



ΑΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΡΕΘΥΜΝΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ
ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ: «Ακουστική μελέτη και τροποποίηση μικρού κλειστού χώρου.»

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ Α.Μ. 798

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΜΠΡΕΖΑΣ ΣΠΥΡΟΣ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι η μετατροπή ενός υπάρχοντα ιδιόκτητου χώρου σε χώρο ακροάσεων και μίξεων μουσικού υλικού. Απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η ακουστική μελέτη του χώρου, δηλαδή ο εντοπισμός και η ποσοτικοποίηση των ηχητικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα εντός του δωματίου. Μέσω μετρήσεων ο χώρος μελετάται συχνοτικά βάσει των παραπάνω φαινομένων. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων χρησιμοποιούνται για την ακουστική του τροποποίηση. Μετά το πέρας της τροποποίησης, πραγματοποιούνται υπολογισμοί για την εγκυρότητά της. Επίσης, μέριμνα υπάρχει και για την ηχομόνωση του χώρου από παρακείμενους, με σκοπό την αποφυγή κατά το δυνατόν όχλησης.

Ολοκληρώνοντας την Πτυχιακή Εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ. Σπύρο Μπρέζα, για την πολύτιμη επιστημονική του καθοδήγηση, τις συμβουλές του και την παροχή θεωρητικού υλικού, αλλά κυρίως τον ευχαριστώ για το ενδιαφέρον που έδειξε ενώ βρισκόμασταν σε πολύ μακρινή απόσταση. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον πατέρα μου Άνθιμο Παπαδόπουλο, για την πολύτιμη βοήθειά του με τις γνώσεις και την εμπειρία του, για την υλοποίηση της κατασκευής. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλη την οικογένειά μου για την υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1 – Ακουστική κλειστών χώρων.....	1
1.1 – Εισαγωγή.....	1
1.2 – Χρόνος αντήχησης.....	1
1.3 – Στάσιμα κύματα - Συντονισμοί χώρου.....	2
1.3.1 – Πυκνότητα τρόπων ταλάντωσης (Modal density).....	4
1.3.2 – Εξασθένηση των τρόπων ταλάντωσης (Mode decay rate).....	4
1.3.3 – Πλάτος ζώνης συχνοτήτων των τρόπων ταλάντωσης (Bandwidth).....	5
1.3.4 – Ακουστική μελέτη κλειστών χώρων.....	6
1.4 – Αποστάσεις και χρωματισμοί τρόπων ταλάντωσης.....	7
1.5 – Τρόποι ελέγχου των συντονισμών.....	8
1.6 – Απορρόφηση και ηχοαπορροφητές.....	11
1.6.1 – Πορώδη υλικά.....	12
1.6.2 – Απορροφητές τύπου μεμβράνης.....	13
1.6.3 – Συνηχητής Helmholtz.....	13
1.7 – Διάχυση και διαχυτές.....	15
Κεφάλαιο 2 – Δωμάτια ελέγχου - Audio control rooms.....	16
2.1 – Εισαγωγή.....	16
2.2 – Η ακουστική ενός δωματίου ελέγχου.....	16
2.2.1 – Αρχικό χάσμα χρονοκαθυστέρησης (Initial Time Gap).....	16
2.2.2 – Συχνотική περιοχή ενός δωματίου ελέγχου.....	17
2.3 – Είδη δωματίων ελέγχου.....	17
2.3.1 – Δωμάτια ελέγχου βασισμένα στη γεωμετρία.....	17
2.3.2 – Δωμάτια ελέγχου τύπου Jencen.....	18
2.3.3 – Δωμάτια ελέγχου τύπου Non-environmen.....	18
2.3.4 – Δωμάτια ελέγχου τύπου Live-End, Dead-End (LEDE).....	19
2.3.5 – Δωμάτια ελέγχου τύπου Reflection Free Zone (RFZ).....	19
2.3.6 – Δωμάτια ελέγχου τύπου Early Sound Scattering (ESS).....	20
2.3.7 – Δωμάτια ελέγχου και μίξης δύο καναλιών (Stereo).....	21
Κεφάλαιο 3 – Κρουστική απόκριση χώρων.....	22
3.1 – Κρουστική απόκριση.....	22
3.2 – Τρόπος μέτρησης της κρουστικής απόκρισης.....	23
3.2.1 – Μέθοδος του απειροστού παλμού.....	23
3.2.2 – Μέθοδος του μηδενισνού της πηγής.....	24
3.2.3 – Μέθοδος της ακολουθίας μέγιστου μήκους (MLS).....	24
3.3 – Ακουστικοί παράμετροι χώρων.....	25
3.3.1 – Χρόνος αντήχησης (Reverberation time – T).....	26
3.3.2 – Bass Ratio (BR).....	27
3.3.3 – Αρχικός χρόνος αντήχησης (Early decay time – EDT).....	27
3.3.4 – Διαύγεια (Clarity – C80, C50).....	27
3.3.5 – Διακριτικότητα (Definition – D50).....	28
3.3.6 – Χρονικό κέντρο βάρους (Center time – T _s).....	28

Κεφάλαιο 4 – Μείωση αερόφερτου θορύβου.....	28
4.1 – Μετάδοση του θορύβου σε κλειστούς χώρους.....	29
4.2 – Δείκτης ηχομείωσης (R).....	29
4.3 – Υπολογισμός ηχομείωσης αερόφερτου θορύβου σε κλειστό χώρο.....	30
4.4 – Νόμος της μάζας.....	30
4.4.1 – Κάθετη πρόσπτωση.....	30
4.4.2 – Τυχαία πρόσπτωση.....	30
4.5 – Το φαινόμενο της σύμπτωσης.....	31
4.6 – Το φαινόμενο του συντονισμού.....	33
4.7 – Ηχομονωτική συμπεριφορά απλών επιφανειών.....	34
4.7.1 – Περιοχή I (περιοχή σκληρότητας).....	36
4.7.2 – Περιοχή II (περιοχή νόμου μάζας).....	36
4.7.3 – Περιοχή III (περιοχή σύμπτωσης).....	36
4.8 – Μεθοδολογία υπολογισμού ηχομείωσης απλών επιφανειών.....	37
4.9 – Υπολογισμός δείκτη ηχομείωσης σύνθετων επιφανειών.....	37
4.10 – Ηχομονωτική συμπεριφορά διπλών επιφανειών.....	38
4.10.1 – Θεωρία διπλών τοιχωμάτων.....	38
4.10.2 – Συχνότητα συντονισμού του διάκενου.....	38
4.10.3 – Η συχνότητα f_1	39
4.10.4 – Πρακτικός υπολογισμός ηχομείωσης διπλών επιφανειών.....	40
4.10.5 – Μεθοδολογία υπολογισμού δείκτη ηχομείωσης διπλών επιφανειών.....	41
4.11 – Επιδράσεις στην ηχομείωση.....	41
4.11.1 – Επίδραση της απορρόφησης.....	41
4.11.2 – Επίδραση των ανοιγμάτων.....	42
Κεφάλαιο 5 – Πειραματικό μέρος.....	43
5.1 – Περιγραφή χώρου προς μελέτη και τροποποίηση.....	43
5.1.1 – Δομικά στοιχεία χώρου.....	43
5.1.2 – Χαρακτηριστικά δομικών υλικών.....	45
5.2 – Υπολογισμός ηχομείωσης χωρισμάτων.....	45
5.3 – Παρεμβάσεις ηχομόνωσης.....	49
5.3.1 – Γυψοσανίδες.....	49
5.3.2 – Κατασκευή με γυψοσανίδες.....	49
5.3.3 – Υπολογισμός ηχομείωσης διπλών χωρισμάτων με επένδυση.....	53
5.4 – Κατασκευή ηχομονωτικής πόρτας.....	56
5.5 – Εικόνες από τις κατασκευές στο δωμάτιο.....	58
5.6 – Υπολογισμός και ανάλυση των στάσιμων κυμάτων του χώρου.....	66
5.6.1 – Διαχωρισμός του ακουστικού φάσματος σε τέσσερις συχνοτικές περιοχές.....	67
5.6.2 – Υπολογισμός των τρόπων ταλάντωσης.....	67
5.6.3 – Πυκνότητα των τρόπων ταλάντωσης.....	69
5.6.4 – Ανάλυση αξονικών τρόπων ταλάντωσης.....	69
5.6.5 – Αποστάσεις και χρωματισμοί των τρόπων ταλάντωσης.....	70
5.6.6 – Το κριτήριο Bonello.....	71
5.7 – Μέτρηση της κρουστικής απόκρισης του χώρου.....	72
5.7.1 – Πριν και μετά την υλοποίηση των κατασκευών.....	72
5.7.2 – Μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.....	73

5.7.3 – Σύγκριση των αποτελεσμάτων.....	74
5.7.4 – Παρατηρήσεις και συμπεράσματα από τη μελέτη των αποτελεσμάτων.....	130
5.8 – Θεωρητικός υπολογισμός του χρόνου αντήχησης του χώρου.....	132
5.8.1 – Ζητούμενη απορρόφηση για τον επιθυμητό χρόνο αντήχησης....	135
5.9 – Τοποθέτηση ηχείων και θέσης ακρόασης.....	135
5.10 – Προτάσεις για μελλοντική βελτίωση του δωματίου ακρόασης.....	137
5.10.1 – Πρώτες ανακλάσεις.....	137
5.10.2 – Κατασκευή δεύτερης ηχομονωτικής πόρτας.....	137
Βιβλιογραφία.....	138

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΚΛΕΙΣΤΩΝ ΧΩΡΩΝ

1.1 – Εισαγωγή

Η διάδοση του ήχου σε κλειστούς χώρους έχει διαφορετική συμπεριφορά από ότι στους ανοικτούς. Στους ανοικτούς χώρους ο ήχος διαδίδεται απ' ευθείας από την πηγή στον δέκτη, ενώ σε κλειστούς ο ήχος εκτός από την απ' ευθείας διάδοση φθάνει στον δέκτη μετά από διαδοχικές ανακλάσεις στα τοιχώματα του χώρου, οι οποίες αλλοιώνουν την αρχική κυματομορφή του εκπεμπόμενου ήχου.

Η αντήχηση, φαινόμενο σύμφωνα με το οποίο το ηχητικό πεδίο ενός χώρου διατηρείται και μετά το σταμάτημα της ηχητικής πηγής, είναι το κύριο χαρακτηριστικό των κλειστών χώρων. Οι διαστάσεις του χώρου, η γεωμετρία του και τα υλικά με τα οποία είναι κατασκευασμένες όλες οι επιφάνειές του, είναι παράγοντες που επηρεάζουν την αντήχηση.

Για την ακουστική μελέτη τους, οι κλειστοί χώροι διακρίνονται σε μικρούς, μεγάλους και πολύ μεγάλους. Ένας χώρος θεωρείται μεγάλος όταν η μικρότερη διάστασή του είναι κατά δύο μήκη κύματος τουλάχιστον μεγαλύτερη από το μήκος κύματος της συχνότητας που εξετάζουμε. Ένας χώρος θεωρείται πολύ μεγάλος όταν οι αποστάσεις των επιφανειών που ορίζουν το χώρο είναι τόσο μεγάλες ώστε η απορρόφηση του ήχου από τον αέρα να είναι σημαντική. Ένα οικιακό δωμάτιο θεωρείται μικρό για συχνότητα 100Hz ενώ θεωρείται μεγάλο για συχνότητα 1000HZ. Ένα άλλο παράδειγμα μικρού χώρου είναι το ηχείο ενός μουσικού οργάνου. Παράδειγμα μεγάλων χώρων είναι μία αίθουσα διδασκαλίας, και πολύ μεγάλου χώρου ένα θέατρο ή μία μεγάλη εκκλησία.

Η μελέτη της ακουστικής συμπεριφοράς των κλειστών χώρων γίνεται με τρεις τρόπους:

α) Κυματική ακουστική: Με την μέθοδο αυτή μελετάμε τους μικρούς χώρους όπου τα κυματικά φαινόμενα και κυρίως οι συντονισμοί είναι πολύ έντονα.

β) Στατιστική ακουστική: Με την μέθοδο αυτή μελετάμε μεγάλους και πολύ μεγάλους χώρους, με την βοήθεια της στατιστικής ανάλυσης.

γ) Γεωμετρική ακουστική: Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται σε μεγάλους χώρους και οι υπολογισμοί γίνονται με την βοήθεια των τύπων της γεωμετρικής οπτικής.

1.2 – Χρόνος αντήχησης

Η βασικότερη ακουστική παράμετρος που σχετίζεται με την συμπεριφορά των κλειστών χώρων είναι ο χρόνος αντήχησης. «Ως χρόνος αντήχησης (T_{60}) ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται ώστε η στάθμη θορύβου (L_p) σε κάποιο σημείο να ελαττωθεί κατά 60dB, μετά το μηδενισμό του εκπεμπόμενου θορύβου από την πηγή.»

Ο χρόνος αντήχησης σχετίζεται με την ακουστική ποιότητα των κλειστών χώρων, εξαρτάται από τη συχνότητα του ήχου και για το λόγο αυτό ορίζεται για τις κεντρικές συχνότητες κάθε οκτάβας ή τριτοκτάβας. Ο χρόνος αντήχησης μετριέται σε sec. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή του χρόνου αντήχησης για μία δεδομένη συχνότητα είναι η απορρόφηση του χώρου και ο όγκος του χώρου.

Ένας προσεγγιστικός υπολογισμός του χρόνου αντήχησης μπορεί να γίνει με τη προσεγγιστική σχέση του Sabine, η οποία ισχύει ικανοποιητικά για χώρους με μικρή απορρόφηση.

$$T_{60} = 0.161V/A_s$$

1.1

όπου V ο όγκος του χώρου και A_s η απορρόφηση του δωματίου δίνεται από την σχέση $A_s = \alpha_1 s_1 + \alpha_2 s_2 + \alpha_3 s_3 + \dots + \alpha_n s_n$ όπου s το εμβαδόν κάθε επί μέρους επιφάνειας και όπου α ο αντίστοιχος συντελεστής απορρόφησης για την εν λόγω συχνότητα.

Σε δωμάτιο με μεγάλο χρόνο αντήχησης προκαλείται επικάλυψη των συλλαβών και η επικοινωνία γίνεται προβληματική. Αντίθετα, σε δωμάτιο με πολύ μικρό χρόνο αντήχησης το αποτέλεσμα είναι η μη καλή απόδοση κυρίως των μελωδικών ήχων. Η σωστή επιλογή του χρόνου αντήχησης βελτιώνει την ακουστική συμπεριφορά του χώρου. Ο ιδανικός χρόνος αντήχησης ενός χώρου είναι συναρτήσει του όγκου του, της συχνότητας των ήχων και του σκοπού για τον οποίο προορίζεται.

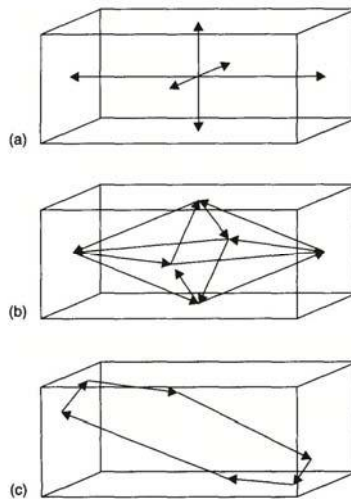
1.3 – Στάσιμα κύματα – Συντονισμοί χώρου

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

Ας υποθέσουμε δύο παράλληλους, ανακλαστικούς τοίχους άπειρων διαστάσεων. Όταν μία ηχητική πηγή διεγείρει το χώρο μεταξύ των δύο τοίχων, το σύστημα αυτό, τοίχος-αέρας-τοίχος, παράγει ένα συντονισμό στη συχνότητα $f_1 = c/2L$ όπου L η απόσταση μεταξύ των δύο τοίχων σε μέτρα και c η ταχύτητα του ήχου στον αέρα 343m/sec. Η θεμελιώδης συχνότητα f_1 θεωρείται η φυσική συχνότητα του χώρου μεταξύ των δύο ανακλαστικών τοίχων, ακολουθείται από μία σειρά τρόπων ταλάντωσης όπου κάθε ένας δημιουργεί το δικό του συντονισμό. Έτσι, παρόμοιοι συντονισμοί συμβαίνουν στις συχνότητες $2f_1, 3f_1, 4f_1$, κτλ. Προσθέτοντας δύο ζεύγη τοιχωμάτων κάθετα στο προηγούμενο, για να σχηματίσουμε ένα κλειστό ορθογώνιο χώρο, προσθέτουμε επίσης δύο ακόμα συστήματα συντονισμού, όπου το καθένα έχει τη δική του θεμελιώδη συχνότητα και σειρά τρόπων ταλάντωσης.

Στην πραγματικότητα, η κατάσταση είναι πολύ πιο περίπλοκη. Ως εδώ, μόνο οι αξονικοί τρόποι ταλάντωσης έχουν συζητηθεί. Ένας αξονικός τρόπος ταλάντωσης αντανακλάται από τις δύο απέναντι και παράλληλες επιφάνειες τοίχων, ένας εφαπτομενικός τρόπος ταλάντωσης αντανακλάται από τις τέσσερις επιφάνειες τοίχων και ένας πλάγιος τρόπος ταλάντωσης αντανακλάται και από τις έξι επιφάνειες του χώρου. Αν οι αξονικοί τρόποι αναφέρονται σε στάθμη 0dB, οι εφαπτομενικοί τρόποι βρίσκονται στα -3dB και οι πλάγιοι τρόποι στα -6dB. Στην πράξη, οι επιφάνειες των τοίχων θα επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό την ενέργεια σε κάθε συγκεκριμένο τρόπο ταλάντωσης.

Στο σχήμα 1 απεικονίζονται οι βασικές διαδρομές των τρόπων ταλάντωσης με την έννοια των ακτινών. Μια τέτοια είδους προσέγγιση καταρρίπτεται, με τις ακτίνες να χάνουν κάθε έννοια όταν μελετάμε την ακουστική συμπεριφορά ενός κλειστού χώρου του οποίου οι διαστάσεις του είναι της τάξης μεγέθους του μήκους κύματος του ήχου που ενεργεί σε αυτόν. Η ανάλυση της κυματικής συμπεριφοράς του ήχου είναι αυτή που εφαρμόζεται σε αυτούς τους χώρους.



Σχήμα 1. Απεικόνιση των αξονικών (a), εφαπτομενικών (b) και πλάγιων (c) τρόπων ταλάντωσης δωματίου με την έννοια των ακτίνων.

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

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

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

1.2

όπου f η συχνότητα του τρόπου ταλάντωσης, c η ταχύτητα του ήχου (343m/s), L_x L_y L_z οι διαστάσεις μήκος, πλάτος, ύψος του χώρου και n_x n_y n_z σταθερές που παίρνουν ανεξάρτητα η κάθε μία τις ακέραιες τιμές 0, 1, 2, 3,...κλπ. Ο συντελεστής n_x μας δείχνει την διάδοση του κύματος παράλληλα προς τον άξονα x και αντίστοιχα οι n_y , n_z παράλληλα προς τον άξονα y και άξονα z αντίστοιχα. Για τους αξονικούς τρόπους ταλάντωσης έχουμε $(n_x, 0, 0)$, $(0, n_y, 0)$, $(0, 0, n_z)$, για τους εφαπτομενικούς έχουμε $(n_x, n_y, 0)$, $(0, n_y, n_z)$, $(n_x, 0, n_z)$ και για τους πλάγιους έχουμε (n_x, n_y, n_z) .

Συνεπώς σε ένα χώρο σχήματος ορθογώνιου παραλληλεπιπέδου, στον οποίο βρίσκεται μια ενεργή ηχητική πηγή, ο χώρος μπορεί και αναπτύσσει μόνο ορισμένες συχνότητες, αυτές στις οποίες συντονίζεται, κάτι το οποίο είναι αντιληπτό όταν η πηγή τεθεί εκτός λειτουργίας μέχρι η ενέργεια των κυμάτων απορροφηθεί από τα τοιχώματα του χώρου. Ως αποτέλεσμα, οι υπόλοιπες συχνότητες να ακούγονται σχετικά «ξερές» συγκριτικά με τις συχνότητες συντονισμού του χώρου, λόγω του ότι δεν συνοδεύονται από τη διάρκεια εκείνη που δημιουργεί ο συντονισμός του χώρου. Κάτω από αυτές τις συνθήκες η ενέργεια του δωματίου θα έχει την τάση να συγκεντρώνεται σε μερικούς τρόπους ταλάντωσης, με αποτέλεσμα τον έντονο χρωματισμό του ήχου του δωματίου.

1.3.1 - Πυκνότητα τρόπων ταλάντωσης (Modal density)

Το πλήθος των συχνοτήτων συντονισμού ενός κλειστού χώρου αυξάνεται με την συχνότητα και τις διαστάσεις του χώρου. Για ένα χώρο σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου ο αριθμός των τρόπων ταλάντωσης, ανά ζώνη εύρους συχνοτήτων df , εκφράζεται από τη σχέση:

$$dN = \left[\frac{4\pi f^2 V}{c^3} + \frac{\pi f S}{2c^2} + \frac{L}{8c} \right] df \quad 1.3$$

όπου N το πλήθος των ιδιοσυχνοτήτων του χώρου, f η κεντρική συχνότητα σε Hz, V ο όγκος του δωματίου σε m^3 , S το ολικό εμβαδό της επιφάνειας του δωματίου σε m^2 , $S=2(L_x L_y + L_y L_z + L_x L_z)$, L το συνολικό μήκος των ακμών του δωματίου σε m , $L=4(L_x + L_y + L_z)$, c η ταχύτητα του ήχου στον αέρα σε m/s .

Όταν η συχνότητα είναι μεγάλη η σχέση 1.3 ισχύει όχι μόνο για χώρους σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου αλλά και για χώρους οποιουδήποτε σχήματος. Ολοκληρώνοντας την σχέση 1.3 προκύπτει η σχέση 1.4 βάση της οποίας υπολογίζεται ο αριθμός των τρόπων ταλάντωσης ενός χώρου από 0Hz έως τη συχνότητα f .

$$N = \frac{4\pi f^3 V}{3c^3} + \frac{\pi f^2 S}{4c^2} + \frac{fL}{8c} \quad 1.4$$

Ομοίως, για τις υψηλές συχνότητες η σχέση 1.4 εφαρμόζεται ανεξαρτήτως του σχήματος του χώρου.

1.3.2 - Εξασθένηση των τρόπων ταλάντωσης (Mode decay rate)

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

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

$$d = \frac{60}{RT_{60}} \quad 1.5$$

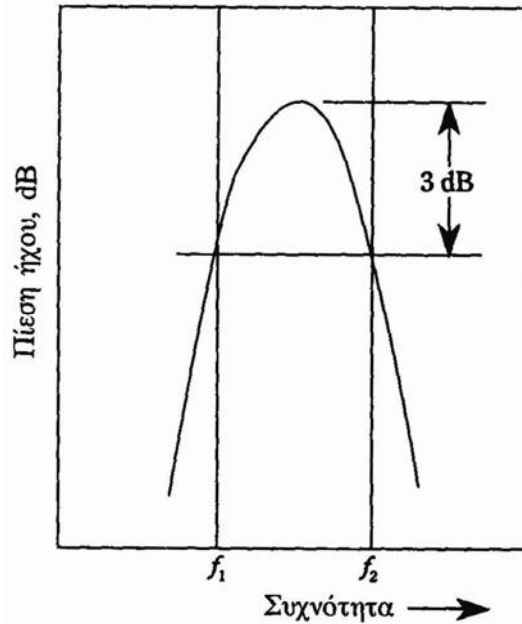
όπου d ο ρυθμός μείωσης σε dB/sec και RT_{60} ο χρόνος αντήχησης του χώρου. Ο ρυθμός πτώσης των τρόπων ταλάντωσης μοιάζει με το χρόνο αντήχησης αλλά στην πραγματικότητα είναι δύο διαφορετικά ποσά.

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

1.3.3 - Πλάτος ζώνης συχνοτήτων των τρόπων ταλάντωσης (Bandwidth)

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

Κάθε τρόπος ταλάντωσης έχει μια καμπύλη συντονισμού, μικρού, αλλά πεπερασμένου πλάτους ζώνης συχνοτήτων όπως φαίνεται στο σχήμα 2, καθορίζοντας εν μέρη πόσο αντιληπτοί είναι οι τρόποι ταλάντωσης.



Σχήμα 2. Πλάτος ζώνης συχνοτήτων τρόπων ταλάντωσης.

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

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

1.6

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

Όσο μικρότερος είναι ο χρόνος αντήχησης ή όσο μεγαλύτερη είναι η απορρόφηση, για τη συγκεκριμένη συχνότητα, τόσο μεγαλύτερο είναι το εύρος ζώνης του συντονισμού. Αυτό σημαίνει ότι γειτονικοί τρόποι δόνησης έχουν την τάση να υπερκαλύπτονται σε δωμάτιο με μικρό χρόνο αντήχησης. Έτσι, ανάλογα με το πλήθος των τρόπων ταλάντωσης που διεγείρονται και το εύρος ζώνης των συχνοτήτων συντονισμού, μία συχνότητα από μία πηγή μπορεί να διεγείρει μόνο ένα τρόπο δόνησης ή περισσότερους. Αν μία συχνότητα διεγείρει μόνο έναν τρόπο δόνησης, τότε οι συχνοτικές διακυμάνσεις θα είναι πολύ έντονες. Αν όμως αυτή η μία

συχνότητα διεγείρει περισσότερους από έναν γειτονικούς τρόπους δόνησης, τότε οι συχνοτικές διακυμάνσεις θα μειωθούν.

Αφού μπορούν να διεγερθούν περισσότερες συχνότητες συντονισμού, σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο του χώρου μπορεί να ενισχύονται κάποιες συχνότητες από αυτές (κοιλία) και να αποσβένονται άλλες (δεσμός). Ο συνδυασμός των παραπάνω είναι συγκεκριμένος και διαφορετικός ανάλογα με τη θέση μας στο χώρο. Κάτι τέτοιο μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικό χρωματισμό του ήχου ανάλογα με τη θέση του ακροατή, δηλαδή έντονες διακυμάνσεις και του ηχοχρώματος, εκτός της στάθμης, μέσα στο χώρο.

Ένας άλλος λόγος χρωματισμού του ήχου στις χαμηλότερες συχνότητες προέρχεται από την ιδιότητα των αξονικών στάσιμων κυμάτων να χάνουν μικρότερο μέρος της ενέργειας τους από ότι τα υπόλοιπα, λόγω λιγότερων ανακλάσεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να φθίνουν πιο αργά από ότι τα εφαπτομενικά, τα πλάγια και πολύ περισσότερο από τις συχνότητες που αντιστοιχούν στο διάχυτο πεδίο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να επικρατούν τα αξονικά στάσιμα κύματα σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες συχνότητες και να χρωματίζουν τον ήχο.

Το πλήθος των κανονικών τρόπων ταλάντωσης ανά σταθερό εύρος συχνοτήτων αυξάνει με τη συχνότητα. Αυτό σημαίνει, ότι στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων οι συχνότητες συντονισμού απέχουν πολύ μεταξύ τους, ενώ σε υψηλότερες συχνότητες πλησιάζουν μεταξύ τους. Από μια συγκεκριμένη συχνότητα και πάνω δημιουργούνται μάλιστα τόσο πολλοί συντονισμοί ανά οκτάβα, που είναι δύσκολο να τους διακρίνουμε. Κατά κανόνα οι συντονισμοί τείνουν να είναι προβληματικοί μέχρι περίπου τα 200Hz – 300Hz.

1.3.4 - Ακουστική μελέτη κλειστών χώρων

Στους μικρούς κλειστούς χώρους, επικρατεί έντονα το κυματικό φαινόμενο της δημιουργίας στάσιμων κυμάτων. Εδώ εφαρμόζονται οι αρχές της κυματικής ακουστικής όπου μελετάται η κυματική φύση του ήχου. Ο διαχωρισμός μεταξύ μεγάλου και μικρού κλειστού χώρου γίνεται με βάση τη συχνότητα αποκοπής f_c (cut-off frequency) και ορίζεται ως η συχνότητα πάνω από την οποία δημιουργούνται ένας μεγάλος αριθμός στάσιμων κυμάτων στο χώρο, ο οποίος συμπεριφέρεται ομοιόμορφα σε όλες τις συχνότητες. Η συχνότητα αποκοπής προκύπτει από τον τύπο:

$$f_c = K \sqrt{\frac{RT_{60}}{V}} \quad 1.7$$

όπου $K=2000$ είναι σταθερά, RT_{60} ο χρόνος αντήχησης του χώρου (sec) και V ο όγκος του χώρου (m^3). Το διάγραμμα του σχήματος 3 το οποίο ονομάζεται «ελεγκτής της σταθερής κατάστασης της ακουστικής απόκρισης δωματίου», διαχωρίζει τη συμπεριφορά του χώρου σε σχέση με τη συχνότητα.

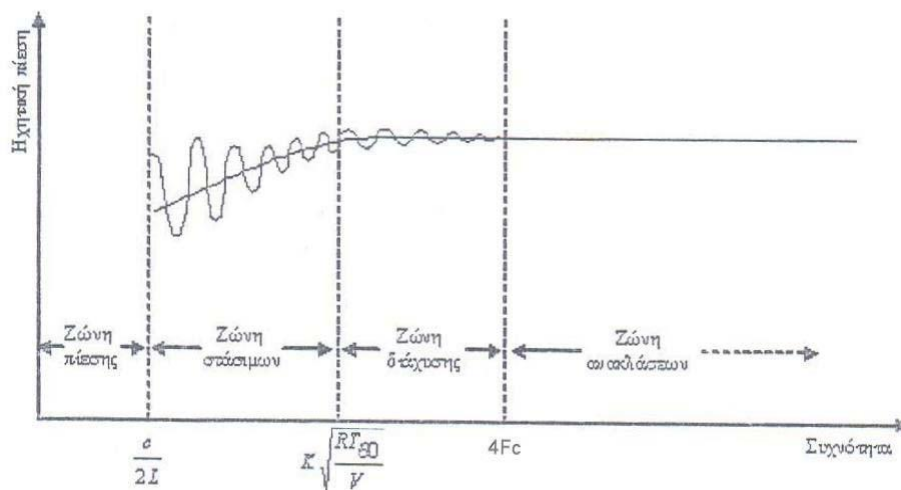
Σύμφωνα με το διάγραμμα του σχήματος 3 το ακουστικό φάσμα διαχωρίζεται σε τέσσερις συχνοτικές περιοχές:

- 1) Ζώνης Πίεσης (pressure zone/cut off region): από 0Hz μέχρι τη συχνότητα

$$f = \frac{c}{2L} \quad 1.8$$

όπου L η μεγαλύτερη διάσταση του χώρου. Πρόκειται για περιοχή πολύ χαμηλών συχνοτήτων που βρίσκεται κάτω από την κατώτατη συχνότητα συντονισμού του χώρου f , δηλαδή στην περιοχή όπου οι διαστάσεις του χώρου είναι μικρότερες από το μισό μήκος κύματος του ήχου. Οι συχνότητες της περιοχής αυτής μπορούν να υπάρχουν στο χώρο αλλά δεν ενισχύονται από τους συντονισμούς του χώρου καθώς στη περιοχή αυτή δεν υπάρχουν συντονισμοί.

- 2) Ζώνη των στάσιμων κυμάτων (modal zone): από τη συχνότητα f μέχρι την συχνότητα αποκοπής f_c . Είναι η περιοχή όπου το μήκος κύματος του ήχου είναι της τάξης μεγέθους του χώρου, εκεί εμφανίζονται τα στάσιμα κύματα. Στην περιοχή αυτή εφαρμόζουμε τις αρχές της κυματικής ακουστικής.
- 3) Ζώνη διάχυσης (diffusion zone): από τη συχνότητα αποκοπής f_c μέχρι τη συχνότητα $4f_c$. Είναι η περιοχή μετάβασης μεταξύ της ζώνης στάσιμων κυμάτων και της ζώνης ανακλάσεων. Πρόκειται για μια δύσκολη συχνοτική περιοχή, επειδή ο χώρος θεωρείται αρκετά μικρός για τη χρήση της γεωμετρικής ακουστικής και της στατιστικής εφόσον εμφανίζονται ακόμη έντονοι συντονισμοί, αλλά και αρκετά μεγάλος για την εφαρμογή των αρχών της κυματικής ακουστικής, σύμφωνα με το μήκος κύματος.
- 4) Ζώνη ανακλάσεων (specular reflection zone): μεγαλύτερη ή ίση της συχνότητας $4f_c$. Σε αυτή τη περιοχή τα κυματικά φαινόμενα εξασθενούν καθώς το μήκος κύματος του ήχου είναι πολύ μικρό σε σχέση με τις διαστάσεις του χώρου. Επικρατούν οι τυχαίες ανακλάσεις με τη γωνία πρόσπτωσης να είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης, ο ήχος διαδίδεται σε ακτίνες και εφαρμόζονται πλέον οι αρχές της γεωμετρικής ακουστικής.



Σχήμα 3. Ελεγκτής της σταθερής κατάστασης της ακουστικής απόκρισης δωματίου.

1.4 – Αποστάσεις και χρωματισμοί τρόπων ταλάντωσης

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

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

Κατά τον Bonello ο οποίος εξετάζει και τους τρεις τύπους τρόπων ταλάντωσης, αναφέρει ότι είναι επιθυμητό να έχουμε όλες τις συχνότητες των τρόπων ταλάντωσης σε μια κρίσιμη ζώνη τουλάχιστον 5% μακριά από την συχνότητά τους. Έτσι βλέπουμε ότι η έννοια του Gilford στηριζόταν στο πόσο μακριά σε συχνότητα πρέπει να βρίσκονται μεταξύ τους οι αξονικοί τρόποι ταλάντωσης για να αποφύγουμε τα προβλήματα που προκύπτουν από ανεξάρτητη και μη συζευγμένη δράση των τρόπων ταλάντωσης. Η προσπάθεια του Bonello έχει να κάνει με διαχωρισμούς για να αποφεύγονται φαινόμενα εκφυλισμού (σύμπτωσης).

Μια συνηθισμένη πηγή διαχωρισμού είναι η μηδενική απόσταση μεταξύ συχνοτήτων των τρόπων ταλάντωσης. Μηδενική απόσταση σημαίνει ότι οι συχνότητες δύο τρόπων ταλάντωσης συμπίπτουν, και αυτοί οι εκφυλισμοί έχουν την τάση να υπερτονίζουν τις συνιστώσες των σημάτων στην συχνότητα αυτή.

1.5 – Τρόποι ελέγχου των συντονισμών

Όταν σχεδιάζουμε ένα χώρο, στόχος μας είναι η δημιουργία ενός ομοιόμορφου ηχητικού πεδίου το οποίο επιτυγχάνεται με τη βέλτιστη ισοκατανομή των τρόπων ταλάντωσης του δωματίου. Το σχήμα και οι διαστάσεις του χώρου είναι στοιχεία που βοηθούν στην επίτευξη του στόχου αυτού, ομαλοποιώντας τα όποια προβλήματα του χώρου, χωρίς βέβαια να τα εξαλείφουν. Σε έναν καλοσχεδιασμένο χώρο οι συχνότητες συντονισμού θα πρέπει να κατανέμονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να μην προκαλούν υπερβολική ενίσχυση ή εξασθένιση κάποιου τμήματος του φάσματος.

Αν και δεν είναι πάντα δυνατόν να προσδιορίσει κανείς με μαθηματικό τρόπο το καλύτερο σχήμα και τις βέλτιστες διαστάσεις ενός χώρου βασιζόμενος στα στάσιμα κύματα, η φυσική ιδέα οδηγεί σε κάποια γενικά συμπεράσματα για τη δημιουργία ενός χώρου με καλά ακουστικά χαρακτηριστικά. Το βασικό συμπέρασμα είναι ότι για να επιτύχει κανείς μια ομοιόμορφη κατανομή στις πιθανές συχνότητες συντονισμού και για να δημιουργήσει την εμφάνιση όσο το δυνατόν περισσότερων από αυτές, οι κύριες διαστάσεις του χώρου δεν θα πρέπει να είναι ακέραια πολλαπλάσια μεταξύ τους. Μάλιστα, ένας χώρος με ακανόνιστο σχήμα θα δημιουργήσει καλύτερη διάχυση από έναν χώρο με συμμετρία. Γι' αυτό ενδείκνυται η κατασκευή ακανόνιστων και μη συμμετρικών χώρων, έτσι ώστε να διασφαλίσουμε ένα φάσμα με συχνότητες συντονισμών όσο το δυνατόν πιο διάσπαρτες και

ισοκατανεμημένες. Πρέπει, βέβαια, να σημειώσουμε ότι η εμφάνιση στάσιμων κυμάτων ενυπάρχει σε κάθε χώρο. Κατασκευάζοντας έναν χώρο όπου οι τοίχοι δεν είναι παράλληλοι δεν αποφεύγουμε τη δημιουργία τους, απλώς μεταβάλλουμε το φάσμα τους, καθιστώντας μάλιστα πιο δύσκολο τον υπολογισμό των συχνοτήτων εμφάνισής τους. Το ακουστικό όφελος από τη χρήση χώρων με ακανόνιστο σχήμα είναι αμφιλεγόμενο. Η στρέβλωση δύο ή και περισσότερων τοίχων του δωματίου είναι μόνο ένας τρόπος βελτίωσης της γενικής διάχυσης του δωματίου, με το αποτέλεσμα να είναι μικρό.

Τα ορθογώνια δωμάτια είναι αυτά που επικρατούν. Βασικό στοιχείο της ακουστικής τους είναι η αναλογία των διαστάσεών τους. Αρκετές μελέτες έχουν γίνει για τον προσδιορισμό των βέλτιστων αναλογιών ενός χώρου και υπάρχει μια σειρά από τέτοιες προτάσεις. Στον πίνακα 1 συνοψίζονται οι καλύτερες αναλογίες για ορθογώνιους χώρους, που προτείνουν οι ερευνητές.

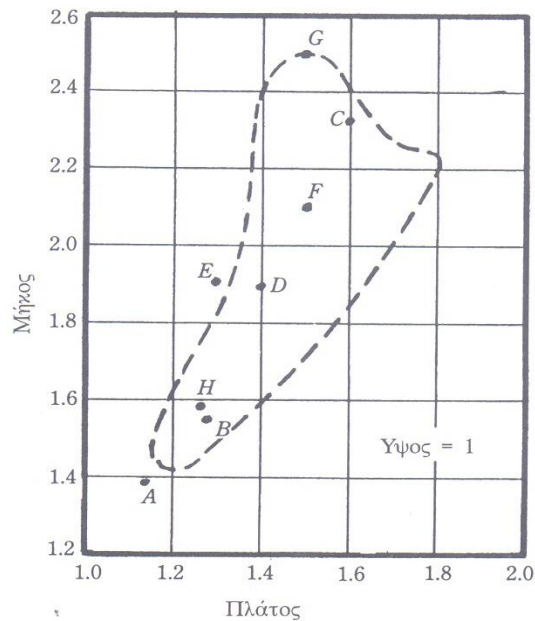
ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ		ΥΨΟΣ	ΠΛΑΤΟΣ	ΜΗΚΟΣ	Μέσα στην
					περιοχή Bolt;
SEPMeyer	A	1.00	1.14	1.39	OXI
	B	1.00	1.28	1.54	NAI
	C	1.00	1.60	2.33	NAI
LOUDEN	D	1.00	1.40	1.90	NAI
	E	1.00	1.30	1.90	OXI
	F	1.00	1.50	2.50	NAI
VOLKMAN	G	1.00	1.50	2.50	NAI
BONER	H	1.00	1.26	1.59	NAI

Πίνακας 1. Προτάσεις για βέλτιστες αναλογίες ενός χώρου.

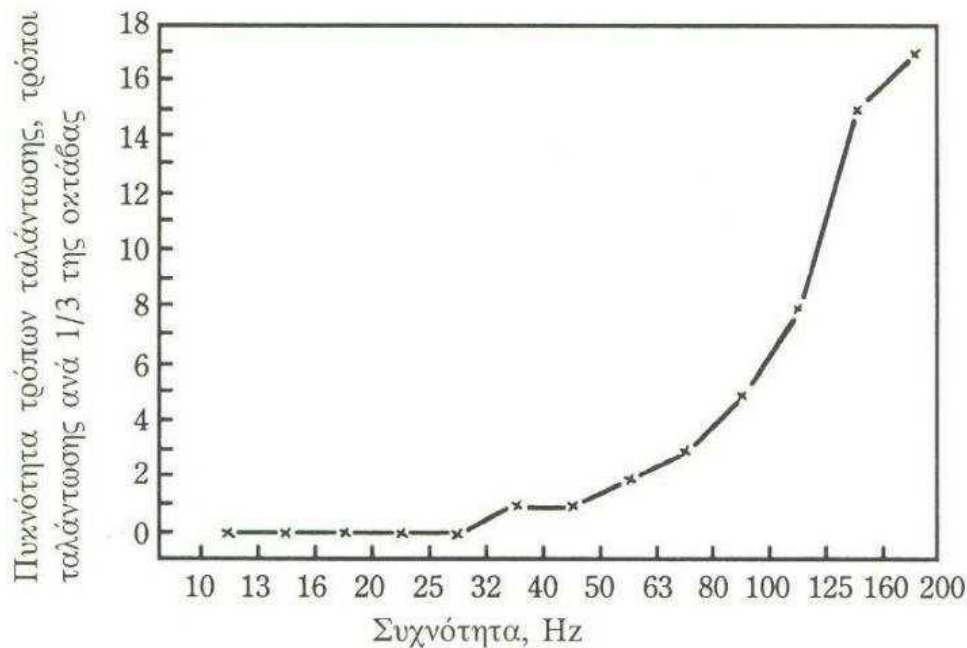
Ο Bolt δίνει μια περιοχή αναλογιών δωματίου που παράγουν τις απαλότερες χαρακτηριστικές καμπύλες δωματίου σε χαμηλές συχνότητες σε μικρά ορθογώνια δωμάτια (Σχήμα 4). Η περιοχή μέσα από τις διακεκομμένες γραμμές ονομάζεται «περιοχή Bolt». Αρχικά βρίσκουμε τη μία διάσταση στον άξονα και στην συνέχεια την διάσταση που μένει στον άλλο άξονα. Εάν το σημείο ένωσης των δύο αριθμών βρίσκεται εντός της «περιοχής Bolt» τότε οι διαστάσεις του δωματίου θεωρούνται ιδανικές.

Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι σε μερικές περιπτώσεις είναι πιθανό οι διαστάσεις ενός χώρου να είναι ιδανικές σύμφωνα με το σχήμα αλλά να μην συμφωνούν με το κριτήριο Bonello το οποίο περιγράφεται παρακάτω. Ο Bonello πρότεινε μια νέα μέθοδο προσδιορισμού των αναλογιών ορθογώνιου δωματίου. Με τη μέθοδο αυτή διαιρεί το κάτω άκρο του ακουστικού φάσματος σε ζώνες με πλάτος τριτοκτάβας και θεωρεί το πλήθος των τρόπων ταλάντωσης σε κάθε ζώνη κάτω από 200Hz. Οι ζώνες της τριτοκτάβας επιλέγονται επειδή κατά προσέγγιση είναι οι κρίσιμες ζώνες του ανθρώπινου αυτιού. Κάθε 1/3 της οκτάβας, για να ικανοποιηθεί το κριτήριο Bonello, πρέπει να έχει περισσότερους τρόπους ταλάντωσης από το προηγούμενο, ή τουλάχιστον το ίδιο πλήθος. Δεν υπάρχει ανοχή για συμπτώσεις

τρόπων ταλάντωσης εκτός και αν στην ζώνη υπάρχουν τουλάχιστον 5 τρόποι ταλάντωσης. (Σχήμα 5)



Σχήμα 4. Διάγραμμα Bolt για προτεινόμενες βέλτιστες αναλογίες διαστάσεων δωματίου.



Σχήμα 5. Παράμετροι του κριτηρίου Bonello.

Το ηχητικό πεδίο ενός κλειστού χώρου διαμορφώνεται από τα κυματικά φαινόμενα που δημιουργούνται σε αυτόν, με κυρίαρχο τα στάσιμα κύματα, φαινόμενο που επιδρά αρνητικά στην ακουστική ποιότητα του χώρου, ενισχύοντας συγκεκριμένες περιοχές του ακουστικού φάσματος οδηγώντας σε μια ακανόνιστη απόκριση του χώρου, «χρωματίζοντας» τον ήχο. Με την προσθήκη

ηχοαπορροφητικών υλικών χαμηλών συχνοτήτων (Bass Traps) μπορούμε να μειώσουμε τη στάθμη κάποιου τρόπου ταλάντωσης χρησιμοποιώντας κάποιο απορροφητικό υλικό για τη συχνότητα που μας ενδιαφέρει. Αυτό θα πρέπει να τοποθετηθεί σε επιφάνειες κοντά στις οποίες η πίεση δεδομένου τρόπου ταλάντωσης είναι μεγάλη, αν θέλουμε να είναι αποτελεσματικό στην απορρόφηση αυτού του τρόπου ταλάντωσης. Εφόσον όλοι οι τρόποι ταλάντωσης έχουν μέγιστα στις γωνίες του δωματίου, αυτή είναι και η συνήθης επιλογή.

Αυξάνοντας το εύρος της ζώνης κάθε τρόπου δόνησης μπορούμε να πετύχουμε καλύτερη επικάλυψη των γειτονικών συντονισμών, πράγμα επιθυμητό, ώστε οι διαφορές στις στάθμες των διαφόρων συχνοτήτων να μειωθούν και να λάβουμε ένα πιο ομαλό και ισοκατανεμημένο συχνοτικό αποτέλεσμα, χωρίς ενίσχυση συγκεκριμένων συχνοτικών περιοχών, δηλαδή χρωματισμό. Αυτό το επιτυγχάνουμε ανάλογα με τη συχνοτική περιοχή με αύξηση της απορρόφησης του χώρου.

1.6 – Απορρόφηση και ηχοαπορροφητές

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

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

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

$$a_a = \frac{W_a}{W_i} \tag{1.9}$$

Ο συντελεστής απορρόφησης μιας επιφάνειας, A , ορίζεται ως εξής:

$$A = s a \tag{1.10}$$

όπου s το εμβαδό της επιφάνειας και a ο συντελεστής απορρόφησης, μετράται σε Sabine.

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

$$\bar{a} = \frac{a_1 s_1 + a_2 s_2 + \dots + a_n s_n}{s_1 + s_2 + \dots + s_n} \tag{1.11}$$

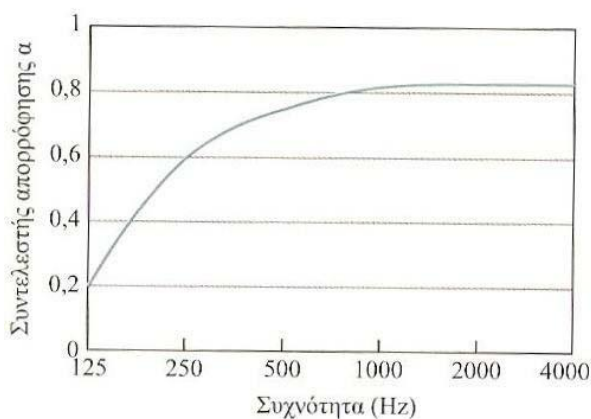
όπου $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ οι συντελεστές απορρόφησης κάθε υλικού και s_1, s_2, \dots, s_n το εμβαδόν κάθε επιμέρους επιφάνειας.

Ο συντελεστής απορρόφησης ενός υλικού μεταβάλλεται ανάλογα με τη συχνότητα και τη γωνία πρόσπτωσης του ηχητικού κύματος πάνω στην επιφάνεια, ορίζεται για την κεντρική συχνότητα κάθε οκτάβας ή τριτοκτάβας. Τρεις είναι οι βασικές κατηγορίες ηχοαπορροφητών. Κάθε κατηγορία στηρίζει την απορροφητική της ικανότητα σε διαφορετικό μηχανισμό λειτουργίας, δρώντας σε διαφορετικό εύρος συχνοτήτων, έχοντας βέβαια ως βασική αρχή λειτουργίας την μετατροπή της ηχητικής ενέργειας σε θερμότητα. Είναι τα πορώδη υλικά (υψηλές και μεσαίες συχνότητες), απορροφητές τύπου μεμβράνης (χαμηλές συχνότητες) και οι συνηχητές (χαμηλές και μεσαίες συχνότητες).

1.6.1 – Πορώδη υλικά

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

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



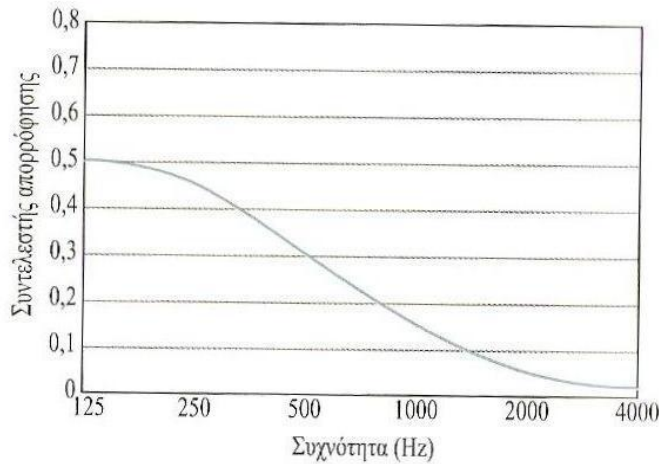
Σχήμα 6. Συντελεστής απορρόφησης πορώδους υλικού.

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

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

1.6.2 – Απορροφητές τύπου μεμβράνης

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



Σχήμα 7. Συντελεστής απορρόφησης απορροφητικού υλικού τύπου μεμβράνης.

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

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

1.12

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

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

1.6.3 – Συνηχητής Helmholtz

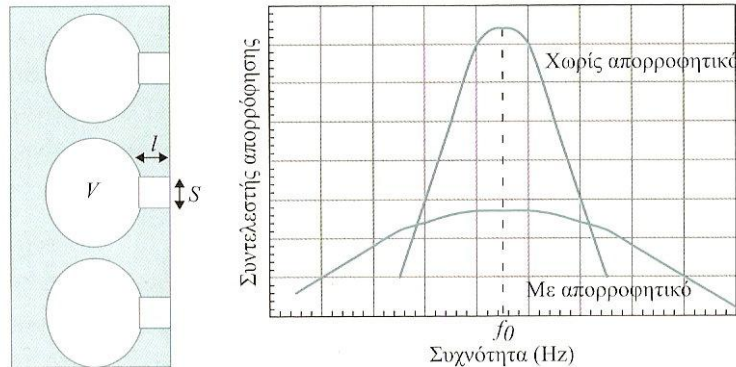
Ο συνηχητής είναι στην πραγματικότητα μια κοιλότητα στο υλικό. Καθώς ο ήχος προσπίπτει στο στόμιο της κοιλότητας διεγείρει τον αέρα που βρίσκεται στο συντονιστή και η απώλεια ενέργειας οφείλεται και πάλι στις αποσβέσεις των ταλαντώσεων λόγω τριβών των σωματιδίων του αέρα. Ο συντελεστής απορρόφησης των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

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{s}{Vl}}$$

1.13

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

Εισάγοντας απορροφητικό υλικό στο εσωτερικό των κοιλοτήτων διευρύνεται το πλάτος της καμπύλης συντονισμού ενώ ταυτόχρονα μειώνεται το μέγιστο αυτής. Ο συντονιστής ενδείκνυται για χώρους όπου υπάρχουν τόνοι χαμηλής συχνότητας.



Σχήμα 8. Συνηχητής.

Οι διάτρητες επιφάνειες απορρόφησης, είναι μία μορφή συνηχητών που χρησιμοποιούνται για την απορρόφηση του ήχου. Μπορεί να έχουν σχήμα κυκλικό ή σχήμα σχισμών όπου κάθε τρύπα δρα σαν το λαιμό ενός συντονιστή Helmholtz. Η συχνότητα συντονισμού των διάτρητων επιφανειών με κυκλικές οπές δίνεται από την σχέση:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{L(1-\delta)}} \quad 1.14$$

όπου P το ποσοστό διάτρησης, L η απόσταση της επιφάνειας από τον τοίχο, l το μήκος του λαιμού κάθε τρύπας σε μέτρα (το πάχος της επιφάνειας), $\delta=0.8d$ και d η διάμετρος του λαιμού.

Στην περίπτωση σχισμών η συχνότητα συντονισμού δίνεται από τη σχέση:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{L(1+Kb)}} \quad 1.15$$

όπου

$$K = \frac{1}{\pi} + \frac{2}{\pi} \ln \frac{2a}{b} \quad 1.16$$

για την περίπτωση σχισμών πεπερασμένου μήκους, P είναι το ποσοστό διάτρησης και δίνεται από τη σχέση $P=b/B$, a είναι το μήκος της σχισμής και b το πλάτος της σχισμής.

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

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

1.7 – Διάχυση και διαχυτές

Ας υποθέσουμε ένα κλειστό χώρο τον οποίο περικλείει ηχητική ενέργεια αλλά η πηγή έχει μηδενιστεί. Σε υψηλές συχνότητες, όπου το μήκος κύματος είναι μικρό, θεωρούμε ότι ο ήχος αποτελείται από επίπεδα κύματα που διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις με ίδια πιθανότητα. Αν το μέσο τετράγωνο της πίεσης για κάθε επίπεδο κύμα έχει την ίδια μέση τιμή, ανεξάρτητα από την κατεύθυνση, τότε ο ήχος ονομάζεται διάχυτος. Κατά τον Randal όταν το ηχητικό πεδίο είναι διάχυτο τότε αυτό έχει τις παρακάτω ιδιότητες:

- Ο ρυθμός μείωσης της ηχητικής ενέργειας όταν μηδενιστεί η πηγή είναι ομαλός.
- Ο ρυθμός μείωσης είναι καθαρά εκθετικός (ευθεία γραμμή σε λογαριθμική κλίμακα).
- Ο χρόνος αντήχησης είναι ο ίδιος σε όλες τις θέσεις του χώρου.
- Ο ρυθμός μείωσης του ήχου είναι ο ίδιος ανεξάρτητα από την συχνότητα.
- Ο ρυθμός μείωσης δεν εξαρτάται από την κατευθυντικότητα του χρησιμοποιούμενου μικροφώνου.
- Οι αποκλίσεις από την μόνιμη (steady state) κατάσταση σε διαφορετικές συχνότητες είναι αμελητέες.

Ένα πεδίο διάχυτο 100% είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί, ωστόσο μπορεί να προσεγγιστεί με ικανοποιητική ακρίβεια αν στο χώρο τοποθετήσουμε ειδικές επιφάνειες που διαχέουν τον ήχο. Οι ακουστικοί διαχυτές είναι εξειδικευμένες κατασκευές που διαθέτουν ακανόνιστες επιφάνειες, με καθορισμένο βάθος που σχετίζεται με το μήκος κύματος του ήχου, ώστε να διασπείρουν την ανακλώμενη ηχητική ενέργεια σε ευρύ φάσμα διαφορετικών γωνιών. Με αυτό το τρόπο αναστέλλεται η επίδραση των πρώτων ανακλάσεων, οι οποίες ανακατευθύνονται για να συντηχθούν με τις μεταγενέστερες ανακλάσεις συμβάλλοντας κι αυτές στο πεδίο αντήχησης. Αυτοσχέδιοι τύποι διαχυτών αποτελούν φυτά, διακοσμητικά, βιβλία και δίσκοι στοιχισμένα ασύμμετρα σε ράφια βιβλιοθήκης, όμως οι εξειδικευμένες διατάξεις επιτυγχάνουν μεγαλύτερη και ευκολότερα ρυθμιζόμενη διάχυση. Αναστέλλοντας και καθυστερώντας λοιπόν την εκδήλωση των πρώτων ανακλάσεων, η απορρόφηση και η διάχυση συντελούν στην εικονική αύξηση των αντιλαμβανόμενων διαστάσεων του χώρου ακρόασης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΔΩΜΑΤΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ – AUDIO CONTROL ROOMS

2.1 – Εισαγωγή

Ένα τυπικό στούντιο ηχογραφήσεων αποτελείται από ένα δωμάτιο ηχογραφήσεων (recording room) όπου εκεί πραγματοποιούνται οι ηχογραφήσεις των μουσικών οργάνων, φωνής κτλ., και από ένα δωμάτιο ελέγχου (control room) όπου εκεί στεγάζεται ο εξοπλισμός για την ηχογράφιση, την δρομολόγηση και την επεξεργασία του ήχου. Στα μεγαλύτερα στούντιο υπάρχουν και άλλοι χώροι όπως είναι οι θάλαμοι απομόνωσης (isolation booths), όπου εκεί ηχογραφούνται συνήθως τα κρουστά, οι κιθάρες και οι φωνές ξεχωριστά.

Έχοντας ως στόχο το control room να αποτελεί ένα ιδανικό περιβάλλον αναπαραγωγής και ακρόασης του ήχου, θα πρέπει να έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί σωστά σε ό,τι αφορά το σχήμα, τις διαστάσεις, την τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών υλικών και την τοποθέτηση των ηχείων. Το σχήμα του δωματίου και οι διαστάσεις παίζουν σπουδαίο ρόλο στην κατανομή των συντονισμών του δωματίου και η σωστή κατανομή τους στο χώρο αποτελεί έναν από τους βασικότερους παράγοντες στον σχεδιασμό ενός δωματίου ελέγχου.

Ένα μικρό δωμάτιο ελέγχου θεωρείται ένας χώρος με διαστάσεις 24-40m³. Άρα αν ένας τέτοιος χώρος χρησιμοποιηθεί ως control room, πρέπει πρώτα να ληφθούν υπόψη οι παρακάτω παράγοντες.

Οι ανακλάσεις που επιστρέφουν από τους τοίχους και τις επιφάνειες του εξοπλισμού διανύουν μικρότερη απόσταση από ότι σε ένα μεγαλύτερο δωμάτιο, άρα φτάνουν πιο γρήγορα στον ακροατή. Συνεπώς οι ανακλάσεις αυτές έχοντας μεγάλη ενέργεια, τείνουν να αναμειγνύονται με τον απευθείας ήχο (direct sound), να «χρωματίζουν» τον ήχο των ηχείων και να καταστρέφουν την στερεοφωνική εικόνα. Οι διαχυτές και οι απορροφητές είναι τα βασικά υλικά με τα οποία θα διορθωθούν αυτά τα προβλήματα. Σε μικρούς χώρους είναι δύσκολη η τοποθέτηση τέτοιων υλικών μιας και οι επιφάνειες είναι περιορισμένες και τα προβλήματα, από ακουστικής πλευράς, είναι δυσκολότερο να αντιμετωπιστούν. Σε μικρά δωμάτια ενδείκνυται η χρήση απορροφητών μιας και οι διαχυτές διατηρούν την στερεοφωνική εικόνα σε μεγαλύτερη περιοχή και επιστρέφουν μεγάλο ποσοστό ενέργειας στην θέση ακρόασης, γεγονός το οποίο «χρωματίζει» τον ήχο των ηχείων. Η επαρκής απορρόφηση με την βοήθεια απορροφητικών υλικών, συμβάλει στην εξασθένηση των συντονισμών του δωματίου και στην διεύρυνση της συχνοτικής τους εξάπλωσης. Αυτά τα φαινόμενα οδηγούν σε μικρότερο χρωματισμό του ήχου.

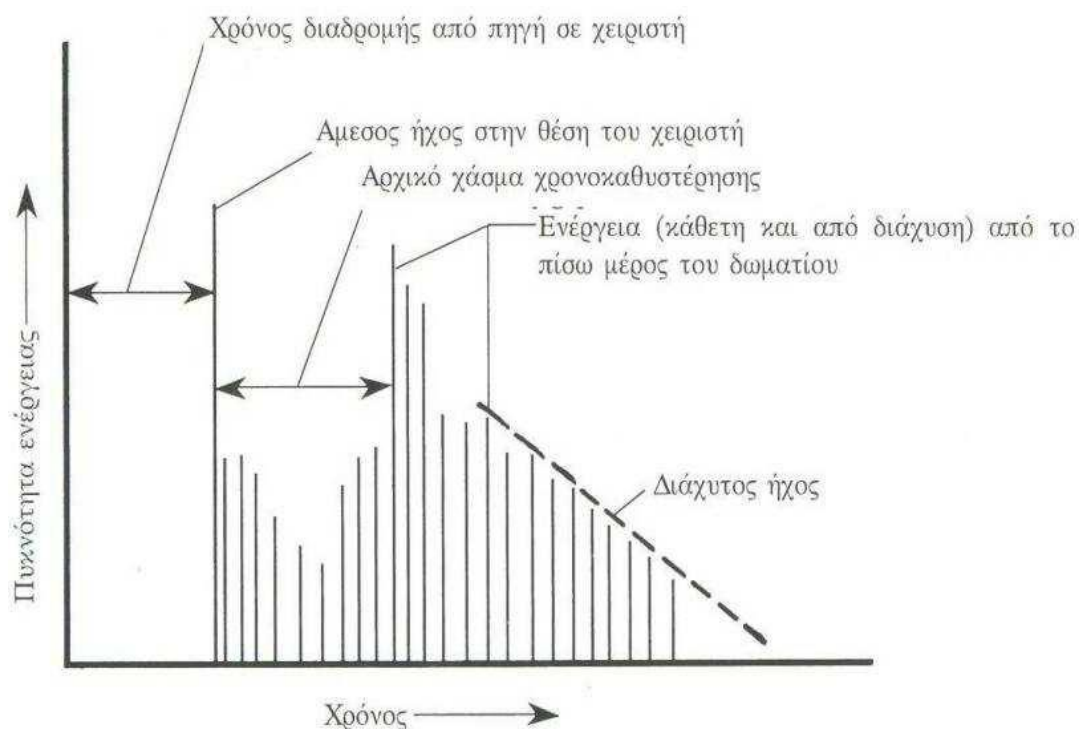
2.2 - Η ακουστική ενός δωματίου ελέγχου

2.2.1 – Αρχικό χάσμα χρονοκαθυστέρησης (Initial Time Gap)

Το αρχικό χάσμα χρονοκαθυστέρησης αναφέρεται στη διαφορά χρόνου άφιξης του απευθείας ήχου της πηγής και στο χρόνο άφιξης των πρώτων ανακλάσεων. Αίθουσες που χαρακτηρίζονται με καλή ακουστική συμπεριφορά διαθέτουν ένα συγκεκριμένο χάσμα χρονοκαθυστέρησης ίσο με 20ms περίπου.

Σε ένα συμβατικό control room, το ITG δεν είναι ακουστό επειδή καλύπτεται από τις πρώτες ανακλάσεις στο δωμάτιο. Ο τρόπος για να γίνει ακουστό το χάσμα χρονοκαθυστέρησης είναι με την εξάλειψη ή την ελάττωση των πρώτων ανακλάσεων στον χώρο. Αυτή η διευκρίνιση του προβλήματος οδήγησε στη λύση της τοποθέτησης

απορροφητικού υλικού στις επιφάνειες γύρω από τα μεγάφωνα στο εμπρός μέρος του δωματίου ελέγχου.



Σχήμα 9. Αρχικό Χάσμα Χρονοκαθυστέρησης (ITG).

2.2.2 – Συχνотική περιοχή ενός δωματίου ελέγχου

Το συχνοτικό εύρος σε ένα δωμάτιο ελέγχου είναι πολύ μεγάλο και κάθε μέρος του εξοπλισμού του θα πρέπει να εκτελεί τη λειτουργία του σε αυτή την συχνοτική περιοχή. Η αποδεκτή συχνοτική περιοχή υψηλής πιστότητας είναι από 20Hz - 20KHz. Η περιοχή αυτή αντιπροσωπεύει μια περιοχή μηκών κύματος από περίπου 17,5m - 1,5cm. 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. Κάτω από τη συχνότητα αυτή δεν υπάρχει υποστήριξη του ήχου με συντονισμό του δωματίου, με αποτέλεσμα, κάτω από τη συχνότητα αυτή, η απόκριση του δωματίου πέφτει απότομα.

2.3 – Είδη δωματίων ελέγχου

Η προσπάθεια για τη δημιουργία δωματίων ελέγχου συγκεκριμένου σχεδίου ξεκίνησε περίπου το 1970. Ο στόχος ήταν η δημιουργία δωματίων ελέγχου όπου τα χαρακτηριστικά της κάθε ηχογράφησης δεν θα άλλαζαν ανάλογα με το χώρο όπου θα γινόταν η ακρόαση.

2.3.1 – Δωμάτια ελέγχου βασισμένα στη γεωμετρία

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 στάσιμων κυμάτων τα οποία και περιέχουν το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας. Αυτού του τύπου τα δωμάτια ελέγχου ήταν σχεδιασμένα ώστε να έχουν χρόνο αντήχησης μικρότερο από 0,3sec. 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.

2.3.2 – Δωμάτια ελέγχου τύπου Jencen

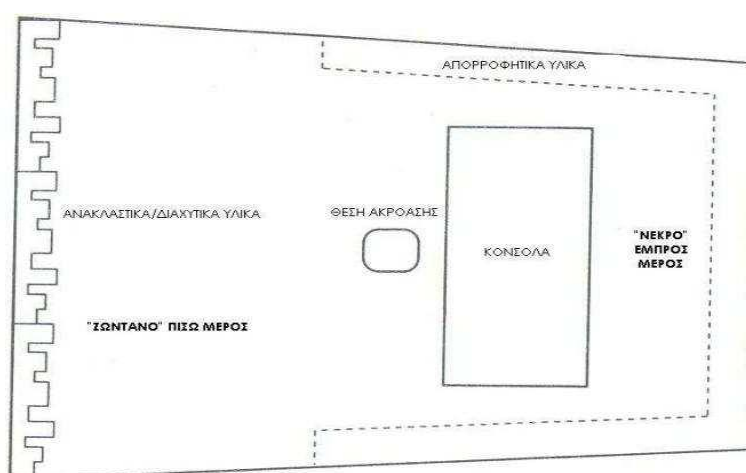
Στα μέσα του 1970 στην Ευρώπη, κατασκευάστηκαν από τον W.W. Jencen, δωμάτια ελέγχου με τη χρήση «πριονωτών» απορροφητών, οι οποίοι απορροφούν το μεγαλύτερο μέρος του ήχου που εκπέμπεται από τα ηχεία. Στα δωμάτια αυτά υπήρχαν ανακλαστικές επιφάνειες τοποθετημένες σε τέτοιες γωνίες ώστε να ανακλούν ήχους που δημιουργούνται μέσα στο δωμάτιο, όπως ομιλίες. Αυτές οι ανακλαστικές επιφάνειες όμως δεν ανακλούσαν τον ήχο που προερχόταν από τα ηχεία. Το ενδιαφέρον που παρατηρείται σε αυτού του τύπου τα δωμάτια είναι το ότι είχαν ουδέτερο χαρακτήρα και σχετικά ζωντανό ήχο, χρησιμοποιούνταν συνήθως ηχεία εντοιχισμένα στον εμπρόσθιο τοίχο, κατασκευασμένα ειδικά για τις ανάγκες του χώρου.

2.3.3 – Δωμάτια ελέγχου τύπου Non-environment

Τη δεκαετία του 1970 και μετά την εμφάνιση της στερεοφωνίας, εισήχθη ένας νέος τρόπος κατασκευής δωματίων ελέγχου, όπου 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 echo). Τυπικοί χρόνοι αντήχησης για ένα τέτοιου τύπου control room είναι 380ms για ένα δωμάτιο με όγκο 100m³ και 430ms για ένα δωμάτιο συνολικού όγκου 200m³. Οι δύο ανακλαστικές επιφάνειες, εμπρός τοίχος και πάτωμα, μαζί με τις σκληρές επιφάνειες των συσκευών του εξοπλισμού παρέχουν ως ένα βαθμό, ένα «ζωντανό» περιβάλλον. Τα ηχεία βρίσκονταν ενσωματωμένα στον εμπρός τοίχο 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 (comp filtering) μεταξύ των ηχείων και των πρώτων ανακλάσεων από τον μπροστά τοίχο. Εκτός από το πάτωμα και τις συσκευές του εξοπλισμού, τα ηχεία «βλέπουν» σε ένα ημι-ανηχοϊκό θάλαμο. 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.

2.3.4 – Δωμάτια ελέγχου τύπου Live-End, Dead-End (LEDE)

Προς το τέλος της δεκαετίας του 1970 άρχισε η έρευνα για τη 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 ηχούς (flutter echo) μεταξύ των πλαϊνών τοίχων και γενικά στη δημιουργία ενός διάχυτου ηχητικά πεδίου.



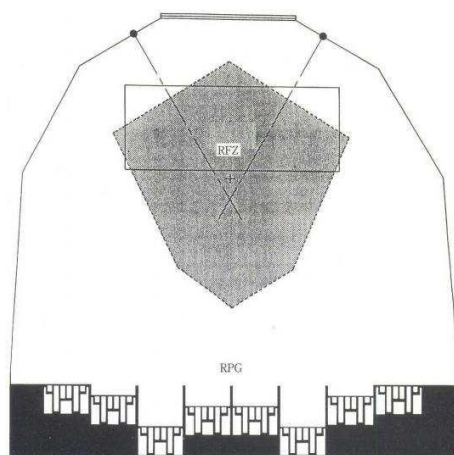
Σχήμα 10. Δωμάτιο ελέγχου LEDE.

Το δωμάτιο είναι γεωμετρικά κατασκευασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργείται μια ζώνη ελεύθερη από τις πρώτες ανακλάσεις στη θέση ακρόασης. Η ιδέα 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 υλικού δεν αλλάζει όταν αυτό αναπαραχθεί σε κάποιο άλλο ιδίου τύπου δωμάτιο.

2.3.5 – Δωμάτια ελέγχου τύπου Reflection Free Zone (RFZ)

Τα δωμάτια του τύπου RFZ (ζώνης ελεύθερης από ανακλάσεις) ακολουθούν την ίδια κατασκευαστική λογική με αυτήν των δωματίων 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. 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 κανείς να σχεδιάσει ένα τέτοιο δωμάτιο θα πρέπει να ασχοληθεί με τα μαθηματικά των πηγών ειδώλων. 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.



Σχήμα 11. Κάτοψη RFZ δωματίου ελέγχου.

Τα ηχεία τοποθετούνται 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 χρονοκαθυστερήσης. 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 παραθύρου επικοινωνίας στο εμπρός μέρος του δωματίου ελέγχου. Παράλληλα με τη χρήση απορροφητών και διαχυτών για τον 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 είναι αρκετά περιορισμένη επιτρέποντας 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.

2.3.6 – Δωμάτια ελέγχου τύπου **Early Sound Scattering (ESS)**

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 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 που προκύπτει 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.

2.3.7 – Δωμάτια ελέγχου και μίξης δύο καναλιών (Stereo)

Πολύ συχνά χρησιμοποιούνται τα λεγόμενα near-field monitors (ηχεία κοντινού πεδίου), 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 πολλά στούντιο 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. Λόγω 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. Με τον εντοιχισμό των ηχείων στον εμπρός τοίχο, 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 πιστότητας 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.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΚΡΟΥΣΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΧΩΡΩΝ

3.1 – Κρουστική απόκριση

Η κρουστική απόκριση ενός συστήματος ονομάζεται η απόκριση εξόδου του συστήματος όταν στην είσοδό του εφαρμοστεί ένας παλμός απειροστής διάρκειας και μοναδιαίου ύψους (συνάρτηση δέλτα $\delta_{(t)}$). Γνωρίζοντας τη κρουστική απόκριση ενός γραμμικού και χρονικά αμετάβλητου συστήματος μπορεί να υπολογιστεί η απόκρισή του σε οποιοδήποτε σήμα εισόδου.

Η απαίτηση της γραμμικότητας συνεπάγεται ότι η απόκριση ενός γραμμικού συστήματος όταν στην είσοδό του εφαρμοστούν ταυτόχρονα δύο σήματα ισούται με το άθροισμα των αποκρίσεων που θα προέκυπταν αν τα δύο σήματα εφαρμοστούν ξεχωριστά. Η απαίτηση της μη-μεταβλητότητας του χρόνου του συστήματος συνεπάγεται ότι κάθε φορά που στην είσοδο του συστήματος εφαρμοστεί το ίδιο σήμα η έξοδός του θα είναι ταυτόσημη.

Υπό τις παραπάνω προϋποθέσεις η απόκριση του συστήματος $y(t)$ σε ένα οποιοδήποτε σήμα εισόδου $x(t)$, μπορεί να προκύψει με τα παρακάτω βήματα:

- 1) Διαιρείται το σήμα εισόδου σε απειροστά τμήματα που απέχουν μεταξύ τους απόσταση ΔT (εκτελείται δηλαδή δειγματοληψία με συχνότητα δειγματοληψίας $f_s=1/\Delta T$).
- 2) Θεωρώντας κάθε μεμονωμένο δείγμα ως ένα απειροστό παλμό η απόκριση του συστήματος σε κάθε μεμονωμένο τέτοιο παλμό θα ισούται με την κρουστική του απόκριση πολλαπλασιασμένη με το πλάτος του παλμού.
- 3) Αθροίζοντας σε κάθε χρονική στιγμή την επίδραση από όλους τους προηγούμενους παλμούς (δείγματα) προκύπτει η συνολική απόκριση του συστήματος στη σύνθετη κυματομορφή εισόδου του συστήματος.

Με μαθηματικούς όρους η παραπάνω διαδικασία ονομάζεται συνέλιξη (convolution) της κρουστικής απόκρισης $h(t)$ του συστήματος με το σήμα εισόδου $x(t)$. Ο μετασχηματισμός Fourier της κρουστικής απόκρισης ενός συστήματος ονομάζεται συχνοτική απόκριση $H(f)$ του συστήματος και χρησιμοποιείται ευρύτατα για τον χαρακτηρισμό και τη συγκριτική και ποιοτική αξιολόγηση συστημάτων. Ισχύει δηλαδή: $H(f)=F\{h(t)\}$, όπου $F\{\dots\}$ ο μετασχηματισμός Fourier. Η απόκριση δηλαδή του συστήματος σε ένα μοναδιαίο παλμό δύναται να παράσχει πληροφορίες και για την απόκριση του συστήματος σε σήμα εισόδου οποιασδήποτε συχνότητας. Η παραπάνω ιδιότητα προκύπτει, θεωρώντας ως είσοδο του συστήματος μια συνάρτηση δέλτα και χρησιμοποιώντας τη βασική ιδιότητα ότι ο μετασχηματισμός Fourier της δέλτα συνάρτησης είναι μια ευθεία γραμμή παράλληλη προς τον άξονα των συχνοτήτων (δηλαδή το φάσμα της περιέχει ίση ενέργεια ανά συχνότητα, όπως ακριβώς και το φάσμα του λευκού θορύβου). Οι τρόποι που υπάρχουν για να μετρηθεί η κρουστική απόκριση ενός χώρου είναι η μέθοδος του απειροστού παλμού, η μέθοδος του μηδενισμού της πηγής και η μέθοδος της ακολουθίας μέγιστου μήκους.

Σε κλειστούς χώρους, η κρουστική απόκριση μεταβάλλεται μεταξύ των διάφορων ζευγών σημείων πηγής-καταγραφικού. Συνήθως λαμβάνονται πολλές μετρήσεις και πραγματοποιείται παραμετρική ανάλυση των αποτελεσμάτων σε συνάρτηση με την απόσταση από την πηγή. Η γνώση της κρουστικής απόκρισης ενός χώρου μας επιτρέπει να υπολογίσουμε ένα μεγάλο πλήθος ακουστικών παραμέτρων.

- Το χρόνο αντήχησης της αίθουσας (RT_{60} , RT_{20} , EDT, κλπ).
- Το ρυθμό πτώσης στάσιμων κυμάτων.

- Τους δείκτες διαύγειας και διακριτικότητας (C50, C80).
- Τον κεντρικό χρόνο του χώρου (Ts).
- Τους δείκτες καταληπτότητας ομιλίας (STI, RASTI).
- Εφόσον χρησιμοποιηθεί και δεύτερο μικρόφωνο αμφικατευθυντικό, τους ακουστικούς δείκτες ανώτερης τάξεως (πλευρικά κλάσματα LF, δείκτες αμφιωτικής ετεροσυσχέτισης IACC κλπ).
- Εφαρμόζοντας διαδοχικούς τμηματικούς μετασχηματισμούς Fourier μπορεί να εξαχθεί και να απεικονιστεί γραφικά η χρονική εξέλιξη της ενέργειας στο δωμάτιο και να εντοπιστούν τα στάσιμα κύματα ή οι καθυστερημένες ανακλάσεις στο χώρο.

3.2 – Τρόπος μέτρησης της κρουστικής απόκρισης

3.2.1 – Μέθοδος του απειροστού παλμού

Ένας χώρος διεγείρεται με έναν παλμό για παράδειγμα πιστόλι (ή πιο πρόχειρα παλαμάκι ή μπαλόκι που σκάει) και καταγράφεται απευθείας η μείωση της ηχοστάθμης του αντηχητικού πεδίου συναρτήσει του χρόνου μέχρι το μηδενισμό του. Για την καταγραφή χρησιμοποιείται ένα καλά βαθμονομημένο ηχόμετρο με φασματικό αναλυτή, έτσι ώστε να γίνεται ξεχωριστή μέτρηση στις διάφορες οκτάβες (διαφορετικός ρυθμός πτώσης ανά συχνότητα). Από τις κλίσεις των καμπύλων υπολογίζεται και εξάγεται ο χρόνος αντήχησης T_{60} /οκτάβα.

Η εν λόγω μέθοδος παρότι θεωρητικά ορθή, στην πράξη εμφανίζει σημαντικά μειονεκτήματα, ειδικότερα κατά την εφαρμογή της σε ακουστικά και ηλεκτροακουστικά συστήματα. Παρακάτω αναλύονται τα βασικά μειονεκτήματα της μεθόδου:

- Είναι πρακτικά αδύνατον να δημιουργηθεί ένας παλμός απειροστού πλάτους καθότι όλα τα συστήματα έχουν ένα πεπερασμένο χρόνο αντίδρασης.
- Σε όλα τα φυσικά συστήματα υπάρχει κάποιας μορφής θόρυβος. Καθότι η ενέργεια του παλμού διεγείρει το σύνολο της απόκρισης του συστήματος, προκειμένου να υπάρξει ικανοποιητικός λόγος σήματος προς θόρυβο στην έξοδο του συστήματος θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί παλμός εισόδου πολύ μεγάλου πλάτους. Αποτέλεσμα αυτού μπορεί να είναι η οδήγηση του συστήματος στη μη γραμμική περιοχή λειτουργίας ως και η καταστροφή του.
- Αν κατά τη διάρκεια της απόκρισης του συστήματος υπάρξει κάποιο εξωτερικό τυχαίο γεγονός (πχ. εξωγενής στιγμιαίος θόρυβος) δεν υπάρχει κανένας τρόπος να αφαιρεθεί η επίδρασή του και η μέτρηση θα πρέπει να επαναληφθεί.
- Ειδικά για ακουστικές μετρήσεις ισχύουν και οι παρακάτω περιορισμοί:
 - Κατά την κρουστική διέγερση ενός χώρου σε υψηλές στάθμες με χρήση μεγάλων υπάρχει μεγάλος κίνδυνος καταστροφής των μονάδων χαμηλών συχνοτήτων.
 - Κατά τη διέγερση με φυσικές κρουστικές πηγές (πχ. πυροβολισμός) υπάρχει πολύ μικρή επαναληψιμότητα και αν χρησιμοποιηθούν υψηλές στάθμες μπορεί να υπερφορτωθούν οι βαθμίδες καταγραφής.

Για τους παραπάνω λόγους η μέθοδος του απειροστού παλμού δε βρίσκει σήμερα εφαρμογή στη μέτρηση της κρουστικής απόκρισης ακουστικών και ηλεκτροακουστικών συστημάτων.

3.2.2 – Μέθοδος του μηδενισμού της πηγής

Ο χώρος διεγείρεται με λευκό ή ροζ θόρυβο μέχρι τη κατάσταση ισορροπίας και στη συνέχεια ο θόρυβος διακόπτεται ακαριαία. Ακολουθείται η ίδια διαδικασία με τη μέθοδο του παλμού από τη στιγμή της διακοπής της πηγής. Τα πλεονεκτήματα είναι ότι η πηγή θορύβου παράγει μεγαλύτερα ποσά ηχητικής ενέργειας (απαραίτητη προϋπόθεση για μετρήσεις σε χώρους με υψηλή στάθμη θορύβου βάθους) και εκπέμπει ηχητική ενέργεια σε όλες τις συχνότητες.

Τα μειονεκτήματα είναι:

- α. Απαιτείται ένα επιπλέον κανάλι καταγραφής για το σήμα εισόδου του σήματος. Καθότι οι περισσότεροι ηλεκτροακουστικοί μετατροπείς παρουσιάζουν φασικές αποκλίσεις στα όρια του ακουστικού συχνοτικού φάσματος η προσθήκη μιας επιπλέον μονάδας (καταγραφή του σήματος εισόδου) αυξάνει τις πιθανότητες σφάλματος στις αντίστοιχες μονάδες.
 - β. Αν κατά τη διάρκεια της απόκρισης του συστήματος υπάρξει κάποιο εξωτερικό τυχαίο γεγονός (πχ. εξωγενής στιγμιαίος θόρυβος) δεν υπάρχει κανένας τρόπος να αφαιρεθεί η επίδρασή του και η μέτρηση θα πρέπει να επαναληφθεί.
 - γ. Σε συστήματα με υψηλό θόρυβο βάθους απαιτείται μεγάλος χρόνος μέτρησης (διπλασιασμός του χρόνου μέτρησης συνεπάγεται βελτίωση του λόγου σήματος προς θόρυβο κατά 3dB).
- Η παραπάνω μέθοδος χρησιμοποιούνταν σε παλαιότερα μετρητικά συστήματα αλλά η χρήση της έχει περιοριστεί στις μέρες μας.

3.2.3 – Μέθοδος της ακολουθίας μέγιστου μήκους (MLS)

Για τον προσδιορισμό της απόκρισης σε κλειστούς χώρους αναπτύχθηκε από τους Schroeder & Alrutz η μέθοδος της εκπομπής μιας ψευδοτυχαίας ακολουθίας που είχε παρόμοιες ιδιότητες με τον τυχαίο θόρυβο. Η ακολουθία αυτή ονομάζεται μέγιστου μήκους (MLS-Maximum Length Sequence). Η μέτρηση του χρόνου αντίληψης με τη μέθοδο MLS έχει το πλεονέκτημα ότι είναι πολύ λίγο ευαίσθητη σε εξωτερικούς θορύβους, δηλαδή επιτυγχάνεται μεγάλος λόγος σήματος προς θόρυβο (S/N). Μια ακολουθία μέγιστου μήκους αποτελείται από μια σειρά μοναδιαίων παλμών και παύσεων (μηδενικών) που εναλλάσσονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε, σε κάθε χρονική στιγμή η πιθανότητα να εμφανιστεί ένας θετικός παλμός ή παύση να είναι ίση (δηλαδή 50%) και ανεξάρτητη από το προηγούμενο δείγμα. Τα βασικά χαρακτηριστικά μιας ακολουθίας μέγιστου μήκους είναι τα ακόλουθα:

- Παράγεται με αυστηρά καθορισμένο, ντετερμινιστικό τρόπο.
- Ο αριθμός των μονάδων είναι ίσος με τον αριθμό των μηδενικών, πλην της αρχικής μονάδας.
- Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης (autocorrelation function) είναι μια δέλτα συνάρτηση.
- Ο μετασχηματισμός Fourier της ακολουθίας περιέχει σταθερή ενέργεια ανά συχνότητα, όπως δηλαδή και μια δέλτα συνάρτηση ή ο λευκός θόρυβος (για το λόγω αυτό οι ακολουθίες μέγιστου μήκους ονομάζονται ψευδοτυχαίος λευκός θόρυβος).
- Είναι περιοδικό σήμα με περίοδο που εξαρτάται από ένα ακέραιο N ο οποίος ονομάζεται τάξη της ακολουθίας. Το μήκος (περίοδος) μιας ακολουθίας τάξης N ισούται προς: $L=2^N-1$ τιμές.

Η βασική διαφοροποίηση της μεθόδου MLS με τη διέγερση του συστήματος με λευκό θόρυβο είναι ότι σε αυτή τη περίπτωση όλοι οι υπολογισμοί λαμβάνουν χώρα

στο πεδίο του χρόνου και δεν παρεμβάλλεται κανένας μετασχηματισμός Fourier περιορίζοντας έτσι σημαντικά τα πιθανά σφάλματα. Επίσης, επειδή το σήμα εισόδου είναι 100% ντετερμινιστικό (δηλαδή σε κάθε χρονική στιγμή είναι γνωστή ακριβώς η τιμή που εισάγεται στο σύστημα), με τη διαδικασία της ετεροσυσχέτισης αποκλείονται από τη μέτρηση όλα τα συμβάντα που δεν συνδέονται γραμμικά με την είσοδο του συστήματος (πχ. τυχαίος θόρυβος). Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μια πολύ σημαντική αύξηση του λόγου σήματος προς θόρυβο και είναι δυνατή η πραγματοποίηση αξιόπιστων μετρήσεων σε περιβάλλον με υψηλή τιμή του θορύβου βάθους. Ο βασικός περιορισμός που πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη σε μετρήσεις με ακολουθία μέγιστου μήκους είναι ότι το μήκος της ακολουθίας που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το μήκος της προς μέτρηση απόκρισης.

3.3 – Ακουστικοί παράμετροι χώρων

Για την εκτίμηση των ακουστικών χαρακτηριστικών ενός χώρου από κοινού, το πρότυπο ISO 3382 καθορίζει τις ακουστικές παραμέτρους χώρων που παρουσιάζονται στον πίνακα 2. Επίσης, το πρότυπο καθορίζει μεθόδους για την εκτίμηση αυτών των παραμέτρων από την μέτρηση της κρουστικής απόκρισης.

<i>Ποσοτικό Σύμβολο</i>	<i>Υποκειμενική Αντίληψη</i>
Χρόνος αντήχησης T_{30} , T_{20} , T_{10} (sec)	Αντήχηση, ακουστότητα, συμμετοχή
Αρχικός χρόνος αντήχησης EDT (sec)	Αντήχηση, διαύγεια
Χρονικό κέντρο βάρους T_s (sec)	Διαύγεια
Διαύγεια C80 (dB)	Διαύγεια
Διακριτότητα D50 (%)	Καταληπτότητα ομιλίας
Δείκτης ισχύος G (dB)	Σχετική ηχητική ένταση
Πλευρικές ανακλάσεις LF, LFC (%)	Ευρυχωρία
Αμφιωτική ετεροσυσχέτιση IACC	Ευρυχωρία

Πίνακας 2. Αναφορά γενικών ακουστικών παραμέτρων ενός χώρου.

Το πρότυπο καθορίζει τα παρακάτω:

- T_{30} είναι ο χρόνος αντήχησης ο οποίος καθορίζεται από το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την μείωση της ηχητικής στάθμης από -5dB σε -35dB.
- T_{20} είναι ο χρόνος αντήχησης ο οποίος καθορίζεται από το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την μείωση της ηχητικής στάθμης από -5dB σε -25dB.
- T_{10} είναι ο χρόνος αντήχησης ο οποίος καθορίζεται από το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την μείωση της ηχητικής στάθμης από -5dB σε -15dB.

Σύμφωνα με το πρότυπο, η εκτίμηση για την μείωση της ηχητικής στάθμης γίνεται με την μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης (linear regression). Ακόμα, δίνεται η αναφορά του συντελεστή συσχέτισης της γραμμικής παλινδρόμησης (τιμή από 0 έως -1).

Το πρότυπο καθορίζει ότι η μέτρηση της μείωσης της ηχητικής στάθμης θα πρέπει να λαμβάνεται στις οκτάβες από 125Hz έως 4KHz, ή στις τριτοκτάβες από 100Hz έως 5KHz. Το λογισμικό πραγματοποιεί μετρήσεις στην παρατεταμένη περιοχή συχνοτήτων από 63Hz έως 8kHz.

Η εκτίμηση για την μείωση της ηχητικής στάθμης λαμβάνεται, σύμφωνα με τον Schroeder, με την μέθοδο της ολοκλήρωσης της κρουστικής απόκρισης. Ο Schroeder έχει δείξει με στατιστική ανάλυση ότι η μέση εξασθένηση ενέργειας στο

χώρο μπορεί να ληφθεί από την ανάποδη ολοκλήρωση του τετραγώνου της κρουστικής απόκρισης $h(t)$:

$$r(t) \approx \int_t^{\infty} h^2(\tau) d\tau \quad 3.1$$

Χρησιμοποιούμε την έκφραση του Schroeder στην πιο πρακτική της, λογαριθμική μορφή:

$$10 \log r_n(t) = 10 \log \left(\frac{\int_t^{\infty} h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \right) \quad 3.2$$

Κατά την διάρκεια των μετρήσεων, πρέπει να πληρούνται οι παρακάτω συνθήκες:

- Η θέση του μικροφώνου πρέπει να είναι τουλάχιστον 1m μακριά από ανακλαστικές επιφάνειες και όχι πολύ κοντά στην πηγή, η ελάχιστη απόσταση από την θέση της πηγής μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση, όπου V ο όγκος του δωματίου, c η ταχύτητα του ήχου, T η εκτίμηση του αναμενόμενου χρόνου αντήχησης.

$$d_{\min} = 2 \sqrt{\frac{V}{cT}} \text{ [m]} \quad 3.3$$

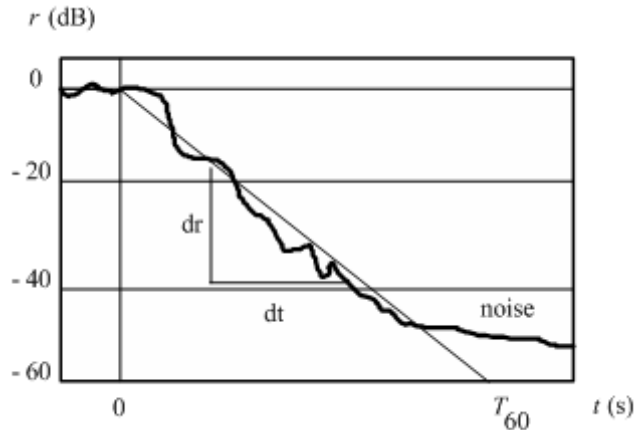
- Η πηγή πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο παντοκατευθυντική.
- Το μικρόφωνο πρέπει να είναι παντοκατευθυντικό.
- Η διάρκεια των μετρήσεων με περιοδικό θόρυβο ή με τη μέθοδο MLS, θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τον χρόνο αντήχησης.

3.3.1 - Χρόνος αντήχησης (Reverberation time – T)

Η πιο σημαντική ακουστική παράμετρος είναι ο χρόνος αντήχησης του χώρου, ο οποίος ορίζεται ως το χρονικό διάστημα που απαιτείται για τη μείωση της ηχητικής ενέργειας 60dB, μετά το πέρας της διέγερσης. (T_{60})

Για να λάβουμε το χρόνο αντήχησης πρέπει να τον εκτιμήσουμε από την εξασθένηση της ηχητικής ενέργειας μετά το σταμάτημα της πηγής. Ο χρόνος αντήχησης καθορίζεται από την κλίση της εκτιμώμενης γραμμικής εξασθένησης.

$$T = 60 \frac{dt}{dr} \quad 3.4$$



Σχήμα 12. Μείωση της ηχητικής ενέργειας μιας πηγής μετά τον τερματισμό της στον χρόνο $t=0\text{sec}$.

3.3.2 – Bass Ratio (BR)

Ένα μοναδικό κριτήριο για τη συχνοτική απόκριση του χρόνου αντήχησης στις χαμηλές συχνότητες είναι το Bass Ratio (BR):

$$BR = \frac{T_{20,125} + T_{20,250}}{T_{20,500} + T_{20,1000}}$$

3.5

όπου $T_{20,x}$ είναι ο χρόνος αντήχησης T_{20} μετρημένος στην οκτάβα x . Για την μουσική, το επιθυμητό Bass Ratio είναι 1.0 έως 1.3, αλλά για την ομιλία, το Bass Ratio πρέπει να έχει μέγιστη τιμή 0.9 έως 1.0.

3.3.3 - Αρχικός χρόνος αντήχησης (Early decay time – EDT)

Ο αρχικός χρόνος αντήχησης ορίζεται ως το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την μείωση του ηχητικού πεδίου 10dB, μετά τον τερματισμό της πηγής. Για να είναι δυνατή η άμεση σύγκριση με τον χρόνο αντήχησης, το αποτέλεσμα πολλαπλασιάζεται επί 6. Για μία ιδανική εκθετική εξασθένηση σε ένα διάχυτο πεδίο, οι αναμενόμενες τιμές του EDT ισούνται με τον χρόνο αντήχησης (T_{60}).

3.3.4 - Διαύγεια (Clarity – C80, C50)

Διαύγεια ή δείκτης κοντινού με μακρινού πεδίου, ορίζεται ως ο λογαριθμικός λόγος της κρουστικής απόκρισης της ενέργειας πριν τον χρόνο t_e και της ενέργειας μετά τον χρόνο t_e . Η τιμή $t_e=50\text{ms}$ χρησιμοποιείται για να εκφράσει την διαύγεια της ομιλίας, ενώ όπου $t_e=80\text{ms}$ ο δείκτης εκφράζει καλύτερα την διαύγεια της μουσικής.

Υψηλές τιμές της διαύγειας υποδεικνύουν μεγάλη ποσότητα της πρώτης ηχητικής ενέργειας, το οποίο αντιστοιχεί στην υποκειμενική αίσθηση της διαύγειας. Αντίθετα, χαμηλές τιμές της διαύγειας υποδεικνύουν έναν ασαφές, υπερβολικά αντηχητικό ήχο. Υποκειμενικές, αποδεκτές τιμές για C80 είναι -3dB και πάνω. Για καλή ομιλία ή κατανόηση κειμένου, αποδεκτές τιμές για C50 είναι -2dB και πάνω.

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80ms} h^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} h^2(t) dt} \text{ dB} \quad C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50ms} h^2(t) dt}{\int_{50ms}^{\infty} h^2(t) dt} \text{ dB}$$

3.6

3.3.5 - Διακριτότητα (Definition – D50)

Η διακριτότητα ή ο λόγος της πρώτης προς τη συνολική ηχητική ενέργεια, είναι ένα μέτρο για την διακριτότητα της ομιλίας. Ορίζεται ως ο λόγος της ηχητικής ενέργειας κατά την διάρκεια των πρώτων 50ms προς τη συνολική ενέργεια.

$$D_{50} = 100 \frac{\int_0^{50ms} h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \text{ (%)}$$

3.7

3.3.6 - Χρονικό κέντρο βάρους (Center time – T_s)

Το χρονικό κέντρο βάρους αντιστοιχεί στο κέντρο βαρύτητας του τετραγώνου της κρουστικής απόκρισης.

$$T_s = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt}$$

3.8

Τα ανώτερα όρια ολοκλήρωσης λαμβάνονται ως το σημείο αποκοπής ή το τέλος της κρουστικής απόκρισης, σύμφωνα με τον καθορισμένο θόρυβο. Η τιμή του T_s μετριέται σε χιλιοστά του δευτερολέπτου (ms). Χαμηλό T_s δείχνει μια αίσθηση διαύγειας, ενώ υψηλό T_s δείχνει έναν αντηχητικό ήχο. Το T_s έχει μεγάλη συσχέτιση με το EDT, σπάνια περιέχει πρόσθετες πληροφορίες όταν συγκρίνεται με το EDT. Για ένα ιδανικό σύστημα, η αναμενόμενη τιμή του T_s είναι ανάλογη με τον χρόνο αντήχησης T:

$$T_{s, \text{expected}} = \frac{T}{13.6}$$

3.9

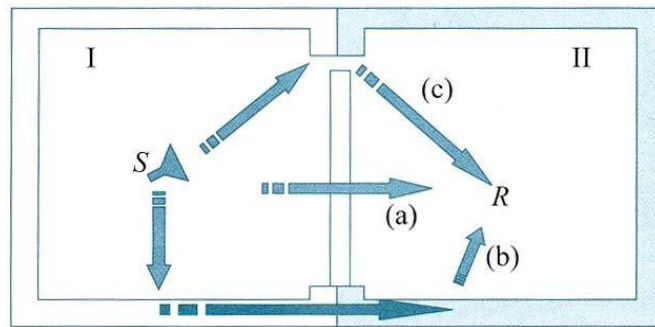
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΜΕΙΩΣΗ ΑΕΡΟΦΕΡΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ

Θόρυβος ονομάζεται κάθε δυσάρεστος ή ανεπιθύμητος ήχος. Σε ένα στούντιο ηχογραφήσεων πρέπει να εξετάζεται και να ελέγχεται ο θόρυβος από έξω καθώς και μέσα σε αυτό.

4.1 - Μετάδοση του θορύβου σε κλειστούς χώρους

Όταν η πηγή του ήχου βρίσκεται σε κλειστούς χώρους, ο ήχος ακολουθεί διάφορους δρόμους μετάδοσης, είτε μέσω του αέρα είτε μέσω της κατασκευής. Όταν ο ήχος μεταδίδεται μέσω της κατασκευής μεταδίδεται με μεγαλύτερη ταχύτητα και μικρότερη απόσβεση από ότι στον αέρα, είναι δυνατόν να διεγείρει τις στερεές επιφάνειες σε ταλάντωση με αποτέλεσμα την δημιουργία δευτερογενών πηγών παραγωγής ήχου. Η μετάδοση του θορύβου σε κλειστούς χώρους μπορεί να γίνει με τους παρακάτω τρόπους, όπως φαίνεται και στο σχήμα 13:

- Μέσω των τοιχωμάτων με απευθείας διάδοση (a).
- Με διέγερση των δομικών στοιχείων των τοιχωμάτων προς ταλάντωση. Τα τοιχώματα στην περίπτωση αυτή, κάτω από τις κατάλληλες συνθήκες, γίνονται δευτερογενής πηγές θορύβου (b).
- Με μετάδοση από ανοίγματα, αρμούς και σχισμές (c). Λόγω του φαινομένου της περίθλασης που είναι ιδιαίτερα έντονο στον ήχο, η μετάδοση μέσω σχισμών και χαραμιάδων είναι σχετικά εύκολη.



Σχήμα 13. Τρόποι μετάδοσης θορύβου.

Όσον αφορά την ηχομόνωση, σύμφωνα με τον τρόπο διάδοσης του θορύβου, έχουμε:

- Αερόφερτο που είναι ο ήχος που διαδίδεται μέσω του αέρα.
- Στερεόφερτο που είναι ο ήχος που διαδίδεται μέσω των στερεών, δηλαδή της κατασκευής.
- Κτυπογενή που είναι ο ήχος που παράγεται από πρόσκρουση στερεών σωμάτων, και είναι κατά κανόνα στερεόφερτος.

4.2 - Δείκτης ηχομείωσης (R)

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

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

4.1

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

4.3 - Υπολογισμός ηχομείωσης αερόφερτου θορύβου σε κλειστό χώρο

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

$$L_{P2} = L_{P1} - R + 10 \log \frac{A_w}{A_N}$$
4.2

όπου A_w το εμβαδόν της διαχωριστικής επιφάνειας και A_N η απορρόφηση του χώρου λήψης κατά Norris – Eyring. Βασικό ρόλο στην παραπάνω σχέση παίζει ο συντελεστής ηχομείωσης, ο υπολογισμός του οποίου είναι πολύπλοκος και γι' αυτό δίνεται με ικανοποιητική ακρίβεια από πίνακες για διάφορα υλικά που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές. Συνεπώς αν θέλουμε να μειώσουμε τον αερόφερτο θόρυβο σημαντικά θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε υλικά με μεγάλο δείκτη ηχομείωσης.

4.4 - Νόμος της μάζας

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

4.4.1 – Κάθετη πρόσπτωση

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

$$R_0 = 20 \log fm - 43$$
4.3

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

4.4.2 - Τυχαία πρόσπτωση

Όταν ο ήχος προσπίπτει σε μία επιφάνεια πλάγια με γωνία πρόσπτωσης θ τότε ο δείκτης ηχομείωσης δίδεται από τη σχέση:

$$R_\theta = 10 \log \left[1 + \left(\frac{\omega m \cos \theta}{2 \rho c} \right)^2 \right]$$
4.4

όπου $\omega=2\pi f$, ρ η πυκνότητα του υλικού (kg/m^3) και c η ταχύτητα του ήχου στο μέσο διάδοσης (m/s). Συνήθως στην πράξη η γωνία πρόσπτωσης είναι $\theta=0-78^\circ$, αν πάρουμε το μέσο όρο για τις γωνίες αυτές η παραπάνω σχέση καταλήγει στην σχέση:

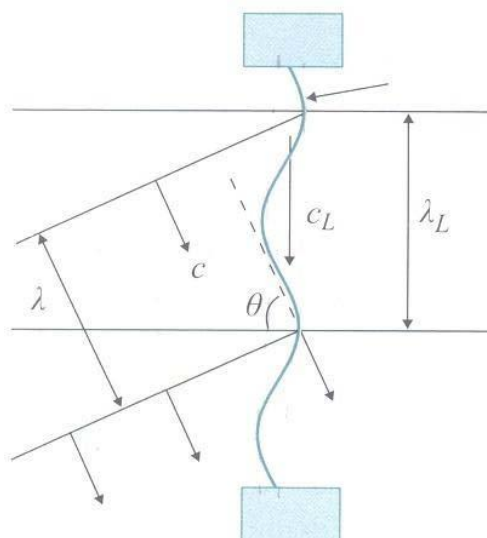
$$R = 20 \log(fm) - 47$$

4.5

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

Η ποσότητα R ονομάζεται δείκτης ηχομείωσης για τυχαία πρόσπτωση. Επειδή όμως στην πράξη ο ήχος προσπίπτει στις επιφάνειες υπό τυχαία γωνία, χρησιμοποιείται η σχέση 4.4. Αν το τοίχωμα είναι συμπαγές και άκαμπτο με μεγαλύτερη επιφανειακή πυκνότητα, μεγαλύτερη από 100kg/m^2 , ο δείκτης ηχομείωσης δίνεται με αρκετά ικανοποιητική προσέγγιση από την σχέση 4.5 και αποτελεί τον νόμο της μάζας. Ο νόμος της μάζας για δεδομένο υλικό δηλώνει ότι η ηχομείωση του υλικού είναι ανάλογη του λογάριθμου της συχνότητας και για δεδομένη συχνότητα είναι ανάλογη της επιφανειακής πυκνότητας. Συγκεκριμένα ο νόμος της μάζας δηλώνει ότι για δεδομένη συχνότητα η ηχομείωση αυξάνει κατά 6dB για κάθε διπλασιασμό της επιφανειακής μάζας και για την ίδια επιφάνεια 6dB για κάθε διπλασιασμό της συχνότητας. Επί προσθέτως δηλώνει ότι σε χαμηλές συχνότητες οι ηχομονωτικές ιδιότητες των υλικών είναι πτωχές. Η ηχομονωτική συμπεριφορά των διαφόρων υλικών στην πράξη και σε ορισμένες συχνότητες αποκλίνει απ' αυτήν που προβλέπει ο νόμος της μάζας. Δύο φαινόμενα, το φαινόμενο της σύμπτωσης και το φαινόμενο του συντονισμού είναι κυρίως υπεύθυνα για τη μείωση της ηχομονωτικής ικανότητας των διαφόρων υλικών.

4.5 - Το φαινόμενο της σύμπτωσης



Σχήμα 14. Φαινόμενο σύμπτωσης σε εύκαμπτες επιφάνειες.

Εάν το τοίχωμα μιας επιφάνειας είναι εύκαμπτο τότε σε αυτό διαδίδονται καμπτικά κύματα κατά μήκος της επιφάνειάς του με μία συγκεκριμένη συχνότητα. Η

εξίσωση κίνησης των επίπεδων επιφανειών όταν σ' αυτές διαδίδονται καμπτικά κύματα δίνεται από τη σχέση:

$$\nabla^4 y + \frac{12}{(hc_L)^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad 4.6$$

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 την σχέση:

$$c_L^2 = 2\pi f h \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\sigma^2)}} \quad 4.7$$

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

$$c_L = \frac{c}{\sin \theta}, \quad \lambda_L = \frac{\lambda}{\sin \theta} \quad 4.8$$

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 της σύμπτωσης. Το μήκος κύματος και κατά συνέπεια η συχνότητα που συμβαίνει το φαινόμενο αυτό, που ονομάζεται συχνότητα σύμπτωσης, εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης της ηχητικής ακτίνας. Η συχνότητα σύμπτωσης δίνεται από τη σχέση:

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi h \sin^2 \theta} \sqrt{\frac{12\rho(1-\sigma^2)}{E}} \quad 4.9$$

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 στην πράξη δίνεται από τη σχέση:

$$f_c = \frac{c^2}{1.8h} \sqrt{\frac{\rho}{E}} = \frac{c^2}{1.8hc_1} \quad 4.10$$

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 4.9 και 4.10 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 χάρισμα με τον προσπίπτοντα ήχο. Στη συχνότητα αυτήν έχουμε τη μικρότερη ηχομείωση. Στην περίπτωση που η επιφάνεια δεν είναι ομογενής αλλά αποτελείται από δύο στρώματα διαφορετικών υλικών η συμπεριφορά της στο φαινόμενο της σύμπτωσης είναι δύσκολο να περιγραφεί, ωστόσο η κρίσιμη συχνότητα με αρκετά καλή προσέγγιση δίνεται από τη σχέση:

$$f_c = \frac{c^2}{1.8H} \sqrt{\frac{\rho'}{E'}} \quad 4.11$$

όπου H το ολικό πάχος του συστήματος των δύο τοιχωμάτων ($H=h_1+h_2$), ρ η ανοιγμένη πυκνότητα και E' το ανοιγμένο μέτρο ελαστικότητας. Η ανοιγμένη πυκνότητα δίνεται από τη σχέση:

$$\rho' = \frac{\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2}{H} \quad 4.12$$

όπου ρ_1, ρ_2 οι πυκνότητες των δύο μέσων. Το ανοιγμένο μέτρο ελαστικότητας δίνεται από τη σχέση:

$$E' = \frac{E_1 h_1 + E_2 h_2}{H} \quad 4.13$$

όπου E_1, E_2 το μέτρο ελαστικότητας των δύο μέσων.

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

$$R = R_0 + 10 \log \left(\frac{f}{f_c} - 1 \right) + 10 \log n - 2 \quad 4.14$$

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

Η σχέση 4.14 δηλώνει ότι η ηχομείωση αυξάνει κατά 10dB για κάθε διπλασιασμό της συχνότητας και ότι η απόσβεση παίζει σπουδαίο ρόλο στην ηχομόνωση των τοιχωμάτων για συχνότητες μεγαλύτερες από την κρίσιμη.

4.6 - Το φαινόμενο του συντονισμού

Σε χαμηλές 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 ονομάζεται φαινόμενο συντονισμού και έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση μερικών βυθισμάτων στις χαμηλές συχνότητες στην καμπύλη που εκφράζει την ηχομονωτική ικανότητα των υλικών συναρτήσει της συχνότητας. Για μία επιφάνεια σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου που στερεώνεται και στις τέσσερις πλευρές, η συχνότητα συντονισμού δίνεται από τη σχέση:

$$f_r = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{B}{m}} \left[\frac{n_x^2}{L_x^2} + \frac{n_y^2}{L_y^2} \right] \quad 4.15$$

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

$$f_r = 0.458 c_L h (1 - \sigma^2)^{1/2} \left[\frac{n_x^2}{L_x^2} + \frac{n_y^2}{L_y^2} \right] \quad 4.16$$

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

4.7 - Ηχομονωτική συμπεριφορά απλών επιφανειών

Οι ταλαντώσεις που εκτελούν οι απλές επιφάνειες είναι ο κύριος λόγος μετάδοσης της ακουστικής ενέργειας. Το φαινόμενο της απόσβεσης των ταλαντώσεων συνεπώς 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 0.6cm. 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 δίνεται από τη σχέση:

$$n = \frac{D}{2\pi W_0} \quad 4.17$$

όπου D η ενέργεια που χάνεται ανά κύκλο ταλάντωσης και W_0 η μέση ολική (κινητική και δυναμική) ενέργεια του ταλαντωμένου συστήματος. Μία άλλη έκφραση για τον παράγοντα απωλειών είναι η παρακάτω:

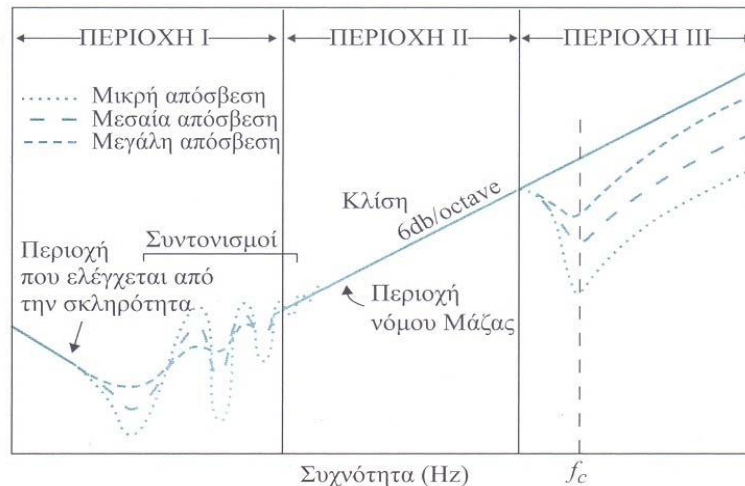
$$n = \frac{\Delta}{27.3f} \quad 4.18$$

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

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

Πίνακας 3. Παράγοντας απωλειών για διάφορα υλικά.

Συνοψίζοντας, η ηχομονωτική συμπεριφορά των διαφόρων υλικών εξαρτάται από τον νόμο της μάζας, το φαινόμενο της σύμπτωσης και το φαινόμενο του συντονισμού. Τα δύο τελευταία φαινόμενα είναι υπεύθυνα για σοβαρές αποκλίσεις από το νόμο της μάζας. Το διάγραμμα του σχήματος 15 δίνει στην πράξη την τιμή του δείκτη ηχομείωσης συναρτήσει της συχνότητας για μία πραγματική ομογενή επιφάνεια. Στο διάγραμμα διακρίνουμε τρεις περιοχές:



Σχήμα 15. Δείκτης ηχομείωσης συναρτήσει της συχνότητας σε απλές επιφάνειες.

4.7.1 - Περιοχή I (περιοχή σκληρότητας)

Η περιοχή αυτή εκτείνεται από $0-2f_r$, όπου f_r η χαμηλότερη τάξης συχνότητα συντονισμού. Στην περιοχή αυτή που βρίσκεται σε χαμηλές συχνότητες η ηχομείωση είναι συνάρτηση της σκληρότητας του υλικού. Αύξηση της σκληρότητας του υλικού συνεπάγεται αύξηση του δείκτη ηχομείωσης κατά 6dB για κάθε διπλασιασμό της σκληρότητας, αν η συχνότητα διατηρηθεί σταθερή. Για το ίδιο υλικό ο δείκτης ηχομείωσης μειώνεται με τη συχνότητα κατά 6dB ανά οκτάβα. Στην πράξη αυτό σημαίνει ότι αν θέλουμε να έχουμε σημαντική ηχομείωση σε χαμηλές συχνότητες θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε σκληρά υλικά. Στην ίδια περιοχή σε σχετικά μεγαλύτερες συχνότητες είναι δυνατόν να συμβεί το φαινόμενο του συντονισμού λόγω των διαστάσεων του υλικού και ο δείκτης ηχομείωσης να παρουσιάζει διακυμάνσεις.

4.7.2 - Περιοχή II (περιοχή νόμου μάζας)

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

4.7.3 - Περιοχή III (περιοχή σύμπτωσης)

Στην περιοχή αυτή που αρχίζει αμέσως μετά την περιοχή του νόμου 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 10dB ανά οκτάβα, για την ίδια

επιφάνεια. Σε μεγαλύτερες συχνότητες, έχουμε μια σταδιακή ελάττωση της αύξησης μέχρι την τιμή των 6dB ανά οκτάβα. Αν θέλουμε να επιτύχουμε σημαντική ηχομείωση σε μέσες και μεγάλες συχνότητες θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε υλικά με μεγάλο επιφανειακό βάρος.

4.8 - Μεθοδολογία υπολογισμού ηχομείωσης απλών επιφανειών

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:

- Χωρίζουμε το εύρος των συχνοτήτων σε δύο περιοχές με βάση την κρίσιμη συχνότητα f_c (σχέση 4.11).
- Για τη συχνότητα $f_c/2$ υπολογίζουμε την ηχομείωση χρησιμοποιώντας τη σχέση 4.5.
- Χαράσσουμε ευθεία που να διέρχεται από το σημείο που βρήκαμε και έχει κλίση 6dB ανά οκτάβα, για συχνότητες χαμηλότερες από την $f_c/2$.
- Υπολογίζουμε την ηχομείωση για την συχνότητα f_c χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$R = 20\log(f_c m) + 10\log(n) - 45 \quad \text{για } f > f_c \quad 4.19$$

όπου n ο παράγοντας απωλειών του υλικού.

- Χαράσσουμε μία ευθεία γραμμή με κλίση 10dB ανά οκτάβα για συχνότητες μεγαλύτερες από την f_c , μέχρι να τμήσει την προέκταση της γραμμής που φέραμε προηγουμένως.
- Από το σημείο τομής φέρουμε ευθεία με κλίση 6dB ανά οκτάβα για μεγαλύτερες συχνότητες από αυτήν του σημείου τομής.
- Για συχνότητες μεταξύ των τιμών $f_c/2$ και f_c , υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ θεωρητικών και πραγματικών συντελεστών, στην περίπτωση αυτή ο υπολογισμός της ηχομείωσης γίνεται με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των δύο τιμών.

4.9 - Υπολογισμός δείκτη ηχομείωσης σύνθετων επιφανειών

Σπάνια οι επιφάνειες που περιορίζουν ένα χώρο αποτελούνται από ένα υλικό. Στην περίπτωση που η επιφάνεια δεν είναι ομογενής, αλλά είναι κατά τμήματα ομογενής (πχ. 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:

$$\tau = (\tau_1 s_1 + \tau_2 s_2 + \tau_3 s_3 + \dots) / (s_1 + s_2 + s_3 + \dots) \quad 4.20$$

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:

$$R = 10\log(1/\tau) \quad 4.21$$

4.10 - Ηχομονωτική συμπεριφορά διπλών επιφανειών

Για να πετύχουμε υψηλό δείκτη ηχομείωσης απαιτείται σχεδιασμός υλικών με μεγάλο επιφανειακό βάρος όπως προκύπτει με την εφαρμογή του νόμου της μάζας. Με την χρήση όμως διπλών τοιχωμάτων μπορούμε να επιτύχουμε μεγάλους δείκτες ηχομείωσης με σχετικά ελαφρές κατασκευές.

Ας υποθέσουμε, μια επιφάνεια με άπειρες διαστάσεις η οποία έχει δείκτη ηχομείωσης R . Αν σε επαφή με την επιφάνεια υπάρχει και δεύτερη όμοια, σύμφωνα με τον νόμο της μάζας η ολική ηχομείωση του συστήματος θα είναι μόλις κατά 6dB μεγαλύτερη δηλαδή $R+6$. Αν η δεύτερη επιφάνεια βρίσκεται σε πολύ μεγάλη απόσταση από την πρώτη και δεν υπάρχει σύζευξη των δύο επιφανειών, η κάθε επιφάνεια θα μειώσει κατά R την στάθμη του ήχου δηλαδή η τελική ηχομείωση θα είναι $R+R$. Στην πράξη όμως ούτε μεγάλες αποστάσεις μπορούμε να έχουμε αλλά και ούτε τέλεια μόνωση μεταξύ των επιφανειών, 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 διπλών επιφανειών είναι να μονώσουμε ακουστικά και μηχανικά τις επιφάνειες μεταξύ τους. Μηχανική μόνωση επιτυγχάνουμε όταν παρεμβάλουμε μεταξύ των διαφόρων στρωμάτων υλικά απορροφητικά των κραδασμών, όταν χρησιμοποιούμε διαφορετικά σημεία στήριξης κλπ. Ακουστική μόνωση μπορούμε επίσης να έχουμε με τη δημιουργία κενού μεταξύ των τοιχωμάτων όπου αυτό είναι κατορθωτό (διπλοί υαλοπίνακες). Στην περίπτωση διπλών τοιχωμάτων κύριο ρόλο παίζουν η συχνότητα συντονισμού του διάκενου και η συχνότητα f_1 που ορίζονται παρακάτω.

4.10.1 - Θεωρία διπλών τοιχωμάτων

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

$$R = 10 \log \left[1 + 4 \left(\frac{\omega m}{2\rho c} \right)^2 \left(\cos kd - \left(\frac{\omega m}{2\rho c} \right) \sin kd \right)^2 \right] \quad 4.22$$

Όπως παρατηρούμε από τη σχέση 4.22, η ηχομείωση αυξάνει με τη συχνότητα και την μάζα, η αύξηση όμως αυτή δεν είναι ομαλή. Για ορισμένες συχνότητες παρουσιάζει μέγιστα ενώ για άλλες ελάχιστα.

4.10.2 - Συχνότητα συντονισμού του διάκενου

Η σχέση 4.22 μηδενίζεται όταν η ποσότητα:

$$\left(\cos kd - \left(\frac{\omega m}{2\rho c} \right) \sin kd \right)^2 = 0 \quad 4.23$$

όπου και δίνει $\log 1=0$, τότε ο δείκτης ηχομείωσης των διπλών επιφανειών μηδενίζεται, στην πράξη ελαχιστοποιείται. Ο μηδενισμός συμβαίνει στην συχνότητα ω_0 που ικανοποιείται από τη σχέση:

$$\tan kd = \frac{2\rho c}{\omega_0 m} \quad 4.24$$

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 εφαπτομένη μπορεί να γραφεί:

$$\tan kd \cong kd, \frac{\omega_0}{c} d = \frac{2\rho c}{\omega_0 m} \quad 4.25$$

Λύνοντας ως προς την συχνότητα θα πάρω:

$$\omega_0^2 = \frac{2\rho c^2}{md}, f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2\rho c^2}{md}} \quad 4.26$$

Η συχνότητα αυτή ονομάζεται συχνότητα συντονισμού του διάκενου.

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

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1.8\gamma P(m_1 + m_2)}{dm_1 m_2}} \quad 4.27$$

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

Στη σχέση 4.27 προστέθηκε η αριθμητική σταθερά 1.8 για καλύτερη συμφωνία των πειραματικών τιμών με τις προβλεπόμενες από την εξίσωση. Αν για τον αέρα σε συνθήκες δεχτούμε τις τιμές $\gamma=1.41$ και $P=101.3 \cdot 10^3 \text{Pa}$ τότε η σχέση 4.27 καταλήγει στην :

$$f_0 = \frac{113}{\sqrt{Md}} \quad 4.28$$

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

$$M = \frac{2m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad 4.29$$

4.10.3 - Η συχνότητα f_1

Στην σχέση 4.23, για συχνότητες που ικανοποιούν την συνθήκη:

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

4.30

το συνημίτονο μηδενίζεται ενώ το ημίτονο παίρνει την τιμή 1, οπότε η ποσότητα της σχέσης 4.23 μεγιστοποιείται. Δηλαδή:

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

4.31

και η ηχομείωση παρουσιάζει μέγιστο.
Η ηχομείωση παρουσιάζει συνεπώς μέγιστο στις συχνότητες:

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

4.32

Η ηχομείωση τότε δίνεται από τη σχέση:

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

4.33

Στην πράξη για την συχνότητα f_1 χρησιμοποιούμε την σχέση:

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

4.34

4.10.4 - Πρακτικός υπολογισμός ηχομείωσης διπλών επιφανειών

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

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

4.35

όπου m (kg/m^2) το άθροισμα των επιφανειακών μαζών των υλικών ($m=m_1+m_2$), οι συχνότητες f_1, f_0 δίνονται από τις σχέσεις 4.34 και 4.28 αντίστοιχα, d το πάχος του

διάκενου (m), το οποίο πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 2.5cm. Γενικά η αύξηση του διάκενου μετακινεί τη συχνότητα συντονισμού σε χαμηλότερες συχνότητες. Διαφοροποιώντας το επιφανειακό βάρος των υλικών επιτυγχάνουμε μετατόπιση των κρίσιμων συχνοτήτων κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι κρίσιμες συχνότητες να μη βρίσκονται στην ίδια περιοχή συχνοτήτων. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η επίδραση του φαινομένου της σύμπτωσης στην ηχομείωση.

4.10.5 - Μεθοδολογία υπολογισμού δείκτη ηχομείωσης διπλών επιφανειών

Ας υποθέσουμε ότι θέλουμε να υπολογίσουμε το δείκτη ηχομείωσης συστήματος επιφανειών που αποτελείται από δύο επιφάνειες με επιφανειακές μάζες m_1 και m_2 που απέχουν μεταξύ τους απόσταση d . Η πορεία που πρέπει να ακολουθήσουμε είναι:

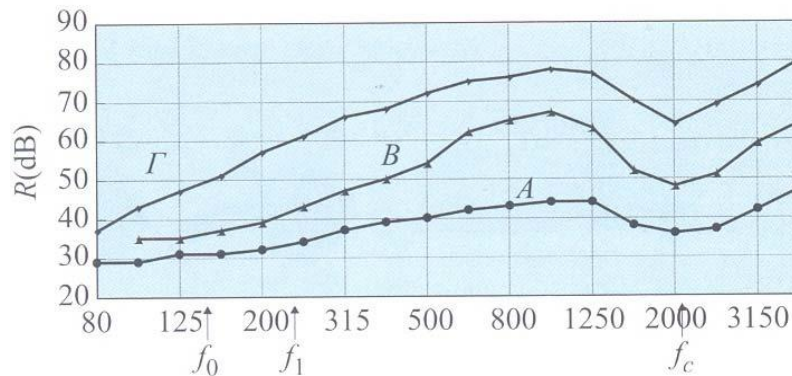
- Υπολογίζουμε τις τιμές των συχνοτήτων f_0 , f_1 , f_c (σχέσεις 4.28, 4.34, 4.11).
- Στη χαμηλότερη συχνότητα (f_0) υπολογίζουμε την ηχομείωση του συστήματος των επιφανειών (σχέση 4.35α).
- Σχεδιάζουμε μία γραμμή με κλίση 6dB/οκτάβα για συχνότητες μικρότερες από την f_0 .
- Υπολογίζουμε την ηχομείωση για την συχνότητα f_1 (σχέση 4.35β).
- Ενώνουμε τις τιμές που βρήκαμε με μία ευθεία.
- Υπολογίζουμε την ηχομείωση στην συχνότητα $f_{c \min}/2$, όπου $f_{c \min}$ η χαμηλότερη κρίσιμη συχνότητα από τις δύο επιφάνειες (σχέση 4.35γ).
- Σχεδιάζουμε ευθεία με κλίση 6dB/οκτάβα από το προηγούμενο σημείο μέχρι να τμήσει την ευθεία f_0 , f_1 .
- Υπολογίζουμε την ηχομείωση στην κρίσιμη συχνότητα $f_{c \max}$, όπου $f_{c \max}$ η υψηλότερη κρίσιμη συχνότητα από τις δύο επιφάνειες (σχέση 4.35γ).
- Υπολογίζουμε την χαμηλότερη ηχομείωση στην συχνότητα αυτή.
- Ενώνουμε με ευθεία τις τιμές ηχομείωσης που αντιστοιχούν στις συχνότητες $f_{c \max}$, $f_{c \min}/2$.
- Σχεδιάζουμε μία ευθεία με κλίση 15dB/οκτάβα για συχνότητες μεγαλύτερες από την $f_{c \max}$.

4.11 – Επίδρασεις στην ηχομείωση

4.11.1 - Επίδραση της απορρόφησης

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 (πχ. γυψοσανίδες) ενώ λίγο συμβάλει σε βαριές κατασκευές (πχ. πέτρινοι τοίχοι). Σε περίπτωση που δεν μπορούμε να γεμίσουμε το διάκενο με απορροφητικό υλικό (πχ. διπλά παράθυρα), το απορροφητικό μπορεί να

τοποθετηθεί περιμετρικά στο παράθυρο. Όσο μεγαλύτερο το πάχος του απορροφητικού τόσο καλύτερη η ηχομόνωση στις χαμηλές συχνότητες.

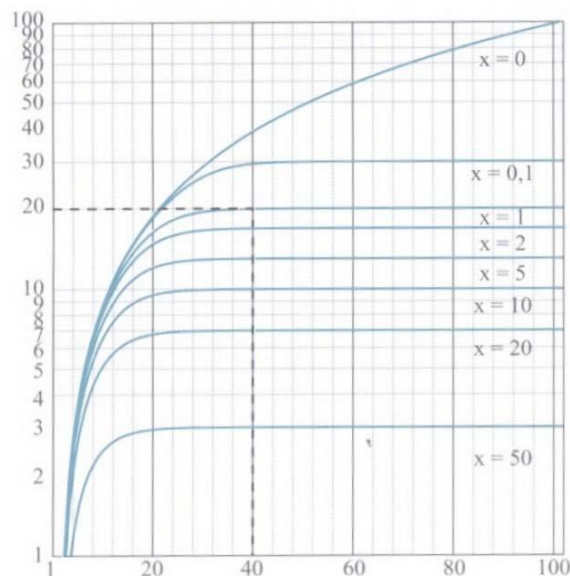


Σχήμα 16. Ηχομείωση από απλή επιφάνεια Α, από διπλή επιφάνεια χωρίς απορροφητικό υλικό Β και διπλής επιφάνειας με απορροφητικό υλικό Γ.

4.11.2 - Επίδραση των ανοιγμάτων

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 17 δείχνει την μεταβολή της ηχομείωσης ενός χωρίσματος σε συνάρτηση το % ποσοστό του ανοίγματος (σε σχέση με το συνολικό εμβαδόν της επιφάνειας).

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



Σχήμα 17. Μείωση του συντελεστή ηχομείωσης συναρτήσει του % ποσοστού του ανοίγματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας, για την ακουστική μελέτη και τροποποίηση μικρού κλειστού χώρου, χρησιμοποιείται ένα οικιακό δωμάτιο. Ο χώρος έχει σχήμα ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου και οι διαστάσεις του είναι: Μήκος=3.63m, Πλάτος=3.24m, Ύψος=2.45m. Σκοπός της πειραματικής διαδικασίας είναι η ηχομείωση του αερόφερτου θορύβου σε παρακείμενους χώρους και η μέτρηση της κρουστικής απόκρισης του χώρου για τη μελέτη της ακουστικής του.

5.1 – Περιγραφή χώρου προς μελέτη και τροποποίηση

5.1.1 – Δομικά στοιχεία χώρου

Η κατασκευή των χωρισμάτων δεν είναι ομοιόμορφη, δηλαδή κάθε χώρισμα μπορεί να αποτελείται από διαφορετικά υλικά κατασκευής, πίσω από το επίχρισμα. Παρακάτω αναλύονται τα δομικά στοιχεία του χώρου:

- Τοίχος με παράθυρο, με συνολική επιφάνεια 7.9m^2 αποτελείται από:
 - Σκυρόδεμα πάχους 20cm στο κάτω μέρος του τοιχώματος, με επιφάνεια 3.72m^2 .
 - Οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 20cm στην κολώνα και στο δοκάρι αυτού του τοιχώματος, με επιφάνεια 1.9m^2 .
 - Οπτόπλινθο πάχους 20cm στον υπόλοιπο τοίχο εκτός από το παράθυρο, με επιφάνεια 1.13m^2 .
 - Παράθυρο αλουμινίου με διπλό τζάμι, με επιφάνεια 1.15m^2 .
- Τοίχος με μήκος 3.63m με συνολική επιφάνεια 8.91m^2 αποτελείται από:
 - Σκυρόδεμα πάχους 20cm στο κάτω μέρος του τοιχώματος, με επιφάνεια 4.74m^2 .
 - Οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 20cm στο δοκάρι στο πάνω μέρος του τοιχώματος, με επιφάνεια 1.47m^2 .
 - Τσιμεντόπλινθο πάχους 20cm στο υπόλοιπο χώρισμα, με επιφάνεια 2.7m^2 .
- Τοίχος με μήκος 3.67m με συνολική επιφάνεια 10.26m^2 αποτελείται από:
 - Σκυρόδεμα πάχους 20cm που καλύπτει επιφάνεια 2.37m^2 .
 - Οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 20cm στην κολώνα και στο δοκάρι αυτού του τοιχώματος, με επιφάνεια 2.74m^2 .
 - Οπτόπλινθο πάχους 20cm στο υπόλοιπο χώρισμα, με επιφάνεια 5.15m^2 .
- Τοίχος με μήκος 2.155m με συνολική επιφάνεια 5.28m^2 αποτελείται από οπτόπλινθο πάχους 20cm σε ολόκληρο το χώρισμα.
- Οροφή με συνολική επιφάνεια 11.78m^2 αποτελείται από σκυρόδεμα πάχους 20cm σε ολόκληρο το χώρισμα.
- Πάτωμα με συνολική επιφάνεια 11.78m^2 αποτελείται από σκυρόδεμα πάχους 20cm σε ολόκληρο το χώρισμα και μωσαϊκό στην επιφάνειά του.



Εικόνα 1. Τοίχος με παράθυρο.



Εικόνα 2. Τοίχος με μήκος 3.63m.



Εικόνα 3. Τοίχος με μήκος 3.67m.



Εικόνα 4. Τοίχος με μήκος 2.155m.

5.1.2 – Χαρακτηριστικά δομικών υλικών

Για τον υπολογισμό της ηχομείωσης κάθε χωρίσματος χρειάζεται να γνωρίζουμε κάποια από τα χαρακτηριστικά των δομικών υλικών, όπως την πυκνότητα ρ , το μέτρο ελαστικότητας E και τον παράγοντα απωλειών n του υλικού. Παρακάτω συγκεντρώνονται οι τιμές που βρέθηκαν από τη βιβλιογραφία «Properties of materials», «Τεχνικά υλικά τόμος 4», «Noise and Vibration Control Engineering».

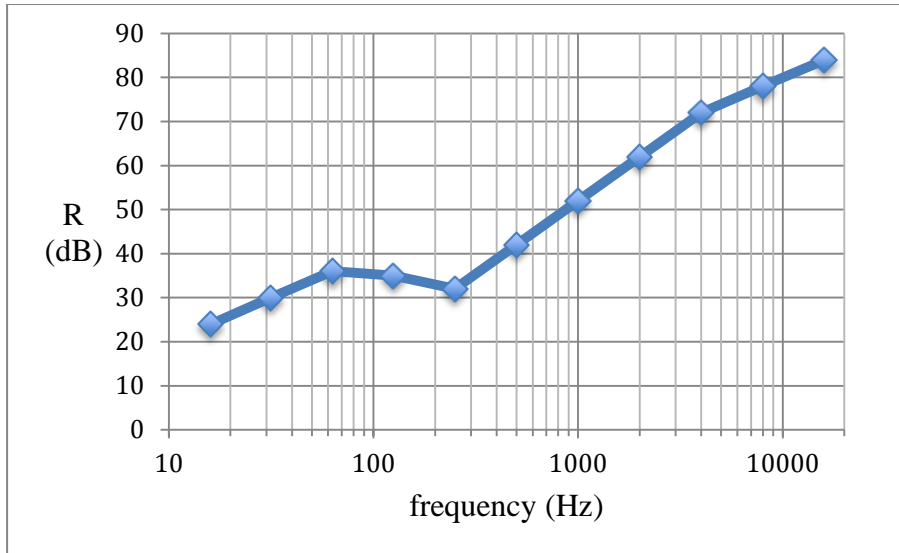
- Διάτρητος οπτόπλινθος (Brick)
Πυκνότητα $\rho=1100\text{kg/m}^3$
Επιφανειακή πυκνότητα $m=\rho h=220\text{kg/m}^2$
Μέτρο ελαστικότητας $E=3.25*10^9\text{Pa}$
Παράγοντας απωλειών $n=0.01$
- Τσιμεντόπλινθος (Concretebrick)
Πυκνότητα $\rho=1500\text{kg/m}^3$
Επιφανειακή πυκνότητα $m=\rho h=300\text{kg/m}^2$
Μέτρο ελαστικότητας $E=6.5*10^9\text{Pa}$
Παράγοντας απωλειών $n=0.01$
- Σκυρόδεμα (Concrete)
Πυκνότητα $\rho=2300\text{kg/m}^3$
Επιφανειακή πυκνότητα $m=\rho h=460\text{kg/m}^2$
Μέτρο ελαστικότητας $E=36*10^9\text{Pa}$
Παράγοντας απωλειών $n=0.01$
- Οπλισμένο σκυρόδεμα (Concrete reinforced)
Πυκνότητα $\rho=2400\text{kg/m}^3$
Επιφανειακή πυκνότητα $m=\rho h=480\text{kg/m}^2$
Μέτρο ελαστικότητας $E=39*10^9\text{Pa}$
Παράγοντας απωλειών $n=0.01$

Για την τιμή του παράγοντα απωλειών χρησιμοποιήθηκε η ελάχιστη τιμή ($n=0.01$) και για το μέτρο ελαστικότητας ο μέσος όρος του εύρους των τιμών.

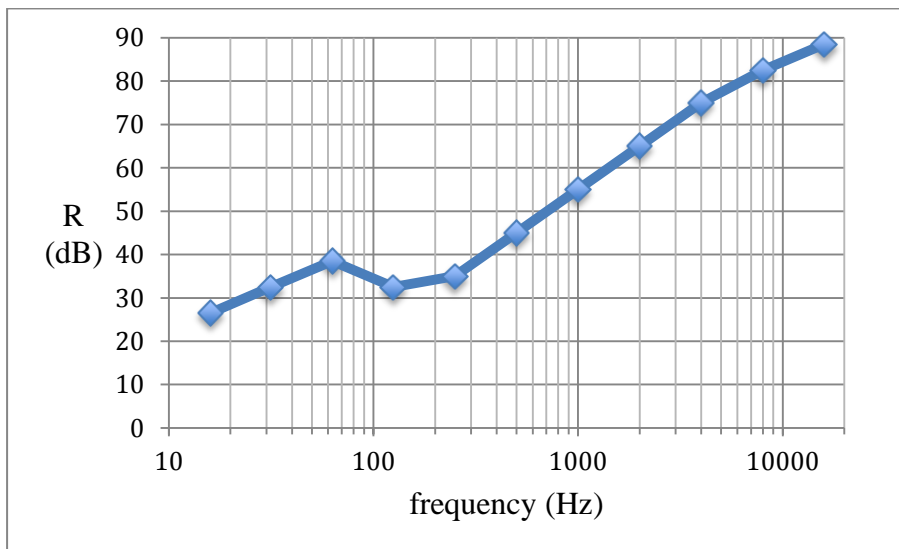
5.2 – Υπολογισμός ηχομείωσης χωρισμάτων

Παρακάτω παρουσιάζεται ο υπολογισμός της ηχομείωσης των χωρισμάτων της υπάρχουσας κατασκευής. Για τους υπολογισμούς το επίχρισμα δεν θα επηρεάσει τη συμπεριφορά του χωρίσματος στις χαμηλές συχνότητες. Επίσης, η ηχομείωση της πόρτας δεν υπολογίζεται σε αυτό το στάδιο της μελέτης.

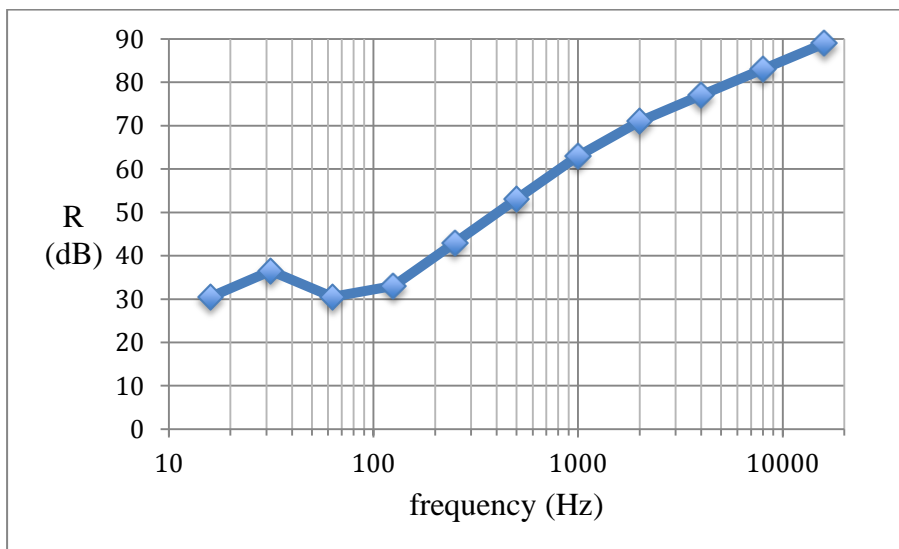
Υπολογίζεται η ηχομείωση σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τα τέσσερα διαφορετικά δομικά υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή. Ο υπολογισμός έγινε σύμφωνα με τη «Μεθοδολογία υπολογισμού ηχομείωσης απλών επιφανειών». Τα αποτελέσματα φαίνονται στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις:



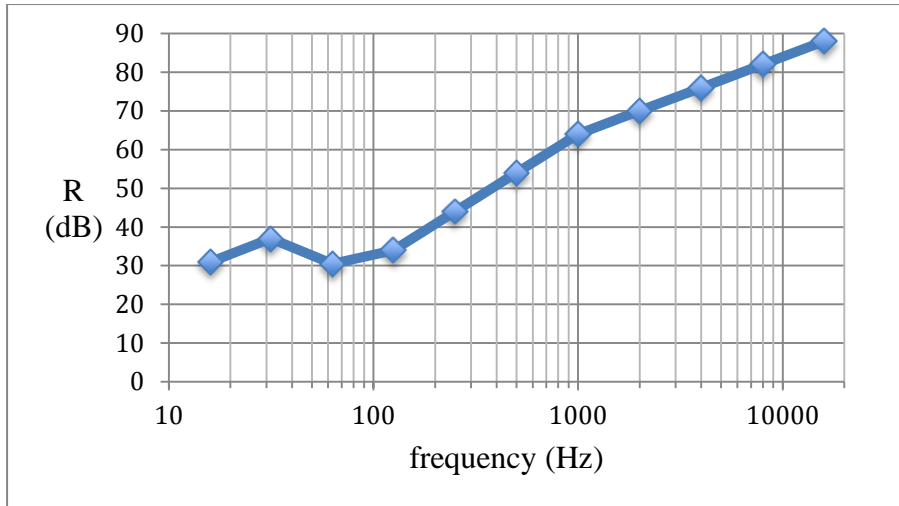
Σχήμα 18. Δείκτης ηχομείωσης οπτόπλινθου.



Σχήμα 19. Δείκτης ηχομείωσης τσιμεντόπλινθου.



Σχήμα 20. Δείκτης ηχομείωσης σκυροδέματος.



Σχήμα 21. Δείκτης ηχομείωσης οπλισμένου σκυροδέματος.

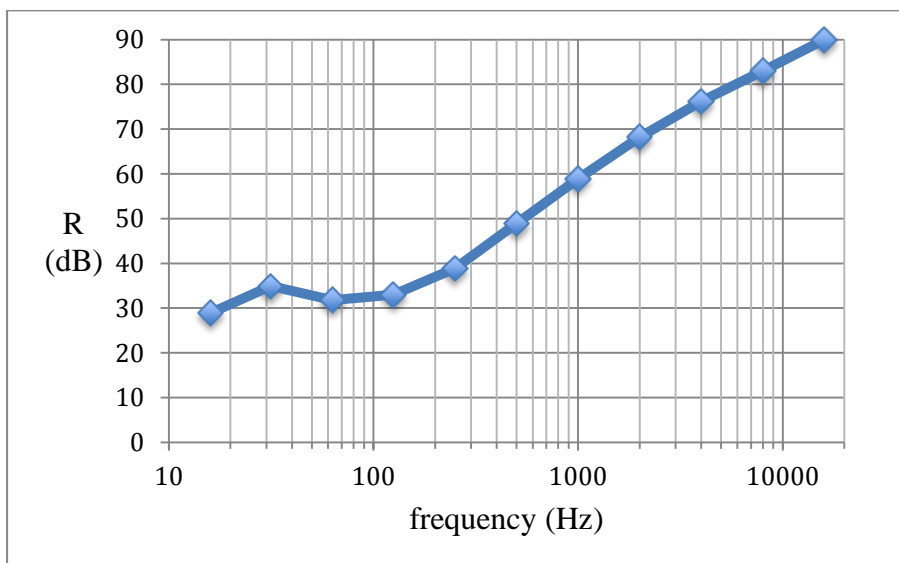
Επειδή το κάθε χώρισμα δεν είναι ομογενές, αλλά αποτελείται από διαφορετικά υλικά, θα υπολογίσουμε την ηχομείωση σύμφωνα με το μέσο συντελεστή διάδοσης σε κάθε χώρισμα για κάθε οκτάβα, χρησιμοποιώντας τους τύπους της παραγράφου «Υπολογισμός δείκτη ηχομείωσης σύνθετων επιφανειών».

Για το πάτωμα δεν είναι απαραίτητο να υπολογιστεί η ηχομείωσή του, επειδή αφενός κάτω από το πάτωμα δεν υπάρχει τίποτα παρά μόνο χώμα, αφετέρου η ηχομείωσή του αντιστοιχεί στο παραπάνω γράφημα που μας δίνει την ηχομείωση του σκυροδέματος (σχήμα 20), επειδή το χώρισμα είναι ομογενές.

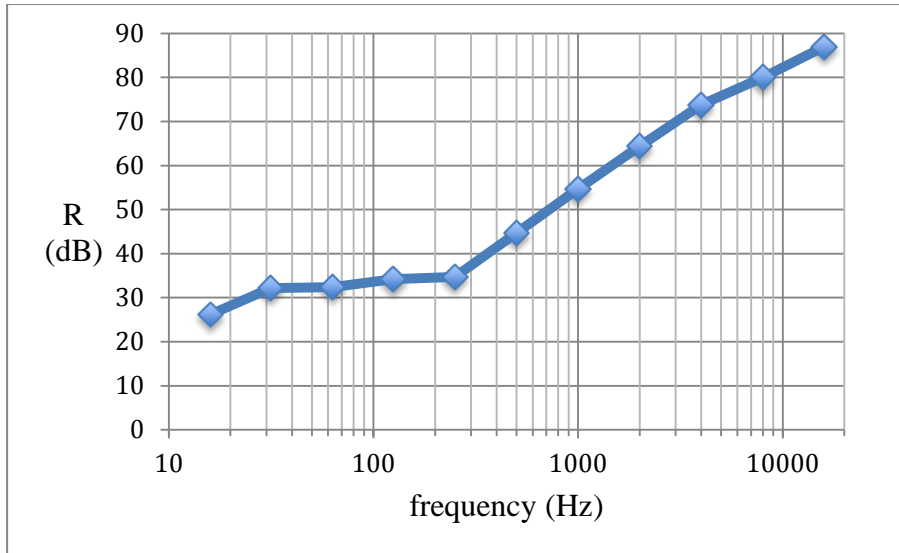
Επίσης, για το ταβάνι του δωματίου, δεν είναι απαραίτητο να υπολογιστεί η ηχομείωσή του, επειδή το χώρισμα είναι ομογενές, η ηχομείωσή του αντιστοιχεί στο παραπάνω γράφημα που μας δίνει την ηχομείωση του σκυροδέματος. (σχήμα 20)

Ακόμα, ο τοίχος με μήκος 2.155m αποτελείται εξολοκλήρου από οπτόπλινθους, άρα είναι ομογενής και η ηχομείωσή του αντιστοιχεί στο παραπάνω γράφημα που μας δίνει την ηχομείωση του οπτόπλινθου. (σχήμα 18)

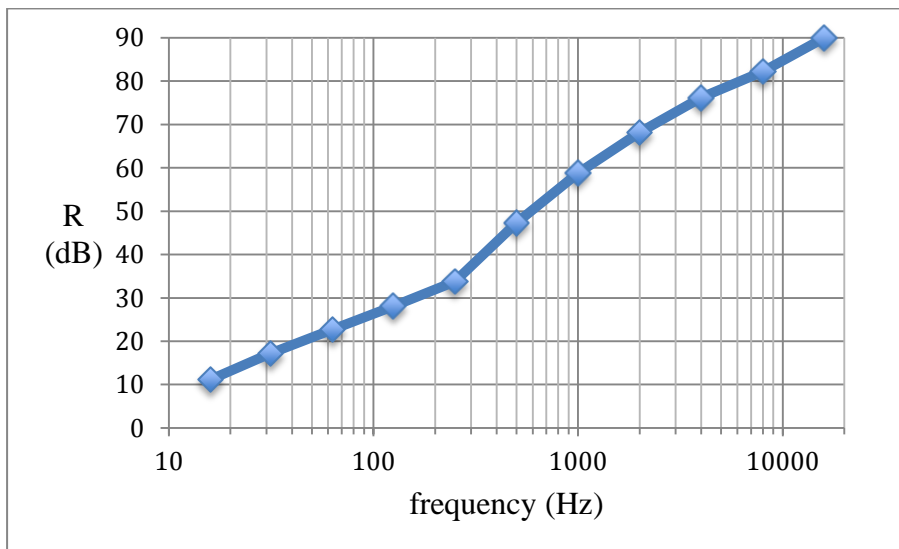
Τα αποτελέσματα για τα υπόλοιπα 3 χωρίσματα φαίνονται παρακάτω.



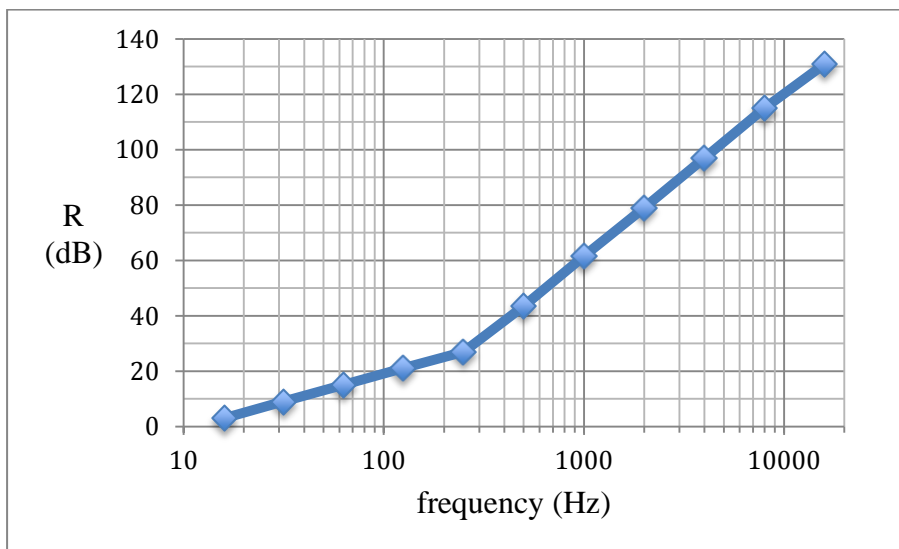
Σχήμα 22. Δείκτης ηχομείωσης τοίχου με μήκος 3.63m.



Σχήμα 23. Δείκτης ηχομείωσης τοίχου με μήκος 3.67m.



Σχήμα 24. Δείκτης ηχομείωσης τοίχου με παράθυρο.



Σχήμα 25. Δείκτης ηχομείωσης παραθύρου.

Στην περίπτωση του τοίχου με παράθυρο, το παράθυρο είναι κατασκευασμένο με διπλό γυαλί των 4mm τοποθετημένο σε απόσταση 16mm. Η ηχομείωση αυτής της κατασκευής φαίνεται στο σχήμα 25. Για τον υπολογισμό της ηχομείωσης του τοίχου με παράθυρο, χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές από το γράφημα του σχήματος 25 με την ηχομείωση του παραθύρου για ολόκληρη την επιφάνεια του παραθύρου (1.15m^2), ενώ στην πραγματικότητα η επιφάνεια αυτή περιλαμβάνει και την κατασκευή αλουμινίου του παραθύρου.

5.3 – Παρεμβάσεις ηχομόνωσης

Σε αυτό το στάδιο της εργασίας, σκοπός είναι η ηχομείωση του αερόφερτου θορύβου από και προς παρακείμενους χώρους. Στη συγκεκριμένη περίπτωση μας ενδιαφέρει η αύξηση της ηχομείωσης στα τρία από τα έξι χωρίσματα του δωματίου. Το πάτωμα και ο τοίχος με μήκος 3.63m δεν έχουν παρακείμενους χώρους, άρα θα ήταν πλεόνασμα κάποια επένδυση ηχομόνωσης σε αυτά τα χωρίσματα. Επίσης, στο χωρίσμα που περιλαμβάνει το παράθυρο το οποίο καλύπτει το 15% της επιφάνειας του χωρίσματος, η όποια επένδυση θα λειτουργούσε χωρίς αποτέλεσμα από τη στιγμή που δεν πρόκειται να επέμβουμε στο παράθυρο.

Θα ασχοληθούμε με την αύξηση της ηχομείωσης στην οροφή, στον τοίχο με μήκος 3.67m και στον τοίχο με μήκος 2.155m. Με τη χρήση διπλών τοιχωμάτων μπορούμε να επιτύχουμε αρκετά ικανοποιητικούς δείκτες ηχομείωσης με σχετικά ελαφρές κατασκευές. Μία αποτελεσματική λύση είναι η κατασκευή τοιχοποιίας με γυψοσανίδες.

5.3.1 – Γυψοσανίδες

Οι γυψοσανίδες είναι επίπεδα, ορθογώνια δομικά στοιχεία μικρού πάχους, που αποτελούνται από γυψοπυρήνα επενδυμένο με χαρτί, το οποίο αποτελεί τον οπλισμό και διασφαλίζει εξαιρετικής ποιότητας επιφάνεια. Ανάλογα με την εφαρμογή προσδίδονται στην γυψοσανίδα με ειδική επεξεργασία και πρόσμικτα οι απαιτούμενες ιδιότητες. Οι γυψοσανίδες στερεώνονται εύκολα με βίδες σε μεταλλικό σκελετό, με καρφιά σε ξύλινο σκελετό ή γυψόκολλες σε υπάρχουσα τοιχοποιία. Σε συνδυασμό με ινώδη μονωτικά υλικά συνθέτουν δομικά στοιχεία που παρέχουν υψηλή ηχομόνωση υπερκαλύπτοντας και τις πλέον αυστηρές προδιαγραφές.

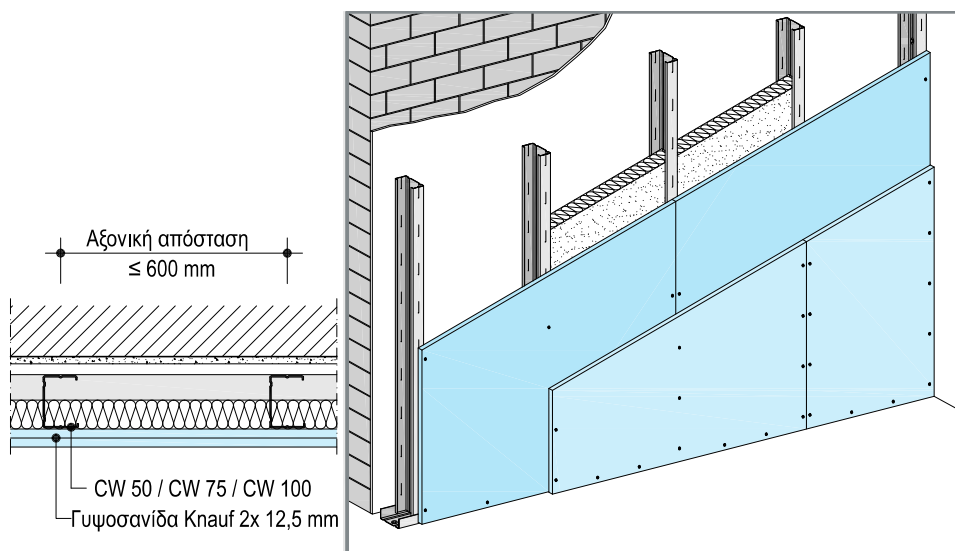
Για την περίπτωση της ηχομόνωσης, η επιλογή κατασκευής τοιχοποιίας με γυψοσανίδες σε απόσταση από την υπάρχουσα κατασκευή είναι μία ιδανική λύση ως προς το αποτέλεσμα της ηχομόνωσης, επειδή η γυψοσανίδα έχει πολύ μεγάλο παράγοντα απωλειών σε σχέση με άλλα υλικά.

5.3.2 – Κατασκευή με γυψοσανίδες

Στην κατασκευή μας θα χρησιμοποιήσουμε γυψοσανίδες τύπου Στάνταρντ Α με λοξά κατά μήκος άκρα ΑΚ, οι οποίες είναι οι κανονικές δομικές γυψοσανίδες και χρησιμεύουν για την κατασκευή οροφών, διαχωριστικών τοίχων, για εσωτερική επένδυση εξωτερικών τοίχων και για όποια άλλη εσωτερική κατασκευή. Επιδέχονται οποιαδήποτε διακοσμητική επεξεργασία και φινιρίσμα. Οι διαστάσεις τους είναι $2.5\text{m} \times 1.2\text{m}$ με πάχος 12.5mm.

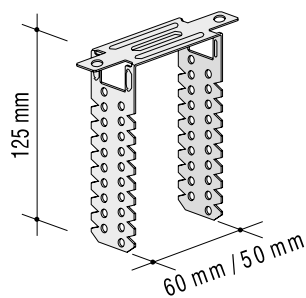
Η προσθήκη μονωτικού, πορώδους υλικού στο διάκενο μεταξύ γυψοσανίδας και της υπάρχουσας κατασκευής, σε επαφή με τη γυψοσανίδα, θα μειώσει τη συχνότητα συντονισμού του διάκενου (f_0), με αποτέλεσμα την αύξηση της

ηχομείωσης του χωρίσματος στις χαμηλές συχνότητες, πάνω από την f_0 . Για να το πετύχουμε αυτό θα χρησιμοποιήσουμε τις ειδικές πλάκες ορυκτοβάμβακα Ultracoustic P, οι οποίες είναι μονωτικές πλάκες φυσικού ορυκτοβάμβακα χωρισμάτων ξηράς δόμησης με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $\lambda = 0.037\text{W/m}$ και παρουσιάζουν εξαιρετική ηχοαπορρόφηση με αντίσταση στη ροή του αέρα $r > 5\text{kPa s/m}^2$. Οι πλάκες που θα χρησιμοποιήσουμε έχουν διαστάσεις $1.2\text{m} \times 0.6\text{m}$ και πάχος 45mm .

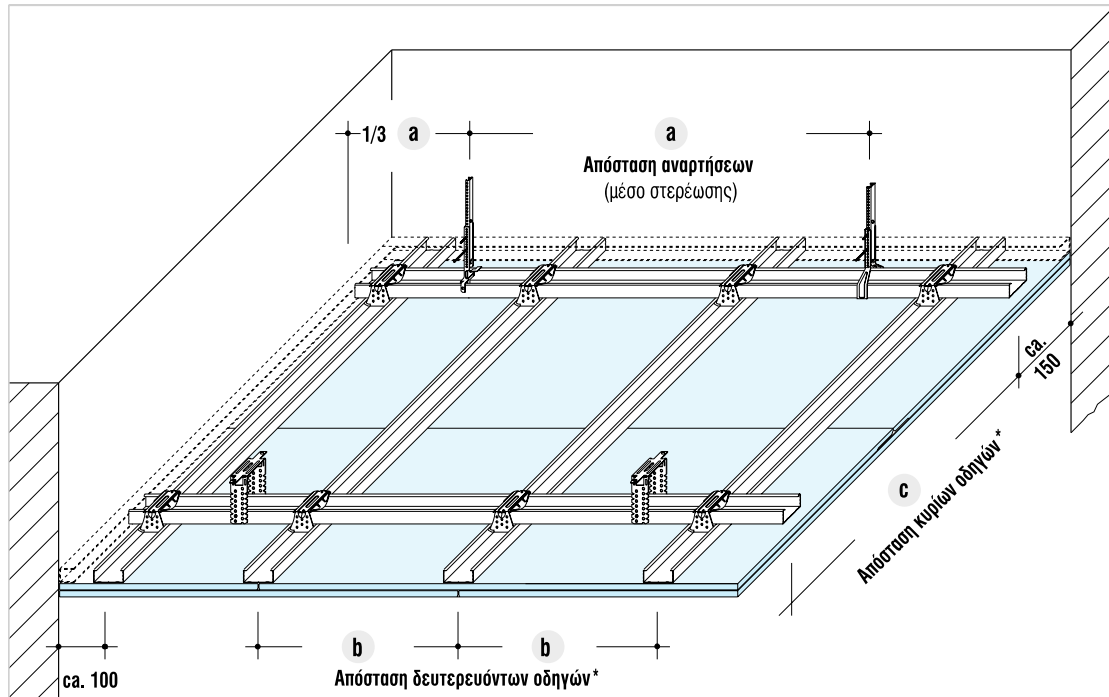


Σχήμα 26. W626 Επένδυση Knauf σε μεταλλικό σκελετό ορθοστατών με ελεύθερη στερέωση και δύο στρώσεις γυψοσανίδων.

Στους δύο τοίχους όπου θέλουμε να αυξηθεί η ηχομόνωση των χωρισμάτων, η κατασκευή θα γίνει σύμφωνα με το σύστημα επενδύσεων τοίχων W626 της Knauf, με ελεύθερη στερέωση μεταλλικού σκελετού, δηλαδή ο μεταλλικός σκελετός δεν εφάπτεται με το χώρισμα πίσω του, αλλά στηρίζεται στα χωρίσματα που βρίσκονται περιμετρικά από αυτό, με διπλή στρώση γυψοσανίδας και πλάκες ορυκτοβάμβακα Ultracoustic. Σε κατακόρυφα διατεταγμένους ορθοστάτες σε απόσταση 60cm οι οποίοι τοποθετούνται μέσα στους στρωτήρες και ευθυγραμμίζονται, οι στρωτήρες τοποθετούνται σε δάπεδο και οροφή. Τα προφίλ που εφάπτονται περιμετρικά σε δομικά στοιχεία πρέπει να σφραγίζονται με ελαστικά κορδόνια όταν υπάρχουν απαιτήσεις ηχομόνωσης. Τα περιμετρικά προφίλ πρέπει να στερεώνονται στα δομικά στοιχεία σε αποστάσεις 1m , στις τοιχοποιίες απαιτούνται τουλάχιστον 3 σημεία στήριξης. Στα συμπαγή δομικά στοιχεία χρησιμοποιούμε πλαστικά ή μεταλλικά εκτονούμενα βύσματα, για μη συμπαγή δομικά στοιχεία ειδικά για το δομικό στοιχείο μέσο στερέωσης.



Σχήμα 27. Άμεση ανάρτηση «Π».

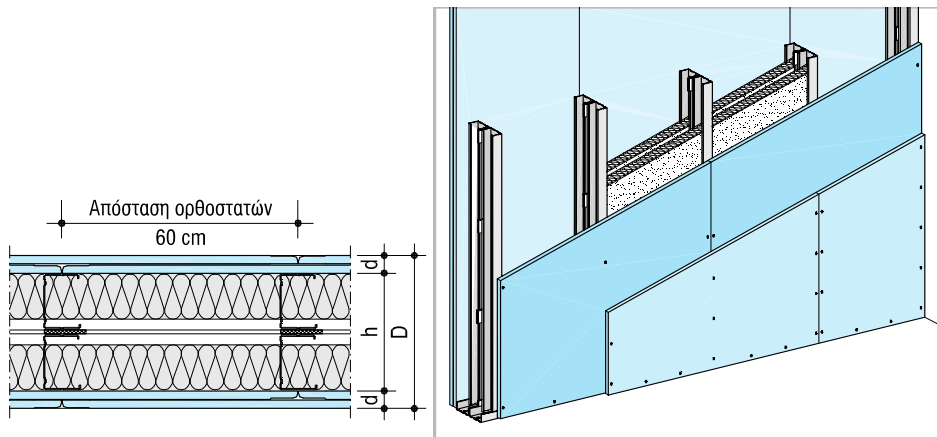


Σχήμα 28. D112 Οροφή Knauf – Αναρτημένος μεταλλικός σκελετός με κύριους και δευτερεύοντες οδηγούς CD προφίλ Knauf.

Στην οροφή, η κατασκευή θα γίνει σύμφωνα με το σύστημα D112 της Knauf, σε μεταλλικό σκελετό με άμεση αντικραδαστική ανάρτηση σε σχήμα «Π», με διπλή στρώση γυψοσανίδας και πλάκες ορυκτοβάμβακα Ultracoustic. Οι άμεσες αναρτήσεις αποτελούνται από ένα ενιαίο έλασμα χάλυβα σε μορφή «Π» και χρησιμοποιούνται για την ανάρτηση σκελετού σε οροφές, όπου το ύψος είναι περιορισμένο. Η άμεση ανάρτηση εφαρμόζεται με εκτονούμενο μεταλλικό βύσμα στο φέροντα οργανισμό και ανάμεσα στα σκέλη τοποθετείται ο κύριος οδηγός. Ο οδηγός αλφαδιάζεται και τα σκέλη βιδώνονται στα πλευρά του οδηγού. Κάθετα με τον κύριο οδηγό συνδέεται ο δευτερεύων οδηγός με τους συνδετήρες «Π». Οι γυψοσανίδες τοποθετούνται κάθετα στους δευτερεύοντες οδηγούς. Σημαντικός παράγον για την στατική επάρκεια όλης της οροφής είναι η ποιότητα του βύσματος και του φέροντος οργανισμού, καθώς και ο τρόπος εφαρμογής του βύσματος. Για την κάλυψη των απαιτήσεων ηχομόνωσης στην επαφή της ανάρτησης με το φέροντα οργανισμό απαιτείται η τοποθέτηση ελαστικής διακοπής η οποία αποτρέπει τις ηχογέφυρες.

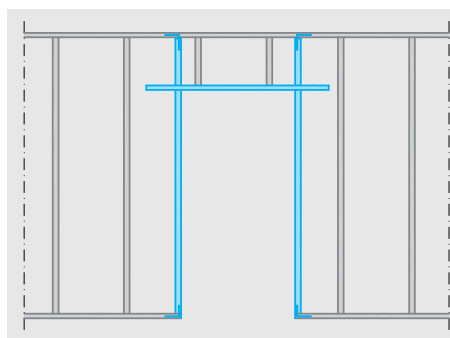
Οι αποστάσεις των αναρτήσεων και των οδηγών εξαρτώνται από το συνολικό φορτίο της οροφής. Το ολικό φορτίο είναι το άθροισμα του βάρους της γυψοσανίδας, του σκελετού και του μονωτικού υλικού. Το βάρος της συγκεκριμένης κατασκευής, σύμφωνα με τον κατασκευαστή, είναι μέγιστο 33kg/m^2 , με την άμεση ανάρτηση «Π» που ανήκει στην κατηγορία ανάρτησης 0.40kN να καλύπτει τις ανάγκες μας.

Η σύνδεση της οροφής με τους παράπλευρους τοίχους γίνεται με περιμετρικό προφίλ, το οποίο στερεώνεται στον τοίχο με βύσματα και βίδες και μέγιστη απόσταση στερέωσης 60cm . Για απαιτήσεις ηχομόνωσης προβλέπεται σφράγισμα με ακρυλική μαστίχα στην επαφή του προφίλ με τον τοίχο.

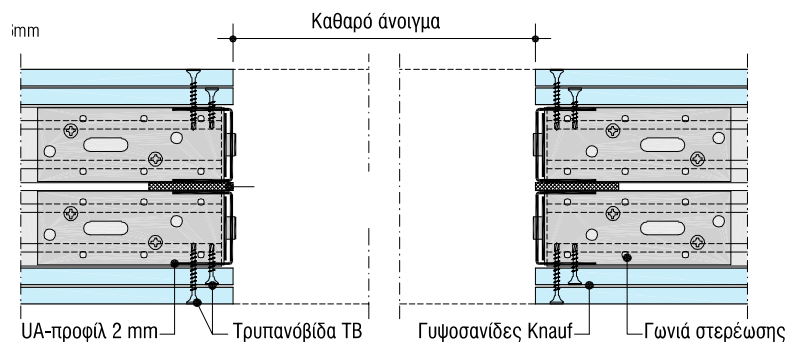


Σχήμα 29. W115 Τοιχοποιία διπλού μεταλλικού σκελετού με διπλή στρώση γυψοσανίδας.

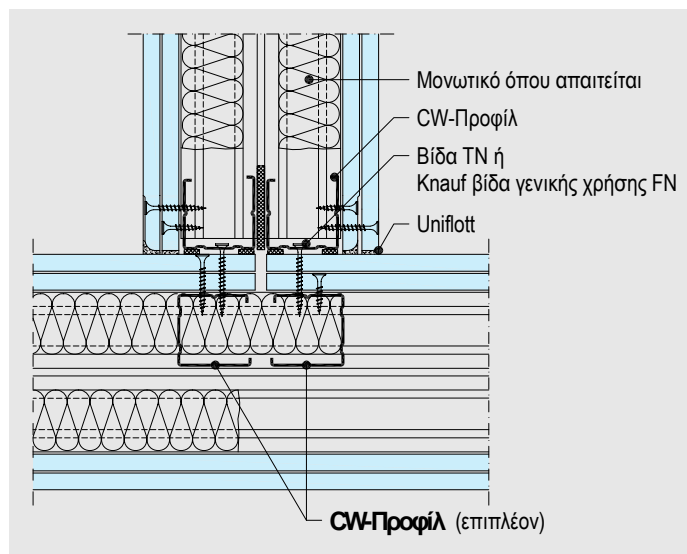
Ένα άλλο ζητούμενο είναι να κατασκευασθεί καινούρια πόρτα με ηχομονωτικές ιδιότητες. Για να τοποθετηθεί η καινούρια πόρτα θα γίνει κατασκευή τοιχοποιίας από γυψοσανίδες, η οποία θα είναι επέκταση της υπόλοιπης κατασκευής, αφήνοντας ένα άνοιγμα για την τοποθέτηση της πόρτας. Η τοιχοποιία γυψοσανίδας θα γίνει σύμφωνα με το σύστημα W115 της Knauf, τοιχοποιία υψηλής ηχομόνωσης η οποία αποτελείται από διπλό μεταλλικό σκελετό και διπλή στρώση γυψοσανίδας σε κάθε πλευρά. Για τις απαιτήσεις ηχομόνωσης τοποθετείται διπλός σκελετός αποφεύγοντας τις ηχογέφυρες. Ενδιάμεσα των σημείων επαφής των σκελετών παρεμβάλλεται αφρώδης ηχομονωτική ταινία. Οι τοίχοι Knauf αποτελούνται από μεταλλικούς γαλβανισμένους στρωτήρες UW που στερεώνονται στο φέροντα οργανισμό του κτιρίου με βίδες και βύσματα, από μεταλλικούς γαλβανισμένους ορθοστάτες CW που ενώνονται με τους στρωτήρες δημιουργώντας έναν ενιαίο σκελετό, από πλάκες ορυκτοβάμβακα τοποθετημένες ανάμεσα στους ορθοστάτες και από γυψοσανίδες που βιδώνονται εκατέρωθεν του μεταλλικού σκελετού. Οι ορθοστάτες περιμετρικά του ανοίγματος της πόρτας πρέπει να είναι σταθεροί και αντοχής ώστε να φέρουν το φορτίο της πόρτας. Για το λόγο αυτό πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψιν κατά την κατασκευή το πάχος, το ύψος του τοίχου, το βάρος της πόρτας και ο τρόπος χρήσης της. Συγκεκριμένα για ανοίγματα με φύλλο πόρτας πάνω από 25kg απαιτείται η χρήση μεταλλικού ενισχυμένου ορθοστάτη UA-προφίλ πάχους λαμαρίνας 2mm, στις πλευρές του ανοίγματος σε όλο το ύψος του τοίχου. Ο αρμός των γυψοσανίδων δεν πρέπει να διαμορφώνεται σε συνέχεια του ανοίγματος της πόρτας. Η ένωσή τους πρέπει να γίνεται πάντα σε ενδιάμεσο ορθοστάτη στο υπέρθυρο. Ο ορθοστάτης στο υπέρθυρο θα πρέπει να τοποθετείται τουλάχιστον 15cm από το άνοιγμα της πόρτας.



Σχήμα 30. Μεταλλική δομή για το άνοιγμα της πόρτας.



Σχήμα 31. Καθαρό άνοιγμα πόρτας.



Σχήμα 32. Ένωση «Τ» - Σύνδεση με CW-προφίλ για την ένωση των δύο κάθετων τοίχων γυψοσανίδας.

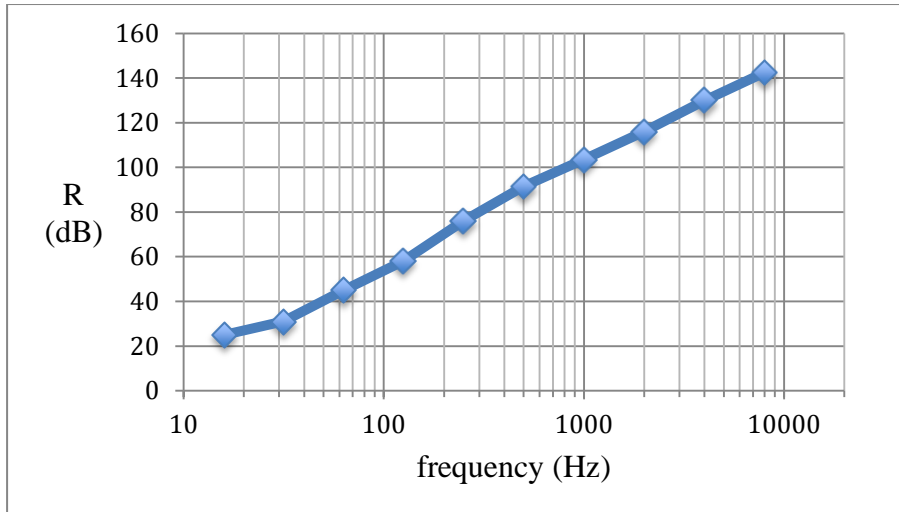
5.3.3 – Υπολογισμός ηχομείωσης διπλών χωρισμάτων με επένδυση

Για να υπολογίσουμε την ηχομείωση που θα παρουσιάζει το κάθε χώρισμα με την επένδυση γυψοσανίδας, θα πρέπει να γνωρίζουμε τα χαρακτηριστικά του υλικού της γυψοσανίδας τα οποία μας τα δίνει ο κατασκευαστής.

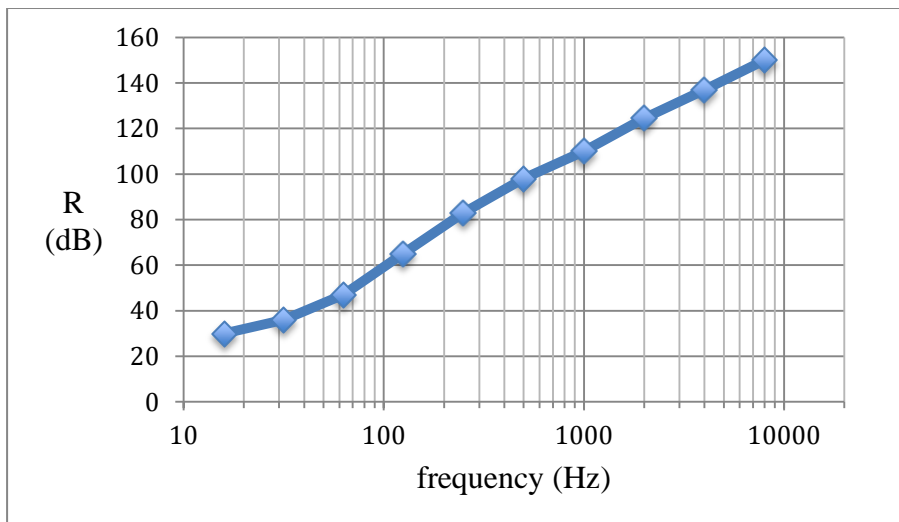
- Πυκνότητα $\rho=700\text{kg/m}^3$
- Επιφανειακή πυκνότητα $m=\rho h=17.5\text{kg/m}^2$ ($h=2*12.5\text{mm}$)
- Μέτρο ελαστικότητας $E=4.1*10^9\text{Pa}$

Πρώτα υλοποιήθηκε η κατασκευή στον τοίχο με μήκος 3.67m, η γυψοσανίδα τοποθετήθηκε σε απόσταση 16cm από τον τοίχο. Υπολογίζουμε τη συνολική ηχομείωση του διπλού χωρίσματος σε συνάρτηση με τη συχνότητα σύμφωνα με τη «Μεθοδολογία υπολογισμού δείκτη ηχομείωσης διπλών επιφανειών». Τα αποτελέσματα φαίνονται στις γραφικές παραστάσεις των σχημάτων 33 και 34.

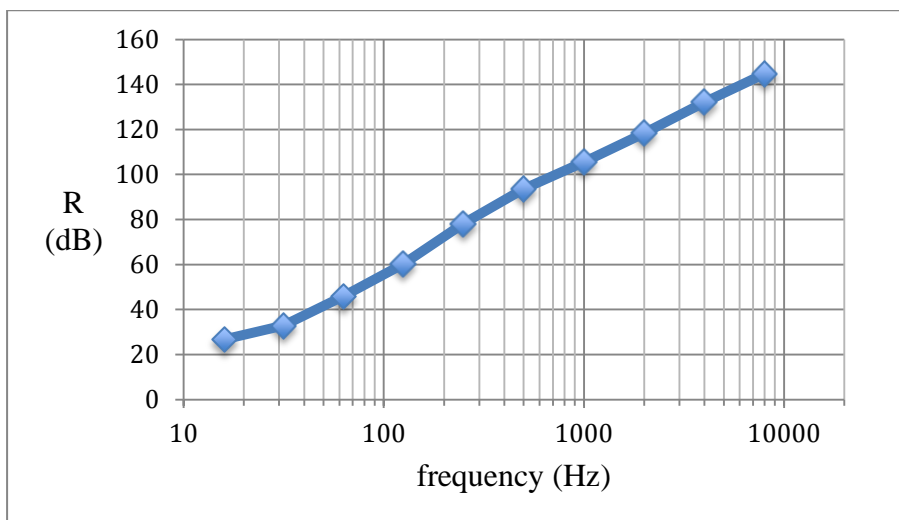
Επειδή το χώρισμα δεν είναι ομογενές, θα υπολογίσουμε την ηχομείωση σύμφωνα με το μέσο συντελεστή διάδοσης για κάθε οκτάβα, χρησιμοποιώντας τους τύπους της παραγράφου «Υπολογισμός δείκτη ηχομείωσης σύνθετων επιφανειών» (σχήμα 35).



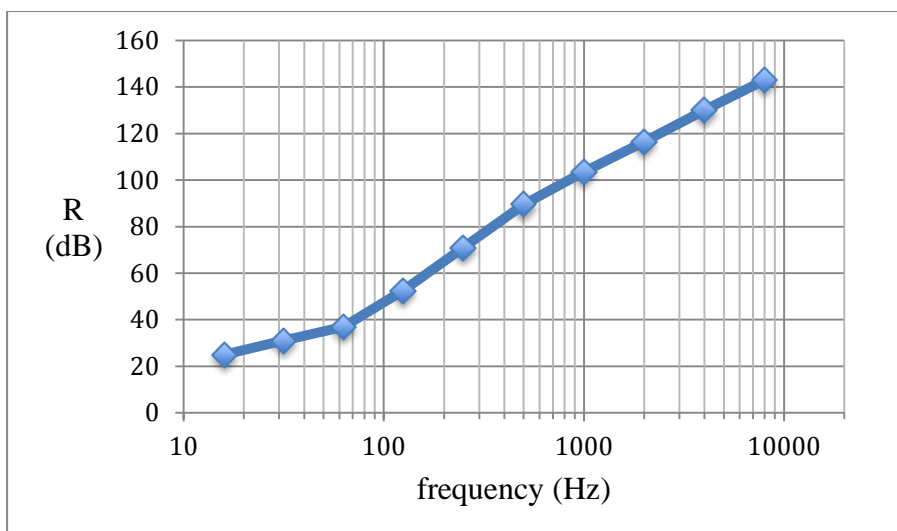
Σχήμα 33. Δείκτης ηχομείωσης οπτόπλινθου με επένδυση διπλής γυψοσανίδας σε απόσταση 16cm.



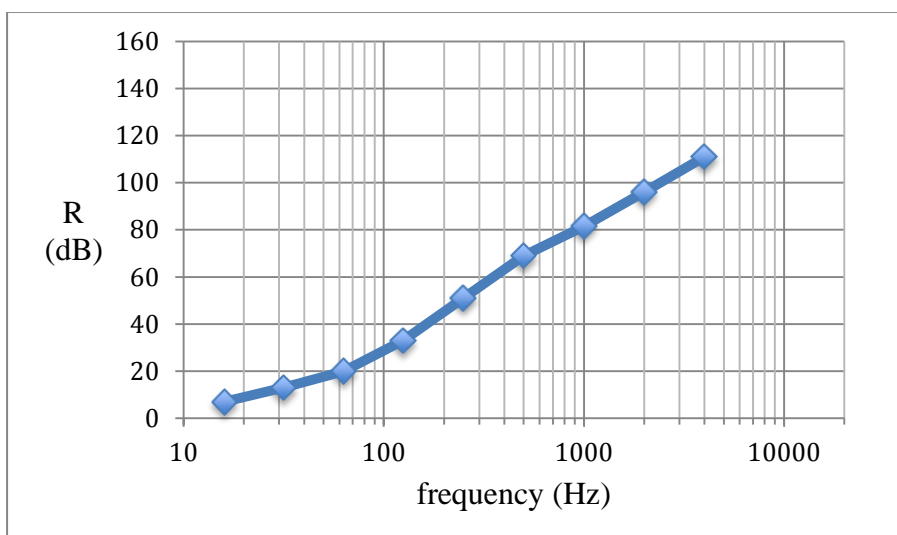
Σχήμα 34. Δείκτης ηχομείωσης σκυροδέματος και οπλισμένου σκυροδέματος με επένδυση διπλής γυψοσανίδας σε απόσταση 16cm.



Σχήμα 35. Δείκτης ηχομείωσης τοίχου με μήκος 3.67m με επένδυση διπλής γυψοσανίδας σε απόσταση 16cm.



Σχήμα 36. Δείκτης ηχομείωσης τοίχου με μήκος 2.155m με επένδυση διπλής γυψοσανίδας σε απόσταση 8cm.



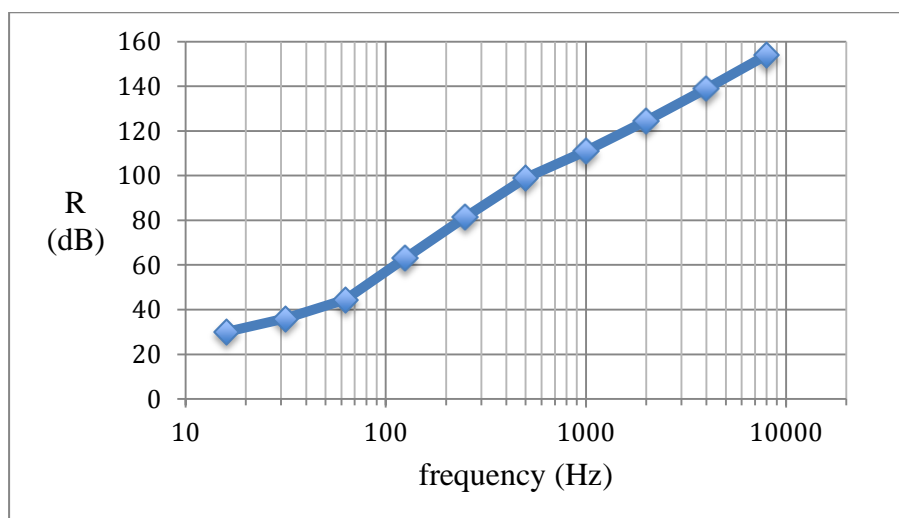
Σχήμα 37. Δείκτης ηχομείωσης τοιχοποιίας με διπλή γυψοσανίδα σε κάθε πλευρά και διάκενο 10.5cm.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η κατασκευή στον τοίχο με μήκος 2.155m, η γυψοσανίδα τοποθετήθηκε σε απόσταση 8cm από τον τοίχο. Ως επέκταση αυτής της κατασκευής κατασκευάζεται η τοιχοποιία γυψοσανίδας περιμετρικά από το άνοιγμα της πόρτας και καταλήγει να εφάπτεται κάθετα στην προηγούμενη επένδυση. Στην τοιχοποιία γυψοσανίδας το διάκενο είναι 10.5cm. Υπολογίζουμε τη συνολική ηχομείωση των δύο διπλών χωρισμάτων σε συνάρτηση με τη συχνότητα σύμφωνα με τη «Μεθοδολογία υπολογισμού δείκτη ηχομείωσης διπλών επιφανειών». Τα αποτελέσματα φαίνονται στις γραφικές παραστάσεις των σχημάτων 36 και 37.

Εν τέλει κατασκευάστηκε η επένδυση στην οροφή, η γυψοσανίδα αναρτήθηκε σε απόσταση 11.5cm από την οροφή. Υπολογίζουμε τη συνολική ηχομείωση της οροφής με επένδυση σε συνάρτηση με την συχνότητα σύμφωνα με τη «Μεθοδολογία υπολογισμού δείκτη ηχομείωσης διπλών επιφανειών». Τα αποτελέσματα φαίνονται στη γραφική παράσταση του σχήματος 38.

Όλοι οι θεωρητικοί υπολογισμοί της ηχομείωσης των χωρισμάτων με επένδυση έχουν πραγματοποιηθεί χωρίς τον υπολογισμό του πορώδους υλικού στο

διάκενο. Η προσθήκη του ορυκτοβάμβακα στο διάκενο, σε επαφή με τη γυψοσανίδα, μειώνει τη συχνότητα συντονισμού του διακένου (f_0), με αποτέλεσμα την αύξηση της ηχομείωσης του χωρίσματος στις χαμηλές συχνότητες, πάνω από την f_0 .



Σχήμα 38. Δείκτης ηχομείωσης οροφής με επένδυση διπλής γυψοσανίδας σε απόσταση 11.5cm.

5.4 – Κατασκευή ηχομονωτικής πόρτας

Το καθαρό άνοιγμα που αφήνουμε για την πόρτα είναι 1.95m x 0.715m. Για την κατασκευή της κάσας της πόρτας χρησιμοποιήθηκε κόντρα πλακέ θαλάσσης με πυκνότητα 654kg/m^3 . Στην ένωση μεταξύ τοίχου και κάσας το κενό γεμίζει με πεπιεσμένο ορυκτοβάμβακα και ο αρμός ένωσης σφραγίζεται με ελαστικό στόκο και από τις δύο πλευρές. Το άνοιγμα που αφήνει η κάσα είναι 1.902m x 0.668m.

Για το τελάρο της πόρτας χρησιμοποιήθηκε σουηδικό καδρόνι με πυκνότητα 513kg/m^3 . Το τελάρο της πόρτας αποτελείται από:

- 2 σουηδικά καδρόνια με διαστάσεις 1.787m x 0.07m x 0.045m, το βάρος τους είναι 5.78kg.
- 2 σουηδικά καδρόνια με διαστάσεις 0.662m x 0.07m x 0.044m, το βάρος τους είναι 2.09kg.
- 3 σουηδικά καδρόνια με διαστάσεις 0.57m x 0.03m x 0.045m, το βάρος τους είναι 1.18kg.
- 1 κόντρα πλακέ θαλάσσης με διαστάσεις 0.662m x 0.07m x 0.018m, το βάρος του είναι 0.55kg.

Για το κέλυφος της πόρτας χρησιμοποιήθηκε μοριοσανίδα με πυκνότητα 675kg/m^3 και μέτρο ελαστικότητας $3.8 \cdot 10^9\text{Pa}$. Το κέλυφος της πόρτας αποτελείται από:

- 2 μοριοσανίδες με διαστάσεις 1.787m x 0.57m x 0.008m, το βάρος τους είναι 11kg.
- 1 μοριοσανίδα με διαστάσεις 1.895m x 0.661m x 0.016m, το βάρος της είναι 13.53kg.
- 1 μοριοσανίδα με διαστάσεις 1.946m x 0.702m x 0.016m, το βάρος της είναι 14.75kg.

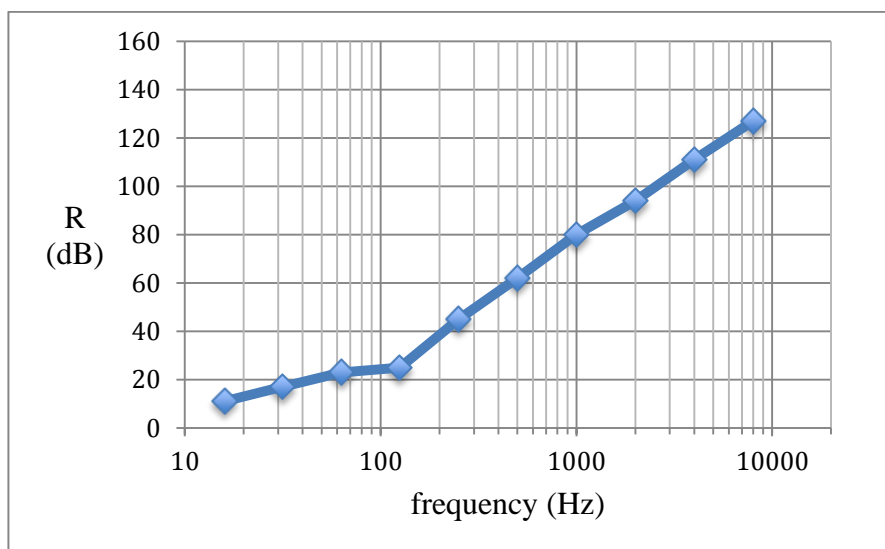
Το συνολικό βάρος της πόρτας είναι περίπου 49kg και στηρίζεται στη σταθερή κατασκευή με τρεις μεντεσέδες υψηλής αντοχής.

Η κατασκευή του θυρόφυλλου της πόρτας αποτελείται από δύο μοριοσανίδες σε κάθε πλευρά της, μία μοριοσανίδα πάχους 8mm η οποία τοποθετείται εσωτερικά του τελάρου και μία μοριοσανίδα πάχους 16mm η οποία τοποθετείται εξωτερικά του τελάρου. Το διάκενο που αφήνουν οι μοριοσανίδες στο εσωτερικό της πόρτας είναι 5.4cm και γεμίζει με ορυκτοβάμβακα Ultracoustic πάχους 4.5cm. Το συνολικό πάχος του θυρόφυλλου είναι 10.2cm.

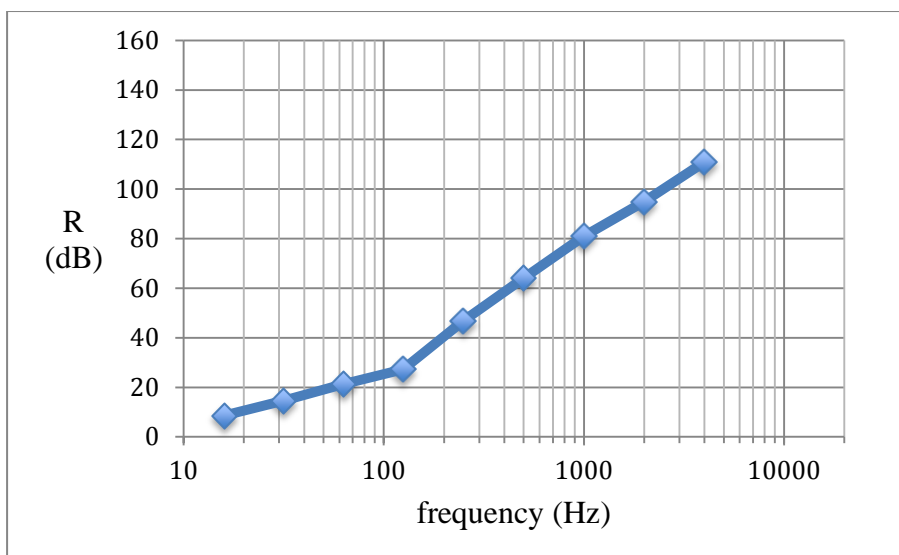
Η ένωση μεταξύ του θυρόφυλλου και της κάσας γίνεται περιμετρικά της πόρτας με λάστιχο της εταιρείας Roverplastic για πλάτος αρμού 4mm, σε δύο επίπεδα. Η πόρτα πρέπει να κλείνει εύκολα χωρίς να δημιουργεί ιδιαίτερο θόρυβο. Αυτό σημαίνει ότι τα σφραγίσματα έχουν την απαραίτητη ελαστικότητα να σφραγίζουν τους αρμούς με σχετικά μικρή δύναμη.

Υπολογίζουμε τη συνολική ηχομείωση του θυρόφυλλου σε συνάρτηση με τη συχνότητα σύμφωνα με τη «Μεθοδολογία υπολογισμού δείκτη ηχομείωσης διπλών επιφανειών». Έχουμε 2.4cm μοριοσανίδα σε κάθε πλευρά του θυρόφυλλου με 5.4cm διάκενο στο ενδιάμεσο, στους υπολογισμούς δεν περιλαμβάνεται η προσθήκη του ορυκτοβάμβακα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στη γραφική παράσταση του σχήματος 39.

Στη θέση όπου κατασκευάστηκε η τοιχοποιία γυψοσανίδας και η πόρτα υπήρχε αρχικά άνοιγμα εμβαδού 2.65m^2 . Το καθαρό άνοιγμα της πόρτας καταλαμβάνει εμβαδό 1.39m^2 και η τοιχοποιία γυψοσανίδας καταλαμβάνει εμβαδό 1.26m^2 . Υπολογίζουμε την ηχομείωση σύμφωνα με το μέσο συντελεστή διάδοσης για κάθε οκτάβα, χρησιμοποιώντας τους τύπους της παραγράφου «Υπολογισμός δείκτη ηχομείωσης σύνθετων επιφανειών». Τα αποτελέσματα φαίνονται στη γραφική παράσταση του σχήματος 40.

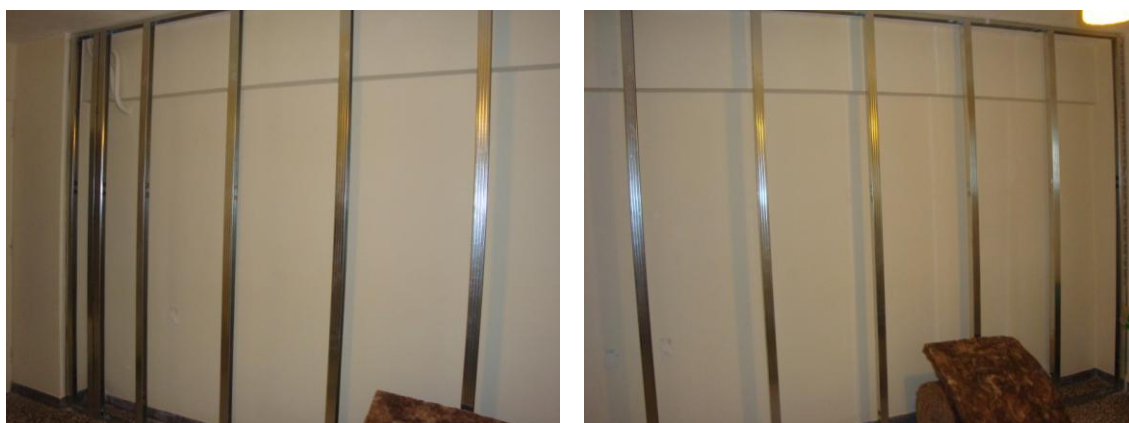


Σχήμα 39. Δείκτης ηχομείωσης θυρόφυλλου με μοριοσανίδα πάχους 2.4cm σε κάθε πλευρά και διάκενο 5.4cm.



Σχήμα 40. Δείκτης ηχομείωσης τοιχοποιίας γυψοσανίδας και πόρτας.

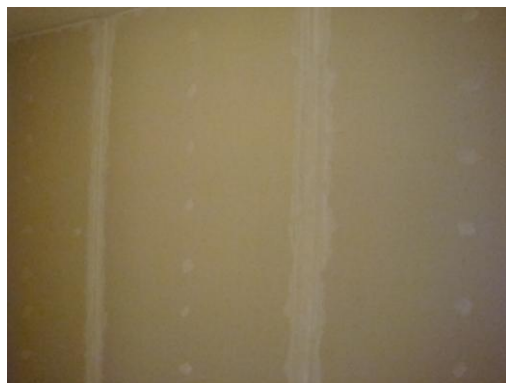
5.5 – Εικόνες από τις κατασκευές στο δωμάτιο



Εικόνα 5. Μεταλλικός σκελετός στην πλευρά του τοίχου με μήκος 3.67m.



Εικόνα 6. Προσθήκη ορυκτοβάμβακα στο μεταλλικό σκελετό της πλευράς του τοίχου με μήκος 3.67m.



Εικόνα 7. Τελευταία στρώση γυψοσανίδας με αρμολόγηση στην πλευρά του τοίχου με μήκος 3.67m.



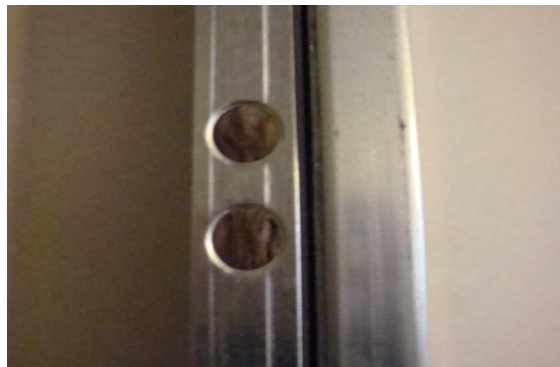
Εικόνα 8. Η ένωση της γυψοσανίδας με το φέροντα οργανισμό γίνεται περιμετρικά με ακρυλική μαστίχη, όπως και ο μεταλλικός σκελετός.



Εικόνα 9. Μεταλλικός σκελετός στην πλευρά του τοίχου με μήκος 2.155m.



Εικόνα 10. Οι τρύπες στις παροχές ρεύματος έχουν γεμίσει στόκο, για να αποφύγουμε διαρροές του ήχου από εκεί.



Εικόνα 11. Διπλός μεταλλικός σκελετός περιμετρικά της πόρτας, η επαφή των δύο σκελετών γίνεται με αφρώδη ηχομονωτική ταινία. Στην πλευρά όπου θα στηρίζεται η πόρτα χρησιμοποιούμε UA-προφίλ πάχους 2mm για να αντέξει το βάρος της.



Εικόνα 12. Προσθήκη ορυκτοβάμβακα στο μεταλλικό σκελετό της πλευράς του τοίχου με μήκος 2.155m. Προσθήκη ορυκτοβάμβακα σε κάθε πλευρά του διπλού μεταλλικού σκελετού, στο υπέρθυρο και περιμετρικά του ανοίγματος της πόρτας.



Εικόνα 13. Πρώτη στρώση γυψοσανίδας στην πλευρά του τοίχου με μήκος 2.155m και σε κάθε πλευρά περιμετρικά του ανοίγματος της πόρτας. Οι αρμοί στο υπέρθυρο δεν είναι ο ένας πίσω από τον άλλο.



Εικόνα 14. Δεύτερη στρώση γυψοσανίδας στην πλευρά του τοίχου με μήκος 2.155m και σε κάθε πλευρά περιμετρικά του ανοίγματος της πόρτας.



Εικόνα 15. Άμεση αντικραδαστική ανάρτηση «Π» και συνδετήρας «Π».



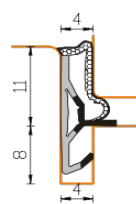
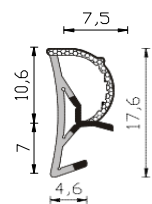
Εικόνα 16. Μεταλλικός σκελετός αναρτημένος στην οροφή.



Εικόνα 17. Προσθήκη ορυκτοβάμβακα στο μεταλλικό σκελετό της οροφής.



Εικόνα 18. Πρώτη και δεύτερη στρώση γυψοσανίδας στην οροφή.



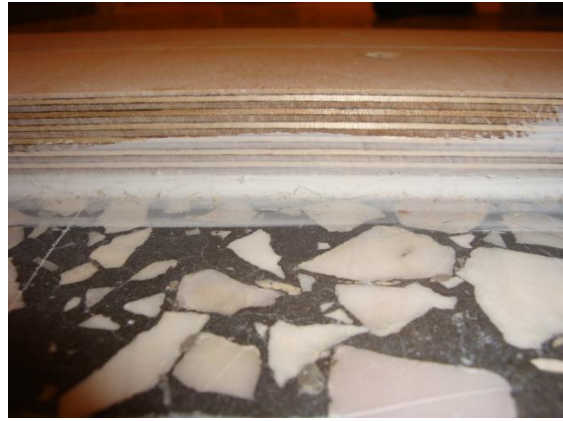
Εικόνα 19. Λάστιχο της εταιρείας Roverplastic για πλάτος αρμού 4mm.



Εικόνα 20. Τοποθετείται το κύριο μέρος της κάσας από κόντρα πλακέ θαλάσσης, το αυλάκι που παρατηρούμε γίνεται σε συγκεκριμένο σημείο με συγκεκριμένο πλάτος και βάθος, ώστε να τοποθετηθεί εκεί το λάστιχο που σφραγίζει την ένωση μεταξύ πόρτας και κάσας.



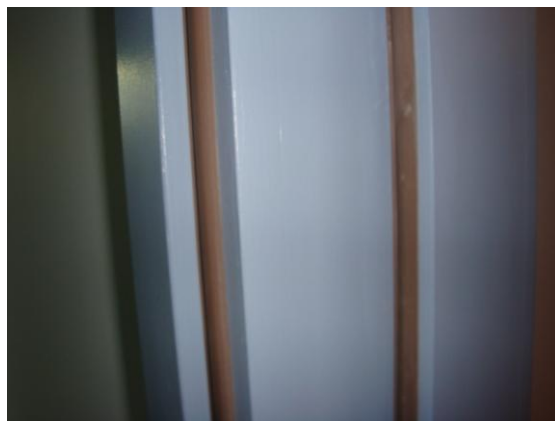
Εικόνα 21. Στην ένωση μεταξύ τοιχοποιίας και κάσας, το διάκενο γεμίζει με πεπιεσμένο ορυκτοβάμβακα και ο αρμός ένωσης σφραγίζεται με ελαστικό στόκο και από τις δύο πλευρές.



Εικόνα 22. Στην ένωση του δαπέδου με το κατωκάσι τοποθετείται επίσης πεπιεσμένος ορυκτοβάμβακας και ο αρμός ένωσης σφραγίζεται με ελαστικό στόκο και από τις δύο πλευρές.



Εικόνα 23. Το τελάρο της πόρτας και οι μοριοσανίδες που χρησιμοποιούνται για το κέλυφος της πόρτας. Δύο μοριοσανίδες πάχους 16mm και δύο πάχους 8mm.



Εικόνα 24. Ολοκληρωμένη κατασκευή κάσας και πόρτας. Η πόρτα σφραγίζει περιμετρικά σε δύο επίπεδα, στην επαφή της με την κάσα παρεμβάλλεται λάστιχο. Η πόρτα στηρίζεται στην κάσα με τρεις μεντεσέδες υψηλής αντοχής.



Εικόνα 25. Τοποθέτηση μοκέτας στο δωμάτιο.



Εικόνα 26. Τελική μορφή δωματίου. Τοποθέτηση επίπλων και κουρτίνας.

5.6 – Υπολογισμός και ανάλυση των στάσιμων κυμάτων του χώρου

Οι νέες διαστάσεις του δωματίου είναι:

- Μήκος: 3.45m
- Πλάτος: 2.99m
- Ύψος: 2.31m

Οι αναλογίες των διαστάσεων του δωματίου είναι 1 : 1.29 : 1.49. Βρίσκονται μέσα στην περιοχή του διαγράμματος Bolt, οι κοντινότερες προτεινόμενες βέλτιστες αναλογίες διαστάσεων δωματίου είναι 1 : 1.28 : 1.54 και δίνονται από το Serpmeyer.

- Ο όγκος του δωματίου είναι 23.83m^3 .
- Το ολικό εμβαδό των επιφανειών του δωματίου είναι 50.38m^2 .
- Το εμβαδό της οροφής και του πατώματος είναι 10.31m^2 .
- Το εμβαδό του τοίχου με μήκος 3.63m και του απέναντι τοίχου είναι 7.97m^2 .
- Το εμβαδό του τοίχου με παράθυρο και του απέναντι τοίχου είναι 6.91m^2 .
- Η διαγώνιος του δωματίου είναι 4.54m .
- Ο ιδανικός χρόνος αντήχησης για την χρήση του χώρου είναι 0.3sec .

5.6.1 – Διαχωρισμός του ακουστικού φάσματος σε τέσσερις συχνοτικές περιοχές

Ο διαχωρισμός του ακουστικού φάσματος σε τέσσερις συχνοτικές περιοχές έχει ως εξής:

- 1) Ζώνης Πίεσης (pressure zone/cut off region): από 0Hz μέχρι τη συχνότητα $f = 49.7\text{Hz}$, όπου αντιστοιχεί στην μεγαλύτερη διάσταση του δωματίου, τη χαμηλότερη συχνότητα συντονισμού του χώρου. Σε αυτή την περιοχή δεν υπάρχουν συντονισμοί.
- 2) Ζώνη των στάσιμων κυμάτων (modal zone): από τη συχνότητα $f = 49.7\text{Hz}$ μέχρι την συχνότητα αποκοπής $f_c = 224.4\text{Hz}$. Σε αυτή τη περιοχή εμφανίζονται τα στάσιμα κύματα, συνεπώς εφαρμόζουμε τις αρχές της κυματικής ακουστικής.
- 3) Ζώνη διάχυσης (diffusion zone): από τη συχνότητα αποκοπής $f_c = 224.4\text{Hz}$ μέχρι τη συχνότητα $4f_c = 897.6\text{Hz}$. Είναι η περιοχή μετάβασης μεταξύ της ζώνης στάσιμων κυμάτων και της ζώνης ανακλάσεων.
- 4) Ζώνη ανακλάσεων (specular reflection zone): μεγαλύτερη ή ίση της συχνότητας $4f_c = 897.6\text{Hz}$. Σε αυτή την περιοχή επικρατούν οι τυχαίες ανακλάσεις με τη γωνία πρόσπτωσης να είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης, ο ήχος μπορεί να θεωρηθεί πως διαδίδεται σε ακτίνες και εφαρμόζονται πλέον οι αρχές της γεωμετρικής ακουστικής.

5.6.2 – Υπολογισμός των τρόπων ταλάντωσης

Θα υπολογίσουμε όλους τους τρόπους ταλάντωσης που μπορούν να δημιουργηθούν στο χώρο, από τη σχέση 1.2. Οι συχνότητες των συντονισμών αυτών καταγράφονται στον πίνακα 4 και είναι αυτοί που καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την απόκριση του συγκεκριμένου δωματίου για την καθορισμένη συχνοτική περιοχή.

Αριθμός Συντονισμού	Ακέραιοι n_x, n_y, n_z	Συχνότητα Συντονισμού (Hz)	Αξονικός	Εφαπτομενικός	Πλάγιος
1	1 0 0	49.7	x		
2	0 1 0	57.4	x		
3	0 0 1	74.2	x		
4	1 1 0	75.9		x	
5	1 0 1	89.4		x	
6	0 1 1	93.8		x	
7	2 0 0	99.4	x		
8	1 1 1	106.2			x
9	0 2 0	114.7	x		

10	2 1 0	114.8		x	
11	2 0 1	124.1		x	
12	1 2 0	125		x	
13	0 2 1	136.6		x	
14	2 1 1	136.7			x
15	1 2 1	145.4			x
16	0 0 2	148.5	x		
17	3 0 0	149.1	x		
18	2 2 0	151.8		x	
19	0 1 2	159.2		x	
20	3 1 0	159.8		x	
21	3 0 1	166.6		x	
22	1 1 2	166.8			x
23	2 2 1	169			x
24	0 3 0	172.1	x		
25	3 1 1	176.2			x
26	2 0 2	178.7		x	
27	1 3 0	179.1		x	
28	0 3 1	187.4		x	
29	0 2 2	187.6		x	
30	2 1 2	187.7			x
31	3 2 0	188.2		x	
32	1 3 1	193.9			x
33	1 2 2	194.1			x
34	2 3 0	198.7		x	
35	4 0 0	198.8	x		
36	3 2 1	202.3			x
37	3 0 2	210.5		x	
38	2 3 1	212.2			x
39	2 2 2	212.4			x
40	3 1 2	218.1			x
41	4 1 1	219.9			x
42	0 0 3	222.7	x		
43	0 3 2	227.3		x	
44	3 3 0	227.7		x	
45	1 0 3	228.2		x	
46	0 4 0	229.4	x		
47	0 1 3	230		x	
48	1 3 2	232.7			x
49	1 1 3	235.3			x
50	3 2 2	239.7			x
51	4 2 1	241.3			x
52	2 0 3	243.9		x	
53	1 4 1	246.2			x
54	2 3 2	248.1			x
55	5 0 0	248.6	x		
56	0 2 3	250.5		x	
57	2 1 3	250.6			x

58	4 1 2	254.7			x
59	1 2 3	255.4			x
60	2 4 1	260.8			x
61	4 3 0	263		x	
62	5 1 1	265.7			x
63	3 0 3	268		x	
64	2 2 3	269.5			x
65	3 3 2	271.8			x
66	4 2 2	273.4			x
67	3 4 0	273.6		x	
68	1 4 2	277.8			x
69	0 3 3	281.5		x	
70	5 2 1	283.6			x
71	0 5 0	286.8	x		
72	2 4 2	290.8			x
73	3 2 3	291.6			x
74	5 1 2	295.2			x
75	0 0 4	297	x		
76	6 0 0	298.3	x		
77	2 3 3	298.5			x
78	4 0 3	298.6		x	
79	1 5 1	300.4			x
80	4 3 2	302			x

Πίνακας 4. Υπολογισμός των συντονισμών του δωματίου.

5.6.3 – Πυκνότητα των τρόπων ταλάντωσης

Η πυκνότητα των τρόπων ταλάντωσης (Modal density) ανά οκτάβα υπολογίζεται από τη σχέση 1.3. Σύμφωνα με τους υπολογισμούς τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 5, επίσης καταγράφεται το πλήθος των αξονικών, εφραπτομενικών και πλάγιων ρυθμών ξεχωριστά για κάθε οκτάβα.

Οκτάβα (Hz)	Πλήθος Ρυθμών	Αξονικοί	Εφραπτομενικοί	Πλάγιοι
63 (44 – 88)	4	3	1	0
125 (88 – 177)	21	5	10	6
250(177 – 254) (partial octave)	39*	4	13	15

Πίνακας 5. Πλήθος των τρόπων ταλάντωσης ανά οκτάβα. Στην οκτάβα των 250Hz υπολογίζουμε το πλήθος των τρόπων ταλάντωσης για μέρος της οκτάβας.

5.6.4 – Ανάλυση αξονικών τρόπων ταλάντωσης

Μία άλλη πιο απλοποιημένη αλλά και αποτελεσματική ανάλυση είναι να εξετάσουμε μόνο τους αξονικούς τρόπους ταλάντωσης επειδή η περισσότερη ενέργεια που έχουν από τους εφραπτομενικούς και τους πλάγιους, επιδρά πιο έντονα στην συχνοτική απόκριση του χώρου. Το δωμάτιο κατά το μήκος του (3.45m) συντονίζεται στα 49.7Hz, κατά το πλάτος του (2.99m) συντονίζεται στα 57.4Hz και κατά το ύψος του (2.31m) συντονίζεται στα 74.2Hz. Στον πίνακα 6 παρουσιάζονται

αυτοί οι τρεις αξονικοί συντονισμοί με μία σειρά από πολλαπλάσια για κάθε έναν για συχνότητες κάτω από 300Hz. Επειδή πολλοί χρωματισμοί οφείλονται στους αξονικούς τρόπους ταλάντωσης, οι αποστάσεις μεταξύ τους πρέπει να εξεταστούν με λεπτομέρεια για το λόγο αυτό οι συχνότητες συντονισμού του μήκους, του πλάτους και του ύψους ταξινομούνται σε αύξουσα σειρά σε μία στήλη, έτσι ώστε να είναι πιο εύκολο να εξετάσουμε τον κρίσιμο παράγοντα της απόστασης των αξονικών συντονισμών.

- Ο αριθμός των αξονικών ρυθμών κάτω από τα 300Hz είναι 15, η προτεινόμενη τιμή για ένα μικρό στούντιο ηχογράφησης είναι 18.
- Ο χαμηλότερος αξονικός ρυθμός είναι 49.7Hz, η προτεινόμενη τιμή για ένα μικρό στούντιο ηχογράφησης είναι 45.9Hz.
- Η μέση απόσταση μεταξύ των αξονικών ρυθμών είναι 17.75Hz, η προτεινόμενη τιμή για ένα μικρό στούντιο ηχογράφησης είναι 14.1Hz.
- Η συχνότητα που αντιστοιχεί στη διαγώνιο του δωματίου είναι 37.8Hz και αντιστοιχεί σε πλάγιο ρυθμό, η προτεινόμενη τιμή για ένα μικρό στούντιο ηχογράφησης είναι 31.6Hz.
- Το εύρος ζώνης των ρυθμών, σύμφωνα με τον ιδανικό χρόνο αντήχησης, είναι 7.3Hz.

Συντονισμοί Αξονικών Ρυθμών (Hz)				
Μήκος=3.45m	Πλάτος=2.99m	Ύψος=2.31m	Σε Αύξουσα Σειρά	Απόσταση Ρυθμών
49.7	57.4	74.2	49.7	7.7
99.4	114.7	148.5	57.4	16.8
149.1	172.1	222.7	74.2	25.2
198.8	229.4	297	99.4	15.3
248.6	286.8		114.7	33.8
298.3			148.5	0.6
			149.1	23
			172.1	26.7
			198.8	23.9
			222.7	6.7
			229.4	19.2
			248.6	38.2
			286.8	10.2
			297	1.3
			298.3	

Πίνακας 6. Συντονισμοί αξονικών ρυθμών και ανάλυση της απόστασής τους.

5.6.5 – Αποστάσεις και χρωματισμοί των τρόπων ταλάντωσης

Ένας μουσικός τόνος του οποίου η συχνότητα βρίσκεται μεταξύ αρκετά απομακρυσμένων συντονισμών μπορεί να είναι ασυνήθιστα αδύναμος και να σβήνει πιο γρήγορα σε σχέση με άλλους τόνους. Σαν αίσθηση αντιλαμβανόμαστε αυτόν τον τόνο πιο απόμακρο από τους υπόλοιπους τόνους.

Ο Gilford αναφέρει, ότι ένας αξονικός ρυθμός που χωρίζεται με περισσότερα από 20Hz από τον επόμενο αξονικό ρυθμό, θα τείνει να είναι απομονωμένος ακουστικά. Δεν θα τείνει να διεγείρεται μέσω σύζευξης λόγω επικαλυπτόμενων

ορίων αλλά θα τείνει να ενεργεί ανεξάρτητα. Σύμφωνα με τον Gilford, οι προβληματικοί αξονικοί ρυθμοί του δωματίου σημειώνονται με γκρι κελιά στον πίνακα 6.

Στην ανάλυση των αξονικών ρυθμών δεν παρατηρούνται ακριβείς συμπτώσεις, αλλά μόνο δύο ζεύγη ρυθμών βρίσκονται σε πολύ κοντινή απόσταση. Στο πρώτο ζεύγος (148.5Hz – 149.1Hz) η διαφορά είναι 0.6Hz και στο δεύτερο ζεύγος (297Hz – 298.3Hz) η διαφορά είναι 1.3Hz.

Ο Bonello αναλύει τις αποστάσεις των ρυθμών με σκοπό να αποφύγει φαινόμενα εκφυλισμού (σύμπτωσης). Ο Bonello εξετάζει και τα τρία είδη ρυθμών και όχι μόνο τους αξονικούς. Αναφέρει ότι είναι επιθυμητό να έχουμε όλες τις συχνότητες των ρυθμών σε μία κρίσιμη ζώνη τουλάχιστο 5% μακριά από τη συχνότητά τους. Σύμφωνα με τον Bonello, οι προβληματικοί ρυθμοί που συμπίπτουν σημειώνονται παρακάτω παρατηρώντας τους ρυθμούς που βρίσκονται μέσα στην κρίσιμη ζώνη για κάθε ρυθμό:

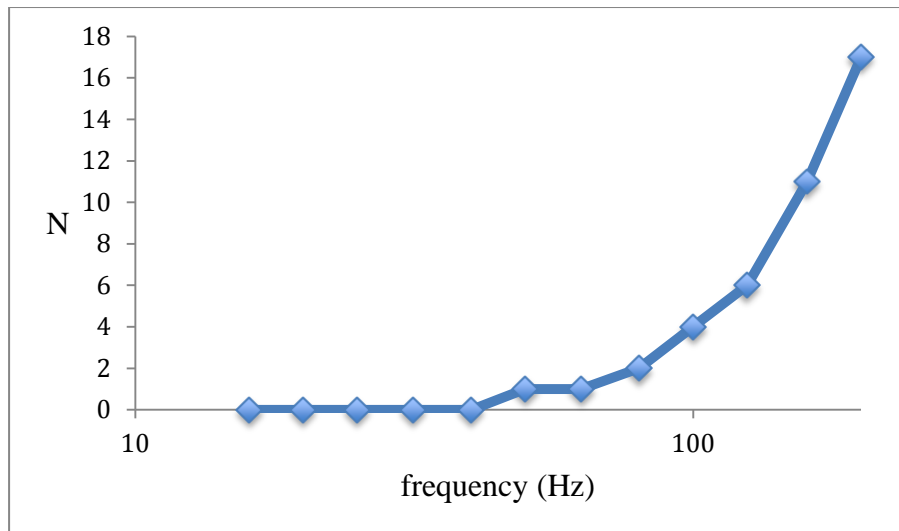
- 1) 74.2Hz – 75.9Hz
- 2) 89.4Hz – 93.8Hz
- 3) 114.7Hz – 114.8Hz
- 4) 124.1Hz – 125Hz
- 5) 136.6Hz – 136.7Hz

Αυτά τα πέντε ζεύγη είναι οι χαμηλότεροι σε συχνότητα συντονισμοί όπου οι συχνότητες τους βρίσκονται μέσα στην κρίσιμη ζώνη του Bonello. Στις υψηλότερες συχνότητες, μέσα στην κρίσιμη ζώνη κάθε ρυθμού βρίσκονται τρεις ή τέσσερις ρυθμοί. Αυτό ίσως και να έχει ως αποτέλεσμα μία κάπως πιο ομαλή απόκριση σε αυτές τις συχνότητες.

5.6.6 – Το κριτήριο Bonello

Σύμφωνα με το κριτήριο Bonello, κάθε ζώνη 1/3 οκτάβας πρέπει να έχει περισσότερους ρυθμούς από την προηγούμενη ή τουλάχιστον το ίδιο πλήθος. Οι συμπτώσεις ρυθμών δεν είναι ανεκτοί εκτός και αν στη ζώνη υπάρχουν τουλάχιστον πέντε ρυθμοί. Στο σχήμα 41 παρατηρούμε ότι κάθε ζώνη τριτοκτάβας έχει το ίδιο πλήθος ή περισσότερους ρυθμούς από την προηγούμενη ζώνη και για τα τρία είδη ρυθμών.

Συμπτώσεις ρυθμών σε ζώνες τριτοκτάβας παρατηρούμε σύμφωνα με τη κρίσιμη ζώνη του Bonello, στην τριτοκτάβα των 80Hz τους ρυθμούς 74.2Hz – 75.9Hz και στην τριτοκτάβα των 100Hz τους ρυθμούς 89.4Hz – 93.8Hz. Στις υψηλότερες τριτοκτάβες το πλήθος των ρυθμών είναι μεγαλύτερο από πέντε.



Σχήμα 41. Πυκνότητα ρυθμών σε κάθε ζώνη τριτοκτάβας.

5.7 – Μέτρηση της κρουστικής απόκρισης του χώρου

5.7.1 – Πριν και μετά την υλοποίηση των κατασκευών

Πριν από οποιαδήποτε κατασκευή και σε άδειο δωμάτιο έγινε μέτρηση της κρουστικής απόκρισης του χώρου, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του απειροστού παλμού για να διεγείρουμε το χώρο. Επειδή οι μετρήσεις δεν πραγματοποιούνται σε έναν ομοιόμορφο ηχητικά χώρο, θα πραγματοποιηθούν σε πλέγμα σημείων 9 θέσεων σε 3 διαφορετικά ύψη, συνολικά 27 θέσεις, για να υπάρχει μεγαλύτερη κάλυψη της ηχητικής κατανομής. Η διέγερση σε κάθε θέση γίνεται με τρεις διαφορετικούς τρόπους, με παλαμάκι, με το σκάσιμο μπαλονιού και με το χτύπημα δύο ξύλινων πλακών. Οι μετρήσεις γίνονται σε απόσταση τουλάχιστον 1m από τους τοίχους και το ύψος τους κυμαίνεται μεταξύ του ύψους του καθήμενου και του όρθιου ακροατή (1.2m, 1.5m, 1.8m).

Μετά την ολοκλήρωση των κατασκευών και σε άδειο δωμάτιο γίνεται ξανά μέτρηση της κρουστικής απόκρισης χώρου, χρησιμοποιώντας τις ίδιες μεθόδους για να διεγείρουμε το χώρο. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε πλέγμα σημείων 5 θέσεων, αυτή τη φορά, σε 3 διαφορετικά ύψη (1.2m, 1.5m, 1.8m), συνολικά 15 θέσεις.

Οι μετρήσεις καταγράφονται από ένα παντοκατευθυντικό μικρόφωνο (AKG Perception 420) μέσω της κάρτας ήχου (Focusrite Saffire PRO 26) στο σκληρό δίσκο του υπολογιστή.

Στους πίνακες 7 και 8 καταγράφονται οι θέσεις όπου λαμβάνονται οι μετρήσεις της κρουστικής απόκρισης του χώρου. Οι θέσεις είναι ίδιες και για τα τρία διαφορετικά ύψη.

	Απόσταση από τον τοίχο με μήκος 3.63m	Απόσταση από τον τοίχο με παράθυρο
θέση 1	1m	1m
θέση 2	1m	1.82m
θέση 3	1m	2.64m
θέση 4	1.64m	1m
θέση 5	1.64m	1.82m
θέση 6	1.64m	2.64m
θέση 7	2.26m	1m
θέση 8	2.26m	1.82m
θέση 9	2.26m	2.64m

Πίνακας 7. Πλέγμα σημείων για τη μέτρηση της κρουστικής απόκρισης του χώρου, πριν την υλοποίηση των κατασκευών.

	Απόσταση από τον τοίχο με μήκος 3.63m	Απόσταση από τον τοίχο με παράθυρο
θέση 1	1.1m	1.1m
θέση 2	1.1m	2.37m
θέση 3	1.85m	1.1m
θέση 4	1.89m	2.34m
θέση 5	1.49m	1.71m

Πίνακας 8. Πλέγμα σημείων για την μέτρηση της κρουστικής απόκρισης του χώρου, μετά την υλοποίηση των κατασκευών.

5.7.2 – Μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας

Στη συνέχεια, τοποθετείται μοκέτα πάχους 5mm σε όλο το πάτωμα και κουρτίνα μπροστά από το παράθυρο που να κρέμεται ως το πάτωμα, με εμβαδό διπλάσιο εκείνου της επιφάνειας που καλύπτει, η οποία είναι $3.3m^2$. Επίσης, στο δωμάτιο τοποθετούμε έναν καναπέ διαστάσεων 1.80m x 0.88m x 0.66m, δύο γραφεία, μία βιβλιοθήκη και μία καρέκλα στη θέση ακρόασης.

Μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας στο χώρο επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία για τη μέτρηση της κρουστικής απόκρισης του χώρου. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε πλέγμα σημείων 5 θέσεων, σε 3 διαφορετικά ύψη (1.2m, 1.5m, 1.8m), επίσης γίνεται μέτρηση στην θέση ακρόασης, συνολικά 16 θέσεις. Η μέτρηση στη θέση ακρόασης γίνεται σε ύψος 1.10m το οποίο καθορίζεται από το ύψος του καθήμενου ακροατή. Στον πίνακα 9 καταγράφονται οι θέσεις όπου λαμβάνονται οι μετρήσεις. Οι θέσεις είναι ίδιες για τα τρία διαφορετικά ύψη.

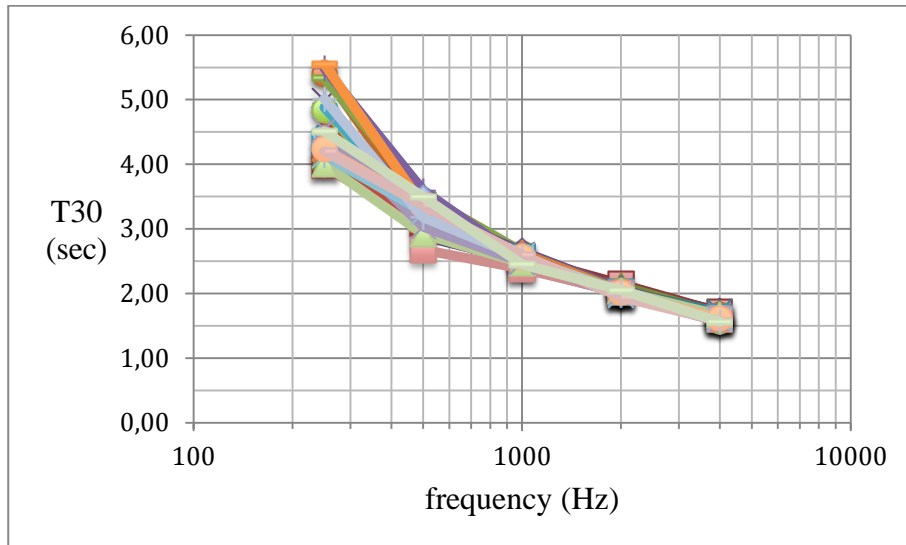
	Απόσταση από τον τοίχο με μήκος 3.63m	Απόσταση από τον τοίχο με παράθυρο
θέση 1	1.1m	1.1m
θέση 2	1.1m	2.37m
θέση 3	1.85m	1.1m
θέση 4	1.89m	2.34m
θέση 5	1.49m	1.71m
θέση Ακρ.	1.47m	1.15m

Πίνακας 9. Πλέγμα σημείων για τη μέτρηση της κρουστικής απόκρισης του χώρου, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.

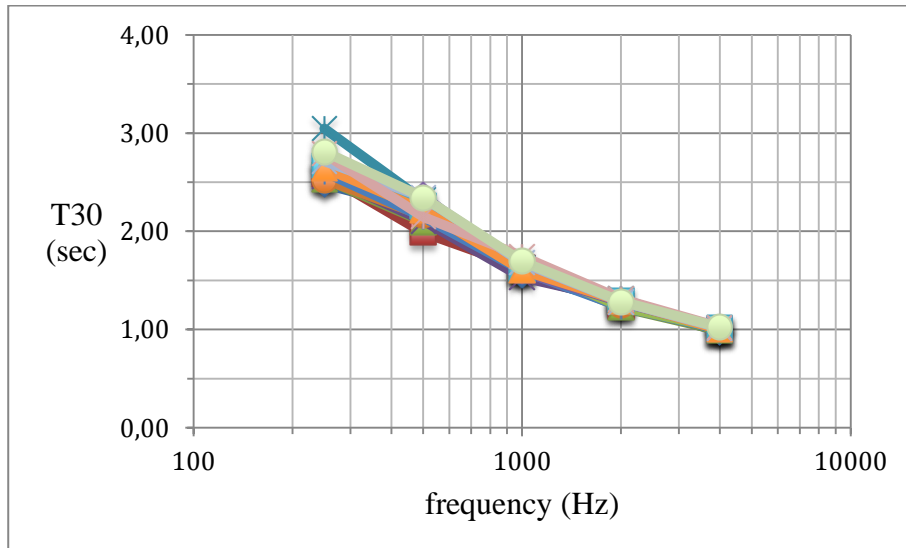
5.7.3 – Σύγκριση των αποτελεσμάτων

Παρακάτω παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις των ακουστικών παραμέτρων του χώρου σε συνάρτηση με τη συχνότητα, για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων πριν και μετά την υλοποίηση των κατασκευών, αλλά και μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας στο δωμάτιο. Επίσης, στις γραφικές παραστάσεις παρουσιάζονται οι προτεινόμενες τιμές των ακουστικών παραμέτρων, για να γίνει σύγκριση και εκτίμηση του χώρου.

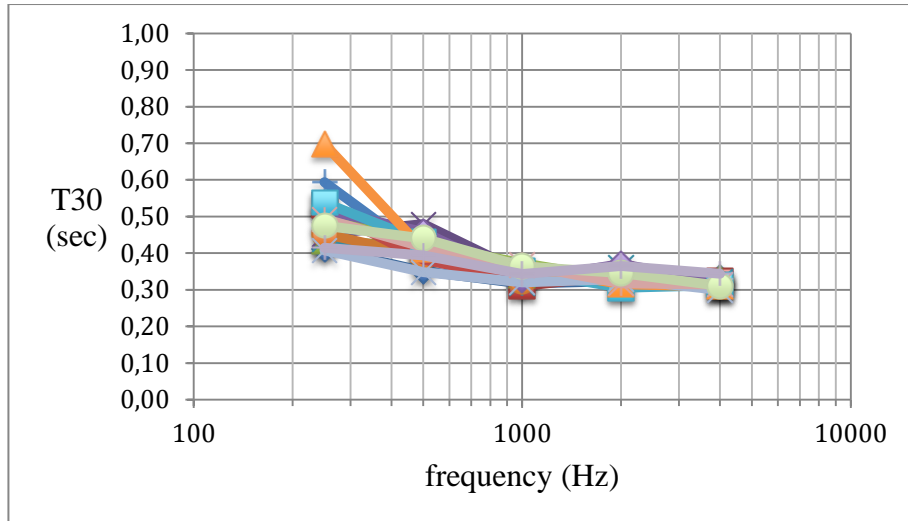
➤ T30



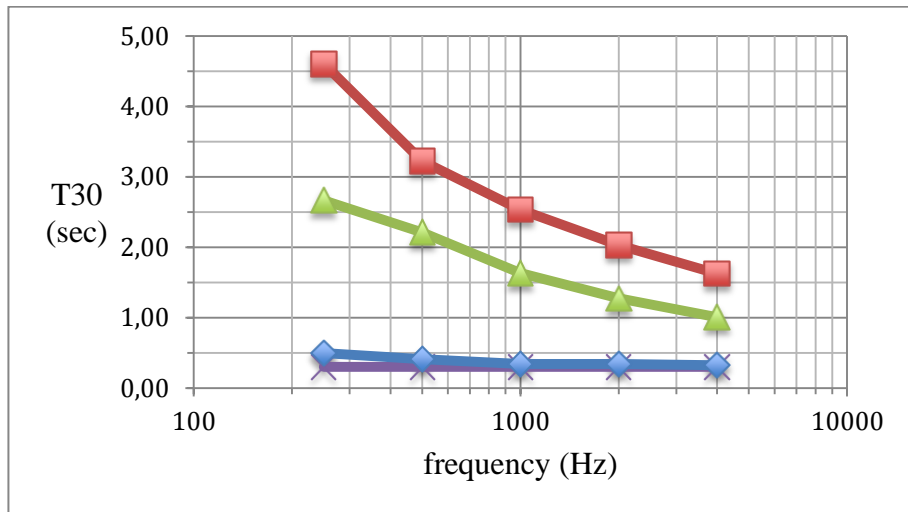
Σχήμα 42. Μετρήσεις T30 με ξύλινες πλάκες, πριν τις κατασκευές.



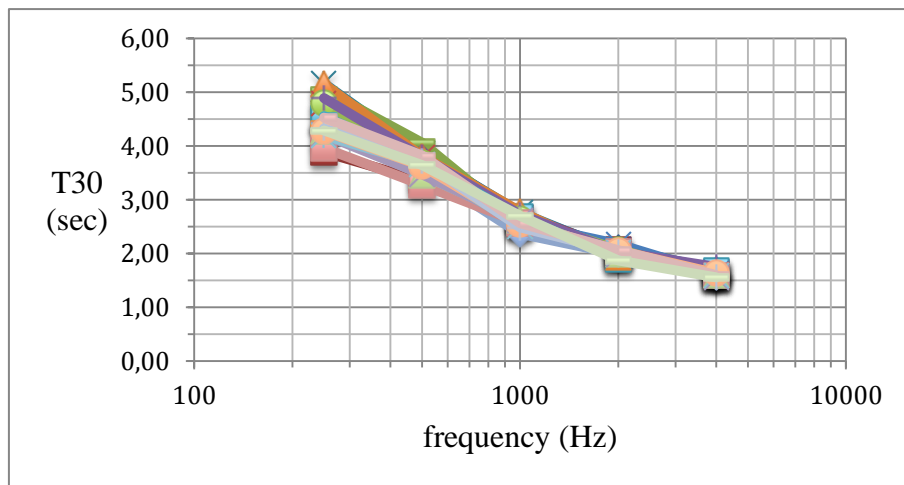
Σχήμα 43. Μετρήσεις T30 με ξύλινες πλάκες, μετά τις κατασκευές.



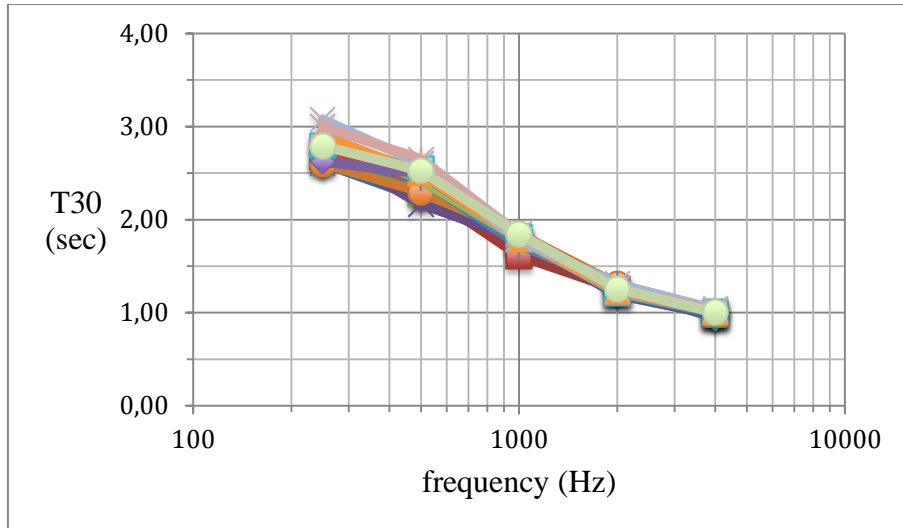
Σχήμα 44. Μετρήσεις T30 με ξύλινες πλάκες, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.



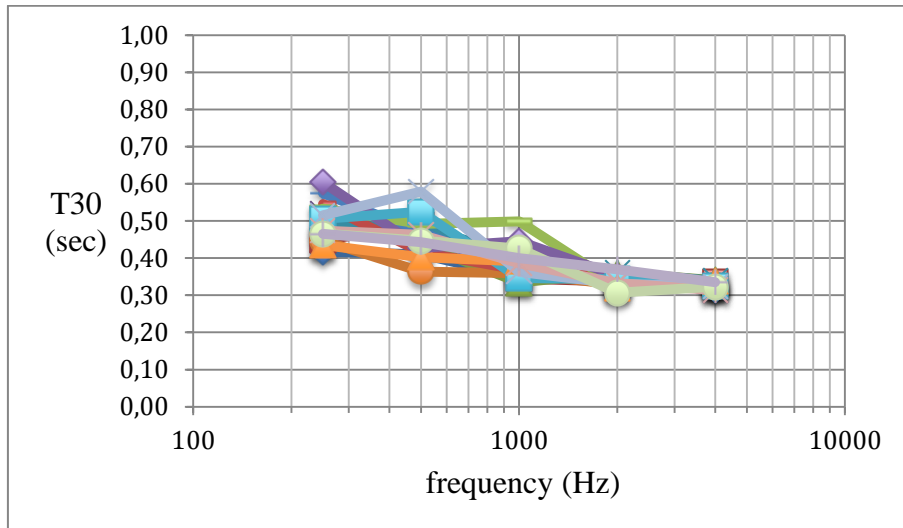
Σχήμα 45. Μέσος όρος μετρήσεων T30 με ξύλινες πλάκες, πριν (κόκκινο) και μετά (πράσινο) τις κατασκευές, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (μπλε) και προτεινόμενη τιμή (μωβ).



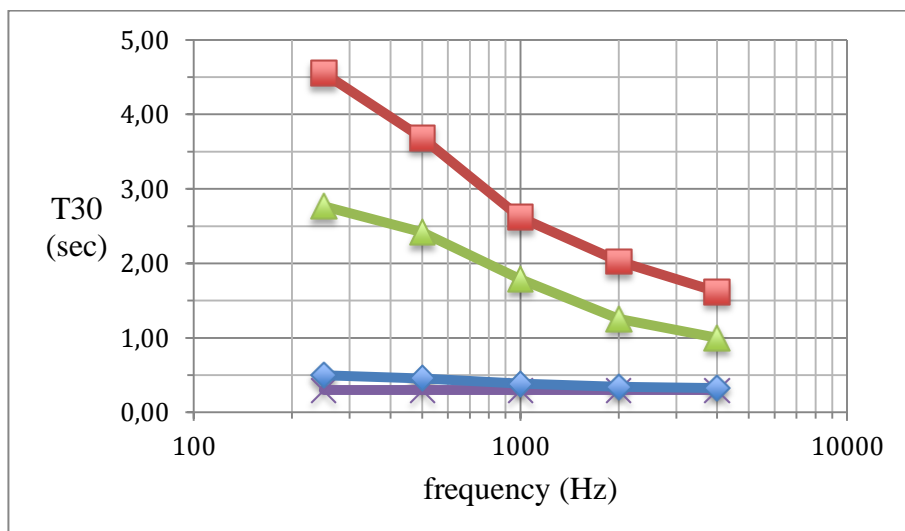
Σχήμα 46. Μετρήσεις T30 με μπαλόκι, πριν τις κατασκευές.



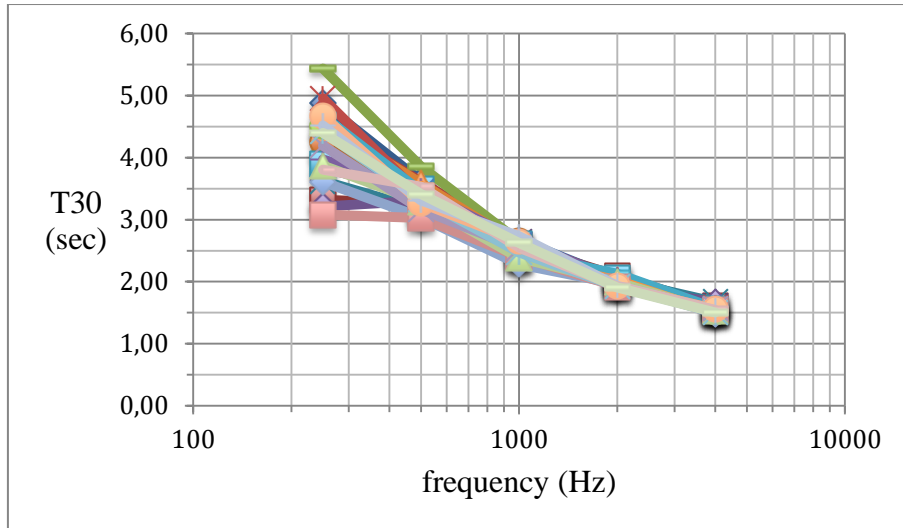
Σχήμα 47. Μετρήσεις T30 με μπαλόνη, μετά τις κατασκευές.



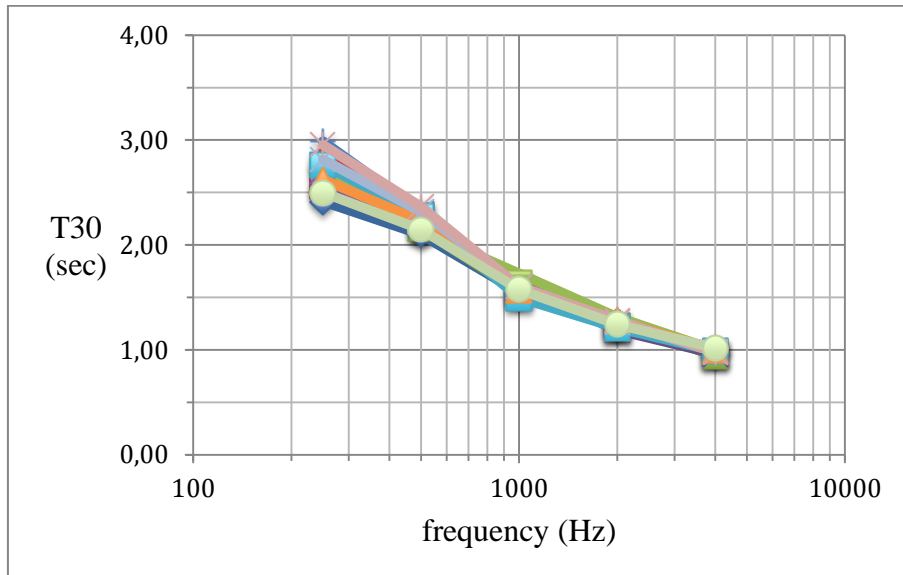
Σχήμα 48. Μετρήσεις T30 με μπαλόνη, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.



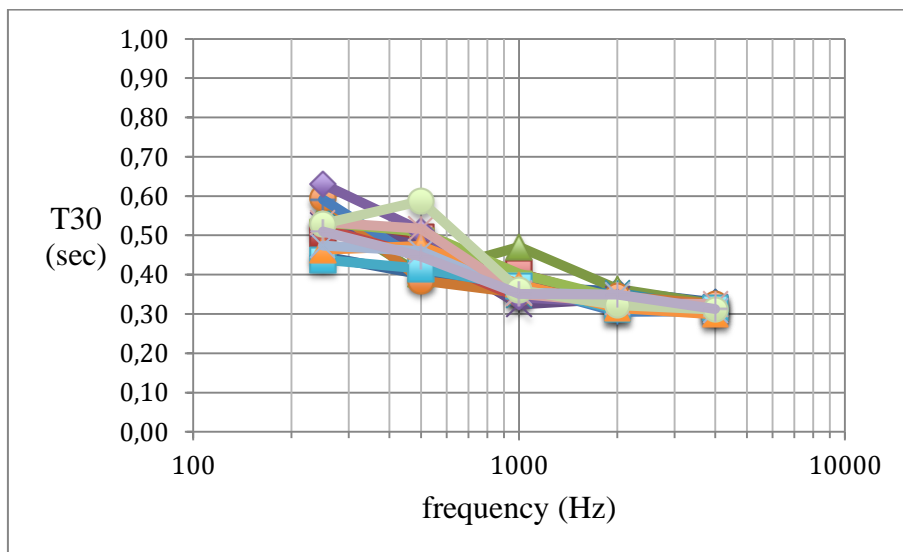
Σχήμα 49. Μέσος όρος μετρήσεων T30 με μπαλόνη, πριν (κόκκινο) και μετά (πράσινο) τις κατασκευές, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (μπλε) και προτεινόμενη τιμή (μωβ)



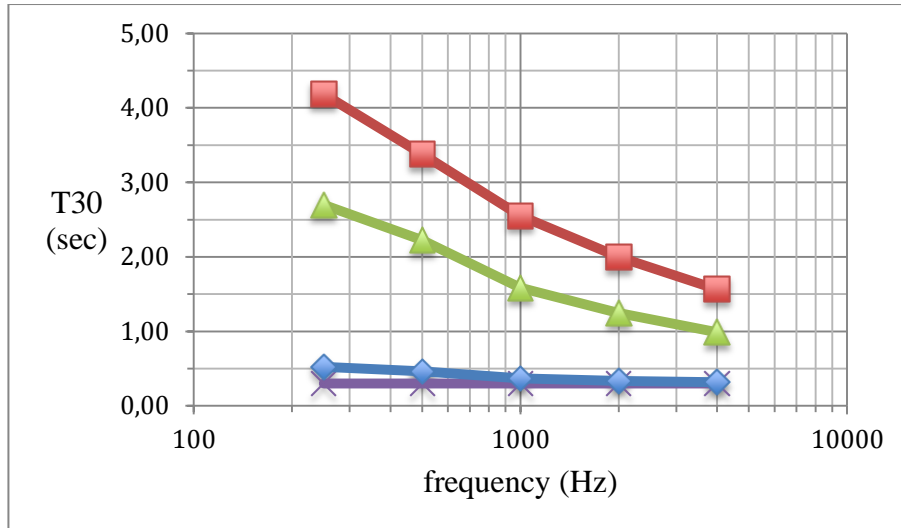
Σχήμα 50. Μετρήσεις T30 με παλαμάκι, πριν τις κατασκευές.



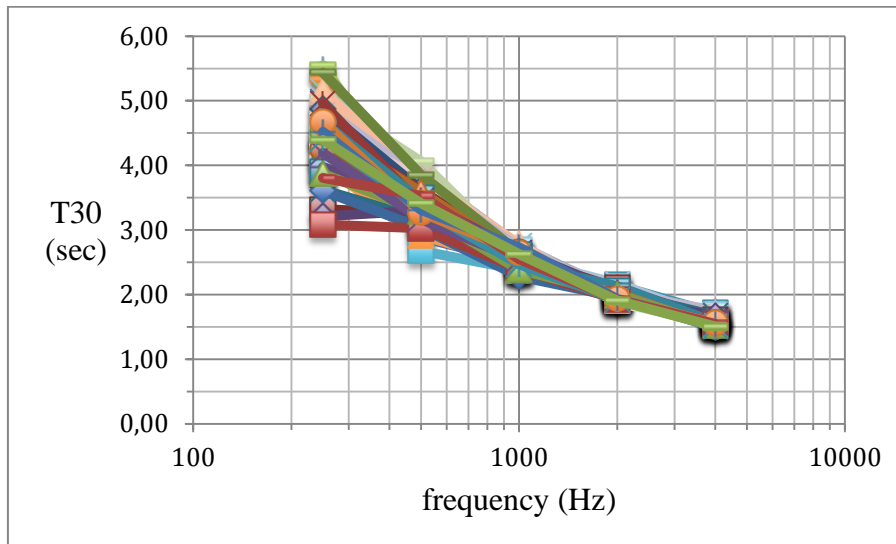
Σχήμα 51. Μετρήσεις T30 με παλαμάκι, μετά τις κατασκευές.



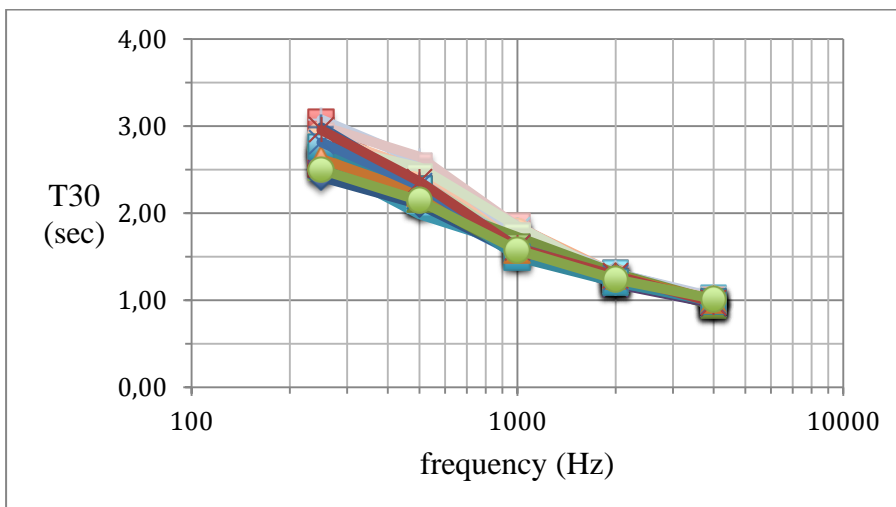
Σχήμα 52. Μετρήσεις T30 με παλαμάκι, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.



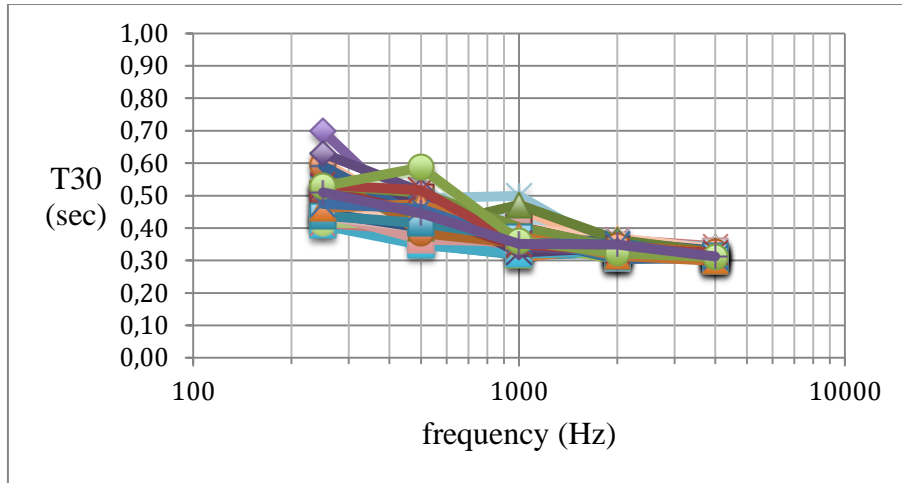
Σχήμα 53. Μέσος όρος μετρήσεων T30 με παλαμάκι, πριν (κόκκινο) και μετά (πράσινο) τις κατασκευές, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (μπλε) και προτεινόμενη τιμή (μωβ).



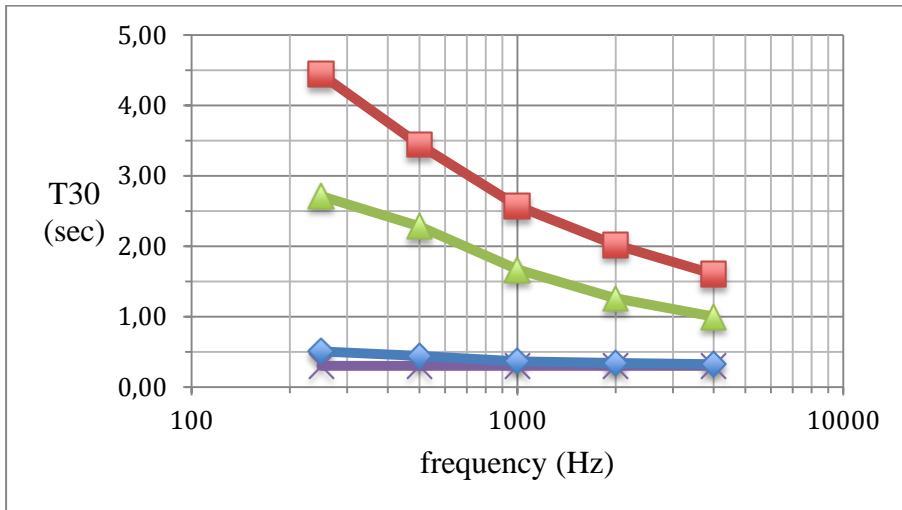
Σχήμα 54. Μετρήσεις T30 με όλες τις διεγέρσεις, πριν τις κατασκευές.



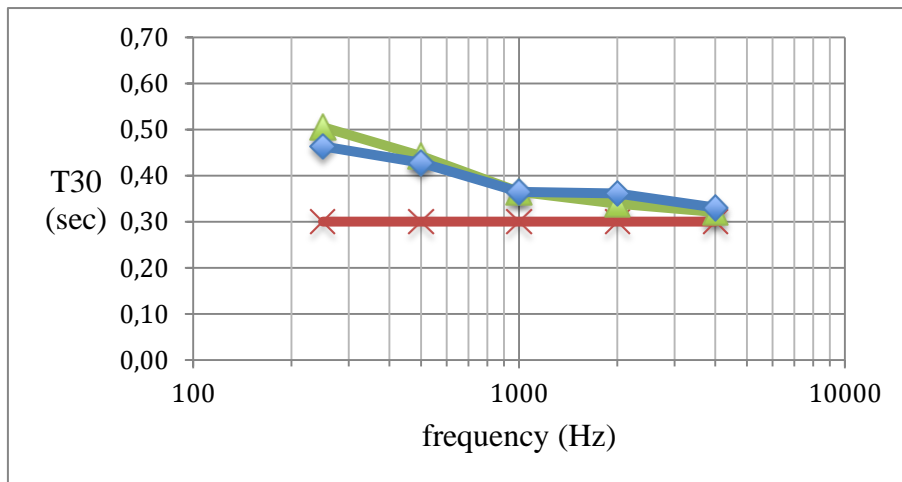
Σχήμα 55. Μετρήσεις T30 με όλες τις διεγέρσεις, μετά τις κατασκευές.



Σχήμα 56. Μετρήσεις T30 με όλες τις διεγέρσεις, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.

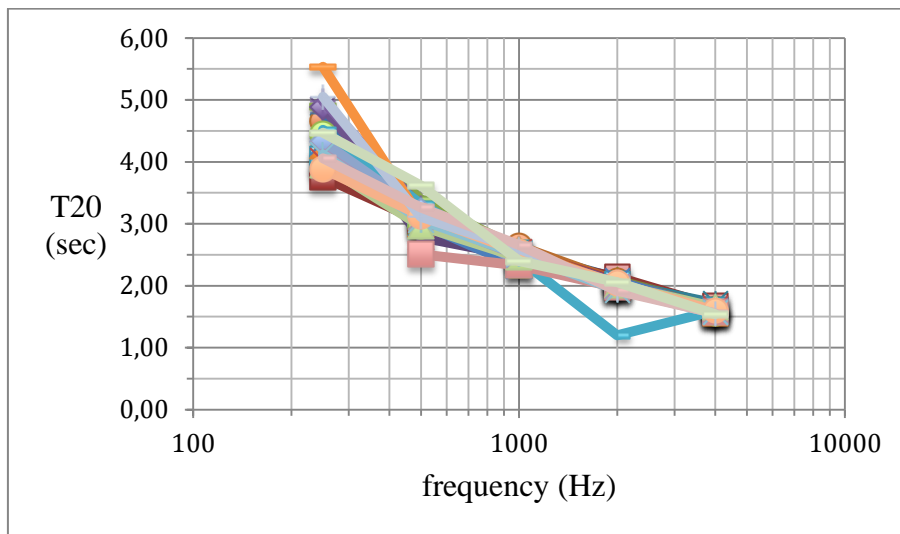


Σχήμα 57. Μέσος όρος όλων των μετρήσεων T30 με όλες τις διεγέρσεις, πριν (κόκκινο) και μετά (πράσινο) τις κατασκευές, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (μπλε) και προτεινόμενη τιμή (μωβ).

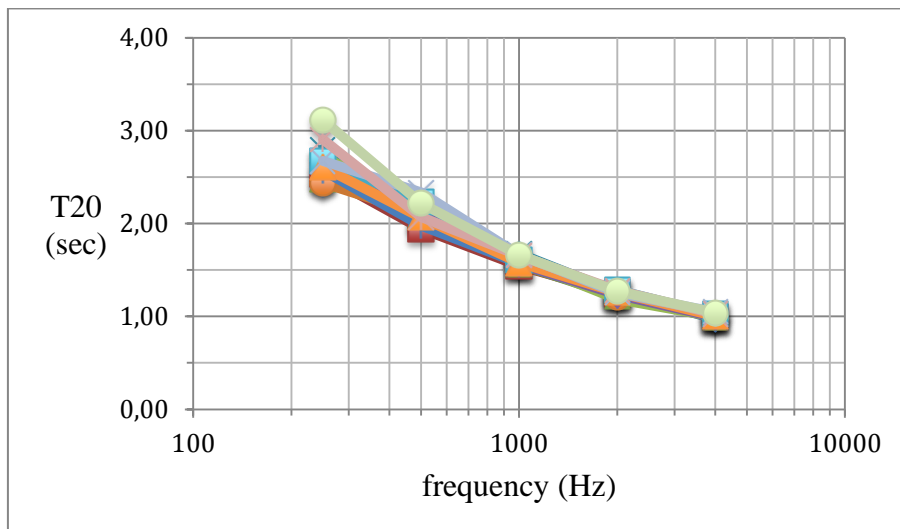


Σχήμα 58. Μέσος όρος μετρήσεων T30 στη θέση ακρόασης (μπλε), μέσος όρος όλων των μετρήσεων μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (πράσινο) και προτεινόμενη τιμή (κόκκινο).

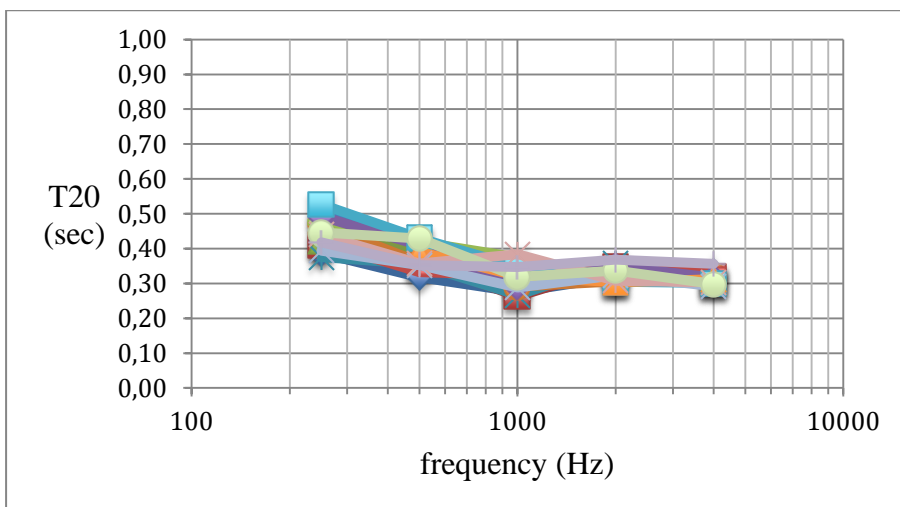
➤ **T20**



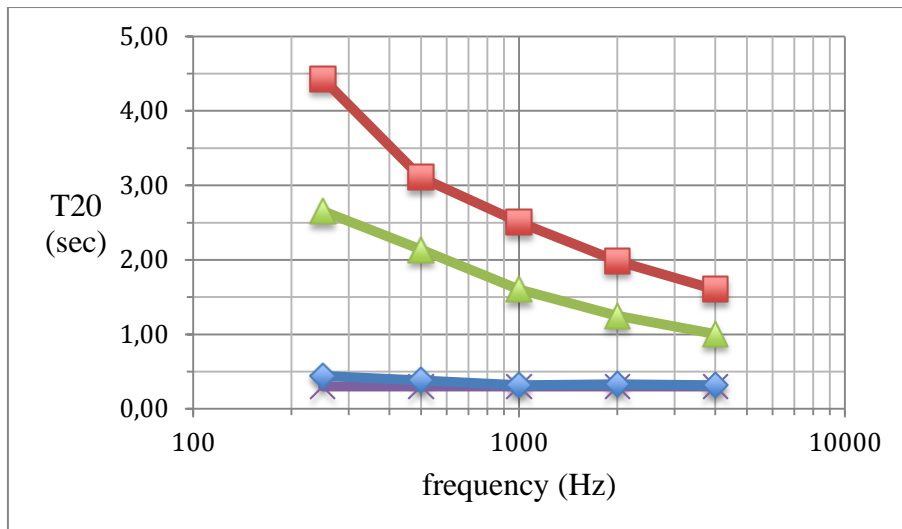
Σχήμα 59. Μετρήσεις T20 με ξύλινες πλάκες, πριν τις κατασκευές.



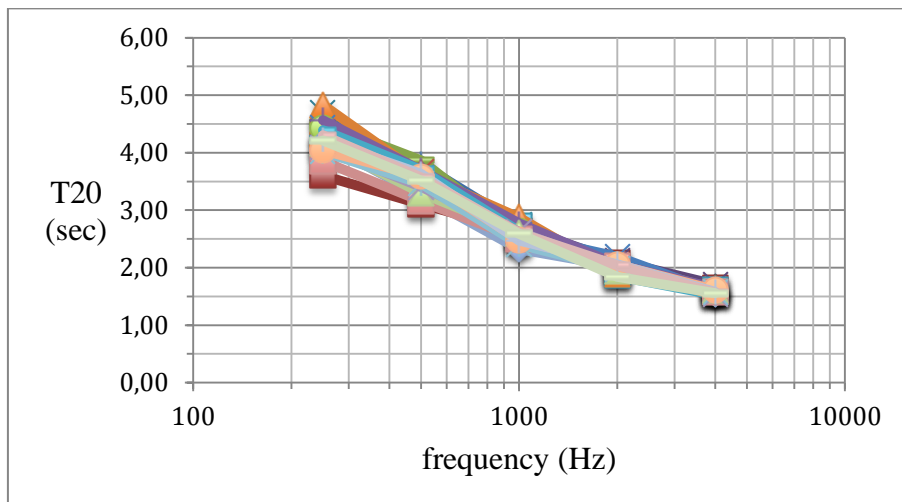
Σχήμα 60. Μετρήσεις T20 με ξύλινες πλάκες, μετά τις κατασκευές.



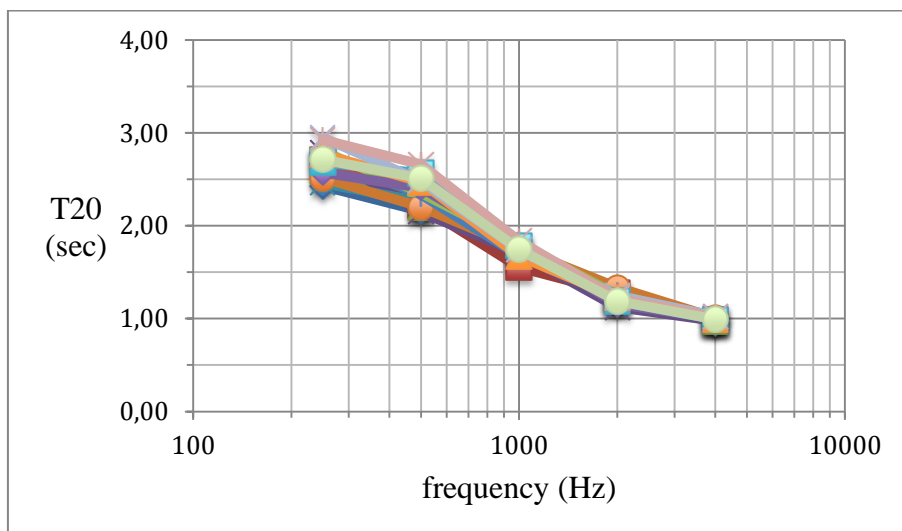
Σχήμα 61. Μετρήσεις T20 με ξύλινες πλάκες, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.



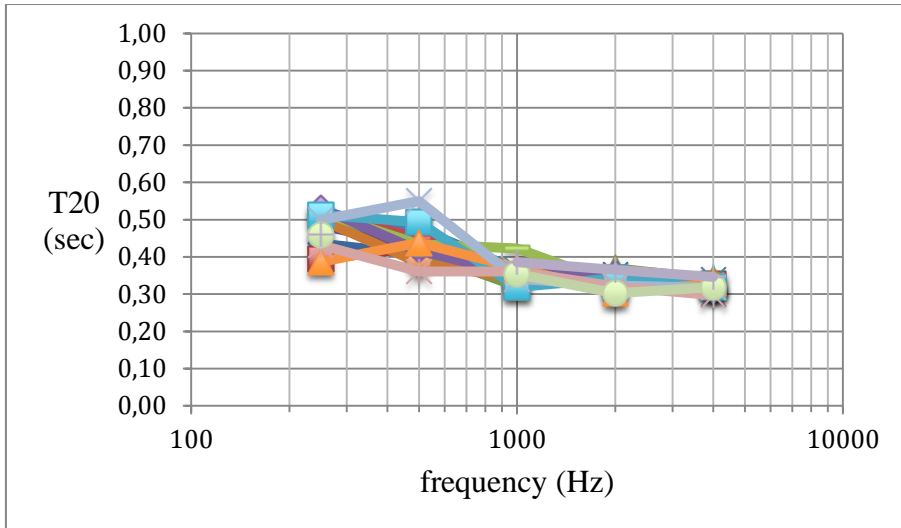
Σχήμα 62. Μέσος όρος μετρήσεων T20 με ξύλινες πλάκες, πριν (κόκκινο) και μετά (πράσινο) τις κατασκευές, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (μπλε) και προτεινόμενη τιμή (μωβ).



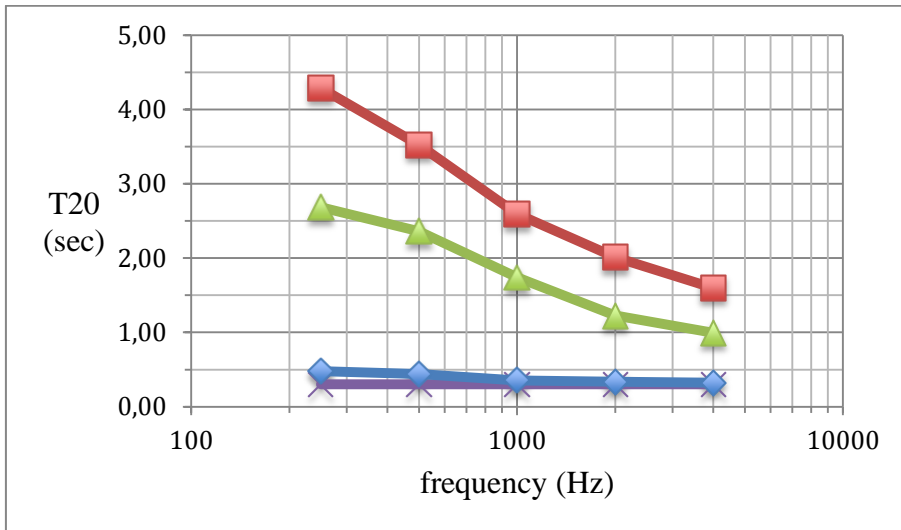
Σχήμα 63. Μετρήσεις T20 με μπαλόνι, πριν τις κατασκευές.



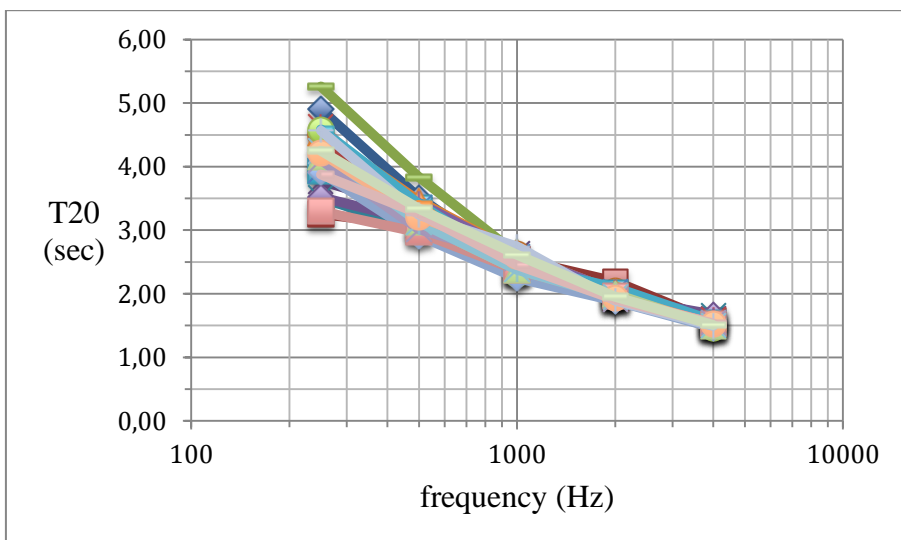
Σχήμα 64. Μετρήσεις T20 με μπαλόνι, μετά τις κατασκευές.



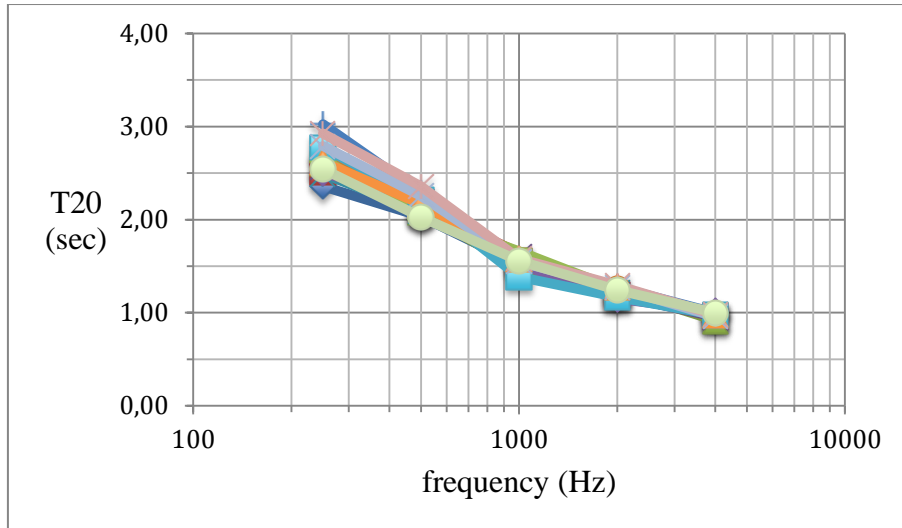
Σχήμα 65. Μετρήσεις T20 με μπαλόκι, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.



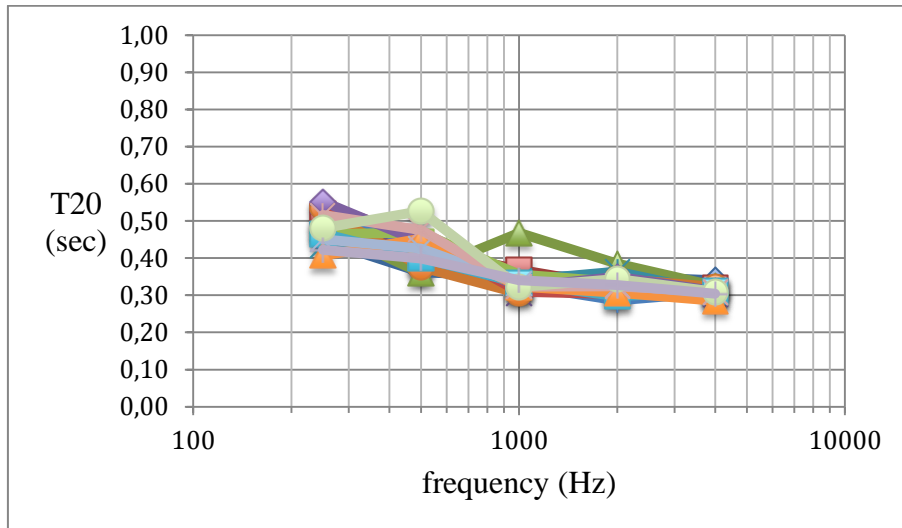
Σχήμα 66. Μέσος όρος μετρήσεων T20 με μπαλόκι, πριν (κόκκινο) και μετά (πράσινο) τις κατασκευές, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (μπλε) και προτεινόμενη τιμή (μωβ).



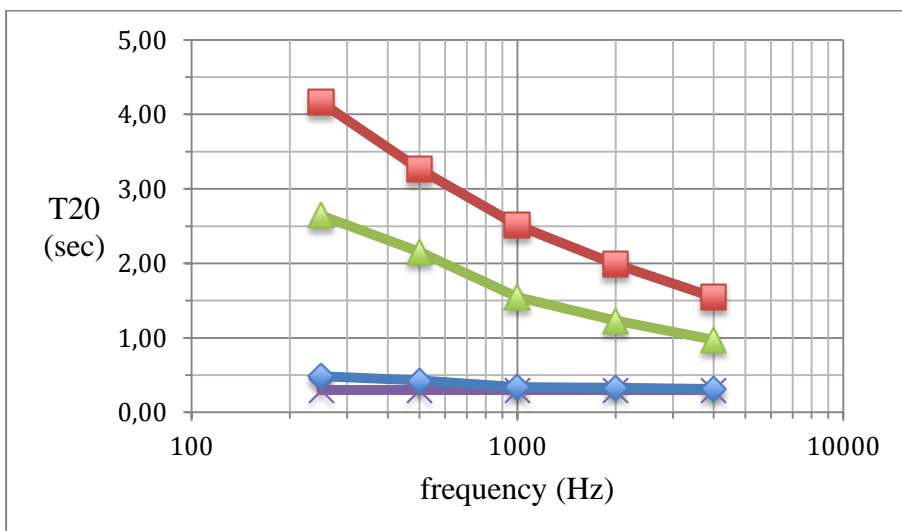
Σχήμα 67. Μετρήσεις T20 με παλαμάκι, πριν τις κατασκευές.



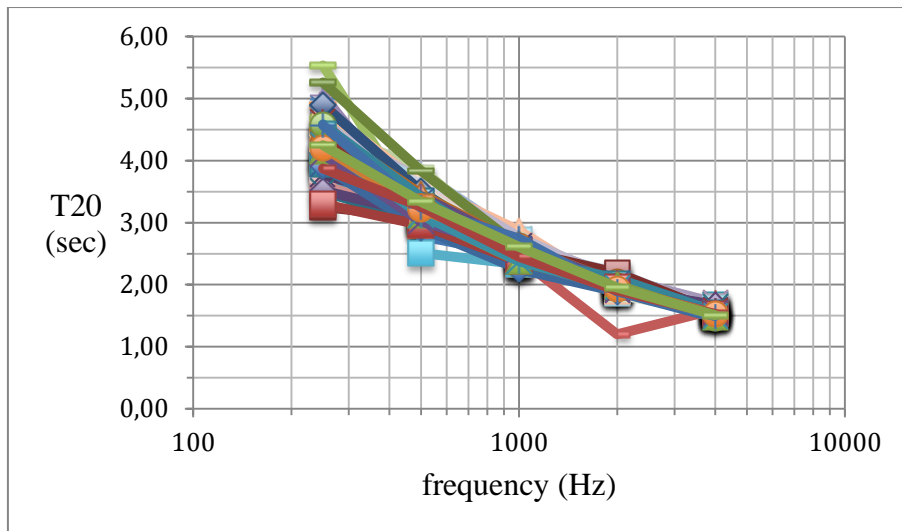
Σχήμα 68. Μετρήσεις T20 με παλαμάκι, μετά τις κατασκευές.



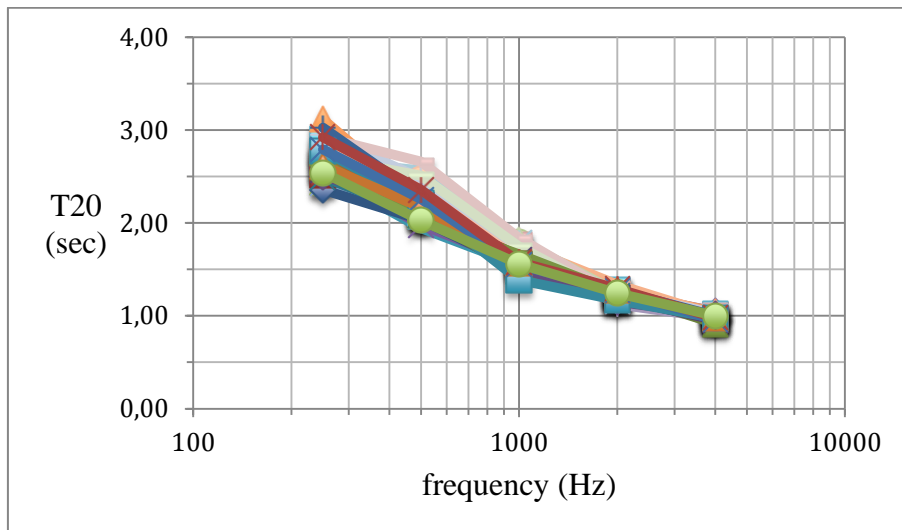
Σχήμα 69. Μετρήσεις T20 με παλαμάκι, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.



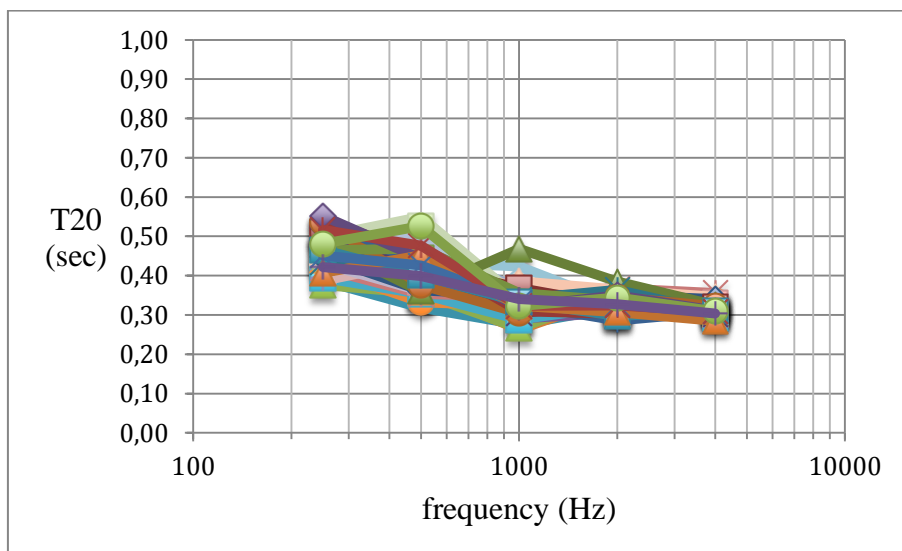
Σχήμα 70. Μέσος όρος μετρήσεων T20 με παλαμάκι, πριν (κόκκινο) και μετά (πράσινο) τις κατασκευές, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (μπλε) και προτεινόμενη τιμή (μωβ).



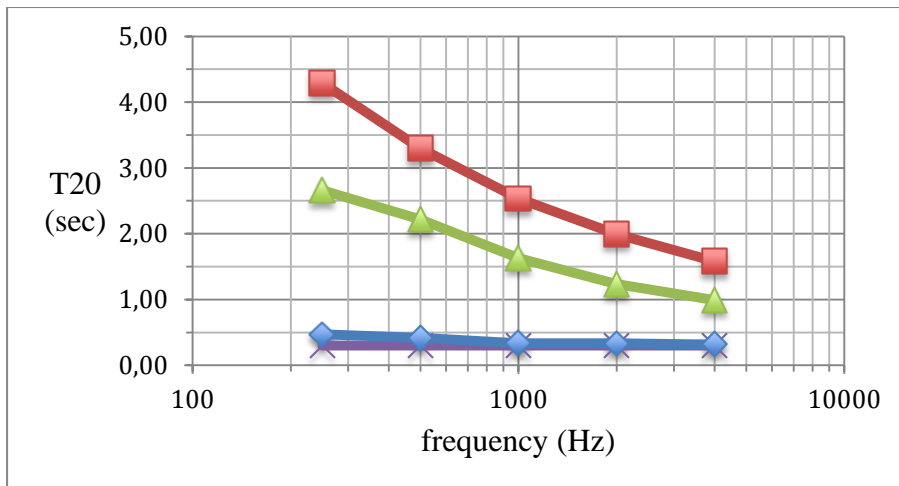
Σχήμα 71. Μετρήσεις T20 με όλες τις διεγέρσεις, πριν τις κατασκευές.



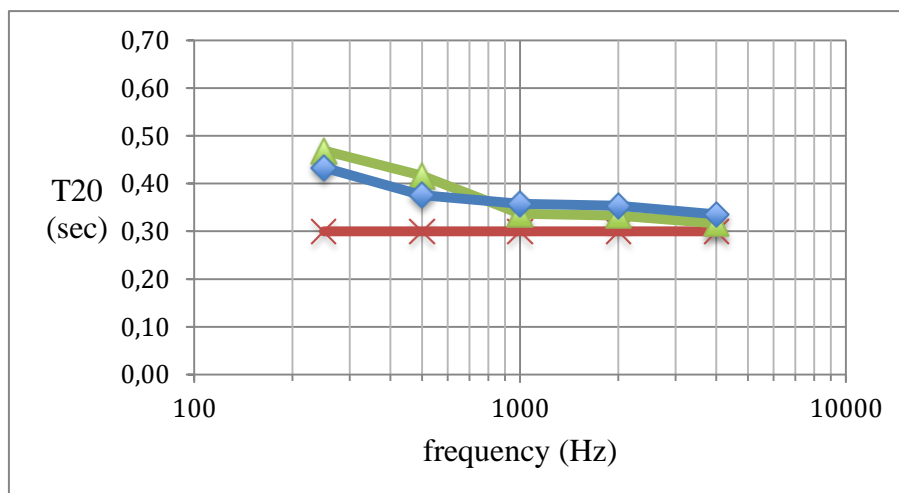
Σχήμα 72. Μετρήσεις T20 με όλες τις διεγέρσεις, μετά τις κατασκευές.



Σχήμα 73. Μετρήσεις T20 με όλες τις διεγέρσεις, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.

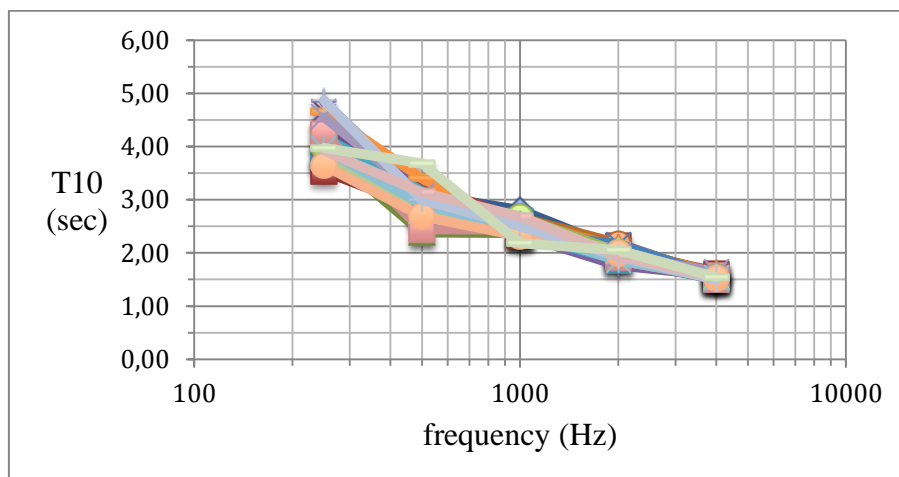


Σχήμα 74. Μέσος όρος όλων των μετρήσεων T20 με όλες τις διεγέρσεις, πριν (κόκκινο) και μετά (πράσινο) τις κατασκευές, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (μπλε) και προτεινόμενη τιμή (μωβ).

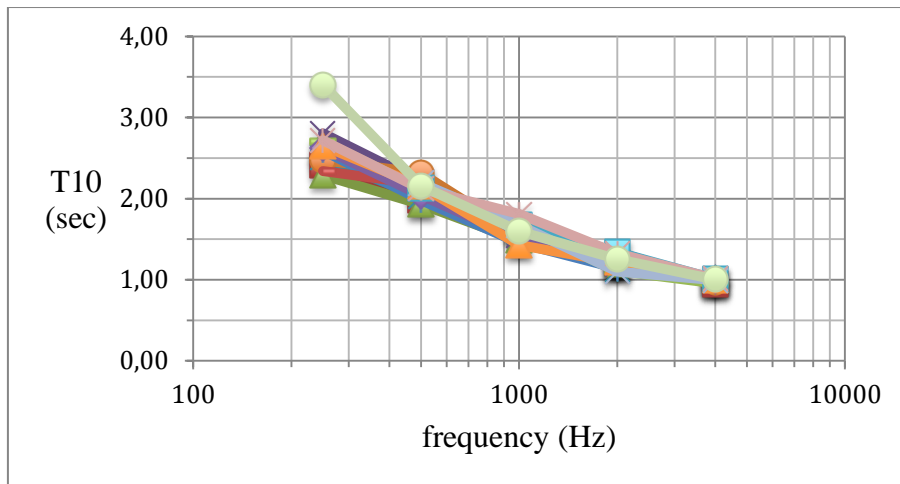


Σχήμα 75. Μέσος όρος μετρήσεων T20 στην θέση ακρόασης (μπλε), μέσος όρος όλων των μετρήσεων μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (πράσινο) και προτεινόμενη τιμή (κόκκινο).

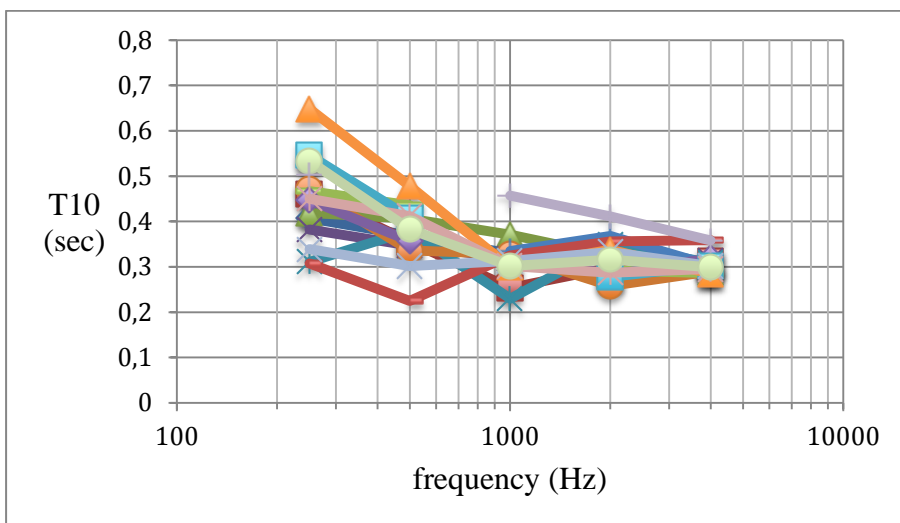
➤ **T10**



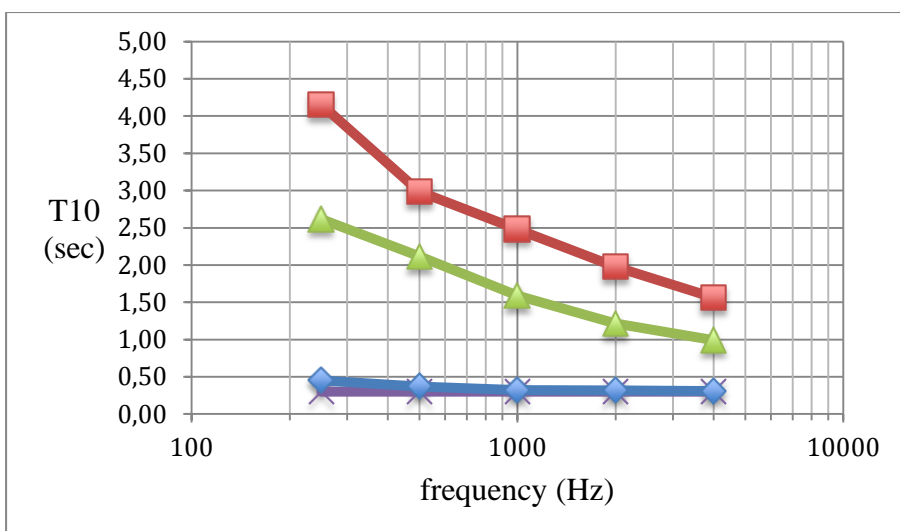
Σχήμα 76. Μετρήσεις T10 με ξύλινες πλάκες, πριν τις κατασκευές.



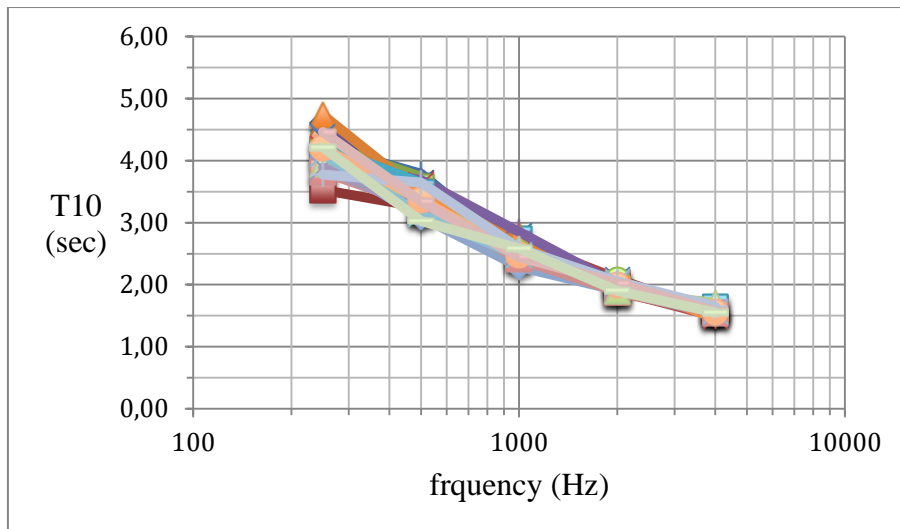
Σχήμα 77. Μετρήσεις T10 με ξύλινες πλάκες, μετά τις κατασκευές.



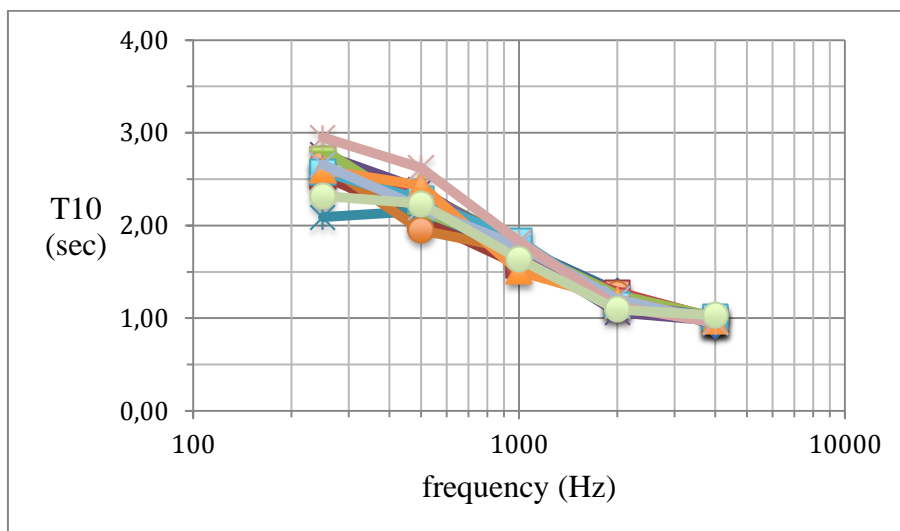
Σχήμα 78. Μετρήσεις T10 με ξύλινες πλάκες, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.



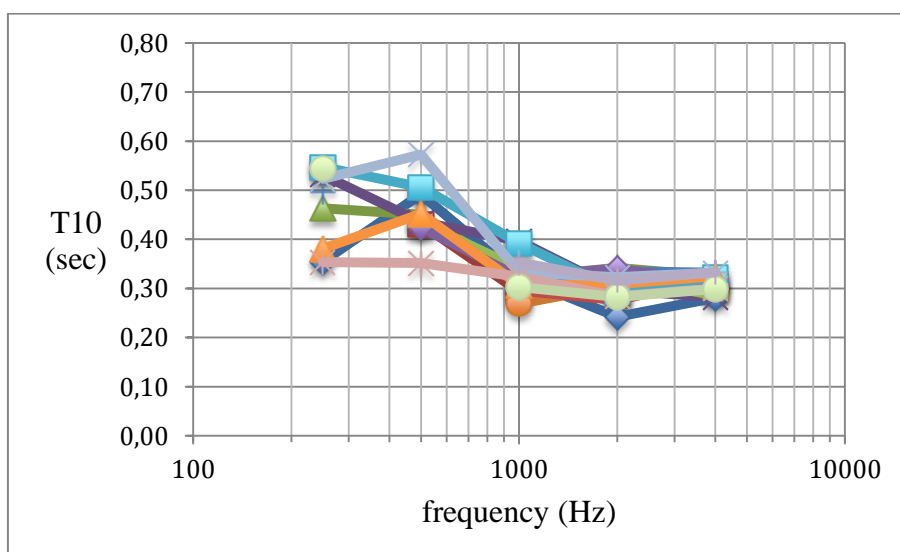
Σχήμα 79. Μέσος όρος μετρήσεων T10 με ξύλινες πλάκες, πριν (κόκκινο) και μετά (πράσινο) τις κατασκευές, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (μπλε) και προτεινόμενη τιμή (μωβ).



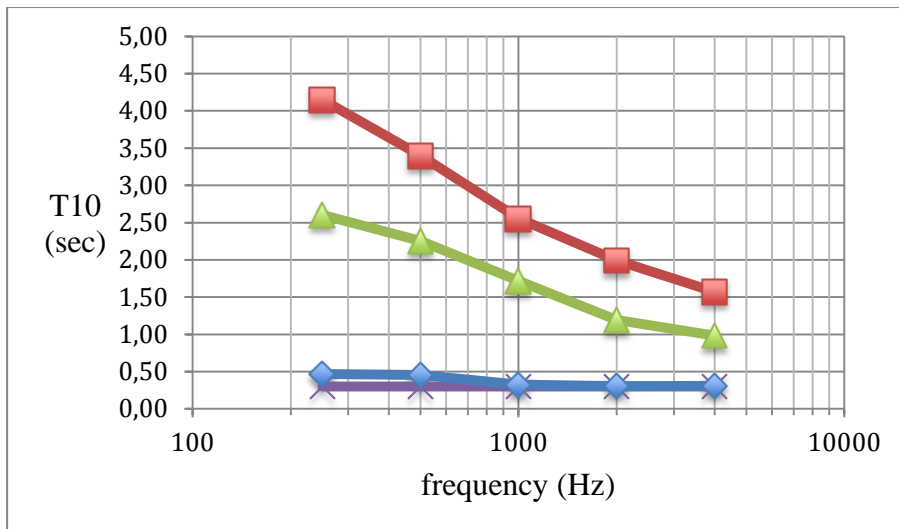
Σχήμα 80. Μετρήσεις T10 με μπαλόνη, πριν τις κατασκευές.



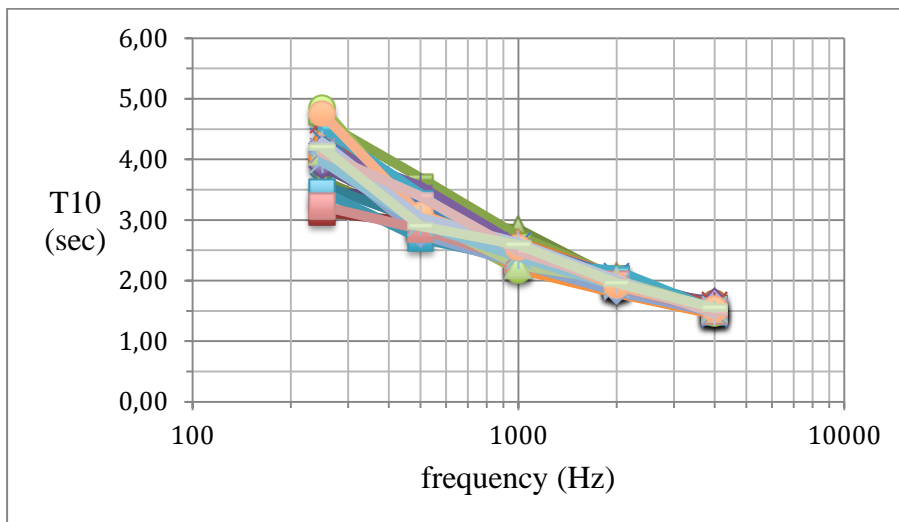
Σχήμα 81. Μετρήσεις T10 με μπαλόνη, μετά τις κατασκευές.



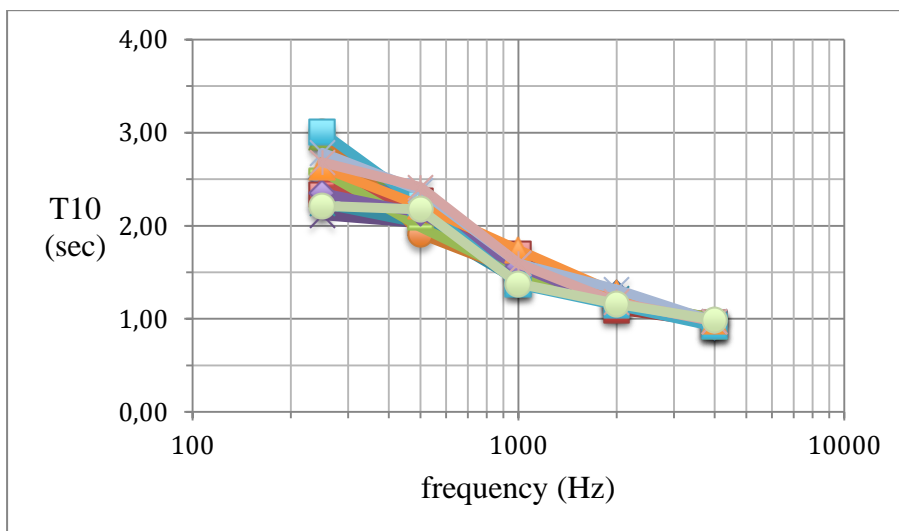
Σχήμα 82. Μετρήσεις T10 με μπαλόνη, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.



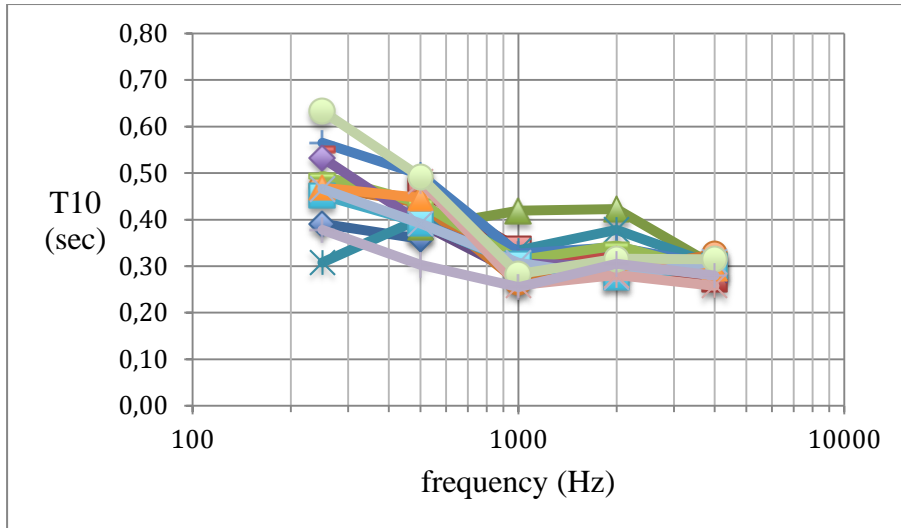
Σχήμα 83. Μέσος όρος μετρήσεων T10 με μπαλόκι, πριν (κόκκινο) και μετά (πράσινο) τις κατασκευές, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (μπλε) και προτεινόμενη τιμή (μωβ).



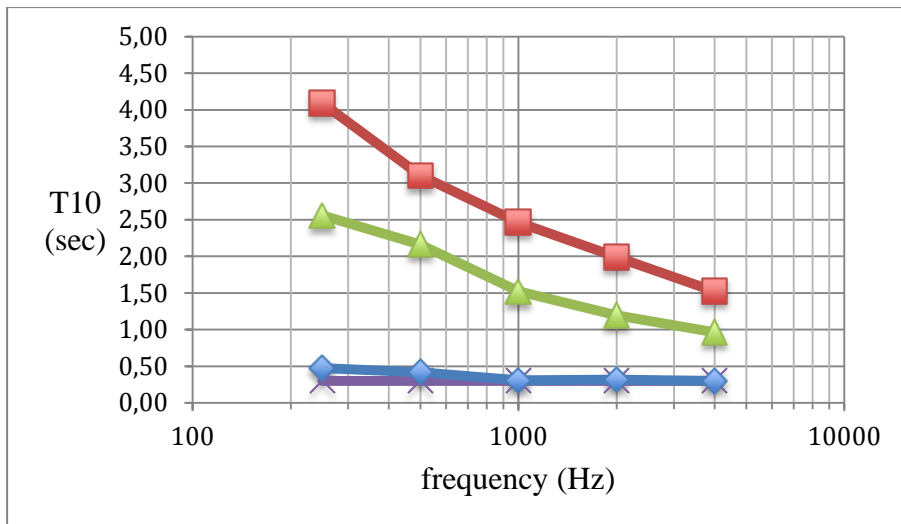
Σχήμα 84. Μετρήσεις T10 με παλαμάκι, πριν τις κατασκευές.



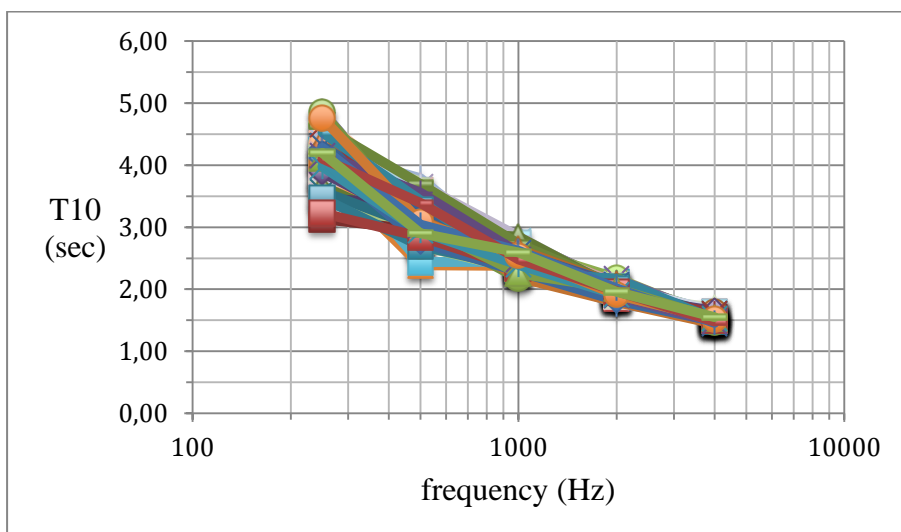
Σχήμα 85. Μετρήσεις T10 με παλαμάκι, μετά τις κατασκευές.



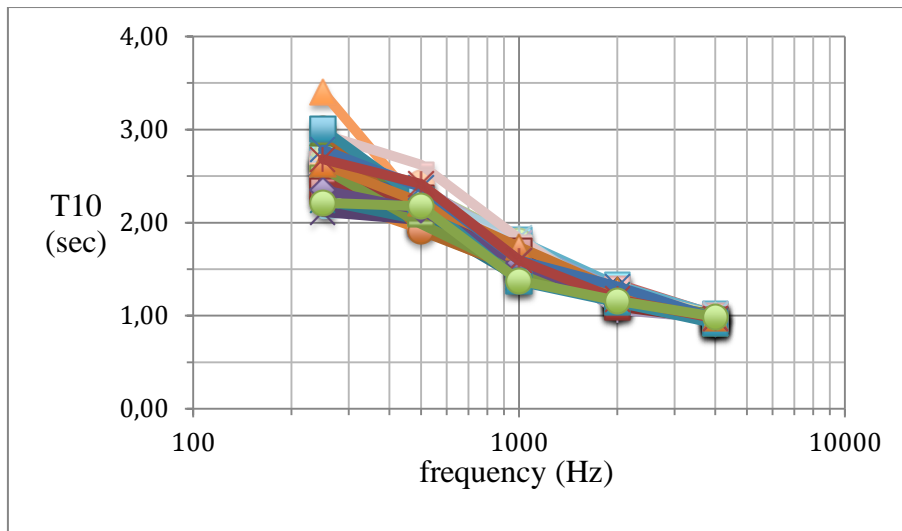
Σχήμα 86. Μετρήσεις T10 με παλαμάκι, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.



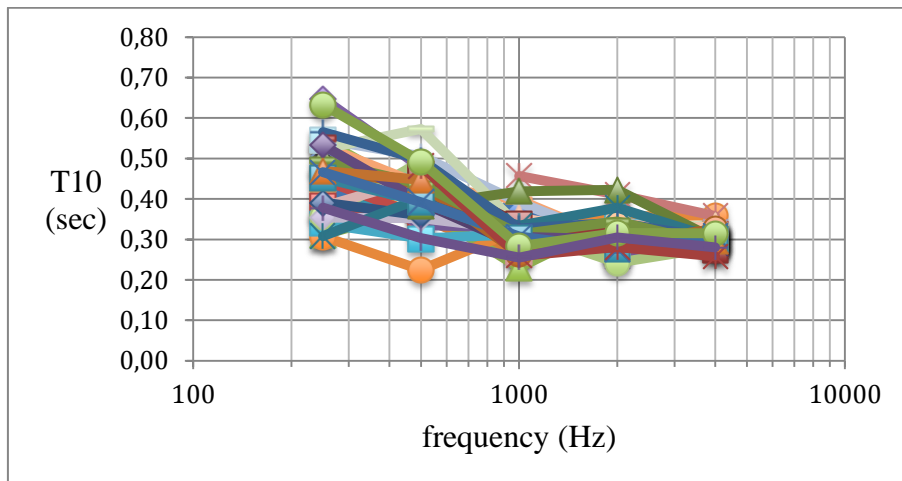
Σχήμα 87. Μέσος όρος μετρήσεων T10 με παλαμάκι, πριν (κόκκινο) και μετά (πράσινο) τις κατασκευές, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (μπλε) και προτεινόμενη τιμή (μωβ).



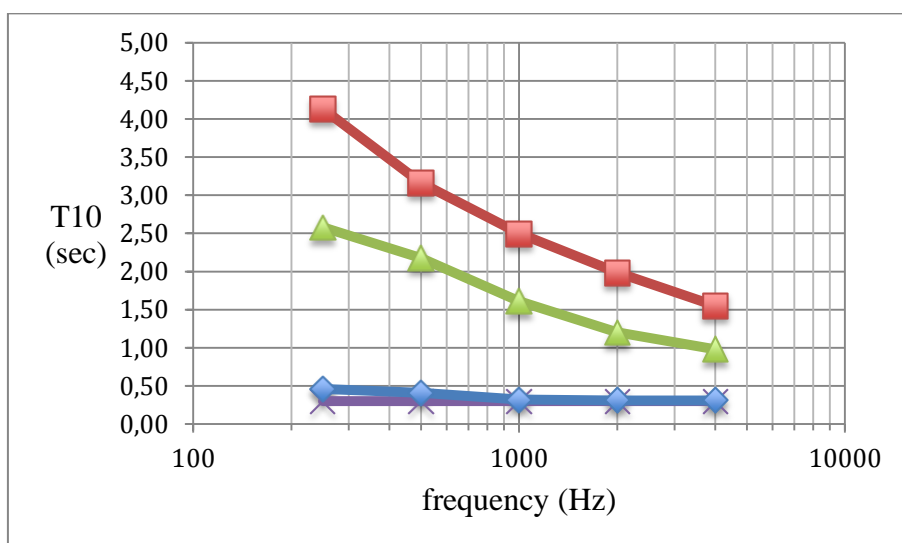
Σχήμα 88. Μετρήσεις T10 με όλες τις διεγέρσεις, πριν τις κατασκευές.



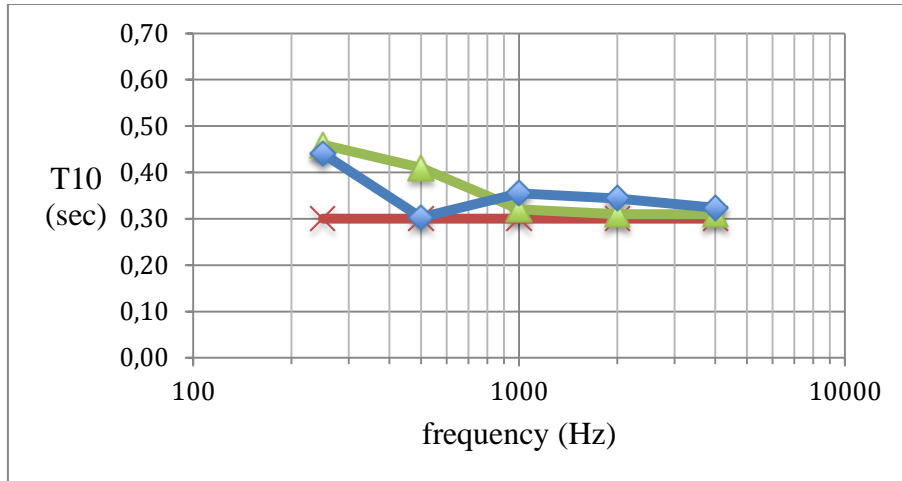
Σχήμα 89. Μετρήσεις T10 με όλες τις διεγέρσεις, μετά τις κατασκευές.



Σχήμα 90. Μετρήσεις T10 με όλες τις διεγέρσεις, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.

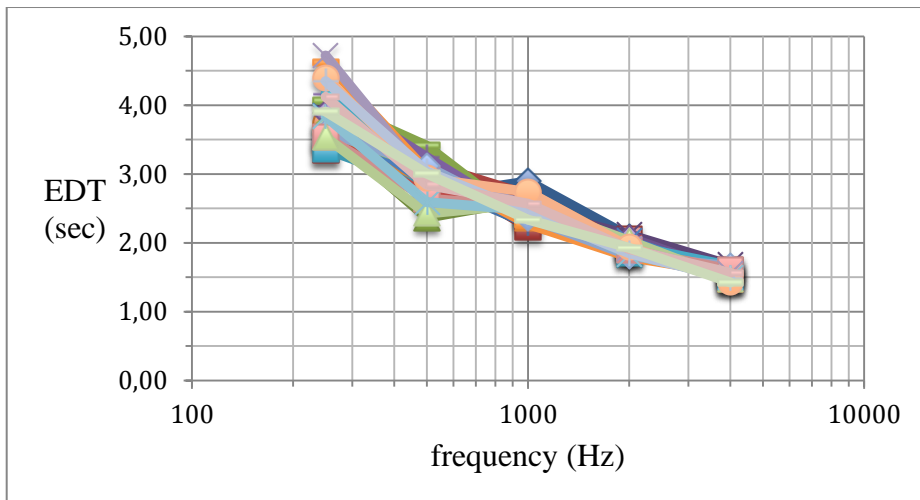


Σχήμα 91. Μέσος όρος όλων των μετρήσεων T10 με όλες τις διεγέρσεις, πριν (κόκκινο) και μετά (πράσινο) τις κατασκευές, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (μπλε) και προτεινόμενη τιμή (μωβ).

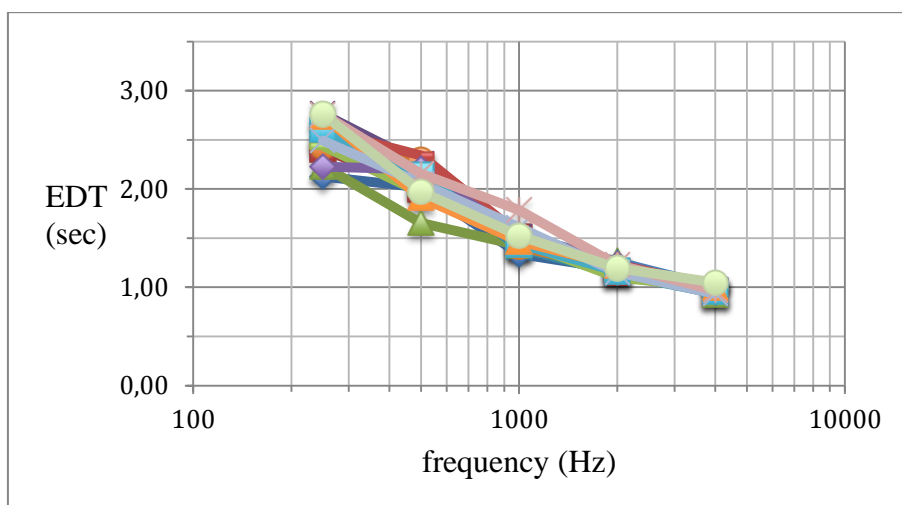


Σχήμα 92. Μέσος όρος μετρήσεων T10 στην θέση ακρόασης (μπλε), μέσος όρος όλων των μετρήσεων μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (πράσινο) και προτεινόμενη τιμή (κόκκινο).

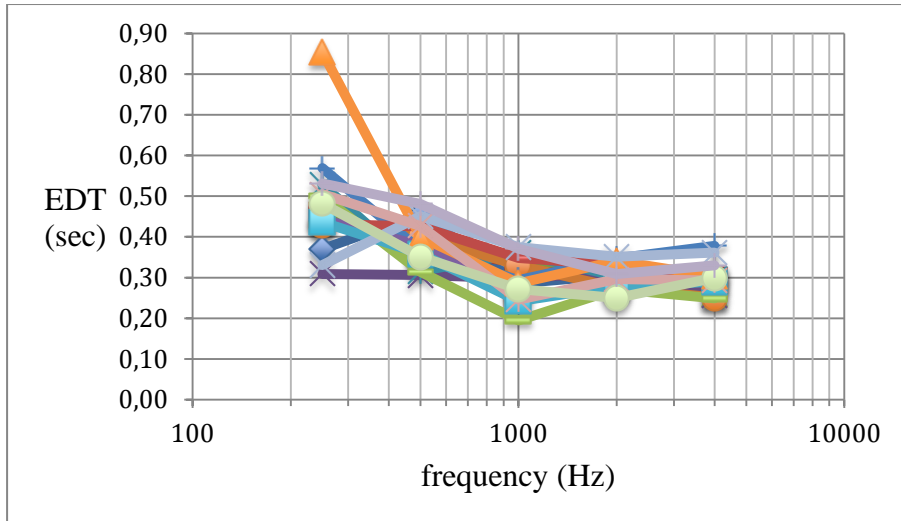
➤ **EDT**



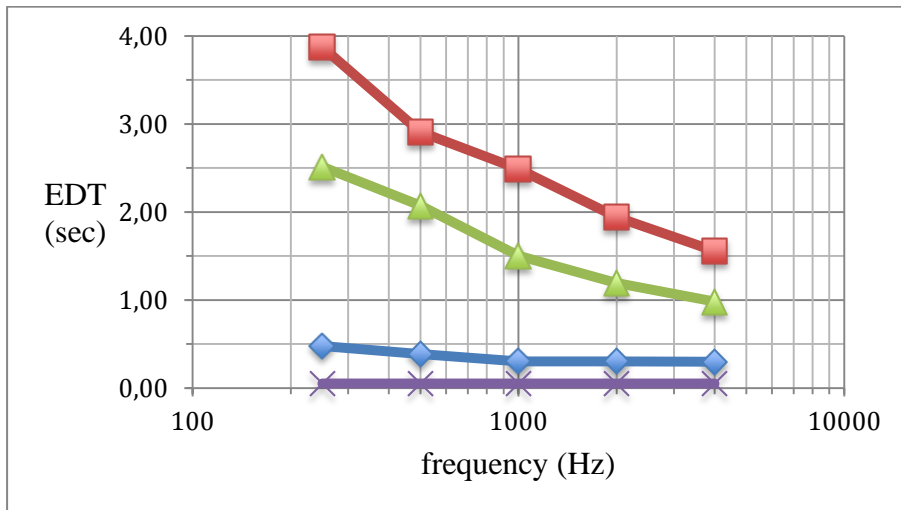
Σχήμα 93. Μετρήσεις EDT με ξύλινες πλάκες, πριν τις κατασκευές.



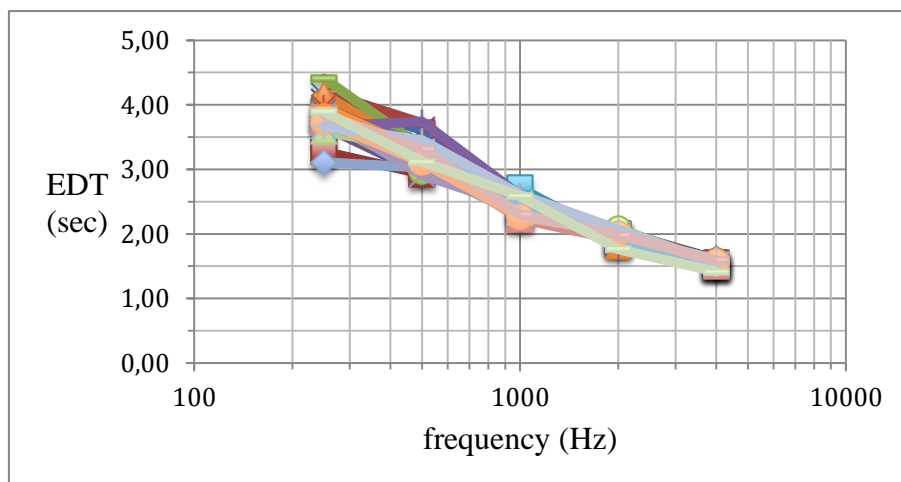
Σχήμα 94. Μετρήσεις EDT με ξύλινες πλάκες, μετά τις κατασκευές.



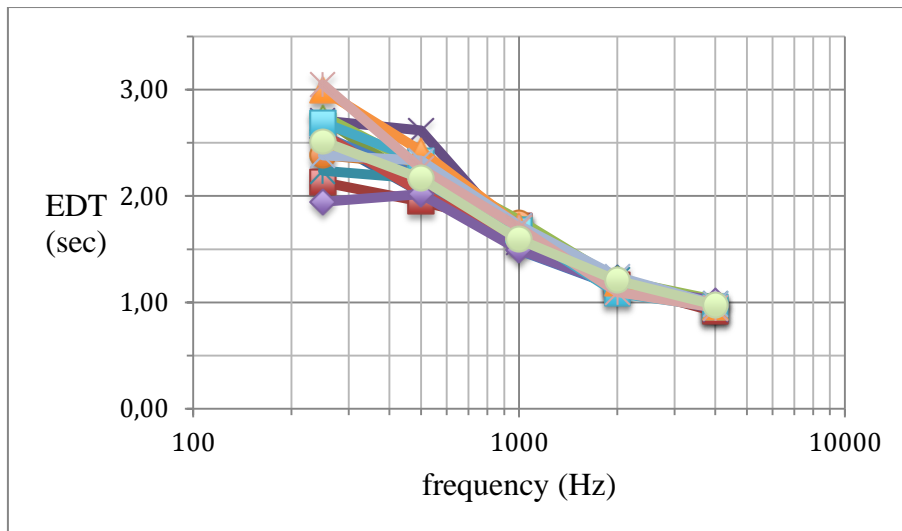
Σχήμα 95. Μετρήσεις EDT με ξύλινες πλάκες, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.



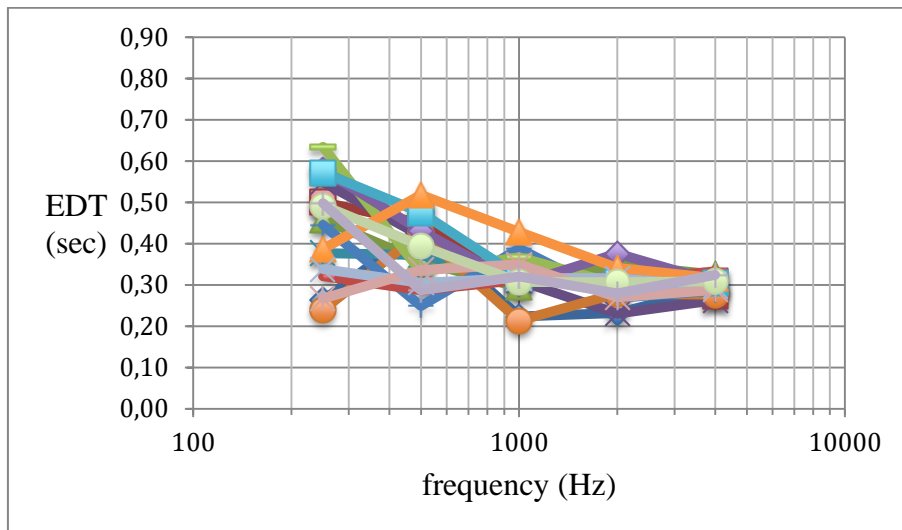
Σχήμα 96. Μέσος όρος μετρήσεων EDT με ξύλινες πλάκες, πριν (κόκκινο) και μετά (πράσινο) τις κατασκευές, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (μπλε) και προτεινόμενη τιμή (μωβ).



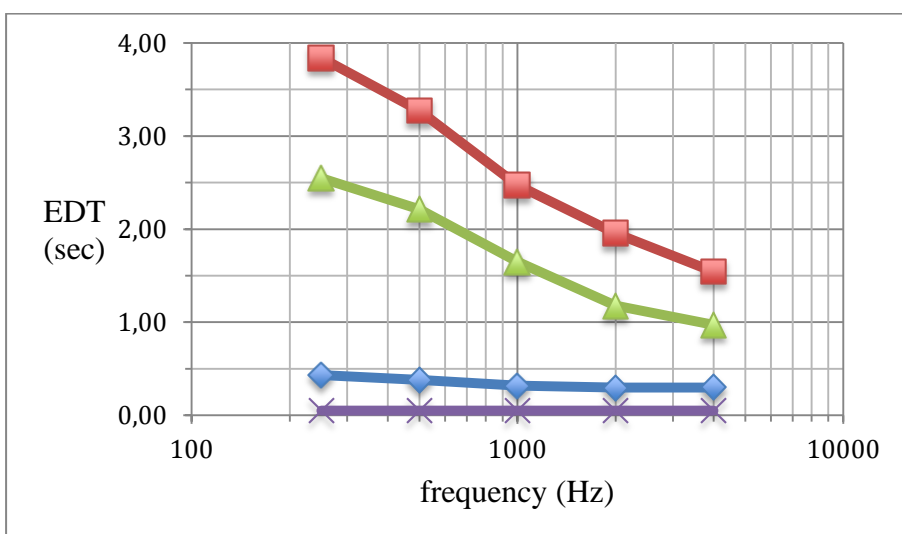
Σχήμα 97. Μετρήσεις EDT με μπαλόνη, πριν τις κατασκευές.



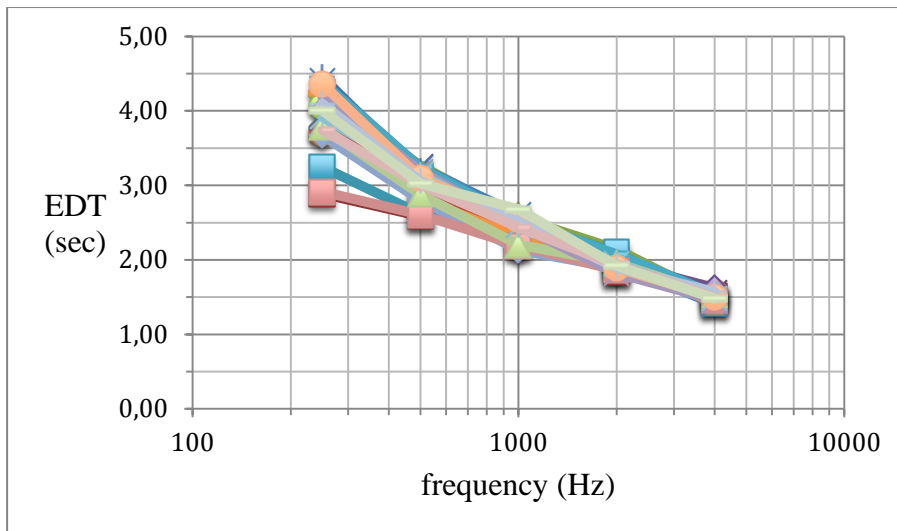
Σχήμα 98. Μετρήσεις EDT με μπαλόνη, μετά τις κατασκευές.



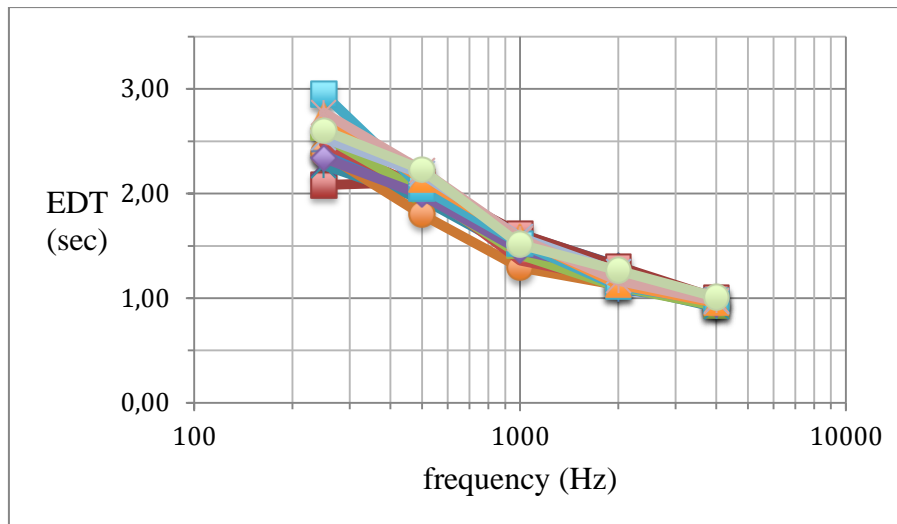
Σχήμα 99. Μετρήσεις EDT με μπαλόνη, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.



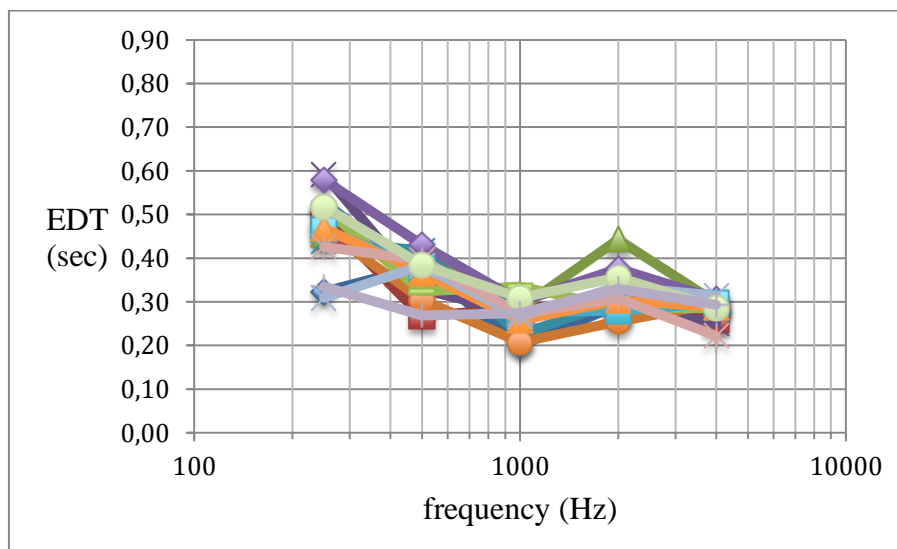
Σχήμα 100. Μέσος όρος μετρήσεων EDT με μπαλόνη, πριν (κόκκινο) και μετά (πράσινο) τις κατασκευές, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (μπλε) και προτεινόμενη τιμή (μωβ).



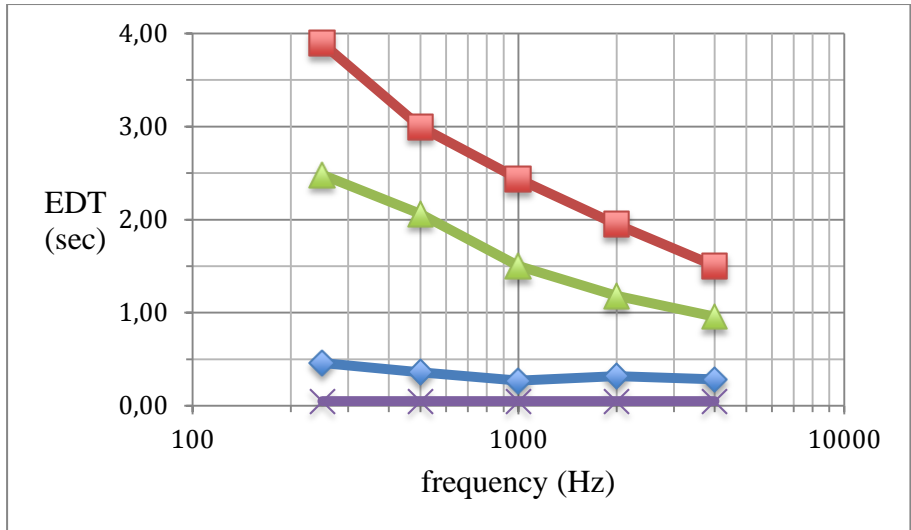
Σχήμα 101. Μετρήσεις EDT με παλαμάκι, πριν τις κατασκευές.



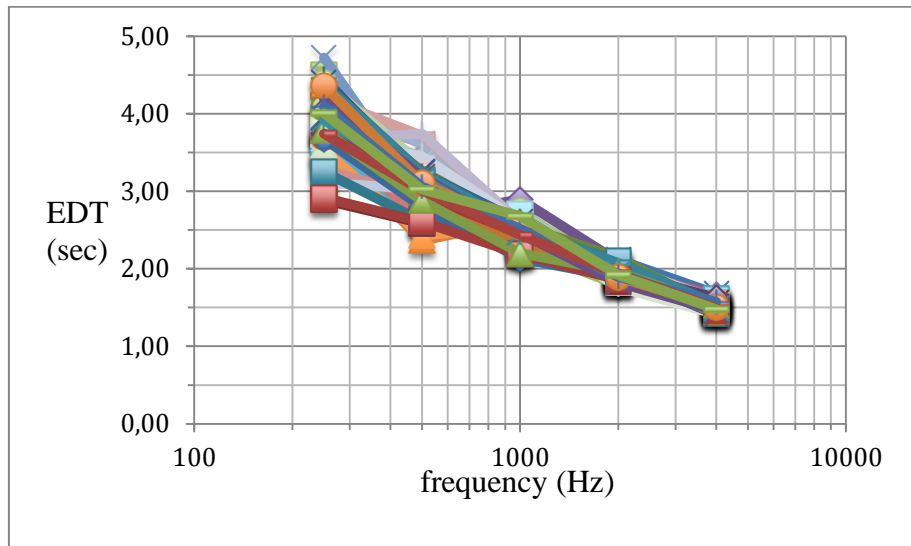
Σχήμα 102. Μετρήσεις EDT με παλαμάκι, μετά τις κατασκευές.



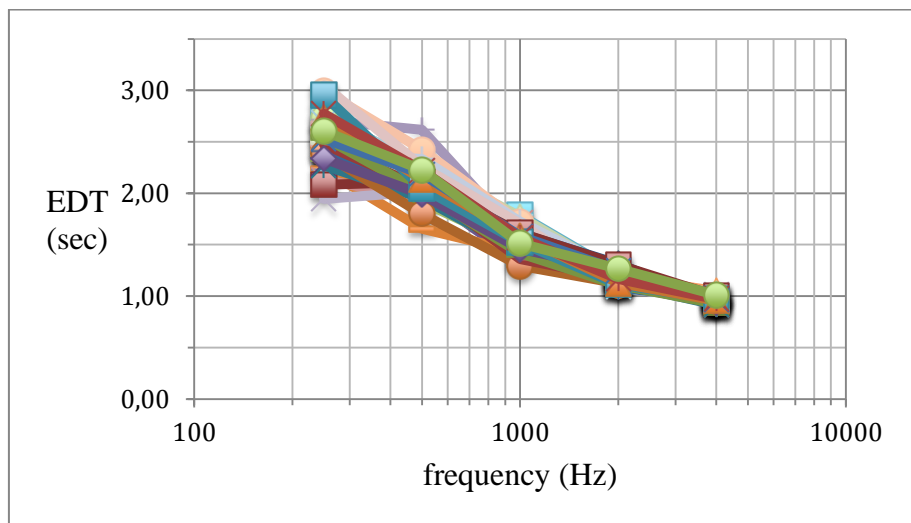
Σχήμα 103. Μετρήσεις EDT με παλαμάκι, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.



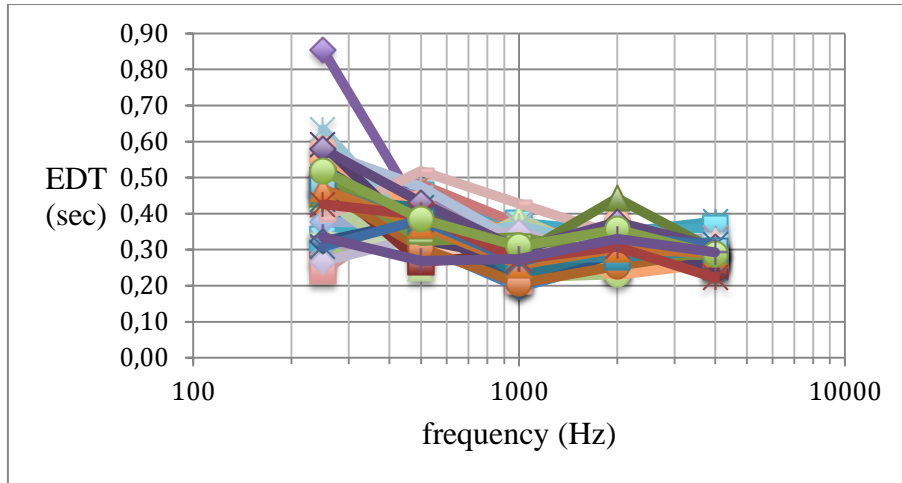
Σχήμα 104. Μέσος όρος μετρήσεων EDT με παλαμάκι, πριν (κόκκινο) και μετά (πράσινο) τις κατασκευές, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (μπλε) και προτεινόμενη τιμή (μωβ).



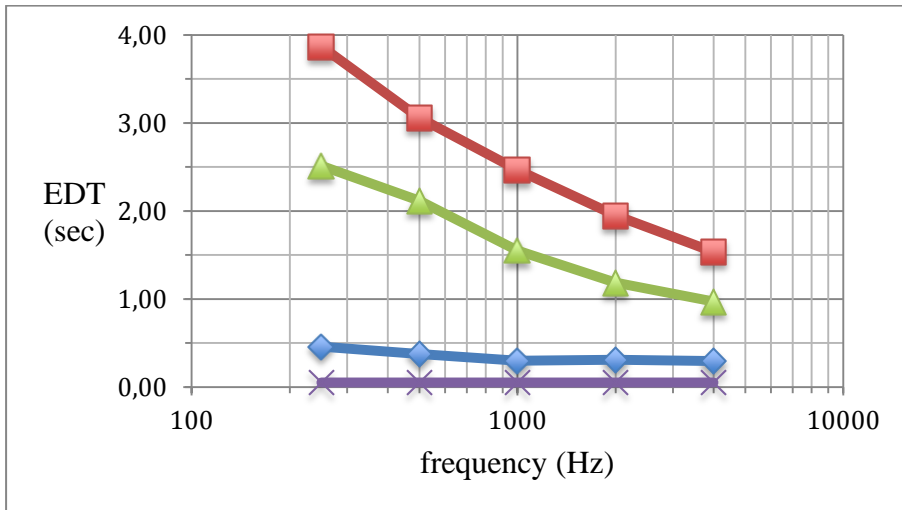
Σχήμα 105. Μετρήσεις EDT με όλες τις διεγέρσεις, πριν τις κατασκευές.



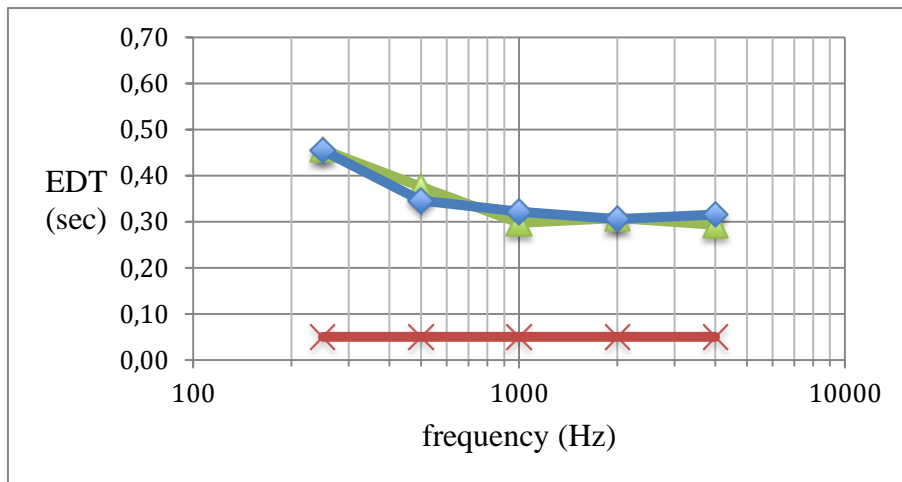
Σχήμα 106. Μετρήσεις EDT με όλες τις διεγέρσεις, μετά τις κατασκευές.



Σχήμα 107. Μετρήσεις EDT με όλες τις διεγέρσεις, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.

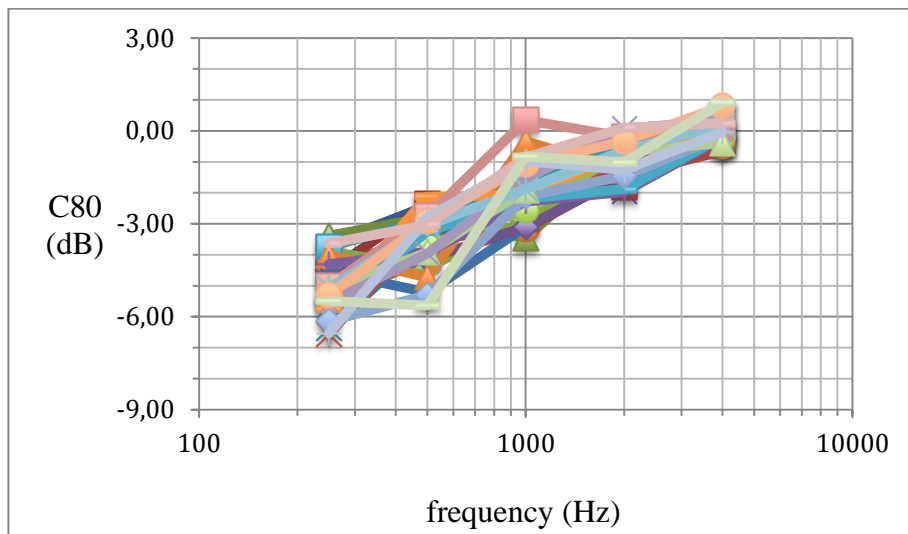


Σχήμα 108. Μέσος όρος όλων των μετρήσεων EDT με όλες τις διεγέρσεις, πριν (κόκκινο) και μετά (πράσινο) τις κατασκευές, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (μπλε) και προτεινόμενη τιμή (μωβ).

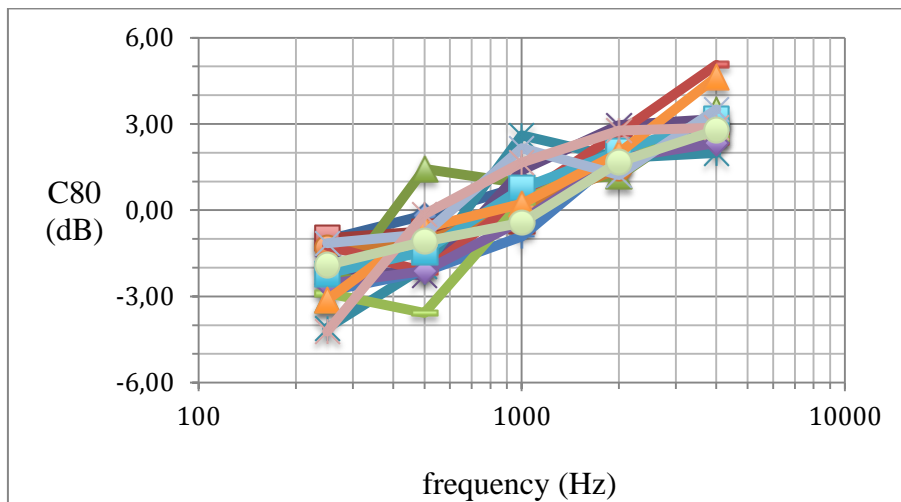


Σχήμα 109. Μέσος όρος μετρήσεων EDT στην θέση ακρόασης (μπλε), μέσος όρος όλων των μετρήσεων μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (πράσινο) και προτεινόμενη τιμή (κόκκινο).

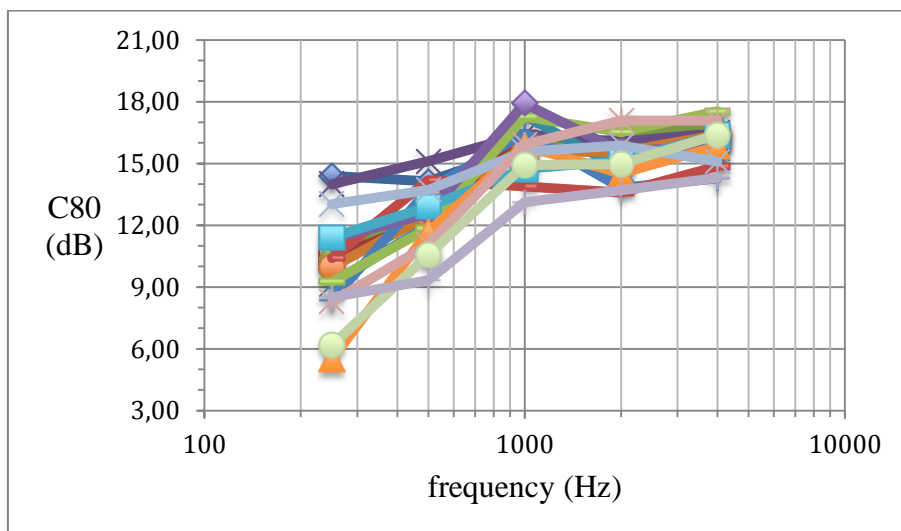
➤ C80



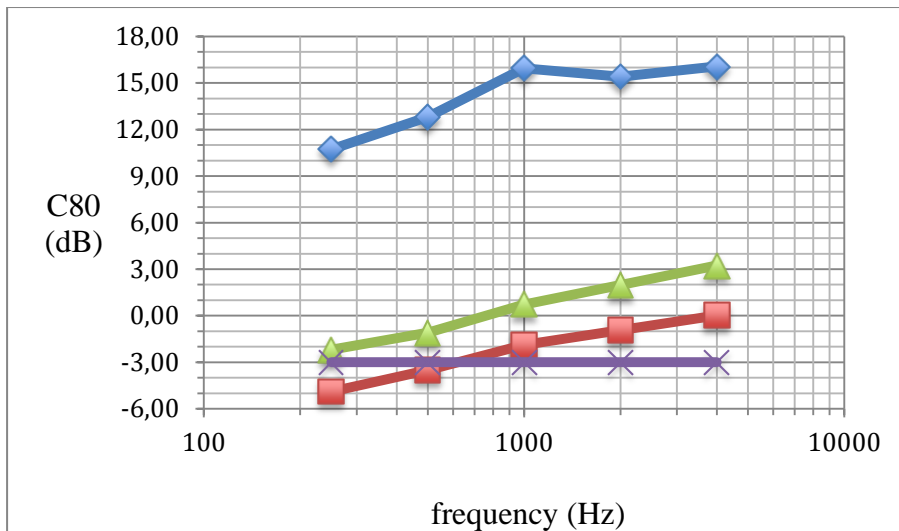
Σχήμα 110. Μετρήσεις C80 με ξύλινες πλάκες, πριν τις κατασκευές.



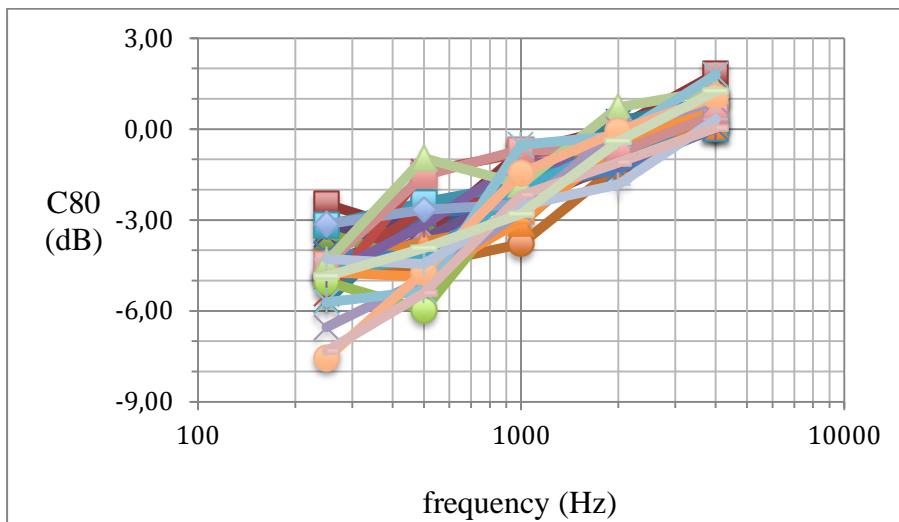
Σχήμα 111. Μετρήσεις C80 με ξύλινες πλάκες, μετά τις κατασκευές.



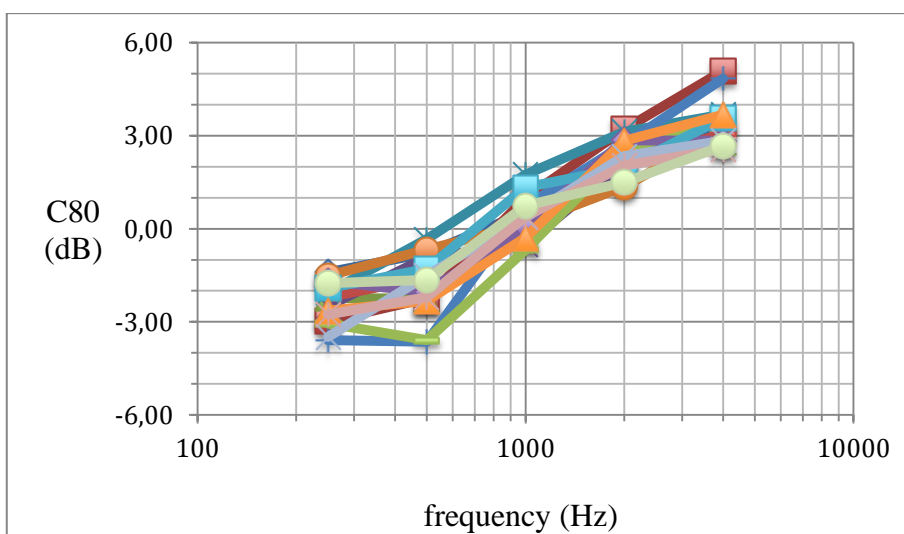
Σχήμα 112. Μετρήσεις C80 με ξύλινες πλάκες, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.



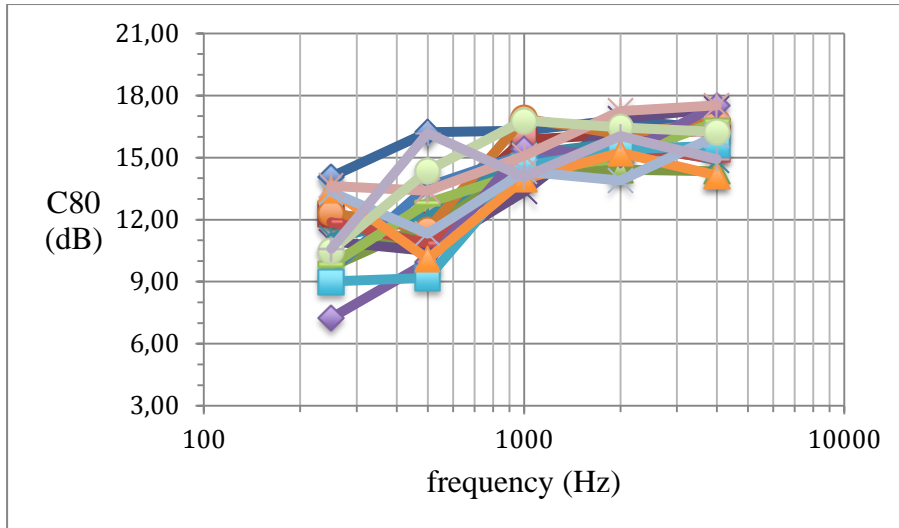
Σχήμα 113. Μέσος όρος μετρήσεων C80 με ξύλινες πλάκες, πριν (κόκκινο) και μετά (πράσινο) τις κατασκευές, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (μπλε) και προτεινόμενη τιμή (μωβ).



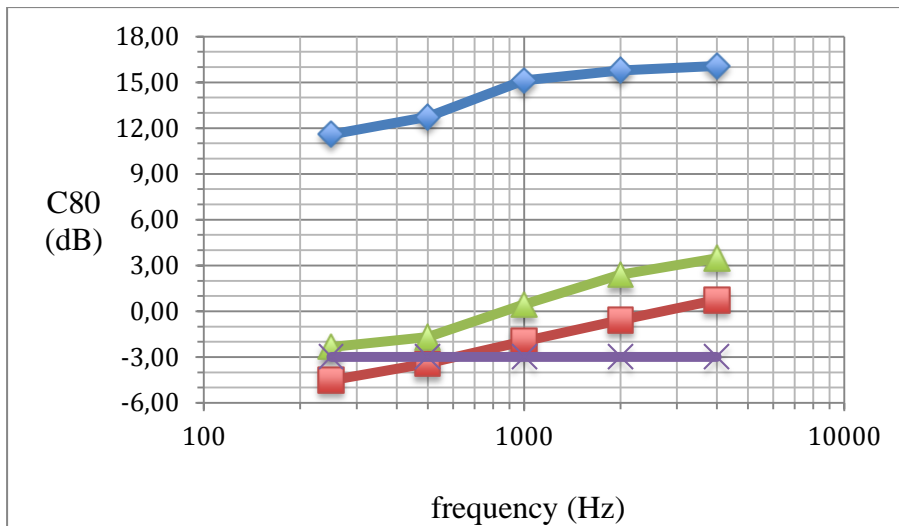
Σχήμα 114. Μετρήσεις C80 με μπαλόνη, πριν τις κατασκευές.



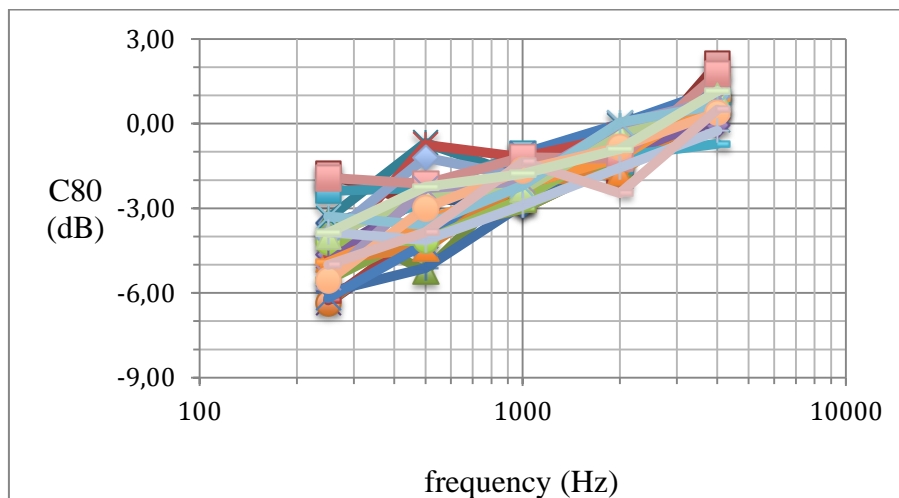
Σχήμα 115. Μετρήσεις C80 με μπαλόνη, μετά τις κατασκευές.



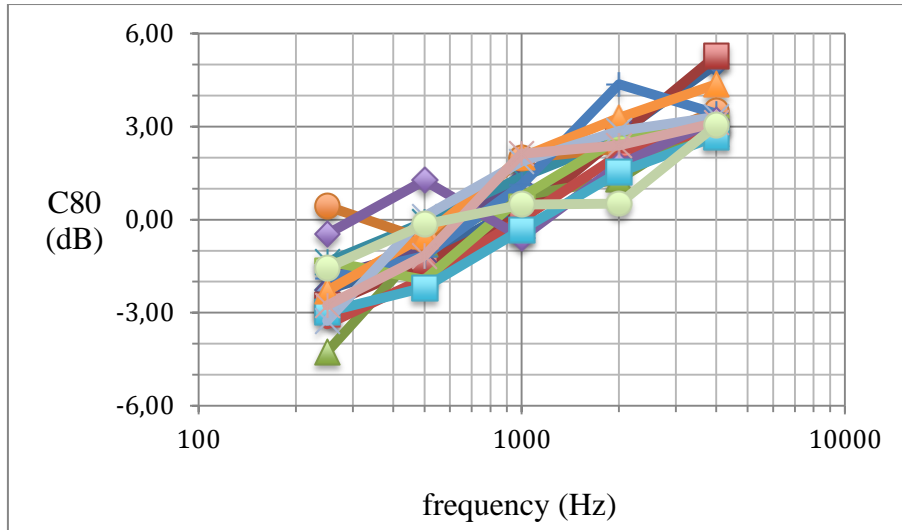
Σχήμα 116. Μετρήσεις C80 με μπαλόνη, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.



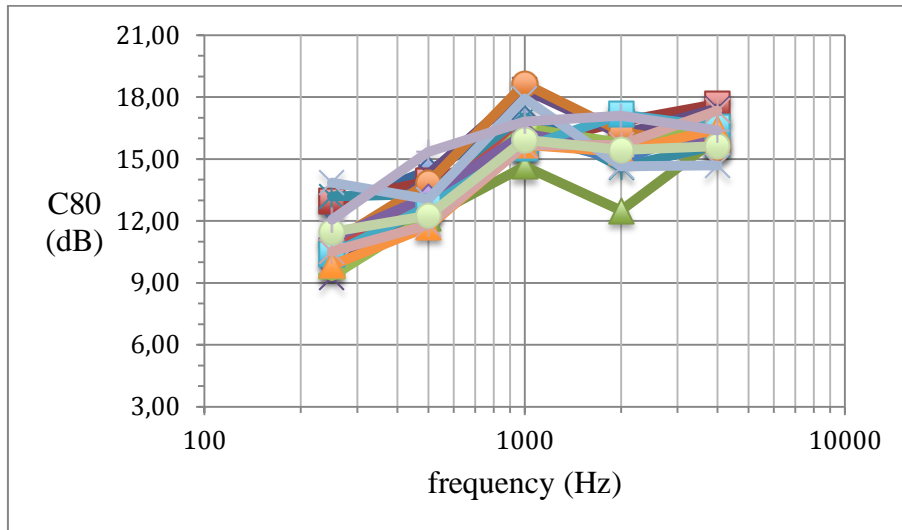
Σχήμα 117. Μέσος όρος μετρήσεων C80 με μπαλόνη, πριν (κόκκινο) και μετά (πράσινο) τις κατασκευές, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (μπλε) και προτεινόμενη τιμή (μωβ).



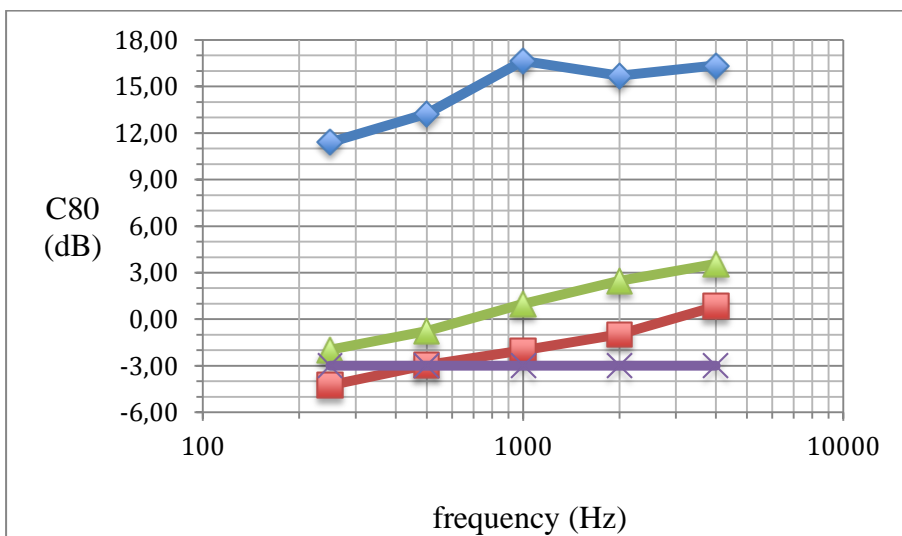
Σχήμα 118. Μετρήσεις C80 με παλαμάκι, πριν τις κατασκευές.



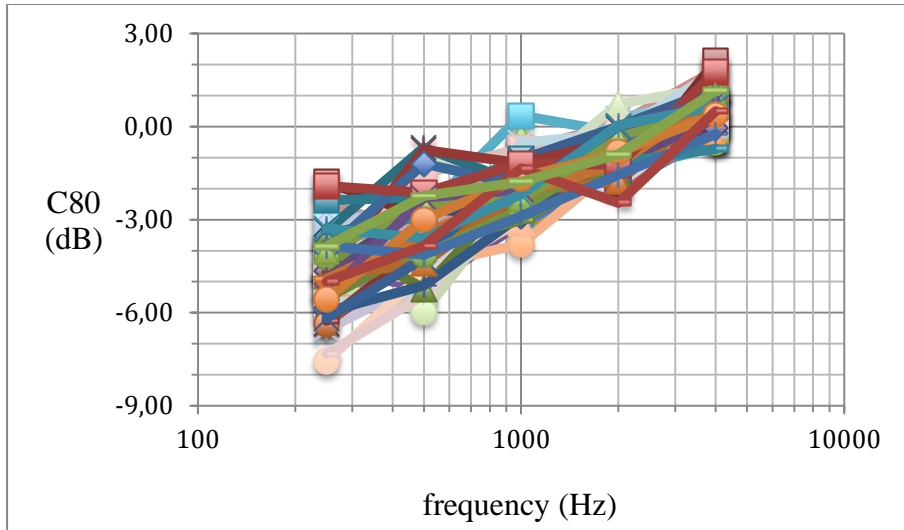
Σχήμα 119. Μετρήσεις C80 με παλαμάκι, μετά τις κατασκευές.



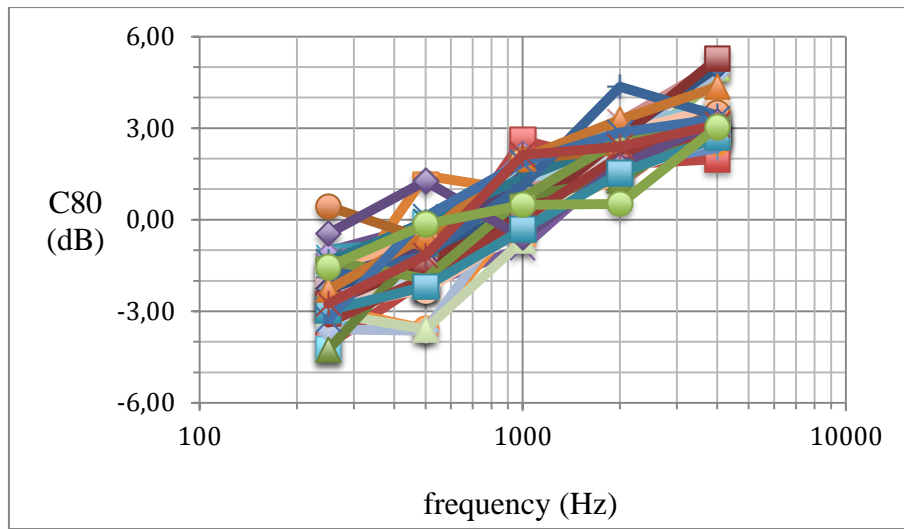
Σχήμα 120. Μετρήσεις C80 με παλαμάκι, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.



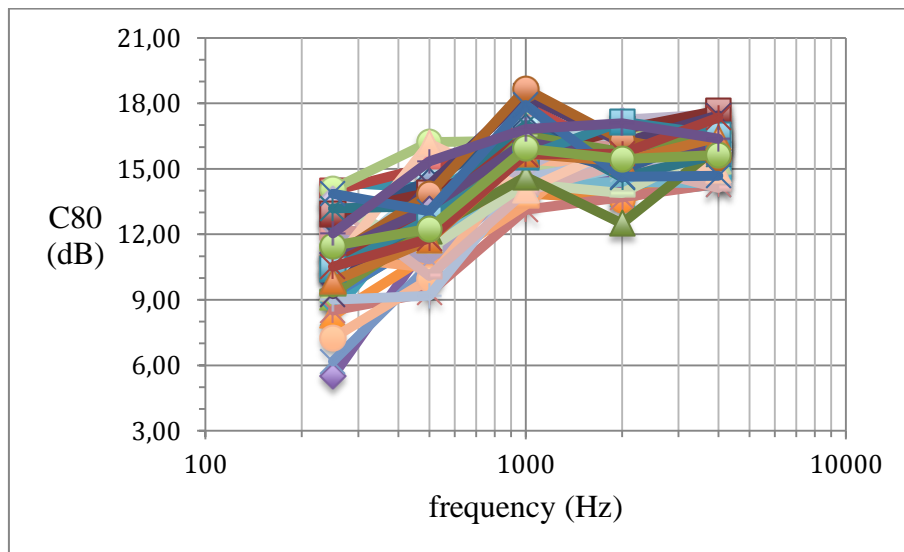
Σχήμα 121. Μέσος όρος μετρήσεων C80 με παλαμάκι, πριν (κόκκινο) και μετά (πράσινο) τις κατασκευές, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (μπλε) και προτεινόμενη τιμή (μωβ).



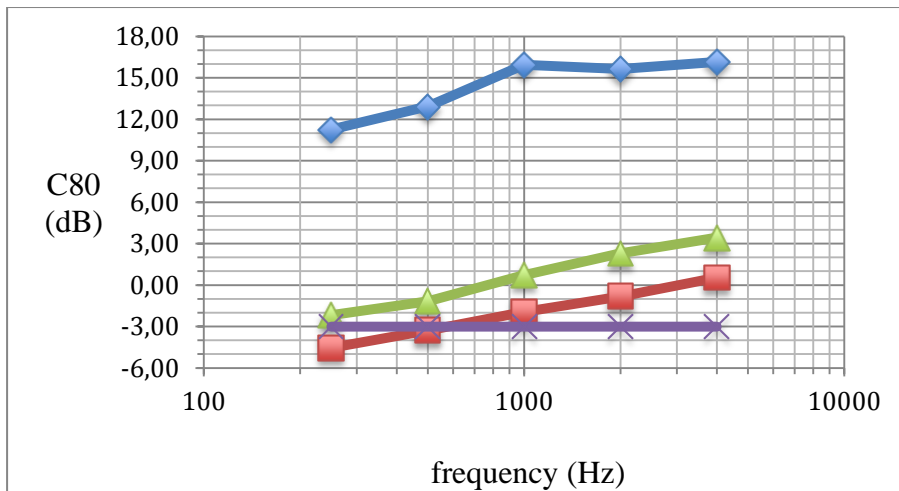
Σχήμα 122. Μετρήσεις C80 με όλες τις διεγέρσεις, πριν τις κατασκευές.



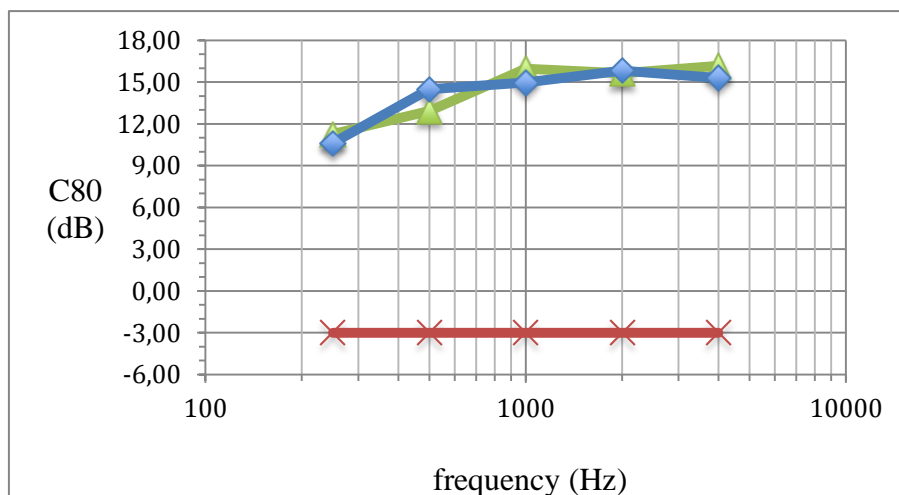
Σχήμα 123. Μετρήσεις C80 με όλες τις διεγέρσεις, μετά τις κατασκευές.



Σχήμα 124. Μετρήσεις C80 με όλες τις διεγέρσεις, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.

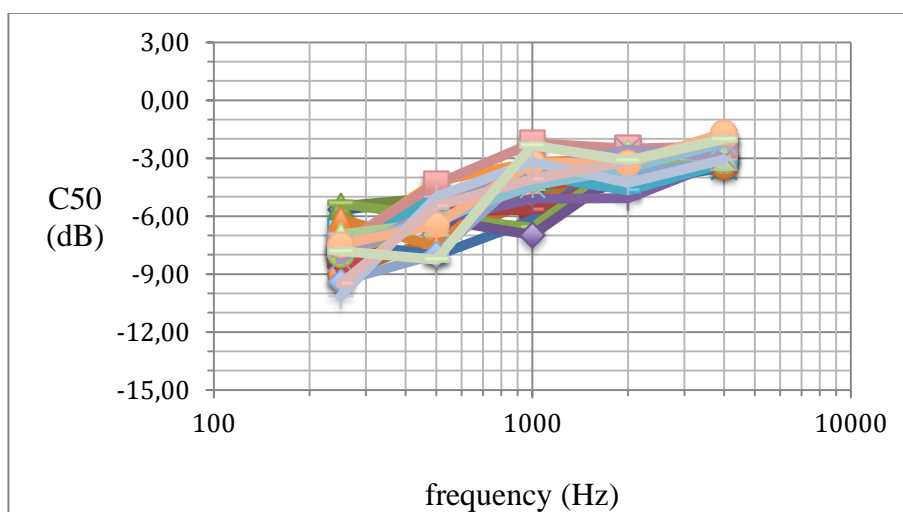


Σχήμα 125. Μέσος όρος όλων των μετρήσεων C80 με όλες τις διεγέρσεις, πριν (κόκκινο) και μετά (πράσινο) τις κατασκευές, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (μπλε) και προτεινόμενη τιμή (μωβ).

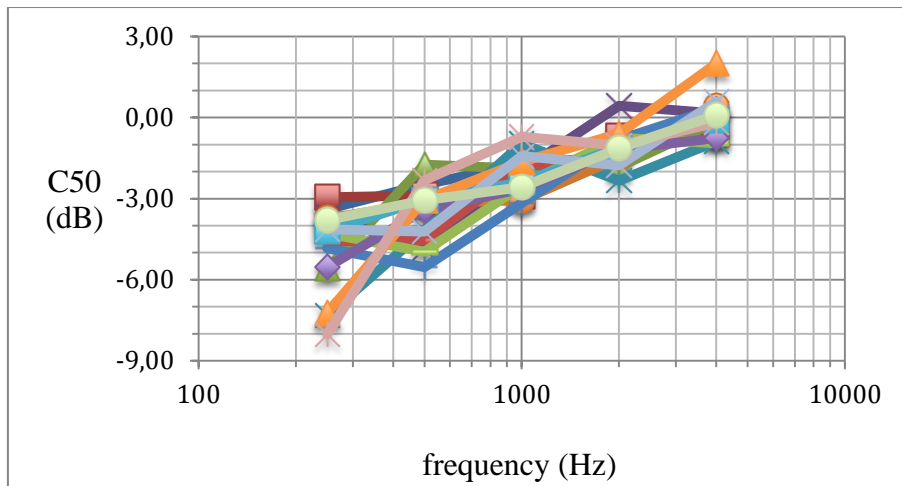


Σχήμα 126. Μέσος όρος μετρήσεων C80 στην θέση ακρόασης (μπλε), μέσος όρος όλων των μετρήσεων μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (πράσινο) και προτεινόμενη τιμή (κόκκινο).

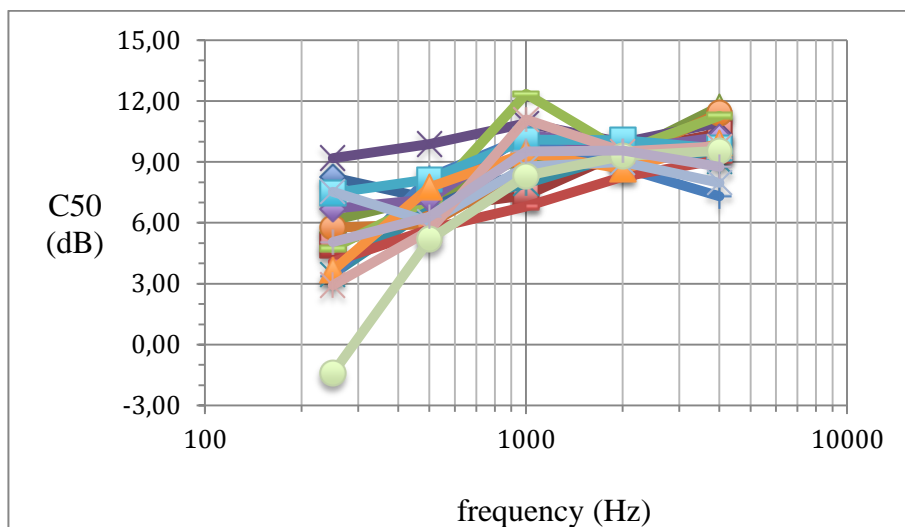
➤ **C50**



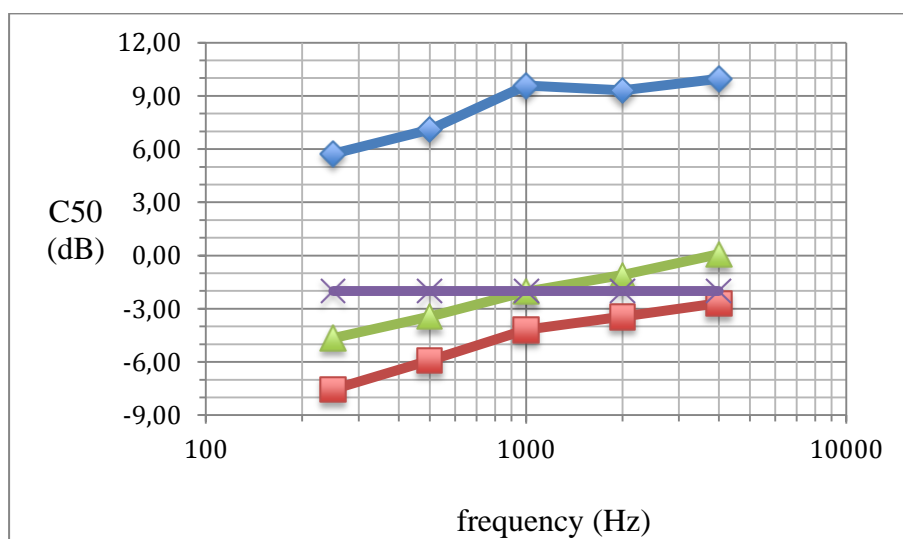
Σχήμα 127. Μετρήσεις C50 με ξύλινες πλάκες, πριν τις κατασκευές.



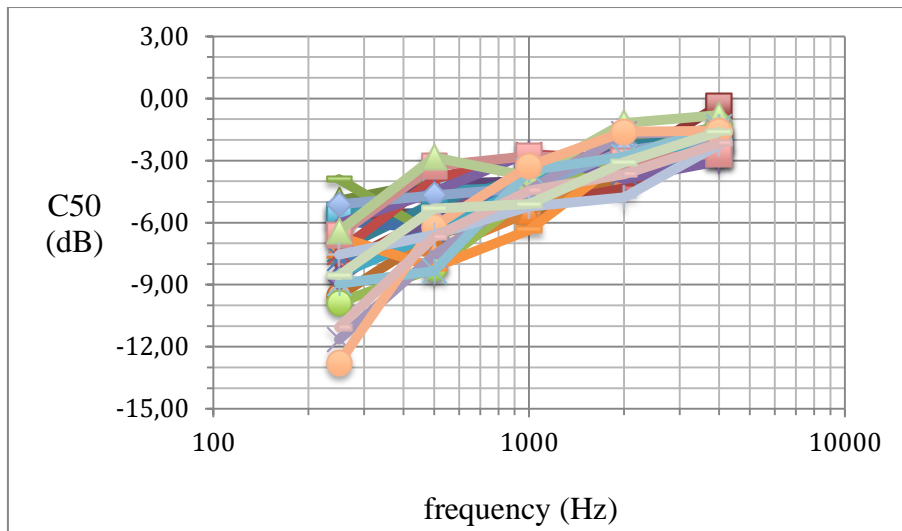
Σχήμα 128. Μετρήσεις C50 με ξύλινες πλάκες, μετά τις κατασκευές.



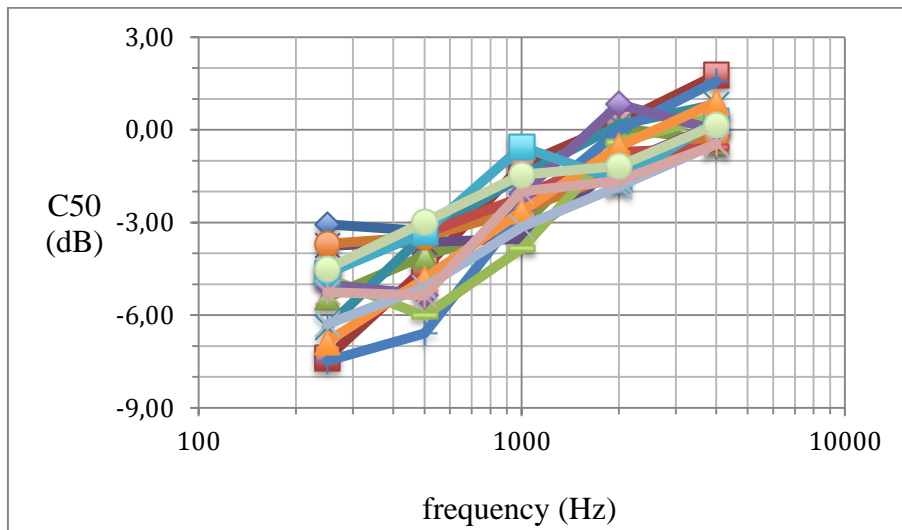
Σχήμα 129. Μετρήσεις C50 με ξύλινες πλάκες, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.



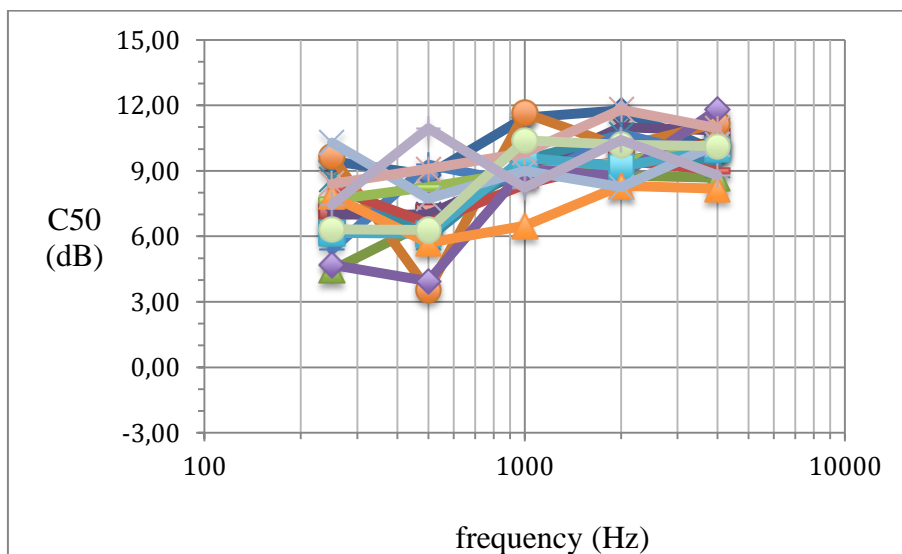
Σχήμα 130. Μέσος όρος μετρήσεων C50 με ξύλινες πλάκες, πριν (κόκκινο) και μετά (πράσινο) τις κατασκευές, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (μπλε) και προτεινόμενη τιμή (μωβ).



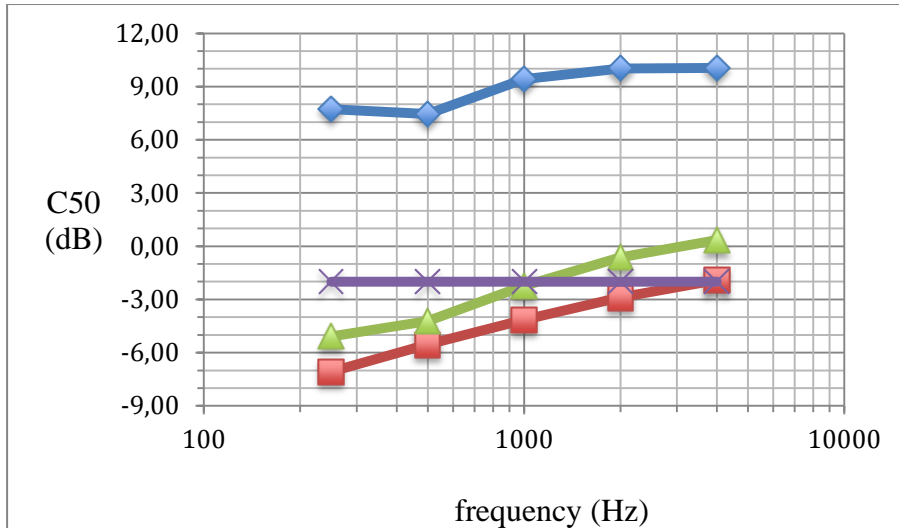
Σχήμα 131. Μετρήσεις C50 με μπαλόκι, πριν τις κατασκευές.



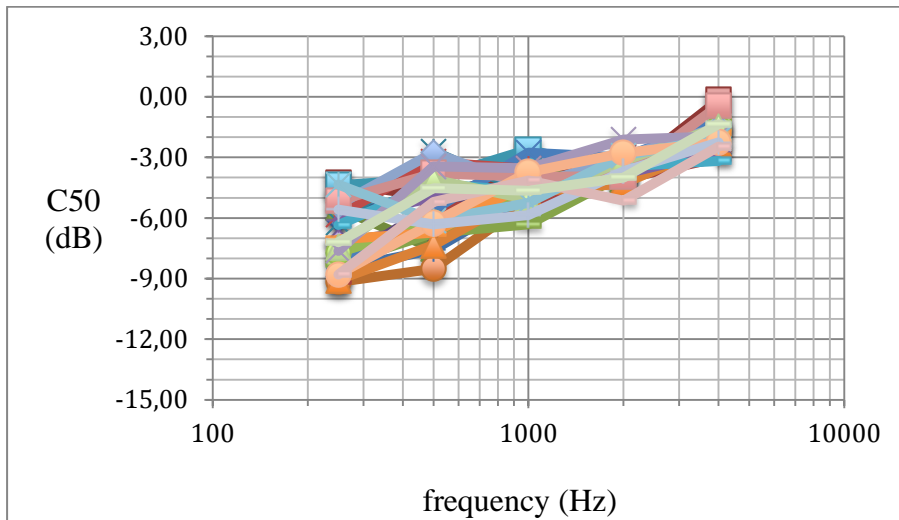
Σχήμα 132. Μετρήσεις C50 με μπαλόκι, μετά τις κατασκευές.



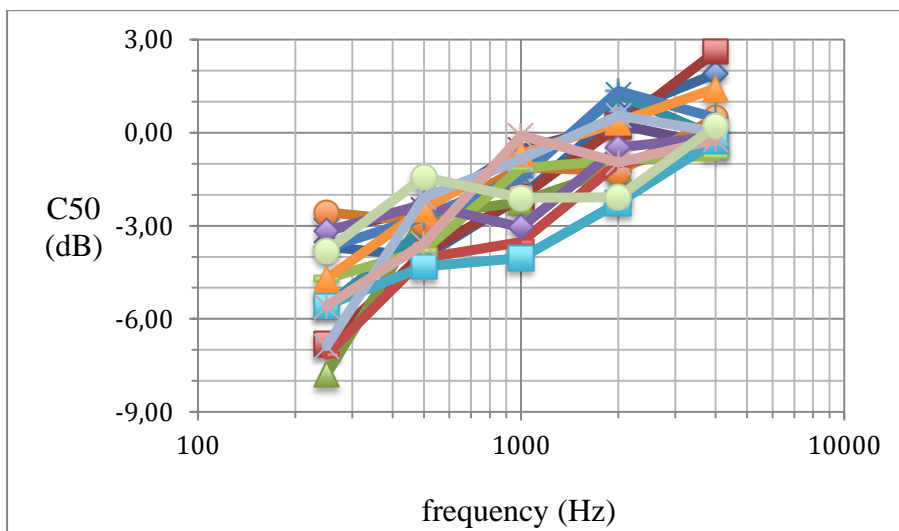
Σχήμα 133. Μετρήσεις C50 με μπαλόκι, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.



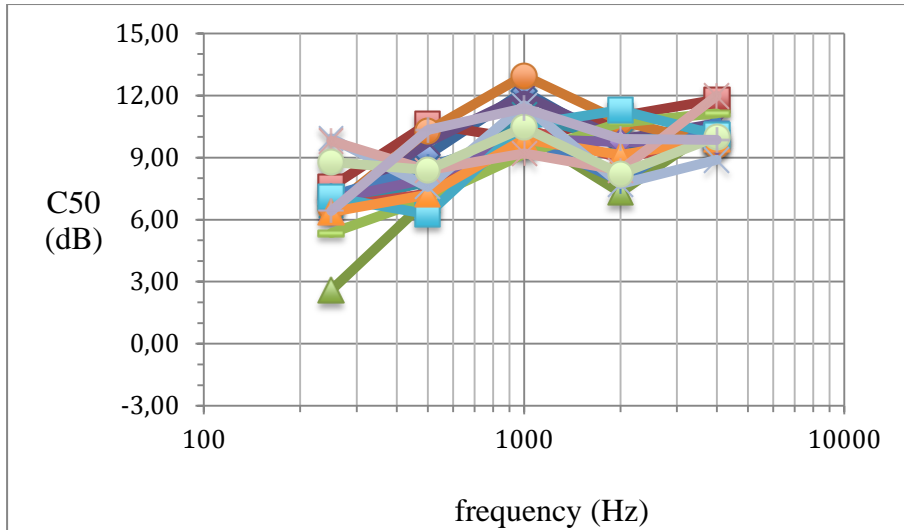
Σχήμα 134. Μέσος όρος μετρήσεων C50 με μπαλόκι, πριν (κόκκινο) και μετά (πράσινο) τις κατασκευές, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (μπλε) και προτεινόμενη τιμή (μωβ).



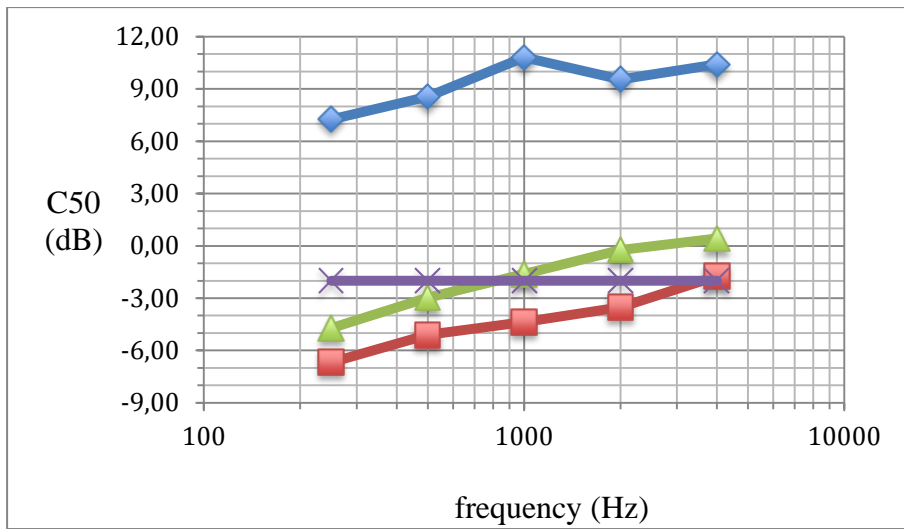
Σχήμα 135. Μετρήσεις C50 με παλαμάκι, πριν τις κατασκευές.



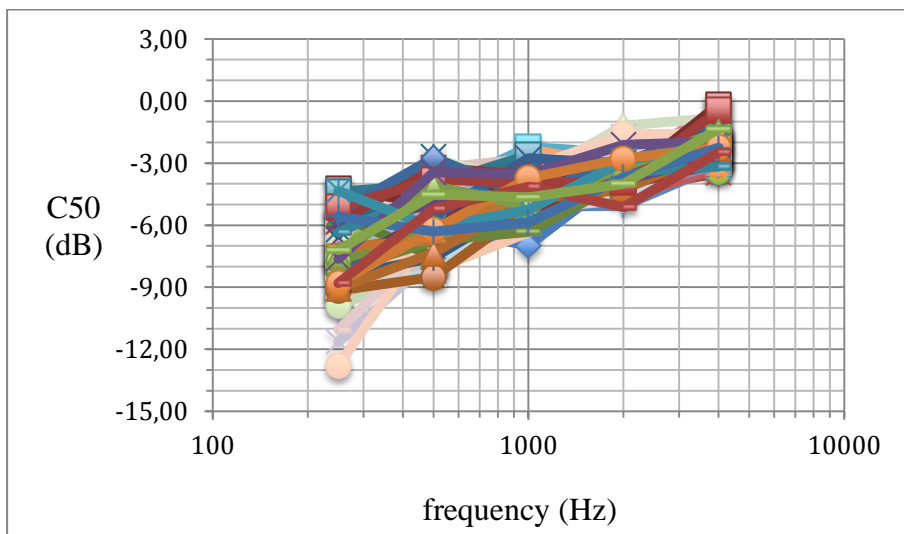
Σχήμα 136. Μετρήσεις C50 με παλαμάκι, μετά τις κατασκευές.



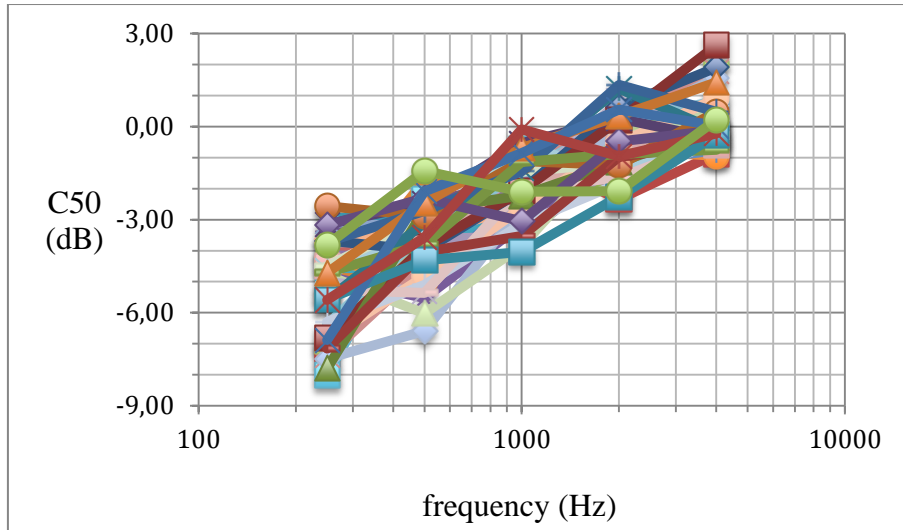
Σχήμα 137. Μετρήσεις C50 με παλαμάκι, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.



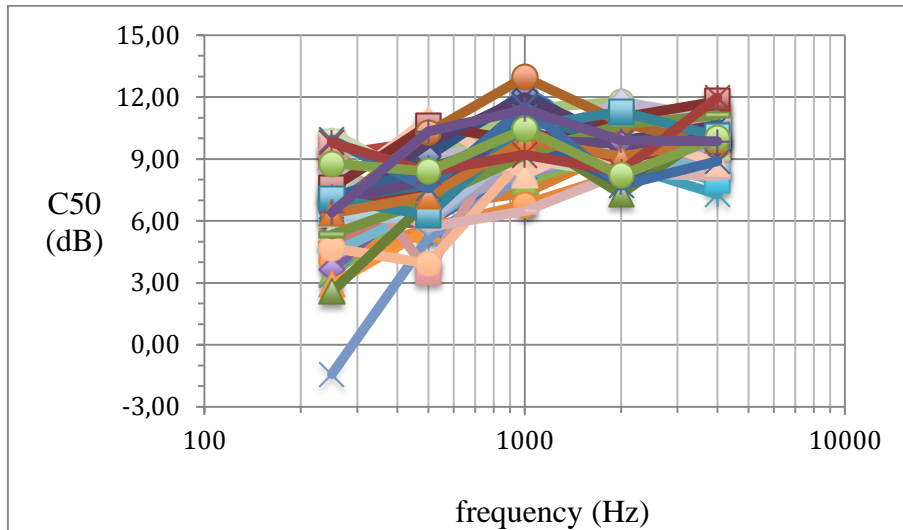
Σχήμα 138. Μέσος όρος μετρήσεων C50 με παλαμάκι, πριν (κόκκινο) και μετά (πράσινο) τις κατασκευές, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (μπλε) και προτεινόμενη τιμή (μωβ).



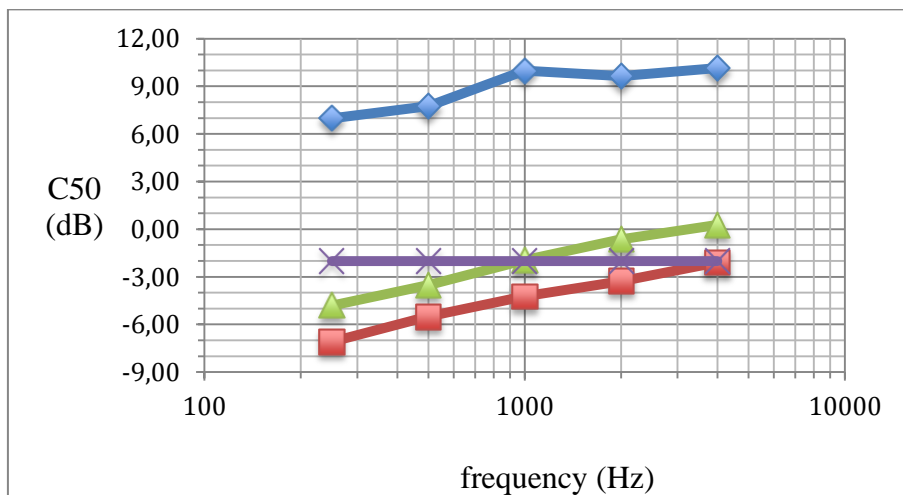
Σχήμα 139. Μετρήσεις C50 με όλες τις διεγέρσεις, πριν τις κατασκευές.



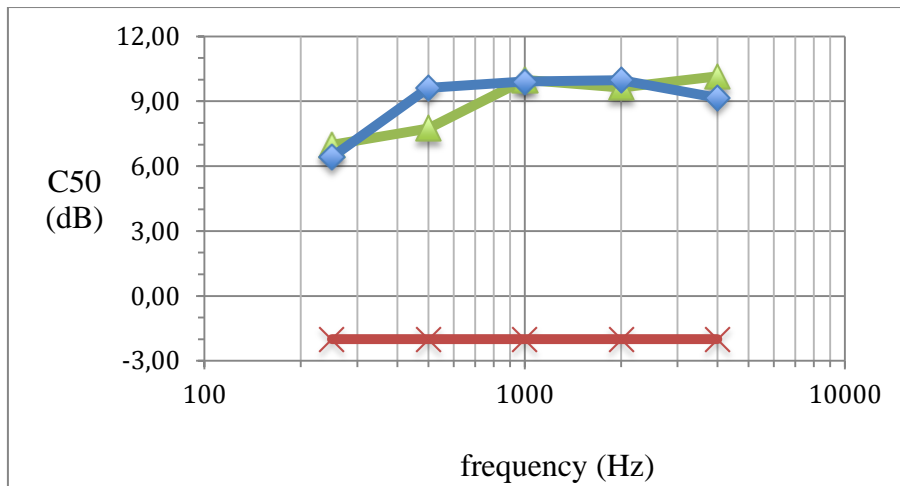
Σχήμα 140. Μετρήσεις C50 με όλες τις διεγέρσεις, μετά τις κατασκευές.



Σχήμα 141. Μετρήσεις C50 με όλες τις διεγέρσεις, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.

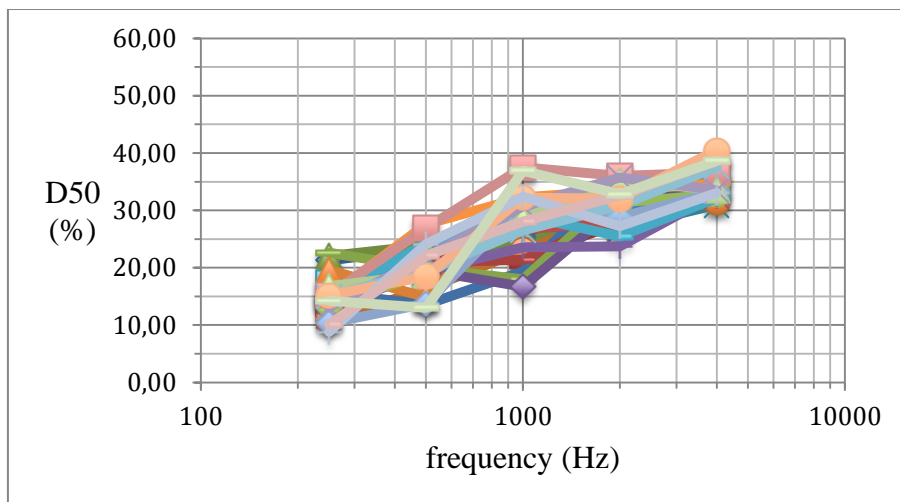


Σχήμα 142. Μέσος όρος όλων των μετρήσεων C50 με όλες τις διεγέρσεις, πριν (κόκκινο) και μετά (πράσινο) τις κατασκευές, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (μπλε) και προτεινόμενη τιμή (μωβ).

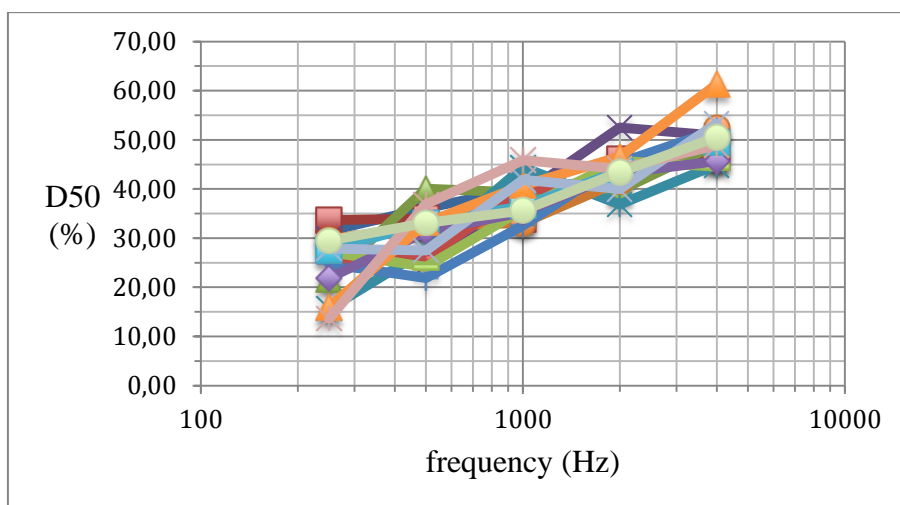


Σχήμα 143. Μέσος όρος μετρήσεων C50 στην θέση ακρόασης (μπλε), μέσος όρος όλων των μετρήσεων μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (πράσινο) και προτεινόμενη τιμή (κόκκινο).

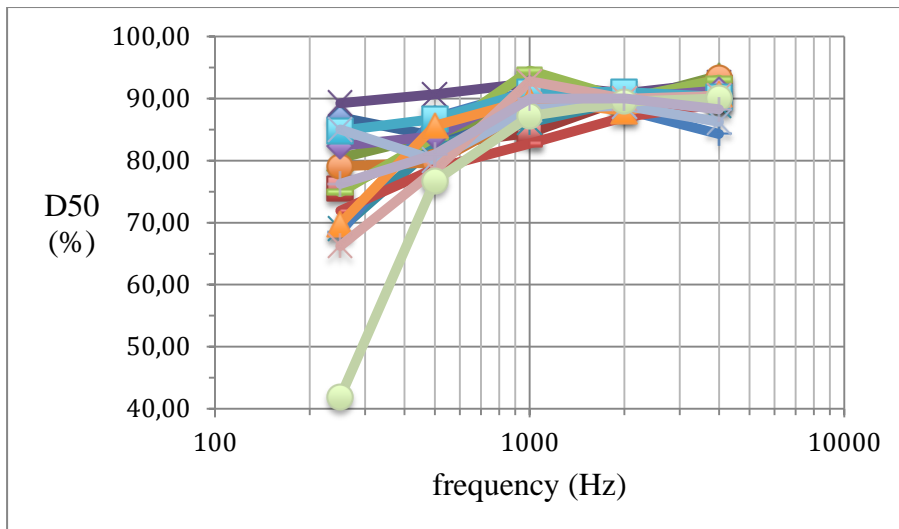
➤ **D50**



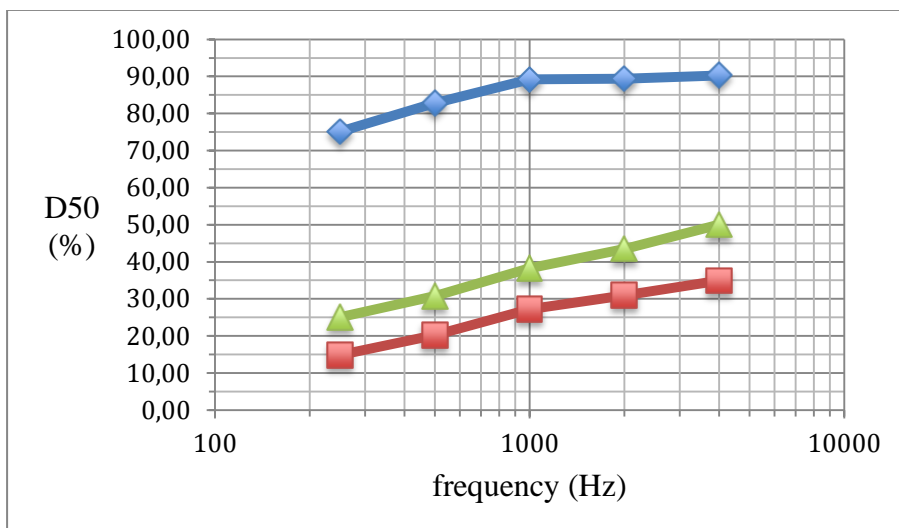
Σχήμα 144. Μετρήσεις D50 με ξύλινες πλάκες, πριν τις κατασκευές.



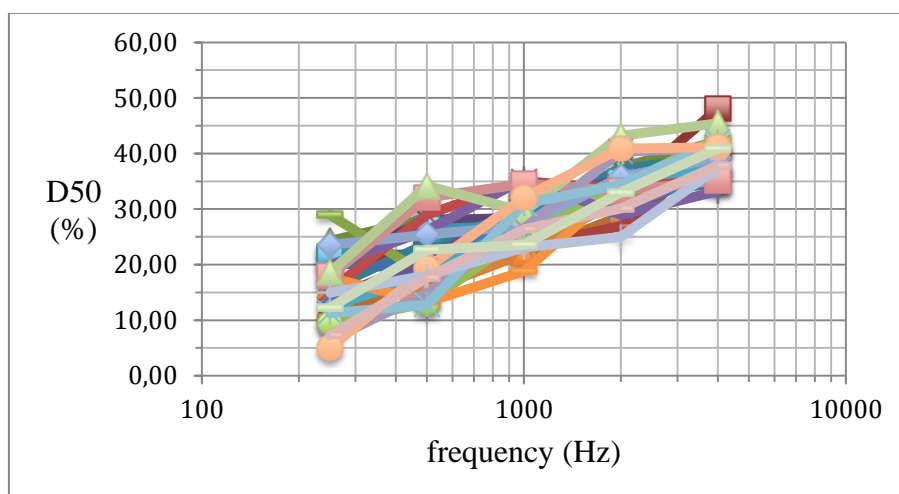
Σχήμα 145. Μετρήσεις D50 με ξύλινες πλάκες, μετά τις κατασκευές.



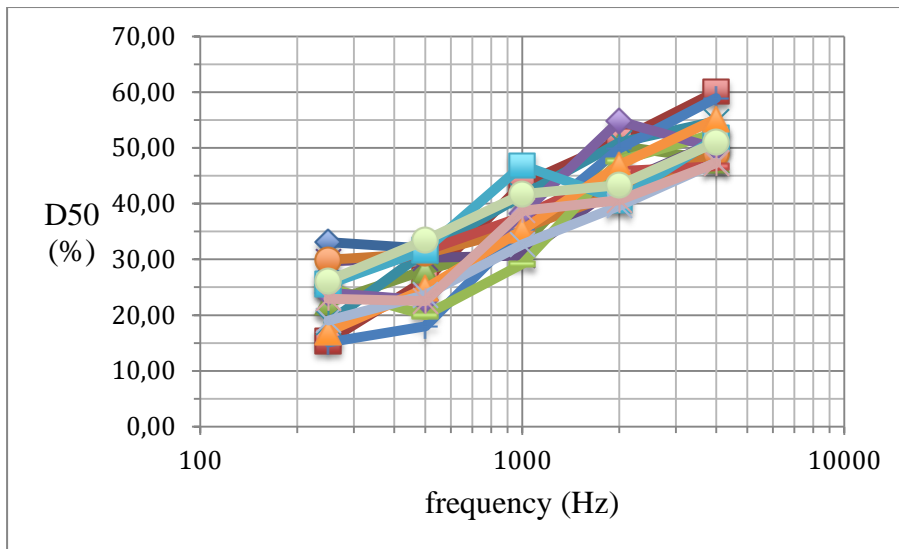
Σχήμα 146. Μετρήσεις D50 με ξύλινες πλάκες, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.



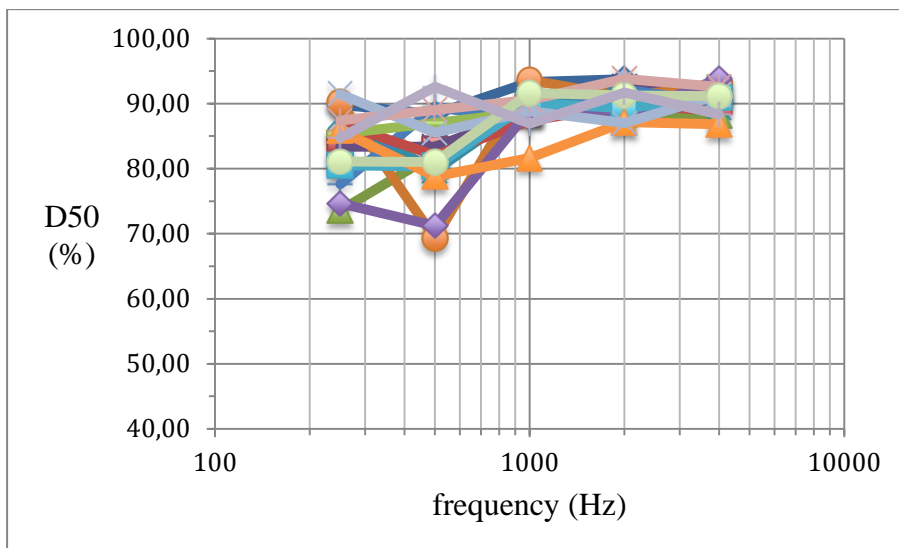
Σχήμα 147. Μέσος όρος μετρήσεων D50 με ξύλινες πλάκες, πριν (κόκκινο) και μετά (πράσινο) τις κατασκευές, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (μπλε).



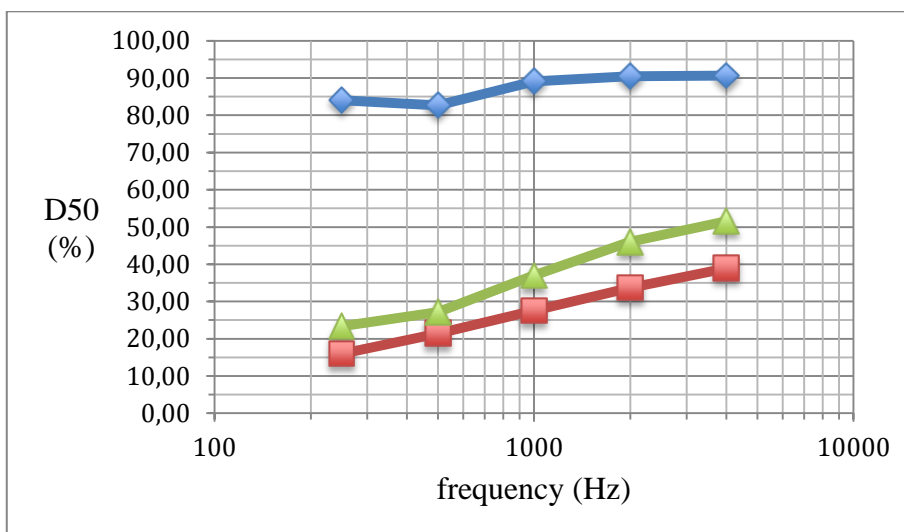
Σχήμα 148. Μετρήσεις D50 με μαλάκι, πριν τις κατασκευές.



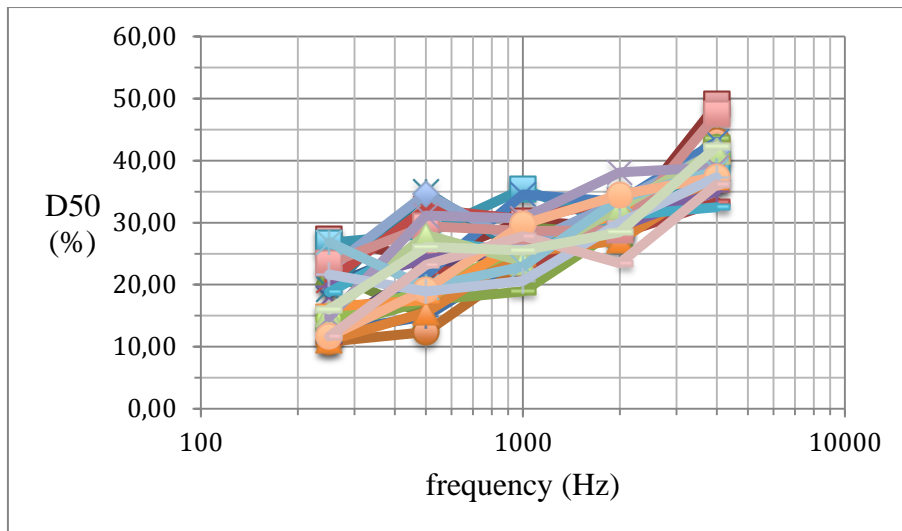
Σχήμα 149. Μετρήσεις D50 με μπαλόνη, μετά τις κατασκευές.



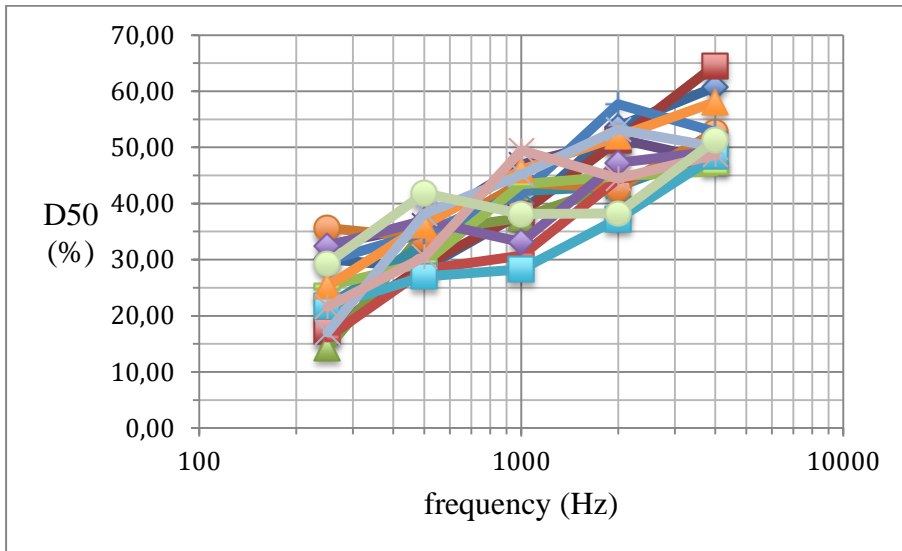
Σχήμα 150. Μετρήσεις D50 με μπαλόνη, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.



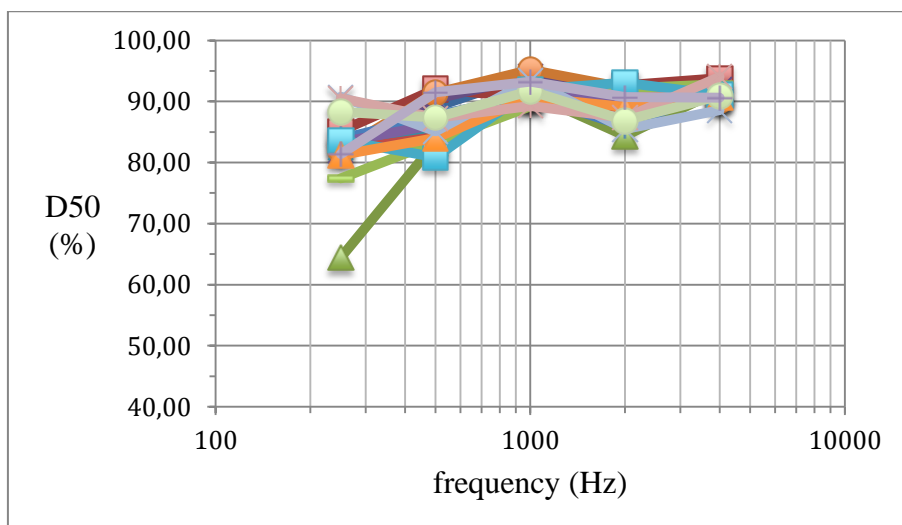
Σχήμα 151. Μέσος όρος μετρήσεων D50 με μπαλόνη, πριν (κόκκινο) και μετά (πράσινο) τις κατασκευές, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (μπλε).



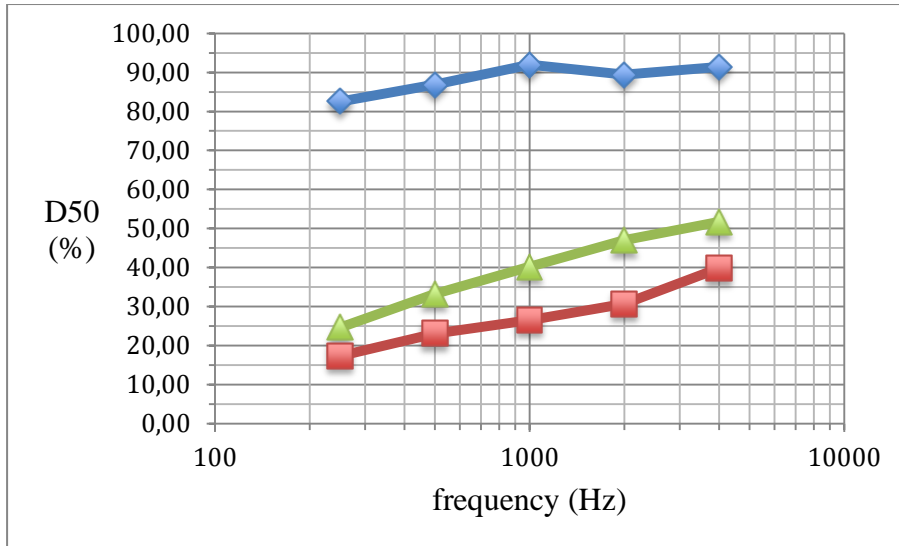
Σχήμα 152. Μετρήσεις D50 με παλαμάκι, πριν τις κατασκευές.



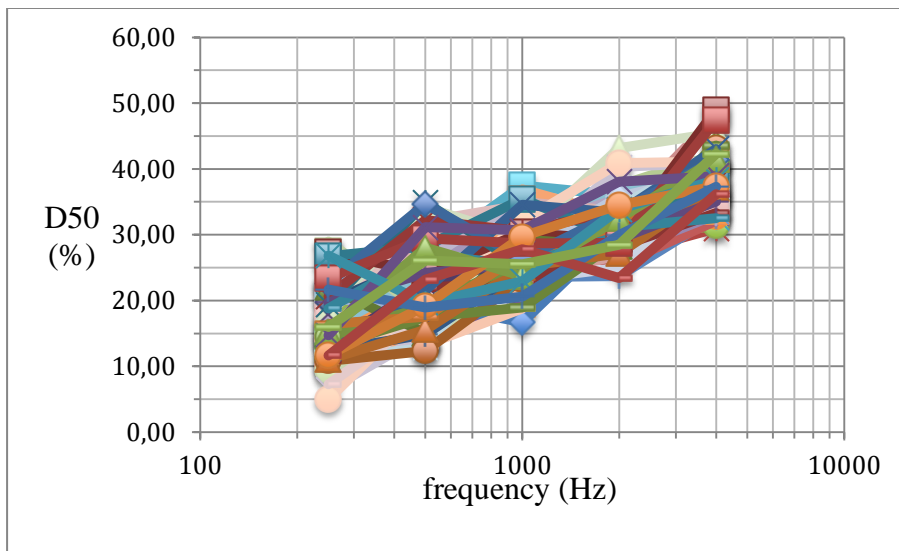
Σχήμα 153. Μετρήσεις D50 με παλαμάκι, μετά τις κατασκευές.



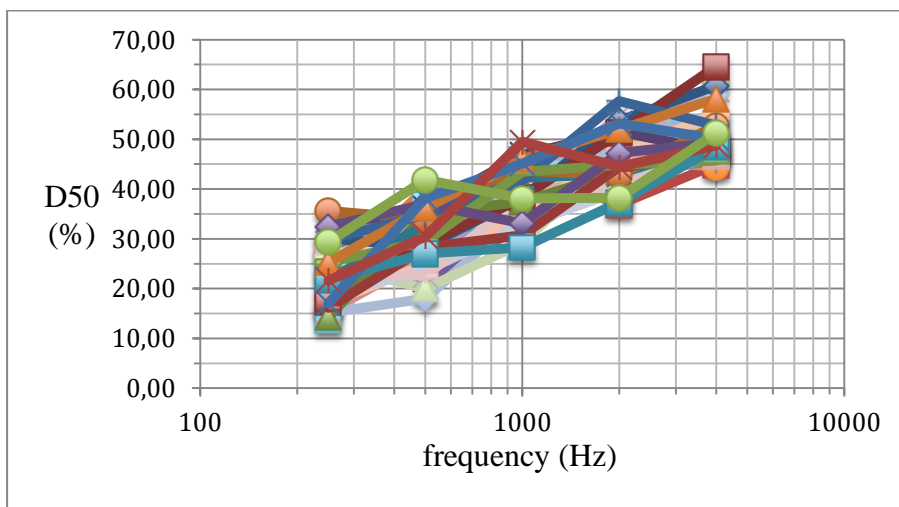
Σχήμα 154. Μετρήσεις D50 με παλαμάκι, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.



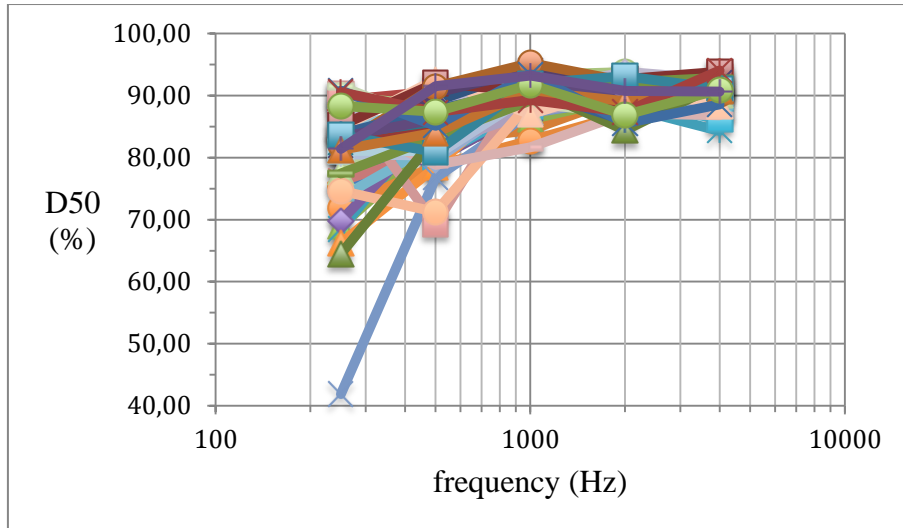
Σχήμα 155. Μέσος όρος μετρήσεων D50 με παλαμάκι, πριν (κόκκινο) και μετά (πράσινο) τις κατασκευές, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (μπλε).



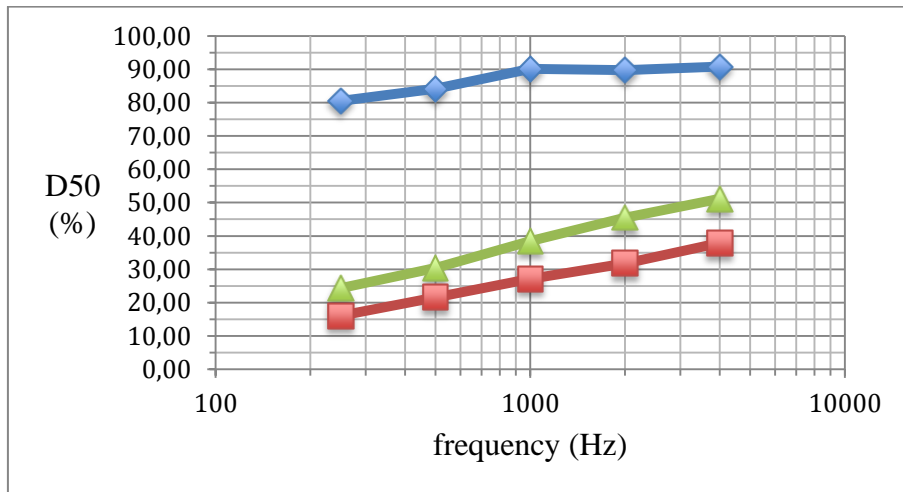
Σχήμα 156. Μετρήσεις D50 με όλες τις διεγέρσεις, πριν τις κατασκευές.



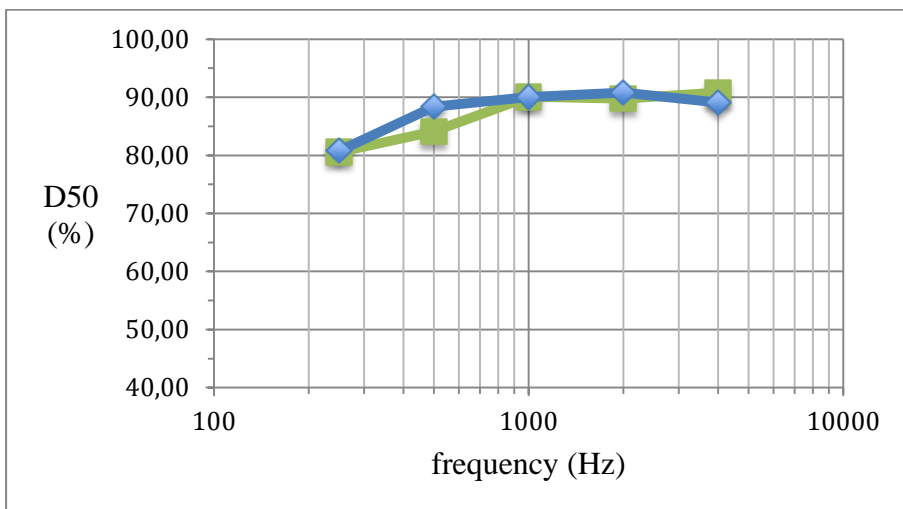
Σχήμα 157. Μετρήσεις D50 με όλες τις διεγέρσεις, μετά τις κατασκευές.



Σχήμα 158. Μετρήσεις D50 με όλες τις διεγέρσεις, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.

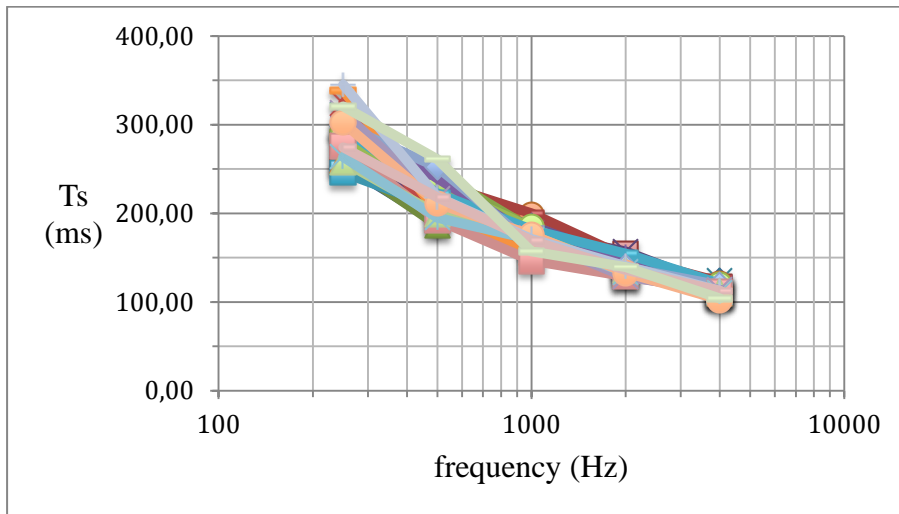


Σχήμα 159. Μέσος όρος όλων των μετρήσεων D50 με όλες τις διεγέρσεις, πριν (κόκκινο) και μετά (πράσινο) τις κατασκευές, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (μπλε).

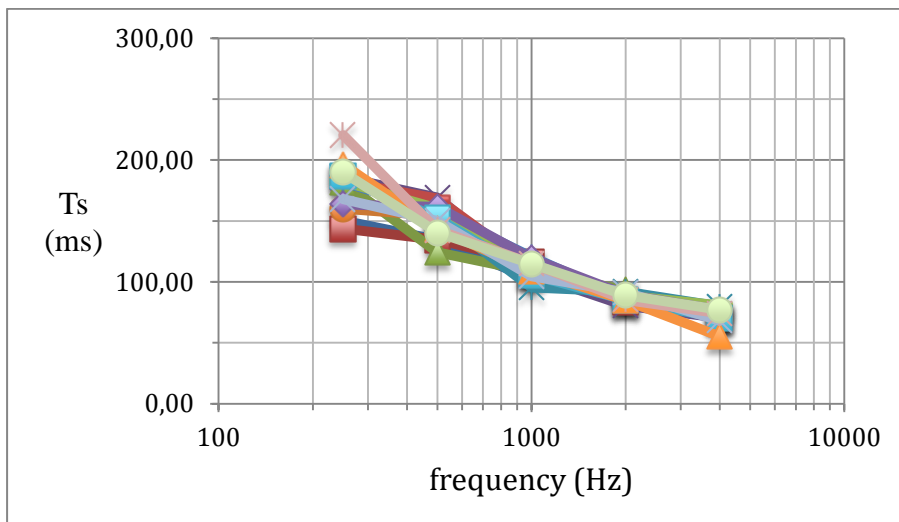


Σχήμα 160. Μέσος όρος μετρήσεων D50 στην θέση ακρόασης (μπλε), μέσος όρος όλων των μετρήσεων μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (πράσινο).

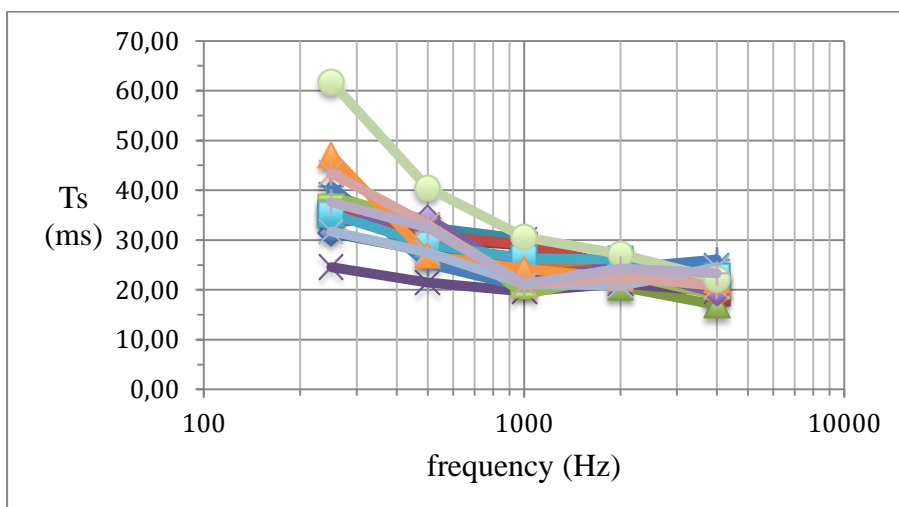
➤ **Ts**



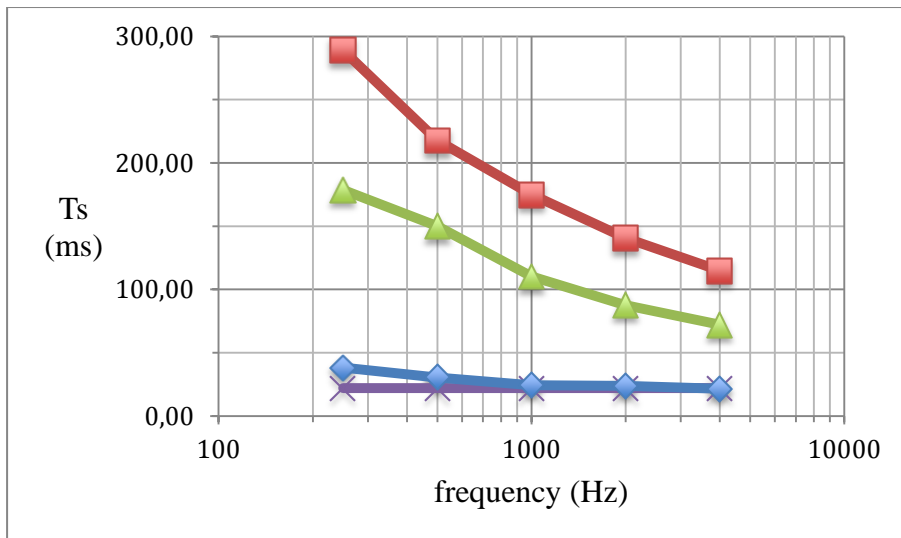
Σχήμα 161. Μετρήσεις T_s με ξύλινες πλάκες, πριν τις κατασκευές.



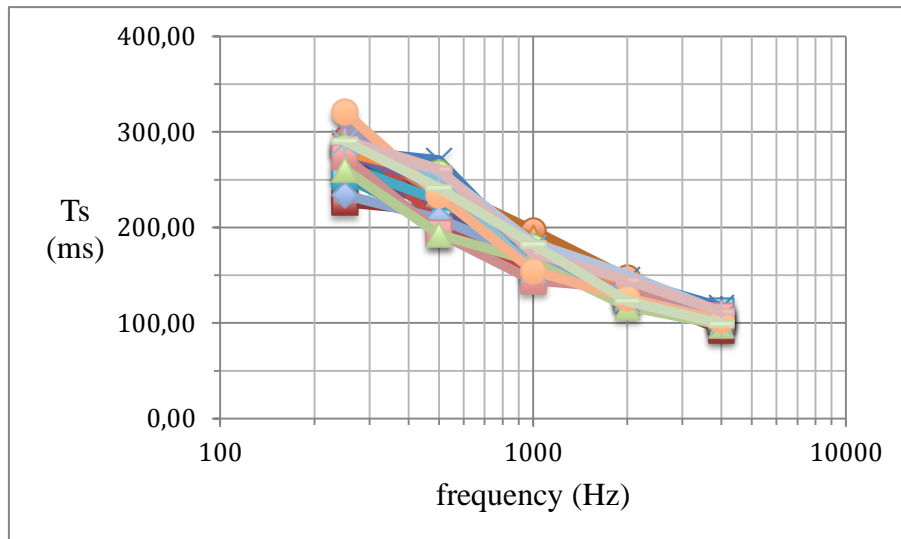
Σχήμα 162. Μετρήσεις T_s με ξύλινες πλάκες, μετά τις κατασκευές.



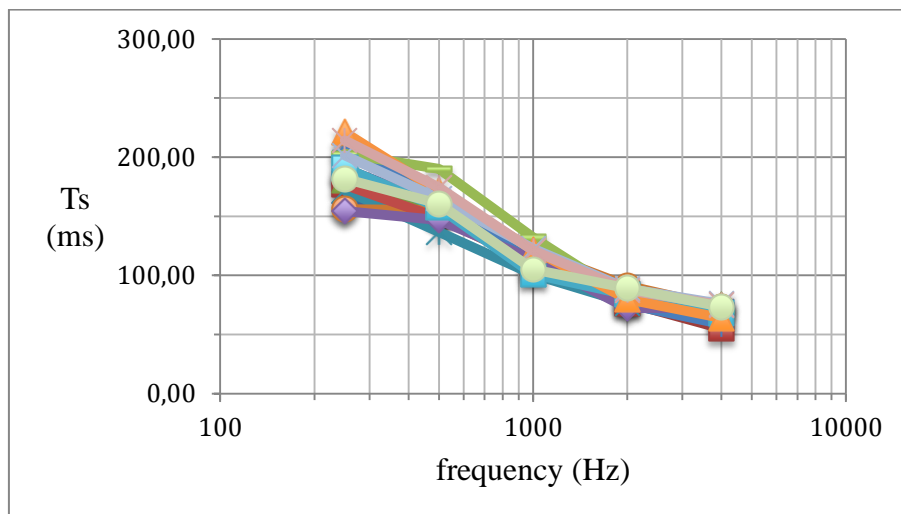
Σχήμα 163. Μετρήσεις T_s με ξύλινες πλάκες, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.



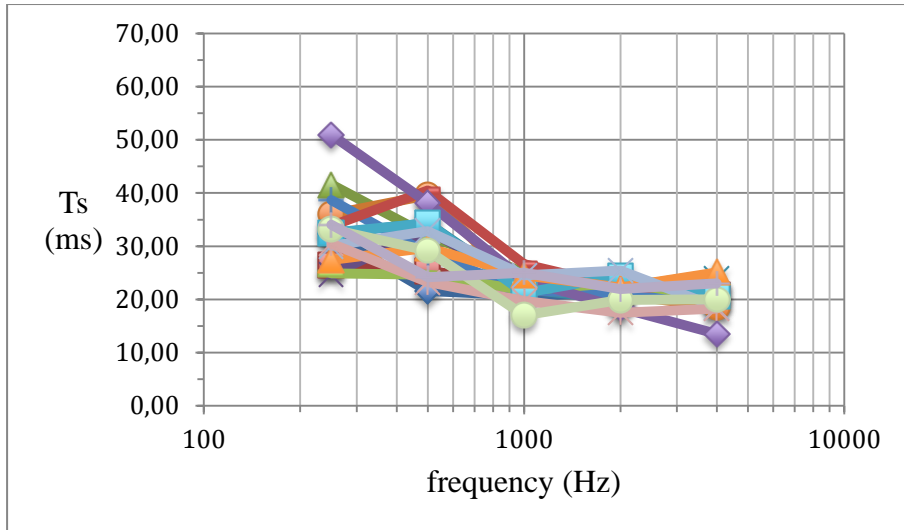
Σχήμα 164. Μέσος όρος μετρήσεων Ts με ξύλινες πλάκες, πριν (κόκκινο) και μετά (πράσινο) τις κατασκευές, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (μπλε) και προτεινόμενη τιμή (μωβ).



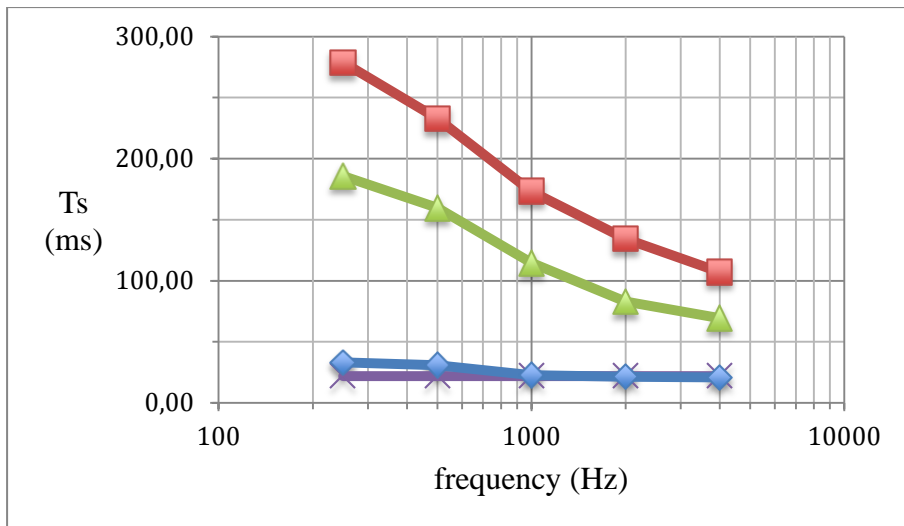
Σχήμα 165. Μετρήσεις Ts με μπαλόνη, πριν τις κατασκευές.



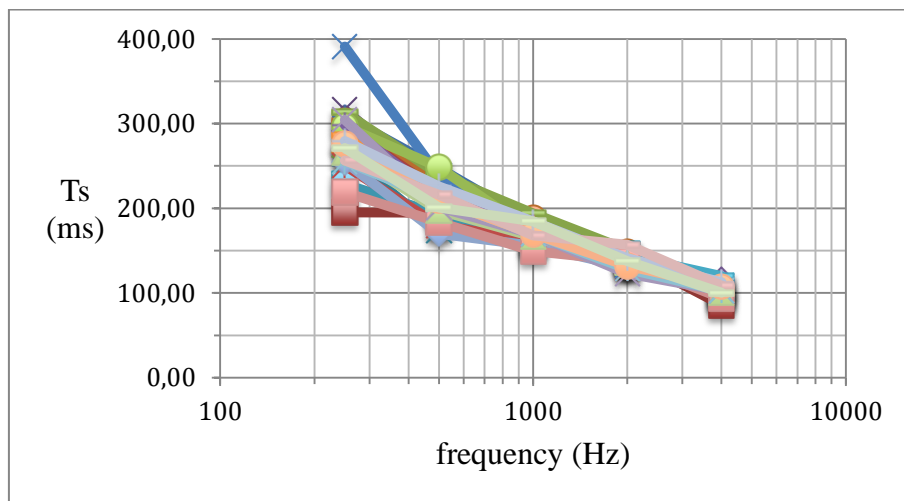
Σχήμα 166. Μετρήσεις Ts με μπαλόνη, μετά τις κατασκευές.



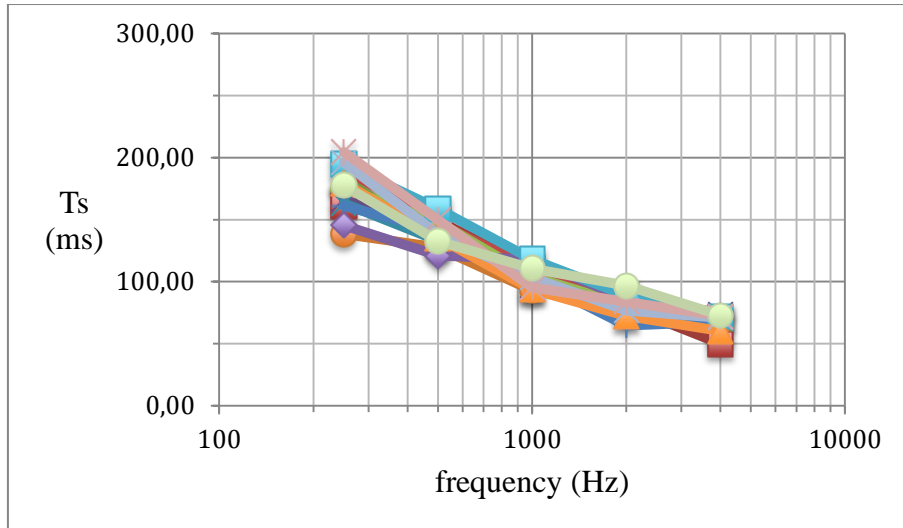
Σχήμα 167. Μετρήσεις Ts με μπαλόκι, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.



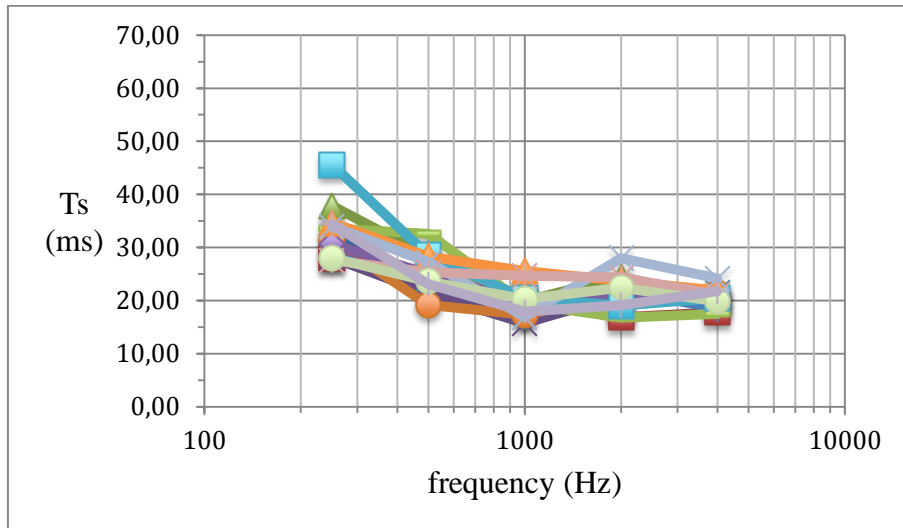
Σχήμα 168. Μέσος όρος μετρήσεων Ts με μπαλόκι, πριν (κόκκινο) και μετά (πράσινο) τις κατασκευές, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (μπλε) και προτεινόμενη τιμή (μωβ).



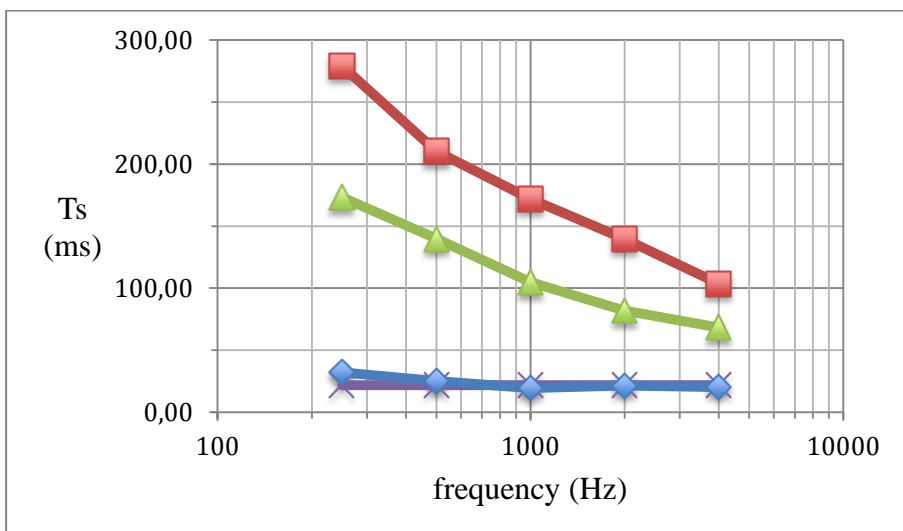
Σχήμα 169. Μετρήσεις Ts με παλαμάκι, πριν τις κατασκευές.



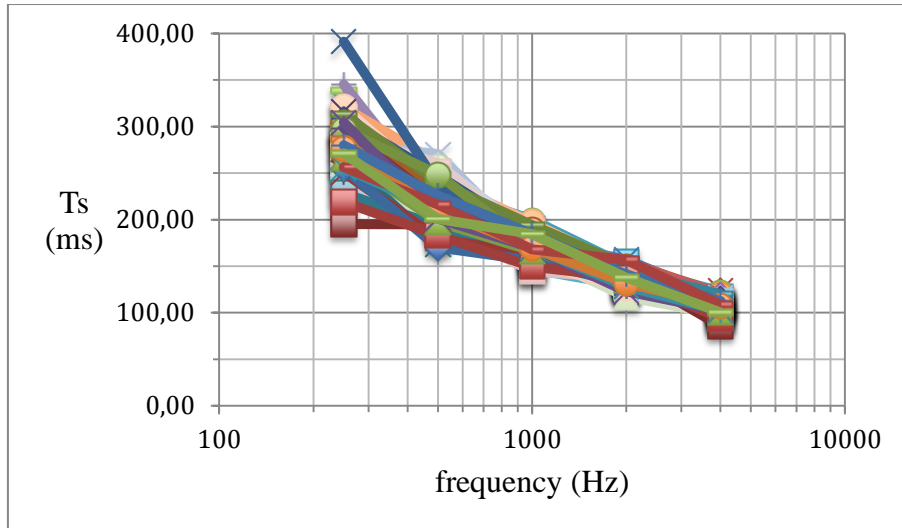
Σχήμα 170. Μετρήσεις T_s με παλαμάκι, μετά τις κατασκευές.



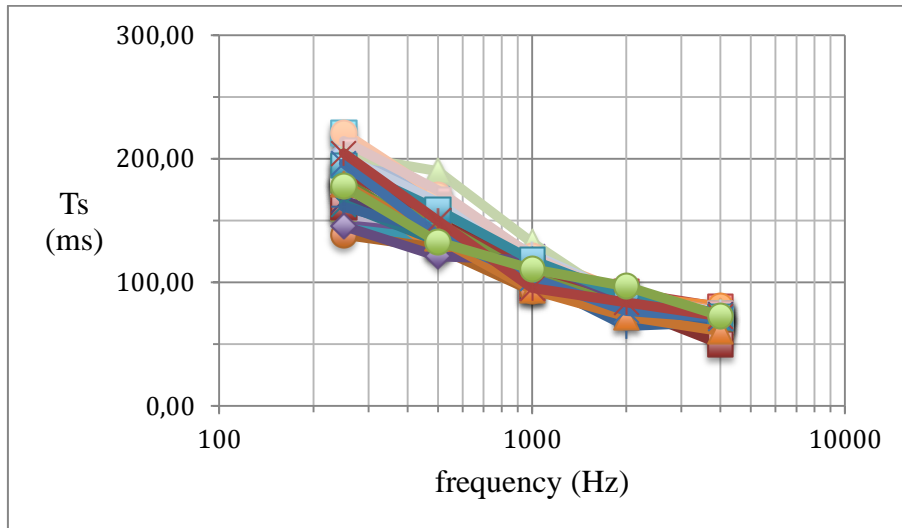
Σχήμα 171. Μετρήσεις T_s με παλαμάκι, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.



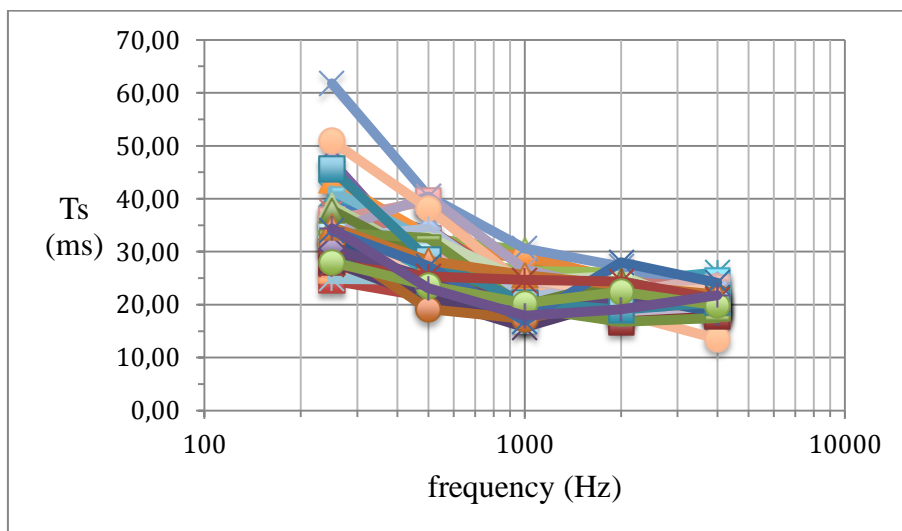
Σχήμα 172. Μέσος όρος μετρήσεων T_s με παλαμάκι, πριν (κόκκινο) και μετά (πράσινο) τις κατασκευές, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (μπλε) και προτεινόμενη τιμή (μωβ).



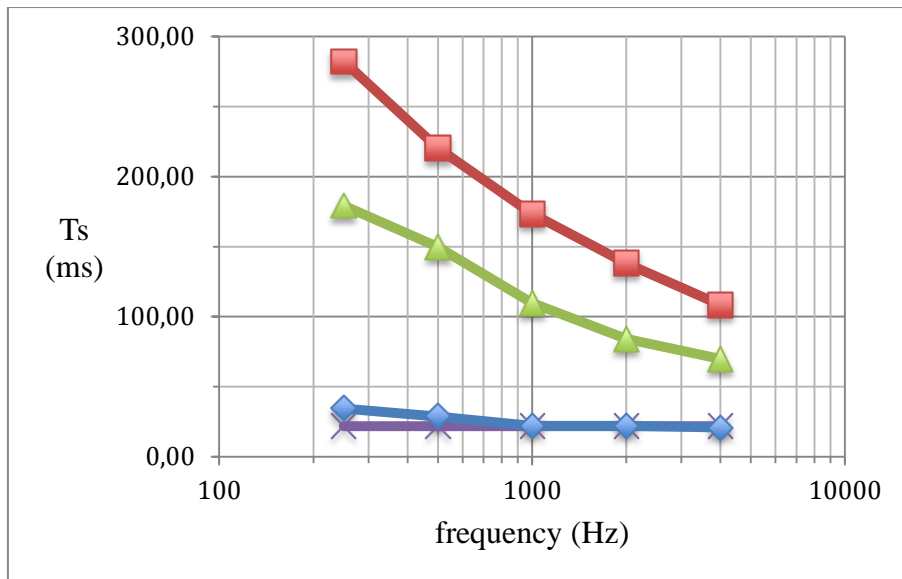
Σχήμα 173. Μετρήσεις T_s με όλες τις διεγέρσεις, πριν τις κατασκευές.



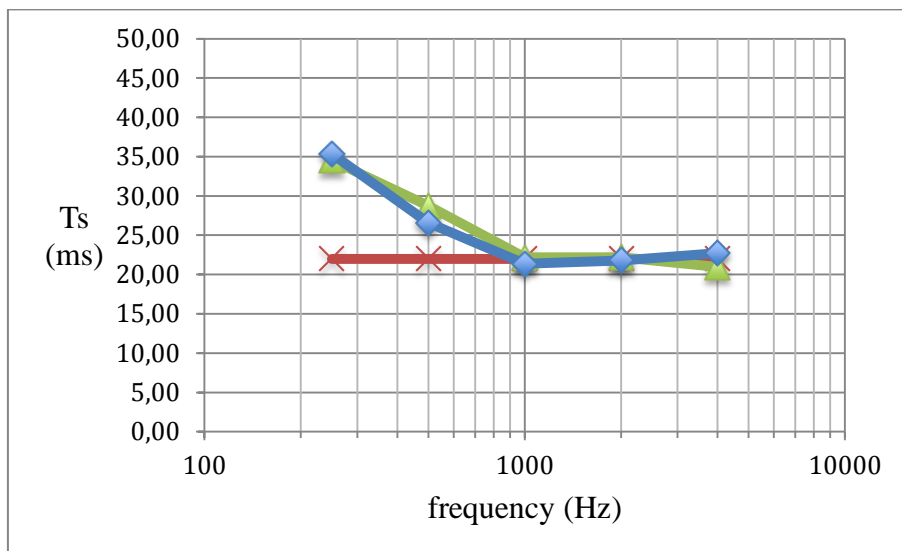
Σχήμα 174. Μετρήσεις T_s με όλες τις διεγέρσεις, μετά τις κατασκευές.



Σχήμα 175. Μετρήσεις T_s με όλες τις διεγέρσεις, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.



Σχήμα 176. Μέσος όρος όλων των μετρήσεων Ts με όλες τις διεγέρσεις, πριν (κόκκινο) και μετά (πράσινο) τις κατασκευές, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (μπλε) και προτεινόμενη τιμή (μωβ).



Σχήμα 177. Μέσος όρος μετρήσεων Ts στην θέση ακρόασης (μπλε), μέσος όρος όλων των μετρήσεων μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας (πράσινο) και προτεινόμενη τιμή (κόκκινο).

➤ **BR**

	ξύλινες πλάκες	μπαλόκι	παλαμάκι	μέσος όρος για κάθε θέση
θέση 1	1.612	2.322	1.815	1.916
θέση 2	2.072	2.186	2.003	2.087
θέση 3	1.763	2.216	1.834	1.938
θέση 4	2.39	2.307	1.862	2.186
θέση 5	1.933	2.311	2.083	2.109
θέση 6	1.916	2.234	1.868	2.006
θέση 7	2.228	2.086		2.157
θέση 8	2.069	2.151	1.847	2.022
θέση 9	1.986	2.119	2.088	2.064
θέση 10	2.259	2.21		2.235
θέση 11	1.894	2.09	1.332	1.772
θέση 12	2.051	2.25	1.953	2.085
θέση 13	2.069	1.933	1.363	1.788
θέση 14	1.941	2.239		2.09
θέση 15	2.38	2.269	2.921	2.523
θέση 16	2.044	2.095		2.07
θέση 17	1.814	2.041	1.974	1.943
θέση 18	2.301	2.184		2.243
θέση 19	1.64	1.615	1.505	1.587
θέση 20		1.493	1.305	1.399
θέση 21	1.645	1.547	1.538	1.577
θέση 22	1.903	1.693	1.864	1.82
θέση 23	1.81	1.588	1.651	1.683
θέση 24	1.971	1.654	2.026	1.884
θέση 25	1.927	1.567	1.556	1.683
θέση 26	1.533	1.597	1.219	1.45
θέση 27	1.657	1.56	1.222	1.48
μέσος όρος	1.954	1.984	1.765	1.909

Πίνακας 10. Μετρήσεις BR πριν τις κατασκευές, σε κάθε θέση με κάθε διέγερση, μέσος όρος σε κάθε θέση, μέσος όρος για κάθε διέγερση και μέσος όρος όλων των θέσεων για όλες τις διεγέρσεις.

	ξύλινες πλάκες	μπαλόνη	παλαμάκι	μέσος όρος για κάθε θέση
θέση 1	1.242	1.264	1.292	1.266
θέση 2	1.425	1.381	1.336	1.381
θέση 3	1.258	1.22	1.474	1.317
θέση 4	1.329	1.399	1.363	1.364
θέση 5	1.388	1.31	1.461	1.386
θέση 6	1.228	1.29	1.21	1.243
θέση 7	1.318	1.348		1.333
θέση 8	1.25	1.212	1.402	1.288
θέση 9	1.363	1.325	1.291	1.326
θέση 10	1.284	1.247	1.479	1.337
θέση 11	1.204	1.229	1.587	1.34
θέση 12	1.31	1.323	1.178	1.27
θέση 13	1.231	1.311	1.266	1.269
θέση 14	1.289	1.259	1.279	1.276
θέση 15	1.304	1.207	1.243	1.251
μέσος όρος	1.295	1.288	1.347	1.309

Πίνακας 11. Μετρήσεις BR μετά τις κατασκευές, σε κάθε θέση με κάθε διέγερση, μέσος όρος σε κάθε θέση, μέσος όρος για κάθε διέγερση και μέσος όρος όλων των θέσεων για όλες τις διεγέρσεις.

	ξύλινες πλάκες	μπαλόνη	παλαμάκι	μέσος όρος για κάθε θέση
θέση 1	1.484	1.158	1.216	1.286
θέση 2		1.002	1.085	1.044
θέση 3	1.286	1.276	1.032	1.198
θέση 4	1.269	1.138		1.204
θέση 5	1.039	1.048	1.065	1.051
θέση 6	1.653	1.41	1.49	1.518
θέση 7	1.258	1.141	1.212	1.204
θέση 8		1.249	1.398	1.324
θέση 9	1.229	1.057	1.09	1.125
θέση 10	1.155	1.302	1.225	1.227
θέση 11	1.39	1.274	1.236	1.3
θέση 12		0.812	0.955	0.884
θέση 13	1.245	1.11		1.178
θέση 14	1.18	1.14	1.142	1.154
θέση 15			0.976	
θέση ακρόασης			1.045	
μέσος όρος	1.29	1.151	1.155	1.192

Πίνακας 12. Μετρήσεις BR μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας, σε κάθε θέση με κάθε διέγερση, μέσος όρος σε κάθε θέση, μέσος όρος για κάθε διέγερση και μέσος όρος όλων των θέσεων για όλες τις διεγέρσεις.

➤ Μέσος όρος των μετρήσεων για κάθε ακουστική παράμετρο και τυπική απόκλιση των αποτελεσμάτων

T30 (s)						
F (Hz)	Πριν τις κατασκευές		Μετά τις κατασκευές		Μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας	
	μέσος όρος με ξύλινες πλάκες	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με ξύλινες πλάκες	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με ξύλινες πλάκες	τυπική απόκλιση
250	4.60	0.48	2.66	0.14	0.49	0.07
500	3.22	0.20	2.21	0.10	0.41	0.03
1000	2.53	0.07	1.63	0.05	0.34	0.02
2000	2.03	0.04	1.27	0.03	0.34	0.02
4000	1.62	0.05	1.01	0.01	0.32	0.01
	μέσος όρος με μπαλόني	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με μπαλόني	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με μπαλόني	τυπική απόκλιση
250	4.55	0.33	2.77	0.14	0.50	0.05
500	3.68	0.17	2.42	0.13	0.46	0.05
1000	2.62	0.09	1.79	0.06	0.39	0.04
2000	2.03	0.06	1.26	0.04	0.34	0.02
4000	1.62	0.05	1.00	0.02	0.33	0.01
	μέσος όρος με παλαμάκι	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με παλαμάκι	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με παλαμάκι	τυπική απόκλιση
250	4.16	0.57	2.70	0.16	0.53	0.05
500	3.42	0.26	2.22	0.08	0.46	0.05
1000	2.55	0.11	1.59	0.05	0.37	0.03
2000	2.00	0.06	1.25	0.03	0.34	0.02
4000	1.56	0.05	0.99	0.02	0.32	0.01
	μέσος όρος όλων	τυπική απόκλιση	μέσος όρος όλων	τυπική απόκλιση	μέσος όρος όλων	τυπική απόκλιση
250	4.44	0.51	2.71	0.15	0.51	0.06
500	3.44	0.28	2.28	0.14	0.44	0.05
1000	2.57	0.10	1.67	0.10	0.36	0.04
2000	2.02	0.06	1.26	0.03	0.34	0.02
4000	1.60	0.05	1.00	0.02	0.32	0.01

Πίνακας 13. Μέσος όρος των μετρήσεων T30 και τυπική απόκλιση των μετρήσεων.

T20 (s)						
F (Hz)	Πριν τις κατασκευές		Μετά τις κατασκευές		Μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας	
	μέσος όρος με ξύλινες πλάκες	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με ξύλινες πλάκες	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με ξύλινες πλάκες	τυπική απόκλιση
250	4.43	0.42	2.65	0.18	0.44	0.04
500	3.11	0.20	2.14	0.10	0.38	0.04
1000	2.50	0.09	1.60	0.04	0.32	0.04
2000	1.99	0.16	1.25	0.03	0.33	0.02
4000	1.60	0.04	1.01	0.02	0.32	0.02
	μέσος όρος με μπαλόني	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με μπαλόني	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με μπαλόني	τυπική απόκλιση
250	4.29	0.26	2.69	0.15	0.48	0.04
500	3.52	0.18	2.36	0.15	0.44	0.05
1000	2.59	0.12	1.74	0.07	0.35	0.02
2000	2.01	0.08	1.23	0.05	0.34	0.02
4000	1.60	0.04	0.99	0.02	0.32	0.01
	μέσος όρος με παλαμάκι	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με παλαμάκι	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με παλαμάκι	τυπική απόκλιση
250	4.16	0.47	2.64	0.17	0.48	0.04
500	3.26	0.20	2.15	0.10	0.43	0.04
1000	2.51	0.13	1.55	0.06	0.34	0.04
2000	1.99	0.07	1.23	0.04	0.33	0.02
4000	1.55	0.05	0.98	0.02	0.31	0.01
	μέσος όρος όλων	τυπική απόκλιση	μέσος όρος όλων	τυπική απόκλιση	μέσος όρος όλων	τυπική απόκλιση
250	4.29	0.41	2.66	0.17	0.47	0.05
500	3.30	0.26	2.22	0.16	0.42	0.05
1000	2.54	0.12	1.63	0.10	0.34	0.04
2000	1.99	0.11	1.24	0.04	0.33	0.02
4000	1.58	0.05	0.99	0.02	0.32	0.01

Πίνακας 14. Μέσος όρος των μετρήσεων T20 και τυπική απόκλιση των μετρήσεων.

T10 (s)						
F (Hz)	Πριν τις κατασκευές		Μετά τις κατασκευές		Μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας	
	μέσος όρος με ξύλινες πλάκες	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με ξύλινες πλάκες	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με ξύλινες πλάκες	τυπική απόκλιση
250	4.15	0.35	2.61	0.25	0.45	0.09
500	2.99	0.27	2.12	0.10	0.37	0.06
1000	2.48	0.15	1.59	0.10	0.32	0.05
2000	1.98	0.10	1.21	0.08	0.32	0.04
4000	1.56	0.04	0.99	0.02	0.31	0.02
	μέσος όρος με μπαλόني	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με μπαλόني	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με μπαλόني	τυπική απόκλιση
250	4.15	0.27	2.57	0.22	0.47	0.08
500	3.40	0.21	2.26	0.16	0.46	0.06
1000	2.55	0.14	1.72	0.09	0.33	0.03
2000	1.99	0.07	1.20	0.07	0.31	0.03
4000	1.57	0.06	0.99	0.03	0.31	0.02
	μέσος όρος με παλαμάκι	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με παλαμάκι	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με παλαμάκι	τυπική απόκλιση
250	4.09	0.45	2.56	0.28	0.48	0.09
500	3.10	0.23	2.16	0.14	0.42	0.05
1000	2.46	0.16	1.52	0.10	0.31	0.04
2000	1.99	0.08	1.20	0.06	0.32	0.04
4000	1.52	0.06	0.96	0.03	0.30	0.02
	μέσος όρος όλων	τυπική απόκλιση	μέσος όρος όλων	τυπική απόκλιση	μέσος όρος όλων	τυπική απόκλιση
250	4.13	0.37	2.58	0.25	0.46	0.09
500	3.16	0.30	2.18	0.15	0.41	0.06
1000	2.50	0.16	1.61	0.13	0.32	0.04
2000	1.99	0.09	1.20	0.07	0.31	0.04
4000	1.55	0.06	0.98	0.03	0.31	0.02

Πίνακας 15. Μέσος όρος των μετρήσεων T10 και τυπική απόκλιση των μετρήσεων.

EDT (s)						
F (Hz)	Πριν τις κατασκευές		Μετά τις κατασκευές		Μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας	
	μέσος όρος με ξύλινες πλάκες	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με ξύλινες πλάκες	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με ξύλινες πλάκες	τυπική απόκλιση
250	3.87	0.36	2.51	0.20	0.48	0.12
500	2.91	0.24	2.07	0.17	0.39	0.05
1000	2.49	0.16	1.50	0.10	0.30	0.05
2000	1.94	0.09	1.19	0.05	0.30	0.03
4000	1.56	0.07	0.98	0.03	0.30	0.03
	μέσος όρος με μπαλόني	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με μπαλόني	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με μπαλόني	τυπική απόκλιση
250	3.84	0.27	2.55	0.29	0.43	0.12
500	3.27	0.23	2.21	0.17	0.38	0.07
1000	2.47	0.13	1.65	0.09	0.32	0.05
2000	1.95	0.08	1.18	0.05	0.30	0.04
4000	1.54	0.04	0.97	0.03	0.30	0.02
	μέσος όρος με παλαμάκι	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με παλαμάκι	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με παλαμάκι	τυπική απόκλιση
250	3.89	0.39	2.48	0.21	0.46	0.08
500	3.00	0.19	2.06	0.11	0.36	0.05
1000	2.44	0.14	1.50	0.09	0.27	0.03
2000	1.95	0.08	1.18	0.07	0.32	0.05
4000	1.50	0.06	0.96	0.03	0.28	0.02
	μέσος όρος όλων	τυπική απόκλιση	μέσος όρος όλων	τυπική απόκλιση	μέσος όρος όλων	τυπική απόκλιση
250	3.87	0.35	2.51	0.24	0.46	0.11
500	3.06	0.27	2.11	0.17	0.38	0.06
1000	2.46	0.14	1.55	0.12	0.30	0.05
2000	1.95	0.08	1.18	0.06	0.31	0.04
4000	1.54	0.06	0.97	0.03	0.29	0.03

Πίνακας 16. Μέσος όρος των μετρήσεων EDT και τυπική απόκλιση των μετρήσεων.

C80 (dB)						
F (Hz)	Πριν τις κατασκευές		Μετά τις κατασκευές		Μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας	
	μέσος όρος με ξύλινες πλάκες	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με ξύλινες πλάκες	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με ξύλινες πλάκες	τυπική απόκλιση
250	-4.88	0.90	-2.19	1.03	10.73	2.41
500	-3.50	0.90	-1.10	1.15	12.80	1.44
1000	-1.88	0.90	0.73	0.97	15.95	1.19
2000	-0.94	0.57	1.97	0.52	15.41	0.99
4000	0.03	0.40	3.23	0.77	16.06	0.92
	μέσος όρος με μπαλόني	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με μπαλόني	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με μπαλόني	τυπική απόκλιση
250	-4.52	1.17	-2.34	0.67	11.59	1.85
500	-3.41	1.25	-1.70	0.94	12.73	2.02
1000	-1.97	0.77	0.44	0.64	15.12	1.00
2000	-0.58	0.54	2.40	0.54	15.79	0.88
4000	0.73	0.54	3.47	0.71	16.07	1.07
	μέσος όρος με παλαμάκι	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με παλαμάκι	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με παλαμάκι	τυπική απόκλιση
250	-4.26	1.27	-1.97	1.15	11.41	1.34
500	-2.95	1.16	-0.77	0.87	13.23	0.99
1000	-2.01	0.60	0.99	0.85	16.65	1.05
2000	-0.98	0.59	2.48	0.87	15.69	1.09
4000	0.83	0.60	3.56	0.75	16.35	0.77
	μέσος όρος όλων	τυπική απόκλιση	μέσος όρος όλων	τυπική απόκλιση	μέσος όρος όλων	τυπική απόκλιση
250	-4.54	1.15	-2.16	0.98	11.26	1.99
500	-3.28	1.13	-1.17	1.07	12.93	1.58
1000	-1.95	0.77	0.73	0.86	15.95	1.25
2000	-0.83	0.60	2.29	0.69	15.63	1.01
4000	0.54	0.62	3.42	0.76	16.16	0.94

Πίνακας 17. Μέσος όρος των μετρήσεων C80 και τυπική απόκλιση των μετρήσεων.

C50 (dB)						
	Πριν τις κατασκευές		Μετά τις κατασκευές		Μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας	
F (Hz)	μέσος όρος με ξύλινες πλάκες	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με ξύλινες πλάκες	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με ξύλινες πλάκες	τυπική απόκλιση
250	-7.54	1.15	-4.65	1.50	5.74	2.48
500	-5.91	1.03	-3.44	1.05	7.1	1.16
1000	-4.19	1.16	-2.03	0.71	9.58	1.42
2000	-3.45	0.68	-1.10	0.63	9.31	0.45
4000	-2.69	0.50	0.07	0.70	9.97	1.18
	μέσος όρος με μπαλόني	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με μπαλόني	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με μπαλόني	τυπική απόκλιση
250	-7.08	2.10	-5.08	1.31	7.73	1.66
500	-5.54	1.47	-4.22	1.09	7.46	1.88
1000	-4.15	0.91	-2.24	0.88	9.43	1.20
2000	-2.89	0.78	-0.62	0.79	10.02	1.09
4000	-1.91	0.62	0.34	0.70	10.06	0.96
	μέσος όρος με παλαμάκι	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με παλαμάκι	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με παλαμάκι	τυπική απόκλιση
250	-6.68	1.54	-4.71	1.59	7.25	1.65
500	-5.11	1.52	-2.97	0.82	8.55	1.30
1000	-4.37	0.83	-1.62	1.09	10.81	1.05
2000	-3.51	0.58	-0.23	1.08	9.55	1.19
4000	-1.75	0.69	0.42	0.92	10.4	0.77
	μέσος όρος όλων	τυπική απόκλιση	μέσος όρος όλων	τυπική απόκλιση	μέσος όρος όλων	τυπική απόκλιση
250	-7.08	1.67	-4.81	1.48	6.99	2.21
500	-5.51	1.38	-3.51	1.13	7.74	1.61
1000	-4.24	0.98	-1.96	0.94	9.98	1.39
2000	-3.28	0.74	-0.64	0.91	9.64	1.00
4000	-2.10	0.73	0.28	0.79	10.15	1.01

Πίνακας 18. Μέσος όρος των μετρήσεων C50 και τυπική απόκλιση των μετρήσεων.

D50 (%)						
F (Hz)	Πριν τις κατασκευές		Μετά τις κατασκευές		Μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας	
	μέσος όρος με ξύλινες πλάκες	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με ξύλινες πλάκες	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με ξύλινες πλάκες	τυπική απόκλιση
250	14.84	3.40	25.08	5.91	75.11	10.98
500	20.24	3.64	30.80	5.08	82.83	3.54
1000	27.26	5.11	38.25	3.87	89.19	3.06
2000	30.97	3.30	43.47	3.54	89.41	1.00
4000	34.89	2.63	50.04	4.00	90.29	2.46
	μέσος όρος με μπαλόني	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με μπαλόني	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με μπαλόني	τυπική απόκλιση
250	15.99	5.74	23.34	5.25	84.03	5.17
500	21.39	5.66	27.16	4.78	82.69	6.06
1000	27.53	4.13	37.01	4.73	89.12	2.68
2000	33.71	3.99	46.02	4.51	90.47	2.10
4000	38.96	3.39	51.57	3.97	90.65	1.87
	μέσος όρος με παλαμάκι	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με παλαμάκι	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με παλαμάκι	τυπική απόκλιση
250	17.36	5.12	24.68	6.55	82.55	5.76
500	23.09	6.10	33.25	4.17	86.87	3.25
1000	26.56	3.71	40.19	5.89	91.94	1.70
2000	30.69	2.81	47.01	5.74	89.40	2.61
4000	39.80	3.83	51.74	5.19	91.42	1.33
	μέσος όρος όλων	τυπική απόκλιση	μέσος όρος όλων	τυπική απόκλιση	μέσος όρος όλων	τυπική απόκλιση
250	16.07	4.96	24.37	5.97	80.57	8.68
500	21.58	5.37	30.40	5.32	84.13	4.87
1000	27.11	4.38	38.49	5.07	90.08	2.86
2000	31.79	3.67	45.50	4.92	89.76	2.08
4000	37.88	3.95	51.12	4.49	90.79	2.00

Πίνακας 19. Μέσος όρος των μετρήσεων D50 και τυπική απόκλιση των μετρήσεων.

Ts (ms)						
F (Hz)	Πριν τις κατασκευές		Μετά τις κατασκευές		Μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας	
	μέσος όρος με ξύλινες πλάκες	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με ξύλινες πλάκες	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με ξύλινες πλάκες	τυπική απόκλιση
250	288.93	25.31	178.70	18.54	38.23	7.86
500	217.74	18.76	149.91	12.58	30.44	4.22
1000	175.04	12.31	110.29	6.52	24.42	3.74
2000	140.55	7.77	87.66	3.34	23.69	1.84
4000	114.86	5.28	72.15	5.81	21.63	2.40
	μέσος όρος με μπαλόني	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με μπαλόني	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με μπαλόني	τυπική απόκλιση
250	278.72	21.26	185.76	19.82	33.10	6.44
500	232.88	20.63	159.69	12.74	30.72	5.72
1000	173.19	11.92	114.61	8.69	22.56	2.29
2000	134.41	8.08	82.86	5.49	21.40	1.97
4000	106.97	5.76	69.40	5.93	20.81	2.76
	μέσος όρος με παλαμάκι	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με παλαμάκι	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με παλαμάκι	τυπική απόκλιση
250	278.94	35.75	173.32	18.19	32.23	4.48
500	210.27	20.74	139.93	9.51	25.12	3.22
1000	172.01	10.56	104.86	7.82	19.56	2.50
2000	139.74	7.65	82.00	7.68	21.52	2.82
4000	103.68	6.89	68.32	7.26	20.45	1.66
	μέσος όρος όλων	τυπική απόκλιση	μέσος όρος όλων	τυπική απόκλιση	μέσος όρος όλων	τυπική απόκλιση
250	282.19	28.51	179.26	19.54	34.52	6.93
500	220.30	22.16	149.84	14.21	28.76	5.19
1000	173.41	11.69	109.92	8.70	22.18	3.54
2000	138.23	8.30	84.17	6.29	22.20	2.49
4000	108.50	7.63	69.96	6.57	20.96	2.38

Πίνακας 20. Μέσος όρος των μετρήσεων Ts και τυπική απόκλιση των μετρήσεων.

BR					
Πριν τις κατασκευές		Μετά τις κατασκευές		Μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας	
μέσος όρος με ξύλινες πλάκες	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με ξύλινες πλάκες	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με ξύλινες πλάκες	τυπική απόκλιση
1.954	0.23	1.295	0.06	1.29	0.16
μέσος όρος με μπαλόني	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με μπαλόني	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με μπαλόني	τυπική απόκλιση
1.984	0.29	1.288	0.06	1.151	0.14
μέσος όρος με παλαμάκι	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με παλαμάκι	τυπική απόκλιση	μέσος όρος με παλαμάκι	τυπική απόκλιση
1.765	0.38	1.347	0.11	1.155	0.15
μέσος όρος όλων	τυπική απόκλιση	μέσος όρος όλων	τυπική απόκλιση	μέσος όρος όλων	τυπική απόκλιση
1.901	0.32	1.310	0.09	1.192	0.16

Πίνακας 21. Μέσος όρος των μετρήσεων BR και τυπική απόκλιση των μετρήσεων.

5.7.4 – Παρατηρήσεις και συμπεράσματα από τη μελέτη των αποτελεσμάτων

Από τις μετρήσεις της κρουστικής απόκρισης γίνεται η εκτίμηση των ακουστικών παραμέτρων του χώρου. Σύμφωνα με το διαχωρισμό του ακουστικού φάσματος, ο χώρος θεωρείται ακουστικά μεγάλος από τη συχνότητα αποκοπής 224.4Hz και για μεγαλύτερες συχνότητες. Αυτό σημαίνει ότι εξετάζουμε τις ακουστικές παραμέτρους του χώρου από την οκτάβα των 250Hz έως την οκτάβα των 4000Hz. Οι δείκτες που υπολογίζονται, χρησιμοποιούνται από τη γεωμετρική ακουστική, όπως και ο χρόνος αντήχησης και εκφράζονται στις ίδιες συχνότητες. Για τις χαμηλότερες συχνότητες υπάρχει η μελέτη των στάσιμων κυμάτων του χώρου.

Για την ορθότητα των τιμών του χρόνου αντήχησης (T30, T20, T10) δίνονται οι τιμές του δείκτη rT, οι οποίες δείχνουν εάν η μείωση της στάθμης ηχητικής πίεσης είναι ομαλή ή υπάρχουν παράγοντες επηρεασμού της κλίσης της. Εάν η απόλυτη τιμή είναι κοντά στο ένα τότε οι μετρήσεις του χρόνου αντήχησης είναι έγκυρες. Σε αντίθετη περίπτωση υπάρχει κάτι που επηρεάζει την απόσβεση του αντηχητικού πεδίου. Οπότε σε αυτή την περίπτωση, οι μετρήσεις του χρόνου αντήχησης είναι άκυρες και δε λαμβάνουν μέρος στην εκτίμηση του χρόνου αντήχησης. Επίσης, για τις μετρήσεις του T20 οι άκυρες τιμές στις οκτάβες 125Hz, 250Hz, 500Hz και 1000Hz δε μας επιτρέπουν να υπολογίσουμε το BR για τις αντίστοιχες θέσεις. Στους πίνακες 10, 11 και 12, οι μετρήσεις στις θέσεις όπου οι τιμές είναι άκυρες, σύμφωνα με το δείκτη rT, παραμένουν κενές.

Σύμφωνα με το δείκτη rT, παρατηρούμε ότι λαμβάνουμε πιο έγκυρες μετρήσεις στις χαμηλές οκτάβες διεγείροντας τον χώρο με ξύλινες πλάκες και με μπαλόني σε σύγκριση με τη διέγερση του χώρου με παλαμάκι.

Συγκρίνοντας τις παραμέτρους T30, T20 και T10 πριν την υλοποίηση των κατασκευών, παρατηρούμε ότι για T10 δεν έχουμε άκυρες μετρήσεις και για T20 λαμβάνουμε λίγες άκυρες μετρήσεις σε σύγκριση με τις άκυρες μετρήσεις για T30. Αυτό σημαίνει ότι το ηχητικό πεδίο επηρεάζει τις μετρήσεις και καθιστά δύσκολο τον

υπολογισμό του χρόνου αντήχησης για μεγαλύτερη χρονική απόσβεση του ηχητικού πεδίου.

Μετά την υλοποίηση των κατασκευών στο χώρο, για τις παραμέτρους T30, T20 και T10 οι άκυρες μετρήσεις ελαχιστοποιούνται. Αυτό οφείλεται στην πιο ομοιόμορφη κατανομή της απορρόφησης στο χώρο με την τοποθέτηση των γυψοσανίδων.

Μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας στο χώρο για τις παραμέτρους T30 και T20 αυξάνονται λίγο οι άκυρες μετρήσεις, ενώ για T10 υπάρχει μεγάλη αύξηση των άκυρων μετρήσεων με όλες τις διεγέρσεις. Αυτό οφείλεται σε ανακλάσεις από τα έπιπλα οι οποίες είναι σύντομες χρονικά και έντονες σε διαφορετικές συχνοτικές περιοχές ανάλογα με τη θέση μέτρησης στο χώρο. Οι ανακλάσεις αυτές δεν επιτρέπουν την ομοιόμορφη κλίση στην εξασθένηση της ενέργειας σε τόσο μικρό κομμάτι μείωσης.

Μελετώντας την τυπική απόκλιση των μετρήσεων πριν και μετά την υλοποίηση των κατασκευών, παρατηρούμε ότι για τις παραμέτρους T30, T20, T10, EDT και Ts όπου εκφράζουν την εξασθένηση του χώρου, όπως και το BR το οποίο εξάγεται από το T20, η τυπική απόκλιση των μετρήσεων μετά την υλοποίηση των κατασκευών στο δωμάτιο έχει μειωθεί σημαντικά, κάτι το οποίο σημαίνει ότι το ηχητικό πεδίο στο χώρο είναι περισσότερο ομοιόμορφο από ότι ήταν πριν την υλοποίηση των κατασκευών. Μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας στο δωμάτιο, η τυπική απόκλιση των μετρήσεων των παραμέτρων T30, T20, T10, EDT και Ts μειώνεται ακόμα περισσότερο, ενώ για το BR η τυπική απόκλιση των μετρήσεων αυξάνεται λίγο από ότι ήταν μετά τις κατασκευές σε άδειο χώρο.

Αντίθετα, μελετώντας την τυπική απόκλιση των παραμέτρων C80, C50 και D50, πριν και μετά την υλοποίηση των κατασκευών και μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας στο χώρο, παρατηρούμε ότι η τυπική απόκλιση των μετρήσεων δεν έχει μεγάλες μεταβολές, κατί το οποίο μας δείχνει ότι η διαύγεια της μουσικής και η ευκρίνεια της ομιλίας μεταβάλλονται από θέση σε θέση μέσα στο χώρο ακόμα και μετά την υλοποίηση των κατασκευών και σε γεμάτο δωμάτιο.

Στη συνέχεια θα πρέπει να δούμε αν οι τιμές των ακουστικών δεικτών εμπίπτουν στις προτεινόμενες. Θα μελετήσουμε τις τιμές του μέσου όρου όλων των μετρήσεων για κάθε ακουστική παράμετρο ξεχωριστά.

Ο ιδανικός χρόνος αντήχησης για την χρήση του χώρου είναι 0.3sec. Η εκτίμηση των ακουστικών δεικτών T30, T20, T10 και EDT βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο για κάθε ένα από τα τρία στάδια μετρήσεων. Μετά την υλοποίηση των κατασκευών στο χώρο ο χρόνος αντήχησης μειώνεται λίγο, ενώ μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας στο χώρο ο χρόνος αντήχησης μειώνεται σημαντικά στο επίπεδο της προτεινόμενης τιμής με μία μικρή αύξηση στις χαμηλότερες συχνότητες.

Παρατηρούμε ότι μετά την υλοποίηση των κατασκευών ο δείκτης C80 έχει οριακά αποδεκτές τιμές, ενώ μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας ο δείκτης C80 ξεπερνά κατά πολύ το όριο των -3dB. Παρατηρούμε ότι μετά την υλοποίηση των κατασκευών ο δείκτης C50 δεν έχει αποδεκτές τιμές παρά μόνο οριακά για τις υψηλότερες συχνότητες, ενώ μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας ο δείκτης C50 ξεπερνά κατά πολύ το όριο των -2dB. Συμπεραίνουμε ότι η ακουστική συμπεριφορά του χώρου παρέχει διαύγεια στη μουσική και ευκρίνεια στην ομιλία.

Ο ακουστικός δείκτης D50 είναι ένα μέτρο για την ευκρίνεια της ομιλίας, ορίζεται ως η αναλογία σε ένα σημείο της ηχητικής ενέργειας κατά την διάρκεια των πρώτων 50msec προς τη συνολική ενέργεια. Υπάρχει μικρή αύξηση του δείκτη D50, μετά την υλοποίηση των κατασκευών στο δωμάτιο, ενώ μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας ο δείκτης D50 αυξάνεται πάρα πολύ, κυμαίνεται από 80%-90%

και μας δείχνει ότι έχει αυξηθεί η ηχητική ενέργεια των πρώτων 50msec σε σχέση με την συνολική ενέργεια, κάτι το οποίο είναι επιθυμητό για την ευκρίνεια της ομιλίας.

Η αναμενόμενη τιμή του T_s για ένα ιδανικό σύστημα είναι ανάλογη με τον χρόνο αντήχησης $T_s = T/13.6$. Στην περίπτωση που ο ιδανικός χρόνος αντήχησης είναι 0.3sec η ιδανική τιμή του T_s είναι 22msec. Υπάρχει μικρή μείωση της τιμής του δείκτη T_s μετά την υλοποίηση των κατασκευών στο δωμάτιο, ενώ μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας ο δείκτης T_s μειώνεται σημαντικά, βρίσκεται πολύ κοντά στην ιδανική περίπτωση, αυτό μας δείχνει την αύξηση της διαύγειας στο χώρο, κάτι το οποίο είναι επιθυμητό.

Η τιμή του BR πριν την υλοποίηση των κατασκευών στο δωμάτιο βρίσκεται πολύ πάνω από τα επιθυμητά όρια, μετά την υλοποίηση των κατασκευών, η τιμή του BR μειώνεται κοντά στο 1.3, μία οριακά αποδεκτή τιμή, ενώ μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας η τιμή του BR μειώνεται κι άλλο περίπου στο 1.2 και βρίσκεται μέσα στα όρια των προτεινόμενων τιμών για μουσική αλλά λίγο πάνω από τα όρια των προτεινόμενων τιμών για ομιλία.

5.8 – Θεωρητικός υπολογισμός του χρόνου αντήχησης του χώρου

Η αντήχηση είναι το αποτέλεσμα της σύνθεσης των τριών τύπων του μη απευθείας ήχου, των πρώτων ανακλάσεων, του αντηχητικού πεδίου και των στάσιμων κυμάτων. Η μέτρηση του χρόνου αντήχησης δεν αποκαλύπτει άμεσα τη φύση αυτών των μεμονωμένων συστατικών της αντήχησης. Αυτή είναι η αδυναμία του χρόνου αντήχησης ως δείκτη της ακουστικής ποιότητας του δωματίου. Η σημαντική δράση ενός ή περισσότερων συστατικών της αντήχησης μπορεί να επισκιαστούν από τη σύνθετη διαδικασία. Αυτός είναι και ο λόγος που ο χρόνος αντήχησης δεν είναι ο μοναδικός ακουστικός δείκτης.

Η εξίσωση του Sabine για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης βασίζεται στις στατιστικές ιδιότητες ενός τυχαίου ηχητικού πεδίου, το οποίο δεν μπορεί να υπάρξει σε μικρούς χώρους. Ο χρόνος αντήχησης είναι μία μέτρηση της εξασθένησης της ενέργειας. Ένας χρόνος αντήχησης 0.5sec σημαίνει ότι έχουμε πτώση 60dB σε 0.5sec. Ένας άλλος τρόπος να το εκφράσουμε αυτό είναι $60\text{dB} / 0.5\text{sec} = 120\text{dB/sec}$ εξασθένηση. Είτε έχουμε διάχυτο ηχητικό πεδίο είτε όχι, ο ήχος εξασθενεί με συγκεκριμένο ρυθμό, ακόμα και στις χαμηλές συχνότητες όπου το ηχητικό πεδίο είναι ελάχιστα διάχυτο. Η ηχητική ενέργεια η οποία συγκεντρώνεται σε συχνότητες συντονισμού εξασθενεί με κάποιο μετρήσιμο ρυθμό. Φαίνεται να είναι πρακτικό να χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση Sabine σε μικρούς χώρους για να εκτιμήσουμε την απορρόφηση που χρειάζεται ο χώρος σε διαφορετικές συχνότητες.

Πρακτικά, ο όρος «χρόνος αντήχησης» δεν πρέπει να συνδέεται με σχετικά μικρούς χώρους όπου το ηχητικό πεδίο δεν είναι τυχαίο. Ωστόσο, ένας σχεδιαστής πρέπει να υπολογίσει την ποσότητα της απορρόφησης που χρειάζεται για να πετύχει τον επιθυμητό ακουστικό χαρακτήρα του δωματίου. Ενώ ο χρόνος αντήχησης είναι χρήσιμος για αυτό το λόγο, οι τιμές του χρόνου αντήχησης σε ένα μικρό χώρο δεν έχουν την ίδια σημαντική αξία όσο σε ένα μεγάλο χώρο.

Συνεπώς, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον προσεγγιστικό τύπο του Sabine (σχέση 1.1) για να υπολογίσουμε τον χρόνο αντήχησης ενός χώρου σε συνάρτηση με τη συχνότητα, ανάλογα με τα υλικά που υπάρχουν στους τοίχους του δωματίου. Οι συντελεστές απορρόφησης των υλικών του χώρου λαμβάνονται από το βιβλίο του Ευθυμιάτου Δ. «Ακουστική και κτιριακές εφαρμογές».

α/α	Υλικά	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
4	πάτωμα, μωσαϊκό	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
6	τοίχοι βαμμένοι	0.013	0.015	0.02	0.03	0.04	0.05
24	γυψοσανίδες	0.15	0.1	0.06	0.04	0.04	0.05
29	παράθυρο	0.02	0.06	0.03	0.03	0.02	0.02
55	πόρτα	0.12	0.04	0.06	0.05	0.05	0.05

Πίνακας 22. Συντελεστές απορρόφησης των υλικών του χώρου σε άδειο δωμάτιο μετά την υλοποίηση των κατασκευών.

Υλικά	S (m ²)	125Hz		250Hz		500Hz	
		α	Sα	α	Sα	α	Sα
πάτωμα	10.31	0.01	0.1	0.01	0.1	0.02	0.21
τοίχοι	13.73	0.013	0.18	0.015	0.21	0.02	0.28
γυψοσανίδες	23.8	0.15	3.57	0.1	2.38	0.06	1.43
παράθυρο	1.15	0.02	0.02	0.06	0.07	0.03	0.03
πόρτα	1.39	0.12	0.17	0.04	0.06	0.06	0.08
Συνολική Απορρόφηση			4.04		2.82		2.03
Χρόνος Αντήχησης			0.95		1.36		1.89

Υλικά	S (m ²)	1kHz		2kHz		4kHz	
		α	Sα	α	Sα	α	Sα
πάτωμα	10.31	0.02	0.21	0.02	0.21	0.03	0.31
τοίχοι	13.73	0.03	0.41	0.04	0.55	0.05	0.69
γυψοσανίδες	23.8	0.04	0.95	0.04	0.95	0.05	1.19
παράθυρο	1.15	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
πόρτα	1.39	0.05	0.07	0.05	0.07	0.05	0.07
Συνολική Απορρόφηση			1.67		1.8		2.28
Χρόνος Αντήχησης			2.3		2.13		1.68

Πίνακας 23. Θεωρητικός υπολογισμός του χρόνου αντήχησης του χώρου σε άδειο δωμάτιο μετά την υλοποίηση των κατασκευών.

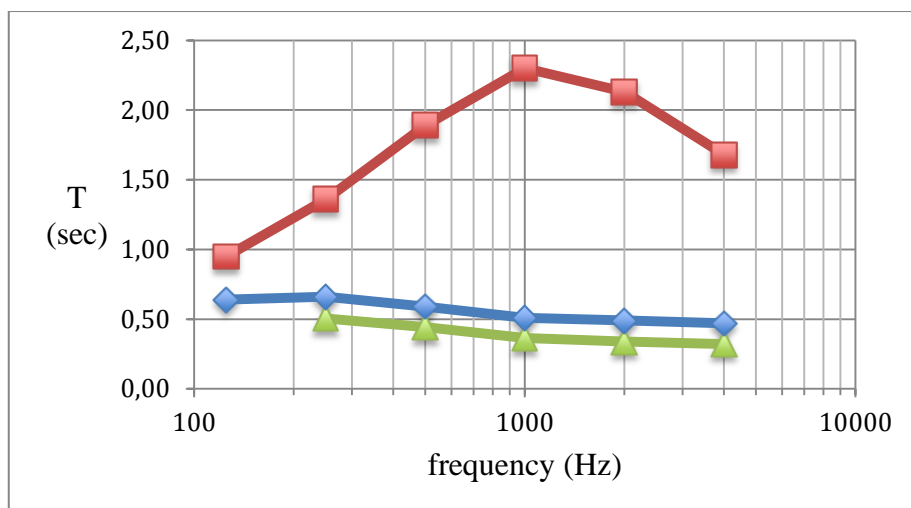
Στη συνέχεια, αφού τοποθετούνται έπιπλα και μοκέτα επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία για τον θεωρητικό υπολογισμό του χρόνου αντήχησης του χώρου με γεμάτο δωμάτιο. Το γραφείο, η βιβλιοθήκη και η καρέκλα στην θέση ακρόασης δε λαμβάνουν μέρος στους υπολογισμούς.

α/α	Υλικά	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
113	πάτωμα με μοκέτα	0.05	0.05	0.15	0.2	0.25	0.3
6	τοίχοι βαμμένοι	0.013	0.015	0.02	0.03	0.04	0.05
24	γυψοσανίδες	0.15	0.1	0.06	0.04	0.04	0.05
87	παράθυρο με κουρτίνα	0.07	0.31	0.49	0.75	0.7	0.6
55	πόρτα	0.12	0.04	0.06	0.05	0.05	0.05
126	καναπές	0.54	0.62	0.68	0.7	0.68	0.66

Πίνακας 24. Συντελεστές απορρόφησης των υλικών του χώρου μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.

		125Hz		250Hz		500Hz	
Υλικά	S (m ²)	α	Sα	α	Sα	α	Sα
πάτωμα με μοκέτα	8.73	0.05	0.44	0.05	0.44	0.15	1.31
τοίχοι	10.39	0.013	0.14	0.015	0.16	0.02	0.21
γυψοσανίδες	23.8	0.15	3.57	0.1	2.38	0.06	1.43
παράθυρο με κουρτίνα	3.3	0.07	0.23	0.31	1.02	0.49	1.62
πόρτα	1.39	0.12	0.17	0.04	0.06	0.06	0.08
καναπές	2.77	0.54	1.49	0.62	1.72	0.68	1.88
Συνολική Απορρόφηση			6.04		5.78		6.53
Χρόνος Αντήχησης			0.64		0.66		0.59
		1kHz		2kHz		4kHz	
Υλικά	S (m ²)	α	Sα	α	Sα	α	Sα
πάτωμα με μοκέτα	8.73	0.2	1.75	0.25	2.18	0.3	2.62
τοίχοι	10.39	0.03	0.31	0.04	0.42	0.05	0.52
γυψοσανίδες	23.8	0.04	0.95	0.04	0.95	0.05	1.19
παράθυρο με κουρτίνα	3.3	0.75	2.48	0.7	2.31	0.6	1.98
πόρτα	1.39	0.05	0.07	0.05	0.07	0.05	0.07
καναπές	2.77	0.7	1.94	0.68	1.88	0.66	1.83
Συνολική Απορρόφηση			7.5		7.81		8.21
Χρόνος Αντήχησης			0.51		0.49		0.47

Πίνακας 25. Θεωρητικός υπολογισμός του χρόνου αντήχησης του χώρου μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας.



Σχήμα 178. Θεωρητικός υπολογισμός του χρόνου αντήχησης του χώρου σε συνάρτηση με την συχνότητα σε άδειο (κόκκινο) και σε γεμάτο (μπλε) δωμάτιο. Μέτρηση T30 μέσος όρος όλων των μετρήσεων (πράσινο).

Παρατηρούμε ότι, μετά την υλοποίηση των κατασκευών σε άδειο δωμάτιο, ο θεωρητικός χρόνος αντήχησης διαφέρει κατά πολύ από τον μετρήσιμο χρόνο αντήχησης. Αντίθετα, μετά την τοποθέτηση επίπλων και μοκέτας στο δωμάτιο, ο θεωρητικός χρόνος αντήχησης είναι πολύ κοντά στο μετρήσιμο χρόνο αντήχησης.

5.8.1 – Ζητούμενη απορρόφηση για τον επιθυμητό χρόνο αντήχησης

Στην περίπτωση που θεωρητικά ο επιθυμητός χρόνος αντήχησης είναι περίπου 0.3sec, η ζητούμενη απορρόφηση από τις επιφάνειες του χώρου μπορεί να υπολογιστεί επίσης από την εξίσωση του Sabine. (σχέση 1.1)

$$A_s = 0.161V / T_{60}$$

Όπου $T_{60} = 0.3\text{sec}$ και ο όγκος του δωματίου $V = 23.83\text{m}^3$. Από τη λύση της εξίσωσης η ζητούμενη απορρόφηση από τις επιφάνειες του χώρου είναι 12.79sabins. Αυτό σημαίνει ότι, θα πρέπει να προστεθούν απορροφητικές επιφάνειες έτσι ώστε η συνολική απορρόφηση του πίνακα 25 για κάθε οκτάβα να φτάσει τα 12.79sabins, για να μειωθεί ο χρόνος αντήχησης στα 0.3sec.

5.9 – Τοποθέτηση ηχείων και θέσης ακρόασης

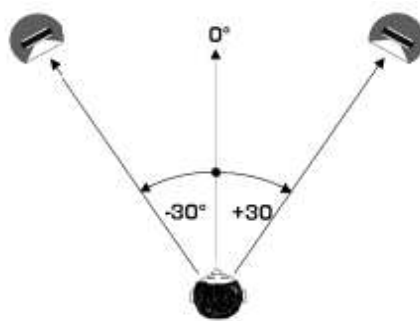
Όσο πιο επίπεδη είναι η συνολική απόκριση της ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης, τόσο πιο επιτυχημένη θεωρείται, αφού μπορεί να αποδίδει πιστά το αρχικό σήμα. Η θέση των ηχητικών πηγών και η θέση ακρόασης παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην απόκριση του χώρου. Θα πρέπει να καθορίζονται έτσι ώστε να αποφεύγονται οι θέσεις των μηδενικών στην κατανομή των αξονικών ρυθμών κατά μήκος, κατά πλάτος και κατά ύψος στον χώρο. Για να το πετύχουμε αυτό, υπολογίζοντας την απόσταση των ηχείων από τους τοίχους, μπορούμε να ακολουθήσουμε τον «κανόνα των περιττών αριθμών», ο οποίος είναι: «Διαιρούμε κατά πλάτος το δωμάτιο με έναν περιττό αριθμό και κατά μήκος με έναν άλλο και τοποθετούμε τα ηχεία σε αποστάσεις από τους τοίχους ίσες με το αποτέλεσμα των δύο διαιρέσεων.»

Στην περίπτωση μας, τοποθετούμε τα ηχεία στην μικρότερη πλευρά του δωματίου και ακριβώς μπροστά από τον τοίχο, θεωρώντας πως είναι η ιδανική θέση για near-field monitors μέσα στο χώρο. Γενικά, θα πρέπει να αποφεύγεται η τοποθέτηση των ηχείων από 30cm – 76cm από τον μπροστινό τοίχο, εκτός αν έχουν τροποποιηθεί οι επιφάνειες ακριβώς πίσω από τα ηχεία. Η επιλογή της μικρότερης πλευράς του δωματίου γίνεται επειδή θα μας δώσει λιγότερο δραστικές κορυφές και κοιλίες, σε σχέση με την τοποθέτησή τους στον μακρύτερο τοίχο, ο κύριος λόγος είναι ότι από τη στιγμή που ο πίσω τοίχος είναι πιο μακριά από τη θέση ακρόασης, επιτρέπει την καλύτερη εξασθένηση των χαμηλών συχνοτήτων.

Τα ηχεία σχεδόν πάντα θέλουμε να έχουν ίση απόσταση από τους πλαϊνούς τοίχους, αν αυτό είναι δυνατό. Για να καθορίσουμε την απόστασή τους από τους πλαϊνούς τοίχους θα ακολουθήσουμε τον «κανόνα των περιττών αριθμών», διαιρώντας το πλάτος του δωματίου με τον αριθμό τρία, το αποτέλεσμα είναι απόσταση περίπου 1m από τον πλαϊνό του τοίχο το κάθε ηχείο.

Οι καμπίνες των ηχείων θα πρέπει να είναι στο ίδιο ύψος μεταξύ τους, αλλά και στο κατάλληλο ύψος. Προτείνεται ως ύψος τοποθέτησης, τα tweeter των ηχείων να τοποθετούνται περίπου στο ύψος των αυτιών του καθήμενου ακροατή και να σημαδεύουν τη θέση του ακροατή. Το ύψος των αυτιών του καθήμενου ακροατή είναι περίπου 1.10m, συνεπώς και τα ηχεία τοποθετούνται έτσι ώστε τα tweeter τους να είναι σε ύψος 1.10m.

Τα ηχεία τοποθετούνται σε επιδαπέδιες βάσεις αντί να είναι πάνω στο γραφείο. Τοποθετώντας τα ηχεία σε βάσεις δίνεται μεγαλύτερη ελευθερία ώστε να βρεθεί η καλύτερη θέση των ηχείων, επίσης αποσυνδέουμε τα ηχεία από το γραφείο το οποίο συντονίζει.



Σχήμα 179. Ισόπλευρο ιδεατό τρίγωνο που σχηματίζεται με τα ηχεία και τον ακροατή.

Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός στερεοφωνικού συστήματος ηχητικής αναπαραγωγής καθορίζονται ως λειτουργία της σχετικής θέσης των μεγαφώνων σε σχέση με τον ακροατή κατά τη διάρκεια της αναπαραγωγής. Γίνεται σχεδόν κοινώς αποδεκτό ως τυποποιημένος τρόπος ακρόασης, πως ο ακροατής πρέπει να τοποθετηθεί στην κορυφή της θέσης που προσδιορίζει το ισόπλευρο ιδεατό τρίγωνο με τα μεγάφωνα σε κάθε ακρότατο της βάσης του τριγώνου που «βλέπουν» προς τον ακροατή. Για την αίσθηση της στερεοφωνίας στο δωμάτιο ακρόασης είναι ουσιαστικές οι ανακλάσεις από την οροφή, το πάτωμα και τους τοίχους. Αν τα ηχεία είναι πολύ μακριά το ένα από το άλλο, η ηχητική εικόνα δεν είναι συμπαγής. Αν είναι πολύ κοντά, η ηχητική εικόνα θα είναι «στενή». Προτείνεται να σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία 45 – 60 μοίρες και η θέση ακρόασης πρέπει να τοποθετηθεί μπροστά από τα ηχεία έτσι ώστε να υπάρχει γωνία μεταξύ ακροατή και ηχείου 30 μοίρες.

Ο καθορισμός της θέσης ακρόασης, προτείνεται να απέχει περίπου 35% - 40% από τον μπροστά τοίχο, με τη συγκεκριμένη θέση να καθορίζεται μετά από πειραματισμό. Αυτή η απόσταση αποφεύγει μεγάλες κορυφές και κοιλίες από τους συντονισμούς του χώρου. Πρέπει να αποφεύγεται η τοποθέτηση της θέσης ακρόασης στο κέντρο του μήκους του δωματίου και δεν πρέπει να βρίσκεται πολύ κοντά στις επιφάνειες του δωματίου.

Οι θέσεις των ηχείων πρέπει να θεωρούνται ευμετάβλητες, έτσι ώστε να μπορούν να μετακινηθούν λίγο, αν χρειαστεί, για να βελτιωθεί η ποιότητα του ήχου. Το ίδιο ισχύει και για την θέση ακρόασης. Οι μετατοπίσεις στην θέση, συμπεριλαμβανομένου του ύψους, θα επηρεάσουν την απόκριση συχνότητας και την ποιότητα του ήχου της θέσης ακρόασης.

5.10 – Προτάσεις για μελλοντική βελτίωση του δωματίου ακρόασης

5.10.1 – Πρώτες ανακλάσεις

Για μικρά δωμάτια ακρόασης, η καθυστέρηση στην περιοχή των 0 – 20msec είναι σημαντική. Το απευθείας σήμα ακολουθείται άμεσα από ανταγωνιστικές πρώτες ανακλάσεις διαφόρων εντάσεων και καθυστερήσεων, παράγοντας παραμόρφωση τύπου comb-filter. Η ηχητική στάθμη των πρώτων ανακλάσεων θα πρέπει να μειωθεί σε σχέση με το απευθείας σήμα, αλλά όχι οι καθυστερημένες ανακλάσεις. Επιτρέποντας μία καθυστερημένη ανάκλαση ρυθμισμένης στάθμης, θα επιτρέψει τον έλεγχο της ευρυχωρίας και της εικόνας του δωματίου. Επομένως, όταν σχεδιάζονται οι ακουστικές συνθήκες του δωματίου ακρόασης, οι πρώτες ανακλάσεις θα πρέπει να εξαλειφθούν, οι καθυστερημένες ανακλάσεις από το πίσω μέρος του δωματίου μπορούν στη συνέχεια να τροποποιηθούν για βέλτιστη ποιότητα ήχου.

Προτείνεται, οι πρώτες επιφάνειες που θα τροποποιήσουμε στο δωμάτιο να είναι στα σημεία των πρώτων ανακλάσεων. Τα σημεία των πρώτων ανακλάσεων είναι τα σημεία στους πλαϊνούς τοίχους, στο πάτωμα και στην οροφή όπου οι ανακλάσεις επιστρέφουν στη θέση ακρόασης. Οι ανακλάσεις αυτές είναι σύντομες χρονικά και δυνατές σε στάθμη, ώστε να προκαλούν πολλές μεταβολές από τις χαμηλομεσαίες έως τις υψηλές συχνότητες παρουσιάζοντας ακανόνιστες αιχμές στην απόκριση και να αλλοιώνουν τις δυναμικές. Τα σημεία των πρώτων ανακλάσεων είναι εύκολο να εντοπιστούν με τη «μέθοδο του καθρέπτη» και να τροποποιηθούν με κάποια ακουστικά πάνελ στα κατάλληλα σημεία. Η ακουστική παρέμβαση θα πρέπει να επηρεάζει τις πρώτες ανακλάσεις, ακόμα και όταν κινείται ελαφρά ο ακροατής.

5.10.2 – Κατασκευή δεύτερης ηχομονωτικής πόρτας

Προτείνεται, η μελλοντική κατασκευή δεύτερης ηχομονωτικής πόρτας. Το θυρόφυλλο της οποίας να αποτελείται από μονό κέλυφος και η ένωσή του με την κάσα να γίνεται περιμετρικά με λάστιχο σε ένα επίπεδο. Η πόρτα μπορεί να τοποθετηθεί σε απόσταση 80cm από την υπάρχουσα πόρτα, από την έξω πλευρά του δωματίου. Με αυτή την κατασκευή θα υπάρξει υψηλή απομόνωση του χώρου με τον παρακείμενό του, σε περίπτωση που αυτό κριθεί απαραίτητο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλία:

- Σκαρλάτος, Δ., «Εφαρμοσμένη Ακουστική», Φιλομάθεια, Πάτρα, 2003.
- Ευθυμιάτος, Δ., «Ακουστική & Κτιριακές Εφαρμογές – Θεωρία και Πράξη», Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2007.
- Everest, F. A. & Pohlmann, K. C., “Master Handbook of Acoustics” (fifth edition), The McGraw-Hill Companies, Inc, USA, 2009.
- Beranek, L. L. & Ver, I. L., “Noise and Vibration Control Engineering” (second edition), John Wiley & Sons, Inc, USA, 2006.
- Gervais, R., “Home Recording Studio: Build It Like the Pros”, Thomson Course Technology PTR, USA, 2006.

Πανεπιστημικές Σημειώσεις:

- Κουζούπης, Σ., Σηφάκης, Μ., «Εφαρμοσμένη Ακουστική ΙΙ Σημειώσεις Εργαστηριακών Ασκήσεων», ΑΤΕΙ Κρήτης, παράρτημα Ρεθύμνου, τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ρέθυμνο, 2008.
- Πασχαλίδου, Σ., «Εφαρμοσμένη Ακουστική Ι Σημειώσεις Εργαστηριακών Ασκήσεων», ΑΤΕΙ Κρήτης, παράρτημα Ρεθύμνου, τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ρέθυμνο, 2007.
- Σηφάκης, Μ., «Εφαρμοσμένη Ακουστική Ι Σημειώσεις Θεωρίας», ΑΤΕΙ Κρήτης, παράρτημα Ρεθύμνου, τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ρέθυμνο, 2007.
- Κορωναίος, Α., Πουλάκος, Γ., «Τεχνικά Υλικά» (Τόμος 1,2,3,4), Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2006.

Πτυχιακές Εργασίες:

- Κισσουράς, Α., Τσαμπάσης, Ν., Ιωαννίδης, Σ., «Ακουστική και σχεδιαστικές αρχές ηχογραφικών κέντρων», ΑΤΕΙ Κρήτης, παράρτημα Ρεθύμνου, τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ρέθυμνο, 2009.
- Κούρκουλου, Ε., «Γενική μελέτη, με έμφαση στην ακουστική, για την κατασκευή φωνητικού θαλάμου (Vocal Booth) στο χώρο του Εργαστηρίου Ηχοληψίας Ι (Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής)», ΑΤΕΙ Κρήτης, παράρτημα Ρεθύμνου, τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ρέθυμνο, 2010.
- Τσομάκου, Α., «Ακουστική μελέτη μικρών δωματίων ακρόασης», ΑΤΕΙ Κρήτης, παράρτημα Ρεθύμνου, τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ρέθυμνο, 2008.
- Παπαρίδου, Ε., «Ηχομόνωση & Τεχνολογία Υλικών», ΑΤΕΙ Κρήτης, παράρτημα Ρεθύμνου, τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ρέθυμνο, 2010.
- Μητράκης, Μ., «Ακουστική μελέτη και βελτίωση του control room του studio ηχογραφήσεων στο ΑΤΕΙ Ρεθύμνου», ΑΤΕΙ Κρήτης, παράρτημα Ρεθύμνου, τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ρέθυμνο, 2011.

Διαδίκτυο:

- Knauf, «Συστήματα ξηράς δόμησης: Τεχνικός οδηγός κατασκευών με γυψοσανίδες», www.knauf.gr, 07/2013.
- Knaufinsulation, «Μόνωση Υψηλής Ποιότητας: Κατάλογος Προϊόντων Πετροβάμβακα – Φυσικού Ορυκτοβάμβακα», www.knaufinsulation.gr, 10/2010.
- Knauf, «W61 Ξηρά επιχρίσματα και επενδύσεις Knauf», www.knauf.gr, 11/2010.
- Knauf, «W11 Τοιχοποιίες μεταλλικού σκελετού Knauf», www.knauf.gr, 06/2012.
- Knauf, «W11 Συστήματα εσωτερικής τοιχοποιίας Knauf», www.knauf.gr, 09/2011.
- Knauf, «D11 Οροφές με γυψοσανίδες Knauf», www.knauf.gr, 09/2011.
- Schubert, G., «Ηχομόνωση θυρών», <http://www.amds.gr/a7.aspx>, 09/2011.
- <http://gikacoustics.co.uk>
- <http://www.bobgolds.com>