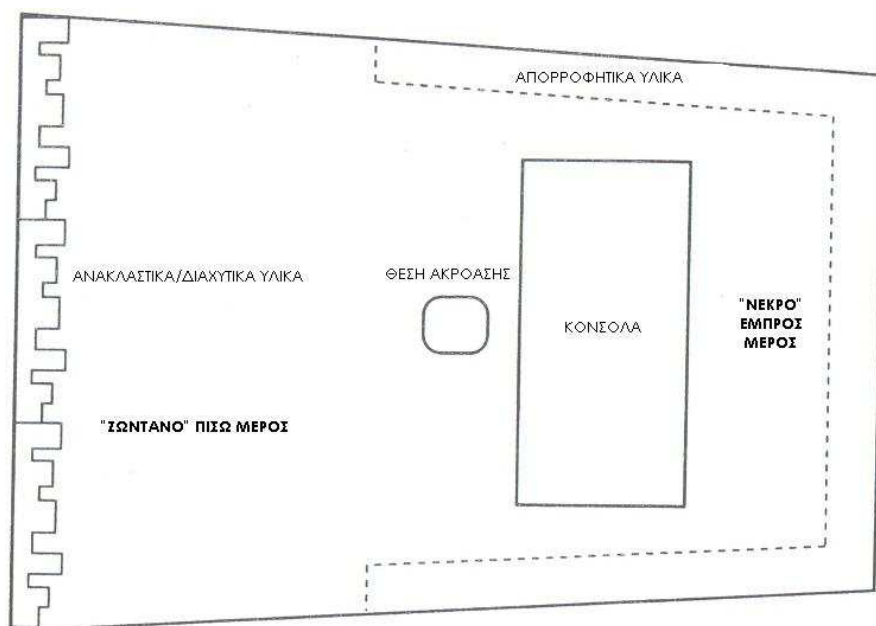
Με την αύξηση της απορρόφησης μέσα στο δωμάτιο και την μείωση των ανακλάσεων, το ποσοστό του απευθείας ήχου σε σχέση με τον ανακλώμενο ήχο αυξάνεται. Κατά συνέπεια ο «χρωματισμός» του ήχου μειώνεται. Η ακρόαση όμως μέσα σε ένα τέτοιο δωμάτιο έρχεται σε αντίθεση και δεν συμβαδίζει με την ακρόαση του ηχητικού υλικού στον οικιακό χώρο. Τέλος θα πρέπει να αναφερθεί ότι δεν υπήρχε καμία συμβατότητα μεταξύ δυο ίδιας κατασκευής δωματίων και η χρήση EQ δεν βοήθησε στην ακουστική βελτίωση του χώρου.

3.7.4 ΔΩΜΑΤΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΥΠΟΥ LIVE-END, DEAD-END (LEDE)

Προς το τέλος της δεκαετίας του '70 άρχισε να ερευνάται η δημιουργία ενός δωματίου ελέγχου του οποίου ο σχεδιασμός βασίζεται, σε μεγάλο βαθμό, σε ψυχοακουστικά φαινόμενα και στην αίσθηση της κατευθυντικότητας του ήχου όπως προσλαμβάνεται από το ανθρώπινο σύστημα ακοής. Η αρχή λειτουργίας αυτών των δωματίων βασίζεται στη διαφορά χρόνου μεταξύ του απευθείας ήχου και των πρώτων ανακλάσεων. Αυξάνοντας το διάστημα αυτό, ο ανθρώπινος εγκέφαλος μπορεί να ξεχωρίσει τον ακουστικό χαρακτήρα του δωματίου και να τον αγνοήσει.

Ο τρόπος κατασκευής αυτών των δωματίων έχει ως εξής : το μπροστά μισό του δωματίου είναι υψηλά απορροφητικό, σχεδόν ανηχοϊκό με στόχο την μείωση των πρώτων ανακλάσεων. Ο πίσω τοίχος, καθώς και οι πλαϊνοί τοίχοι, όπως και το ταβάνι είναι καλυμμένα με διαχυτές στοχεύοντας στη διάχυση των πρώτων ανακλάσεων και στη μείωση του «χρωματισμού» του ηχητικού υλικού. Όπως επίσης και στην εξάλειψη των φαινομένων τρεμοπαιξίματος ήχους (flutter echo) μεταξύ

των πλαϊνών τοίχων και γενικά στη δημιουργία ενός διάχυτου ηχητικά πεδίου.



Σχήμα 3.7: Δωμάτιο ελέγχου LEDE

Το δωμάτιο είναι γεωμετρικά κατασκευασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργείται μια ζώνη ελεύθερη από τις πρώτες ανακλάσεις στη θέση ακρόασης. Η ιδέα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, βασίζεται στην ξεκάθαρη ακρόαση του απευθείας ήχου από τα ηχεία και τη μεσολάβηση κάποιου καθορισμένου χρονικού διαστήματος πριν οι πρώτες ανακλάσεις φθάσουν στον ακροατή. Σαν αποτέλεσμα έχουμε ένα πραγματικά ουδέτερο δωμάτιο όπου η ακρόαση του ηχητικού δεν αλλάζει όταν αυτό αναπαραχθεί σε κάποιο άλλο ίδιου τύπου δωμάτιο.

Ένα δωμάτιο ελέγχου για να λάβει την πιστοποίηση LEDE από το Synergetic Audio Concepts (Syn-Aud-Con)¹⁰ θα πρέπει να πληρεί τις εξής προϋποθέσεις :

- Ύπαρξη ενός χαμηλών συχνοτήτων εξωτερικού ασύμμετρου κελυφους, ελεύθερο από συντονισμούς στις χαμηλές συχνότητες.

¹⁰ Jacob J. (1983) LEDE control room design. STUDIO SOUND. April's issue.

Το κέλυφος θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο ώστε να επιτρέπει την ανάπτυξη των μπάσων συχνοτήτων.

- Ύπαρξη συμμετρικού εσωτερικού κελύφους. Η συχνότητα διασταύρωσης μεταξύ του εξωτερικού και του εσωτερικού κελύφους θα πρέπει να είναι ίση με,

$$f_x = 3 \text{ ταχ. ήχου} / \text{μικρ. διαστ. δωματ.}$$

- Θα πρέπει να υπάρχει μια ανηχοϊκή διαδρομή μεταξύ των monitor ηχείων και του ηχολήπτη, η οποία θα πρέπει να είναι κατά 2-5 ms μεγαλύτερη από το αρχικό χάσμα χρονοκαθυστέρησης μέσα στο χώρο ηχογράφησης.
- Θα πρέπει να υπάρχει ένα έντονα διαχυτικό ηχητικό πεδίο κατά την διάρκεια έναρξης του φαινομένου Haas.
- Κανένα ίχνος «προγενέστερου» ήχου (early-early sound) δεν θα πρέπει να υπάρχει. Αυτοί είναι τυχόν ήχοι που φτάνουν στα αυτιά του ηχολήπτη πριν από τον απευθείας ήχο. Οι ήχοι αυτοί εμφανίζονται όταν τα ηχεία δεν είναι με ακρίβεια εντοιχισμένα και ακτινοβολούν τον ήχο μέσω της οικοδομικής κατασκευής.
- Ο σκληρός πίσω τοίχος, οι σκληροί πλαϊνοί τοίχοι καθώς και το πίσω μέρος της οροφής θα πρέπει να είναι έτσι κατασκευασμένα ώστε να παρέχουν ανάμιξη των φαινομένων φίλτρου κτένας που δημιουργούνται και να τα μετατρέπουν σε υψηλής πυκνότητας ηχητικό πεδίο χωρίς μετρήσιμες ανωμαλίες.

3.7.5 ΔΩΜΑΤΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΥΠΟΥ RFZ (REFLECTION FREE ZONE)

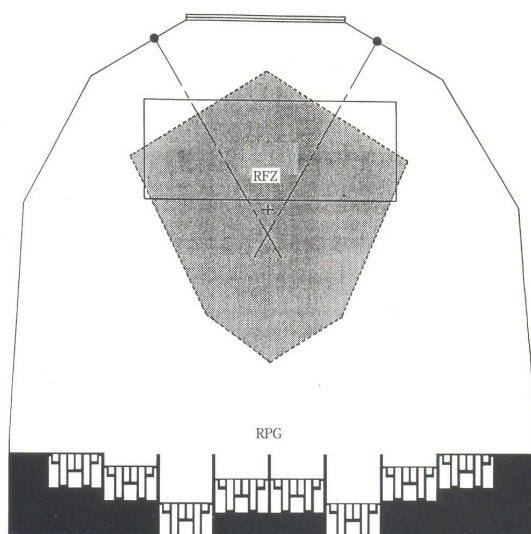
Τα δωμάτια του τύπου RFZ (ζώνης ελεύθερης από ανακλάσεις) ακολουθούν την ίδια κατασκευαστική λογική με αυτήν των δωματίων τύπου LEDE. Και σε αυτήν την κατασκευαστική προσέγγιση ο στόχος είναι η δημιουργία ενός χώρου ακρόασης όπου ο ακουστικός

χαρακτήρας του δωματίου θα επιδρά όσο το δυνατόν λιγότερο στην αναπαραγωγή του ηχητικού υλικού.

Ο σχεδιασμός στοχεύει στη δημιουργία μιας χωρικά και χρονικά ζώνης ελεύθερης από ανακλάσεις, η οποία περιβάλλει τη θέση ακρόασης-μίξης. Η ζώνη είναι χωρική γιατί υπάρχει μόνο σε ένα συγκεκριμένο σημείο του δωματίου και χρονική γιατί ο έλεγχος των ανακλάσεων πραγματοποιείται σε ένα συγκεκριμένο χρονικό σημείο, μεταξύ του χρόνου άφιξης των πρώτων ανακλάσεων και πριν από το χρόνο άφιξης των ανακλάσεων που προέρχονται από το σώμα του δωματίου.

Θέλοντας κάποιος να σχεδιάσει ένα τέτοιο δωμάτιο θα πρέπει να ασχοληθεί με τα μαθηματικά των πηγών ειδώλων. Η συνεισφορά ανάκλασης από επιφάνεια μπορεί να θεωρηθεί ότι προέρχεται από μια εικονική πηγή που βρίσκεται στην άλλη πλευρά του ανακλώντος επιπέδου σε ευθεία κάθετη στο επίπεδο αυτό, η οποία διέρχεται από το σημείο παρατήρησης. Έχοντας λοξές επιφάνειες σε τρεις διαστάσεις, είναι αρκετά δύσκολο να υπολογίσουμε όλες τις εικονικές πηγές, πράγμα που είναι απαραίτητο για να οριστούν τα όρια της ζώνης ελεύθερης από ανακλάσεις.

Στο σχήμα που ακολουθεί βλέπουμε την κάτοψη ενός δωματίου ελέγχου με ζώνη ελεύθερη από ανακλάσεις.



Σχήμα 3.8: Κάτοψη RFZ δωματίου ελέγχου

Παρατηρούμε ότι τα monitor ηχεία βρίσκονται τοποθετημένα όσο το δυνατόν κοντύτερα στην τριεδρη γωνία που σχηματίζεται με την τομή της οροφής. Στρεβλώνοντας με ακρίβεια τους εμπρός πλάγιους τοίχους καθώς και το εμπρός μέρος της οροφής, οι ανακλάσεις οδηγούνται εκτός του όγκου που περιέχει τον ηχολήπτη. Συνήθως στο πίσω μέρος του δωματίου τοποθετείται μια πλήρης εγκατάσταση διαχυτών, έτσι η ηχητική ενέργεια ευρείας ζώνης συχνοτήτων που προσπίπτει στο πίσω μέρος του δωματίου διαχέεται και κατευθύνεται πίσω στον ηχολήπτη έχοντας το κατάλληλο χάσμα χρονοκαθυστέρησης.

Ο έλεγχος των ανακλάσεων, όπου ήταν και ο στόχος, αναπτύχθηκε εν μέσω διαμάχης που ήθελε το εμπρός μέρος του δωματίου να είναι απορροφητικό αλλά και την ύπαρξη παράθυρου επικοινωνίας στο εμπρός μέρος του δωματίου ελέγχου. Παράλληλα με τη χρήση απορροφητών και διαχυτών για των έλεγχο των ανακλάσεων υιοθετήθηκε και η πρόταση της κατασκευής των τοίχων αλλά και του ταβανιού με κλίση. Έτσι η λύση δόθηκε χάρη στη γεωμετρία όπου με προσεκτικό σχεδιασμό οι ανακλάσεις από το τζάμι του παραθύρου επικοινωνίας οδηγούνται εκτός της θέσης ακρόασης.

Ένα από τα μειονεκτήματα αυτής της κατασκευαστικής προσέγγισης είναι ότι η καθορισμένη περιοχή ακρόασης είναι περιορισμένη επιτρέποντας, πολλές φορές, μόνο στον ηχολήπτη ποιοτική ακρόαση. Σε μοντέρνες κατασκευές προτείνεται η χρήση απορροφητών και διαχυτών συνδυαστικά, με στόχο τη διεύρυνση της θέσης ακρόασης. Ένα δεύτερο μειονέκτημα είναι οι διαφοροποιήσεις που υπάρχουν από δωμάτιο σε δωμάτιο αυτού του τύπου και που επιδρούν στην ακρόαση και μίξη του ηχητικού υλικού.

3.7.6 EARLY SOUND SCATTERING ΔΩΜΑΤΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ

Μια εναλλακτική προσέγγιση των δωματίων ελέγχου LEDE/RFZ είναι η κατασκευή ενός δωματίου του οποίου οι ανακλάσεις θα είναι

ομοιόμορφα τυχαίες έτσι ώστε να μην μπορούν να προσδώσουν χαρακτήρα στον ήχο.

Στα δωμάτια τύπου ESS, το εμπρός μέρος κατασκευάζεται έτσι ώστε να είναι υψηλά διαχυτικό, συμπεριλαμβανόμενων και των τοίχων στους οποίους βρίσκονται τοποθετημένα τα ηχεία, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη διάχυση των πρώτων ανακλάσεων. Το σώμα του δωματίου είναι απορροφητικό, με συχνή χρήση απορροφητών τύπου μεμβράνης για την απορρόφηση των χαμηλών συχνοτήτων. Ο χώρος μπορεί να γίνει αρκετά ζωντανός έναντι των παλαιότερων δωματίων ελέγχου, με επίπεδη απόκριση συχνότητας και με καλή στερεοφωνική εικόνα, δύο ιδιότητες οι οποίες παραμένουν σταθερές ακόμα και στις πίσω γωνίες του δωματίου.

Η στερεοφωνική εικόνα είναι μια ψυχοακουστική παραίσθηση, ένα τέχνασμα του εγκεφάλου και των αυτιών. Τα αυτιά συλλέγουν οτιδήποτε πληροφορίες μπορούν και ο εγκέφαλος μεταφράζει ότι αίσθηση μπορεί βάση αυτών των πληροφοριών. Όταν οι πληροφορίες είναι συγκρουόμενες, ο εγκέφαλος αποτυγχάνει να τις κατανοήσει και η αίσθηση χάνεται. Οι πληροφορίες που περισσότερο ενδιαφέρουν τον εγκέφαλο είναι η διαφορά επιπέδου έντασης μεταξύ του αριστερού και του δεξιού αυτιού, αλλά και ο χρόνος άφιξης του ήχου σε κάθε αυτί είναι επίσης σημαντικός. Εάν οι πληροφορίες άφιξης του ήχου έρχεται σε αντίθεση με τις πληροφορίες επιπέδου έντασης η στερεοφωνική εικόνα εξαφανίζεται. Οι ανακλάσεις βοηθούν τον εγκέφαλο στον εντοπισμό της πηγής, αλλά αυτός δεν είναι ο στόχος κατά την προσπάθεια διαμόρφωσης μια στερεοφωνικής εικόνας. Οι διαφορές στο χρόνο άφιξης της πληροφορίας καθιστά δύσκολο τον εντοπισμό του ηχείου, αφήνοντας μόνο τις πληροφορίες επιπέδων έντασης διαθέσιμες για την παροχή της στερεοφωνικής εικόνας. Η προκύπτουσα στερεοφωνική είναι αρκετά αξιόπιστη ανεξάρτητα από τις αλλαγές του εξοπλισμού στο πίσω τμήμα του δωματίου.

Σημαντική λεπτομέρεια σε αυτού του τύπου τα δωμάτια ελέγχου είναι η χρήση ηχείων ημισφαιρικής διασποράς έτσι ώστε επαρκής ποσότητα ενέργειας να μεταφέρεται στους διαχυτές που βρίσκονται κοντά τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι ακροατές που βρίσκονται εκτός της ακτίνας διασποράς του ηχείου(off-axis) να λαμβάνουν το ίδιο ηχητικό φάσμα με αυτούς που βρίσκονται εντός της ακτίνας διασποράς του ηχείου(on-axis). Πρακτικά, οι διαχυτές που βρίσκονται κοντά στα ηχεία τα μετατρέπουν αποτελεσματικά σε επίπεδες πηγές, οι οποίες δεν δημιουργούν προβλήματα προσθετικής ή καταστρεπτικής συμβολής στο χώρο, επιτυγχάνοντας την ομοιογένεια της συχνοτικής απόκρισης σε όλα τα σημεία του δωματίου.

3.8 ΣΥΣΤΗΜΑ MONITORING ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ (CLOSE FIELD MONITORING)

Έγινε προφανές την δεκαετία του 1960 πως ο ήχος όπως μιξάρεται στα δωμάτια ελέγχου (control rooms) των studio ηχογραφήσεων δεν ακούγεται καλά στα νέα ραδιόφωνα με ενισχυτή. Όμως μέσω τέτοιων ραδιοφώνων πολλοί άνθρωποι αποφάσιζαν ποιους δίσκους θα αγόραζαν, ενώ η επιτυχία ή αποτυχία ενός δίσκου προβλέπονταν, σωστά ή λανθασμένα, και εξαρτιόνταν από το πώς ακούγονταν στο ραδιόφωνο. Εάν 2 dB επιπλέον στην ένταση του βασικού κιθαρίστα θα έκαναν πράγματι την διαφορά μεταξύ της κατάκτησης του No. 1 ή μόνο του No. 18 είναι ένα αμφισβητήσιμο θέμα, αλλά ο συναγωνισμός μεταξύ των ραδιοφωνικών παραγωγών, και της κληρονομικής τους ανασφάλειας, οδήγησαν τα studio ηχογραφήσεων στην παροχή ενός τυπικού ραδιοφωνικού μεγαφώνου, είτε μέσα είτε πάνω στην κονσόλα της μίξης. Στα μέσα της δεκαετίας του 1970, η Auratone Sound Cube είχε γίνει ένα δεδομένο σημείο αναφοράς, και ήταν γενικά και λογικά συμφωνημένο πως ήταν ευκολότερο να κριθούν τα φωνητικά και τα επίπεδα αντήχησης πιο εύκολα σε μικρά μεγάφωνα. Κρίνοντάς τα, στα πλαίσια του πως θα ακούγονταν τυπικά σε οικιακές περιστάσεις. Εκείνον

τον καιρό, τα περισσότερα δωμάτια ελέγχου (control rooms) κατασκευάζονταν για συγκεκριμένο σκοπό, και πολύ σπάνια σχεδιάζονταν από την αρχή. Κάπως παράλογα, επιστρέψαμε σε μια κατάσταση δια της οποίας η τεράστια πλειοψηφία των δωματίων ελέγχου (control rooms) είναι για μια ακόμη φορά όχι πολύ καλά σχεδιασμένα, έτσι δεν είναι και τόσο άξιο απορίας πως το monitoring κοντινού πεδίου (close filed monitoring) είναι ακόμη σε ευρεία χρήση.

Αναμφίβολα, τα monitors κοντινού πεδίου (close filed monitors), με την περιορισμένη περιοχή συχνοτήτων τους, δίνουν μια καλή αναπαράσταση της τυπικής οικιακής αναπαραγωγής, η οποία λαμβάνει χώρα υπερβολικά σε μεγάφωνα ενός γενικά παρόμοιου μεγέθους. Ακούγοντας από κοντινή απόσταση ή μέσα στην κρίσιμη απόσταση βοηθά επίσης στην εξάλειψη κατά έναν βαθμό της αστάθειας από το ένα δωμάτιο στο άλλο. Δυστυχώς, όμως, αυτό δεν εξηγεί ολόκληρη την ιστορία γύρω από την ηχογράφιση, και τις ενισχύσεις που εφαρμόζονται σε εκείνη στα 70 Hz καθώς παρακολουθούμε μέσω μεγαφώνων ότι η ρυθμική ροή στα 50 Hz μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα καταφανείς επιρροές στα 35 Hz. Αυτό μπορεί να κριθεί εντελώς ανεπιθύμητο όταν η μουσική ακούγεται σε μεγάλη έκταση, σε πραγματικά υψηλής πιστότητας οικιακό σύστημα. Για ακόμη μια φορά, σε πολλές περιπτώσεις, οι mastering μηχανικοί αναμένονται να σώσουν την κατάσταση.

Θα έμοιαζε υποχρεωτικό για μια επαγγελματική βιομηχανία να επιδείξει ένα καλά ισορροπημένο προϊόν στην αγορά. Αυτό θα επέφερε αποτελέσματα τα οποία θα ανταποκρίνονταν κατάλληλα σε συστήματα στα οποία θα παίζονταν. Δεν μοιάζει επαγγελματικό να επιδεικνύονται προϊόντα τα οποία εκτίθενται ως ελλιπή από τους αγοραστές των υψηλής πιστότητας μουσικών συστημάτων. Με άλλα λόγια, η ποιότητα που χαρακτηρίζει μια ηχογράφισης θα πρέπει να είναι ανάλογη της ποιότητας του συστήματος στο οποίο παίζεται. Όλα αρκετά συχνά, ωστόσο, εξαιτίας των ανεπαρκών συστημάτων παρακολούθησης

(monitoring systems) στα studio ηχογραφήσεων, οι φίλοι της μουσικής υψηλής πιστότητας στις οικείες τους είναι οι πρώτοι που συνειδητοποιούν πόσο απαισίες είναι κάποιες ηχογραφήσεις.

Κανένα studio ηχογραφήσεων δεν μπορεί λογικά να αποκαλείται επαγγελματικό εκτός και εάν έχει τη δυνατότητα να παρέχει σύστημα monitoring, υψηλού βαθμού ανάλυσης. Το monitoring κοντινού πεδίου είναι συνεπώς χρήσιμο, αλλά όχι και υποκατάστατο για ένα σύστημα υψηλής ποιότητας και μεγάλης έκτασης, αν και η ακριβή επιλογή για το αν το σύστημα κοντινού πεδίου θα πρέπει να είναι υψηλής ή μεσαίας ποιότητας εξαρτάται κατά ένα ορισμένο ποσοστό από τον τύπο της μουσικής η οποία ηχογραφείται και την προτεινόμενη αγορά.

3.9 ΔΩΜΑΤΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΜΙΞΗΣ ΔΥΟ ΚΑΝΑΛΙΩΝ (STEREO)

Τα συστήματα stereo monitoring σε δωμάτια ελέγχου βρίσκονται συνήθως εντοιχισμένα στις συνοριακές επιφάνειες του δωματίου, στο μπροστινό τοίχο, ή δεξιά και αριστερά του παραθύρου παρατήρησης, ή τέλος, τοποθετημένα σε βάσεις πίσω από την κονσόλα. Πολύ συχνά χρησιμοποιούνται τα λεγόμενα near-field monitors (ηχεία κοντινού πεδίου), τοποθετημένα πάνω στην κονσόλα, με στόχο να δώσουν μια εναλλακτική προσέγγιση στην ακρόαση, η οποία επηρεάζεται λιγότερο από τον ακουστικό χαρακτήρα του δωματίου και προσομοιάζει την ακρόαση στο οικιακό περιβάλλον.

Σε δωμάτια ελέγχου τύπου LEDE, για παράδειγμα, η φιλοσοφία ήταν η δημιουργία ενός χρονικού παραθύρου μέσα στο οποίο οι ανακλάσεις θα ήταν ελάχιστες. Ο σχεδιασμός των δωματίων αυτού του τύπου, επέβαλε απορρόφηση στο εμπρόσθιο μέρος του δωματίου ανάκλαση και διάχυση στο πίσω μέρος. Το χρονικό παράθυρο που αναφέρθηκε θα παρεμβάλλονταν του απευθείας ήχου και των πρώτων ανακλάσεων. Ο στόχος ήταν η ακρόαση του απευθείας ήχου των ηχείων χωρίς τροποποίηση από τις ανακλάσεις που ακολουθούν. Με τον έλεγχο των ανακλάσεων δόθηκε ένας φυσικός χαρακτήρας στα

δωμάτια ελέγχου αυτού του τύπου παρόλο που οι ανακλάσεις που προέρχονταν από την κονσόλα και το παράθυρο παρατήρησης ήταν δύσκολο να εξαλειφθούν.

Αντίθετα ο σχεδιασμός των δωματίων τύπου RFZ (ζώνης ελεύθερης από ανακλάσεις - reflection free zone) πρότεινε ανάκλαση στην μπροστά περιοχή, γύρω από τα ηχεία, αλλά κατάλληλη κλίση στις επιφάνειες ώστε να οδηγούνται οι πρώτες ανακλάσεις έξω από την περιοχή ακρόασης, στο πίσω μέρος του δωματίου. Μια άλλη προσέγγιση πρότεινε τον εντοιχισμό των ηχείων στον εμπρός τοίχο και κατασκευή του πίσω τοίχου έτσι ώστε να συμπεριφέρεται ως ηχοπαγίδα για τις χαμηλές συχνότητες. Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιήθηκε στα δωμάτια ελέγχου τύπου non-environment.

Σε πολλά studio ηχογραφήσεων είναι σύνηθες να εντοιχίζουν τα monitor ηχεία του δωματίου ελέγχου στον μπροστά τοίχο. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι αποφεύγονται οι ανακλάσεις από τον τοίχο που βρίσκεται πίσω από τα ηχεία όταν αυτά δεν είναι εντοιχισμένα. Οι ανακλάσεις αυτές προκαλούν ακύρωση στη συχνότητα της οποίας το μήκος κύματος είναι ίσο με το ένα τέταρτο της απόστασης που υπάρχει μεταξύ του ηχείου και του πίσω τοίχου. Λόγο αυτού προτείνεται οι επιφάνειες, γύρω από τα ηχεία, να είναι ανακλαστικές στις χαμηλές συχνότητες ενώ απορροφητικές στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες.

Το πρόβλημα που δημιουργείται από εγκοπές ακύρωσης που παρουσιάζονται στις χαμηλές συχνότητες όταν τα ηχεία δεν είναι εντοιχισμένα μπορεί να μειωθεί αλλά όχι να διορθωθεί τελείως. Το ποσοστό ακύρωσης εξαρτάται από το ποσοστό απορρόφησης του δωματίου αλλά και από την κατευθυντικότητα του ηχείου. Ρυθμίζοντας την απόσταση μεταξύ του ηχείου και του τοίχου η συχνότητα στην οποία εμφανίζεται η ακύρωση μπορεί να αλλάξει (προς τα κάτω με την αύξηση της απόστασης) αλλά η απόσταση που απαιτείται είναι συνήθως μεγάλη οπότε ο τρόπος αυτός δεν είναι πρακτικός για την επίλυση του

προβλήματος. Σε περίπτωση που ηχεία μεταφερθούν πιο κοντά στον τοίχο, η ακύρωση εμφανίζεται σε υψηλότερη συχνότητα. Αυτό είναι ικανοποιητικό για μεγάλα ηχεία των οποίων η κατευθυντικότητα είναι αρκετά υψηλή στις μεσαίες συχνότητες αλλά είναι πρόβλημα για μικρότερα ηχεία.

Σε μικρά δωμάτια ελέγχου είναι συνηθισμένο φαινόμενο ο εντοιχισμός των ηχείων στον εμπρός τοίχο. Με τον τρόπο αυτό η θέση τους είναι η μέγιστη δυνατή από τη θέση ακρόασης που μπορεί να επιτευχθεί. Στην πραγματικότητα ο εντοιχισμός των ηχείων είναι μια ρεαλιστική προσέγγιση όπου είναι επιθυμητό να υπάρχει υψηλής πιστότητα ακρόαση. Σε αντίθετη περίπτωση δεν μπορεί να υπάρξει επίπεδη απόκριση συχνότητας. Παρόλα αυτά τα μικρά δωμάτια ελέγχου είναι αυτά στα οποία είναι λιγότερο συνηθισμένος ο εντοιχισμός των ηχείων.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Everest F. Alton (1998) Εγχειρίδιο Ακουστικής, 3η Έκδοση. Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Τζιόλα.

Newell Philip (2003) Recording Studio Design, First Published 2003, Reprinted 2004. Burlington, Focal Press.

Jones D. Acoustical Noise Control, 3rd edition. United States of America, Focal Press, Balloy G. M.

Everest F. Alton (1997) Sound Studio Construction on a Budget, 1st edition. United States of America, McGraw-Hill.

Andrew Parry (2005) Early Sound Scattering: A New Kind of Control Room [WWW]. Διαθέσιμο από: <http://www.electroacoustics.co.uk/article/essroom.htm> (πρόσβαση 24/10/05).

Rumsey F. (2001) Spatial Audio. United States of America, Focal Press.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

4.1 ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΥ

4.1.1. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ, ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ ΓΙΑ ΧΑΜΗΛΟ ΘΟΡΥΒΟ

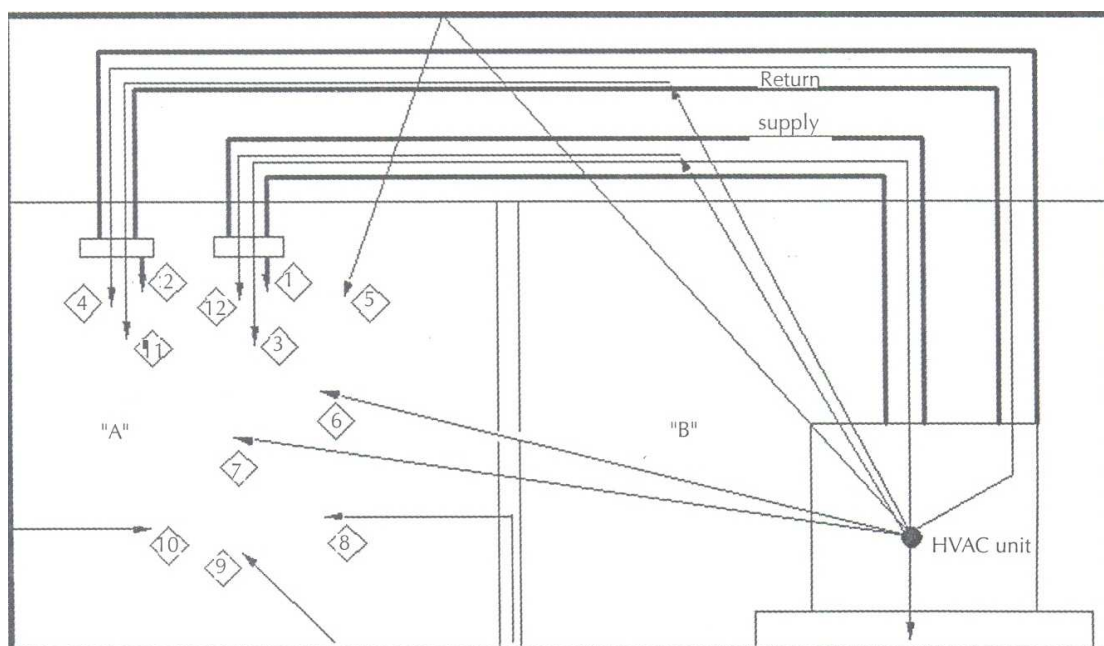
Όταν μελετάμε συστήματα θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού έχουμε να κάνουμε με συστήματα τα οποία α) παραβιάζουν το ακουστικό περίβλημα το οποίο είναι σχεδιασμένο να διατηρεί τον θόρυβο απ' έξω, β) εισάγουν έναν αξιοσημείωτο θόρυβο και γ) παρέχουν μία δίοδο στον θόρυβο ούτως ώστε να μετακινηθεί με ευκολία από τον ένα χώρο στον άλλο. Τα συστήματα θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού «εξασθενούν» κάποιες φορές τις όσες προσπάθειες γίνονται για μόνωση. Συχνά η φθηνότερη λύση για την παροχή συστήματος θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού σε ευαίσθητους ηχητικά χώρους είναι να χρησιμοποιηθούν παράθυρα τα οποία κλείνουν όταν απαιτείται ησυχία! Εάν αυτή η λύση δεν είναι αποδεκτή και τα κεντρικά συστήματα διανομής πρέπει να βρίσκονται σε χρήση, ο σχεδιαστής πρέπει να καταλάβει πως η επιτυχία θα απαιτήσει σημαντικά έξοδα και μηχανική γνώση.

Είναι πολύ σημαντικό να κατανοήσουμε πως τα συστήματα θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού που βρίσκονται σε πολλές κατοικίες ή σε ελαφρά εμπορικούς χώρους ή χώρους γραφείου είναι εντελώς ανεπαρκή για χρήση σε χώρους με ακραίο θόρυβο. Αντίθετα προς τα οικιακά συστήματα τα οποία συχνά χρησιμοποιούν υψηλής αποδοτικότητας συστήματα τα οποία απελευθερώνουν μικρές ποσότητες κρύου αέρα σε μεγάλες ταχύτητες, τα συστήματα χαμηλού θορύβου απαιτούν μέγιστη ποσότητα και ελάχιστη ταχύτητα απελευθέρωσης. Πολλά εμπορικά συστήματα εκμεταλλεύονται τους αγωγούς τροφοδοσίας και τις αρωγές της επιστροφής στις διαρροές

κάτω από τις πόρτες ή στους χώρους του ταβανιού. Για να επιτευχθεί χαμηλός θόρυβος και η τροφοδοσία αλλά και η επιστροφή θα πρέπει να τοποθετηθούν με ξεχωριστούς αγωγούς σε κάθε δωμάτιο.

4.1.2 ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΩΝ ΘΟΡΥΒΟΥ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ, ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ

Οι ποικίλοι τύποι και διαδρομές των παραγώγων θορύβου του συστήματος θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού παρουσιάζονται στο σχήμα 4.1. Αυτή η απεικόνιση παρέχει μια ενδιαφέρουσα μελέτη σε διαδρομές που συνορεύουν. Είναι σημαντικό να θυμόμαστε ότι θα υπάρχει σχετικά μικρή μείωση θορύβου εκτός εάν ελέγχονται όλες οι διαδρομές. Το Α αναπαριστά το δωμάτιο ήχου. Το Β αναπαριστά το δωμάτιο που περιέχει το σύστημα θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού.



Σχήμα 4.1: Τυπικές διαδρομές μέσω των οποίων ο θόρυβος του συστήματος θέρμανσης, κλιματισμού και εξαερισμού μπορεί να προεκταθεί στα ηχητικά ευαίσθητα δωμάτια.

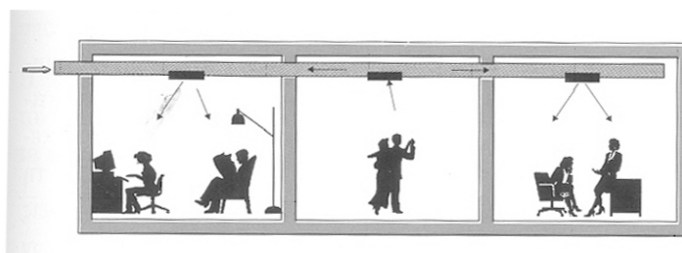
Εξετάζοντας τις πηγές θορύβου σύμφωνα με την αρίθμησή τους, οι 1 και 2 αναπαριστούν τον θόρυβο που παράγεται από τους ίδιους τους

διαχυτές. Ο θόρυβος παράγεται από τον στροβιλισμό του αέρα ο οποίος δημιουργείται καθώς ο αέρας κινείται μέσω του διαχυτή. Πολλοί διαχυτές έχουν μια εκτίμηση θορύβου σε μια δεδομένη ροή αέρα, και το μόνο στοιχείο ελέγχου σε αυτήν την περίπτωση είναι η επιλογή του σχεδίου με την καλύτερη εκτίμηση. Ας μην ξεχνάμε όμως ότι αυτή η επιλογή εφαρμόζεται στην «σχάρα» της επιστροφής όπως επίσης και στην παροχή του διαχυτή. Τα βέλη 3 και 4 αναπαριστούν τον βασικό θόρυβο του ανεμιστήρα, ο οποίος «ταξιδεύει» μέσα στο δωμάτιο μέσω και της παροχής και της επιστροφής των αγωγών, και είναι ικανός να «ταξιδεύει» αντίθετα και κατά την φορά του ρεύματος. Η απελευθέρωση του θορύβου του ανεμιστήρα μέσα από αυτά τα δυο μονοπάτια μπορεί να μειωθεί με την βοήθεια σιγαστήρων και/ή εσωτερικών επενδύσεων των αγωγών. Η σωστή προσαρμογή του μεγέθους των εργασιών των σωληνώσεων αποτελεί ένα μέσο «μάχμου» θορύβου ανεμιστήρα μιας και η ηχητική ενέργεια της εξόδου ενός ανεμιστήρα μεταβάλλεται κατά πολύ από τον όγκο του αέρα και της πίεσης. Το βέλος 5 αναπαριστά ένα καλό παράδειγμα ενός συνοριακού «μονοπατιού» το οποίο συχνά ξεφεύγει της προσοχής. Εξαρτώμενοι από το πώς το ταβάνι είναι κατασκευασμένο και στα δυο δωμάτια, ο ήχος από τη μονάδα θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού μπορεί να «ταξιδέψει» μέσω του ταβανιού στο δωμάτιο του συστήματος θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού και καταλήγει στο δωμάτιο Α. Φυσικά ο τρόπος ελέγχου του 5ου «μονοπατιού» είναι να σιγουρευτούμε πως τα ταβάνια και στα δυο δωμάτια είναι καλοχτισμένα, αρκετά συμπαγή για να ελέγχουν τις δονήσεις χαμηλών συχνοτήτων και, φυσικά, τον πολύ συμπιεσμένο αέρα. Το βέλος 6 αναπαριστά εκείνο το «μονοπάτι» όπου ο ήχος μπορεί να «ταξιδέψει» μέσω των κενών ή των τρυπών τα οποία αθέλητα έχουν αφεθεί στο χάρισμα. Το νούμερο 7 αναπαριστά τον ήχο που μπορεί να ταξιδέψει απ' ευθείας μέσω ενός μη ικανοποιητικά κατασκευασμένου τοίχου. Οι αριθμοί 8, 9 και 10 αναπαριστούν τα «μονοπάτια» που οι δομικές δονήσεις μπορούν να ακολουθήσουν μέσω της κατασκευής.

Τέλος, οι αριθμοί 11 και 12 αναπαριστούν το φαινόμενο που καλείται «εισβολή» θορύβου. Αυτό συμβαίνει όταν ο ήχος εισέρχεται ή «εισβάλλει» σε έναν αγωγό και «ταξιδεύει» μέσα του, εκπεμπόμενος μέσα στο δωμάτιο.¹¹

4.1.3 ΠΗΓΕΣ ΘΟΡΥΒΟΥ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ

Όταν ένα κτίριο διαθέτει σύστημα κλιματισμού τότε κατά γενικό κανόνα μειώνεται ο θόρυβος που προέρχεται από το περιβάλλον, όπως π.χ. ο κυκλοφοριακός



Σχήμα 4.2: Μετάδοση του θορύβου μέσω συστήματος κλιματισμού

θόρυβος διότι τα παράθυρα και οι πόρτες είναι κλειστές. Αν η κατασκευή είναι θερμομονωτική (π.χ. έχει διπλά παράθυρα), τότε η μείωση του εξωτερικού θορύβου είναι ακόμη μεγαλύτερη διότι πολλά (όχι όλα) από τα χρησιμοποιούμενα στοιχεία προσφέρουν συγχρόνως και ηχομόνωση. Οι συσκευές κλιματισμού όμως δημιουργούν τα εξής προβλήματα:

- προσθέτουν νέες πηγές θορύβου και
- μεταδίδουν εύκολα τον παραγόμενο θόρυβο μέσω των αεραγωγών στους διάφορους 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.

¹¹ Jones Doug (2002) Acoustical Noise Control. Handbook for Sound Enginneers. 3rd ed. Focal Press, pp. 67-68.

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 παρακάτω σχέση:

$$L_w \cong 30 + 60 \log udB / m^2 \quad (51)$$

Η σχέση αυτή δίδει τη στάθμη ισχύος ανά m^2 στομίου εξόδου.

Το σχήμα 4.2 δείχνει ένα σύστημα κλιματισμού. 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 10 m/sec. Για αποτελεσματικότερη μείωση του θορύβου απαιτείται περιορισμός των ταλαντώσεων των αεραγωγών.

4.1.4 ΘΟΡΥΒΟΣ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΩΝ

Υπάρχουν δυο κυρίως τύποι ανεμιστήρων στα συστήματα κλιματισμού: οι αξονικοί και οι φυγοκεντρικοί.



Σχήμα 4.3: Τύποι φυγοκεντρικών ανεμιστήρων

Οι φυγοκεντρικοί με τη σειρά τους διακρίνονται σε τρεις τύπους ανάλογα με την κλίση των πτερυγίων τους. Το σχήμα 4.3 δείχνει τους τρεις τύπους των φυγοκεντρικών ανεμιστήρων.

Το σχήμα 4.4 δίδει πώς κατανέμεται η σχετική ακουστική ισχύς των φυγοκεντρικών και των αξονικών ανεμιστήρων στις διάφορες συχνότητες.

Ως σχετική ακουστική ισχύς ορίζεται η στάθμη της ακουστικής ισχύος σε συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων με στάθμη αναφοράς

τη μέση ακουστική ισχύ ολόκληρου του φάσματος.

Η επιλογή του καλύτερου ανεμιστήρα από πλευράς εκπεμπόμενου θορύβου είναι συνάρτηση της στατικής πίεσης και της παροχής.

Το σχήμα 4.5 δείχνει

(κατά τον Beranek) την καμπύλη

επιλογής του καλύτερου από πλευράς θορύβου ανεμιστήρα (γραμμοσκιασμένη περιοχή), από το διάγραμμα στατικής πίεσης, παροχής με παράμετρο τις χαρακτηριστικές του ανεμιστήρα.

Επιλογή μεγαλύτερου ανεμιστήρα (περιοχή A) ή μικρότερου (περιοχή B) συνεπάγεται παραγωγή μεγαλύτερης στάθμης θορύβου.

Γενικά ο θόρυβος που εκπέμπουν όλοι οι τύποι των φυγοκεντρικών ανεμιστήρων αποτελείται από δυο συνιστώσες:

η πρώτη συνιστώσα του εκπεμπόμενου θορύβου αποτελείται από ορισμένους τόνους συγκεκριμένης συχνότητας και αντιστοιχεί στο θόρυβο που παράγεται από τα πτερύγια.

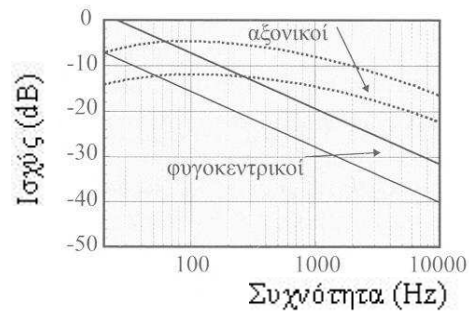
Η συχνότητα των τόνων δίνεται από τη σχέση:

$$f_n = \frac{nBN}{60} \quad (52)$$

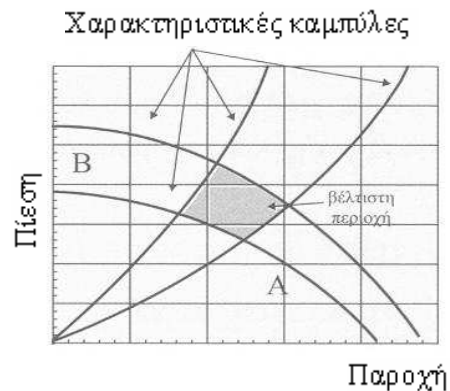
όπου B ο αριθμός των πτερυγίων,

N η συχνότητα περιστροφής,

n η τάξη των αρμονικών, $n = 1,2,3...$

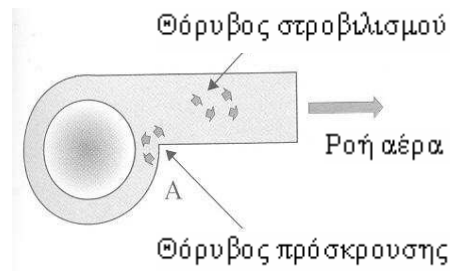


Σχήμα 4.4: Φάσμα ακουστικής ισχύος αξονικών και φυγοκεντρικών ανεμιστήρων



Σχήμα 4.5: Επιλογή κατάλληλου ανεμιστήρα

Αίτια του θορύβου αυτού (θόρυβος πρόσκρουσης) είναι η διάβαση των πτερυγίων από το σημείο ασυνέχειας A, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6: Παραγωγή του θορύβου

Η δεύτερη συνιστώσα (θόρυβος στροβιλισμού) αποτελείται από έναν αεροδυναμικό σε φυγοκεντρικούς ανεμιστήρες θόρυβο, που εκτείνεται σε ευρεία περιοχή συχνοτήτων και οφείλεται στη διαταραχή της πίεσης του αέρα λόγω της περιστροφής.

Όσον αφορά τη στάθμη θορύβου των ανεμιστήρων, αυτή είναι δύσκολο να προβλεφθεί και εξαρτάται κυρίως από τον κατασκευαστή.

Με αρκετά μεγάλη ανοχή όταν δεν έχουμε στοιχεία από τον κατασκευαστή για τη στάθμη πίεσης που οφείλεται σε φυγοκεντρικούς ανεμιστήρες, μπορούμε να γράψουμε τη σχέση:

$$L_p = 10 \log Q + 20 \log P_t + k \quad (53)$$

όπου Q η παροχή σε cfm

P_t η στατική πίεση σε $\text{inch H}_2\text{O}$,

k σταθερά που εξαρτάται από τον τύπο του ανεμιστήρα ($k = 35$ για τους τύπους A, B και $k = 43$ για τον τύπο Γ). (σχήμα 4.1)

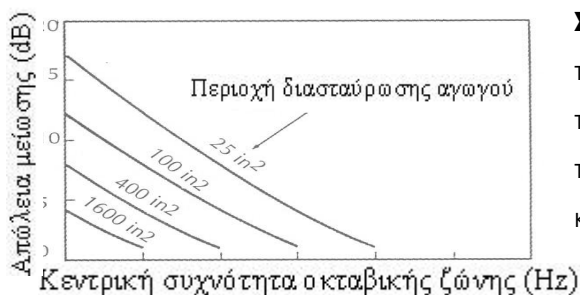
Οι αξονικοί ανεμιστήρες πήραν το όνομα τους από το γεγονός ότι ο αέρας βγαίνει κατά την διεύθυνση του άξονα περιστροφής. Οι αξονικοί ανεμιστήρες έχουν γενικά μεγάλες ταχύτητες περιστροφής και αριθμό πτερυγίων από 8 μέχρι 30. Ο θόρυβος που βγάζουν αποτελείται από ισχυρά διακριτούς τόνους και οφείλεται κυρίως στο στροβιλισμό του ρευστού. Γενικά ο θόρυβος αυτός είναι δύσκολο να καταπολεμηθεί. Η μόνωση των ταλαντώσεων των σωληνώσεων στην περίπτωση αυτή προσφέρει ελάχιστα στη μείωση του θορύβου και η εξασθένιση με την απόσταση είναι εξαιρετικά μικρή. Η στάθμη του θορύβου που βγάζουν, όταν δεν έχουμε στοιχεία από τον κατασκευαστή υπολογίζεται με μεγάλη προσέγγιση από τον τύπο:

$$L_p = 10 \log Q + 20 \log P_r + 48 \quad (54)$$

Λόγω του ότι η συχνότητα περιστροφής είναι μεγαλύτερη απ' αυτή των φυγοκεντρικών, το φάσμα τους είναι μετατοπισμένο στις υψηλές συχνότητες, γεγονός που δείχνει ότι η μετάδοση του γίνεται με μεγάλη απόσβεση.

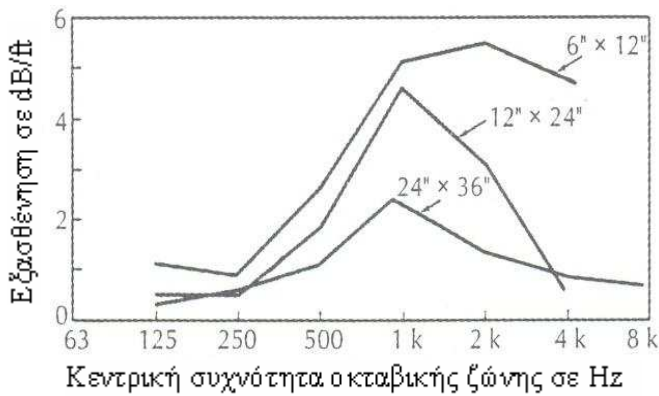
4.1.5 ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗ ΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ ΣΤΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ

Οι μεταλλικοί αγωγοί με καμία εσωτερική επένδυση εξασθενούν τον θόρυβο του ανεμιστήρα σε ένα συγκεκριμένο βαθμό. 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 4.7. Εν αντιθέσει με πολλά άλλα συστήματα στην ακουστική αυτό είναι ένα είδος εξασθένησης μεγαλύτερο στις χαμηλές συχνότητες απ' ότι στις υψηλές.



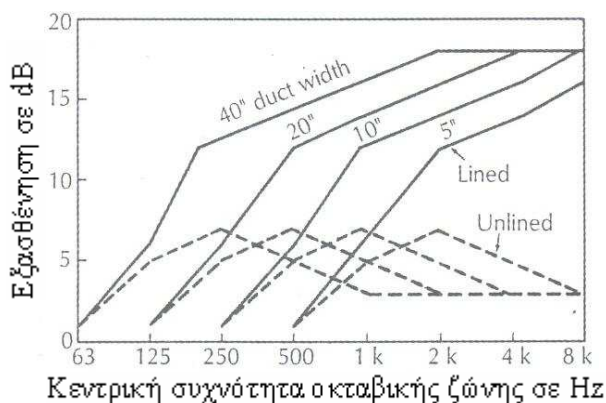
Σχήμα 4.7: Η επίδραση της τμηματικής διασταύρωσης του αγωγού στην εξασθένηση του συστήματος θέρμανσης, κλιματισμού και εξαερισμού

Η εσωτερική επένδυση ενός αγωγού αυξάνει την εξασθένηση πρωτίστως στην υψηλή ακουστική περιοχή συχνοτήτων. Το σχέδιο 4.8 παριστά την μετρούμενη εξασθένηση αγωγού εσωτερικής επένδυσης 1 ίντσας (2.54 εκατοστά) και στις τέσσερις πλευρές του (σχήμα 4.8).



Σχήμα 4.8.: Μετρούμενη εξασθένηση θορύβου σε ορθογώνιους αγωγούς.

Οι διαστάσεις που φαίνονται 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 10 ποδιών (3.048 μέτρων) μπορεί να λογαριαστεί για 40 ή 50 dB εξασθένησης για αγωγούς 12 ή 24 ιντσών (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 4.9 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 σχήματος 4.9 ευθυγραμμίζονται.



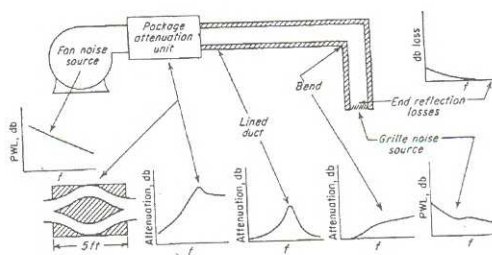
Σχήμα 4.9: Εξασθένηση θορύβου στις γωνίες ένωσης των σωλήνων των τετράγωνων αγωγών του συστήματος θέρμανσης, κλιματισμού και εξαερισμού χωρίς την στροφή των πτερυγίων.

Κι εδώ πάλι, 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 δυο πλάτη αγωγού μπροστά και δυο 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.

4.1.6 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ ΤΩΝ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΩΝ

Ο έλεγχος του θορύβου των ανεμιστήρων γενικά δεν είναι δύσκολη υπόθεση. Οι φυγοκεντρικοί ανεμιστήρες είναι γενικά συσκευές χαμηλής πίεσης αλλά υψηλής παροχής. Η χρήση απορροφητικών, παράλληλων, κυκλικών σιγαστήρων είναι κατάλληλη για τη μείωση του θορύβου. Το σχήμα 4.10 δείχνει μια διάταξη ηχομόνωσης φυγοκεντρικών ανεμιστήρων. Στη διάταξη αυτή έχουν χρησιμοποιηθεί δυο σιγαστήρες, ένας στην είσοδο και ένας στην έξοδο του αέρα. Η σύνδεση των σιγαστήρων έχει γίνει με κατάλληλες εύκαμπτες συνδέσεις. Η μείωση του θορύβου γίνεται ακόμη μεγαλύτερη αν χρησιμοποιηθούν ράβδοι εξάρτησης που απορροφούν τους κραδασμούς.

Το σχήμα 4.10 δείχνει το φάσμα των πηγών θορύβου καθώς και την εξασθένηση από τα διάφορα εξαρτήματα σ' ένα σύστημα

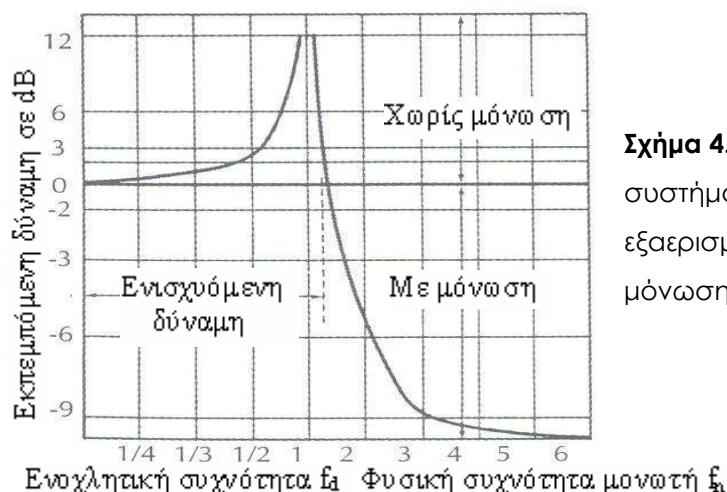


Σχήμα 4.10: Παραγωγή και εξασθένηση του θορύβου κατά μήκος διάταξης (Πηγή Beranek Noise reduction)

κλιματισμού. Οι πηγές θορύβου είναι ο ανεμιστήρας και οι γρίλιες εξόδου του αέρα. Το πρώτο και το τελευταίο διάγραμμα δίδουν τα φάσματα του θορύβου των παραπάνω πηγών ενώ τα υπόλοιπα δίδουν την εξασθένηση συναρτήσει της συχνότητας.

4.1.7 ΜΟΝΩΣΗ ΔΟΝΗΣΕΩΝ

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. Φυσικά, εάν είναι επιτυχές θα μείωνε ή θα εξάλειφε δραστικά τα «μονοπάτια» 8, 9 και 10 του σχήματος 4.1. Η αποδοτικότητα της μόνωσης είναι καθαρά μια λειτουργία της σχέσης μεταξύ της 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 – 6 dB.



Σχήμα 4.11: Ο θόρυβος του εξοπλισμού συστήματος θέρμανσης, κλιματισμού και εξαερισμού μπορεί να μειωθεί με πλαίσια μόνωσης, ή μπορεί στην πραγματικότητα

4.1.8 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ, ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ

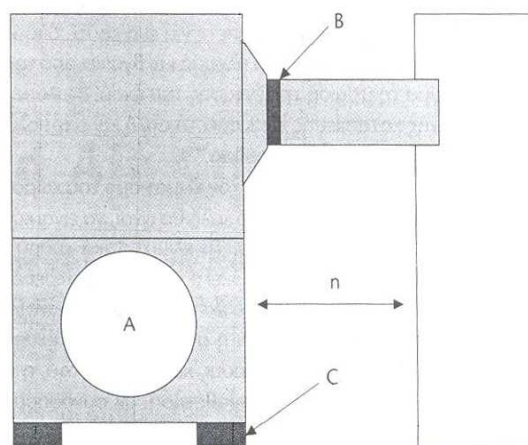
Περιληπτικά, ένα σημείο θα πρέπει να επιλεγεί το οποίο μονώνει την αναπόφευκτη δόνηση ενός τέτοιου εξοπλισμού από την ευαίσθητη ηχητικά περιοχή. Μια αρκετά καλή περίπτωση είναι να τοποθετήσουμε τον εξοπλισμό σε ένα τσιμεντένιο πλαίσιο το οποίο είναι απομονωμένο από την κατασκευή. Με αυτόν τον τρόπο, το πρόβλημα του θορύβου περιορίζεται στον χειρισμό του θορύβου ο οποίος προέρχεται από τους αγωγούς, ένα σαφώς απλούστερο πρόβλημα από την καταπολέμηση της ενδοκατασκευαστικής δόνησης.

4.1.9 ΟΙ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ (HVAC) ΣΕ STUDIO ΗΧΟΓΡΑΦΗΣΕΩΝ

Οι αρχές που θα πρέπει να διέπουν ένα σωστό σύστημα εξαερισμού και κλιματισμού (HVAC) σε ένα studio ηχογραφήσεων είναι:

- 1) Θα πρέπει να εξαερίζει το χώρο.
- 2) Θα πρέπει να κλιματίζει το χώρο.
- 3) Θα πρέπει να μη μεταφέρεται ο θόρυβος των κλιματιστικών μονάδων μέσα στο studio ηχογραφήσεων και να αποφευχθούν κατά το δυνατόν οι αεροδυναμικοί θόρυβοι.
- 4) Θα πρέπει να μη μεταφέρεται στο studio ο ήχος του περιβάλλοντος.
- 5) Θα πρέπει να μη μεταφέρεται στο περιβάλλον ο ήχος του studio.
- 6) Θα πρέπει να μη μεταφέρεται ήχος από το ένα δωμάτιο στο άλλο.

Οι δυο πρώτες συνθήκες είναι αυτονόητες και δε χρίζουν ιδιαίτερης εξήγησης. Για το λόγο αυτό, θα πάμε αμέσως στην τρίτη. Στο σχήμα 4.13 φαίνεται ποια σημεία θα πρέπει να προσέξουμε, για να μην έχουμε θόρυβο.



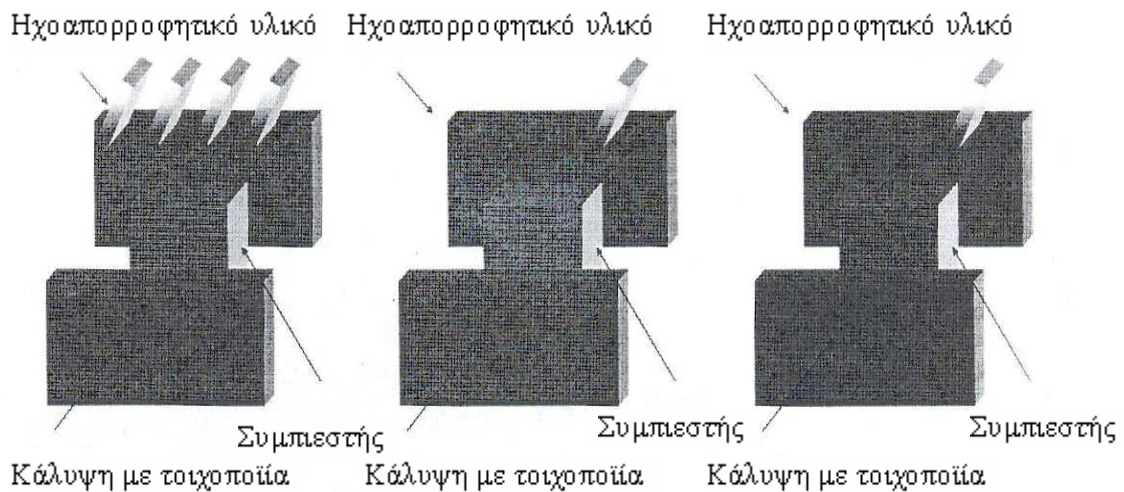
Σχήμα 4.13

A) Ο θόρυβος από τον ανεμιστήρα της κεντρικής μονάδας, συνήθως δεσπόζει στο συνολικό θόρυβο του κλιματιστικού. Το περίεργο είναι ότι οι μεγαλύτεροι ανεμιστήρες έχουν συνήθως λιγότερο θόρυβο από τους μικρότερους. Για να γίνει περισσότερο κατανοητός ο συγκεκριμένος θόρυβος, αναφέρουμε ότι πρόκειται για έναν ήχο, στον οποίο δεσπόζει ένας κεντρικός τόνος, ο οποίος προστίθεται στο συνολικό θόρυβο του συστήματος.

B) Η κεντρική μονάδα θα πρέπει να συνδέεται με ελαστικούς συνδέσμους με τους αεραγωγούς, για να μην τους μεταφέρει τις δονήσεις, που δημιουργούνται από τη λειτουργία του ανεμιστήρα. Καλό είναι βέβαια και τα υπόλοιπα σημεία στήριξης των αεραγωγών να είναι ελαστικά, ώστε να αποφεύγεται εν γένει η μεταφορά δονήσεων.

Γ) Η κεντρική μονάδα και ο συμπιεστής θα πρέπει να τοποθετηθούν σε νεοπρένιο ή ελατήρια, για να μην μεταφέρουν δονήσεις στην οικοδομή, με συνέπεια να μεταφέρονται μέσα στο studio.

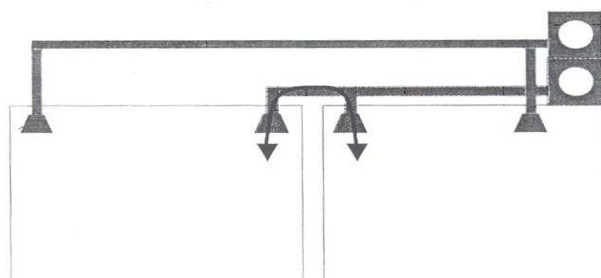
Δ) Τέλος, θα πρέπει να τοποθετούνται σε σημείο που δεν θα εκπέμπουν ηχητική ενέργεια σε τοίχους με χαμηλή ηχομονωτική ικανότητα και να βρίσκονται όσο το δυνατό μακριά από τα ανοιχτά παράθυρα των περιοίκων. Τέτοιες μονάδες κάνουν συνήθως πολύ θόρυβο, με αποτέλεσμα να χρειάζονται μια μορφή εξωτερικής κατασκευής, που θα εμποδίζει τον ήχο και ταυτόχρονα θα επιτρέπει την ανεμπόδιστη ροή του αέρα (σχήμα 4.14).



Σχήμα 4.14

Τέλος, πολύ σημαντικό είναι να επιτύχουμε χαμηλό αεροδυναμικό θόρυβο, κάτι που οφείλεται κυρίως στο σχήμα και το μέγεθος των αεραγωγών. Ο αέρας όταν συναντήσει κάποιο εμπόδιο, εμφανίζει στροβιλισμούς, που με τη σειρά τους είναι υπεύθυνοι για τους αεροδυναμικούς θορύβους. Αυτό μπορεί να μετριαστεί, όταν οι αεραγωγοί έχουν κανονικά σχήματα, χωρίς απότομες στροφές και εσοχές ή εξοχές, που εμποδίζουν την ομαλή πορεία του αέρα και ταυτόχρονα, μεγάλες διατομές, που να εξασφαλίζουν μικρές ταχύτητες. Για τους αεραγωγούς θα αναφερθούμε παρακάτω, αλλά αυτό που μπορούμε να πούμε από τώρα, είναι ότι ταχύτητες μεγαλύτερες από 153m/min, δεν είναι αποδεκτές για ευαίσθητους ακουστικά χώρους, όπως είναι τα studio ηχογραφήσεων.

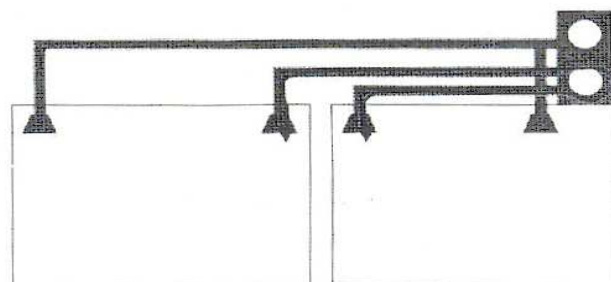
Ας δούμε όμως τι σημαίνει πρακτικά αυτό, μέσα από ένα παράδειγμα: Έστω λοιπόν ότι έχουμε έναν αεραγωγό, με διατομή 1x1 μέτρο. Με ταχύτητα 153m/min, έχουμε 9180m/h.



Σχήμα 4.15

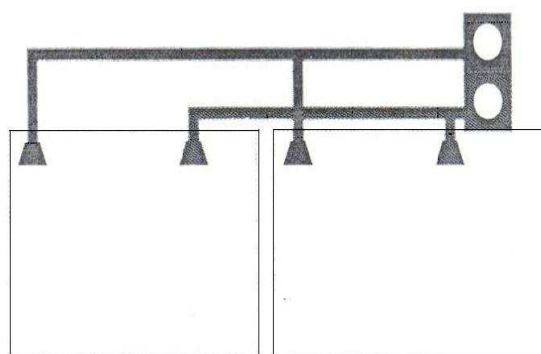
Αν έχουμε ένα χώρο που έχει όγκο 91.80m³, τότε το σύστημα μας έχει τη δυνατότητα να ανανεώσει τον αέρα στο εσωτερικό του, 100 φορές

μέσα σε μια ώρα. Αν λοιπόν θέσουμε U την ταχύτητα $153\text{m}/\text{min}$, στον τύπο: $V=SU$ (όπου V είναι ο όγκος του δωματίου, επί τον αριθμό των ανακυκλώσεων του αέρα σε μια ώρα και S



Σχήμα 4.16

η διατομή του αεραγωγού) έχουμε: $S > V/153$. Θα πρέπει δηλαδή η διατομή του αεραγωγού να μην είναι μικρότερη από το νούμερο αυτό, για να μην έχουμε προβλήματα με αεροδυναμικούς θορύβους. Από κει και πέρα, όσο μεγαλύτερη είναι, τόσο το καλύτερο.



Σχήμα 4.17

Για τις συνθήκες 4 και 5 ισχύουν τα ίδια πράγματα και η ικανοποίηση τους έγκειται στη χρησιμοποίηση ηχοπαγίδων. Όταν λέμε βέβαια ηχοπαγίδες, δεν θα πρέπει να ξεχνάμε ότι η σημαντικότερη όλων, δεν είναι άλλη από τον ίδιο τον αεραγωγό. Για όλα αυτά όμως, όπως είπαμε, θα μιλήσουμε λεπτομερώς παρακάτω.

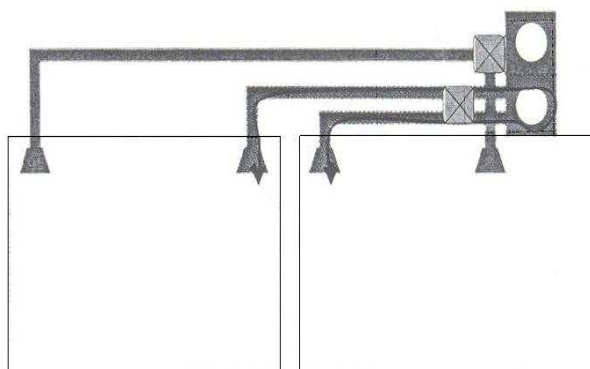
Για την έκτη και τελευταία συνθήκη, ισχύει ότι και για την 4 και 5, μόνο που εδώ θα μπορούσαμε να δείξουμε και κάποια κοινά λάθη και πώς να τα αποφεύγουμε.

Στο σχήμα 4.15 βλέπουμε ένα από αυτά, στη σύνδεση δύο δωματίων με κοινό αεραγωγό και στο σχήμα 4.16 έναν τρόπο για να το αποφύγουμε. Επίσης καλή λύση, μας δίνει και το σχήμα 4.17 και ανάλογα με την περίπτωση μπορεί να μας δώσει εξίσου καλά αποτελέσματα. Όπως είναι κατανοητό, βασική επιδίωξή μας είναι να

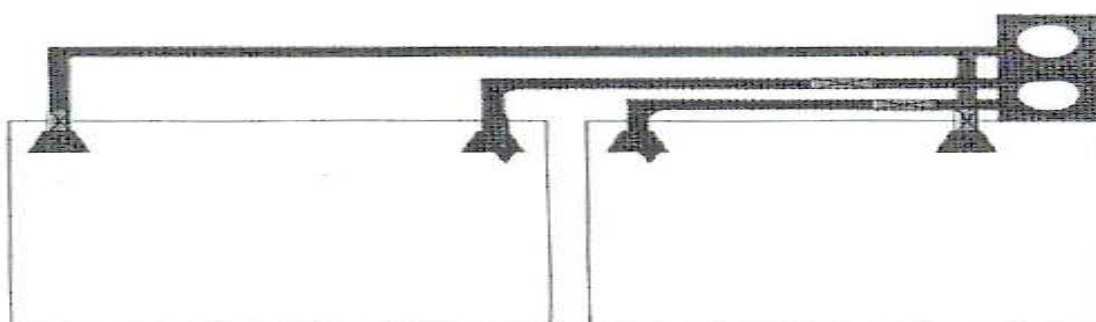
παρεμβάλουμε όσο το δυνατόν περισσότερο μήκος αγωγού γίνεται, αφού όπως είπαμε, συμβάλλει τα μέγιστα στην εξασθένιση του ήχου.

Τέλος, στο σχήμα 4.18

βλέπουμε πως θα μπορούσαμε να τοποθετήσουμε ηχοπαγίδες για να αποφύγουμε το θόρυβο και πως θα έχουμε καλύτερα αποτελέσματα μεταξύ δυο δωματίων, αν αντί για δυο μεγάλες, κατασκευάσουμε τέσσερις μικρότερες (σχήμα 4.19).



Σχήμα 4.18



Σχήμα 4.19

4.1.10 ΤΟ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΥ

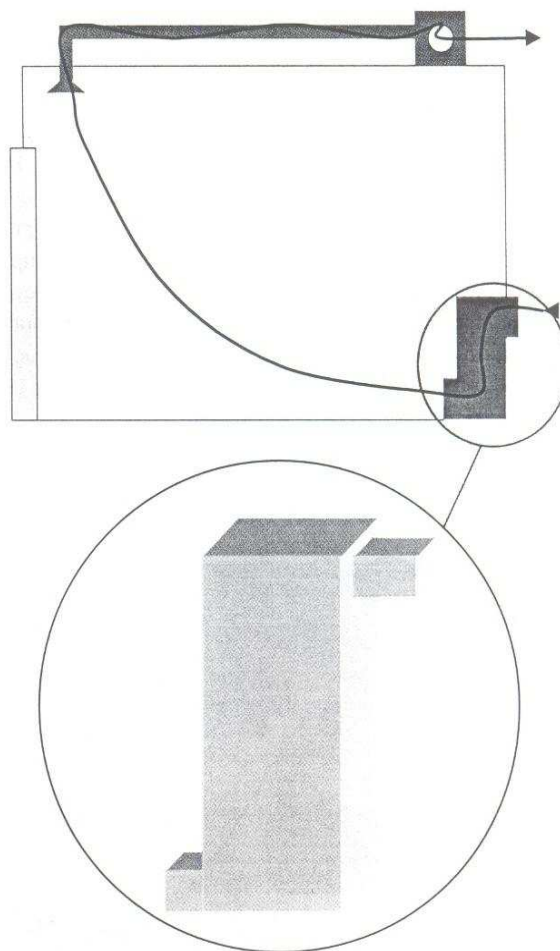
Το πιο απλό σύστημα που θα μπορούσαμε να εγκαταστήσουμε, είναι ένας ανεμιστήρας, ο οποίος θα επικοινωνεί με το δωμάτιο μέσω ενός αεραγωγού και θα βγάζει έξω τον αέρα και ταυτόχρονα, ένας άλλος αεραγωγός, ο οποίος θα διοχετεύει φρέσκο αέρα. Το καλύτερο θα είναι και αυτός ο δεύτερος αεραγωγός, να είναι συνδεδεμένος με κάποιον ανεμιστήρα, ο οποίος θα βγάζει αέρα – για μικρά όμως φορτία, δεν είναι αναγκαίο, γιατί ο αέρας που αποβάλλεται, δημιουργεί υποπίεση, με αποτέλεσμα την τάση να εισρέει φρέσκος, που καλύπτει το κενό. Αυτός είναι και ο τύπος του εξαερισμού που συναντάμε σε

πολλούς κοινόχρηστους χώρους, με τη διαφορά, ότι ο φρέσκος αέρας δεν εισρέει από κανάλι, αλλά από τις χαραμάδες που υπάρχουν στις πόρτες και τα παράθυρα και ενώ αυτό είναι απολύτως αποδεκτό σε αυτές τις περιπτώσεις, στην περίπτωσή μας, δεν μπορεί να βρει καμιά εφαρμογή. Αυτό, διότι οι πόρτες και τα παράθυρα είναι στεγανά, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να λειτουργήσει αυτό το μοντέλο ανακύκλωσης του αέρα. Εδώ συναντάμε το άλλο τραγικό φαινόμενο, να ανοίγονται δηλαδή τρύπες στις πόρτες και να τοποθετούνται περσίδες, με αποτέλεσμα την απόλυτη αχρήστευση της ηχομονωτικής τους ικανότητας. Ένας τρόπος να το ξεπεράσουμε αυτό, είναι να κατασκευάσουμε μια ηχοπαγίδα, την οποία στη συνέχεια θα τοποθετήσουμε στην τρύπα που θα δημιουργήσουμε, με αποτέλεσμα να έχουμε την απαιτούμενη ακουστική απομόνωση μεταξύ των δωματίων και ταυτόχρονα, να υπάρχει κυκλοφορία του αέρα, που θα επιτρέπει την ανακύκλωση του. Η ηχοπαγίδα τώρα, λόγω του όγκου της, καλό θα ήταν να μην τοποθετηθεί επάνω στην πόρτα, αλλά σε κάποιο σημείο της τοιχοποιίας.

Ένας διαδεδομένος τύπος ηχοπαγίδας, κυρίως λόγω της ευκολίας να κατασκευαστεί, είναι το plenum. Αν και θα επεκταθούμε παρακάτω με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στους διάφορους τύπους ηχοπαγίδων, μπορούμε απλά να δείξουμε στο σχήμα 4.20, πως είναι περίπου μια τέτοια κατασκευή. Συνοπτικά αναφέρουμε πως πρόκειται για ένα κουτί, όπου ο αέρας μπαίνει από μια τρύπα στη μια πλευρά και βγαίνει από την άλλη, με αποτέλεσμα τη μείωση της έντασης του ήχου.

Αυτά όσον αφορά τον εξερισμό. Για τον κλιματισμό του χώρου θα χρειαστούμε ένα κλιματιστικό, το οποίο καλό θα είναι, να είναι κάποιο με χαμηλά χαρακτηριστικά θορύβου. Τα κλιματιστικά τύπου split είναι η πιο κοινή και λογική επιλογή, αρκεί ο χώρος να επιτρέπει την τοποθέτηση του. Τα πλεονεκτήματα που έχει ένα κλιματιστικό split σε σχέση με μια κεντρική μονάδα, είναι η ανεξάρτητη ρύθμιση της θερμοκρασίας σε

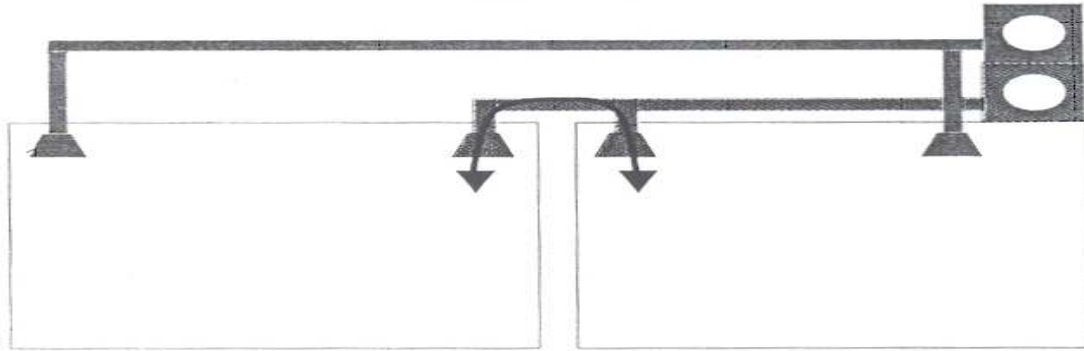
διαφορετικούς χώρους και λόγω αυτού, η εξοικονόμηση ενέργειας και η εύκολη τοποθέτηση, σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος. Από την άλλη, θα πρέπει να έχουμε πάντα στο μυαλό μας να το κλείνουμε, όταν γράφουμε με πυκνωτικά μικρόφωνα και θα πρέπει να το καλύψουμε με κάποια κατασκευή, που θα εξασφαλίζει όμως ελεύθερη μετακίνηση του αέρα, σε περίπτωση που η αισθητική του δεν συμβαδίζει με το υπόλοιπο δωμάτιο.



Σχήμα 4.20

ΜΙΑ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Είναι τα συστήματα, τα οποία εξασφαλίζουν ταυτόχρονα κλιματισμό και εξαερισμό. Πρόκειται για ακριβά κλιματιστικά συστήματα, τα οποία τοποθετούνται σε κάποιο εξωτερικό χώρο και επικοινωνούν με το δωμάτιο μέσω αεραγωγών. Περιληπτικά, μπορούμε να πούμε ότι ο αέρας αντλείται από τα στόμια της εξαγωγής, οδηγείται στην κεντρική μονάδα όπου αποκτά την κατάλληλη θερμοκρασία, αναμιγνύεται με φρέσκο αέρα και επιστρέφει στο δωμάτιο από τα στόμια εισαγωγής (σχήμα 4.21).



Σχήμα 4.21

Το σχήμα τοποθετεί τα μηχανήματα στην οροφή του κτιρίου, κάτι τέτοιο όμως δεν είναι απαραίτητο και έγινε για να γίνει πιο κατανοητή η λειτουργία τους. Θα πρέπει μάλιστα να τοποθετηθούν όσο μακρύτερα γίνεται για να κερδίσουμε μήκος στους αεραγωγούς και να μην έχουμε πρόβλημα με τους θορύβους των ιδίων των μηχανημάτων, σε περίπτωση που αυτοί μεταφέρονται μέσα στο χώρο μας.

Η κεντρική μονάδα HVAC είναι μια λύση, που μας εξασφαλίζει μια πιο ομοιόμορφη λύση στον κλιματισμό και δεν πρέπει να έχουμε συνεχώς το μυαλό μας να το κλείνουμε, κάθε φορά που απαιτείται χαμηλό επίπεδο θορύβου στο studio ηχογραφήσεων. Είναι όμως δαπανηρή λύση και δεν μπορούμε να έχουμε διαφορετικές θερμοκρασίες στα δωμάτια. Συνήθως, μια υβριδική λύση, που περιλαμβάνει ένα έξτρα split σύστημα στο δωμάτιο ελέγχου, μας δίνει περισσότερη ευελιξία και θα πρέπει να το λάβουμε σοβαρά υπόψη, αφού συγκεντρώνει αρκετά πλεονεκτήματα.¹²

4.11 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ, ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ

Ο σκοπός αυτής της ενότητας του συστήματος θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού είναι να δώσουμε έμφαση στην

¹² Πετρογιάννης Γιάννης (2004) HVAC 1 (Heating Ventilation and Air Conditioning). Περιοδικό «SOUND maker», τεύχος Σεπτεμβρίου, σελ. 72-75.

σπουδαιότητα στην επαρκή προσοχή του σχεδιασμού και της εγκατάστασης του συστήματος θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού στην κατασκευή ενός studio ηχογραφήσεων. Οι θόρυβοι του συστήματος θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού συνήθως κυριαρχούν σε τέτοιου είδους ηχητικά δωμάτια και είναι συχνά η κύρια πηγή δημιουργίας προβλημάτων, καθώς ένα όμορφο νέο δωμάτιο τίθεται σε λειτουργία.

Οικιακά συστήματα θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού συνήθως κατέχουν μικρούς αγωγούς και υψηλής ταχύτητας συστήματα διανομής αέρα. Ο θόρυβος του στροβιλισμού του αέρα αυξάνεται όπως η έκρηξη δύναμη της ταχύτητας. Γι' αυτόν τον λόγο, υψηλής ταχύτητας συστήματα θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού μπορούν εύκολα να είναι οι πηγές υπερβολικού θορύβου στροβιλισμού στις γρίλιες και στους διαχυτές. Διατηρώντας την ταχύτητα του αέρα κάτω από τα 400 ft/min για τα studios ηχογραφήσεων και άλλα επαγγελματικά ηχητικά δωμάτια είναι μια πρώτη και βασική απαίτηση. Ο θόρυβος του αέρα ροής δημιουργείται στα στηρίγματα, στις γωνίες ένωσης των σωλήνων και στους αποσβεστήρες ταλαντώσεων και λαμβάνει 5 έως 10 φορές την διάμετρο του αγωγού για να ομαλοποιηθεί ένας τέτοιος στροβιλισμός. Αυτό προϋποθέτει ότι τα εξαρτήματα του αγωγού θα πρέπει να τοποθετηθούν με επαρκές διάστημα ανάμεσα τους. Ο θόρυβος της ροής του αέρα μέσα σε έναν αγωγό προκαλεί τους τοίχους του αγωγού να πάλλονται, τείνοντας την εκπομπή του περιβάλλοντος στο εσωτερικό του χώρου. Η θερμαντική επένδυση του αγωγού (υλικό θερμομόνωσης) βοηθά στην απόσβεση τέτοιων ταλαντώσεων, αλλά ακόμα και καλυμμένοι, τέτοιου είδους αγωγοί δεν θα πρέπει να εκτίθενται σε ηχητικά ευαίσθητα δωμάτια. Αυτή η καθ' όλα απλουστευμένη μεταχείριση του σχεδιασμού του συστήματος θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού έχει την πρόθεση να τονίσει την σπουδαιότητα του ειδικού σχεδιασμού και εγκατάστασης του συστήματος κλιματισμού-εξαερισμού. Ο όλος σχεδιασμός του

συστήματος κλιματισμού και εξαερισμού, ωστόσο, απαιτεί την εμπλοκή του μηχανικού ήχου σε κάθε βήμα.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Jones Doug (2002) Handbook for Sound Engineers, 3rd edition. Focal Press.

Everest F. Alton (1997) Sound Studio Construction On A Budget. United States of America, McGraw-Hill Companies, Inc.

Newell Philip (2003) Recording Studio Design, First Published 2003, Reprinted 2004. Burlington, Focal Press.

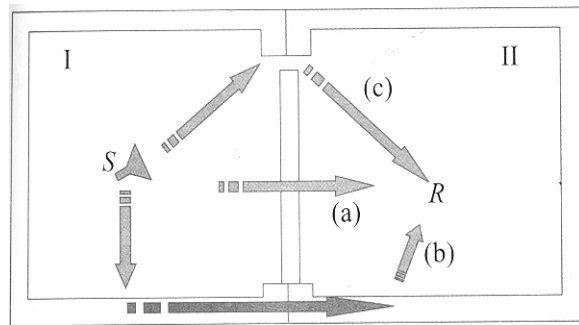
Σκαρλάτος Δημήτρης (2005) Εφαρμοσμένη Ακουστική, 2η έκδοση. Πάτρα, Εκδόσεις Φιλομάθεια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

5.1 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ

Όταν η πηγή του ήχου βρίσκεται σε κλειστούς χώρους το φαινόμενο της μετάδοσης του ήχου είναι πολύπλοκο, διότι ο ήχος μεταδίδεται ακολουθώντας διάφορους δρόμους, είτε μέσω του αέρα είτε μέσω της κατασκευής.

Όταν ο ήχος μεταδίδεται μέσω της κατασκευής μεταδίδεται αφ' ενός μεν με μεγαλύτερη ταχύτητα και μικρότερη απόσβεση απ' ό,τι στον αέρα, αφ' ετέρου δε είναι δυνατόν να διεγείρει τις



στερεές επιφάνειες σε ταλάντωση **Σχήμα 5.1:** Τρόποι μετάδοσης του θορύβου με συνέπεια να δημιουργούνται δευτερογενείς πηγές παραγωγής ήχου. Γενικά όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.1 σε κλειστούς χώρους η μετάδοση του θορύβου μπορεί να γίνει με τους παρακάτω τρόπους:

- 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 δευτερογενείς πηγές εκπομπής 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.λπ. είναι ιδιαίτερα εύκολη.

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

Αερόφερτο που είναι ο ήχος που διαδίδεται μέσω του αέρα.

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

Κτυπογενή 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.

5.2 ΔΕΙΚΤΗΣ ΗΧΟΜΕΙΩΣΗΣ

Για τον υπολογισμό της διάδοσης του αερόφερτου θορύβου χρησιμοποιείται ο όρος φαινόμενος δείκτης ηχομείωσης R ή απώλεια διάδοσης (Transmission Loss, TL) που εκφράζει σε dB το ποσοστό της ηχητικής ενέργειας που διέρχεται μέσα από τα τοιχώματα σε σχέση μ' αυτήν που προσπίπτει. Ο φαινόμενος δείκτης ηχομείωσης ή πιο απλά δείκτης ηχομείωσης ορίζεται για την κεντρική συχνότητα κάθε 1/1 ή 1/3 οκτάβας και για την περιοχή των συχνοτήτων από 125 ως 8000 Hz. Σύμφωνα με τον ορισμό δίδεται από τη σχέση,

$$R = 10 \log \frac{W_i}{W_t} = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (55)$$

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

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:

$$IL = L_p - L'_p \quad (56)$$

Ανάλογα με τον τρόπο μέτρησης των ποσοτήτων που αναφέρονται στη σχέση 55, για τον δείκτη ηχομείωσης χρησιμοποιούνται διάφορες ονομασίες.

5.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΗΧΟΜΕΙΩΣΗΣ ΑΕΡΟΦΕΡΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ

5.3.1 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΟ ΧΩΡΟ

Στην περίπτωση που το σημείο λήψης βρίσκεται και αυτό σε κλειστό χώρο, που γειτνιάζει με το χώρο της πηγής με μια επιφάνεια, η έκφραση για τη στάθμη στο σημείο λήψης δίνεται από τη σχέση:

$$L_{p2} = L_{p1} - R + 10 \log \frac{A_w}{A_N} \quad (57)$$

όπου A_w το εμβαδόν της διαχωριστικής επιφάνειας και A_N η απορρόφηση του χώρου λήψης κατά Norris – Eyring.

Στη σχέση 57 καθώς και στη σχέση $L_{p2} = L_{p1} - R$ βασικό ρόλο παίζει όχι η απορρόφηση του χώρου λήψης (A_N), αλλά ο συντελεστής ηχομείωσης. Συνεπώς αν θέλουμε να μειώσουμε τον αερόφερτο θόρυβο σημαντικά θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε υλικά με μεγάλο δείκτη ηχομείωσης.

Ο συντελεστής αυτός δίνεται με ικανοποιητική ακρίβεια από πίνακες για διάφορα υλικά που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές.

5.4 ΝΟΜΟΣ ΤΗΣ ΜΑΖΑΣ

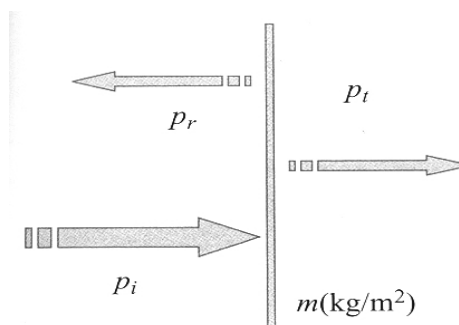
Ο δείκτης ηχομείωσης που εκφράζει την ηχομονωτική συμπεριφορά μιας επιφάνειας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η συχνότητα του ήχου, η γωνία πρόσπτωσης, οι φυσικές ιδιότητες του υλικού (πυκνότητα, σκληρότητα κ.λπ.). Ο νόμος της μάζας που αποδεικνύεται παρακάτω δίνει μια ικανοποιητική προσέγγιση στον

προσδιορισμό του δείκτη ηχομείωσης για κάθετη και πλάγια πρόσπτωση.

5.4.1 ΚΑΘΕΤΗ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗ

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

$$R_0 = 20 \log fm - 43 \quad (43)$$



Σχήμα 5.2

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

5.4.2 ΤΥΧΑΙΑ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗ

Όταν ο ήχος προσπίπτει σε μια επιφάνεια πλάγια με γωνία πρόσπτωσης θ τότε η σχέση $R_0 = 10 \log \frac{1}{\tau} = 10 \log \left| \frac{p_i}{p_t} \right|^2 = 10 \log \left[1 + \left(\frac{\omega m}{2\rho c} \right)^2 \right]$ όπως αποδεικνύεται εύκολα μπορεί να γραφεί:

$$R_\theta = 10 \log \frac{1}{\tau_\theta} = 10 \log \left[1 + \left(\frac{\omega m \cos \theta}{2\rho c} \right)^2 \right] \quad (58)$$

Αν πάρουμε το μέσο όρο για γωνίες από $\theta = 0 - 90^\circ$ η παραπάνω σχέση καταλήγει στην:

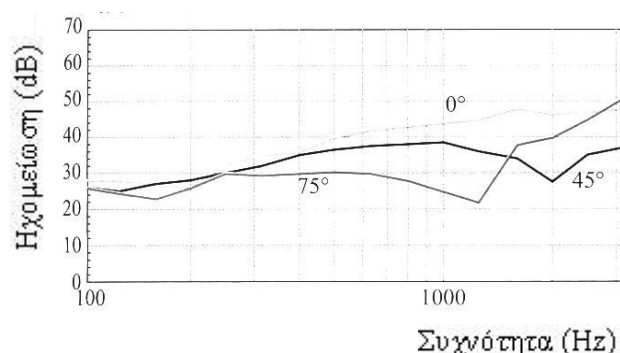
$$R = R_0 - 10 \log(0.23R_0) \quad (59)$$

Συνήθως στην πράξη η γωνία πρόσπτωσης είναι $0 - 78^\circ$ οπότε προσεγγιστικά μπορούμε να γράψουμε:

$$R = 20 \log(fm) - 47 \quad (60)$$

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

Η ποσότητα R ονομάζεται δείκτης ηχομείωσης για τυχαία πρόσπτωση. Επειδή συνήθως στην πράξη ο ήχος πέφτει στις διάφορες επιφάνειες με τυχαία γωνία, η σχέση αυτή είναι κατ' εξοχήν χρησιμοποιούμενη. Αν το



Σχήμα 5.3: Ηχομείωση παραθύρου (πάχους 12 mm) για γωνίες πρόσπτωσης 0°, 45°, 75°

τοίχωμα είναι συμπαγές και άκαμπτο με μεγάλη επιφανειακή πυκνότητα (μεγαλύτερη από 100 kg/m^2) ο δείκτης ηχομείωσης δίδεται με αρκετά ικανοποιητική προσέγγιση από την παραπάνω σχέση και αποτελεί το νόμο της μάζας.

Ο νόμος της μάζας για δεδομένο υλικό δηλώνει ότι η ηχομείωση του υλικού είναι ανάλογη του λογαρίθμου της συχνότητας και για δεδομένη συχνότητα είναι ανάλογη της επιφανειακής πυκνότητας.

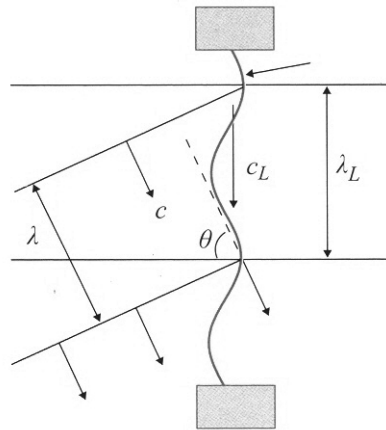
Πιο συγκεκριμένα ο νόμος της μάζας δηλώνει ότι για δεδομένη συχνότητα η ηχομείωση αυξάνει κατά 6 dB για κάθε διπλασιασμό της επιφανειακής μάζας και για την ίδια επιφάνεια 6 dB για κάθε διπλασιασμό της συχνότητας. Επί προσθέτως δηλώνει ότι σε χαμηλές συχνότητες οι ηχομονωτικές ιδιότητες των υλικών είναι πτωχές.

Η ηχομονωτική συμπεριφορά των διαφόρων υλικών στην πράξη και σε ορισμένες συχνότητες αποκλίνει απ' αυτήν που προβλέπει ο νόμος της μάζας. Δυο φαινόμενα, το φαινόμενο της σύμπτωσης και το φαινόμενο του συντονισμού είναι κυρίως υπεύθυνα για τη μείωση της ηχομονωτικής ικανότητας των διάφορων υλικών.

5.5 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΣΥΜΠΤΩΣΗΣ

Εάν το τοίχωμα είναι εύκαμπτο, τότε σ' αυτό διαδίδονται καμπτικά κύματα (bending waves) κατά μήκος της επιφάνειας του με μια συγκεκριμένη συχνότητα. Η εξίσωση κίνησης των επίπεδων επιφανειών όταν σ' αυτές διαδίδονται καμπτικά κύματα δίνεται από τη σχέση,

$$\nabla^4 y + \frac{12}{(hc_L)^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (61)$$



Σχήμα 5.4: Το φαινόμενο της 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:

$$c_L^2 = 2\pi f h \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\sigma^2)}} \quad (62)$$

Στην παραπάνω σχέση σ είναι ο λόγος του Poisson, E είναι το μέτρο του Young και ρ η πυκνότητα της πλάκας σε kg/m^3 .

Όταν η συχνότητα του προσπίπτοντος ήχου συμπίσει με τη συχνότητα ταλάντωσης (δηλαδή όταν η προβολή του μήκους κύματος του ήχου συμπίσει με το μήκος κύματος της επιφάνειας που ταλαντώνεται) ή όταν η προβολή της ταχύτητας των κυμάτων συμπίσει με την ταχύτητα διάδοσης των καμπτικών κυμάτων, τότε ο ήχος διεγείρει την επιφάνεια. Αυτό συμβαίνει όταν,

$$c_L = \frac{c}{\sin \theta}, \quad \lambda_L = \frac{\lambda}{\sin \theta} \quad (63)$$

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 δηλαδή δίνεται από τη σχέση:

$$f_{\theta} = \frac{c^2}{2\pi h \sin^2 \theta} \sqrt{\frac{12\rho(1-\sigma^2)}{E}} \quad (64)$$

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 $\sigma < 1$ (συνήθως τιμή $\sigma = 0.3$), αν θέσουμε όπου $1 - \sigma^2 \approx 1$ η κρίσιμη συχνότητα στη πράξη δίδεται από τη σχέση,

$$f_c = \frac{c^2}{1.8h} \sqrt{\frac{\rho}{E}} = \frac{c^2}{1.8hc_1} \quad (65)$$

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 64 και 65, 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 δυο στρώματα διαφορετικών υλικών η συμπεριφορά της στο φαινόμενο της σύμπτωσης είναι δύσκολο να περιγραφεί, ωστόσο η κρίσιμη συχνότητα με αρκετά καλή προσέγγιση δίδεται από τη σχέση:

$$f_c = \frac{c^2}{1.8H} \sqrt{\frac{\rho'}{E'}} \quad (66)$$

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

Η ανηγμένη πυκνότητα δίνεται από τη σχέση:

$$\rho' = \frac{\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2}{H} \quad (67)$$

όπου ρ_1, ρ_2 οι πυκνότητες των δυο μέσων.

Από τον Cremer δείχθηκε ότι σε συχνότητες μεγαλύτερες από την κρίσιμη συχνότητα η ηχομείωση δίνεται από τον τύπο:

$$R = R_0 + 10 \log \left(\frac{f}{f_c} - 1 \right) + 10 \log n - 2 \quad (68)$$

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

Η σχέση 68 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.

5.6 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ

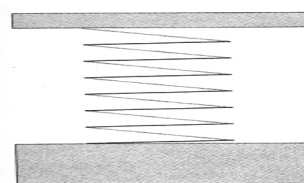
Σε πολύ μικρές συχνότητες η σκληρότητα των υλικών τα εμποδίζει να ταλαντώνονται. Ο συνδυασμός της σκληρότητας με τη μάζα των τοιχωμάτων δρα όπως το σύστημα μάζας - ελατηρίου, με συγκεκριμένη

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 που ονομάζεται φαινόμενο συντονισμού, έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση μερικών βυθισμάτων στις χαμηλές κυρίως συχνότητες στην καμπύλη που εκφράζει την ηχομονωτική ικανότητα των υλικών συναρτήσει της συχνότητας.

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

$$f_r = \frac{\pi B}{2m} \left[\frac{n_x}{L_x^2} + \frac{n_y}{L_y^2} \right] \quad (69)$$



Σχήμα 5.5: Σύστημα μάζας ελατηρίου

όπου L_x, L_y οι διαστάσεις της επιφάνειας

B το μέτρο συμπίεστικότητας ανά μονάδα μήκους

n_x, n_y μικροί ακέραιοι αριθμοί που δείχνουν την τάξη του συντονισμού ($n_x, n_y = 1, 2, 3, 4, \dots$).

Η μικρότερη συχνότητα συντονισμού αντιστοιχεί σε $n_x, n_y = 1$. Όταν η επιφάνεια είναι ομοιόμορφη μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη σχέση,

$$f_r = 0.458 c_L h (1 - \sigma)^{1/2} \left[\frac{n_x}{L_x^2} + \frac{n_y}{L_y^2} \right] \quad (70)$$

όπου c_L η ταχύτητα του ήχου με μέσο διάδοσης την επιφάνεια

σ ο λόγος του Poisson

h το πάχος της επιφάνειας σε μέτρα.

5.7 ΗΧΟΜΟΝΩΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΑΠΛΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

Οι ταλαντώσεις που εκτελούν οι απλές επιφάνειες είναι ο κύριος λόγος μετάδοσης της ακουστικής ενέργειας. Το φαινόμενο της

απόσβεσης των ταλαντώσεων συνεπώς 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:

- 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 μετατρέπεται σε θερμότητα και δίδεται από τη σχέση:

$$n = \frac{D}{2\pi W_0} \quad (71)$$

όπου D η ενέργεια που χάνεται ανά κύκλο ταλάντωσης,

W_0 η μέση ολική (κινητική και δυναμική) ενέργεια του ταλαντωμένου συστήματος.

Μια άλλη έκφραση για τον παράγοντα απωλειών είναι η παρακάτω:

$$n = \frac{\Delta}{27.3f} \quad (72)$$

όπου Δ ο ρυθμός εξασθένησης της ταλάντωσης σε dB/sec και f η συχνότητα ταλάντωσης. Τυπικές τιμές του παράγοντα απωλειών είναι μέχρι 0.3. Ο πίνακας 5.1 δίνει για μερικά υλικά τις τιμές του παράγοντα απωλειών. Όπως θα δούμε παρακάτω υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ του συντελεστή απόσβεσης και του παράγοντα απωλειών.

Πίνακας 5.1: 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 διάφορων υλικών εξαρτάται από τον νόμο της μάζας, το φαινόμενο της σύμπτωσης και το φαινόμενο του συντονισμού. Τα δυο τελευταία φαινόμενα είναι υπεύθυνα για σοβαρές αποκλίσεις από τον νόμο της μάζας. Το διάγραμμα του σχήματος 5.6, δίνει στην πράξη την τιμή του δείκτη ηχομείωσης συναρτήσει της συχνότητας για μια πραγματική ομογενή επιφάνεια. Στο διάγραμμα αυτό διακρίνουμε τρεις περιοχές (σχήμα 5.6).

5.7.1 ΠΕΡΙΟΧΗ Ι (ΠΕΡΙΟΧΗ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ)

Η περιοχή αυτή εκτείνεται από $0-2f_r$, όπου f_r η χαμηλότερης τάξης συχνότητα συντονισμού. Στην περιοχή αυτή που βρίσκεται σε χαμηλές συχνότητες η ηχομόνωση είναι συνάρτηση της σκληρότητας

του υλικού. Αύξηση της σκληρότητας του υλικού συνεπάγεται αύξηση του δείκτη ηχομείωσης κατά 6 dB για κάθε διπλασιασμό της σκληρότητας, αν η συχνότητα διατηρηθεί σταθερή. Για το ίδιο υλικό ο δείκτης ηχομείωσης μειώνεται με την συχνότητα κατά 6 dB 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.

5.7.2 ΠΕΡΙΟΧΗ II (ΠΕΡΙΟΧΗ ΝΟΜΟΥ ΜΑΖΑΣ)

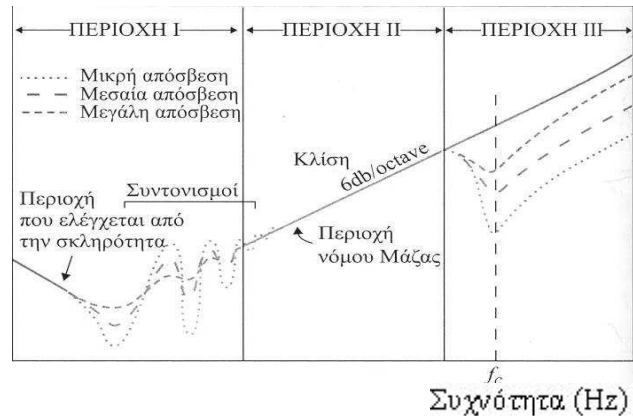
Στην περιοχή αυτή που αρχίζει αμέσως μετά την περιοχή I και εκτείνεται μέχρι τη συχνότητα $f_c/2$, όπου f_c η συχνότητα σύμπτωσης, ο δείκτης ηχομείωσης αυξάνει με την αύξηση της συχνότητας και του επιφανειακού βάρους, σύμφωνα με το νόμο της μάζας. Θεωρητικά ο δείκτης ηχομείωσης θα πρέπει να αυξάνει κατά 6 dB για κάθε διπλασιασμό του επιφανειακού βάρους, στην πράξη όμως η αύξηση είναι μικρότερη δηλαδή έχουμε αύξηση 4-5 dB για κάθε διπλασιασμό του επιφανειακού βάρους. Για την ίδια επιφάνεια η ηχομείωση αυξάνεται κατά 6 dB για κάθε διπλασιασμό της συχνότητας. Το εύρος αυτής της περιοχής είναι δυο ή τρεις φορές μεγαλύτερο από τη χαμηλότερη συχνότητα συντονισμού. Ο νόμος της μάζας ισχύει ικανοποιητικά για σώματα με επιφανειακό βάρος μεγαλύτερο από 100kg/m².

5.7.3 ΠΕΡΙΟΧΗ III (ΠΕΡΙΟΧΗ ΣΥΜΠΤΩΣΗΣ)

Στην περιοχή αυτή που αρχίζει αμέσως μετά την περιοχή του νόμου της μάζας, για συχνότητες κοντά στην 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 10 dB ανά οκτάβα, για την ίδια επιφάνεια. Σε μεγαλύτερες συχνότητες, έχουμε μια σταδιακή ελάττωση της αύξησης μέχρι την τιμή των 6 dB ανά οκτάβα. Αν θέλουμε να επιτύχουμε σημαντική ηχομείωση σε μέσες και μεγάλες συχνότητες θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε υλικά με μεγάλο επιφανειακό βάρος.

Οι διαστάσεις είναι σε εκατοστά, τα δε επιφανειακά βάρη σε kg/m². Οι αναφερόμενες τιμές έχουν ληφθεί από διάφορες πηγές και είναι τυπικές για τα διάφορα είδη των επιφανειών. Μετρούμενες τιμές για τις dB ίδιες επιφάνειες, από διάφορους ερευνητές δίδουν τιμές που μπορεί να διαφέρουν μέχρι 5-7 dB.



Σχήμα 5.6: Δείκτης ηχομείωσης συναρτήσει της συχνότητας σε απλές επιφάνειες

5.8 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΗ ΗΧΟΜΕΙΩΣΗΣ ΑΠΛΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

Για να μπορέσουμε να προσεγγίσουμε την πραγματική συμπεριφορά μιας απλής επιφάνειας, δηλαδή να λάβουμε υπόψη μας τις αποκλίσεις από το νόμο της μάζας λόγω του φαινομένου της σύμπτωσης, εργαζόμαστε ως εξής: Με βάση την κρίσιμη συχνότητα f_c χωρίζουμε το εύρος των συχνοτήτων σε δυο περιοχές, οπότε για το δείκτη ηχομείωσης μπορούμε να γράψουμε:

$$R = 20 \log(f m) - 47 \quad \text{για } f < f_c < 2 \quad (73)$$

και

$$R = 20 \log \frac{\omega m}{2 \rho c} + 10 \log \frac{2n \omega}{\pi \omega_c} \quad \text{για } f > f_c \quad (74)$$

όπου m η επιφανειακή πυκνότητα του υλικού σε kg/m^2 , n ο παράγοντας απωλειών του υλικού και ρ_c η χαρακτηριστική εμπέδηση του αέρα (415 MKS Rayls). Για συχνότητες μεταξύ των δυο παραπάνω αναφερόμενων ορίων, υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ θεωρητικών και πραγματικών συντελεστών. Ο υπολογισμός της ηχομείωσης στην περίπτωση αυτή γίνεται με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των τιμών $f_c/2$ και f_c .

5.9 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΗ ΗΧΟΜΕΙΩΣΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

Σπάνια οι επιφάνειες που περιορίζουν ένα χώρο αποτελούνται από ένα υλικό. Στην περίπτωση που η επιφάνεια δεν είναι ομογενής, αλλά είναι κατά τμήματα ομογενής (π.χ. ένας τοίχος που έχει πόρτες και παράθυρα), ο υπολογισμός του δείκτη ηχομείωσης γίνεται ως εξής: Υπολογίζεται κατ' αρχάς ο μέσος συντελεστής διάδοσης ολόκληρης της επιφάνειας από τον τύπο:

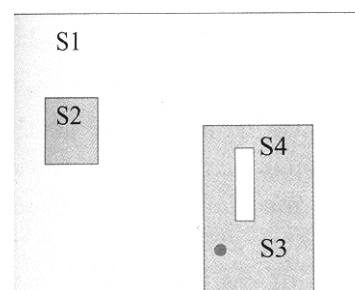
$$\bar{\tau} = \frac{\tau_1 s_1 + \tau_2 s_2 + \tau_3 s_3 + \dots}{s_1 + s_2 + s_3 + \dots} \quad (75)$$

όπου τ_i ο συντελεστής διάδοσης κάθε ομογενούς επιφάνειας και s_i το αντίστοιχο εμβαδόν. Ο δείκτης ηχομείωσης που αντιστοιχεί στην σύνθετη επιφάνεια δίδεται τότε από τον τύπο:

$$R = 10 \log \frac{1}{\bar{\tau}} \quad (76)$$

5.10 ΗΧΟΜΟΝΩΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΔΙΠΛΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

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



Σχήμα 5.8: Σύνθετη επιφάνεια

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 $R = 30\text{dB}$. Αυτό σημαίνει ότι αν από τη μια πλευρά της επιφάνειας η στάθμη είναι 100 dB, από την άλλη θα είναι 70 dB. 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 6 dB μεγαλύτερη δηλαδή $R+6=36\text{ dB}$. Αν η δεύτερη επιφάνεια βρίσκεται σε πολύ μεγάλη απόσταση από την πρώτη και δεν υπάρχει σύζευξη των δυο επιφανειών, η κάθε επιφάνεια θα μειώσει κατά 30 dB την στάθμη του ήχου δηλαδή η τελική ηχομείωση θα είναι $R+R=60\text{ dB}$. Στην πράξη όμως ούτε μεγάλες αποστάσεις μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αλλά ούτε και 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 μόνωση επιτυγχάνουμε όταν παρεμβάλλουμε μεταξύ των διαφόρων στρωμάτων υλικά απορροφητικά των κραδασμών, όταν χρησιμοποιούμε διαφορετικά σημεία στήριξης κ.λπ. Ακουστική μόνωση μπορούμε επίσης να έχουμε με τη δημιουργία κενού μεταξύ των τοιχωμάτων όπου αυτό είναι κατορθωτό (π.χ. διπλοί υαλοπίνακες).

Ενώ στις απλές επιφάνειες (σύνθετες ή μη) υπάρχουν δυο 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.

5.10.1 ΘΕΩΡΙΑ ΔΙΠΛΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ

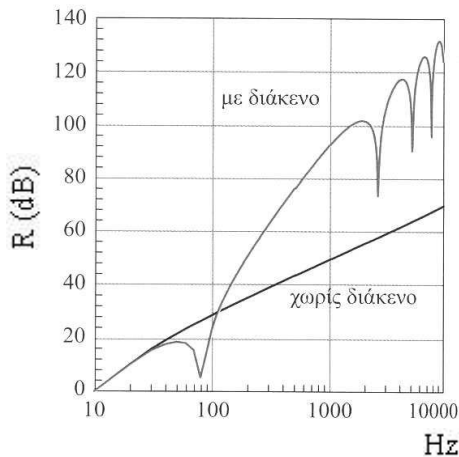
Στην περίπτωση που έχουμε διπλή επιφάνεια ο δείκτης ηχομείωσης είναι πολύ μεγαλύτερος από αυτόν των απλών και δίνεται από τον τύπο:

$$R = 10 \log \left[1 + 4 \left(\frac{\omega m}{2 \rho c} \right)^2 \left(\cos kd - \left(\frac{\omega m}{2 \rho c} \right) \sin kd \right)^2 \right] \quad (77)$$

Όπως παρατηρούμε στην σχέση

$$R = 10 \log \left| \frac{P_i}{P_t} \right|^2 = 10 \log \left[1 + 4 \left(\frac{\omega m}{2 \rho c} \right)^2 \left(\cos kd - \left(\frac{\omega m}{2 \rho c} \right) \sin kd \right)^2 \right] \quad (78)$$

η ηχομείωση αυξάνει μεν με τη συχνότητα και τη μάζα, η αύξηση όμως αυτή δεν είναι ομαλή. Για ορισμένες συχνότητες παρουσιάζει μέγιστα ενώ για άλλες ελάχιστα. Το σχήμα 5.9 συγκρίνει την ηχομείωση ενός διπλού τοιχώματος με διάκενο μεταξύ των επιφανειών με την αντίστοιχη χωρίς διάκενο, που έχει την ίδια επιφανειακή μάζα.



Σχήμα 5.9: Σύγκριση ηχομείωσης διπλών χωρισμάτων με διάκενο και χωρίς διάκενο

Στην περίπτωση που το $d = 0$ δηλαδή οι επιφάνειες εφάπτονται, η εξίσωση

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

παίρνει τη μορφή

$$R = 10 \log \left[1 + \left(\frac{2 \omega m}{2 \rho c} \right)^2 \right] \quad (79)$$

Συγκρίνοντας την σχέση 59 με την $R = 10 \log \frac{1}{\tau} = 10 \log \left| \frac{p_i}{p_t} \right|^2 = 10 \log \left[1 + \left(\frac{\omega m}{2\rho c} \right)^2 \right]$ βλέπουμε ότι στην περίπτωση όμοιων επιφανειών που εφάπτονται, ο δείκτης ηχομείωσης είναι ίδιος με αυτόν που θα πρόεκυπτε αν είχαμε μια απλή επιφάνεια με διπλάσια επιφανειακή μάζα.

5.10.2 ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΔΙΑΚΕΝΟΥ

$$\text{Στην σχέση } R = 10 \log \left| \frac{p_i}{p_t} \right|^2 = 10 \log \left[1 + 4 \left(\frac{\omega m}{2\rho c} \right)^2 \left(\cos kd - \left(\frac{\omega m}{2\rho c} \right) \sin kd \right)^2 \right]$$

στα σημεία που μηδενίζεται η ποσότητα:

$$\left(\cos kd - \left(\frac{\omega m}{2\rho c} \right) \sin kd \right)^2 = 0 \quad (80)$$

εφ' όσον $\log 1 = 0$, τότε και 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 την σχέση:

$$\tan kd = \frac{2\rho c}{\omega_0 m} \quad (81)$$

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 η εφάπτομένη μπορεί να γραφεί:

$$\tan kd \cong kd, \quad \frac{\omega_0}{c} d = \frac{2\rho c}{\omega_0 m} \quad (82)$$

Αν λύσουμε ως προς τη συχνότητα θα πάρουμε:

$$\omega_0^2 = \frac{2\rho c^2}{m d}, \quad f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2\rho c^2}{m d}} \quad (83)$$

Η συχνότητα αυτή ονομάζεται συχνότητα συντονισμού του διάκενου.

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

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1.8\gamma P(m_1 + m_2)}{d m_1 m_2}} \quad (84)$$

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

Στη σχέση 84 προστέθηκε η αριθμητική σταθερά 1.8 για καλύτερη συμφωνία των πειραματικών τιμών με τις προβλεπόμενες από την εξίσωση.

Αν για τον αέρα σε συνήθεις συνθήκες δεχτούμε τις τιμές $\gamma = 1.4$ και $P = 101.3 \times 10^3$ Pa τότε η παραπάνω σχέση καταλήγει στην

$$f_0 = \frac{113}{\sqrt{Md}} \quad (85)$$

όπου d η απόσταση των επιφανειών σε μέτρα, M η ανηγμένη επιφανειακή πυκνότητα που δίδεται από τον τύπο:

$$M = \frac{2m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad (86)$$

5.10.3 Η ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ f_1

Στη σχέση 80 για συχνότητες που ικανοποιούν την συνθήκη:

$$k_n d = (2n-1) \frac{\pi}{2} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (87)$$

το συνημίτονο μηδενίζεται ενώ το ημίτονο παίρνει την τιμή 1, οπότε η ποσότητα της σχέσης 79 μεγιστοποιείται. Δηλαδή

$$\left(\cos kd - \left(\frac{\omega m}{2\rho c} \right) \sin kd \right)^2 = \left(\frac{\omega m}{2\rho c} \right)^2 \quad (88)$$

και η ηχομείωση παρουσιάζει μέγιστο.

Η ηχομείωση παρουσιάζει συνεπώς μέγιστο στις συχνότητες:

$$f_1 = \frac{(2n-1)c}{4d} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (89)$$

Η ηχομείωση τότε δίνεται από την σχέση:

$$R_w \cong 40 \log \left(\frac{\omega m}{2 \rho c} \right) + 6 \quad (90)$$

Στην πράξη για την συχνότητα f_1 χρησιμοποιούμε την σχέση:

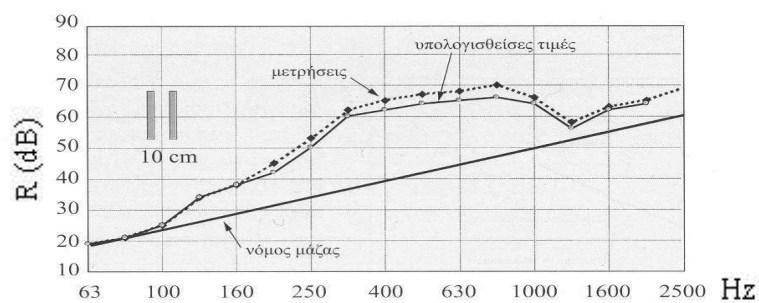
$$f_1 = \frac{c}{2 \pi d} = \frac{55}{d} \quad (91)$$

5.10.4 ΠΡΑΚΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΗΧΟΜΕΙΩΣΗΣ ΔΙΠΛΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

Στην πράξη όταν θέλουμε να υπολογίσουμε τον δείκτη ηχομείωσης, αν αγνοήσουμε την επίδραση των στηρίξεων των επιφανειών για επιφάνειες με μεγάλες διαστάσεις, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} R &= 20 \log(m f) - 47 & f < f_0 \\ R &= R_1 + R_2 + 20 \log(f d) - 29 & f_0 < f < f_1 \\ R &= R_1 + R_2 + 6 & f > f_1 \end{aligned} \quad (92)$$

όπου m το άθροισμα των επιφανειακών μαζών των υλικών ($m = m_1 + m_2$) σε kg/m^2 , οι συχνότητες f_1, f_0 δίδονται από τις σχέσεις 83, 91 και d το πάχος του διάκενου σε μέτρα. Το διάκενο θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 2.5 εκατοστά.

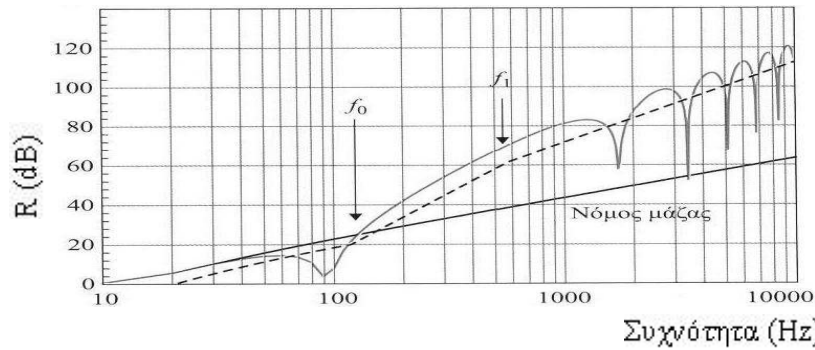


Σχήμα 5.10: Υπολογισθείσες από τις σχέσεις 80 τιμές της ηχομείωσης (διακεκομμένη γραμμή), μετρηθείσες (κουκκίδες) και υπολογισθείσες από τον νόμο της μάζας (ευθεία γραμμή).

Οι τύποι 92 δίδουν με αρκετά καλή προσέγγιση το δείκτη ηχομείωσης διπλών επιφανειών. Το σχήμα 5.10 συγκρίνει τις τιμές του δείκτη ηχομείωσης που προκύπτουν για ένα σύστημα γυψοσανίδων πάχους

1.59 cm με διάκενο μεταξύ τους 10 cm, με εφαρμογή του νόμου της μάζας (για κάθε γυψοσανίδα ξεχωριστά), και αυτές που προκύπτουν από τις σχέσεις 92. Στο ίδιο διάγραμμα φαίνονται οι μετρηθείσες τιμές.

Από το σχήμα φαίνεται ότι οι αποκλίσεις που προκύπτουν από τον νόμο της μάζας ελαχιστοποιούνται με την εφαρμογή των τύπων



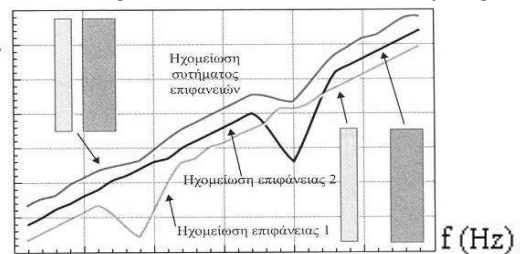
Σχήμα 5.11: Ηχομείωση από διπλές επιφάνειες. Η συνεχής καμπύλη παριστά την προβλεπόμενη ηχομείωση από την θεωρία, ενώ η εστιγμένη την αντίστοιχη από τους προσεγγιστικούς τύπους.

Το σχήμα 5.11 συγκρίνει την ηχομείωση διπλής επιφάνειας ($m = 10 \text{ kg} / \text{m}^2$) με διάκενο 10 cm, όπως αυτή προκύπτει από την εφαρμογή του τύπου

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

και των τύπων της σχέσης 92. Η κρίσιμη συχνότητα για κάθε επιφάνεια είναι 15kHz.

Γενικά αύξηση του διακένου 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.



Σχήμα 5.12: Σύγκριση δεικτών ηχομείωσης απλών επιφανειών και σύνθετης επιφάνειας.

Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η επίδραση του φαινομένου της σύμπτωσης στην ηχομείωση. Στην περίπτωση των παραθύρων 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. Το σχήμα 5.12 δείχνει τον δείκτη ηχομείωσης σύνθετου και απλών τοιχωμάτων με διαφορετικά βάρη κάθε επιφάνειας, όπου φαίνεται η βελτίωση της ηχομείωσης.

5.11 ΗΧΟΜΕΙΩΣΗ ΤΡΙΠΛΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ

Σε κάθε περίπτωση όπου υπάρχουν τριπλά χωρίσματα στην ηχομονωτική συμπεριφορά τους βασικό ρόλο παίζει η χαμηλότερη συχνότητα συντονισμού του διάκενου που δίνεται από τις σχέσεις 83 - 85, οι οποίες στην περίπτωση συμμετρικών τριπλών τοιχωμάτων τροποποιούνται όπως φαίνεται στη σχέση 81. Η σχέση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξίσου καλά και στην περίπτωση μη συμμετρικών τοιχωμάτων.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho c^2 (m_1 + m_2)}{m_1 m_3 (d_1 + d_2)}} \quad (93)$$

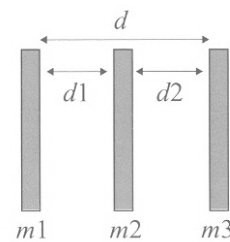
Δηλαδή η συχνότητα αυτή είναι η ίδια με αυτήν των διπλών τοιχωμάτων όταν λείπει η μεσαία επιφάνεια.

Για συχνότητες κάτω από τη συχνότητα

συντονισμού η επίδραση του μεσαίου τοιχώματος

στην ηχομονωτική συμπεριφορά είναι αμελητέα. Για **Σχήμα 5.13:** Τριπλά

συχνότητες πάνω από αυτήν η επίδραση του



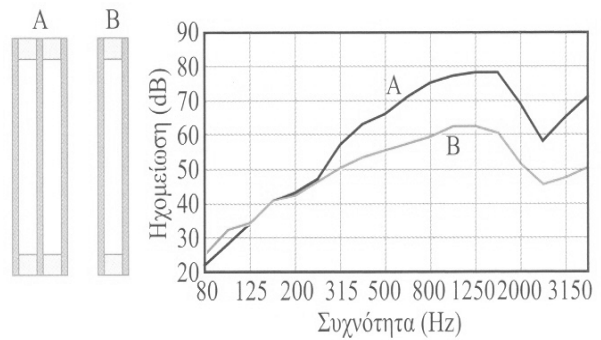
χωρίσματα

μεσαίου τοιχώματος είναι σημαντική και η ηχομείωση δίνεται από τον τύπο:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + 10 \log d_1 d_2 + 10 \log a_1 a_3 + 20 \log \frac{l_1 + l_2}{l_1 l_2} + 6 \quad (94)$$

όπου l_1, l_2 οι διαστάσεις της κοιλότητας (μήκος, πλάτος) και a_1, a_3 οι συντελεστές απορρόφησης των υλικών των κοιλοτήτων.

Το σχήμα 5.14 συγκρίνει (κατά τον Brekke) την ηχομονωτική συμπεριφορά των διπλών (γραμμή Β) και τριπλών χωρισμάτων (γραμμή Α) που αποτελούνται από χαρτόνι 1.2 mm. Περιμετρικά υπάρχει υαλοβάμβακας.



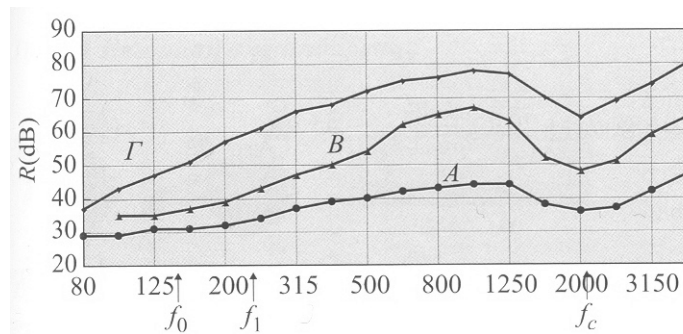
Σχήμα 5.14: Σύγκριση διπλών (γραμμή Β) και τριπλών τοιχωμάτων (γραμμή Α).

5.12 ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΗΧΟΜΕΙΩΣΗ

5.12.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ

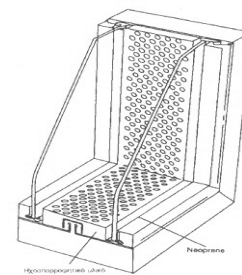
Το διάκενο μεταξύ των επιφανειών στις χαμηλές συχνότητες δρα σαν αποσβεστήρας των ταλαντώσεων που κάνουν, εφόσον βέβαια η απόσταση των επιφανειών είναι πολύ μεγαλύτερη από το μήκος κύματος του ήχου. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή σε αποστάσεις συγκρίσιμες με το μήκος κύματος, σχηματίζονται στάσιμα κύματα 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 συμβάλλει σε βαριές κατασκευές (π.χ. πέτρινοι τοίχοι).



Σχήμα 5.15: Ηχομείωση από απλή επιφάνεια (A) από διπλή επιφάνεια χωρίς απορροφητικό υλικό (B) και διπλής επιφάνειας με απορροφητικό υλικό (Γ).

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.



Σχήμα 5.16: Βελτίωση της απορρόφησης παραθύρων με απορροφητικό υλικό τοποθετημένο περιμετρικά του παραθύρου

5.12.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ

Στην περίπτωση των διπλών και τριπλών επιφανειών οι σχέσεις 92 ισχύουν μόνο όταν οι δυο επιφάνειες είναι απόλυτα μονωμένες μεταξύ τους. 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:

$$R = R + \Delta R_m \quad (95)$$

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

ι) Για σημειακές συνδέσεις:

$$\Delta R_m = 20 \log(ef_c) + 20 \log \frac{m_1}{m_1 + m_2} - 45 \quad (96)$$

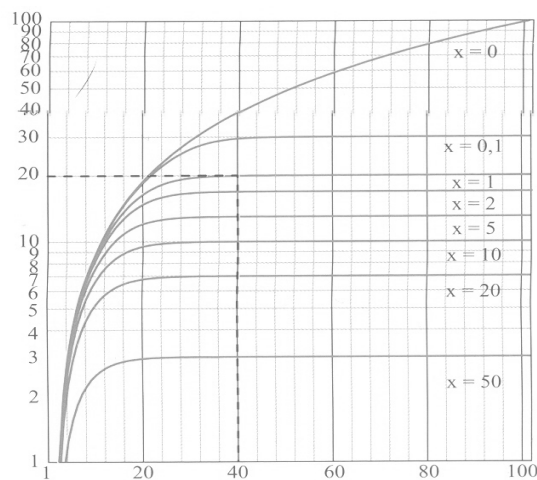
ii) Για γραμμικές συνδέσεις:

$$\Delta R_m = 10 \log(bf_c) + 20 \log \frac{m_1}{m_1 + m_2} - 18 \quad (97)$$

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

5.12.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΑΝΟΙΓΜΑΤΩΝ

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 σχήμα 5.17 δίνει τη μεταβολή της ηχομείωσης ενός χώρισματος σε συνάρτηση με το % ποσοστό του ανοίγματος (σε σχέση με το συνολικό εμβαδόν της επιφάνειας).



Σχήμα 5.17: Μείωση του συντελεστή

ηχομείωσης συναρτήσει

του % ποσοστού ανοίγματος

Η οριζόντια κλίμακα δίνει 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 40 dB αν υπάρχει άνοιγμα που να καλύπτει το 1% του συνολικού εμβαδού, τότε η ηχομείωση μειώνεται στα 20 dB.

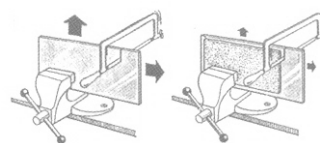
5.12.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ

Σύμφωνα με την σχέση 74 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 5.6).



Σχήμα 5.18: Επίδραση της απόσβεσης

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.λπ., (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.



Σχήμα 5.19: Αύξηση της απόσβεσης με την προσθήκη βισκοελαστικού υλικού

Αύξηση της απόσβεσης μπορούμε να επιτύχουμε σε σκληρά σώματα με την προσθήκη βισκο-ελαστικού πολυμερούς (viscoelastic polymer) στην επιφάνεια που δονείται. Για καλύτερη απόδοση, ένας πρακτικός κανόνας είναι να κολληθεί το 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.

5.13 ΣΤΑΘΜΙΣΜΕΝΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΗΧΟΜΕΙΩΣΗΣ

Για τον καθορισμό του δείκτη ηχομείωσης μιας επιφάνειας απαιτούνται τόσοι αριθμοί όσες είναι οι ζώνες 1/3 οκτάβας. Για λόγους απλούστευσης και κυρίως για να εκφράζεται η ηχομείωση μιας επιφάνειας με ένα μονό αριθμό ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των

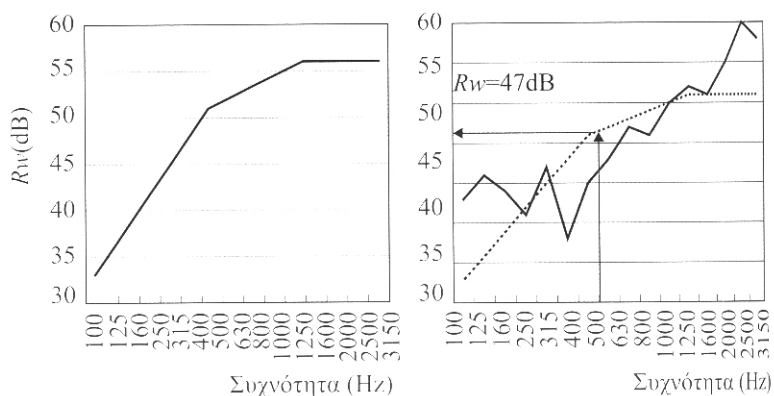
διαφόρων υλικών μεταξύ τους χρησιμοποιείται ο σταθμισμένος δείκτης ηχομείωσης (Rating of Sound Isolation), αντιστοιχώντας σε κάθε επιφάνεια ένα μονό αριθμό, σύμφωνα με τον κανονισμό ISO R 717/1 1982 και ΕΛΟΤ 461.1. Στα αμερικάνικα πρότυπα ο συντελεστής αυτός ονομάζεται STC Sound Transmission Loss και διαφέρει ελάχιστα από τον αντίστοιχο ISO.

Η κατάταξη της ηχομείωσης γίνεται ως εξής: Σε διαφανές χαρτί με κατάλληλη κλίμακα σχεδιάζεται η γραμμή που διέρχεται από τα σημεία του πίνακα 5.2. Σε αδιαφανές χαρτί με την ίδια κλίμακα τοποθετούνται οι τιμές του δείκτη ηχομείωσης στις κεντρικές συχνότητες κάθε τριτοοκτάβας.

Πίνακας 5.2: Τιμές αναφοράς

Κατάταξη ηχομείωσης αερόφερτου θορύβου								
Συχνότητα	100	125	160	200	250	315	400	500
R'	33	36	39	42	45	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 2 dB.



Σχήμα 5.20: Πρότυπη καμπύλη κατάταξης δείκτη ηχομείωσης

Βιβλιογραφικές αναφορές

Newell Philip (2003) Recording Studio Design, First Published 2003, Reprinted 2004. Burlington, Focal Press.

Σκαρλάτος Δημήτρης (2005) Εφαρμοσμένη Ακουστική, 2η έκδοση. Πάτρα, Εκδόσεις Φιλομάθεια.

ΠΡΑΚΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΥ

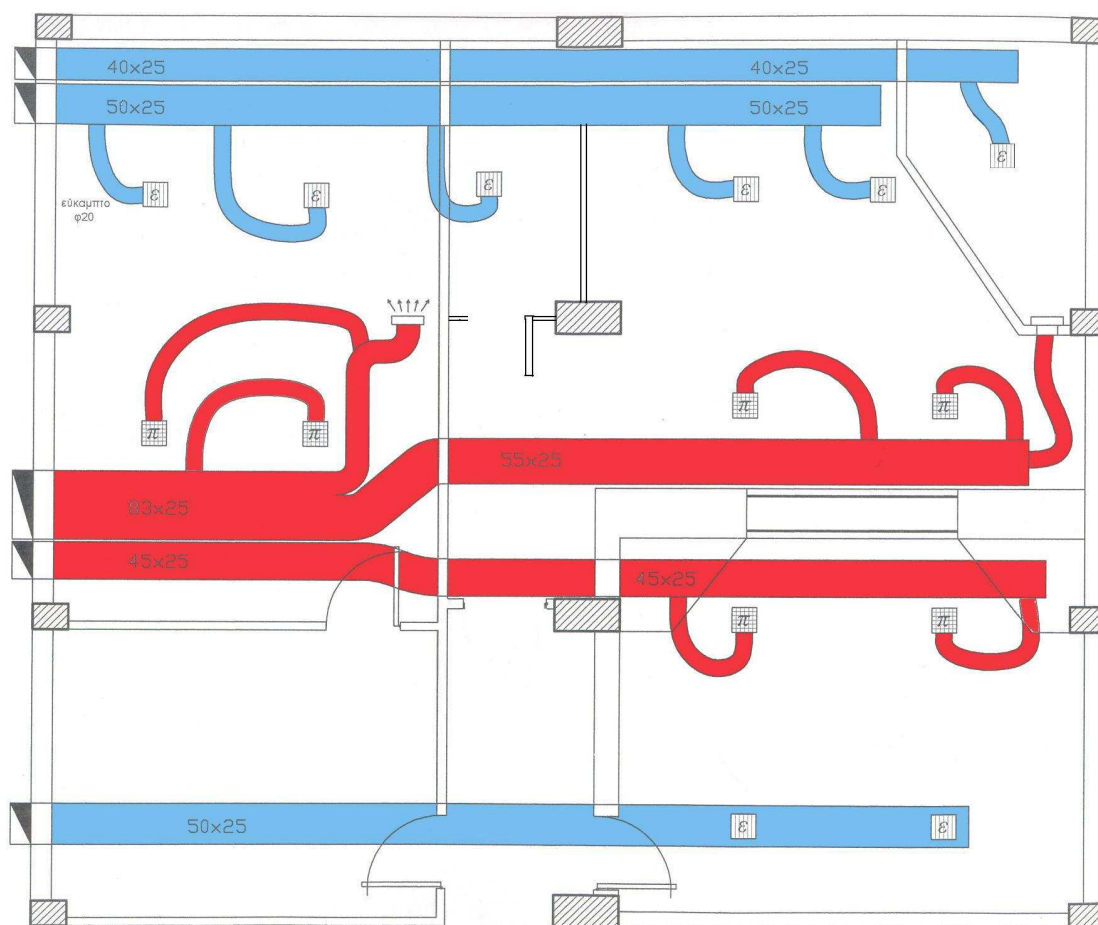
1.1 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ – ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΥ (HVAC) ΠΡΙΝ ΤΙΣ ΔΟΜΙΚΕΣ ΑΛΛΑΓΕΣ ΣΤΟ ΧΩΡΟ ΤΟΥ STUDIO ΗΧΟΓΡΑΦΗΣΕΩΝ

Στο σχέδιο που παρατίθεται παρουσιάζεται το σύστημα κλιματισμού – εξαερισμού του studio ηχογραφήσεων πριν τις δομικές αλλαγές. Σύμφωνα με αυτό παρατηρούμε ότι οι αεραγωγοί ακολουθούν διαδρομές, οι οποίες στο σύνολο τους συνδέουν κατ' ανάγκη δυο τουλάχιστον χώρους του studio. Τονίζουμε ότι υπάρχουν αεραγωγοί που είναι υπεύθυνοι για την εισροή θερμού - ψυχρού αέρα (οι οποίοι σημειώνονται με κόκκινο χρώμα) και άλλοι που ρυθμίζουν την αποβολή του υπάρχοντος βεβαρυμένου αέρα (γαλάζιο χρώμα).

Προχωρώντας σε περαιτέρω ανάλυση, βλέπουμε ότι οι δυο γειτονικοί αεραγωγοί επιστροφής (αποβολής) αέρα καλύπτουν τις ανάγκες τεσσάρων διαφορετικών χώρων, δηλαδή του νέου δωματίου ελέγχου (new control room), του δωματίου εγγραφής φωνής (voice booth), του χώρου ηχογραφήσεων (recording room) και του δωματίου εγγραφής κρουστών (drum booth). Ο τρίτος που βλέπουμε στο κάτω μέρος του σχεδίου, εξυπηρετεί την παροχή νωπού αέρα μεταξύ του κενού δωματίου (σημερινό Tascam's control room) και του δωματίου ελέγχου (σημερινό Pro Tools control room). Με ανάλογο τρόπο οι αεραγωγοί προσαγωγής αέρα χρησιμοποιούνται για την διοχέτευση του σε τέσσερις διαφορετικούς χώρους όσον αφορά τον πρώτο και τρεις χώρους για τον δεύτερο. Στην πρώτη περίπτωση οι χώροι που συνδέονται είναι το νέο δωμάτιο ελέγχου (new control room), το δωμάτιο εγγραφής φωνής (voice booth), ο χώρος ηχογραφήσεων (recording room) και το δωμάτιο εγγραφής κρουστών (drum booth). Στην δεύτερη περίπτωση τώρα, οι χώροι που εμπλέκονται είναι το νέο δωμάτιο ελέγχου (new control room), ο χώρος ηχογραφήσεων

(recording room) και το δωμάτιο ελέγχου (σημερινό Pro Tools control room).

Εν κατακλείδι, ο σχεδιασμός του συστήματος κλιματισμού – εξαερισμού εξυπηρετούσε την λειτουργία του studio ηχογραφήσεων πριν τις δομικές αλλαγές, μιας και το δωμάτιο ηχογράφησης (recording room) και το δωμάτιο ελέγχου (σημερινό Pro Tool control room) δεν ήταν ακουστικά συζευγμένοι χώροι μέσω των αεραγωγών μεταφοράς θερμού – ψυχρού αέρα.



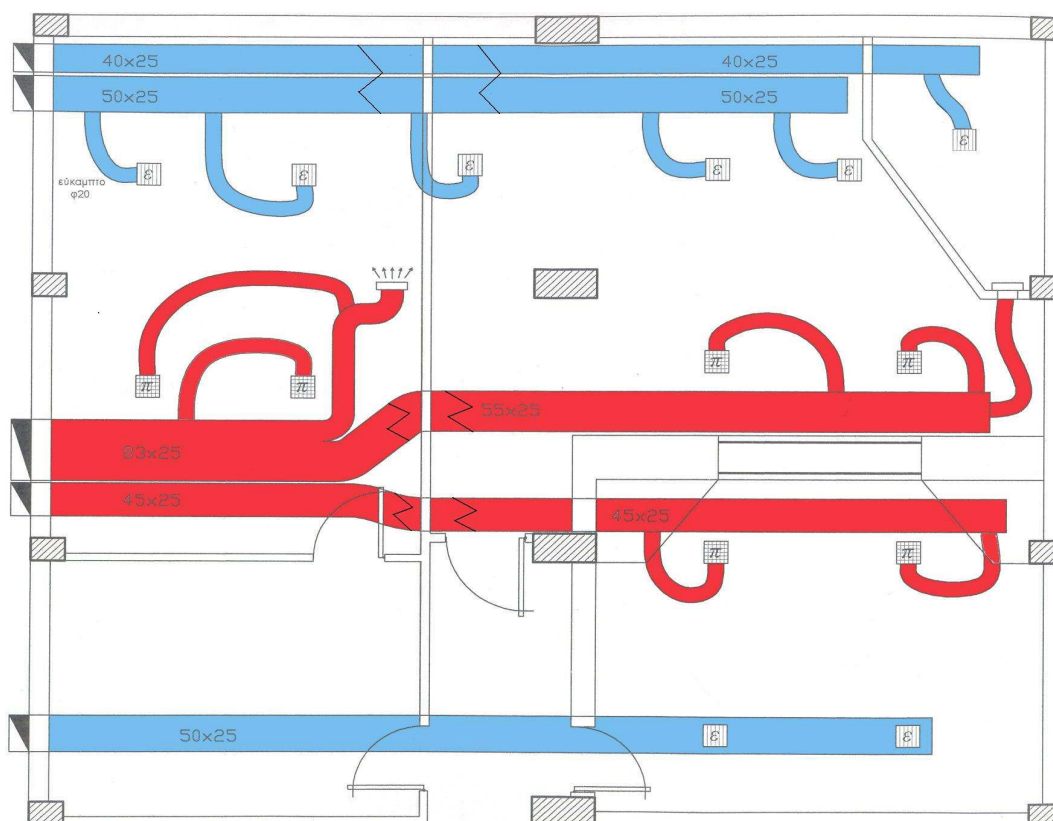
Σχήμα 1.1: Το σύστημα κλιματισμού – εξαερισμού πριν τις δομικές αλλαγές

1.2 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ – ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΥ (HVAC) ΤΟΥ ΝΕΟΥ STUDIO ΗΧΟΓΡΑΦΗΣΕΩΝ

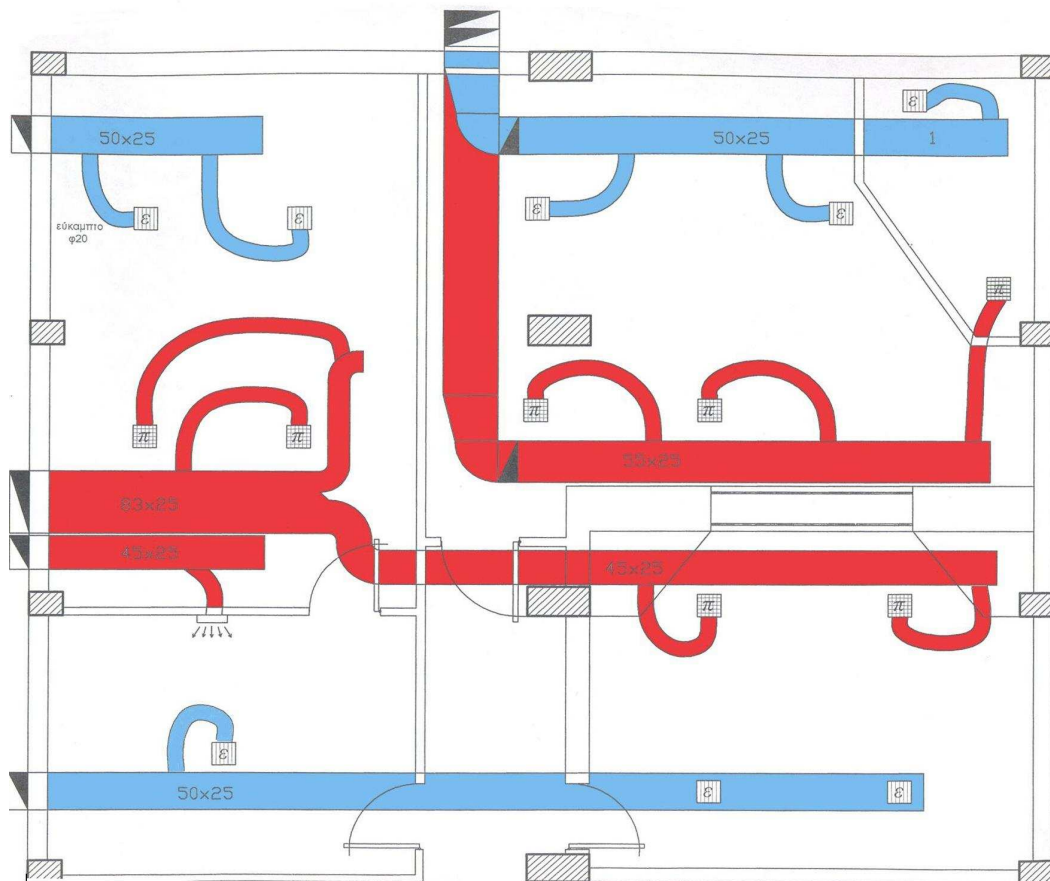
Μετά τις δομικές αλλαγές οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στο χώρο του studio παρουσιάστηκε η ανάγκη για βελτίωση του

συστήματος κλιματισμού – εξαερισμού, μιας και υπήρχε η ανάγκη να κατασταλεί όσο το δυνατό περισσότερο η μεταφορά του ήχου μέσω των αεραγωγών εξαιτίας της ενιαίας διαδρομής που ακολουθούσαν. Ο στόχος ήταν η δημιουργία ενός συστήματος το οποίο θα απομόνωνε ακουστικά τον χώρο ηχογράφησης και τους δύο χώρους καταγραφής (recording room – control rooms). Για την επίτευξη αυτού κρίθηκε απαραίτητος ο διαχωρισμός των αεραγωγών σε συγκεκριμένα σημεία, τα οποία φαίνονται στο σχέδιο που ακολουθεί (Σχήμα 1.2).

Επίσης παρουσιάζεται το σύστημα κλιματισμού – εξαερισμού στη σημερινή του μορφή. Αναλυτικότερα, παρατηρώντας τις αλλαγές οι οποίες επήλθαν στο σύστημα, αρχικά σημειώνουμε ότι οι χώροι παύουν να είναι ακουστικά συζευγμένοι λόγω του διαχωρισμού των αεραγωγών.

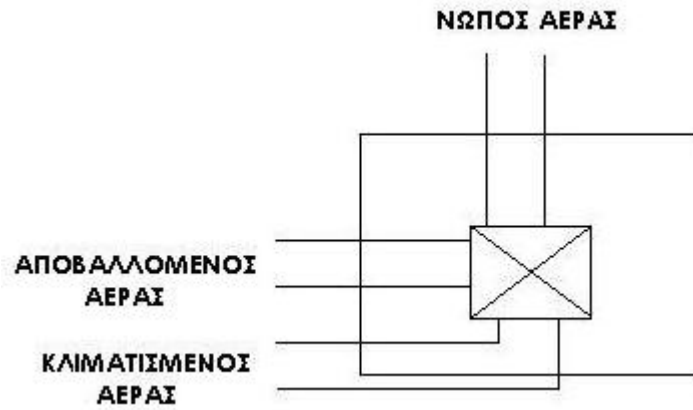


Σχήμα 1.2: Σημεία κοπής του συστήματος κλιματισμού – εξαερισμού



Σχήμα 1.3: Το σύστημα κλιματισμού – εξαερισμού μετά τις δομικές αλλαγές

Αναφερόμενοι στον χώρο ηχογράφησης (recording room) βλέπουμε ότι ο αεραγωγός επιστροφής του αέρα βρίσκεται τοποθετημένος άνωθεν του αεραγωγού της προσαγωγής αέρα στην αριστερή πάνω γωνία του σχεδίου. Το γεγονός αυτό δεν προκαλεί καμία διαταραχή καθ' όλη τη διάρκεια των ηχογραφήσεων λόγω της επένδυσης των αεραγωγών εσωτερικά με μονωτικό τύπου ARMAFLEX πάχους 2 cm με στόχο την βέλτιστη ηχομόνωσή τους. Τονίζεται ότι η επιλογή του νέου κλιματιστικού μηχανήματος έγινε με βάση την αθόρυβη και συμφέρουσα λειτουργία του, καθώς περιλαμβάνει ένα μηχανισμό μίξης, ο οποίος δίνει την δυνατότητα αντικατάστασης ενός ποσοστού του υπάρχοντος αέρα του δωματίου με το αντίστοιχο ποσοστό νωπού αέρα (φρέσκου).

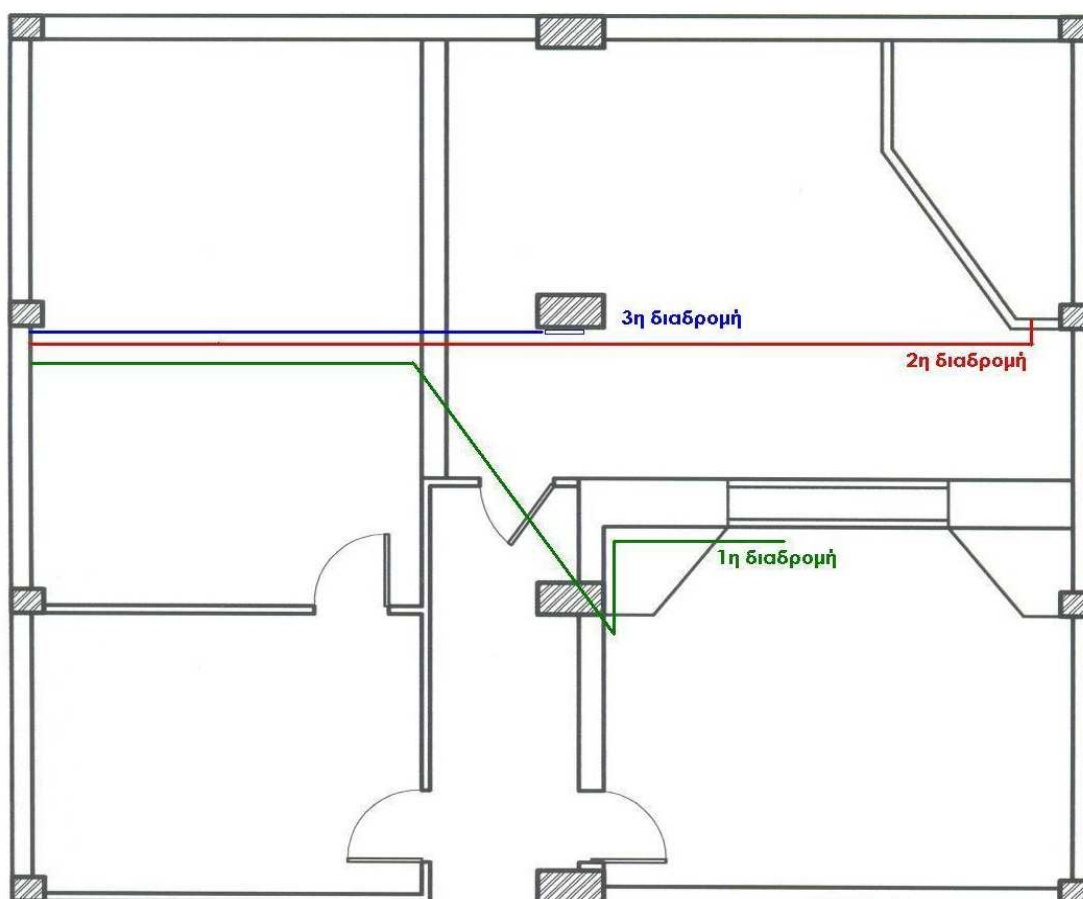


Σχήμα 1.4: Μηχανισμός μίξης αέρα

Ο μηχανισμός μίξης του σχήματος 1.4 είναι εσωτερικός και η χρήση του επιτρέπει την μεταβολή ποσοστού του νωπού αέρα, σε σχέση με τον κλιματιζόμενο.

2. ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΣΗΜΑΤΩΝ

Μεταξύ των χώρων του studio ηχογραφήσεων υπάρχουν τρεις βασικές αμφίδρομες διαδρομές σημάτων. Η πρώτη διαδρομή σήματος συνδέει το δωμάτιο ελέγχου Pro Tools με το νέο δωμάτιο ελέγχου, όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί. Η συγκεκριμένη περιλαμβάνει τρία μοντέλα καλωδίων, εκ των οποίων ένα PW16, ένα OW08x3 και ένα DMX1p. Η δεύτερη διαδρομή σήματος συνδέει το δωμάτιο κρουστών (drum booth) με το νέο δωμάτιο ελέγχου. Περιλαμβάνει μόνο ένα μοντέλο καλωδίου, το PW12. Τέλος, η τρίτη διαδρομή σήματος συνδέει το χώρο ηχογραφήσεων με το νέο δωμάτιο ελέγχου και περιλαμβάνει δυο μοντέλα καλωδίων, ένα PW32 και ένα PW08.



Σχήμα 2.1: Βασικές διαδρομές σημάτων

Σχετικά με τα μοντέλα των καλωδίων που προαναφέρθηκαν επισημαίνουμε τα εξής: το καλώδιο PW16 διαθέτει δυο 25pin τύπου D-SUB στο δωμάτιο έλεγχου Pro Tools τα οποία καταλήγουν στο patch bay της Audient κονσόλας στο νέο δωμάτιο ελέγχου, εκ των οποίων τα οκτώ πρώτα είναι ασύνδετα. Αυτό το καλώδιο μας δίνει τη δυνατότητα να πάρουμε 16 line σήματα αναλογικά και να τα μεταφέρουμε από το ένα δωμάτιο ελέγχου στο άλλο. Καλύπτει το standard ADG24 και έχει αντίσταση μικρότερη των 85 Ω ανά χιλιόμετρο. Το καλώδιο τύπου OW08 είναι ένα ψηφιακό καλώδιο αντίστασης 110 Ω και καλύπτει τα standards της AES/EBU. Το καλώδιο τύπου DMX1p έχει αντίσταση 110 Ω και λόγω του ότι διαθέτει τα ίδια χαρακτηριστικά με ένα MIDI καλώδιο, γι' αυτόν τον λόγο το χρησιμοποιούμε και εμείς ως MIDI καλώδιο.

Το καλώδιο τύπου PW12 συνδέει το wall box της Audient που βρίσκεται στο δωμάτιο κρουστών (drum booth) με τους προενισχυτές της στο νέο δωμάτιο ελέγχου. Καλύπτει επίσης το standard ADG24 και έχει αντίσταση μικρότερη των 85 Ω ανά χιλιόμετρο.

Το καλώδιο τύπου PW32 συνδέει το wall box του χώρου ηχογραφήσεων με τους προενισχυτές της Audient κονσόλας καθώς και με το patch bay. Το καλώδιο τύπου PW08 αφορά τις εξόδους του προενισχυτή Focusrite Red 1-8. Τα δυο αυτά μοντέλα καλωδίων, ως αναλογικά, καλύπτουν το standard ADG24 και έχουν αντίσταση μικρότερη των 85 Ω ανά χιλιόμετρο.

Πίνακας 2.1: Σύνδεση περιφερειακών συσκευών με το patch bay

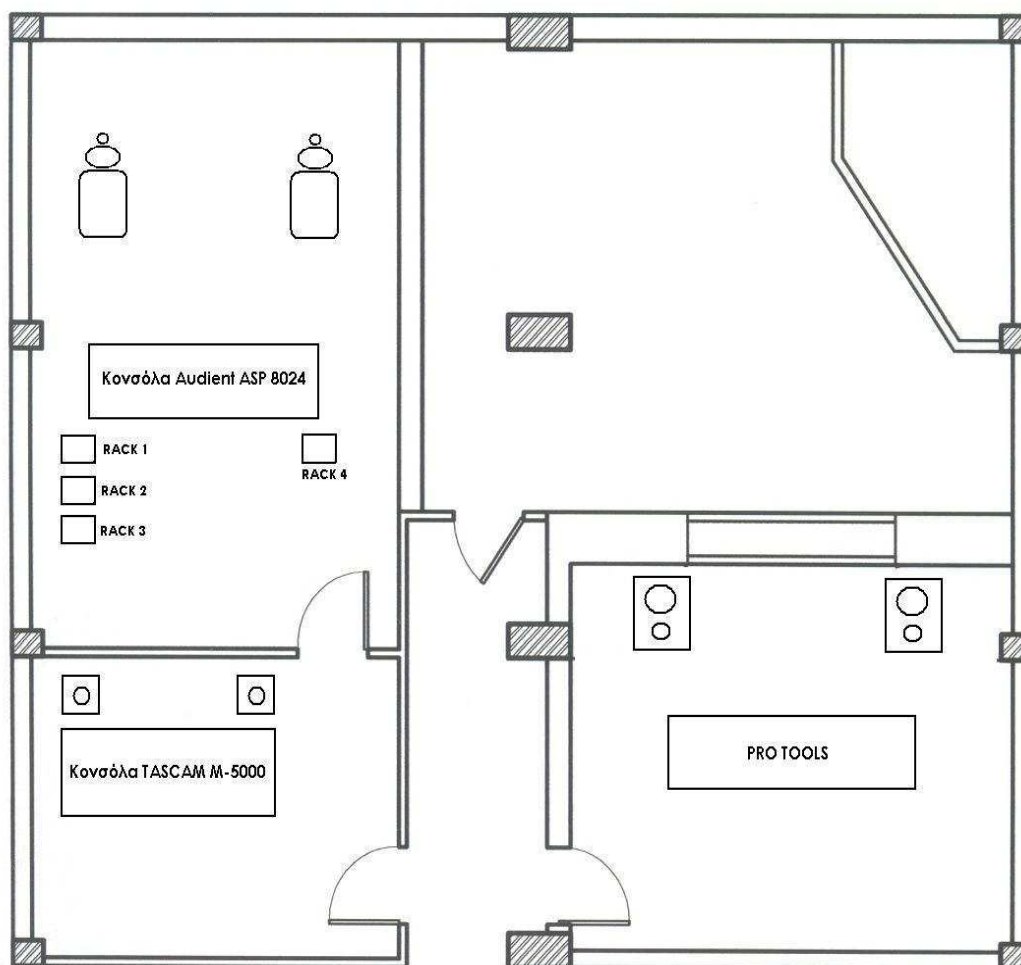
1	TIE LINE 1	WEISS MIC IN1	10	TIE LINE 10	ISA 430 DYN IN
2	TIE LINE 2	WEISS MIC IN2	11	TIE LINE 11	ISA 430 DYN OUT
3	TIE LINE 3	WEISS LINE IN1	12	TIE LINE 12	ISA 430 GATE KEY IN
4	TIE LINE 4	WEISS LINE IN 2	13	TIE LINE 13	ISA 430 COMP KEY IN
5	TIE LINE 5	ISA 430 MIC IN	14	TIE LINE 14	ISA 430 MAIN OUT
6	TIE LINE 6	ISA 430 LINE IN	15	TIE LINE 15	ISA 430 ADC IN 1
7	TIE LINE 7	ISA PRE OUT	16	TIE LINE 16	ISA 430 ADC IN 2
8	TIE LINE 8	ISA 430 EQ IN	17	TIE LINE 17	TC 4000 LEFT IN
9	TIE LINE 9	ISA 430 EQ OUT	18	TIE LINE 18	TC 4000 RIGHT IN

19	TIE LINE 19	TC 4000 LEFT OUT	58	TIE LINE 58	L-960 CH2 OUT
20	TIE LINE 20	TC 4000 RIGHT OUT	59	TIE LINE 59	L-960 CH3 OUT
21	TIE LINE 21	TC M3000 LEFT IN	60	TIE LINE 60	L-960 CH4 OUT
22	TIE LINE 22	TC M3000 RIGHT IN	61	TIE LINE 61	L-960 CH5 OUT
23	TIE LINE 23	TC M3000 LEFT OUT	62	TIE LINE 62	L-960 CH6 OUT
24	TIE LINE 24	TC M3000 RIGHT OUT	63	TIE LINE 63	L-960 CH7 OUT
25	TIE LINE 25	PCM 91 LEFT IN	64	TIE LINE 64	L-960 CH8 OUT
26	TIE LINE 26	PCM 91 RIGHT IN	65	TIE LINE 65	DBX DDP LEFT IN
27	TIE LINE 27	PCM 91 LEFT OUT	66	TIE LINE 66	DBX DDP RIGHT IN
28	TIE LINE 28	PCM 91 RIGHT OUT	67	TIE LINE 67	DBX DDP LEFT OUT
29	TIE LINE 29	MPX 500 LEFT IN	68	TIE LINE 68	DBX DDP RIGHT OUT
30	TIE LINE 30	MPX 500 RIGHT IN	69	TIE LINE 69	DS404 CH1 IN
31	TIE LINE 31	MPX 500 LEFT OUT	70	TIE LINE 70	DS404 CH1 OUT
32	TIE LINE 32	MPX 500 RIGHT OUT	71	TIE LINE 71	DS404 CH1 KEY IN
33	TIE LINE 33	DSP 7500 LEFT IN	72	TIE LINE 72	DS404 CH2 IN
34	TIE LINE 34	DSP 7500 RIGHT IN	73	TIE LINE 73	DS404 CH2 OUT
35	TIE LINE 35	DSP 7500 LEFT OUT	74	TIE LINE 74	DS404 CH2 KEY IN
36	TIE LINE 36	DSP 7500 RIGHT OUT	75	TIE LINE 75	DS404 CH3 IN
37	TIE LINE 37	PB 1 WALL BOX	76	TIE LINE 76	DS404 CH3 OUT
38	TIE LINE 38	PB 2 WALL BOX	77	TIE LINE 77	DS404 CH3 KEY IN
39	TIE LINE 39	AVALON M5 IN	78	TIE LINE 78	DS404 CH4 IN
40	TIE LINE 40	AVALON M5 OUT	79	TIE LINE 79	DS404 CH4 OUT
41	TIE LINE 41	DIGITECH 400 CH1 IN	80	TIE LINE 80	DS404 CH4 KEY IN
42	TIE LINE 42	DIGITECH 400 CH2 IN	81	TIE LINE 81	DBX 1066 LEFT IN
43	TIE LINE 43	DIGITECH 400 CH3 IN	82	TIE LINE 82	DBX 1066 RIGHT IN
44	TIE LINE 44	DIGITECH 400 CH4 IN	83	TIE LINE 83	DBX 1066 LEFT OUT
45	TIE LINE 45	DIGITECH 400 CH1 OUT	84	TIE LINE 84	DBX 1066 RIGHT OUT
46	TIE LINE 46	DIGITECH 400 CH2 OUT	85	TIE LINE 85	DBX 1066 LEFT KEY IN
47	TIE LINE 47	DIGITECH 400 CH3 OUT	86	TIE LINE 86	DBX 1066 RIGHT KEY IN
48	TIE LINE 48	DIGITECH 400 CH4 OUT	87	TIE LINE 87	
49	TIE LINE 49	L-960 CH1 IN	88	TIE LINE 88	
50	TIE LINE 50	L-960 CH2 IN	89	TIE LINE 89	DBX 106SL LEFT IN
51	TIE LINE 51	L-960 CH3 IN	90	TIE LINE 90	DBX 106SL RIGHT IN
52	TIE LINE 52	L-960 CH4 IN	91	TIE LINE 91	DBX 106SL LEFT OUT
53	TIE LINE 53	L-960 CH5 IN	92	TIE LINE 92	DBX 106SL RIGHT OUT
54	TIE LINE 54	L-960 CH6 IN	93	TIE LINE 93	DBX 106SL LEFT SEND
55	TIE LINE 55	L-960 CH7 IN	94	TIE LINE 94	DBX 106SL LEFT RTN
56	TIE LINE 56	L-960 CH8 IN	95	TIE LINE 95	DBX 106SL RIGHT SEND
57	TIE LINE 57	L-960 CH1 OUT	96	TIE LINE 96	DBX 106SL RIGHT RTN

97	TIE LINE 97	AD2044 LEFT IN	121	TIE LINE 121	FOCUSRITE RED 1 OUT 1
98	TIE LINE 98	AD2044 RIGHT IN	122	TIE LINE 122	FOCUSRITE RED 1 OUT 2
99	TIE LINE 99	AD2044 LEFT OUT	123	TIE LINE 123	FOCUSRITE RED 1 OUT 3
100	TIE LINE 100	AD2044 RIGHT OUT	124	TIE LINE 124	FOCUSRITE RED 1 OUT 4
101	TIE LINE 101	AD2044 LEFT KEY IN	125	TIE LINE 125	FOCUSRITE RED 1 OUT 5
102	TIE LINE 102	AD2044 RIGHT KEY IN	126	TIE LINE 126	FOCUSRITE RED 1 OUT 6
103	TIE LINE 103	RED 2-1 LEFT IN	127	TIE LINE 127	FOCUSRITE RED 1 OUT 7
104	TIE LINE 104	RED 2-1 RIGHT IN	128	TIE LINE 128	FOCUSRITE RED 1 OUT 8
105	TIE LINE 105	RED 2-1 LEFT OUT	129	TIE LINE 129	DELTA 66 IN 1
106	TIE LINE 106	RED 2-1 RIGHT OUT	130	TIE LINE 130	DELTA 66 IN 2
107	TIE LINE 107	RED 2-1 LEFT KEY IN	131	TIE LINE 131	DELTA 66 IN 3
108	TIE LINE 108	RED 2-1 RIGHT KEY IN	132	TIE LINE 132	DELTA 66 IN 4
109	TIE LINE 109	RED 2-2 LEFT IN	133	TIE LINE 133	DELTA 66 OUT 1
110	TIE LINE 110	RED 2-2 RIGHT IN	134	TIE LINE 134	DELTA 66 OUT 2
111	TIE LINE 111	RED 2-2 LEFT OUT	135	TIE LINE 135	DELTA 66 OUT 3
112	TIE LINE 112	RED 2-2 RIGHT OUT	136	TIE LINE 136	DELTA 66 OUT 4
113	TIE LINE 113	RED 2-2 LEFT KEY IN	137	TIE LINE 137	PRO TOOLS OUT 9
114	TIE LINE 114	RED 2-2 RIGHT KEY IN	138	TIE LINE 138	PRO TOOLS OUT 10
115	TIE LINE 115		139	TIE LINE 139	PRO TOOLS OUT 11
116	TIE LINE 116		140	TIE LINE 140	PRO TOOLS OUT 12
117	TIE LINE 117		141	TIE LINE 141	PRO TOOLS OUT 13
118	TIE LINE 118		142	TIE LINE 142	PRO TOOLS OUT 14
119	TIE LINE 119		143	TIE LINE 143	PRO TOOLS OUT 15
120	TIE LINE 120		144	TIE LINE 144	PRO TOOLS OUT 16

Ο πίνακας που αναγράφεται παραπάνω παρουσιάζει αναλυτικά τις εισόδους – εξόδους των περιφερειακών συσκευών και την σύνδεσή τους στο patch bay της κονσόλας. Σημειώνουμε ότι ο όρος TIE LINE αναφέρεται σε θέσεις βυσμάτων στο patch bay της κονσόλας που χρησιμοποιούνται για την σύνδεση περιφερειακών συσκευών.

Σχηματικά παρουσιάζονται παρακάτω οι θέσεις των βασικότερων συσκευών σε κάθε δωμάτιο ελέγχου του studio ηχογραφήσεων. Επίσης παρατίθεται σύντομη αναφορά στις επιμέρους περιφερειακές συσκευές του νέου δωματίου ελέγχου (Racks 1-4).



Σχημα 2.2: Χαρτογράφηση συσκευών του studio ηχογραφήσεων

Πίνακας 2.2: Περιφερειακές μονάδες νέου δωματίου ελέγχου

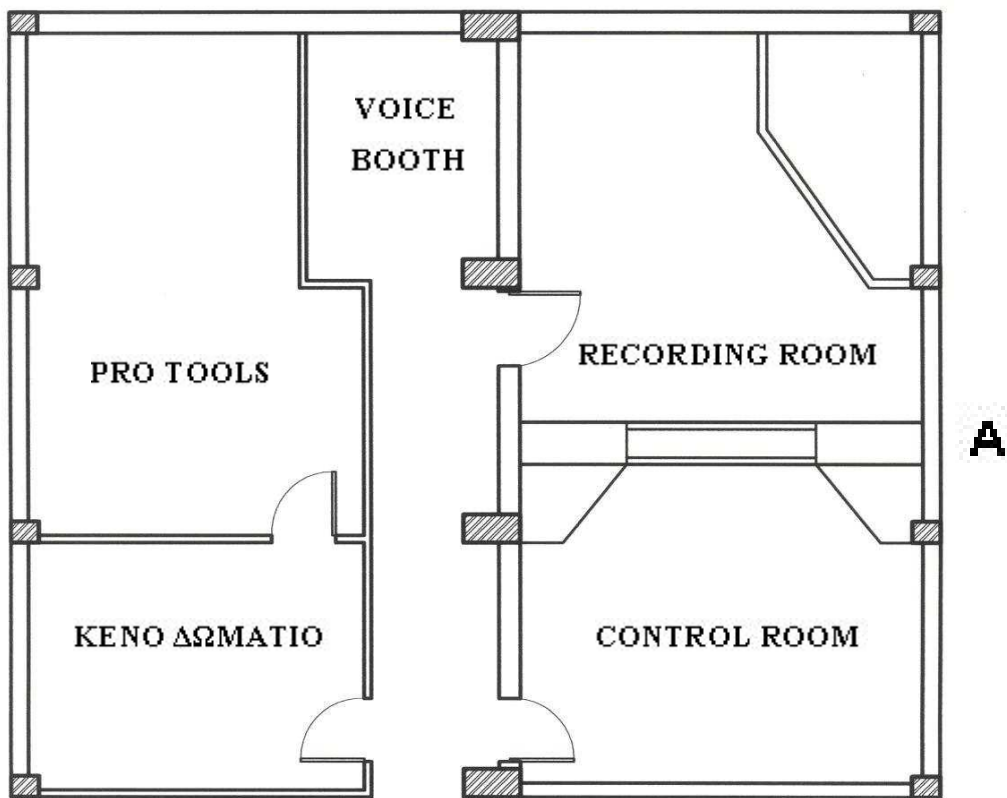
Rack 1	Rack 2	Rack 3	Rack 4
Drawmer Quad-Gate DS404	dbx 160SL Compressor- Limiter	Weiss ADC 2 Analog to Digital Converter	Ηλεκτρονικός υπολογιστής
dbx 1066 Compressor/Limiter/Gate	Avalon Design AD 2044 Pure Class A Compressor	Focusrite Producer Pack ff ISA 430 MK II	Tascam DA-40
dbx DDP Digital Dynamics Processor	Focusrite Red 3 Dual Compressor-Limiter (Unit 1)	t.c. electronic Reverb 4000 High definition reverb	HHD BurnIT Plus CDR-830 Compact Disc Recorder
Focusrite Red 1 Quad Mic-pre	Focusrite Red 3 Dual Compressor-Limiter (Unit 2)	t.c. electronic M3000 Studio reverb processor	TASCAM DA-78HR High Resolution DTRS
DigiTech Studio 400 4 in 4 out Multi-Effects Processor		Lexicon PCM 91 Digital reverberator	TASCAM DA-78HR High Resolution DTRS
Lexicon 960L Digital Effects System		Lexicon MPX 550 Dual Channel Processor	TASCAM DA-38 DTRS
		Eventide DSP7500 Ultra Harmonizer Sampling Special Edition	

3. ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΩΝ ΣΤΟΝ ΧΩΡΟ ΤΟΥ STUDIO ΗΧΟΓΡΑΦΗΣΕΩΝ

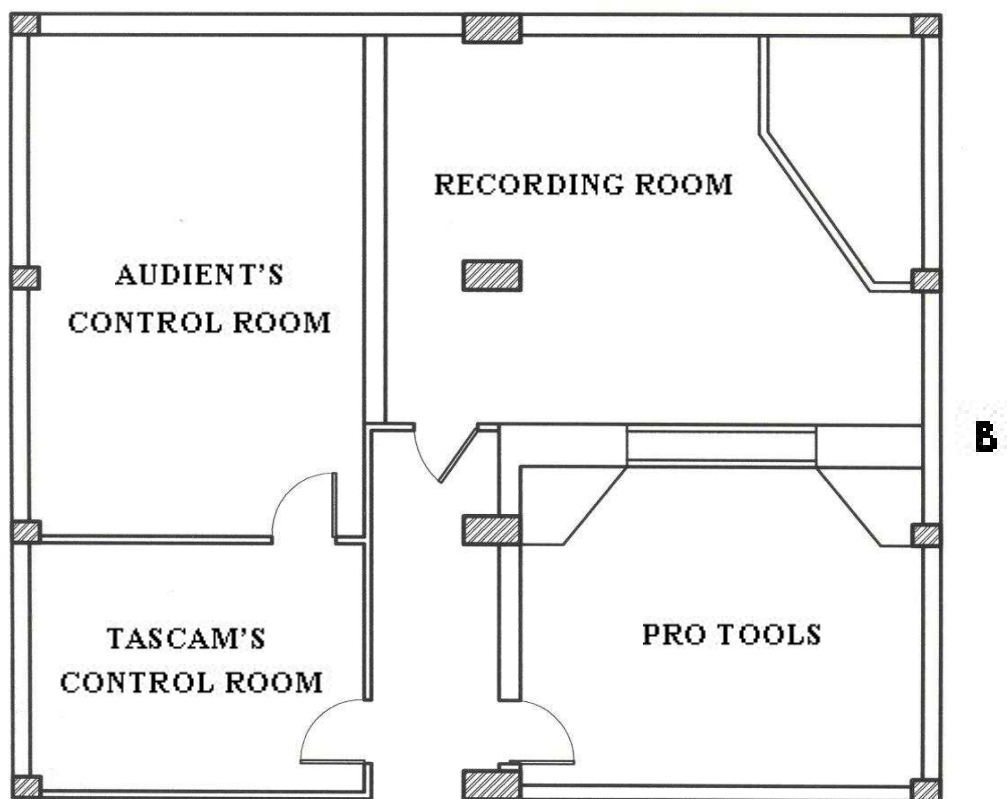
Έπειτα από πέντε χρόνια λειτουργίας του Α.Τ.Ε.Ι. Ρεθύμνου, λόγω του αυξημένου αριθμού των σπουδαστών καθώς και των συνεχώς αυξανόμενων απαιτήσεων, κρίθηκαν αναγκαίες ορισμένες αλλαγές στον χώρο του studio ηχογραφήσεων, έχοντας ως στόχο την αποτελεσματικότερη λειτουργία του. Οι μετατροπές αυτές περιελάμβαναν, εκτός από την αναβάθμιση του εξοπλισμού, ορισμένες δομικές αλλαγές στους χώρους. Η καθημερινή χρήση του studio από καθηγητές και σπουδαστές του τμήματος κατέστησε σαφές πως η δημιουργία ενός δεύτερου δωματίου ελέγχου ήταν επιτακτική, καθώς και η εκμετάλλευση ενός άδειου δωματίου για τις ανάγκες του μαθήματος Ηχοληψία Ι. Επίσης, το δωμάτιο το οποίο είχε κατασκευαστεί με στόχο την καταγραφή φωνής (voice booth) δεν είχε καμιά πρακτική χρήση και αποφασίστηκε η κατεδάφισή του με σκοπό την μεγέθυνση του χώρου ηχογραφήσεων (recording room).

Οι εργασίες ξεκίνησαν με την κατεδάφιση του δωματίου καταγραφής φωνής (voice booth). Έπειτα, γκρεμίστηκε το τμήμα του τοίχου που χώριζε το δωμάτιο καταγραφής φωνής (voice booth) από το νέο δωμάτιο ελέγχου (σχήμα 3.1Α). Οι εργασίες συνεχίστηκαν με την ανακατασκευή αυτού του μέρους του τοίχου (σχήμα 3.1Β). Σε επόμενο στάδιο πραγματοποιήθηκαν μετατροπές στο σύστημα κλιματισμού – εξαερισμού, οι οποίες και επεξηγούνται λεπτομερώς στην αντίστοιχη ενότητα.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι αλλαγές που έγιναν. Στην πρώτη κάτοψη (σχήμα 3.1Α) βλέπουμε το studio ηχογραφήσεων πριν την ανακατασκευή του και παρατηρούμε το διαχωρισμό και τη χρήση κάθε δωματίου ξεχωριστά. Στην δεύτερη κάτοψη (σχήμα 3.1Β) διακρίνονται οι διαφοροποιήσεις στο χώρο του studio και η χρήση του κάθε δωματίου μετά τις δομικές αλλαγές.



ΚΑΤΟΨΗ STUDIO ΗΧΟΓΡΑΦΗΣΕΩΝ
ΠΡΙΝ ΤΙΣ ΔΟΜΙΚΕΣ ΑΛΛΑΓΕΣ



ΚΑΤΟΨΗ STUDIO ΗΧΟΓΡΑΦΗΣΕΩΝ
ΜΕΤΑ ΤΙΣ ΔΟΜΙΚΕΣ ΑΛΛΑΓΕΣ

Σχήμα 3.1: Κάτοψη studio ηχογραφήσεων πριν και μετά τις δομικές αλλαγές

4. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

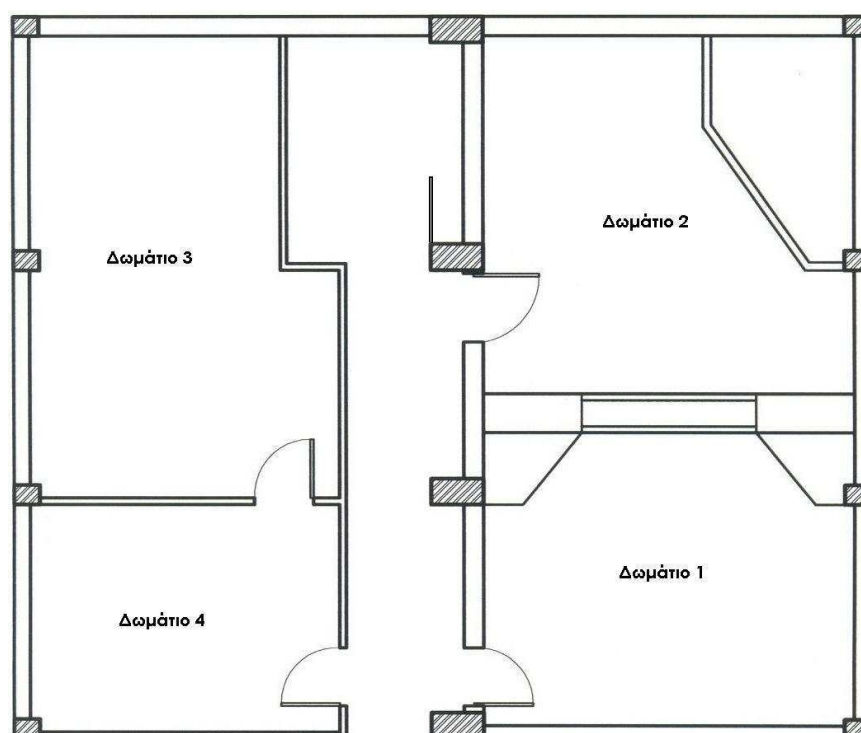
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Δεδομένου του ότι οι μετρήσεις στους χώρους του studio ηχογραφήσεων έπρεπε να πραγματοποιηθούν με την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια, χρησιμοποιήσαμε όλα τα συστήματα (hardware-software) ακουστικών μετρήσεων, που είχαμε στη διάθεσή μας και τα οποία είναι τα ακόλουθα:

- 01 dB Metravib Version 1.4.0.0 dBFA Suite (Symphonie system)
- MLSSA Version 10WI DRA Laboratories.
- SpectraLAB FFT Spectral Analysis System Version 4.32.13.

Με αυτό τον τρόπο μας δινόταν πολλές φορές η δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων.

Σχηματικά παρουσιάζουμε την κάτοψη του studio ηχογραφήσεων πριν τις δομικές αλλαγές και για λόγους ευκολίας θα αναφερόμαστε στο κάθε δωμάτιο με μια συγκεκριμένη ονομασία, όπως για παράδειγμα ο χώρος ηχογραφήσεων θα αναφέρεται ως δωμάτιο 2.



Σχήμα 4.1: Κάτοψη του studio ηχογραφήσεων και ονομασία των χώρων

4.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

4.2.1. ΔΩΜΑΤΙΟ 1^ο (ΠΑΛΙΟ ΔΩΜΑΤΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ)

4.2.1.1 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ MLSSA

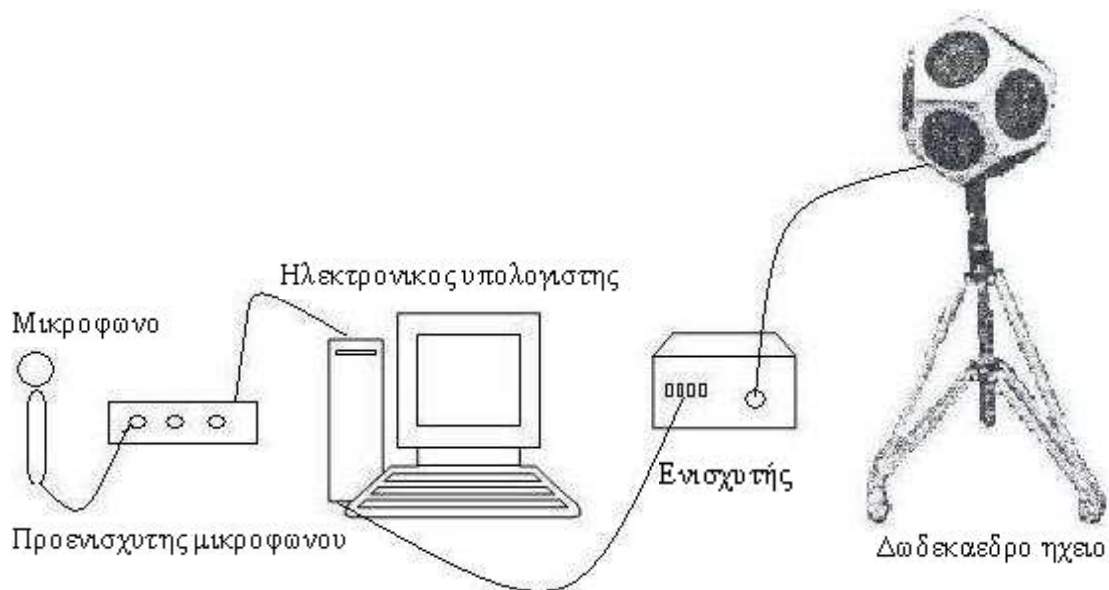
Αρχικά έγιναν μετρήσεις με το σύστημα MLSSA και στους τέσσερις χώρους του studio πριν τις δομικές αλλαγές που επήλθαν. Η διέγερση των χώρων πραγματοποιήθηκε με Ακολουθία Μεγίστου Μήκους (MLS). Ο στόχος ήταν η παρατήρηση της ακουστικής συμπεριφοράς των δωματίων. Σε κάθε χώρο τοποθετήθηκαν σε 5 διαφορετικές θέσεις το μικρόφωνο και η πηγή αντίστοιχα. Για να γίνει η παρουσίαση των διαγραμμάτων δημιουργήθηκε ειδικό πρόγραμμα το οποίο διάβαζε τα ειδικά αρχεία που δημιουργεί το MLSSA.

Το συγκεκριμένο σύστημα μετρήσεων με το MLSSA αποτελείται από:

- Έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή, ο οποίος έχει εγκατεστημένο το hardware και το software του προγράμματος MLSSA.
- Προενισχυτή μικροφώνου
- Μικρόφωνο Earthworks
- Ενισχυτή
- Δωδεκάεδρο ηχείο

Η συνδεσμολογία παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί.

Συνδεσμολογία μέτρησης:

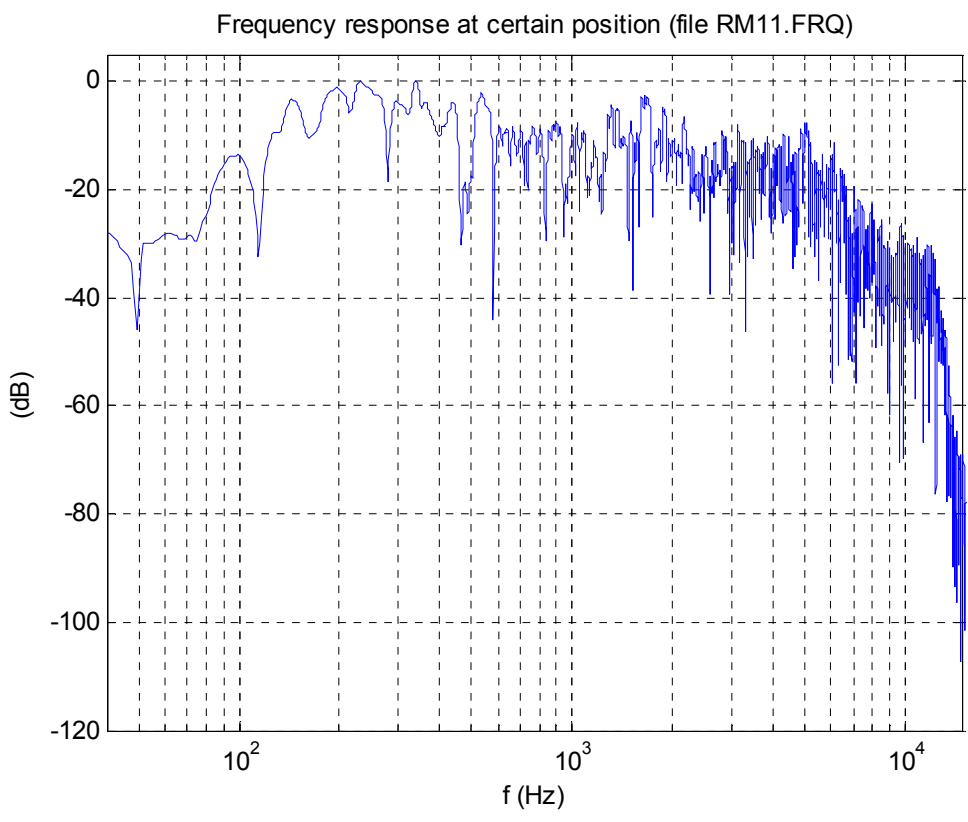
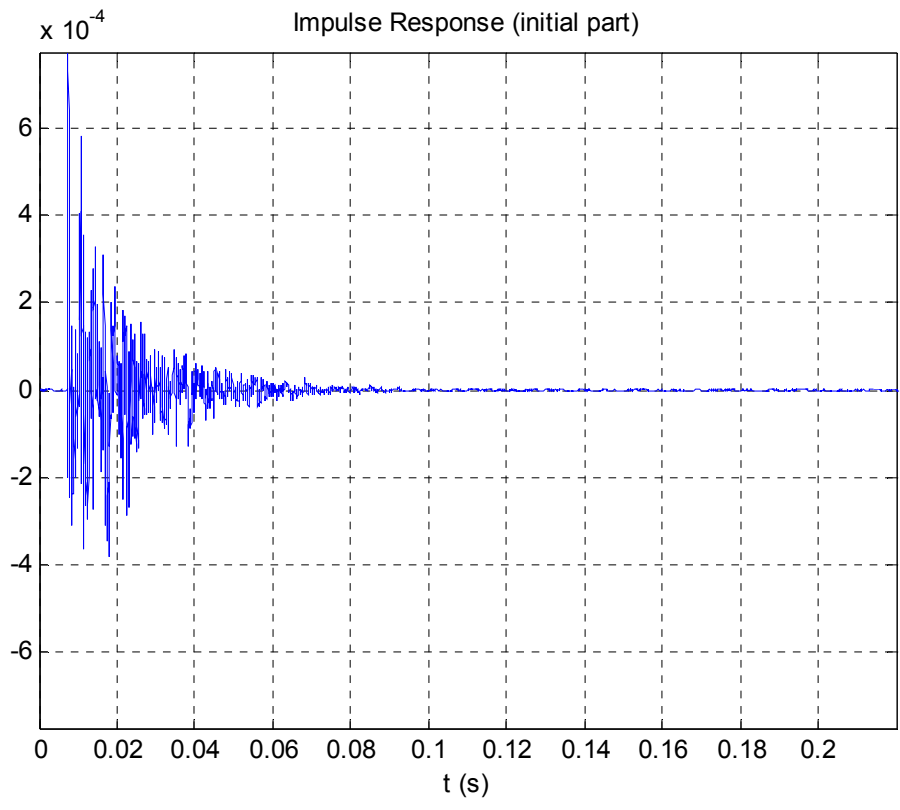


Σχήμα 4.2: Συνδεσμολογία του συστήματος μέτρησης MLSSA

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, το σήμα από την κάρτα του MLSSA (ακολουθία μεγίστου μήκους) ενισχύεται και οδηγεί το δωδεκάεδρο ηχείο. Το μικρόφωνο είναι συνδεδεμένο στον δικό του προενισχυτή, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με την σειρά του στην κάρτα του MLSSA και λαμβάνει την απόκριση του χώρου. Το λειτουργικό σύστημα πάνω στο οποίο βασίζεται το σύστημα μετρήσεων MLSSA είναι το MS-DOS !!

Μέτρηση 1η





Σχήμα 4.3: Διέγερση με MLS και συχνοτική απόκριση δωματίου

4.2.1.2 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕ

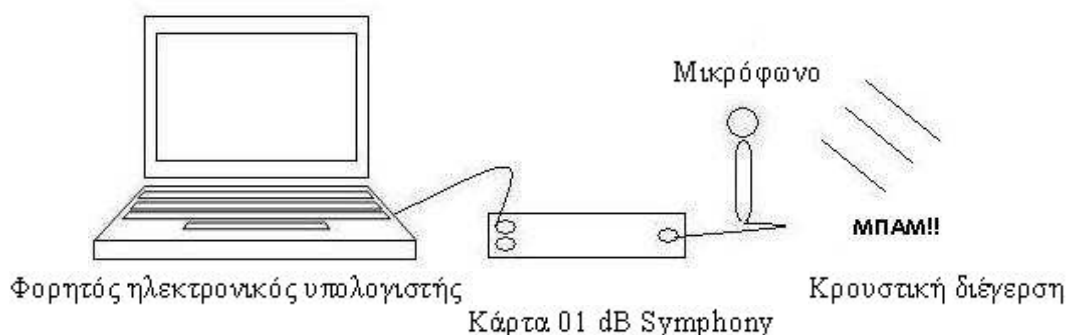
ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ 01 dB Symphonie

Οι μετρήσεις που έγιναν στο δωμάτιο 1 (παλιό δωμάτιο ελέγχου) και παρουσιάζονται παρακάτω πραγματοποιήθηκαν μετά τις δομικές αλλαγές και την αλλαγή του εξοπλισμού. Ο χώρος πλέον «φιλοξενεί» το δωμάτιο ελέγχου όπου είναι εγκατεστημένο το σύστημα ηχογραφήσεων Pro Tools.

Σημειώνουμε ότι η διέγερση του χώρου έγινε κρουστικά, πάρθηκαν συνολικά 3 μετρήσεις, για 3 διαφορετικές θέσεις πηγής και δέκτη.

Το σύστημα μέτρησης 01 dB Symphonie περιελάμβανε:

- Φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή (Laptop)
- Κάρτα 01 dB Symphony
- Μικρόφωνο 01 dB-Stell PRE 12 H n° 10971

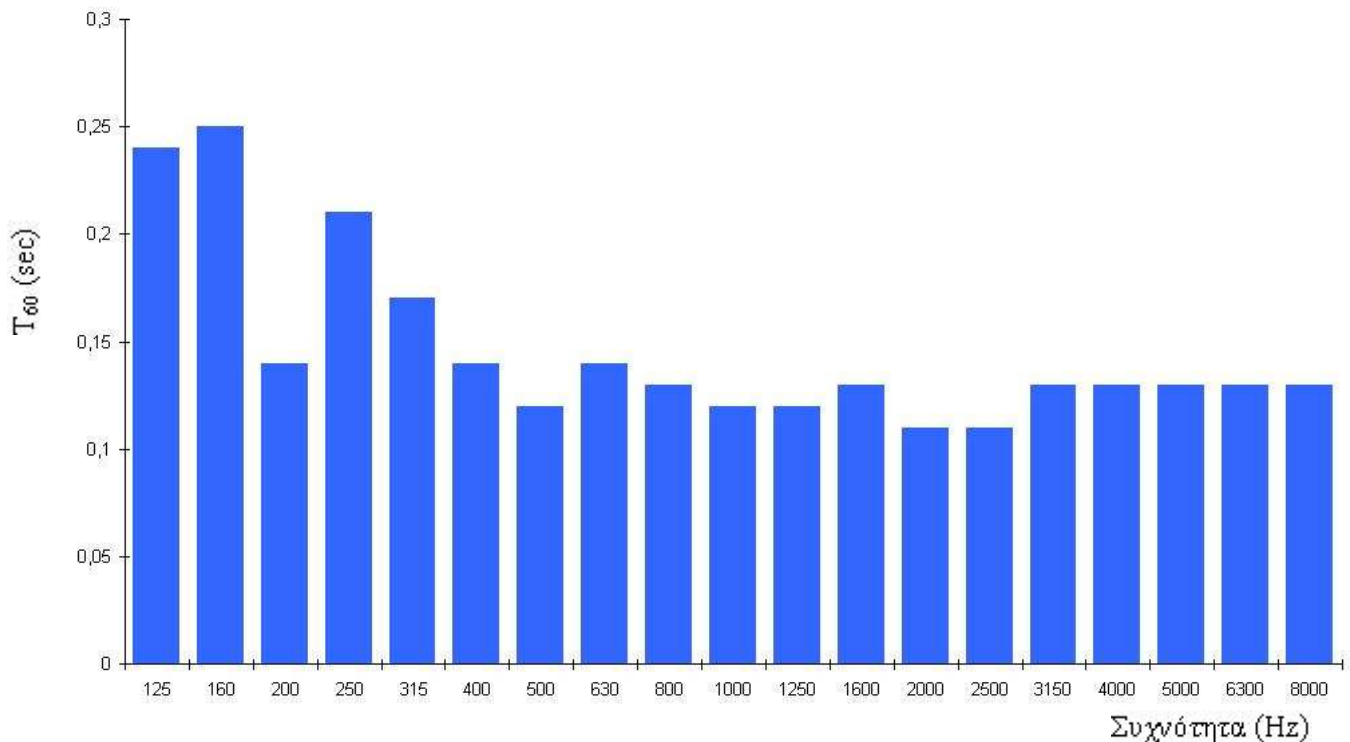


Σχήμα 4.4: Συνδεσμολογία μετρήσεων με το σύστημα 01 dB Symphony

Ο παρακάτω πίνακας περιέχει τους μέσους όρους των χρόνων αντήχησης για κάθε τριτοοκταβική ζώνη.

Πίνακας 4.2: Μέσοι όροι χρόνων αντήχησης ανά τριτοοκτάβα

Συχνότητα (Hz)	T ₆₀ (sec)	Συχνότητα (Hz)	T ₆₀ (sec)
125	0.24	1250	0.12
160	0.25	1600	0.13
200	0.14	2000	0.11
250	0.21	2500	0.11
315	0.17	3150	0.13
400	0.14	4000	0.13
500	0.12	5000	0.13
630	0.14	6300	0.13
800	0.13	8000	0.13
1000	0.12		



Γράφημα 4.2: Μέσοι όροι χρόνου αντήχησης ανά τριτοοκτάβα

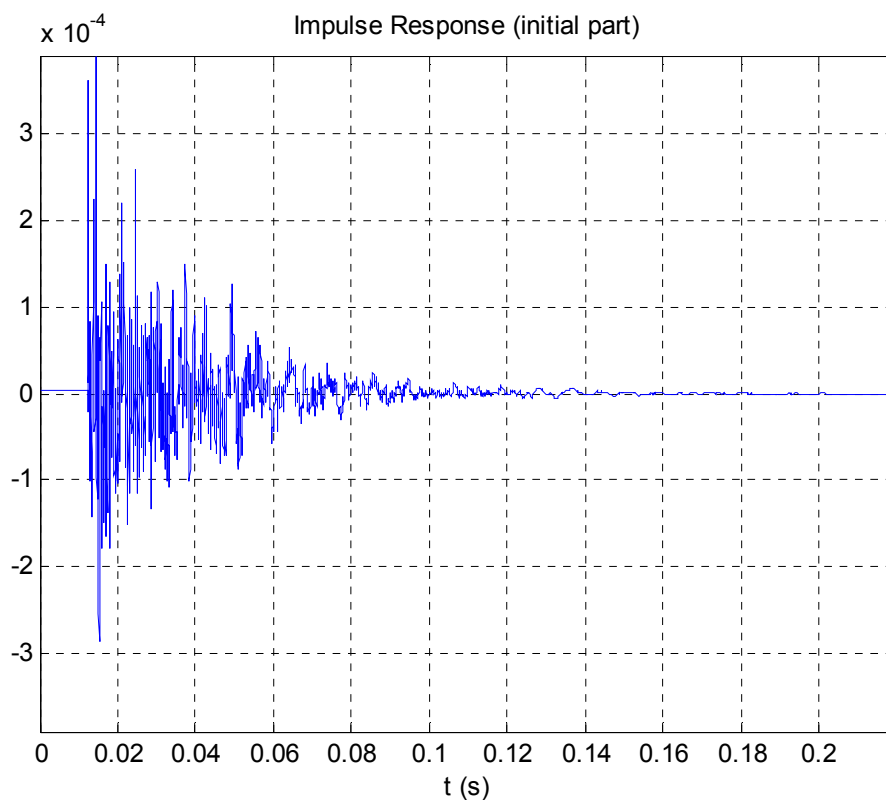
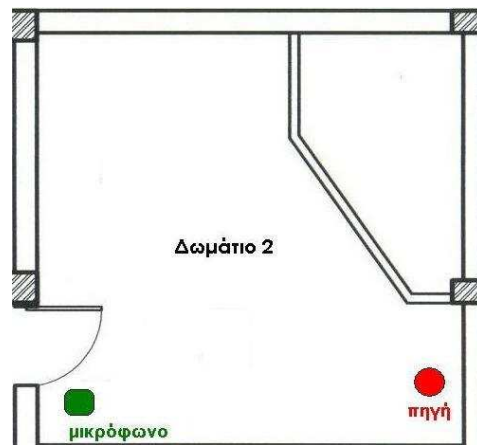
Οι μετρήσεις που πάρθηκαν με το σύστημα MLSSA στο παλιό δωμάτιο ελέγχου παρουσιάζουν έντονες αυξομειώσεις έως τα 1000 Hz. Σημειώνουμε ότι κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ο χώρος δεν ήταν άδειος. Ο πίσω τοίχος του δωματίου καλύπτεται σε μεγάλο μέρος από διαχυτές. Επίσης, η ηχομονωτική επένδυση δεν είχε αφαιρεθεί από τους πλαϊνούς τοίχους του δωματίου. Το γράφημα 4.2 παρουσιάζει τον χρόνο αντήχησης ανά τριτοοκτάβα για το δωμάτιο αυτό. Από το γράφημα παρατηρούμε ότι στις χαμηλές συχνότητες ο χρόνος αντήχησης είναι αρκετά μεγάλος σε σχέση με τις υπόλοιπες. Για παράδειγμα, στις τριτοοκτάβες με κεντρική συχνότητα τα 125 Hz, 160 Hz, 250 Hz αλλά και τα 315 Hz. Ο χρόνος αντήχησης που μετρήθηκε για αυτές τις συχνότητες δεν είναι εκτός των ορίων χρόνου αντήχησης που απαιτούνται για ένα δωμάτιο που προορίζεται για δωμάτιο ελέγχου. Παρ' όλα αυτά όμως η διαφορά χρόνου αντήχησης σε σχέση με τις άλλες συχνότητες είναι αρκετά μεγάλη. Ίσως αυτό το δωμάτιο ελέγχου να πρέπει να μελετηθεί εκ νέου.

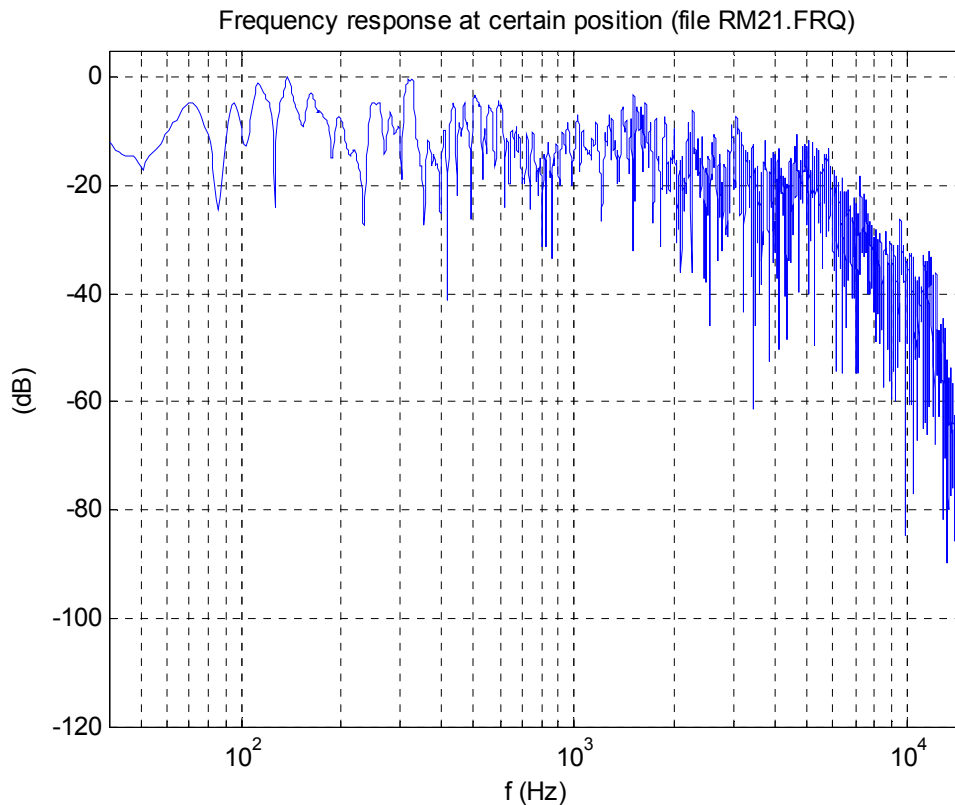
4.2.2 ΔΩΜΑΤΙΟ 2^ο (ΧΩΡΟΣ ΗΧΟΓΡΑΦΗΣΕΩΝ)

4.2.2.1 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΦΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ MLSSA

Ομοίως, τα ίδια ισχύουν και για το δωμάτιο 2 όσον αφορά την συνδεσμολογία και το σύστημα μέτρησης. Τα περαιτέρω φασματικά διαγράμματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.

Μέτρηση 1^η





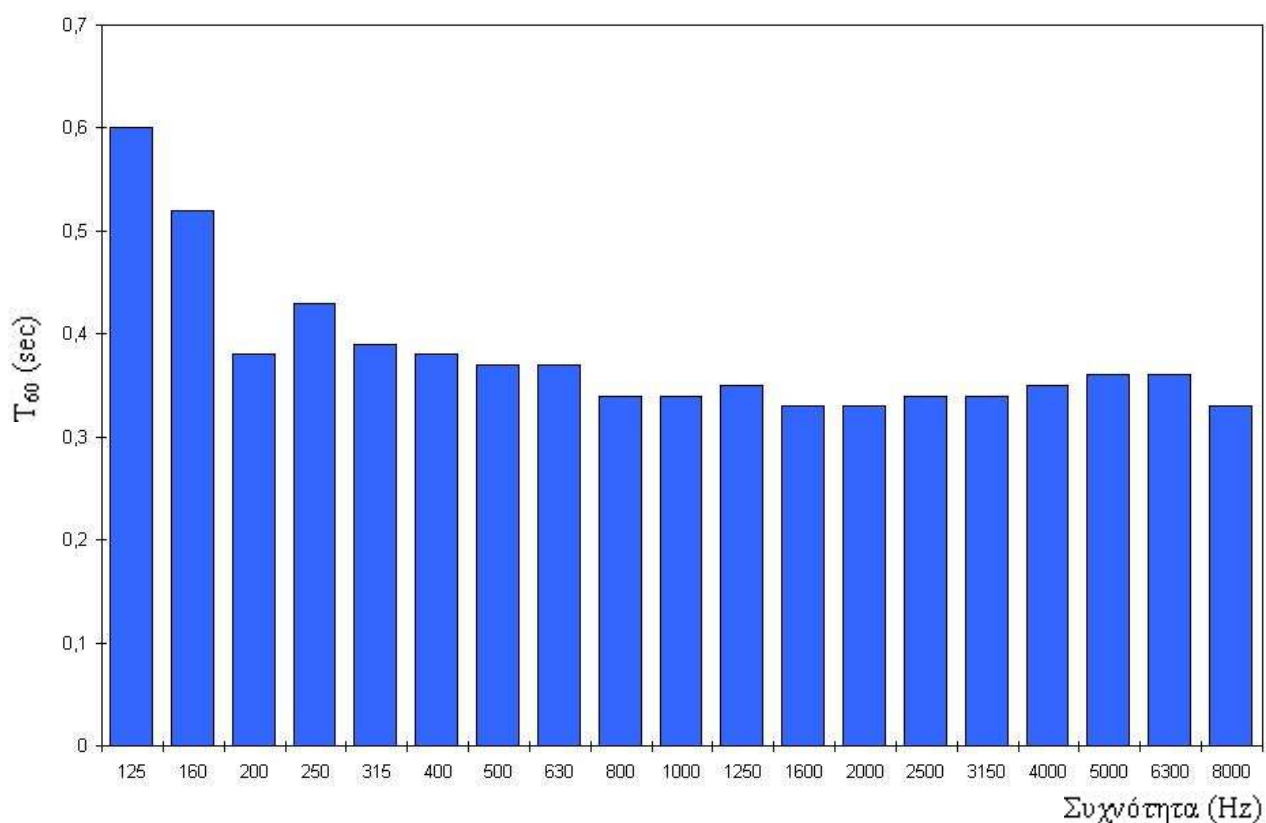
Σχήμα 4.5: Διέγερση με MLS και συχνωτική απόκριση δωματίου

4.2.2.2 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ 01 dB Symphonie

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που ακολουθούν πραγματοποιήθηκαν στο δωμάτιο 2 (χώρος ηχογραφήσεων του studio), μετά τις δομικές αλλαγές. Στο χώρο, κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, ήταν παρόντα 3 άτομα, οι κουρτίνες ήταν τραβηγμένες και το πάτωμα ήταν χωρίς μοκέτα (ξύλινο πάτωμα). Επίσης, ήταν ήδη τοποθετημένα τέσσερα panel (διαχυτές) στους τοίχους. Λάβαμε μετρήσεις τοποθετώντας το μικρόφωνο και την πηγή σε 9 διαφορετικά σημεία. Η διέγερση του χώρου πραγματοποιήθηκε με κρουστικό θόρυβο. Η συνδεσμολογία και το σύστημα μέτρησης είναι τα ίδια με αυτά του δωματίου 1.

Πίνακας 4.3: Μέσοι όροι χρόνων αντήχησης ανά τριτοοκτάβα

Συχνότητα (Hz)	T_{60} (sec)	Συχνότητα (Hz)	T_{60} (sec)
125	0.60	1250	0.35
160	0.52	1600	0.33
200	0.38	2000	0.33
250	0.43	2500	0.34
315	0.39	3150	0.34
400	0.38	4000	0.35
500	0.37	5000	0.36
630	0.37	6300	0.36
800	0.34	8000	0.33
1000	0.34		



Γράφημα 4.3: Μέσοι όροι χρόνου αντήχησης ανά τριτοοκτάβα

Από τις μετρήσεις που πάρθηκαν στο χώρο ηχογραφήσεων με το σύστημα MLSSA πριν την ανακατασκευή του, εντοπίζουμε προβληματική συμπεριφορά στις χαμηλές συχνότητες. Από το γράφημα 4.3 το οποίο παρουσιάζει το χρόνο αντήχησης ανά τριτοοκτάβα, παρατηρούμε ότι στις τριτοοκτάβες με κεντρική συχνότητα τα 125 Hz και 160 Hz ο χρόνος αντήχησης είναι μεγαλύτερος αλλά στην υπόλοιπη συχνотική περιοχή είναι ομοιογενής. Προτείνουμε την τοποθέτηση απορροφητικών υλικών σε μεγαλύτερη επιφάνεια του δωματίου, καθώς και μπασσοπαγίδων για την μείωση του χρόνου αντήχησης στις συγκεκριμένες συχνότητες.

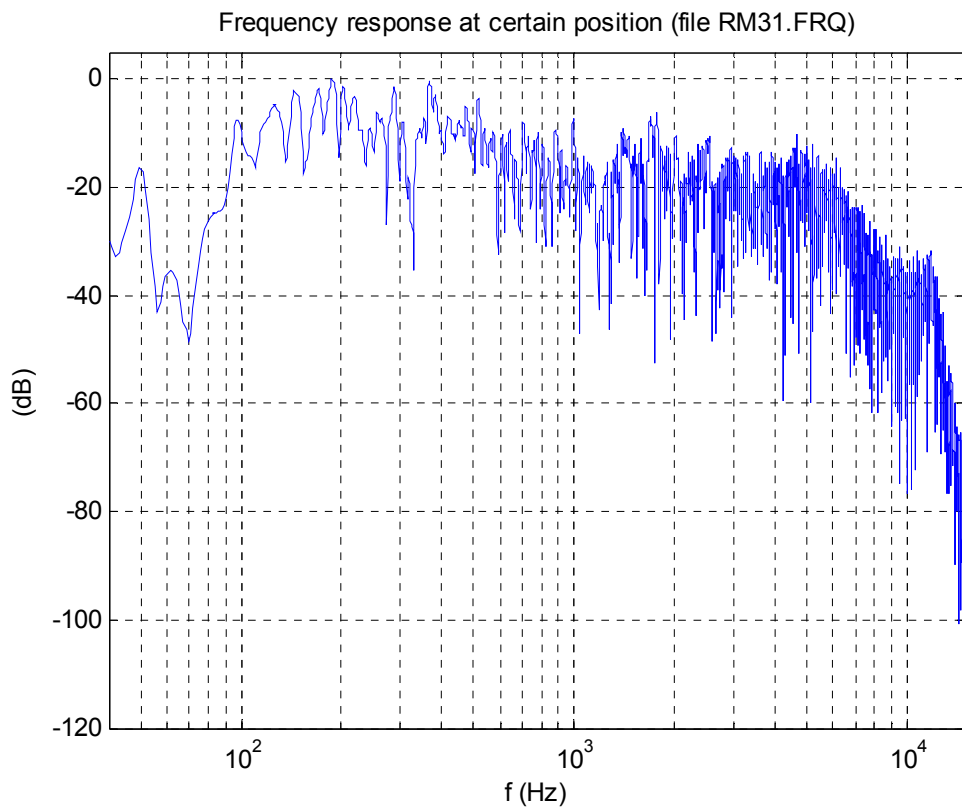
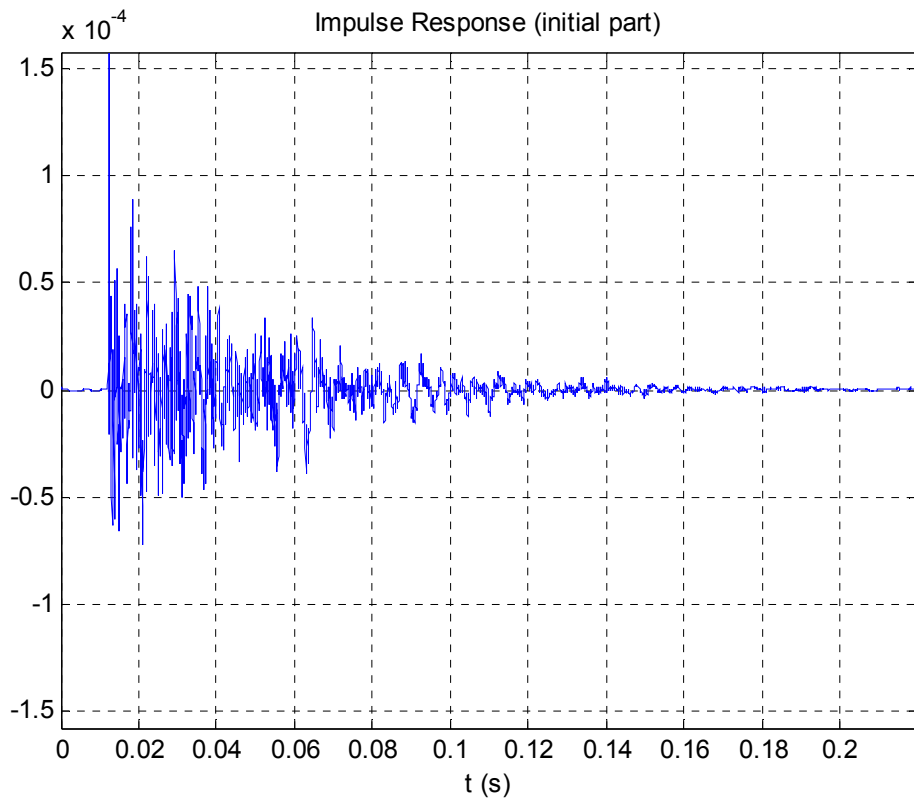
4.2.3 ΔΩΜΑΤΙΟ 3^ο (ΝΕΟ ΔΩΜΑΤΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ)

4.2.3.1 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ MLSSA

Όσον αφορά την συνδεσμολογία και το σύστημα μέτρησης, τα ίδια ισχύουν και για το δωμάτιο 3. Τα περαιτέρω φασματικά διαγράμματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α. (διαστάσεις χώρου: μήκος = 7.09m, πλάτος = 4.55m, ύψος = 2.50m)

Μέτρηση 1^η





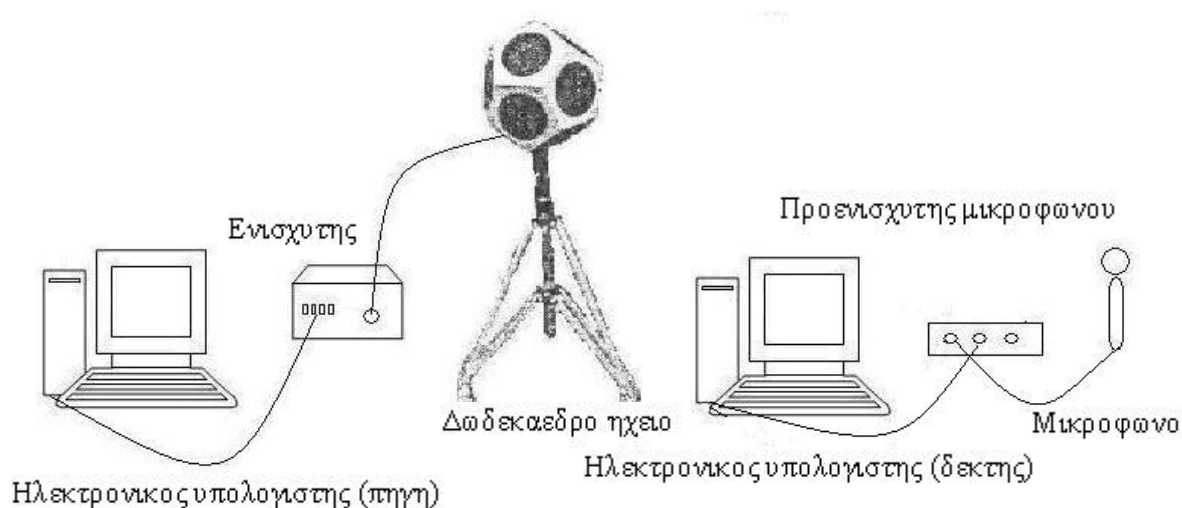
Σχήμα 4.6: Διέγερση με MLS και συχνοτική απόκριση δωματίου

4.2.3.2 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΦΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ SPECTRALAB

Η σειρά μετρήσεων που παρατίθεται πραγματοποιήθηκε μετά την ανακατασκευή του χώρου. Κατά τις μετρήσεις αυτές ο χώρος ήταν τελείως άδειος (δηλαδή έλειπαν η κονσόλα, τα racks, τα μεγάφωνα, οι καρέκλες, οι κουρτίνες και η μοκέτα). Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων υπήρχαν στο χώρο 5 άτομα. Οι μετρήσεις έγιναν με τη χρήση δύο ηλεκτρονικών υπολογιστών, εκ των οποίων ο ένας παρήγαγε το σήμα, το έστειλε στον ενισχυτή και από εκεί στο δωδεκάεδρο ηχείο και ο δεύτερος το κατέγραφε και έκανε την επεξεργασία. Η πηγή και ο δέκτης τοποθετήθηκαν σε διάφορες θέσεις και χρησιμοποιήθηκε ο ακόλουθος εξοπλισμός:

- Δυο ηλεκτρονικοί υπολογιστές
- Μικρόφωνο Earthworks
- Ενισχυτής 01 dB, GDB 95
- Δωδεκάεδρο ηχείο 01 dB Stell Type: DO 12

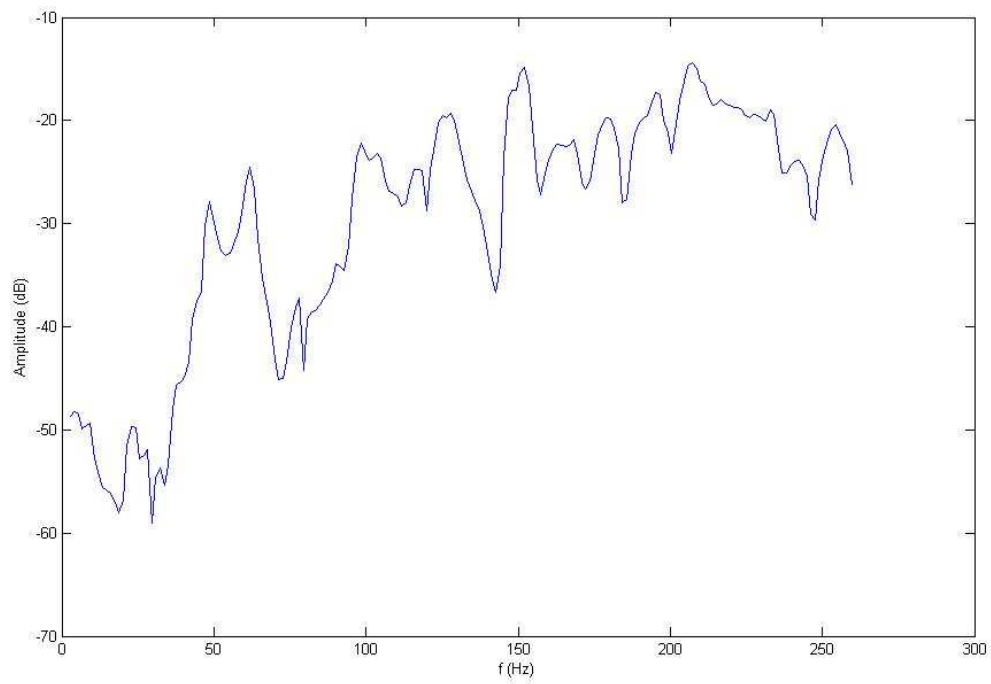
Συνδεσμολογία



Σχήμα 4.7: Συνδεσμολογία του συστήματος μέτρησης SpectraLab

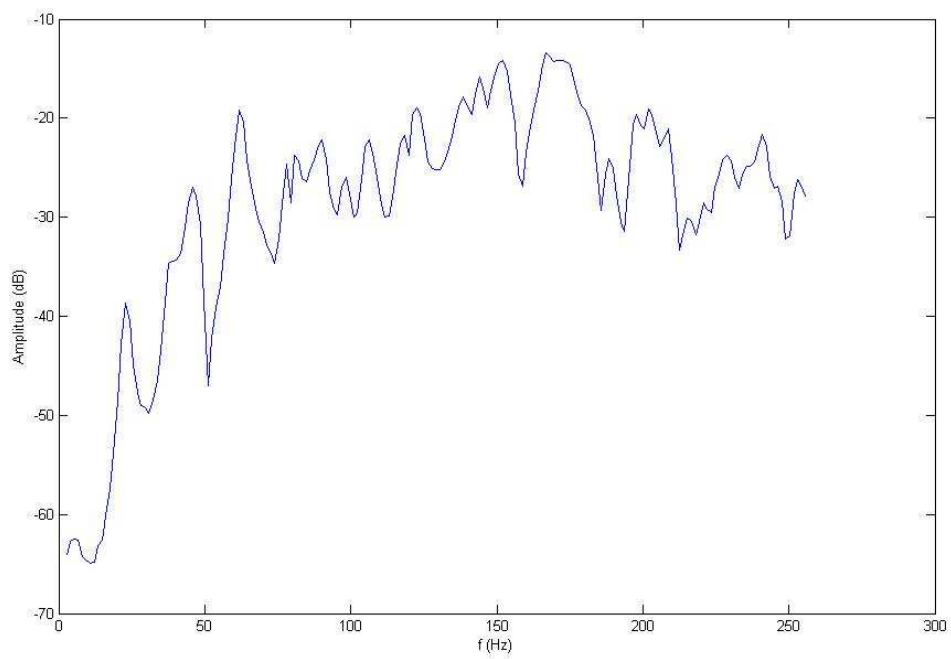
Τα φάσματα που ακολουθούν απεικονίζουν τη συχνотική απόκριση του νέου δωματίου ελέγχου.

Μέτρηση 1η



Σχήμα 4.8: Συχνοτική απόκριση του νέου δωματίου ελέγχου

Μέτρηση 2η



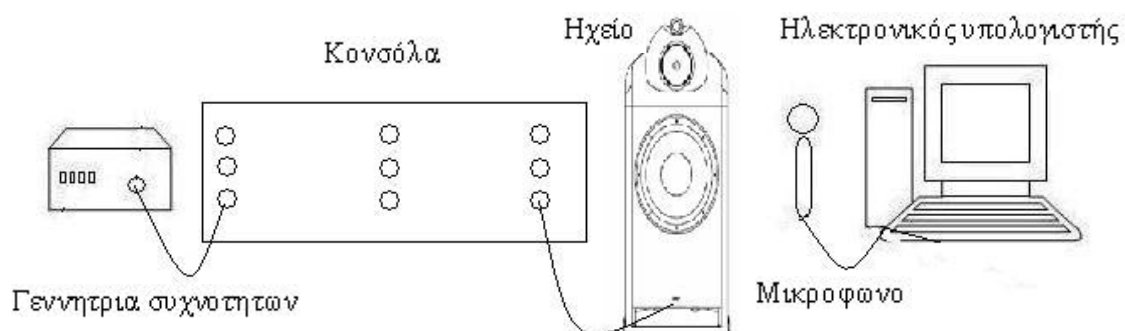
Σχήμα 4.9: Συχνοτική απόκριση του νέου δωματίου ελέγχου

Εστιάζουμε στην περιοχή από 20-300 Hz, όπως φαίνεται από τα διαγράμματα, γιατί σε αυτή την περιοχή παρατηρήθηκε και ακουστικά ότι υπάρχει πρόβλημα. Όπως βλέπουμε από τα φασματικά διαγράμματα που παρουσιάζονται παραπάνω, στις συχνοτικές περιοχές από 50-80 Hz και 100-150 Hz υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις.

Οι μετρήσεις που ακολουθούν πραγματοποιήθηκαν με στόχο να ερευνησουμε τη περιοχή γύρω από την υποψήφια θέση του ηχολήπτη. Στο χώρο υπήρχε όλος ο εξοπλισμός αλλά και η μοκέτα και ήταν παρόντα 4 άτομα. Η διέγερση του χώρου έγινε με τη χρήση γεννήτριας συχνοτήτων συνδεδεμένης σε μια από τις εισόδους της κονσόλας, με sweep tone για τις ανάγκες των μετρήσεων. Το συχνοτικό εύρος της γεννήτριας ήταν από 40 – 500 Hz ενώ η διάρκεια του sweep tone ήταν 15 sec.

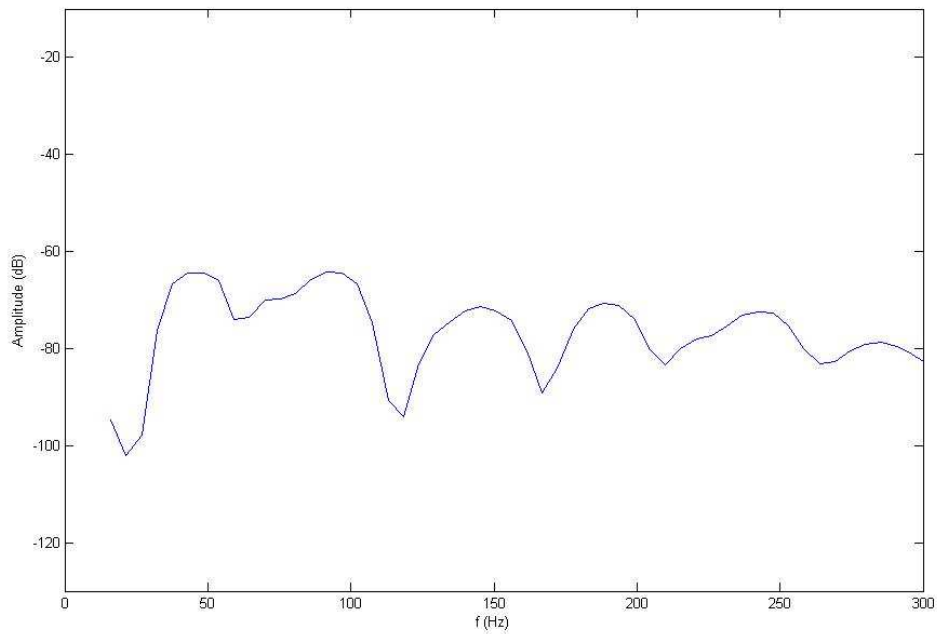
- Ηλεκτρονικός υπολογιστής (δέκτης) + Αναλυτής φάσματος
- Μικρόφωνο: Earthworks
- Μεγάφωνο: Nautilus 802
- Γεννήτρια συχνοτήτων: HM 8030-5

Συνδεσμολογία



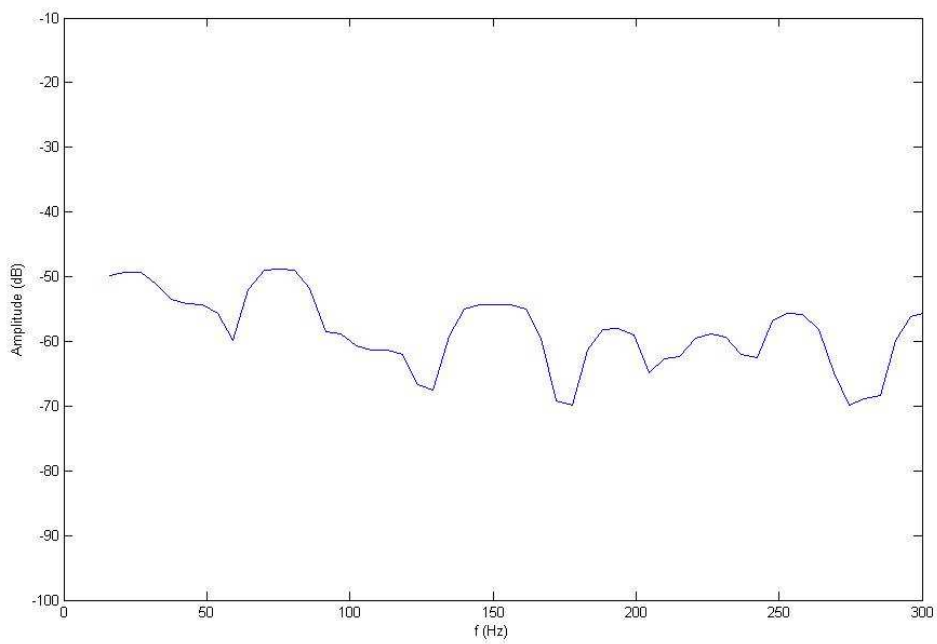
Σχήμα 4.10: Συνδεσμολογία του συστήματος μέτρησης

Μέτρηση 1^η



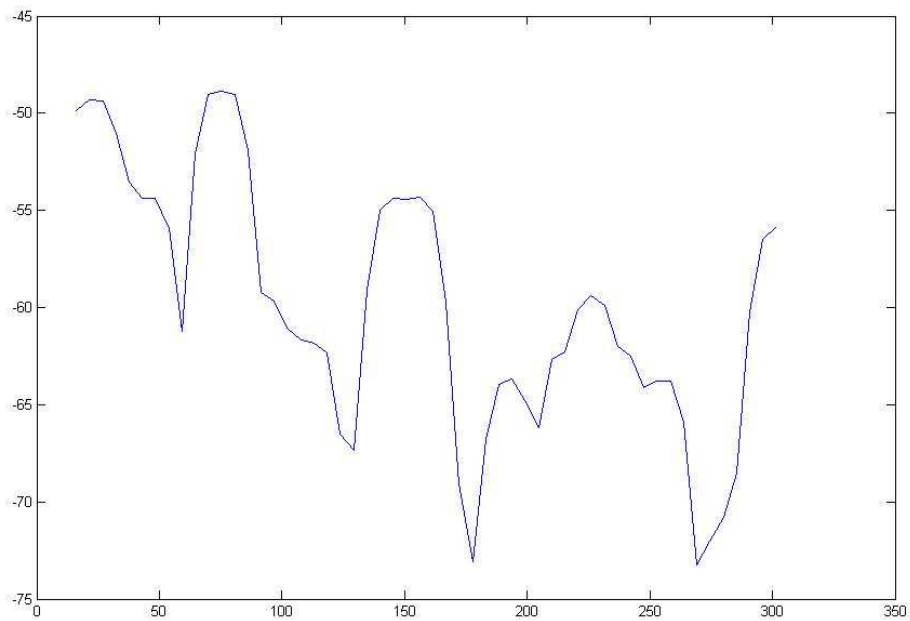
Σχήμα 4.11: Συχνотική απόκριση δωματίου (στις χαμηλές συχνότητες) με το μικρόφωνο τοποθετημένο στο μέσο του μήκους του δωματίου.

Μέτρηση 2^η



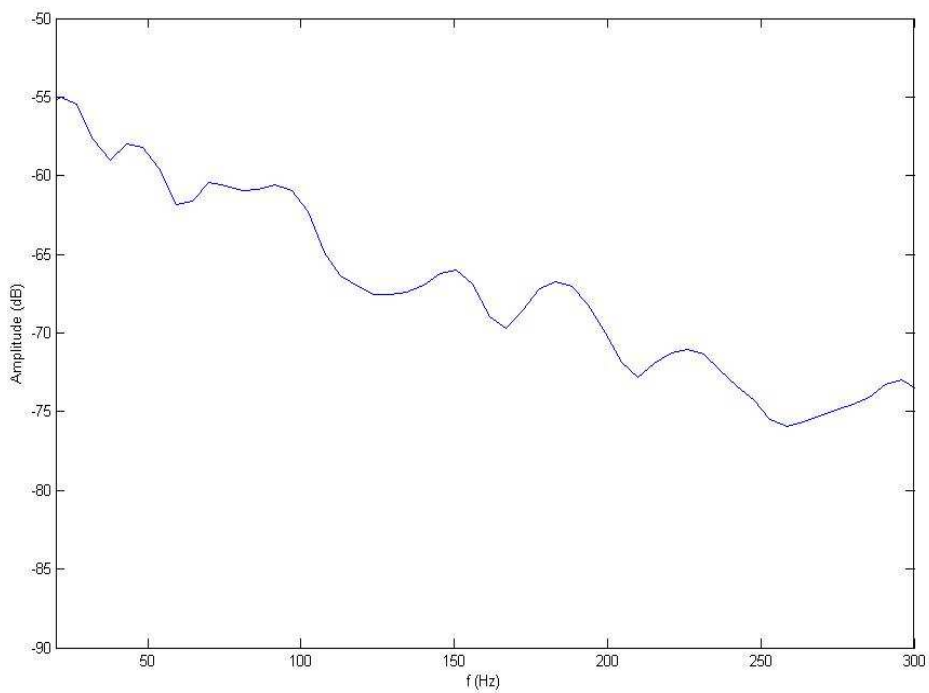
Σχήμα 4.12: Συχνотική απόκριση δωματίου (στις χαμηλές συχνότητες) με το μικρόφωνο τοποθετημένο στο μέσο του πλάτους του δωματίου.

Μέτρηση 3^η



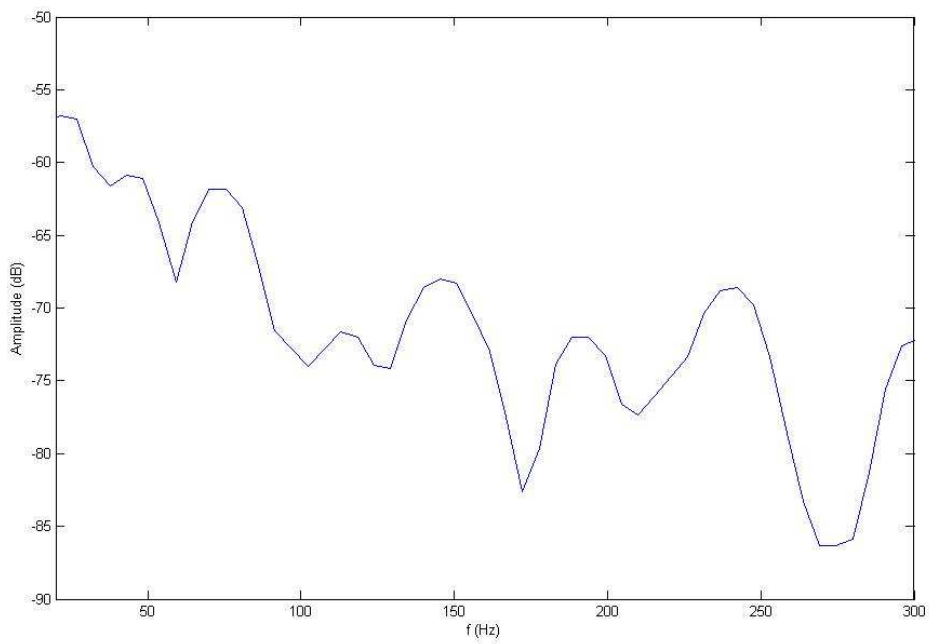
Σχήμα 4.13: Συχνотική απόκριση δωματίου (στις χαμηλές συχνότητες) με το μικρόφωνο τοποθετημένο στο μέσο του ύψους του δωματίου.

Μέτρηση 4^η



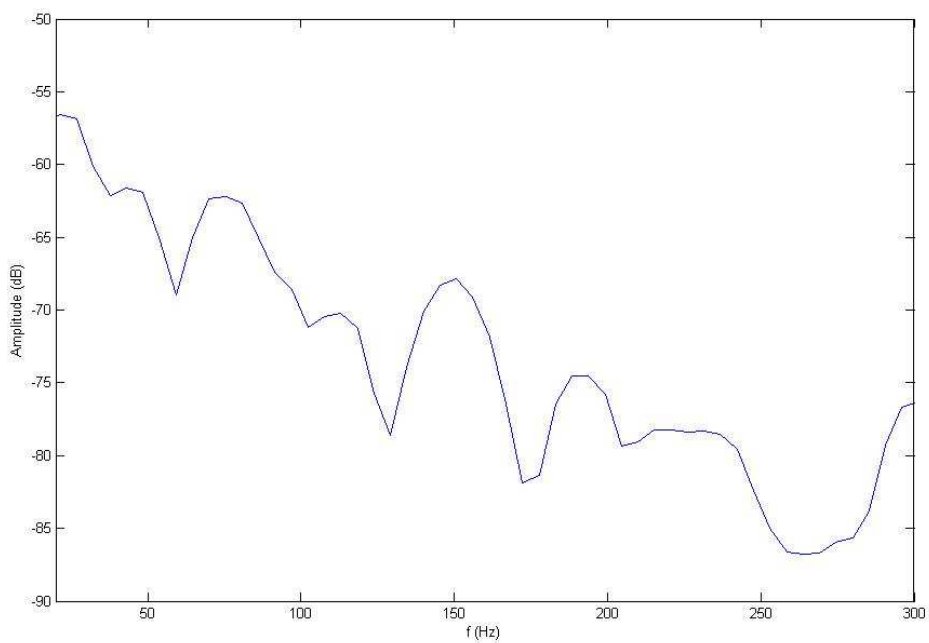
Σχήμα 4.14: Συχνотική απόκριση δωματίου (στις χαμηλές συχνότητες) με το μικρόφωνο τοποθετημένο στην πίσω δεξιά γωνία του δωματίου.

Μέτρηση 5η



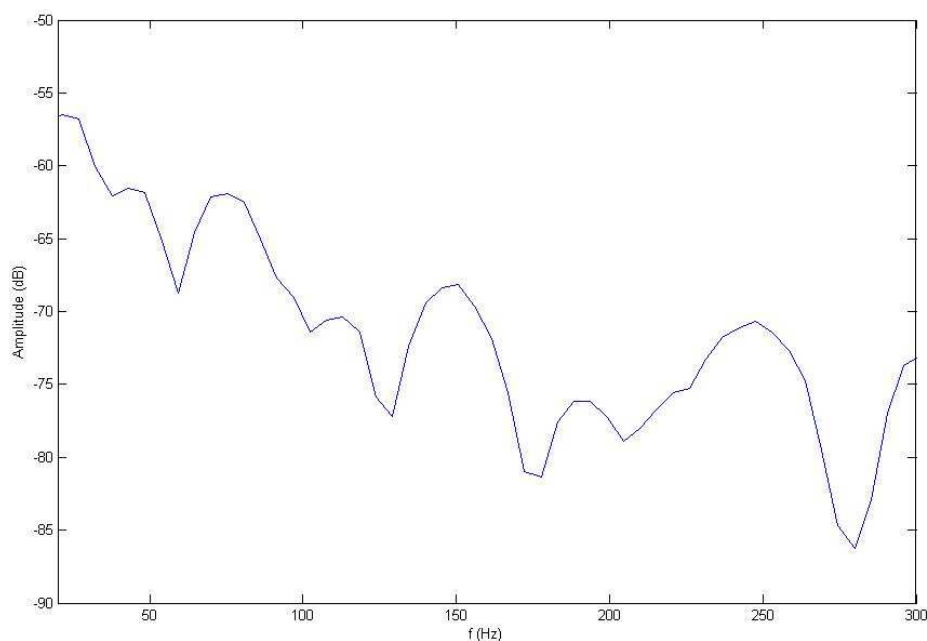
Σχήμα 4.15: Συχνотική απόκριση δωματίου (στις χαμηλές συχνότητες) με το μικρόφωνο τοποθετημένο στην υποψήφια θέση του ηχολήπτη και σε ύψος 1.12 μέτρα από το πάτωμα

Μέτρηση 6η



Σχήμα 4.16: Συχνотική απόκριση δωματίου (στις χαμηλές συχνότητες) με το μικρόφωνο τοποθετημένο στην υποψήφια θέση του ηχολήπτη και σε ύψος 1.60 μέτρα από το πάτωμα

Μέτρηση 7η



Σχήμα 4.17: Συχνотική απόκριση δωματίου (στις χαμηλές συχνότητες) με το μικρόφωνο τοποθετημένο στην υποψήφια θέση του ηχολήπτη και σε ύψος 1.35 μέτρα από το πάτωμα

Αναφέρουμε ότι οι τρεις πρώτες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν γύρω από την υποψήφια θέση του ηχολήπτη. Θέλοντας να ερευνήσουμε την συχνотική απόκριση γύρω από την περιοχή αυτή αρχικά τοποθετήσαμε το μικρόφωνο στο μέσο του μήκους του δωματίου, έπειτα στο μέσο του πλάτους του και τέλος στο μέσο του ύψους του. Σημειώνουμε επίσης πως η υποψήφια θέση του ηχολήπτη, όπως ορίστηκε από τους καθηγητές της Ηχοληψίας του Τμήματος, βρίσκεται στην περιοχή γύρω από το master section της κονσόλας.

Προχωρώντας στην ανάλυση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων, παρατηρούμε ότι υπάρχει συσχετισμός μεταξύ τους. Σύμφωνα με αυτά η συχνотική απόκριση του δωματίου παρουσιάζει μέγιστα στις περιοχές γύρω από τα 70, 150, 190 και 250 Hz. Συνεπώς, σύμφωνα και με την θεωρία, οι περιοχές αυτές αναμένονται να δημιουργήσουν αλλοιώσεις (χρωματισμό) του ήχου κατά την ακρόαση.

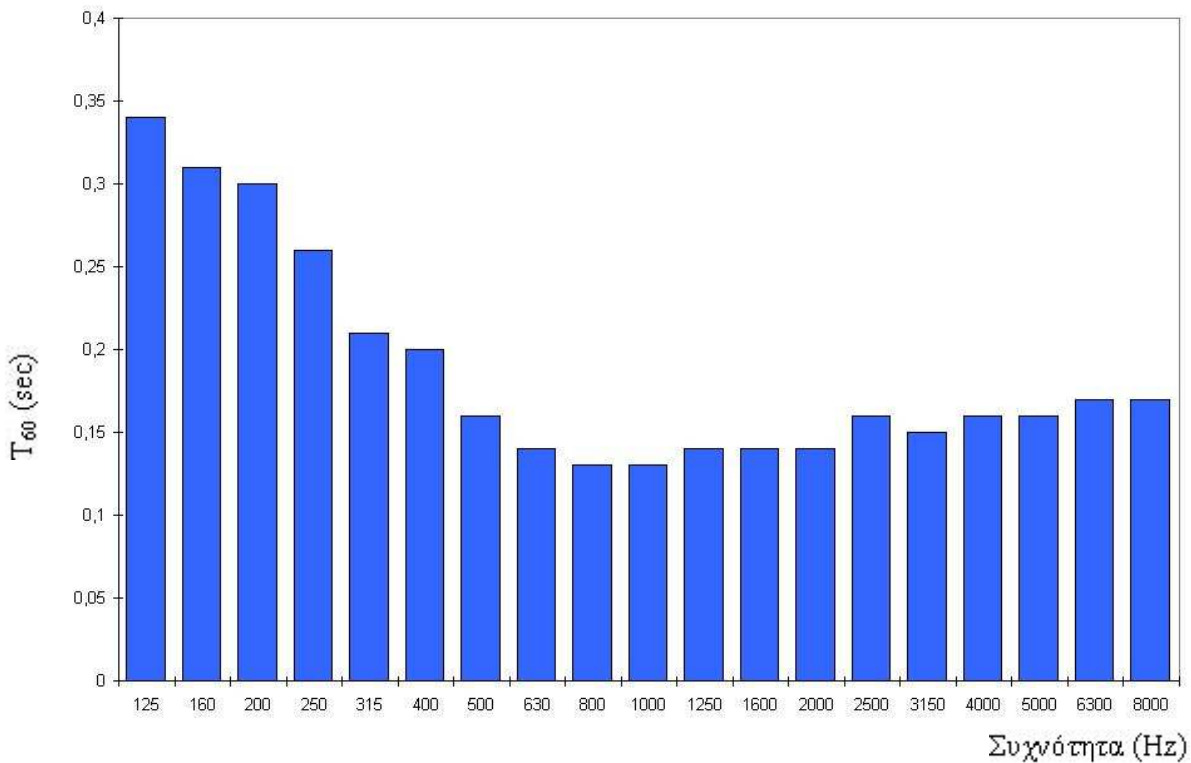
Τέλος, εξετάζοντας τις μετρήσεις που πάρθηκαν με το σύστημα MLSSA, μέχρι τα 500 Hz περίπου η ακουστική συμπεριφορά του χώρου παρουσιάζει έντονες αυξομειώσεις. Από τις μετρήσεις που πάρθηκαν με το σύστημα SPECTRALAB επιβεβαιώνεται αυτό το συμπέρασμα (σχήματα 4.8 - 4.9). Το γράφημα χρόνου αντήχησης ανά τριτοοκτάβα παρουσιάζει έντονες αυξομειώσεις μέχρι τα 400 Hz παρόλο που οι τιμές χρόνου αντήχησης είναι μέσα στα πλαίσια που ορίζονται για ένα δωμάτιο ελέγχου.

4.2.3.3 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ 01 dB Symphonie

Παρακάτω παρουσιάζονται οι μέσοι όροι του χρόνου αντήχησης των μετρήσεων που πάρθηκαν στο νέο δωμάτιο ελέγχου (new control room) με κρουστική διέγερση του χώρου. Η θέση της πηγής κατά την διάρκεια των 4 πρώτων μετρήσεων ήταν μπροστά από την κονσόλα ενώ στις 3 τελευταίες ήταν πίσω και η θέση του μικροφώνου σταθερή στην θέση του ηχολήπτη.

Πίνακας 4.4: Μέσος όρος του χρόνου αντήχησης ανά τριτοοκτάβα για το νέο δωμάτιο ελέγχου

Συχνότητα (Hz)	T ₆₀ (sec)	Συχνότητα (Hz)	T ₆₀ (sec)
125	0.34	1250	0.14
160	0.31	1600	0.14
200	0.30	2000	0.14
250	0.26	2500	0.16
315	0.21	3150	0.15
400	0.20	4000	0.16
500	0.16	5000	0.16
630	0.14	6300	0.17
800	0.13	8000	0.17
1000	0.13		



Γράφημα 4.4: Χρόνος αντήρησης ανά συχνότητα

4.2.3.4 ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΝΕΟΥ ΔΩΜΑΤΙΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

Οι κανονικοί ιδιορυθμοί του νέου δωματίου ελέγχου (νέο control room), υπολογίζονται αρχικά σύμφωνα με τον τύπο,

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}$$

όπου n_x, n_y, n_z ακέραιοι που παίρνουν όμως ανεξάρτητα τις τιμές 0, 1, 2, 3,... κ.λπ. και l_x, l_y, l_z οι διαστάσεις του δωματίου.

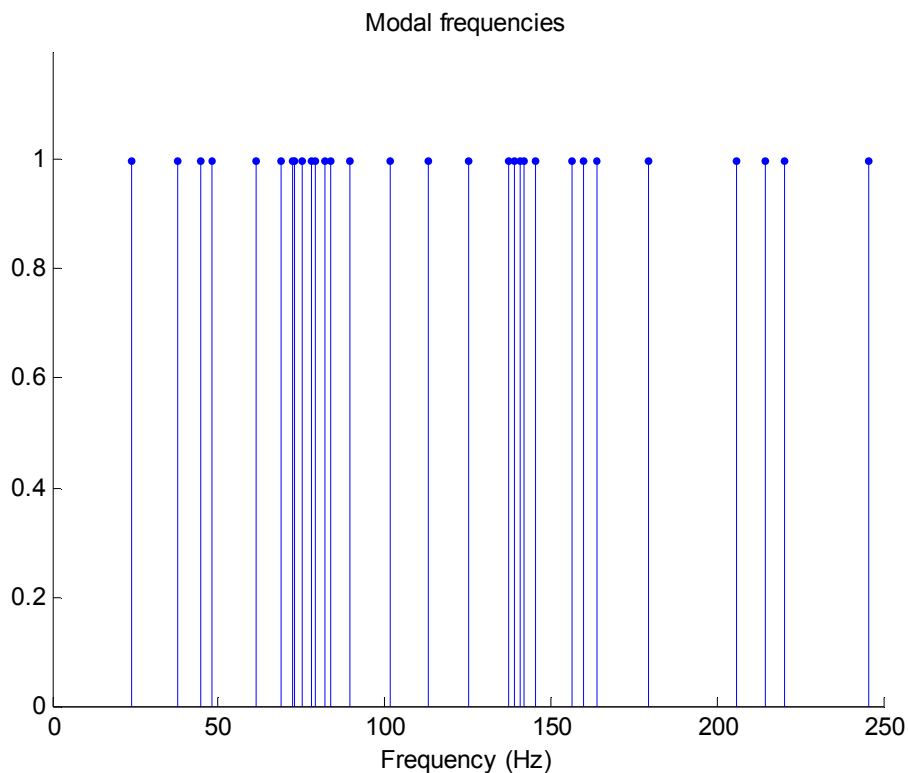
Στον πίνακα που ακολουθεί υπολογίζονται οι ιδιοσυχνότητες (μέχρι και 3ης τάξης), των αντίστοιχων ιδιορυθμών του δωματίου.

Πίνακας 4.5: Ιδιορυθμοί του νέου δωματίου ελέγχου

n_x	n_y	n_z	f (Hz)	n_x	n_y	n_z	f (Hz)
1	0	0	24.1	0	3	0	113
0	1	0	37.6	3	2	1	125
1	1	0	44.7	0	0	2	137.2
2	0	0	48.2	1	0	2	139.3
2	1	0	61.2	2	3	1	140.7
0	0	1	68.6	0	1	2	142.2
3	0	0	72.3	2	0	2	145.4
1	0	1	72.7	0	2	2	156.5
0	2	0	75.3	3	1	2	159.6
0	1	1	78.2	2	2	2	163.8
1	2	0	79.1	1	3	2	179.4
1	1	1	81.9	0	0	3	205.8
2	0	1	83.8	2	1	3	214.7
2	2	0	89.5	1	2	3	220.5
0	2	1	101.9	3	3	3	245.7

Σημειώνεται ότι $l_x = 7.09$ m, $l_y = 4.55$ m, $l_z = 2.50$ m και $c = 343$ m/sec.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα γράφημα στο οποίο απεικονίζεται εμφανέστερα η κατανομή των ιδιοσυχνοτήτων των τρόπων δόνησης του δωματίου.

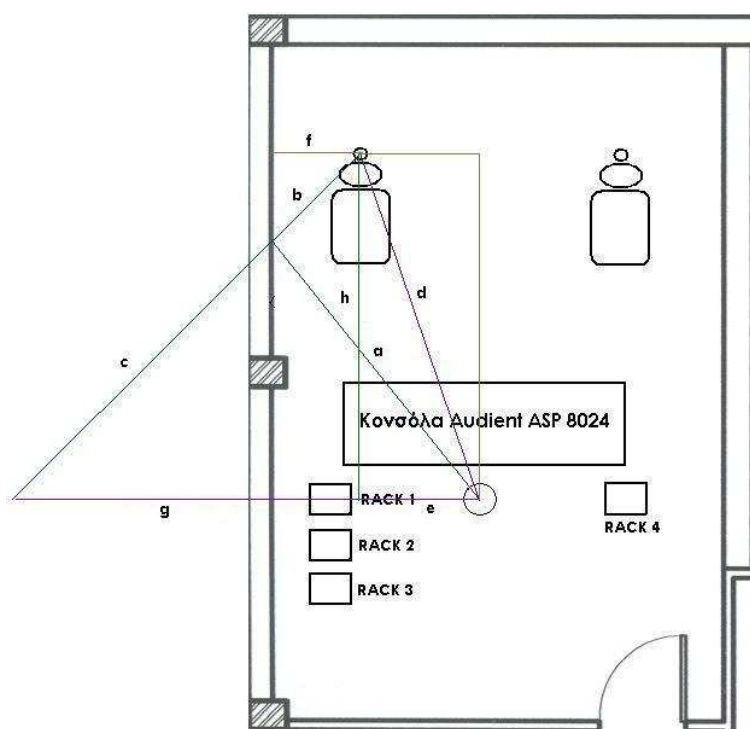


Γράφημα 4.5: Κατανομή των ιδιορυθμών του νέου δωματίου ελέγχου

Από το σχήμα που παρουσιάζεται παραπάνω παρατηρούμε ότι υπάρχει μία αυξημένη πυκνότητα των ιδιοσυχνοτήτων στην περιοχή από 70 έως 85 Hz καθώς και στην περιοχή από 137 έως 145 Hz. Η συσσώρευση μεγάλου αριθμού ιδιορυθμών, σε μία συγκεκριμένη συχνοτική περιοχή πρέπει, αν είναι δυνατόν, να αποφεύγεται διότι προκαλεί άνιση διέγερση του δωματίου και κατά συνέπεια το κοινώς λεγόμενο, χρωματισμό του ήχου.

4.2.3.5 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΝΑΚΛΑΣΕΩΝ ΤΟΥ ΝΕΟΥ ΔΩΜΑΤΙΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε την διαδρομή μιας εκ των ανακλάσεων που παρατηρούνται στο νέο δωμάτιο ελέγχου, καθώς και τον έμμεσο υπολογισμό της βάσει τριγωνομετρικών συναρτήσεων.



Σχήμα 4.18: Ανάκλαση απ' ευθείας ήχου από το δεξι ηχείο στον αριστερό τοίχο προς την θέση του ηχολήπτη

Συμβολικά αναφέρουμε,

d: απόσταση απ' ευθείας ήχου από το ηχείο

a+b: διαδρομή ανάκλασης από το ηχείο στην θέση του ηχολήπτη

c: προέκταση της διαγώνιας απόστασης (b) του ηχείου από τον τοίχο

e: κάθετη απόσταση του μικροφώνου από τον τοίχο

f: κάθετη απόσταση του ηχείου από τον τοίχο

g: κατοπτρική προέκταση της κάθετης απόστασης (e) του μικροφώνου από τον τοίχο

h: κάθετη απόσταση ηχείου προς την κάθετη απόσταση του μικροφώνου από τον τοίχο (e).

Παρατηρώντας το παραπάνω σχήμα συμπεραίνουμε πως η απόσταση που μας ενδιαφέρει για να υπολογίσουμε τον χρόνο ανάκλασης από τον αριστερό τοίχο είναι η a+b. Για λόγους ευκολίας θα την μετονομάσουμε σε x. Εντοπίζουμε το ορθογώνιο τρίγωνο για το οποίο ισχύει η σχέση:

$$(c + b)^2 = h^2 + (f + g)^2$$

Σύμφωνα με τους κανόνες της τριγωνομετρίας βγάζουμε το συμπέρασμα πως η απόσταση $c + b$ είναι ίση με την απόσταση $a + b$, η οποία όπως προαναφέραμε δηλώνει την πρώτη ανάκλαση (x) του απ' ευθείας ήχου. Οπότε η σχέση $(c + b)^2 = h^2 + (f + g)^2$ γίνεται:

$$x^2 = h^2 + (f + g)^2$$

Αντικαθιστούμε τον μοναδικό άγνωστο της σχέσης $x^2 = h^2 + (f + g)^2$ ή από την ισοδύναμη σχέση και έχουμε τελικά:

$$d^2 = h^2 + (e - f)^2 \Rightarrow h^2 = d^2 - (e - f)^2$$

Οι γνωστές αποστάσεις είναι οι ακόλουθες:

$$d: 2.63 \text{ m} \quad e: 2.25 \text{ m} \quad f: 0.90 \text{ m} \quad g: 2.25 \text{ m}$$

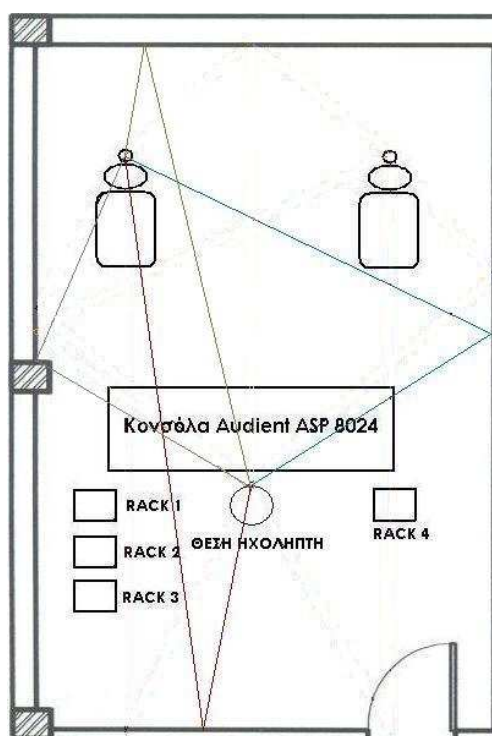
Λύνοντας ως προς το x βρίσκουμε πως η διαδρομή που καλύπτει ο ανακλώμενος ήχος είναι 3.875 m.

Ακολούθως, από την σχέση, όπου ο χρόνος ανάκλασης και η ταχύτητα του ήχου στον αέρα με μέτρο 343 m/sec, υπολογίζουμε τον χρόνο αυτό. Τα αποτελέσματα για όλες τις ανακλάσεις σε όλες τις

επιφάνειες και για τα δυο ηχεία βρίσκονται συγκεντρωμένα στον πίνακα που ακολουθεί. Οι χρόνοι ανάκλασης t_L και t_R αναφέρονται στο αριστερό και το δεξί ηχείο αντιστοίχως. Επίσης, για παράδειγμα, παρατίθενται σχηματικά οι ανακλάσεις μόνο από τους τέσσερις τοίχους του νέου δωματίου ελέγχου.

Πίνακας 4.6: Χρόνοι άφιξης ανακλάσεων

Χρόνος άφιξης από 1 ^η ανάκλαση	Αριστερός τοίχος	Δεξιός τοίχος	Μπροστινός τοίχος	Πίσω τοίχος	Ταβάνι	Πάτωμα
t_L (ms)	11.2	18.5	19.2	22.7	10.3	10.7
t_R (ms)	11.1	18.6	17.9	22.6	10.3	10.7

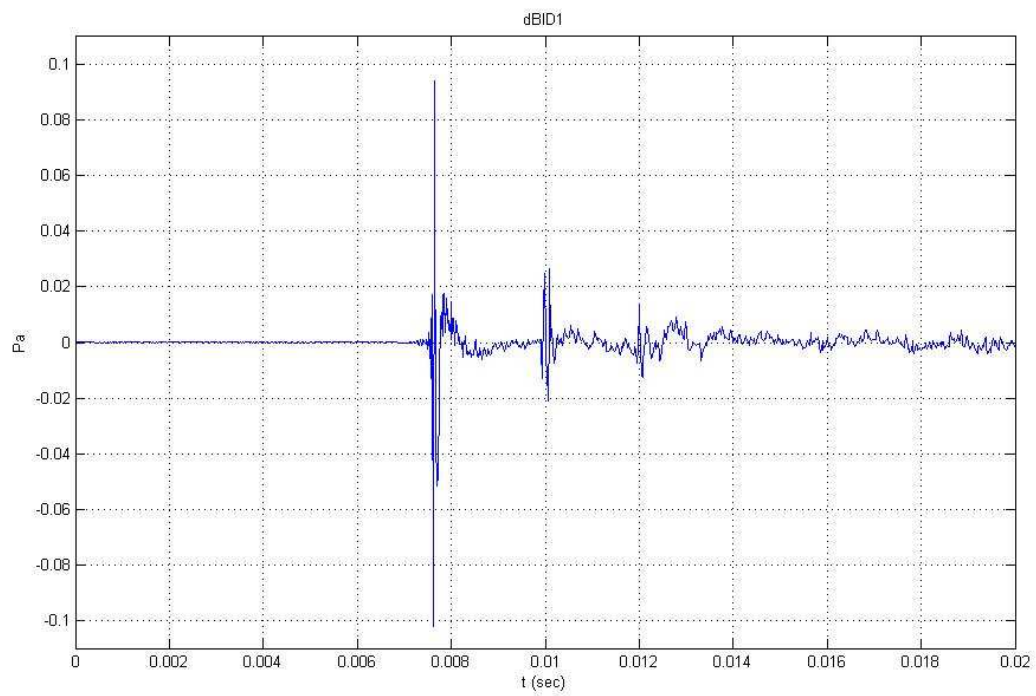


Σχήμα 4.19: Ανακλάσεις μόνο από τους τέσσερις τοίχους του νέου δωματίου ελέγχου

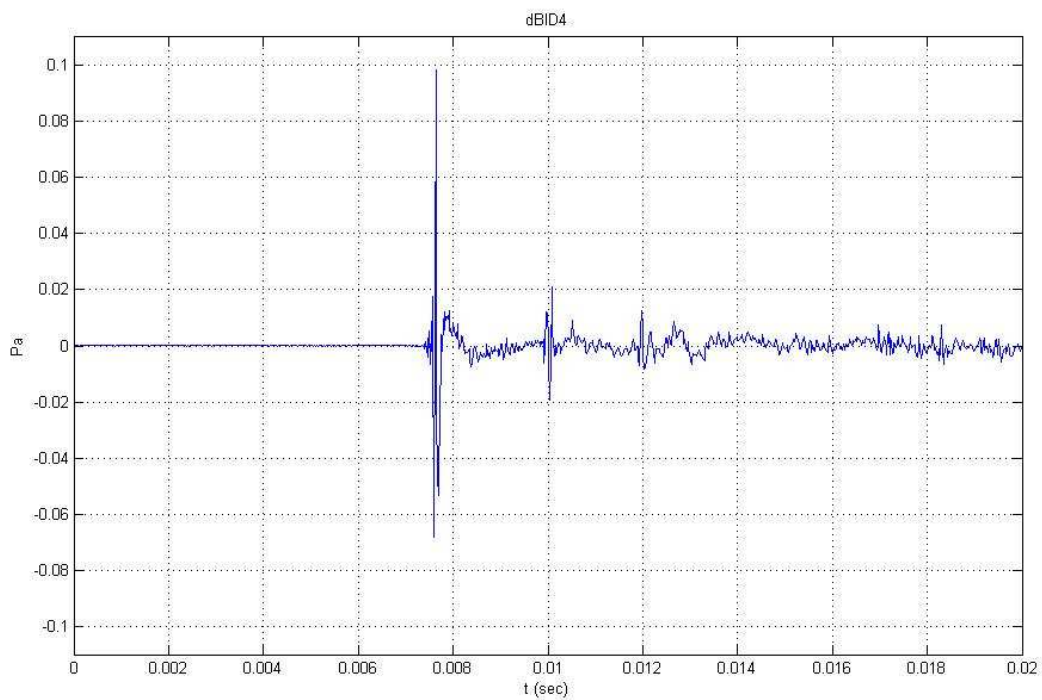
Σύμφωνα με τους υπολογισμούς ο χρόνος άφιξης του απ' ευθείας ήχου από το ηχείο στην θέση του ηχολήπτη είναι:

$$t_{direct} = \frac{d}{c} = \frac{2.63}{343} = 0.0076\text{sec} = 7.6\text{msec}$$

Αριστερό ηχείο

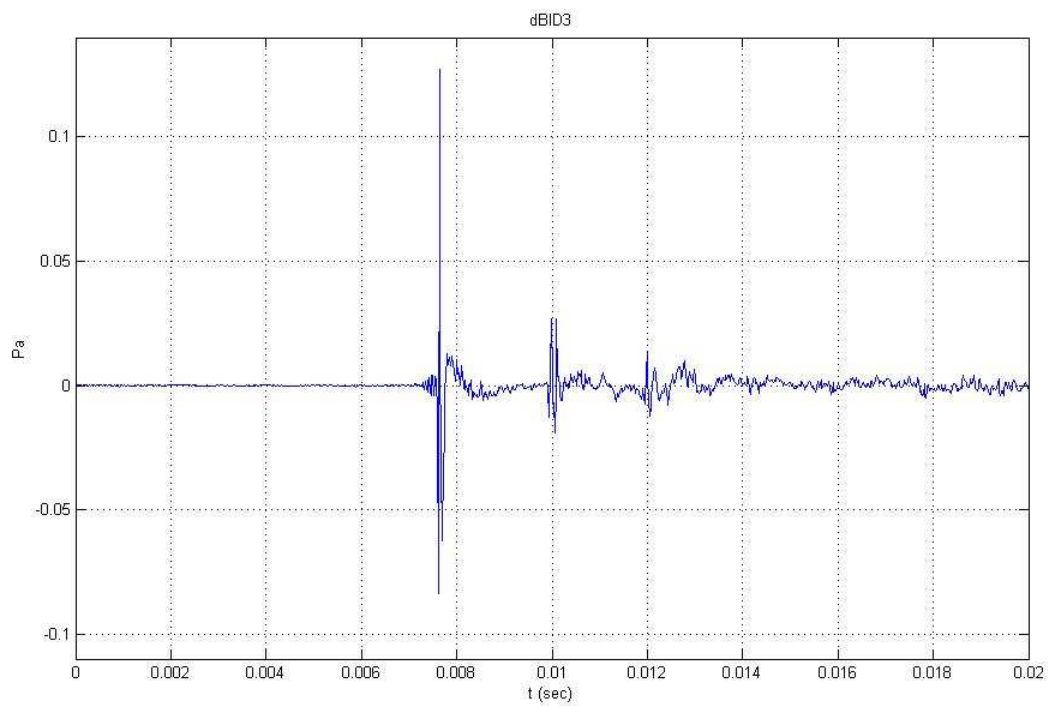


Δεξί ηχείο

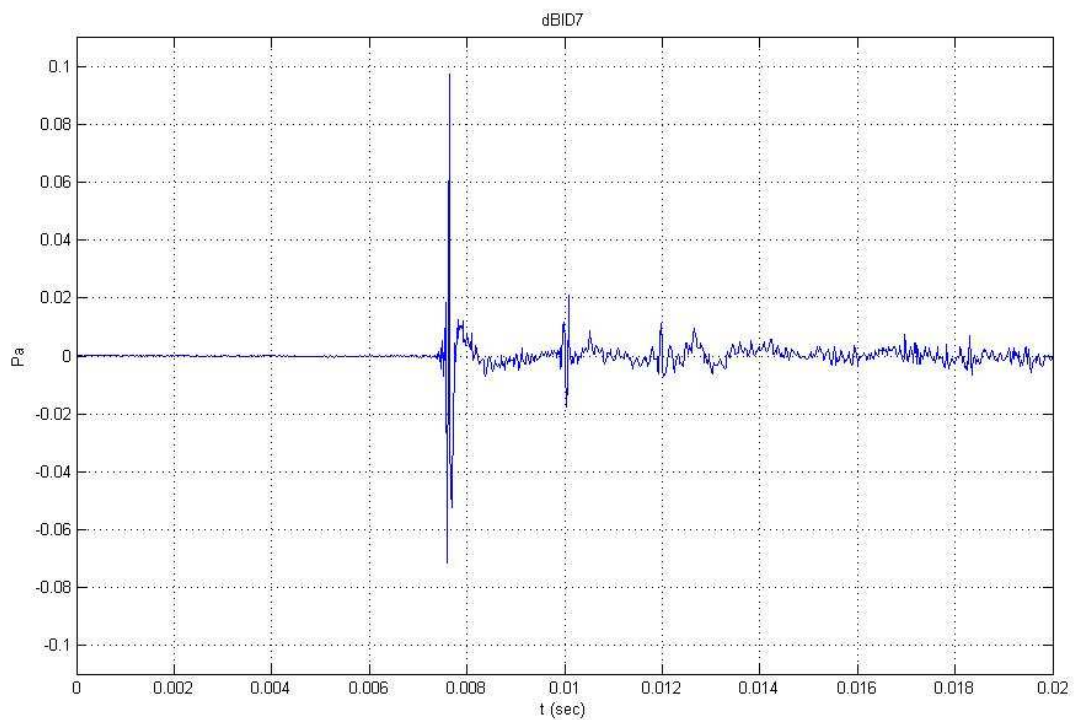


Σχήμα 4.20: Σχηματική αναπαράσταση του χρόνου άφιξης του απ' ευθείας ήχου και των πρώτων ανακλάσεων του, από το αριστερό και το δεξί ηχείο (πρώτη μέτρηση).

Αριστερό ηχείο



Δεξί ηχείο



Σχήμα 4.21: Σχηματική αναπαράσταση του χρόνου άφιξης του απ' ευθείας ήχου και των πρώτων ανακλάσεων του, από το αριστερό και το δεξί ηχείο (δεύτερη μέτρηση).

Η διέγερση του χώρου έγινε με MLS (Ακολουθία Μεγίστου Μήκους) και πάρθηκαν συνολικά 4 μετρήσεις, δηλαδή από 2 μετρήσεις για το κάθε ηχείο. Παραπάνω παρατίθενται οι μετρήσεις συνδυαστικά για την σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Εξετάζοντας τα παραπάνω φάσματα βλέπουμε ότι η τιμή του χρόνου άφιξης του απ' ευθείας ήχου που υπολογίστηκε θεωρητικά, συμφωνεί με τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Όσον αφορά τον ανακλώμενο ήχο που φτάνει πρώτος στη θέση του ηχολήπτη, αυτός προέρχεται από τους πλαϊνούς τοίχους, δεξιό και αριστερό. Ο χρόνος άφιξης των ανακλάσεων αυτών είναι περίπου 11 ms. Για τις ανακλάσεις που φτάνουν στη θέση του ηχολήπτη από το πάτωμα και το ταβάνι, ο χρόνος άφιξης αυτών είναι 10 ms περίπου. Όσο για τις υπόλοιπες επιφάνειες, δηλαδή για τον μπροστινό και τον πίσω τοίχο, οι ανακλάσεις δεν είναι ιδιαίτερα εμφανείς, διότι ο πίσω τοίχος καλύπτεται κατά το μεγαλύτερο μέρος του από διαχυτές και ηχοπαγίδες χαμηλών συχνοτήτων, ενώ ο μπροστινός τοίχος από προσωρινά τοποθετημένους διαχυτές και απορροφητικά panel.

Τονίζουμε ότι η διαφορά του χρόνου άφιξης του απ' ευθείας ήχου από την πρώτη ανάκλαση είναι 2.3 msec. Επίσης, η πρώτη ανάκλαση που φτάνει στη θέση του ηχολήπτη μετά τον απευθείας ήχο είναι κατά 14 dB περίπου ασθενέστερη. Η διαφορά τους είναι 14 dB και συνεπώς θεωρούμε ότι δεν επηρεάζει τον ηχολήπτη κατά την ακρόαση. Η τιμή αυτή είναι μέσα στις προδιαγραφές ενός τυπικού LEDE δωματίου ελέγχου¹³.

4.2.3.6 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΗΧΟΠΑΓΙΔΩΝ ΓΙΑ ΧΑΜΗΛΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ

Έπειτα από την διέγερση του νέου δωματίου ελέγχου με γεννήτρια συχνοτήτων εντοπίστηκε ισχυρός συντονισμός του χώρου στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων (ιδιαίτερα στη περιοχή των 70 Hz). Κρίθηκε

¹³ Jacob J. (1983) LEDE control room design. STUDIO SOUND. April's issue.

λοιπόν αναγκαία η κατασκευή και τοποθέτηση ηχοπαγίδων στις εμπρός γωνίες του δωματίου. Οι σχέσεις που χρησιμοποιούμε για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των ηχοπαγίδων προέρχονται από τις σχέσεις για τους απορροφητές μεμβράνης. Η γωνιακή ιδιοσυχνότητα ω , δίνεται από την σχέση,

$$\omega^2 = \frac{1}{M_p N_p} \quad (1)$$

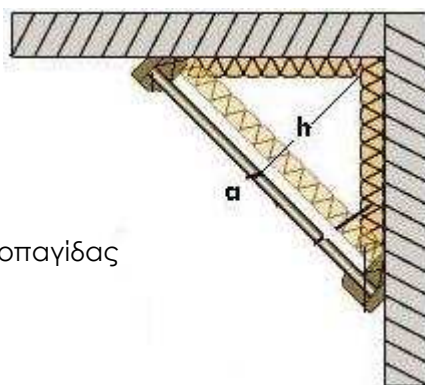
όπου N_p αποτελεί την ελαστικότητα και η M_p την επιφανειακή πυκνότητα της ηχοπαγίδας. Τοποθετώντας τα στην σχέση (1) έχουμε:

$$\omega^2 = \frac{1}{M_p N_p} = \frac{S \rho c^2}{\rho_p t V} \quad (2)$$

Ξέρουμε επίσης την σχέση που συνδέει την συχνότητα με τις διαστάσεις της ηχοπαγίδας και η οποία είναι η ακόλουθη:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{S \rho c^2}{\rho_p t V}} \quad (3)$$

Σύμφωνα με το σχήμα που ακολουθεί καταγράφουμε τις σχέσεις που μας δίνουν το εμβαδόν S και τον όγκο V .



Σχήμα 4.22: Διαστάσεις ηχοπαγίδας

Πλάτος: a , Ύψος: b , Πάχος μεμβράνης t , Εμβαδόν: $s = ab$,

Όγκος: $V = \frac{1}{2} a h b$

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω μεταβλητές στη σχέση (3) καταλήγουμε στην ακόλουθη σχέση που μας δίνει την απόσταση της μεμβράνης από

τη γωνία, για τη συχνότητα συντονισμού που μας ενδιαφέρει και είναι τα 70 Hz:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{2\rho}{\rho_p th}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{2\rho}{\rho_s h}} = \frac{84}{\sqrt{\rho_s h}} \Rightarrow h = \frac{7056}{\rho_s f^2} = \frac{7056}{25 \times 70^2} = 0.057m = 5.7cm$$

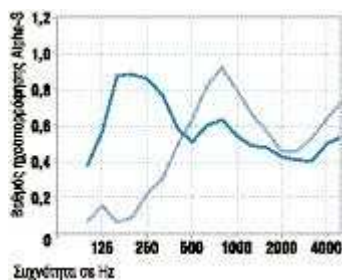
Παρατηρώντας το σχήμα 4.22 βλέπουμε ότι σχηματίζεται ένα ισοσκελές τρίγωνο στην γωνία της ηχοπαγίδας με τον τοίχο από το οποίο προκύπτει η σχέση:

$$h^2 = \frac{3a^2}{4} \Rightarrow a = \frac{2h}{\sqrt{3}} \approx 0.30m = 30cm$$

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι για τη συχνότητα των 70 Hz, το πλάτος της μεμβράνης θα πρέπει να είναι γύρω στα 30 cm. Στη πράξη όμως θα γίνει μεγαλύτερο, λόγω της ύπαρξης της περιμετρικής επιφάνειας στήριξης, στο πίσω μέρος της γυψοσανίδας.

4.2.3.7 ΔΙΑΤΡΗΤΗ ΓΥΨΟΣΑΝΙΔΑ 15/30R ΜΕ ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ

ΔΙΑΤΡΗΣΗ



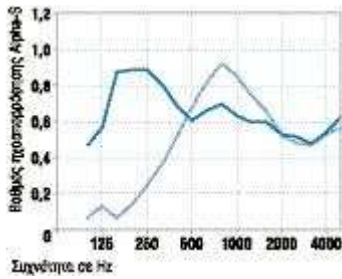
Μέτρηση σε 400 mm κενό αέρος

Alpha = 0.59 Απορρόφηση						
Hz	125	250	500	1000	2000	4000
α _s	0.56	0.86	0.51	0.55	0.43	0.50

Μέτρηση σε 60 mm κενό αέρος

Ινώδες φίλτρο (στάνταρ)

Alpha = 0.59 Απορρόφηση						
Hz	125	250	500	1000	2000	4000
α _s	0.15	0.21	0.62	0.80	0.46	0.63



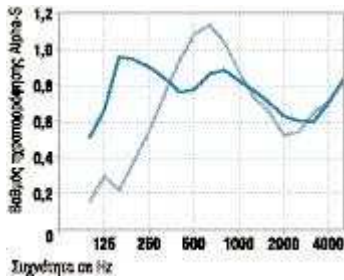
Ακουστικό φίλτρο

Μέτρηση σε 400 mm κενό αέρος

Alpha = 0.67 Απορρόφηση						
Hz	125	250	500	1000	2000	4000
α_s	0.56	0.89	0.61	0.64	0.53	0.54

Μέτρηση σε 60 mm κενό αέρος

Alpha = 0.63 - απορρόφηση						
Hz	125	250	500	1000	2000	4000
α_s	0.13	0.23	0.67	0.86	0.53	0.53



Ινώδες φίλτρο 20 mm
ηχοαπορροφητική πλάκα
Akustik SSP1

Μέτρηση σε 400 mm κενό αέρος

Alpha = 0.80 - απορρόφηση						
Hz	125	250	500	1000	2000	4000
α_s	0.66	0.90	0.77	0.83	0.63	0.71

Μέτρηση σε 60 mm κενό αέρος

Alpha = 0.83 - απορρόφηση						
Hz	125	250	500	1000	2000	4000
α_s	0.29	0.52	1.08	0.87	0.53	0.70

Σχήμα 4.23 :Βαθμός ηχοαπορρόφησης των διάτρητων γυψοσανίδων Knauf σε διαφορετικές κατασκευές

α = βαθμός ηχοαπορρόφησης κατά DIN EN 20354,

π.χ. απορρόφηση = κατηγορία απορρόφησης που υπολογίζεται με βάση το VDI 3755 Πιστοποιητικό: Έκθεση ελέγχου Knauf No SH 99 118.

Διάτρητη γυψοσανίδα με τετράγωνη διάτρηση 8/18Q

Διάτρητη γυψοσανίδα με ποσοστό διάτρησης 19.8% για τη βελτίωση της ηχοαπορρόφησης και της ακουστικής του χώρου.

Σε πολλές περιπτώσεις αρκεί η τοποθέτηση διάτρητων γυψοσανίδων, οι οποίες στην πίσω πλευρά διαθέτουν στάνταρ επίστρωση ινώδους ή ακουστικού φίλτρου για κάλυψη απαιτήσεων ηχομόνωσης σε χώρους όπως σχολεία, γραφεία, νηπιαγωγεία, συνεδριακούς χώρους, χώρους συγκέντρωσης κ.α.

Συνιστάται ο προσδιορισμός των απαιτήσεων ακουστικής μέσω εξειδικευμένης μελέτης και σχεδιασμού.

Διαστάσεις

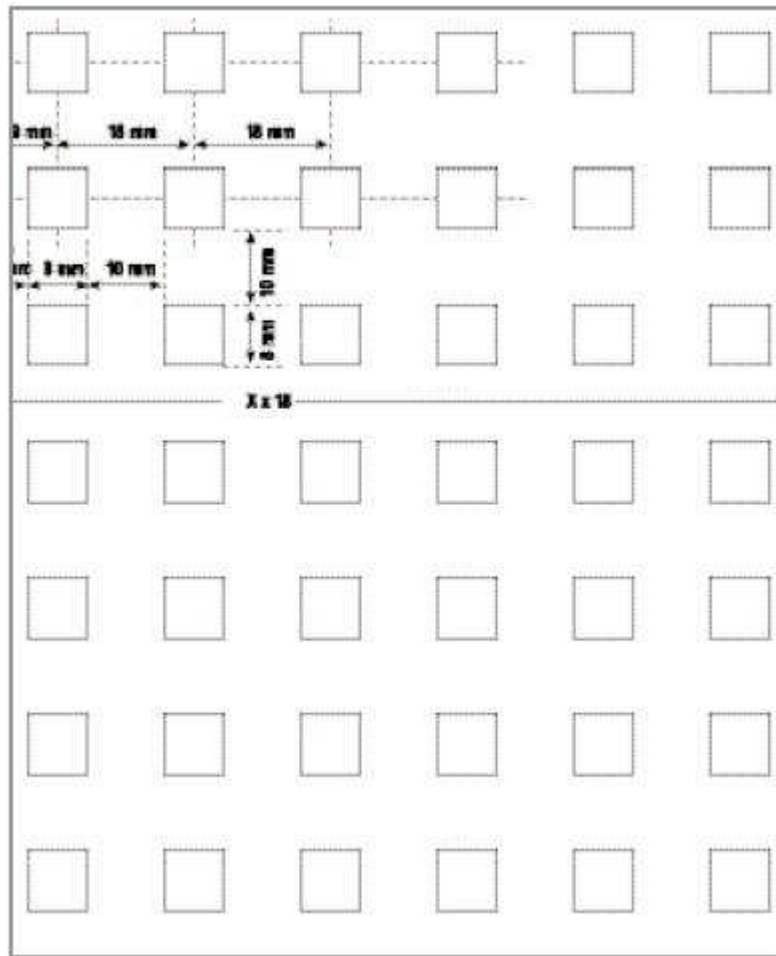
Πλάτος 1188 mm, μήκος 1988 mm, πάχος σανίδας 12.5 mm, διαμόρφωση άκρων 4 SK – ορθογώνια άκρα

Διάτρηση

Διάτρηση 8/18Q, μήκος πλευράς 8 mm, αξονική απόσταση οπών 18 mm, διάταξη τετράγωνη διάτρηση, ποσοστό διάτρησης 19.8%

Επίστρωση με ινώδες φίλτρο

Βάρος $\geq 45\text{g/m}^2$, χρώμα μαύρο/άσπρο



Σχήμα 4.24: Απεικόνιση διάτρησης με κλίμακα 1:1



Σάνταρ πλάτος

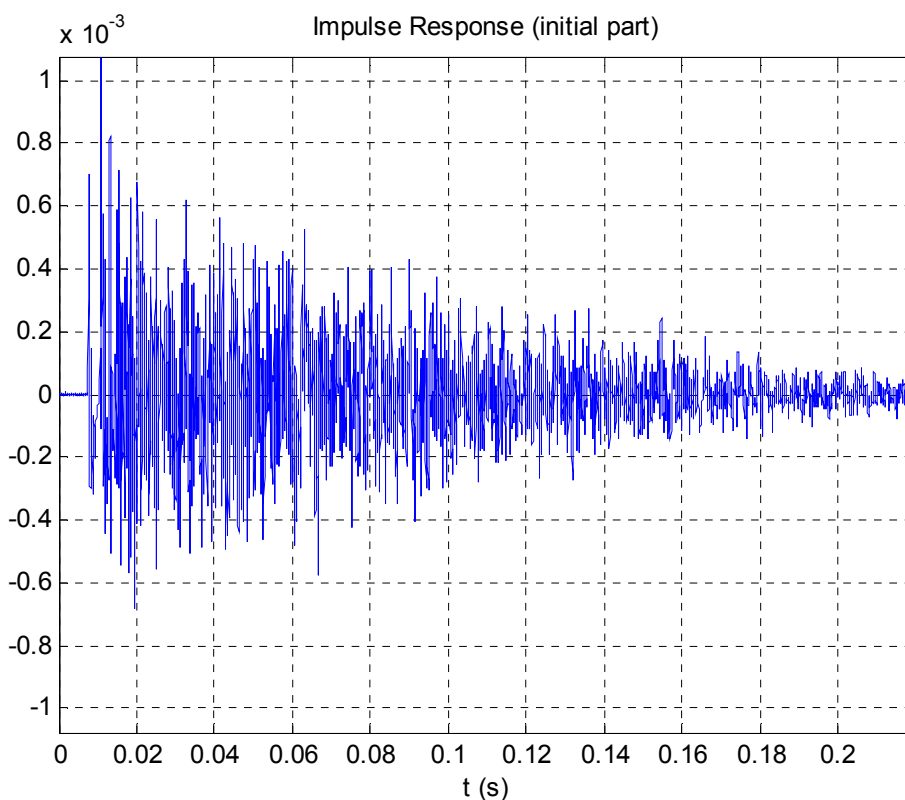
Σάνταρ μήκος

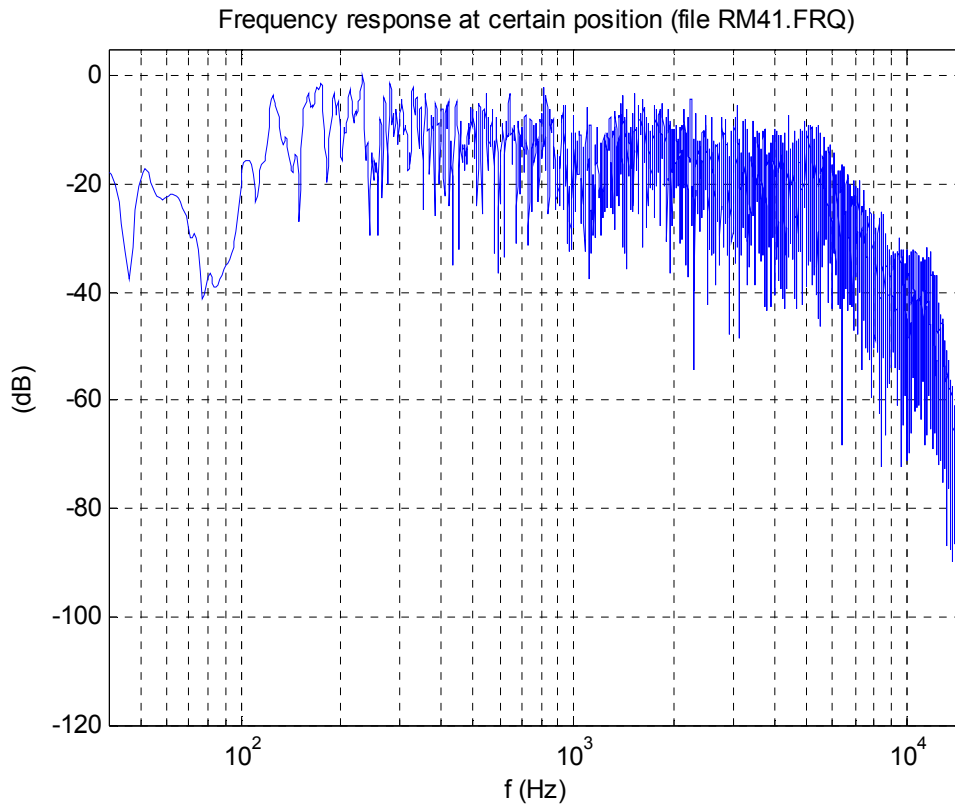
4.2.4 ΔΩΜΑΤΙΟ 4^ο (ΚΕΝΟ ΔΩΜΑΤΙΟ)

4.2.4.1 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ MLSSA

Όσον αφορά το δωμάτιο 4, η συνδεσμολογία και το σύστημα μέτρησης είναι το ίδιο με αυτά των τριών προηγούμενων δωματίων. Παρακάτω παρουσιάζονται τα φασματικά διαγράμματα της πρώτης μέτρησης, ενώ τα υπόλοιπα βρίσκονται στο Παράρτημα Α.

Μέτρηση 1^η





Σχήμα 4.23: Διέγερση με MLS και συχνοτική απόκριση δωματίου

Αναφορικά με το τέταρτο δωμάτιο όταν πάρθηκαν οι μετρήσεις σε αυτό, ήταν τελείως άδειο από εξοπλισμό, χωρίς μοκέτα στο πάτωμα και κουρτίνα στα παράθυρα. Οι διαστάσεις του είναι σχεδόν διαστάσεις κύβου που το καθιστούν ακατάλληλο για δωμάτιο ελέγχου. Το δωμάτιο αυτό όμως προορίζεται για εργαστήριο του μαθήματος Ηχοληψίας Ι και έχει εγκατασταθεί μόνο ο απαραίτητος εξοπλισμός για το σκοπό αυτό και δεν εκτελούνται εργασίες ηχογράφησης και μίξης σε αυτό το χώρο. Άρα η ακουστική του μελέτη δεν κρίθηκε μείζονος σημασίας.

5. ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια να περιγραφούν όλες οι διαδικασίες μετασκευής των χώρων ηχογράφησης και δωματίου ελέγχου στο Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής στο Παράρτημα Ρεθύμνου, να αποτυπωθούν οι χώροι, το σύστημα εξαερισμού και οι καλωδιώσεις πριν και μετά από τις δομικές αλλαγές που έγιναν στους χώρους. Δόθηκαν τα σχέδια των χώρων όπως ήταν πριν τις αλλαγές αλλά και όπως διαμορφώθηκαν μετά, σχέδια για τα κανάλια του εξαερισμού - κλιματισμού πριν τις αλλαγές αλλά και όπως διαμορφώθηκαν μετά, καθώς επίσης και ειδικές χαρτογραφήσεις των σημάτων (καλωδίων) μεταξύ των συσκευών μέσα σε κάθε χώρο αλλά και μεταξύ των χώρων. Έγιναν ακουστικές μετρήσεις στους χώρους όπως ήταν πριν για να εντοπιστούν οι ιδιαιτερότητές τους, αλλά και μετρήσεις μετά τις δομικές αλλαγές για την βελτιστοποίηση της ακουστικής μέσω της εφαρμογής των κατάλληλων υλικών. Με δεδομένα τα ήδη υπάρχοντα δομικά στοιχεία αλλά και το υπάρχον σύστημα καναλιών εξαερισμού, μεγάλο μέρος του οποίου παρέμεινε ακριβώς όπως ήταν, μπορούμε να πούμε ότι η ηχοαπομόνωση γενικά δεν είναι η ιδανική, παραμένει όμως σε αποδεκτά επίπεδα. Συγκεκριμένα όσον αφορά την ακουστική ηχοαπομόνωση του χώρου ηχογραφήσεων με τα δύο δωμάτια ελέγχου, αυτή είναι της τάξης των 60,2 dB ($L_{p(slow)}-linear$). Δηλαδή δεν υπάρχει ουσιαστικό πρόβλημα κατά τη διάρκεια μιας ηχογράφησης, εάν ο ηχολήπτης στο νέο δωμάτιο ελέγχου, δεν λειτουργεί το σύστημα σε ηχητικές εντάσεις μεγαλύτερες των 95 dB. Όσον αφορά τις επιπτώσεις των θορύβων του περιβάλλοντος στις ηχογραφήσεις εντός του δωματίου ηχογράφησης, κρίνονται και αυτές μικρές. Λόγω της ιδιαιτερότητας γενικά των χώρων (βρίσκονται σε πολυόροφο κτίριο με σχετικά στενούς περιμετρικούς τοίχους), αν απαιτήσει κάποιος επαγγελματικές προδιαγραφές θα πρέπει η ηχογράφηση να γίνεται κατά τις νυκτερινές ώρες. Όσον αφορά τα δύο

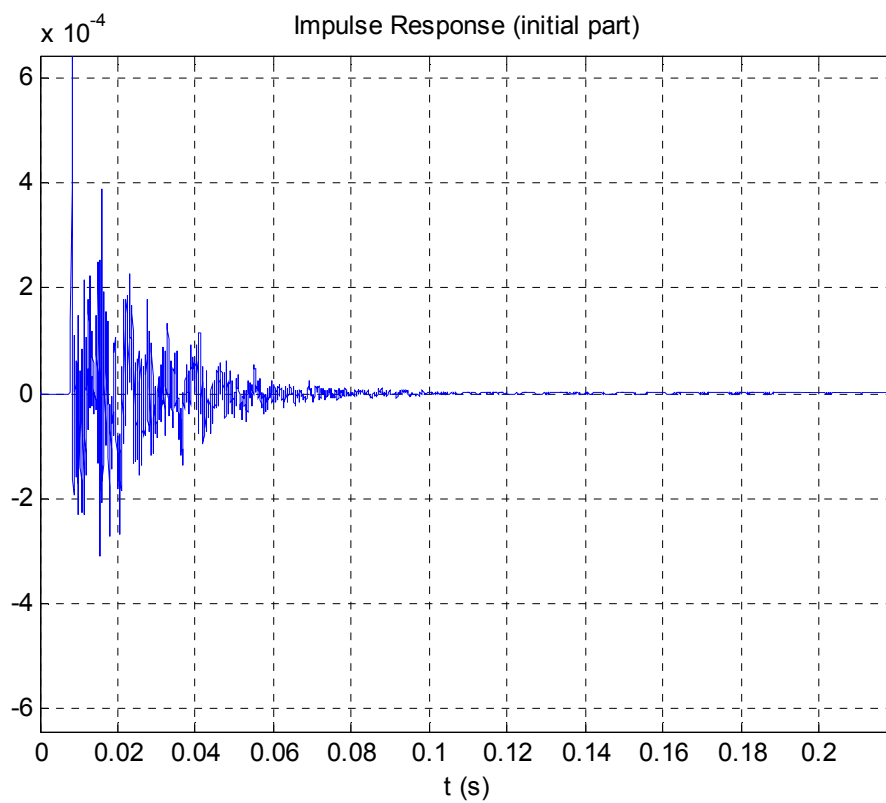
δωμάτια ελέγχου έχουμε να κάνουμε τις εξής παρατηρήσεις: Υπάρχει μικρό πρόβλημα στο επίπεδο θορύβου στους δύο αυτούς χώρους όταν το σύστημα κλιματισμού – εξαερισμού είναι σε λειτουργία. Η ηχητική στάθμη ακουστικής πίεσης μετρήθηκε στο νέο δωμάτιο ελέγχου στα 46.3 dB – 33.9 L_{eq} – 52.2 L_{in} (re 20μPa) όταν η κονσόλα, ο ηλεκτρονικός υπολογιστής και τα ηχεία βρίσκονται σε λειτουργία ενώ το σύστημα εξαερισμού – κλιματισμού όχι. Αντίστοιχα, όταν το σύστημα εξαερισμού – κλιματισμού δεν λειτουργούσε το ηχητική στάθμη πίεσης στο δωμάτιο ήταν 77 dB ($L_{p(slow)}$ -linear). Επίσης, η στάθμη ακουστικής πίεσης στο χώρο ηχογραφήσεων, κατά την διάρκεια μίξης στο νέο δωμάτιο ελέγχου ήταν στα 60.2 dB ($L_{p(slow)}$ -linear), ενώ στο δωμάτιο ελέγχου Pro Tools ήταν στα 48.8 dB ($L_{p(slow)}$ -linear). Το πρόβλημα εντοπίζεται στη μετάδοση του θορύβου του μοτέρ του εξαερισμού μέσω των καναλιών. Σε αυτό το στάδιο δεν υπήρχε η δυνατότητα (λόγω του προϋπολογισμού) να γίνουν επεμβάσεις μέσα στα κανάλια ή στην οροφή. Πάντως το πρόβλημα δεν κρίνεται ως σοβαρό και δεν φαίνεται να ενοχλεί τους ηχολήπτες. Εξ άλλου, εάν κάποιος σε κάποια στιγμή θελήσει άκρα ησυχία, μπορεί να απενεργοποιήσει τον εξαερισμό. Η ακουστική στο χώρο ηχογράφησης κρίνεται ικανοποιητικότερη σε σχέση με αυτήν πριν από τις δομικές αλλαγές, όπως προκύπτει και από τις σχετικές μετρήσεις. Επί πλέον, η ηχοαπορρόφηση του χώρου αυτού μπορεί να αλλάξει, διότι σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να αφαιρεθούν τα περισσότερα ηχοαπορροφητικά πάνελς, στις περιπτώσεις που επιθυμούμε να ηχογραφήσουμε μεμονωμένα κλασσικά όργανα και να δώσουμε την φυσική αίσθηση του χώρου. Η ακουστική στο νέο χώρο ελέγχου έχει ρυθμιστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι αρκετά ομαλή ιδιαίτερα στη θέση του ηχολήπτη και λίγο πιο πίσω από αυτή. Με δεδομένους τους φυσικούς περιορισμούς εξ αιτίας των διαστάσεων των υπάρχοντων χώρων, η τελική απόδοση του χώρου κρίνεται ότι είναι επαγγελματικών προδιαγραφών. Γενικά η όλη απόδοση και λειτουργικότητα του συνόλου των χώρων και του εξοπλισμού,

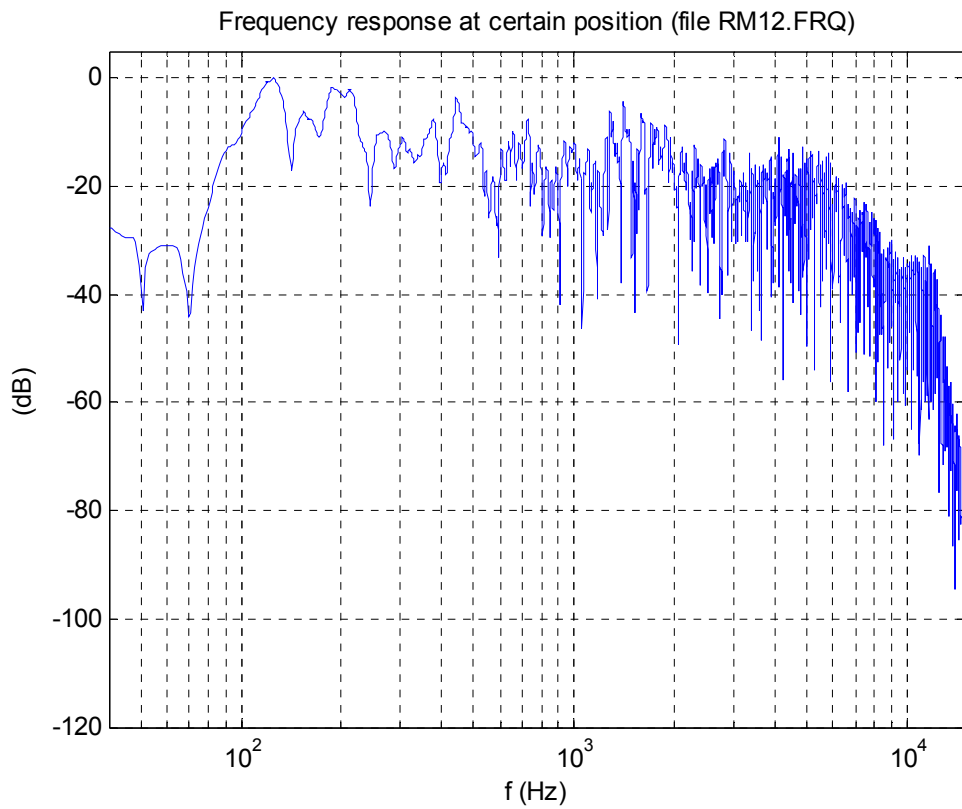
κατατάσσει το όλο επίπεδο των δυνατοτήτων του στούντιο του Α.Τ.Ε.Ι. Ρεθύμνου, από πλευράς ηχοληψίας και επεξεργασίας μουσικού υλικού, ανάμεσα στα καλύτερα της Κρήτης, αν όχι το καλύτερο.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΔΩΜΑΤΙΟ 1^ο (ΠΑΛΙΟ ΔΩΜΑΤΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ) – ΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ MLSSA

Μέτρηση 2^η

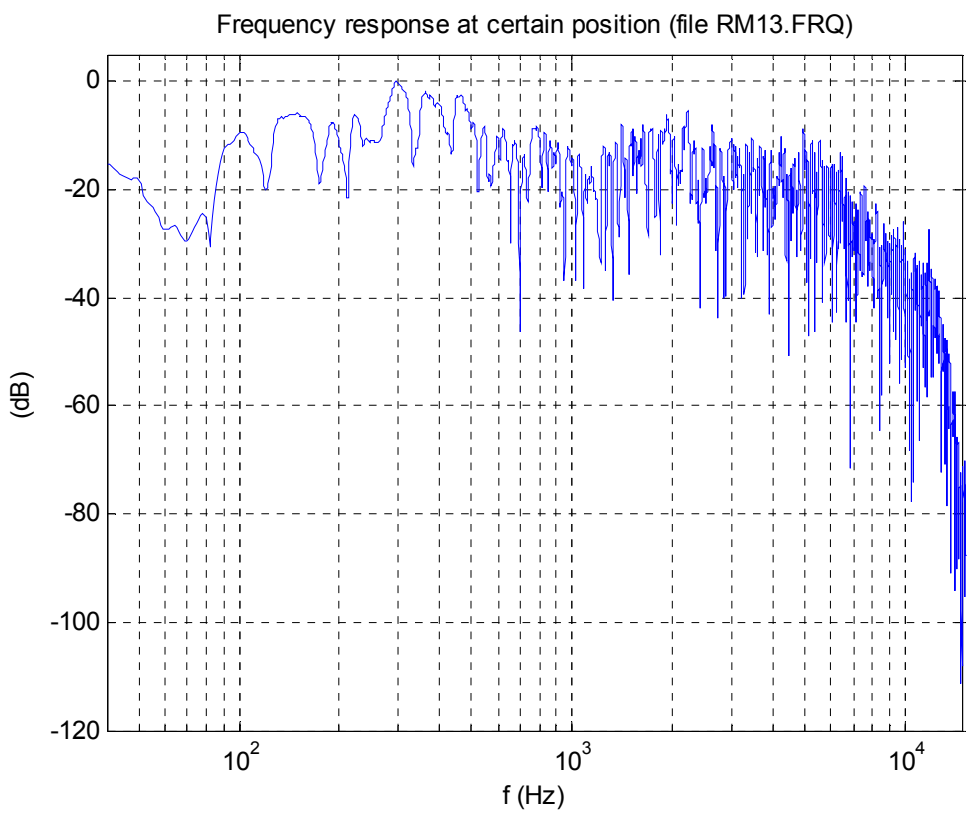
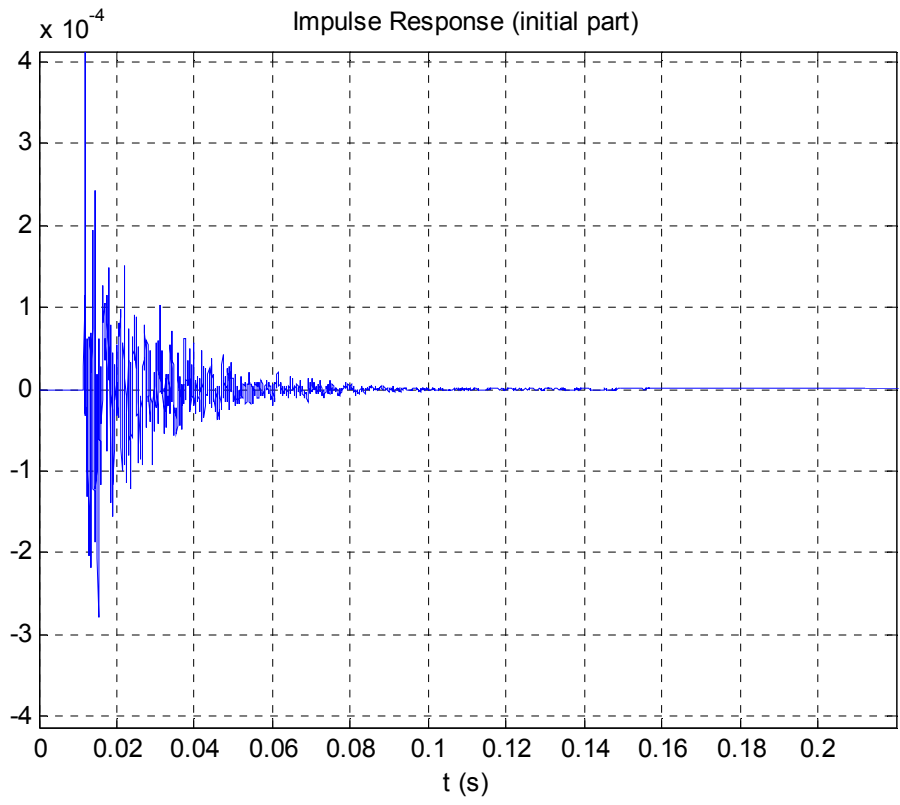




Σχήμα 1: Διέγερση με MLS και συχνотική απόκριση δωματίου

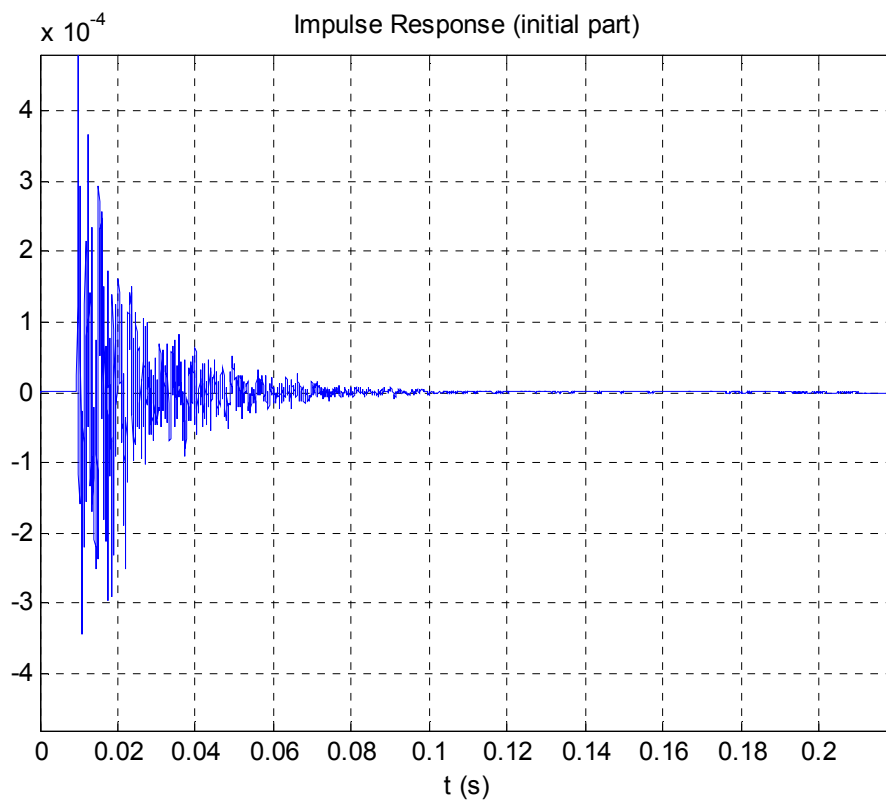
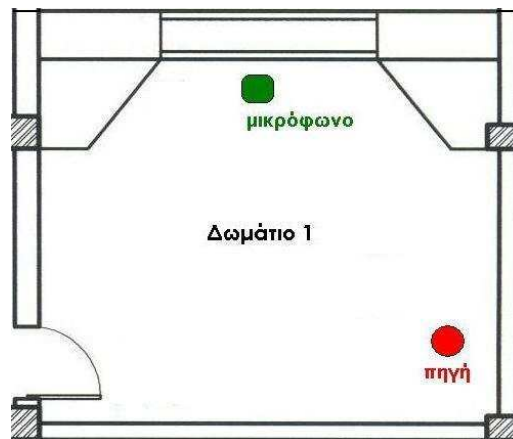
Μέτρηση 3^η

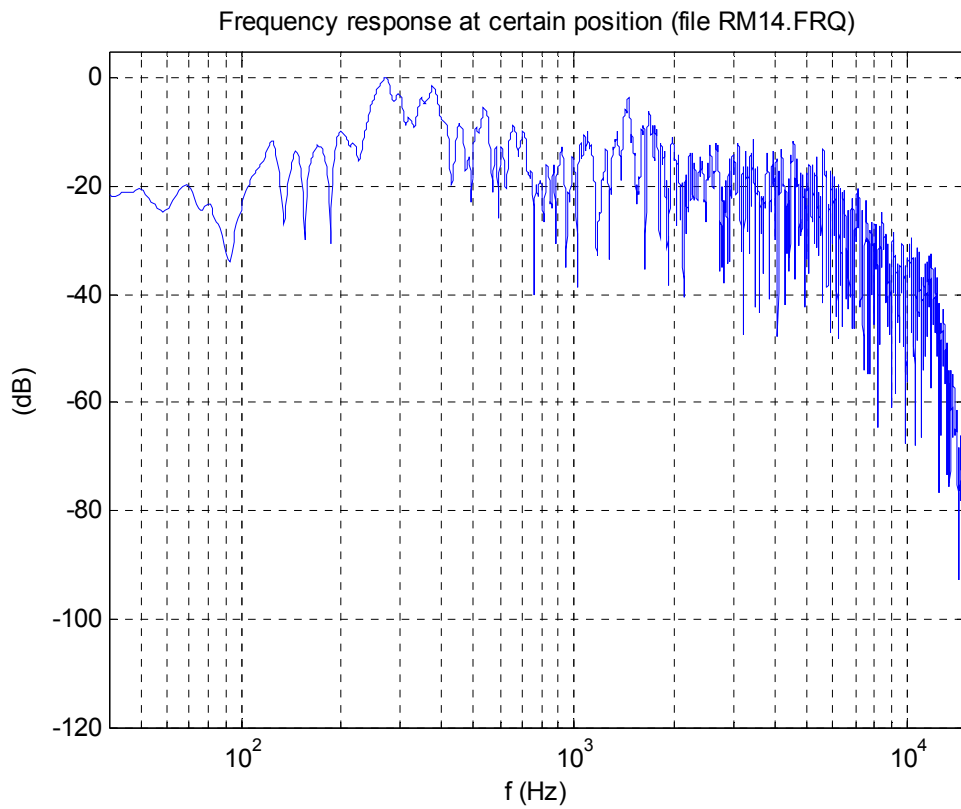




Σχήμα 2: Διέγερση με MLS και συχνοτική απόκριση δωματίου

Μέτρηση 4^η

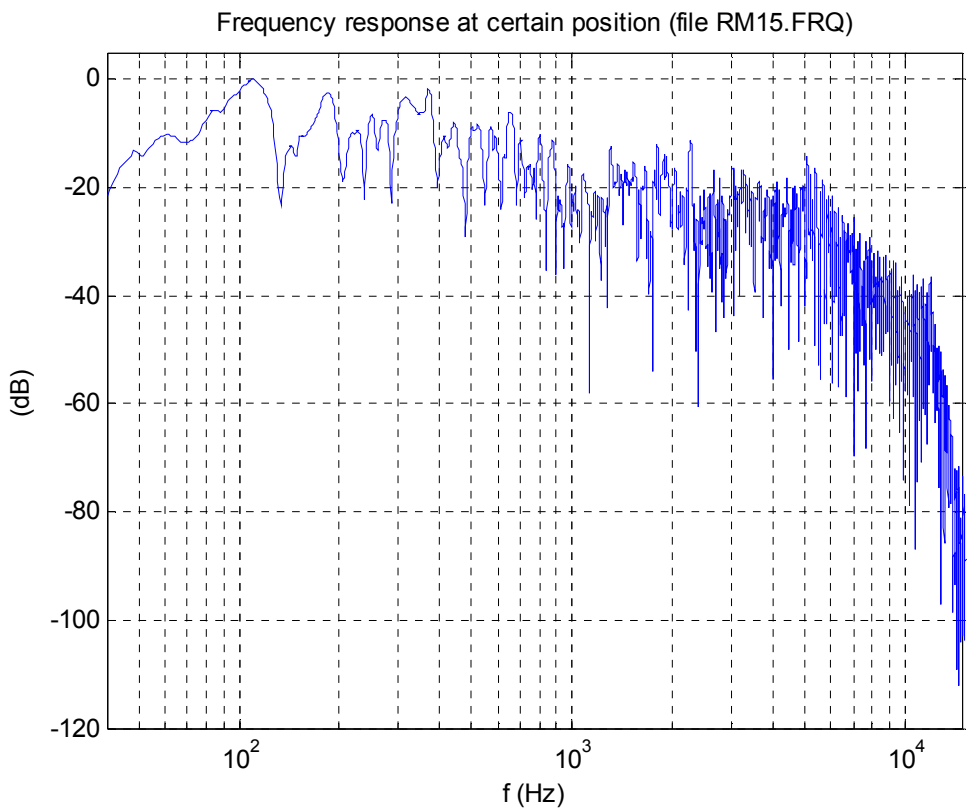
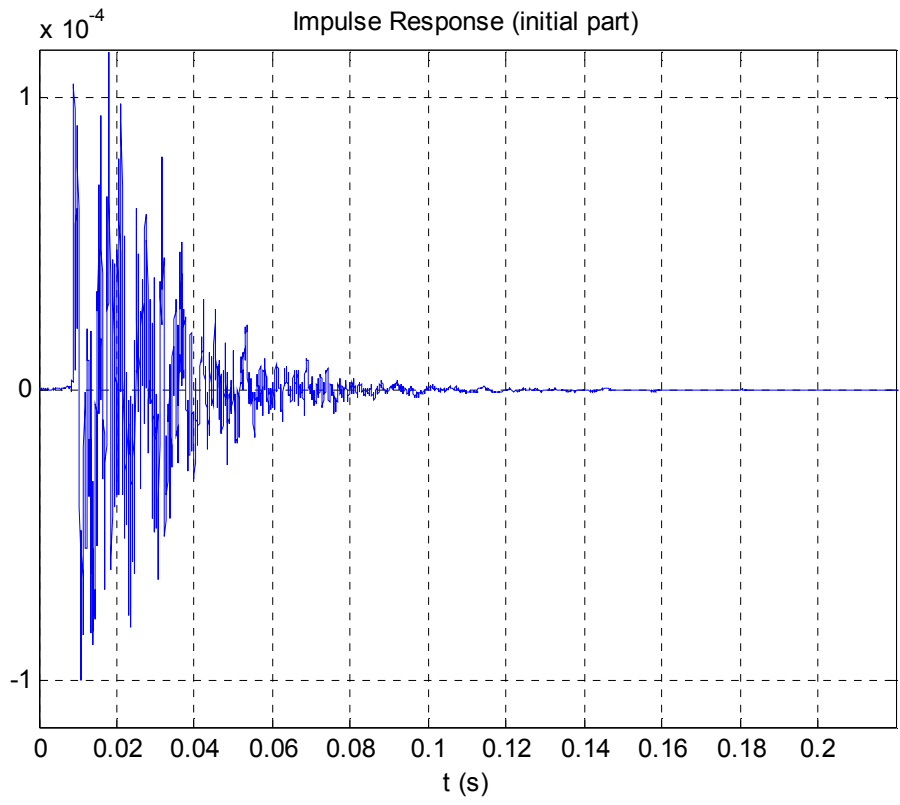




Σχήμα 3: Διέγερση με MLS και συχνοτική απόκριση δωματίου

Μέτρηση 5η

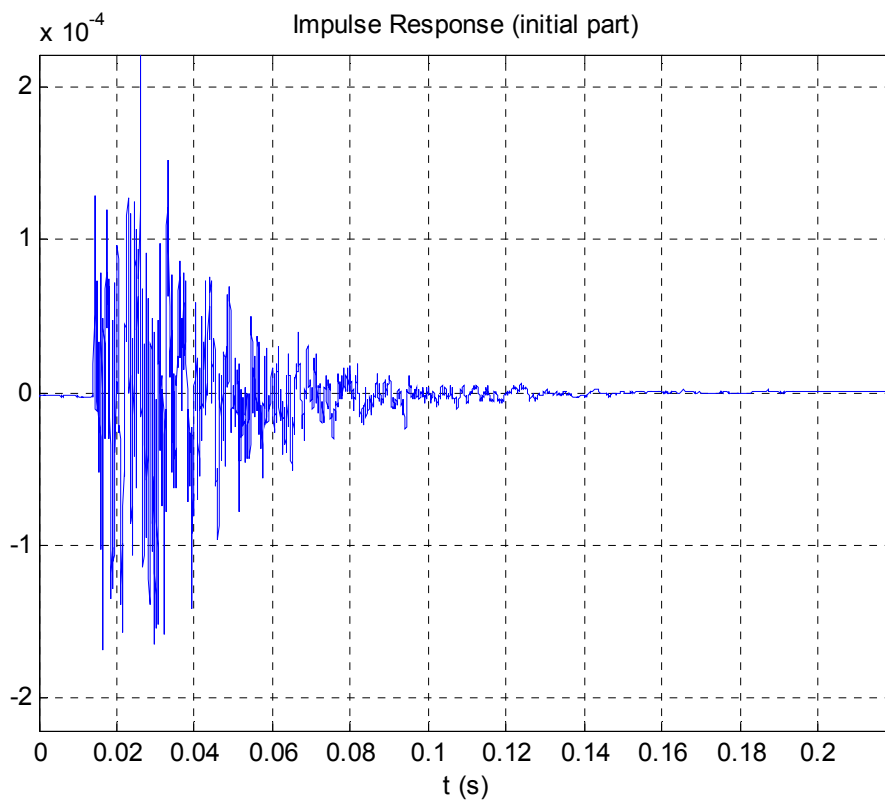


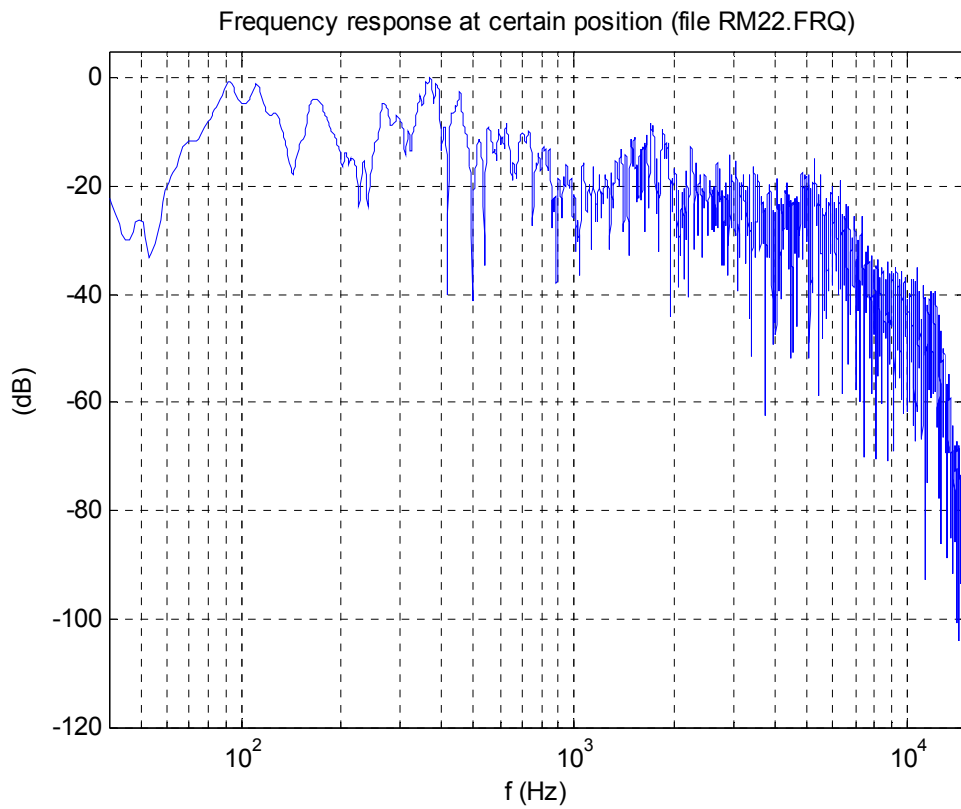


Σχήμα 4: Διέγερση με MLS και συχνοτική απόκριση δωματίου

**ΔΩΜΑΤΙΟ 2^ο (ΧΩΡΟΣ ΗΧΟΓΡΑΦΗΣΕΩΝ) – ΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ
ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ MLSSA**

Μέτρηση 2^η

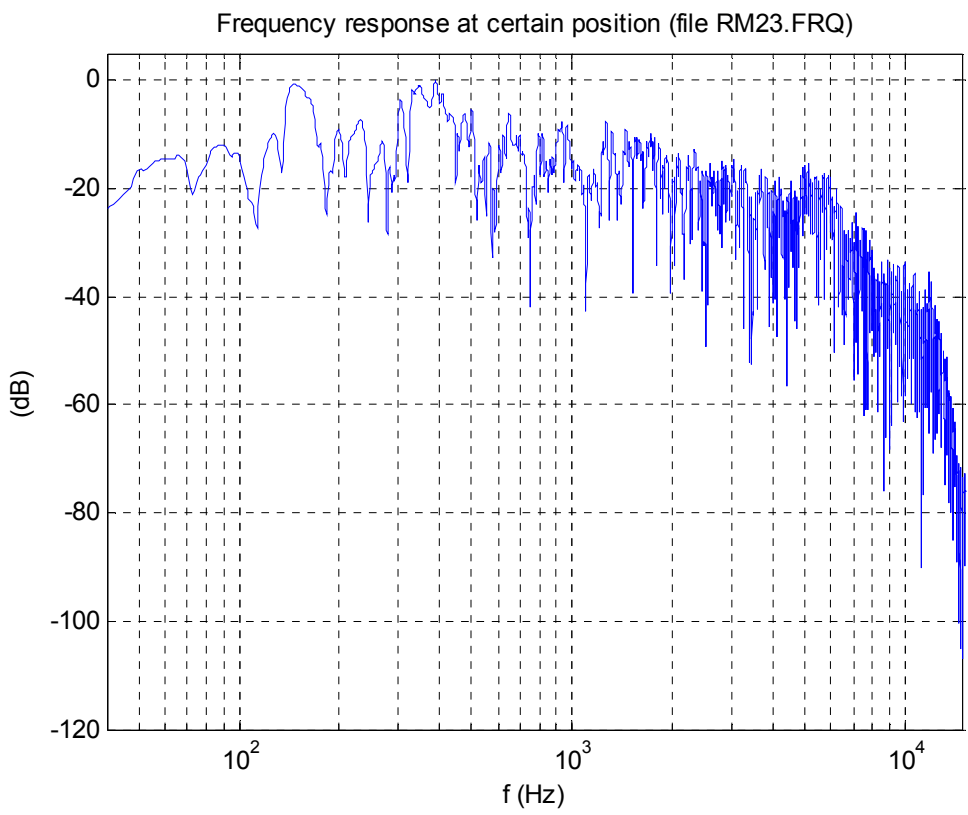
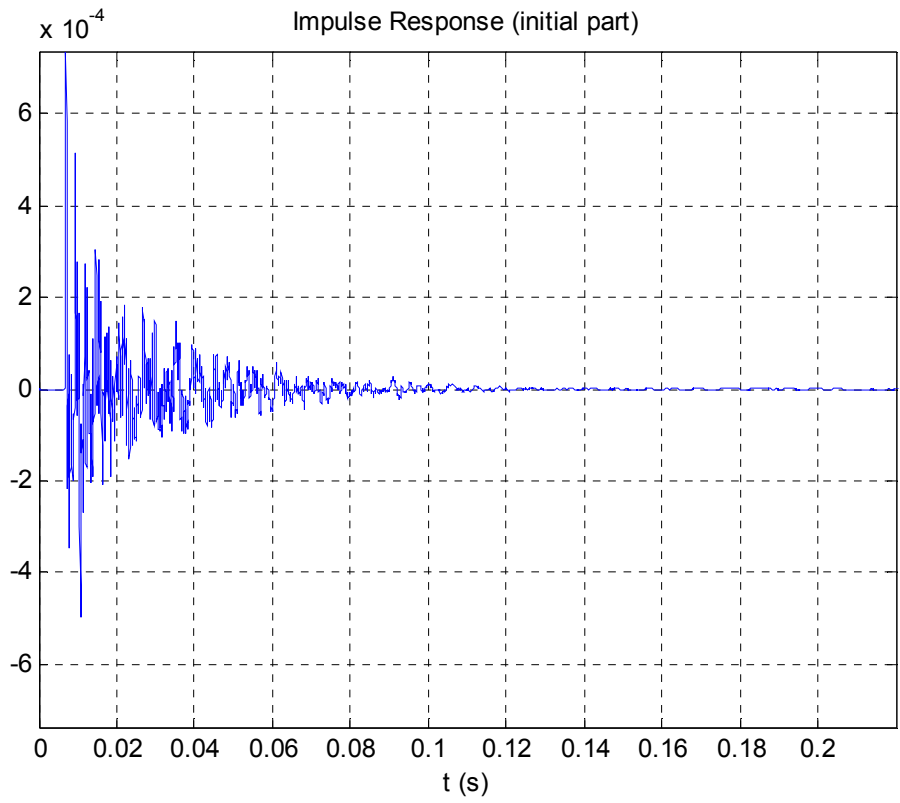




Σχήμα 6: Διέγερση με MLS και συχνοτική απόκριση δωματίου

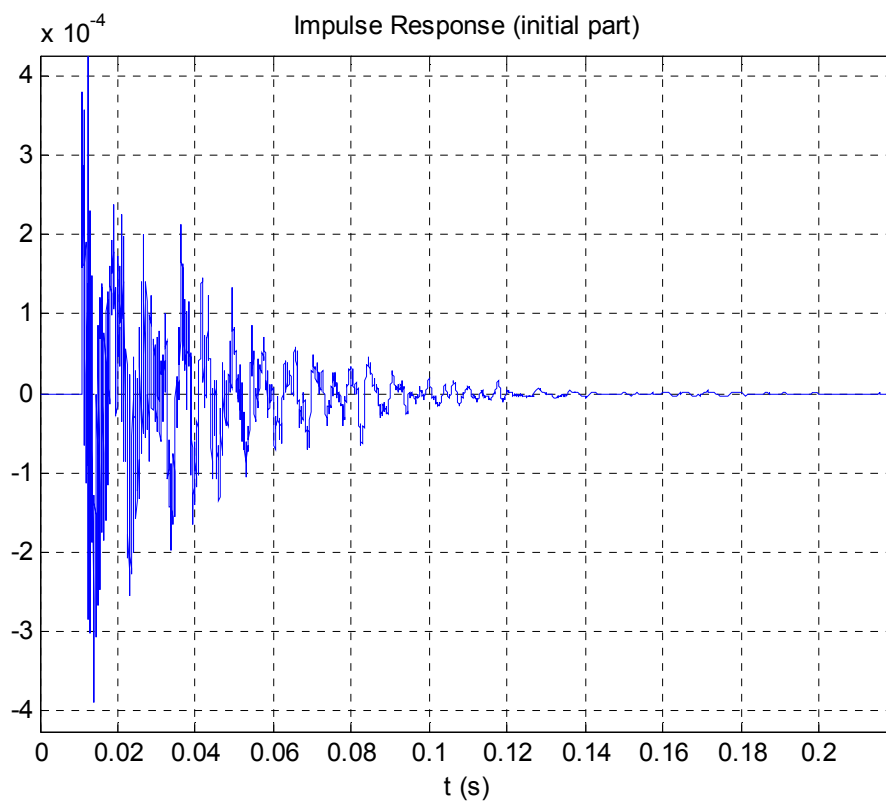
Μέτρηση 3^η

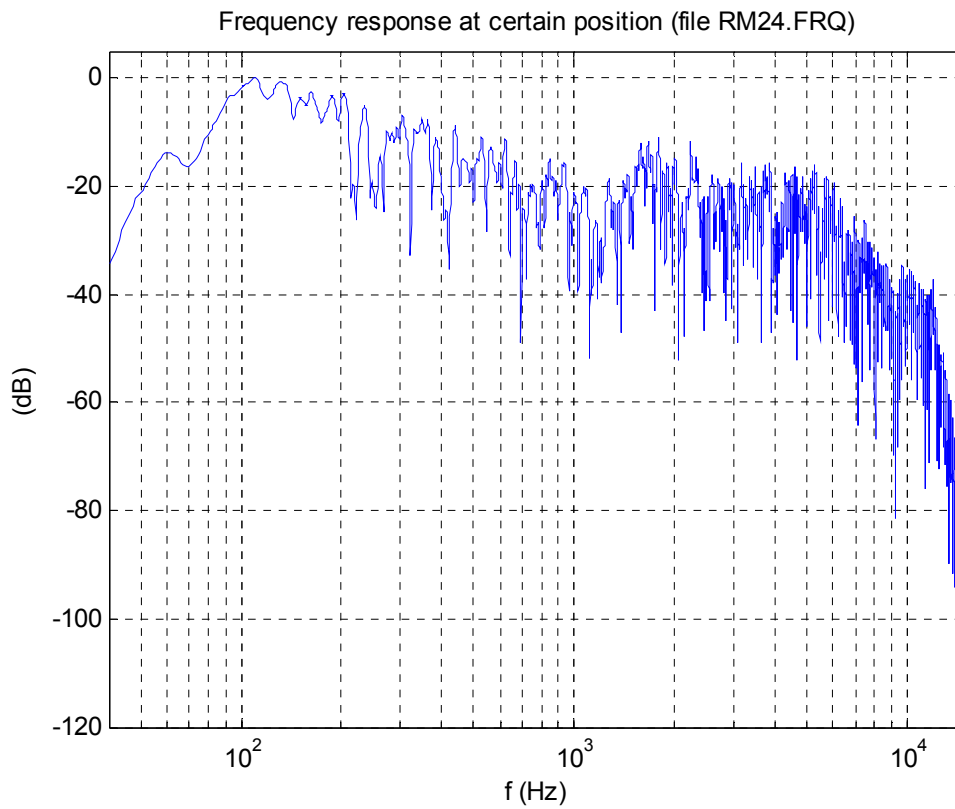




Σχήμα 7: Διέγερση με MLS και συχνοτική απόκριση δωματίου

Μέτρηση 4^η

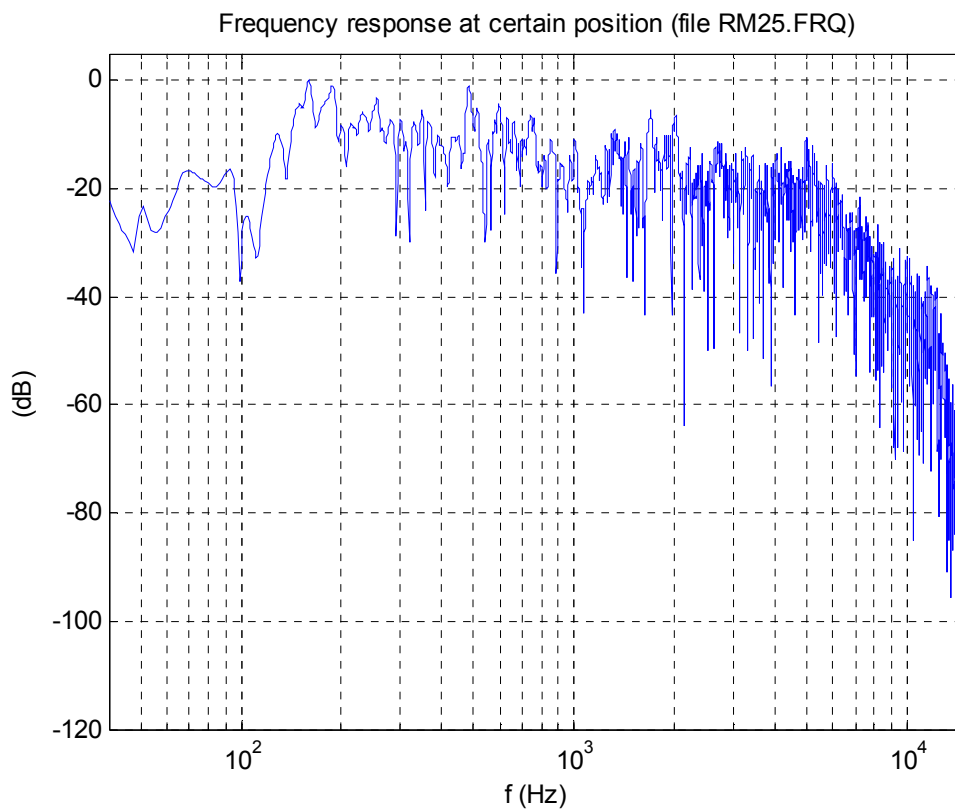
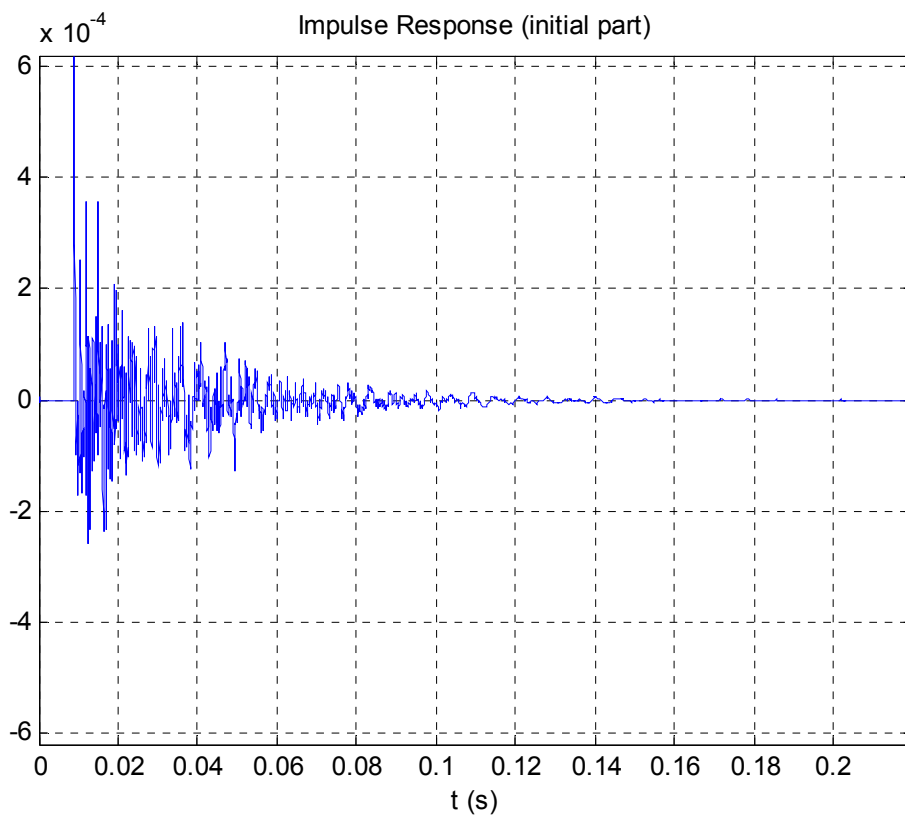




Σχήμα 8: Διέγερση με MLS και συχνοτική απόκριση δωματίου

Μέτρηση 5^η

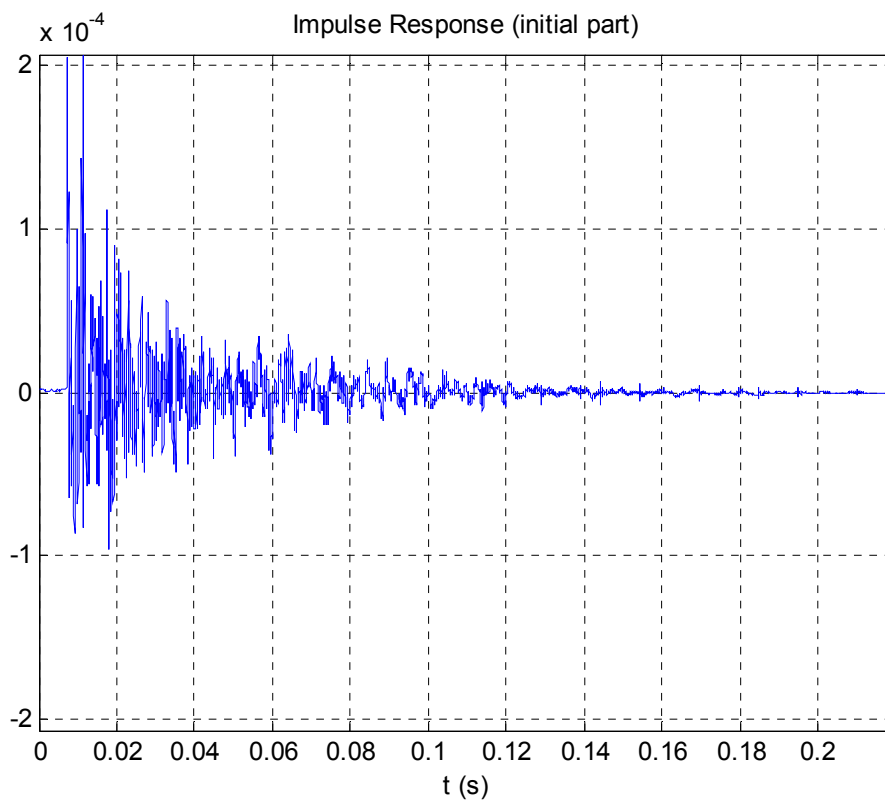


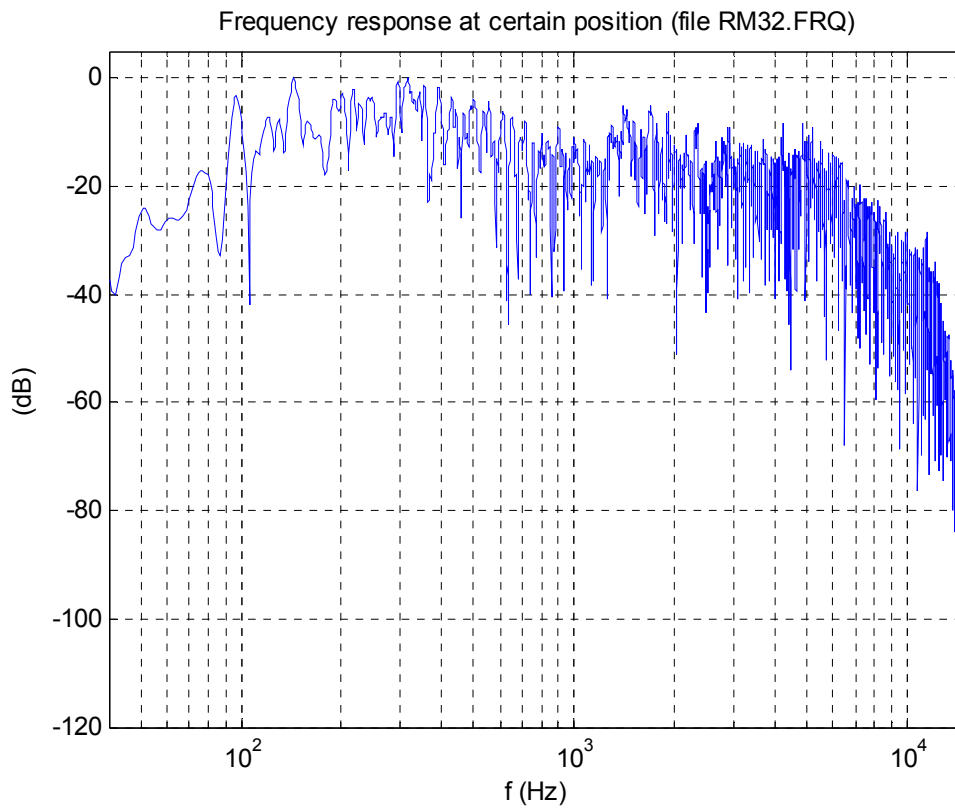


Σχήμα 9: Διέγερση με MLS και συχνοτική απόκριση δωματίου

**ΔΩΜΑΤΙΟ 3^ο (ΝΕΟ ΔΩΜΑΤΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ) – ΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ
ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ MLSSA**

Μέτρηση 2^η

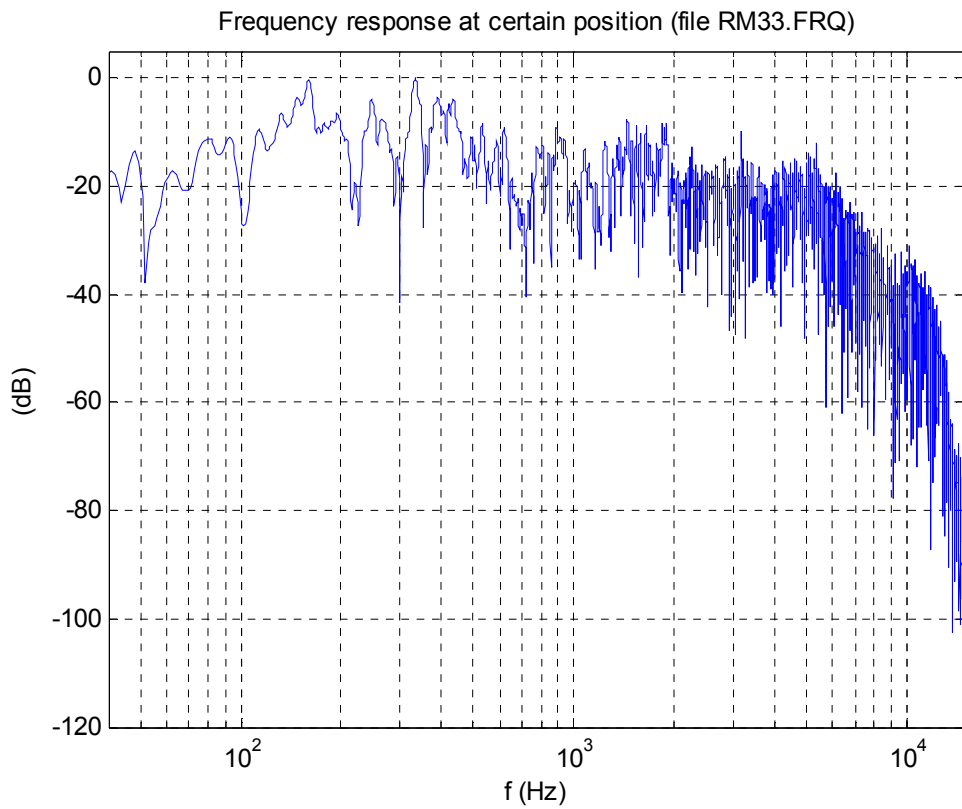
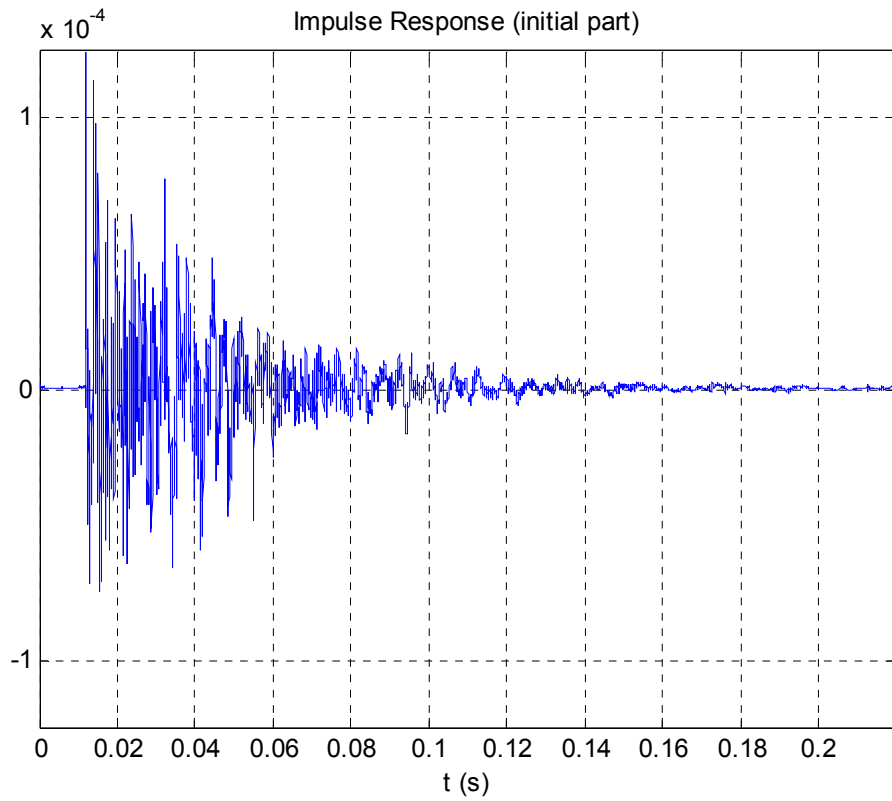




Σχήμα 10: Διέγερση με MLS και συχνотική απόκριση δωματίου

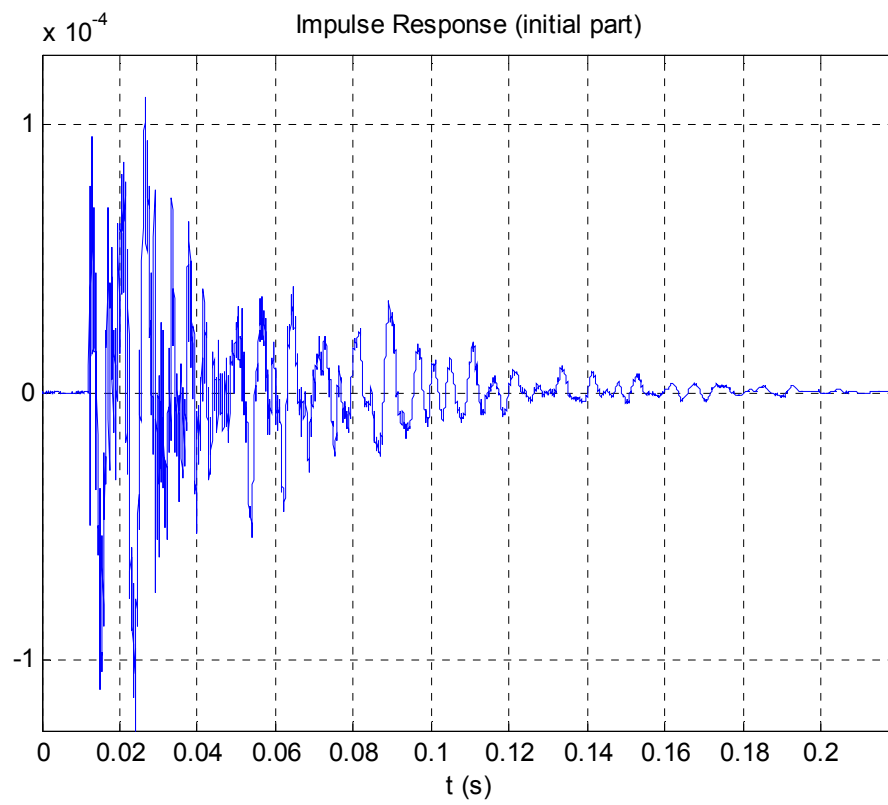
Μέτρηση 3^η

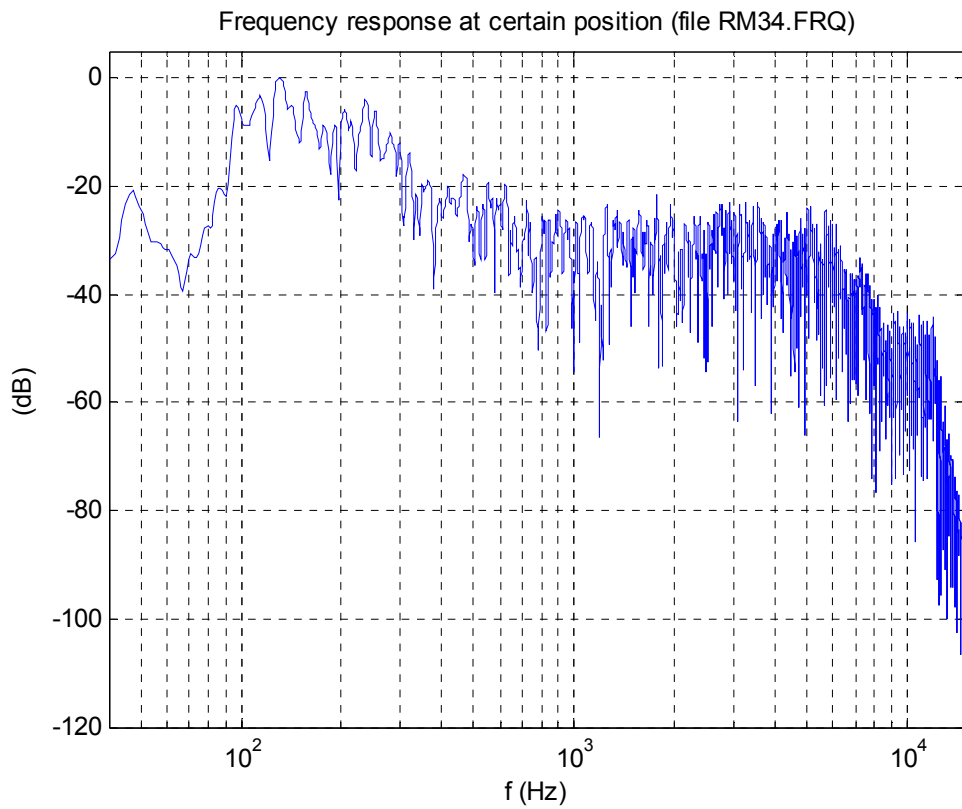




Σχήμα 11: Διέγερση με MLS και συχνοτική απόκριση δωματίου

Μέτρηση 4^η

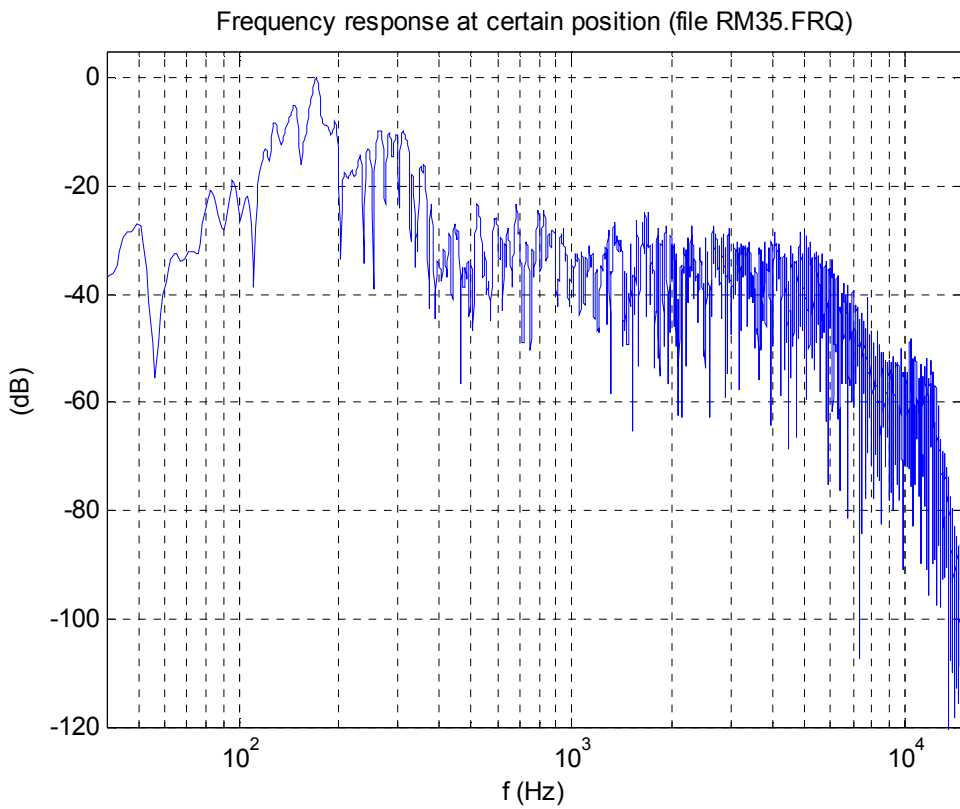
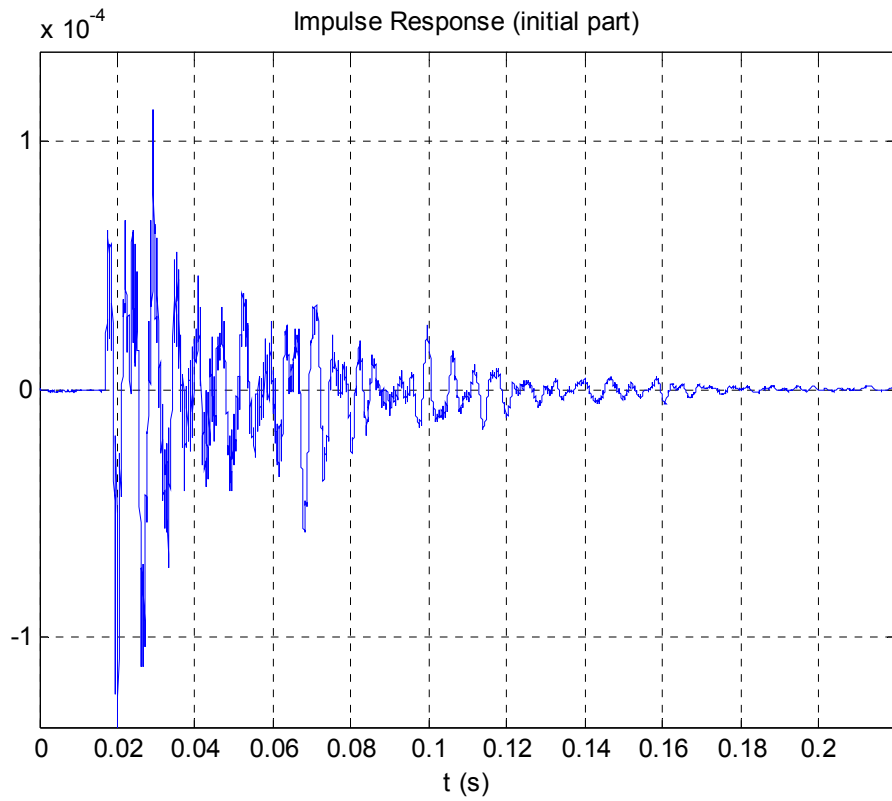




Σχήμα 12: Διέγερση με MLS και συχνотική απόκριση δωματίου

Μέτρηση 5^η

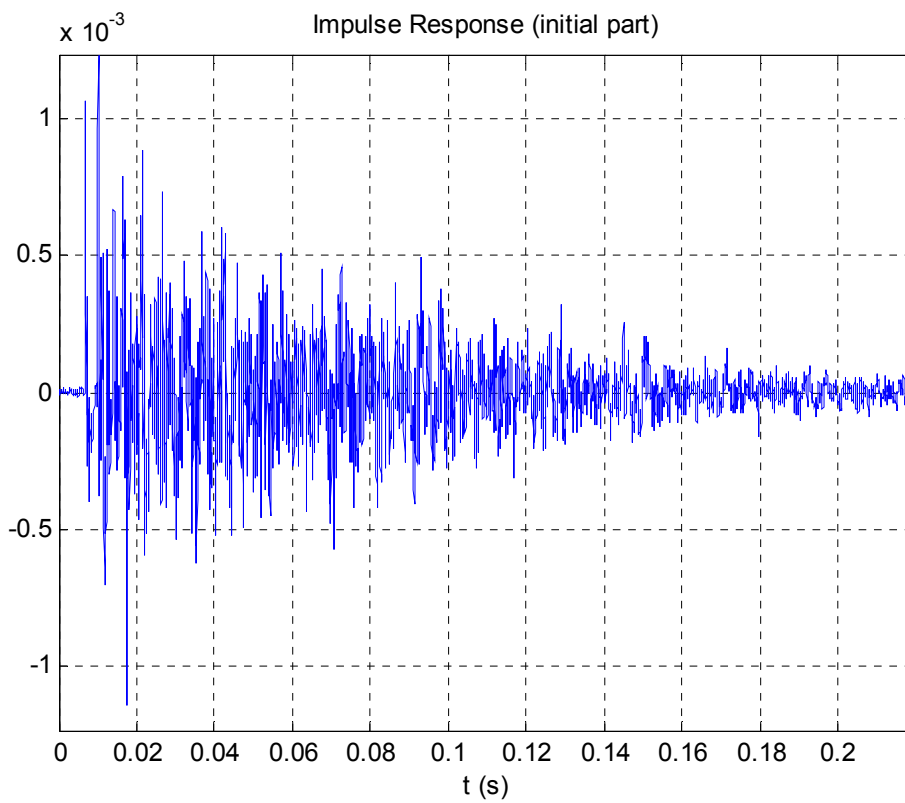
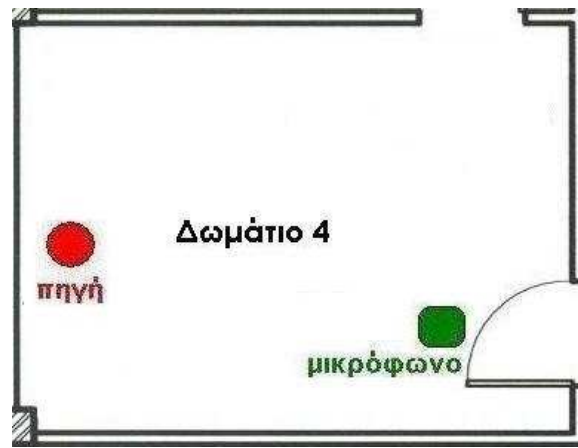


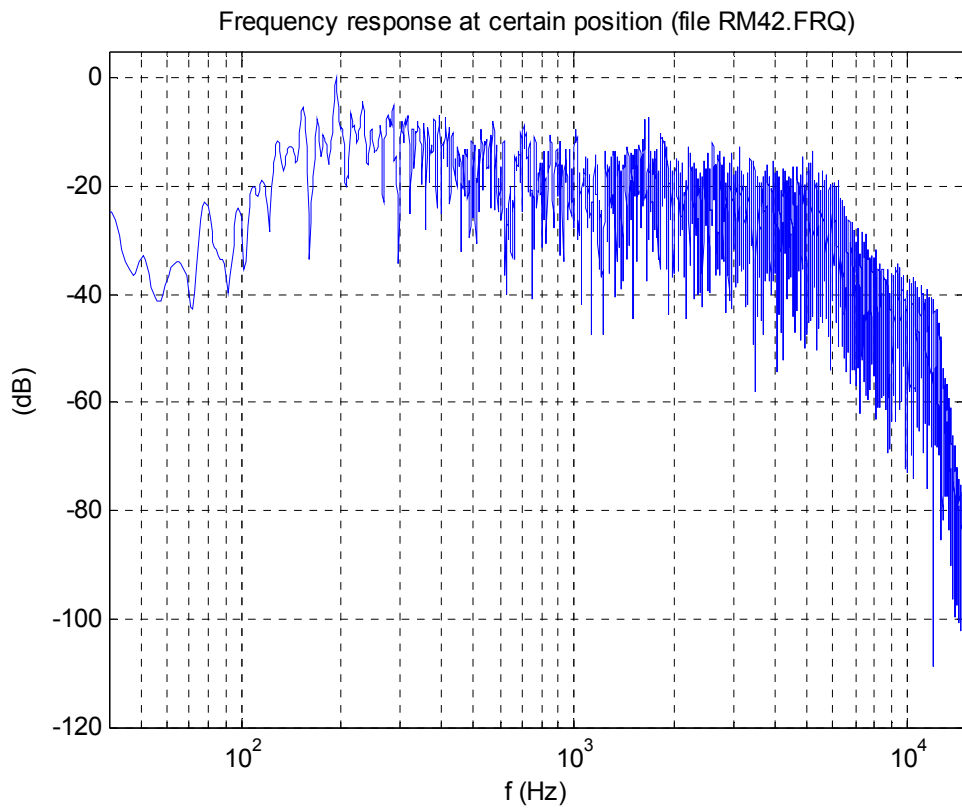


Σχήμα 13: Διέγερση με MLS και συχνοτική απόκριση δωματίου

ΔΩΜΑΤΙΟ 4^ο (ΚΕΝΟ ΔΩΜΑΤΙΟ)- ΦΑΣΜΑΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ MLSSA

Μέτρηση 2^η

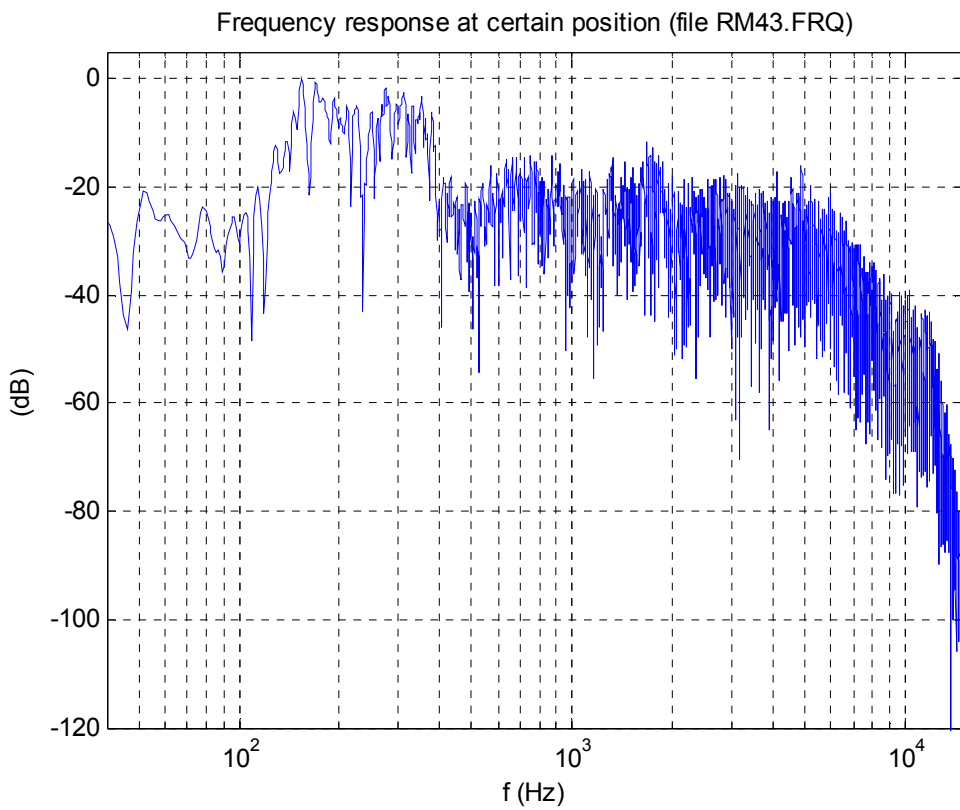
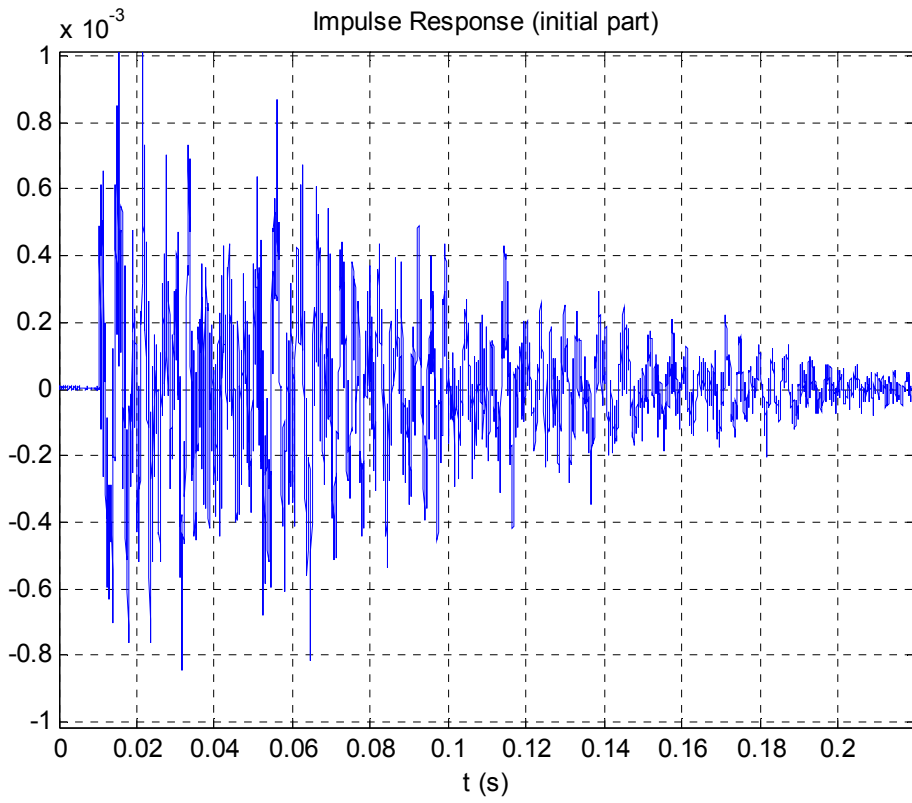




Σχήμα 14: Διέγερση με MLS και συχνотική απόκριση δωματίου

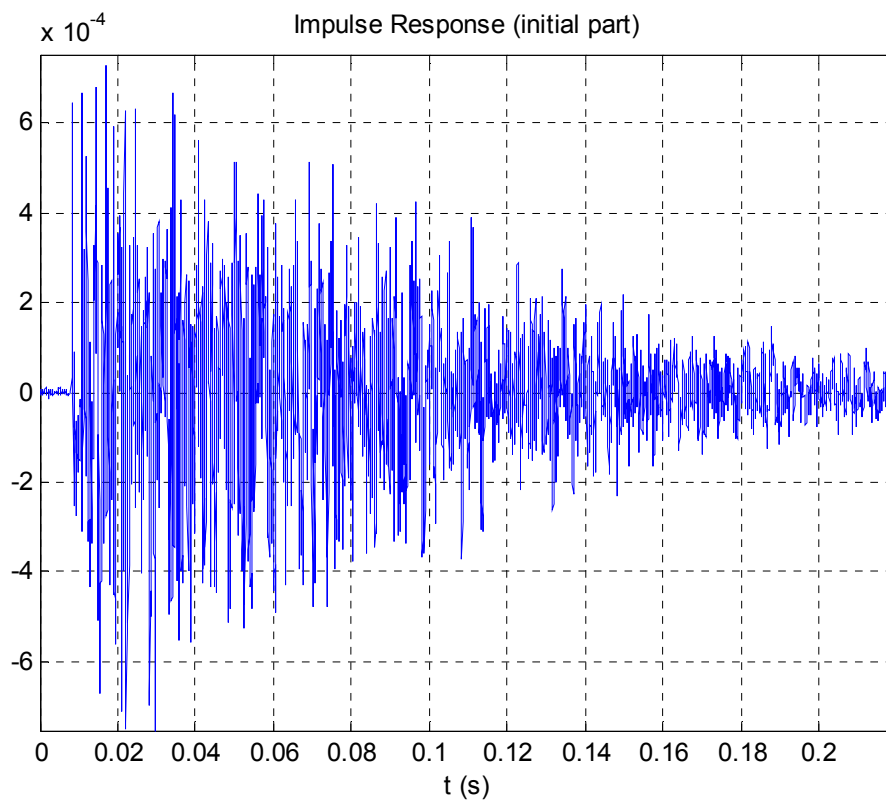
Μέτρηση 3^η

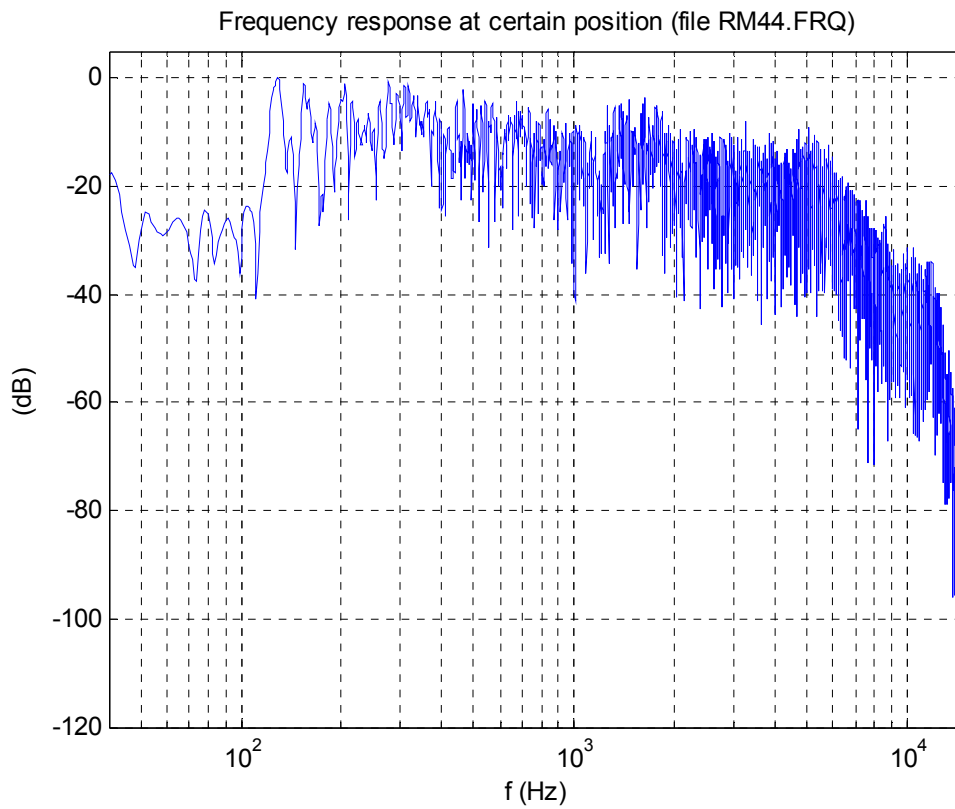




Σχήμα 15: Διέγερση με MLS και συχνотική απόκριση δωματίου

Μέτρηση 4^η

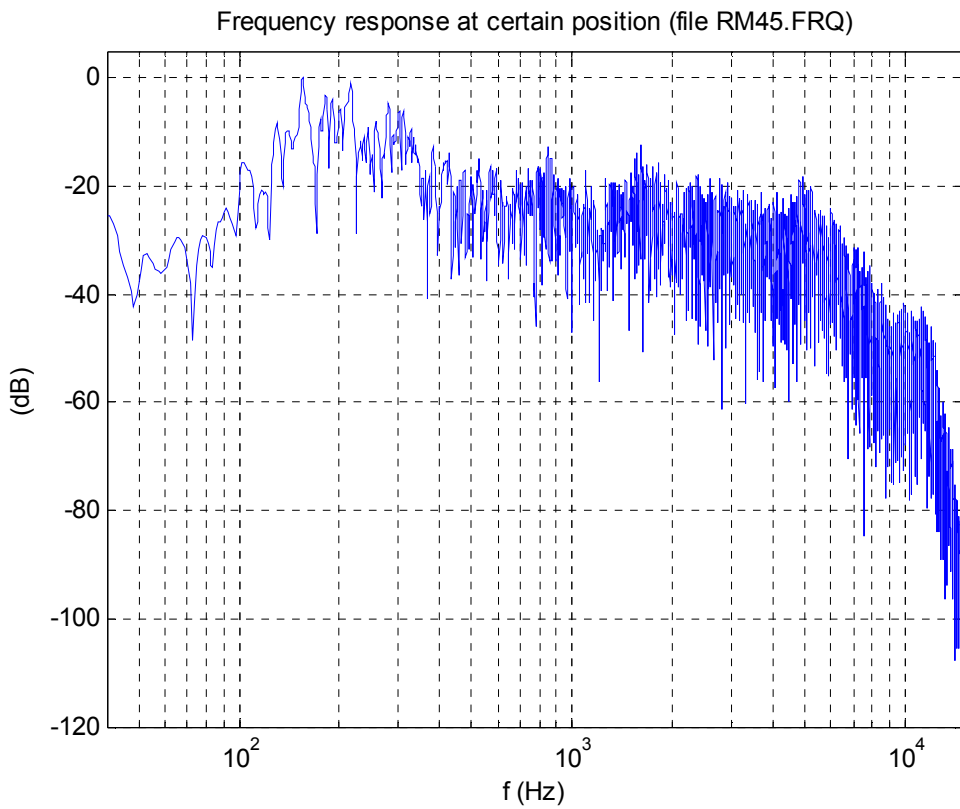
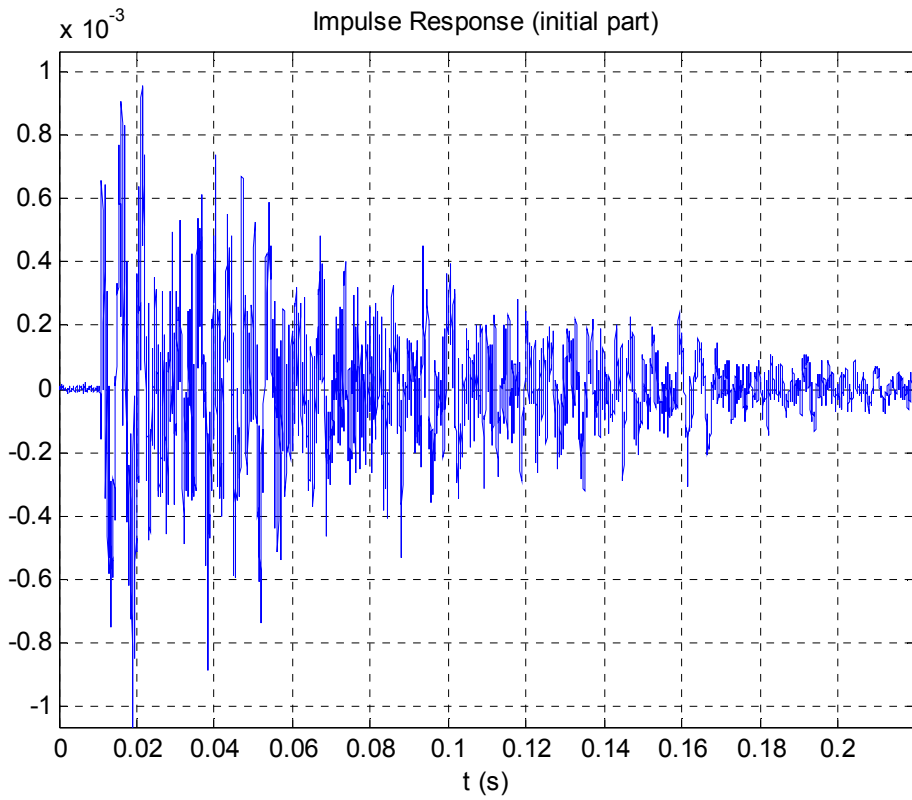




Σχήμα 16: Διέγερση με MLS και συχνωτική απόκριση δωματίου

Μέτρηση 5η





Σχήμα 17: Διέγερση με MLS και συχνотική απόκριση δωματίου