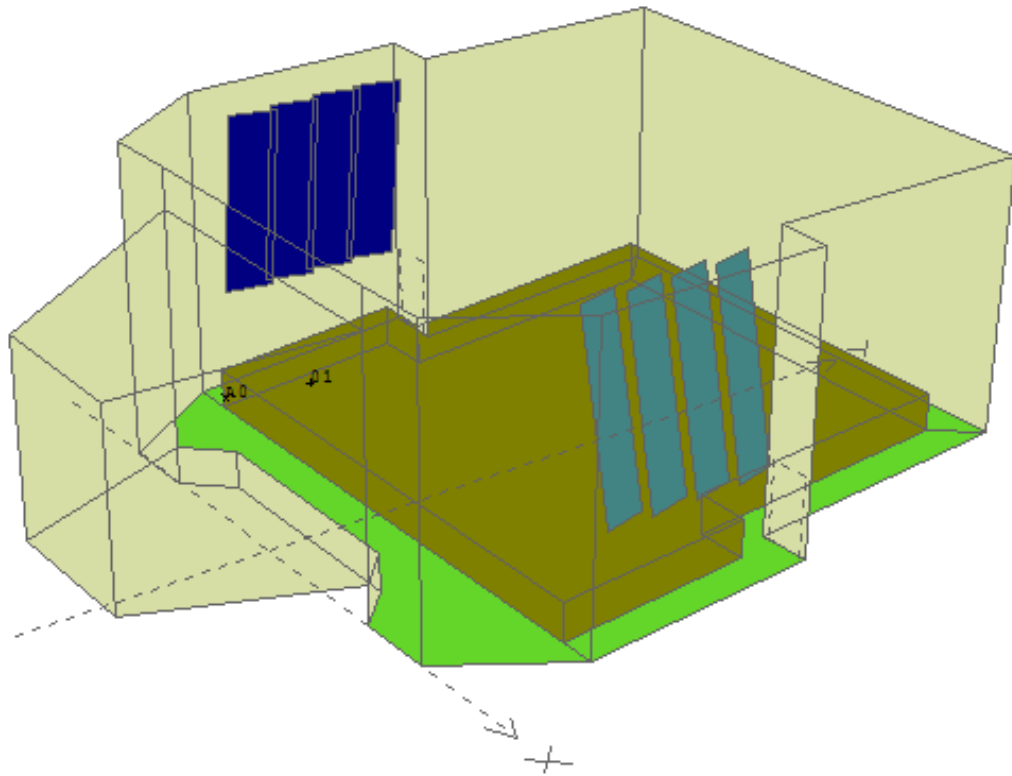


Τ.Ε.Ι. ΚΡΗΤΗΣ – ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΡΕΘΥΜΝΟΥ
ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ



ΘΕΜΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:

“ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΧΟΛΙΚΩΝ ΧΩΡΩΝ”

ΕΚΠΟΝΗΣΗ:

ΔΡΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ Α.Μ. 797

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΙΔΗΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ Α.Μ. 724

ΦΟΥΣΤΑΛΙΕΡΑΚΗΣ ΜΑΝΟΣ Α.Μ. 697

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΜΠΡΕΖΑΣ ΣΠΥΡΟΣ

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον κ. Μπρέζα Σπύρο για την πολύτιμη βοήθειά του και καθοδήγηση για την πραγματοποίηση αυτής της πτυχιακής. Επίσης του διευθυντές του 2^{ου} γυμνασίου Ρεθύμνου, 15^{ου} Δημοτικού Ρεθύμνου και του γυμνασίου Ατσιπόπουλου Ρεθύμνου κ. Χαλκιαδάκη, κ. Δασκαλόπουλο και κα. Καλαντζή αντίστοιχα, για τη φιλοξενεία και την ευγενή παραχώρηση των σχολικών αιθουσών.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία έχει ως κύριο αντικείμενο την ακουστική μελέτη τριών μεγάλων κλειστών χώρων σε διαφορετικά σχολικά συγκροτήματα. Πρόκειται για το γυμναστήριο του 2ου γυμνασίου-λυκείου Ρεθύμνου που προορίζεται για πολλαπλές χρήσεις, το αμφιθέατρο του 15ου δημοτικού σχολείου Ρεθύμνου που είναι ο χώρος εκδηλώσεων του σχολείου και τέλος, το γυμνάσιου της περιοχής Ατσιπόπουλου που επίσης χρησιμοποιείται για μουσικές εκδηλώσεις και ομιλία.

Η εργασία χωρίζεται σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος γίνεται η θεωρητική προσέγγιση της εργασίας. Μελετάται ο ήχος, ο τρόπος διάδοσής του σε κλειστό χώρο και τα φαινόμενα που δημιουργούνται μέσα σε αυτόν. Έπειτα, αναφέρονται οι προϋποθέσεις ενός ακουστικά ποιοτικού χώρου και τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση αυτού.

Στο δεύτερο μέρος βρίσκεται το πρακτικό μέρος της εργασίας. Με τη βοήθεια του ειδικού λογισμικού Catt-Acoustic παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις των χώρων. Στη συνέχεια, αναλύονται οι τιμές διάφορων ακουστικών δεικτών πριν και μετά τη θεωρητική τροποποίηση των χώρων. Στο τέλος κάθε μελέτης προτείνονται όσο το δυνατόν οικονομικές λύσεις ανάλογα πάντα με το επιθυμητό αποτέλεσμα.

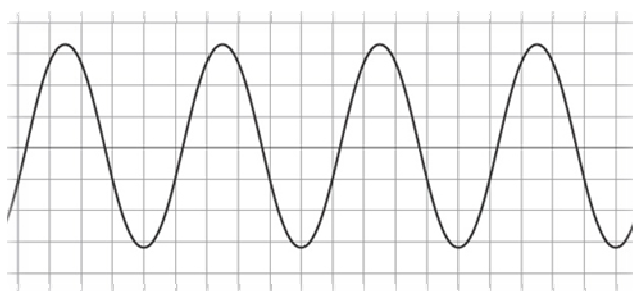
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	Ο ΗΧΟΣ	6
1.1	ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΤΑΣΙΜΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ	8
1.2	ΗΧΗΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΜΕΣ	10
1.3	ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ ΚΑΙ ΦΑΣΜΑ	12
1.4	ΦΙΑΤΡΑ	12
2	ΥΛΙΚΑ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΧΩΡΟΥ	15
2.1	ΠΟΡΩΔΗ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	15
2.2	ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΑ ΤΥΠΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ	16
2.3	ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΕΣ	17
2.4	ΔΙΑΤΡΗΤΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ	18
2.5	ΕΝΕΡΓΟΙ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΕΣ	19
2.6	ΔΙΑΧΥΤΕΣ	19
3	ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΚΛΕΙΣΤΩΝ ΧΩΡΩΝ	21
3.1	ΑΝΤΗΧΗΣΗ	23
3.2	ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ	24
3.2.1	ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΠΑΛΜΟΥ	26
3.2.2	ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΗΔΕΝΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΠΗΓΗΣ	27
3.2.3	ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑΣ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ (MLS)	28
3.3	ΗΧΩ ΚΑΙ ΠΟΛΛΑΠΛΗ ΗΧΩ	30
3.4	ΘΟΡΥΒΟΣ ΒΑΘΟΥΣ	32
3.5	ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΗΑΑΣ (PRECEDENCE EFFECT)	34
4	ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ	35
5	ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ	40
5.1	CATT-ACOUSTIC	40
5.2	MLSSA	44

6	ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ 2^ο ΓΥΜΝΑΣΙΟ – ΛΥΚΕΙΟ ΡΕΘΥΜΝΟΥ	46
	6.1 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΧΩΡΟΥ	46
	6.2 ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΚΑΙ ΠΡΟΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΥΤΩΝ	58
7	15^ο ΔΗΜΟΤΙΚΟ ΣΧΟΛΕΙΟ ΡΕΘΥΜΝΟΥ	59
	7.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΧΩΡΟΥ	60
	7.2 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΗΧΕΙΩΝ	69
	7.3 ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ	70
	7.4 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΓΥΨΟΣΑΝΙΔΩΝ	71
	7.5 ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΑΚΛΑΣΕΩΝ	73
	7.6 ΑΝΑΚΛΑΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΠΙΣΩ ΧΩΡΟ	75
	7.7 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΠΡΟΣΘΕΤΩΝ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ	79
	7.8 ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΟΙ ΧΡΟΝΟΙ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ	81
	7.9 ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΧΩΡΟΥ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ	87
	7.10 ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΕΝΤΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΟΣΤΟΥΣ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ	89
8	ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ ΕΚΔΗΛΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΓΥΜΝΑΣΙΟΥ ΑΤΣΙΠΟΠΟΥΛΟΥ	92
	8.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΧΩΡΟΥ	93
	8.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΠΟΣΟΣΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ	94
	8.3 ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΧΩΡΟΥ	98
	8.4 ΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	106
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	107

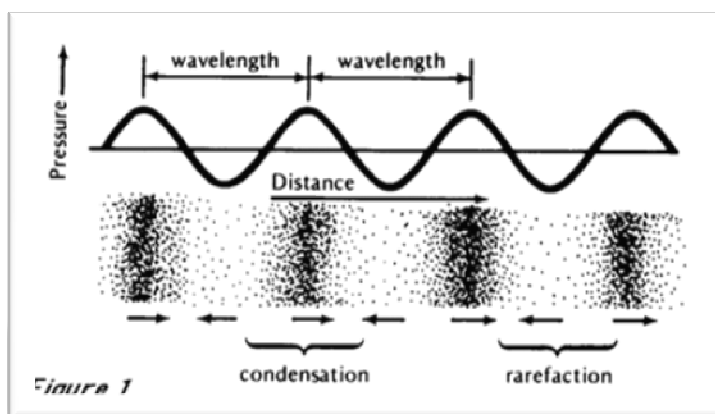
1. Ο ΗΧΟΣ

Ο ήχος είναι μία εναλλαγή της πίεσης, της μετατόπισης των μορίων ή της ταχύτητας των μορίων ενός ελαστικού σώματος και κατά συνέπεια είναι η αίσθηση η οποία δημιουργείται από το ακουστικό μας όργανο, το αυτί, λαμβάνοντας τις εναλλαγές αυτές. Ο πιο απλός ήχος είναι αυτός ο οποίος δημιουργείται από ένα ημίτονο το οποίο παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα 1.1 όπου βλέπουμε τις εναλλαγές αυτές της πίεσης.



Σχήμα 1.1. Μία σταθερή εναλλαγή της πίεσης δημιουργεί ήχο.

Μία τοπική μετατόπιση των μορίων του μέσου παράγει μία τοπική συμπίεση η οποία ακολουθείται από μία τοπική αποσυμπίεση - αραιώση η οποία με τη σειρά της αμέσως ακολουθείται από μία άλλη τοπική συμπίεση κ.ο.κ..



Σχήμα 1.2. Οι εναλλαγές της πίεσης προκαλούν πυκνώματα και αραιώματα στο μέσο.

Από τις παραπάνω ιδιότητες του ήχου καταλήγουμε σε κάποιους ορισμούς.

- Περιοδική Ποσότητα. Μία περιοδική ποσότητα είναι μία ταλαντευόμενη ποσότητα της οποίας οι τιμές επαναλαμβάνονται για κάθε αύξηση της ανεξάρτητης μεταβλητής.
- Κύκλος. Ο κύκλος είναι ένα σύνολο από επαναλαμβανόμενες τιμές μίας περιοδικής ποσότητας.
- Περίοδος. Η περίοδος είναι ο χρόνος που χρειάζεται έτσι ώστε να ολοκληρωθεί ένας κύκλος μίας περιοδικής ποσότητας.
- Συχνότητα. Η συχνότητα ορίζεται ως ο αριθμός των κύκλων που λαμβάνονται-δημιουργούνται ανά μονάδα του χρόνου.

Οποιαδήποτε ταλάντωση που αποτελείται από τα παραπάνω στοιχεία αναλύεται σε μία κυματική εξίσωση η οποία έχει τη μορφή:

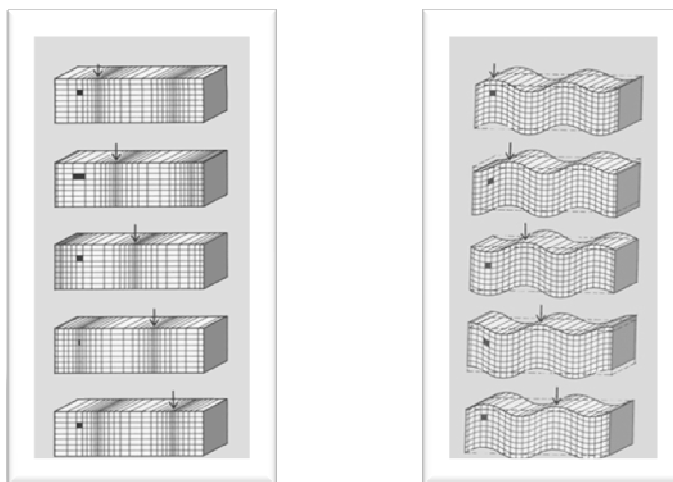
$$s = s_0 \cos 2\pi f(t - x/c) \quad [1.1]$$

Όπου s το πλάτος της ταλάντωσης κάθε χρονική στιγμή, s_0 η τιμή της μέγιστης απομάκρυνσης από τη θέση ισορροπίας, f η συχνότητα της ταλάντωσης, t η χρονική στιγμή και c η ταχύτητα του ήχου.

Η μελέτη του ήχου επικεντρώνεται στη μελέτη της κίνησης του ηχητικού κύματος. Πρέπει να είναι κατανοητό ότι η κίνηση του κύματος είναι διαφορετική από αυτή των μεμονωμένων μορίων. Έτσι ανάλογα με την ταχύτητα διάδοσης και τον τρόπο δόνησης-κίνησης των μεμονωμένων μορίων του μέσου ορίζουμε δύο είδη κυμάτων, τα διαμήκη κύματα και τα εγκάρσια κύματα.

Στα διαμήκη κύματα τα μόρια της ύλης δονούνται παράλληλα προς τη διεύθυνση διάδοσης δημιουργώντας έτσι πυκνώματα και αραιώματα.

Στα εγκάρσια κύματα τα μόρια της ύλης δονούνται κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης δημιουργώντας όρη και κοιλίες.



Σχήμα 1.3. Διαμήκη και Εγκάρσια κύματα.

Γενικότερα ο ήχος διαδίδεται με διαμήκη κύματα καθώς η κίνηση κάποιου δονούμενου υλικού δημιουργεί πυκνώματα και αραιώματα του μέσου-αέρα τα οποία κινούνται στην ίδια κατεύθυνση με αυτή της διάδοσης του κύματος.

Η ισοδυναμία μεταξύ των ηχητικών και φωτεινών ακτινών στηρίζει τη γεωμετρική θεώρηση των ηχητικών κυμάτων. Αυτή η ιδιότητα του ήχου του δίνει τη δυνατότητα να ανακλάται να διαχέεται και να διαδίδεται μέσω σχεδόν όλων των υλικών.

Η ανάκλαση – διάχυση του ήχου είναι ένα πολύ σημαντικό κομμάτι του ήχου, καθώς είναι ένα μεγάλο και βασικό κομμάτι της ακουστικής. Όταν ένα ηχητικό κύμα προσπίπτει σε μία επιφάνεια, τμήμα της ενέργειας μεταδίδεται δια μέσου της επιφάνειας, τμήμα της απορροφάται και ανακλάται. Μετά από κάθε ανάκλαση η ενέργεια του κύματος μειώνεται. Οι ισχυρές ανακλάσεις του ηχητικού κύματος ανάμεσα σε δύο ή παραπάνω τοίχους δημιουργούν στάσιμα κύματα σε ένα χώρο.

Γενικά στάσιμο κύμα εμφανίζεται όταν το μήκος κύματος μία συχνότητας είναι πολλαπλάσιο κάποιας απόστασης μέσα στο χώρο, είτε αυτή είναι ανάμεσα σε δύο τοίχους, είτε σε παραπάνω.

1.1 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΤΑΣΙΜΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

Με την εφαρμογή των αρχών της ακουστικής, τα στάσιμα κύματα:

- Δεν ανακλώνται σε όλους τους τοίχους με την ίδια πιθανότητα. Αντιθέτως, κινούνται μεταξύ κάποιων συγκεκριμένων από αυτούς.
- Δεν προσπίπτουν σε αυτούς σε τυχαίες γωνίες. Αντιθέτως, συγκεκριμένες γωνίες εμπλέκονται στο σχηματισμό των στάσιμων κυμάτων.
- Ως συνέπεια των παραπάνω, τα στάσιμα κύματα απορροφώνται εν γένει με διαφορετικό ρυθμό από τα κύματα των υψηλότερων συχνοτήτων στα οποία ισχύουν οι αρχές της στατιστικής ακουστικής.
- Είναι απαραίτητη η επιστροφή του κύματος σε έναν αρχικό τοίχο, δηλαδή η διάδοση του κύματος σε κάποια κλειστή κυκλική διαδρομή, μήκους πολλαπλάσιου του μισού μήκους κύματος.

Οι συχνότητες εμφάνισης συντονισμών καθορίζονται από τη γεωμετρία του χώρου.

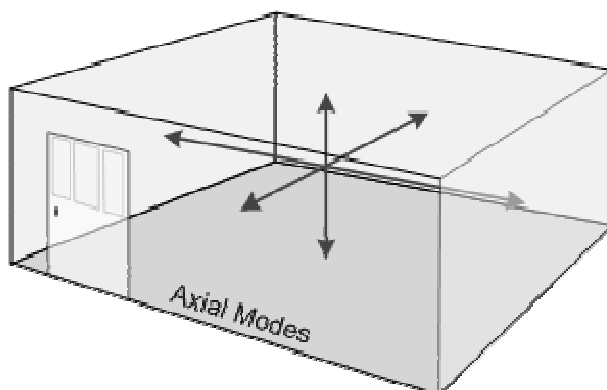
Σε δωμάτια απλού γεωμετρικού σχήματος μπορούμε συχνά να εξάγουμε μια αναλυτική σχέση για τις συχνότητες εμφάνισης συντονισμού.

Στην περίπτωση ενός ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου χώρου οι συχνότητες εμφάνισης στάσιμων κυμάτων δίνονται από την παρακάτω σχέση:

$$f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \quad [1.2]$$

Υπάρχουν τρεις τρόποι δόνησης οι οποίοι εκπληρώνουν τη συνθήκη του ακέραιου πολλαπλάσιου του μισού μήκους κύματος για διαφορετικές συχνότητες από την ανάκλαση του ήχου σε διαφορετικό πλήθος τοίχων. Και αυτοί είναι οι παρακάτω:

Οι αξονικοί τρόποι δόνησης δημιουργούνται ανάμεσα σε δύο παράλληλους τοίχους εάν το μήκος κύματος μίας συγκεκριμένης συχνότητας είναι πολλαπλάσιο της μεταξύ τους απόστασης.

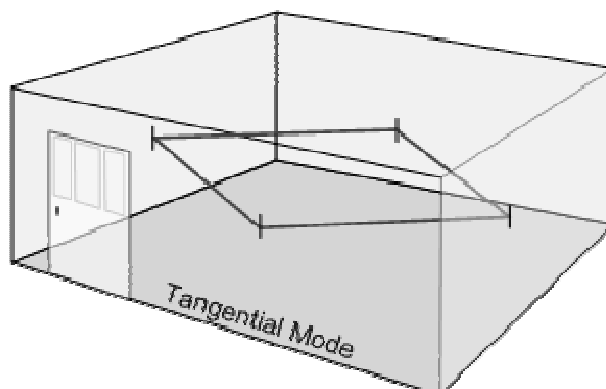


Σχήμα 1.1.1. Αξονικοί τρόποι δόνησης.

Εμφανίζονται λόγω της δημιουργίας στάσιμου κύματος σε μία διάσταση από τις τρεις, δηλαδή για έναν από τους παρακάτω τρόπους:

$$(n_x:0:0) \quad (0:n_y:0) \quad (0:0:n_z)$$

Οι εφαπτομενικοί τρόποι δόνησης εμφανίζονται όταν έχουμε ανάκλαση του ήχου και δημιουργία στάσιμων κυμάτων ανάμεσα σε τέσσερις τοίχους του δωματίου. Όταν ένα ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος του ήχου χωρά και στις δύο διαστάσεις.

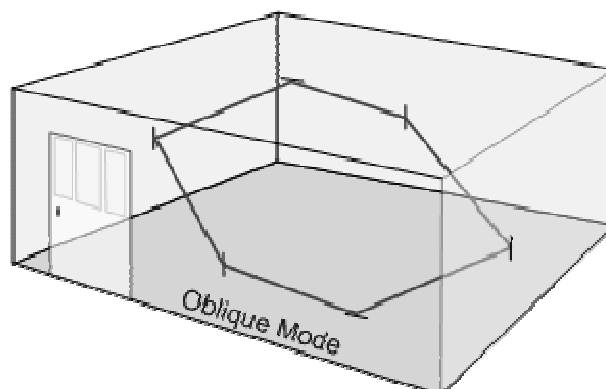


Σχήμα 1.1.2. Εφαπτομενικοί τρόποι δόνησης.

Αυτή η περίπτωση αντιστοιχεί σε κάποιον από τους παρακάτω τρόπους:

$$(n_x: n_y:0) \quad (0:n_y: n_z) \quad (n_x:0:n_z)$$

Τέλος, οι πλάγιοι τρόποι δόνησης εμφανίζονται όταν έχουμε ανάκλαση του ήχου και δημιουργία στάσιμων κυμάτων ανάμεσα και στους έξι τοίχους του δωματίου.



Σχήμα 1.1.3. Πλάγιοι τρόποι δόνησης.

Αυτή η περίπτωση αντιστοιχεί σε κάποιον από τους παρακάτω τρόπους:

$$(n_x: n_y: n_z)$$

Τα στάσιμα κύματα δημιουργούν πολύ έντονα φαινόμενα συντονισμού του ήχου, δημιουργώντας έτσι εμφανή συνήθως προβλήματα στη διάδοση και στην απόσβεση της ηχητικής στάθμης των χαμηλών συχνοτήτων σε ένα χώρο, γι' αυτό είναι σημαντική η αντιμετώπισή τους κατά την ακουστική επίβλεψη ενός χώρου.

1.2 ΗΧΗΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΜΕΣ

Για την καλύτερη αντίληψη και μέτρηση των ηχητικών φαινομένων σε ένα χώρο χρησιμοποιούμε ως μονάδα μέτρησης το Decibel (dB). Το Decibel είναι μία λογαριθμική μονάδα μέτρησης η οποία μας βοηθάει να εξετάζουμε και να μετράμε μεγέθη με μεγάλο εύρος τιμών. Στην ακουστική το εύρος των μεγεθών είναι πολύ μεγάλο άρα η χρήση λογαριθμικών κλιμάκων είναι πιο εύχρηστη. Ουσιαστικά το Decibel είναι το αποτέλεσμα ενός λόγου δύο τιμών.

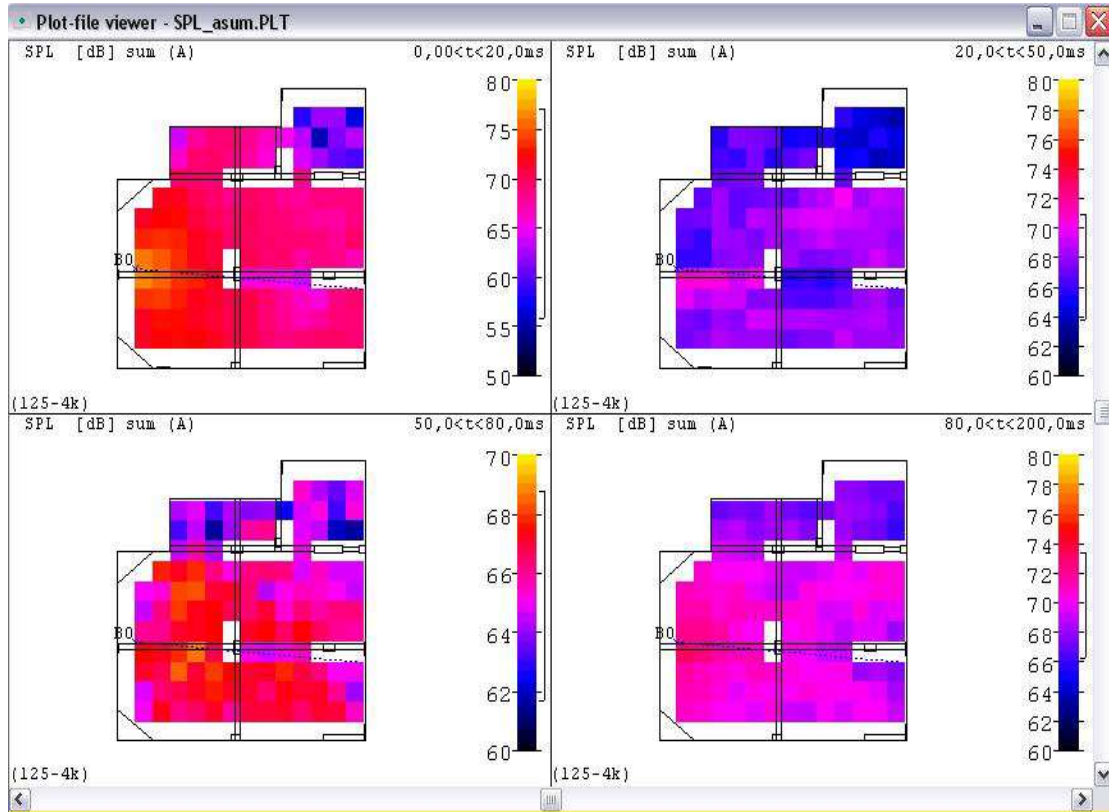
Στην ακουστική τρία είδη στάθμεων χρησιμοποιούνται ευρύτερα. Η Στάθμη πίεσης ήχου, η Στάθμη έντασης ήχου και η Στάθμη ισχύος ήχου.

Στάθμη πίεσης ήχου

Η στάθμη ηχητικής πίεσης συμβολίζεται σαν L_p , μετριέται σε dB_{spl} ή $dB(re\ 20\mu Pa)$ και είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη και αναφερόμενη μονάδα μέτρησης της ηχητικής πίεσης. Για τον υπολογισμό της στάθμης ηχητικής πίεσης χρειαζόμαστε μία τιμή αναφοράς για την πίεση. Αυτή ισούται με $P_{ref} = 20\mu Pa$ και η οποία είναι η ελάχιστη ακουστή ηχητική πίεση για έναν άνθρωπο. Υπολογίζεται από τον τύπο:

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_{ref}^2} \quad [1.3]$$

Η στάθμη ηχητικής πίεσης μας βοηθά να ξέρουμε το επίπεδο που ακούγεται οποιοδήποτε ηχητικό γεγονός σε οποιοδήποτε σημείο μετρηθεί. Μπορεί να παρουσιαστεί σε διαγράμματα όπως το παρακάτω σχήμα 1.2.1., τα οποία είναι πολύ χρήσιμα για τον ηχητικό έλεγχο του χώρου μας.



Σχήμα 1.2.1. Κατανομή ηχητικής στάθμης πίεσης για ένα χώρο σε διάφορες χρονικές στιγμές.

Στάθμη έντασης ήχου

Η στάθμη έντασης ήχου συμβολίζεται σαν L_i , μετριέται σε dB_{SIL} και έχει τιμή αναφοράς $I_{\text{ref}} = 10^{-12} \text{ W/m}^2$. Υπολογίζεται από τον τύπο:

$$L_i = 10 \log \frac{I}{I_{\text{ref}}} \quad [1.4]$$

Στάθμη ισχύος ήχου

Η στάθμη ισχύος ήχου συμβολίζεται ως L_w μετριέται σε dB_{SWL} και έχει τιμή αναφοράς $W_{\text{ref}} = 10^{-12} \text{ W}$. υπολογίζεται από τον τύπο:

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_{\text{ref}}} \quad [1.5]$$

1.3 ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ ΚΑΙ ΦΑΣΜΑ

Οποιοδήποτε ηχητικό κύμα μπορεί να περιγραφεί με δύο τρόπους. Ανάλογα με το πλάτος της πίεσης ως προς το χρόνο, ο οποίος λαμβάνεται με έναν παλμογράφο και ανάλογα με το πλάτος της πίεσης ως προς τη συχνότητα, ο οποίος λαμβάνεται με έναν αναλυτή φάσματος.

Σύμφωνα με το θεώρημα Fourier, κάθε σύνθετη κυματομορφή μπορεί να αναλυθεί σε μια σειρά από ημίτονα με συγκεκριμένες συχνότητες, πλάτη και φάσεις. Πάνω λοιπόν σε αυτή τη θεωρία βασίζεται η ισοδυναμία των δύο περιγραφών.

ΦΑΣΜΑΤΙΚΟΙ ΑΝΑΛΥΤΕΣ

Η διαδικασία της μεταφοράς από τη χρονική στη συχνοτική απεικόνιση του ηχητικού κύματος ονομάζεται φασματική ανάλυση του ήχου. Οι συσκευές με τις οποίες γίνεται αυτή η μεταφορά λέγονται φασματικοί αναλυτές και το αποτέλεσμά τους είναι το φάσμα.

Κατηγορίες φασματικών αναλυτών

Υπάρχουν δύο κατηγορίες φασματικών αναλυτών: οι ψηφιακοί (FFT) και οι αναλογικοί – πραγματικού χρόνου.

Στην FFT ανάλυση το σύστημα λαμβάνει δείγματα του κύματος ανά τακτά χρονικά διαστήματα, με τα οποία τροφοδοτεί τον αλγόριθμο του FFT.

Στην περίπτωση των φασματικών αναλυτών πραγματικού χρόνου το σήμα οδηγείται, παράλληλα, μέσα από φίλτρα τα οποία επιτρέπουν μόνο σε συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων να περάσουν κάθε φορά. Έτσι λαμβάνουμε ένα φάσμα με τη μορφή ράβδων. Κάθε ράβδος αντιστοιχεί σε μία ζώνη συχνοτήτων, όπου το πλάτος της είναι ίσο με το εύρος της ζώνης, ενώ το ύψος της είναι ίσο με την ηχητική στάθμη που αντιστοιχεί στη ζώνη.

1.4 ΦΙΛΤΡΑ

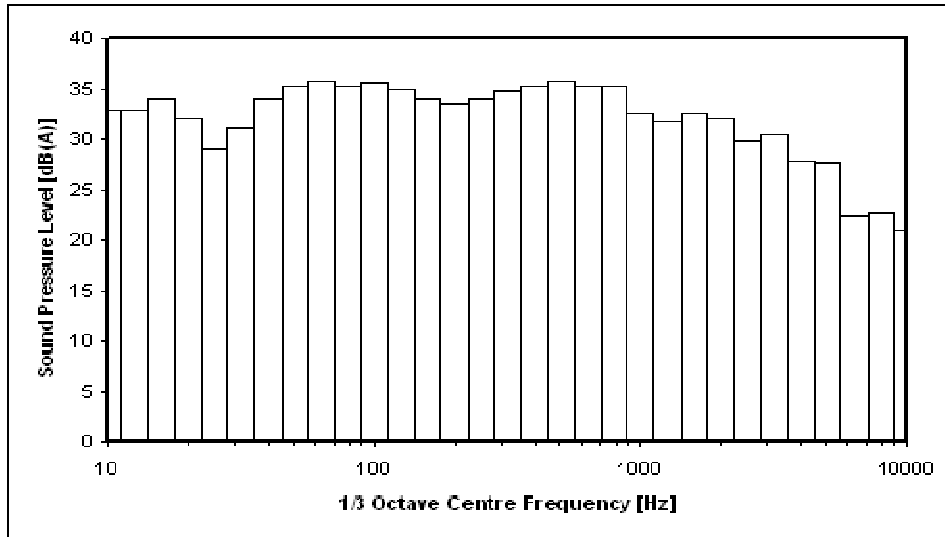
Ζώνες συχνοτήτων

Υπάρχουν δύο τύποι φίλτρων που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε στη φασματική ανάλυση:

- Σταθερού εύρους ζώνης.
- Σταθερού ποσοστιαίου εύρους ζώνης.

Στα φίλτρα σταθερού εύρους ζώνης αυτό που παραμένει σταθερό μεταξύ τους είναι το εύρος της ζώνης τους. Δηλαδή η διαφορά των ακριανών συχνοτήτων που την ορίζουν.

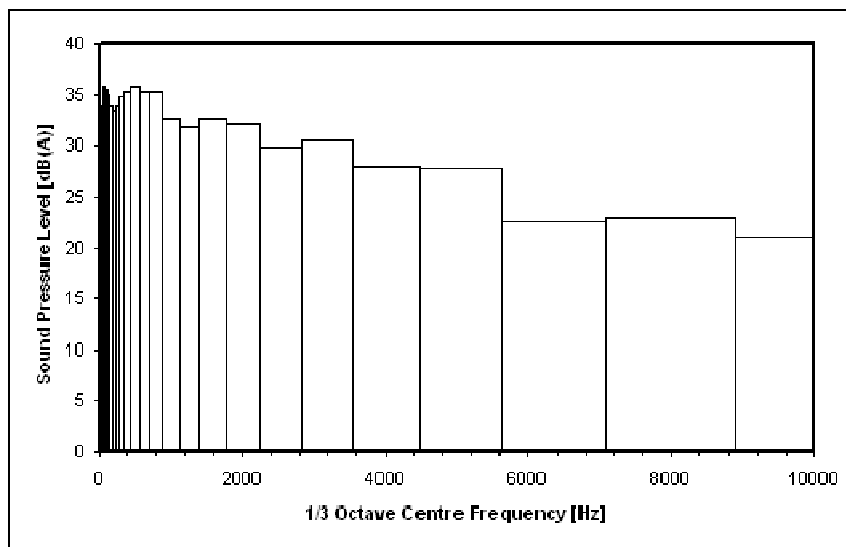
$$f_2 - f_1 = \text{σταθερό}$$



Σχήμα 1.4.1. Φίλτρα σταθερού εύρους ζώνης.

Στα φίλτρα σταθερού ποσοστιαίου εύρους ζώνης αυτό που παραμένει σταθερό είναι το ποσοστό της κεντρικής συχνότητας που αντιπροσωπεύει το εύρος ζώνης, δηλαδή ο λόγος των πλευρικών συχνοτήτων που την ορίζουν.

$$\frac{f_2}{f_1} = \text{σταθερό}$$



Σχήμα 1.4.2. Φίλτρα σταθερού ποσοστιαίου εύρους ζώνης.

Ανάλογα με την κάθε περίπτωση διαλέγουμε και τον κατάλληλο τύπο φίλτρου. Συνήθως τα φίλτρα σταθερού εύρους ζώνης χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που θέλουμε μεγαλύτερη λεπτομέρεια στις φασματικές αλλαγές π.χ. στις μετρήσεις μηχανικών δονήσεων. Ενώ τα φίλτρα σταθερού ποσοστιαίου εύρους ζώνης, εφόσον αναπαριστούν τη συμπεριφορά του ανθρώπινου αυτιού, χρησιμοποιούνται ευρέως σε όλες τις εφαρμογές.

Εύρος Ζώνης

Η επιλογή του εύρους ζώνης γίνεται ανάλογα με την επιθυμητή λεπτομέρεια στις μετρήσεις. Οι πιο διαδεδομένες ζώνες είναι οι οκταβικές (1/oct) και οι τρίτο-οκταβικές (1/3oct). Βέβαια η ανάλυση μπορεί να γίνει σε οποιαδήποτε n-οκταβική (1/n oct) βάσει του τύπου [1.6]:

$$\frac{f_2}{f_1} = 2^{1/n} = \text{σταθερό} \quad [1.6]$$

Κεντρική Συχνότητα

- Για τις ζώνες σταθερού εύρους, η κεντρική συχνότητα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$f_0 = \frac{f_1 + f_2}{2} \quad [1.7]$$

- Ενώ για τις ζώνες σταθερού εύρους ζώνης η κεντρική συχνότητα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$f_0 = \sqrt{f_1 \cdot f_2} \quad [1.8]$$

- Η συνολική στάθμη μπορεί να υπολογιστεί προσθέτοντας λογαριθμικά τις στάθμες των επιμέρους ζωνών.

$$L_{P(\text{ολ})} = 10 \cdot \log (10^{L_{pf1}/10} + 10^{L_{pf2}/10} + \dots) \quad [1.9]$$

2. ΥΛΙΚΑ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΧΩΡΩΝ

Πολύ σπουδαίο ρόλο στην ακουστική χώρων παίζει η ηχητική απορρόφηση των τοιχωμάτων τα οποία περιβάλλουν το χώρο αυτό. Δύο είναι τα κύρια φαινόμενα στα οποία οφείλεται η απορρόφηση αυτή.

Κατά το πρώτο φαινόμενο, το ηχητικό κύμα εισχωρεί στο υλικό που είναι συνήθως πορώδες, ως αποτέλεσμα το μέσο διάδοσης (αέρας) κατά την εκτέλεση των ταλαντώσεων, λόγω τριβών με το υλικό, χάνει ενέργεια. Έχουμε μετατροπή ηχητικής ενέργειας σε θερμική. (*«Εφαρμοσμένη Ακουστική» Δ. Σκαρλάτος σελ.129*)

Κατά το δεύτερο φαινόμενο, το ηχητικό κύμα διεγείρει προς ταλάντωση τα μόρια του απορροφητικού υλικού, οπότε η ενέργεια του ηχητικού κύματος μειώνεται. (*«Εφαρμοσμένη Ακουστική» Δ. Σκαρλάτος σελ.129*)

2.1 ΠΟΡΩΔΗ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Τα πορώδη απορροφητικά υλικά βασίζονται στο πρώτο φαινόμενο της ηχητικής απορρόφησης. Όπως προηγουμένως αναφέρθηκε, η ηχητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική καθώς το ηχητικό κύμα έρχεται σε επαφή με το υλικό. Σύμφωνα με μελέτες, προκύπτει ότι όσο λιγότερο διαφορετική είναι η εμπέδηση ανάμεσα στον αέρα και το υλικό, τόσο λιγότερο ανακλάται το ηχητικό κύμα και έχουμε μεγαλύτερη διάδοση του κύματος στο υλικό, άρα μεγαλύτερη απορρόφηση.

Για να επιτευχθεί αυτό, θα πρέπει η πυκνότητα των απορροφητικών υλικών να είναι μικρή. Βέβαια, αυτό αποτελεί το κύριο χαρακτηριστικό τους. «Στην πράξη η πυκνότητα ενός καλού απορροφητή είναι 2-3 φορές μεγαλύτερη από αυτή του αέρα. Επιπροσθέτως, η διάμετρος των πόρων θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το μήκος κύματος του ήχου και για το λόγο αυτό οι πορώδεις απορροφητές έχουν μεγαλύτερη απόδοση σε υψηλές συχνότητες». [11]

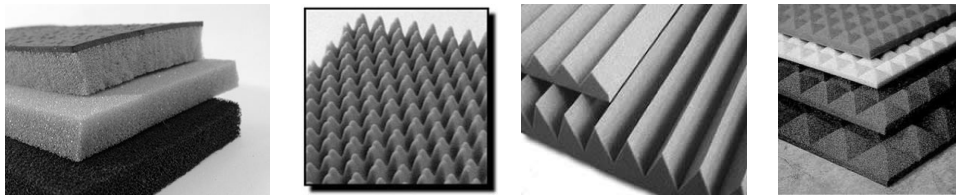
Τα πορώδη υλικά προκαλούν μεγαλύτερη απορρόφηση όταν είναι τοποθετημένα σε θέσεις όπου η ταχύτητα των σωματιδίων του ηχητικού κύματος είναι μέγιστη. Αυτό διότι στα πορώδη υλικά η απορρόφηση οφείλεται στην τριβή, η οποία είναι ανάλογη με τη δυναμική πίεση του κινούμενου αέρα.



Σχήμα 2.1.1. Μορφή πορώδους απορροφητικού υλικού.

Τα πορώδη απορροφητικά υλικά χρησιμοποιούνται σε τοιχώματα χώρων στους οποίους θέλουμε μεγάλη απορρόφηση (στούντιο ηχογραφήσεων, στούντιο ραδιοφωνικών εκπομπών κ.τ.λ.) κυρίως για τις ψηλές συχνότητες. Παρ' όλα αυτά η χρησιμοποίηση τέτοιων υλικών πρέπει να είναι προσεκτική σε χώρους εκδηλώσεων καθώς μπορεί, αν τοποθετηθούν μεγάλες ποσότητες του υλικού, να μειώσει αισθητά τη στάθμη του διαδιδόμενου ηχητικού κύματος στο χώρο.

Ανάλογα με τη συχνοτική και την ποσοτική τους απορροφητικότητα υπάρχουν αρκετά είδη πορώδων απορροφητών, μερικά από τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.



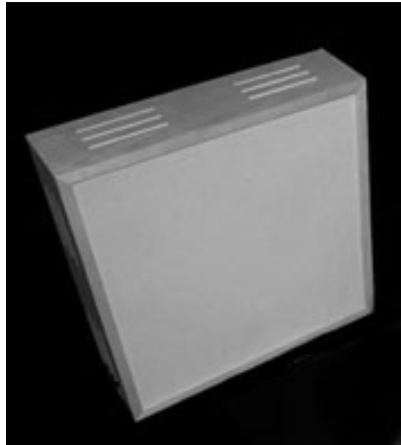
Σχήμα 2.1.2. Διάφορα είδη πορώδων απορροφητικών.

2.2 ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΑ ΤΥΠΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ

Η μορφή αυτών των ηχοαπορροφητικών υλικών περιλαμβάνει μια λεπτή μεμβράνη σε μικρή απόσταση από ένα σκληρό υλικό όπως ο τοίχος. Καθώς ο ήχος προσπίπτει στη μεμβράνη τη διεγείρει σε ταλαντώσεις. Η εσωτερική τριβή του υλικού συμβάλλει στην απώλεια της ηχητικής ενέργειας.

Τα υλικά αυτά αποδίδουν-απορροφούν καλύτερα στις χαμηλές συχνότητες και έχουν τις εξής ιδιότητες:

- Όσο πιο λεπτό το απορροφητικό, τόσο πιο εύκολα δονείται, άρα τόσο μεγαλύτερη γίνεται η απορρόφηση.
- Οι απορροφητές αυτοί είναι καλοί μεταξύ των 50-500 Hz. Σύμφωνα με έρευνες τα μέγιστα της απορρόφησης βρίσκονται κάτω από τα 300 Hz και μετακινούνται σε χαμηλότερες συχνότητες καθώς το βάρος του υλικού αυξάνεται.
- Το πλάτος του μεγίστου αυξάνεται αν πίσω από τα απορροφητικά αυτά τοποθετηθεί πορώδες υλικό.



Σχήμα 2.2.1. Μορφή απορροφητικού υλικού τύπου μεμβράνης.

2.3 ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΕΣ

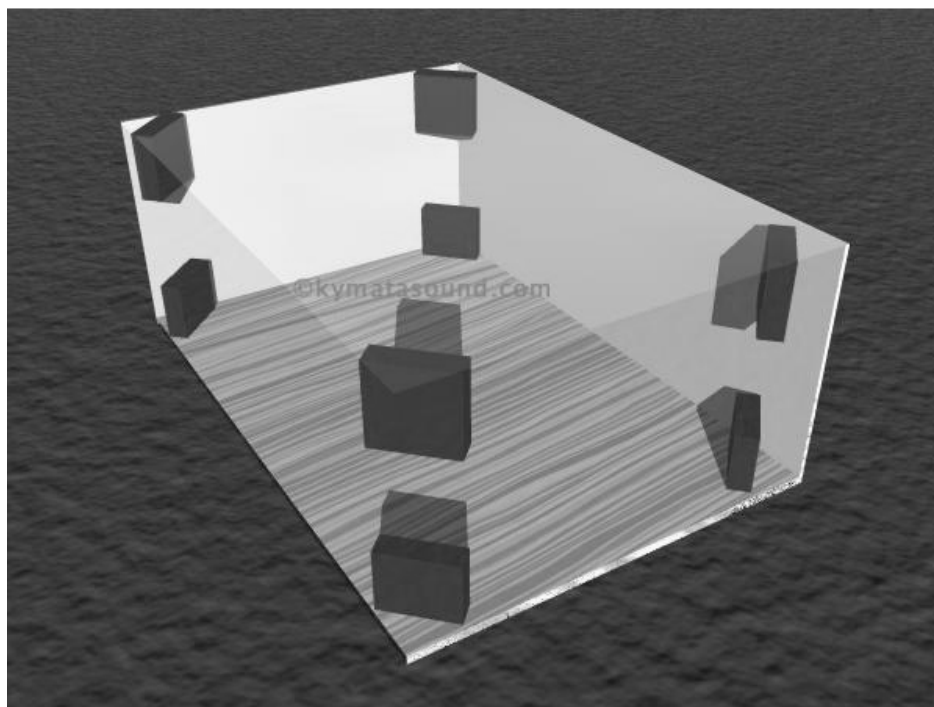
Οι συντονιστές είναι κοιλότητες οι οποίες έχουν στενό άνοιγμα. Σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας του συντονιστή, η εξωτερική ηχητική πίεση διεγείρει τη μάζα του αέρα μέσα στην κοιλότητα, οι κινήσεις του αέρα γίνονται πολύ γρήγορες όταν η συχνότητα πλησιάζει εκείνη του συντονισμού της κοιλότητας, με αποτέλεσμα να απορροφούνται μεγαλύτερες ποσότητες ενέργειας. Επομένως, ο συντονιστής είναι ικανός να απορροφά ενέργεια πολύ μεγαλύτερη από αυτή που αντιστοιχεί στην επιφάνειά του. Η απώλεια ενέργειας οφείλεται στις αποσβέσεις των ταλαντώσεων λόγω τριβών. Σύμφωνα με έρευνες, ο συντελεστής απορρόφησης των συντονιστών έχει ένα οξύ μέγιστο γύρω από τη συχνότητα συντονισμού που βρίσκεται συνήθως στις χαμηλές συχνότητες, ενώ για τις υπόλοιπες είναι σχεδόν μηδέν. Αν στο εσωτερικό των κοιλοτήτων τοποθετηθεί απορροφητικό υλικό η καμπύλη συντονισμού πλαταίνει, ενώ μειώνεται το μέγιστο.



Σχήμα 2.3.1. Συντονιστές.

Στην κατηγορία των συντονιστών ανήκουν και μερικές μασοπαγίδες (bass traps). Οι μασοπαγίδες χρησιμοποιούνται κυρίως για την εξάλειψη των στάσιμων κυμάτων σε

κλειστούς χώρους. Συνήθως η τοποθέτησή τους γίνεται στις γωνίες όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3.2., καθώς εκεί παρουσιάζονται κοιλίες των στάσιμων κυμάτων.

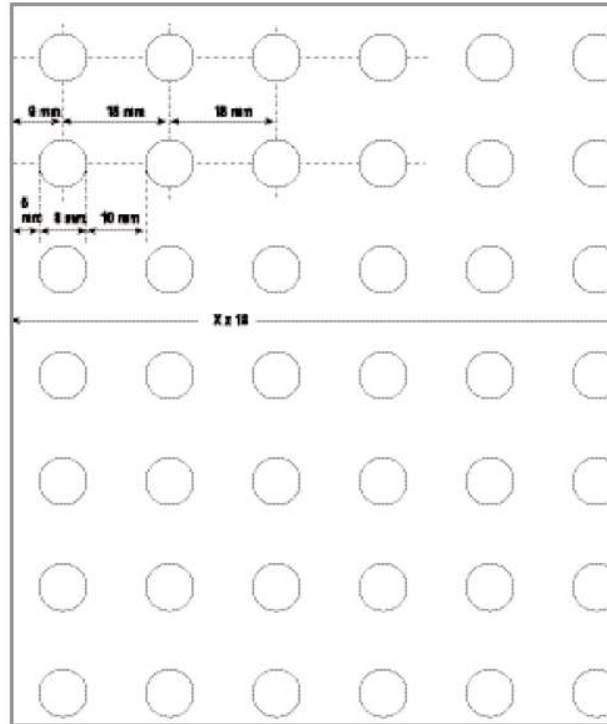


Σχήμα 2.3.2. Τοποθέτηση μασοπαγίδων στο χώρο (από www.kymatasound.com).

2.4 ΔΙΑΤΡΗΤΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ

Οι διάτρητες επιφάνειες κατασκευάζονται από διάφορα υλικά όπως το κόντρα πλακέ, λαμαρίνα κλπ. και είναι μια μορφή συντονιστών. Οι διατρήσεις αυτών των επιφανειών μπορεί να είναι κυκλικές ή να έχουν σχήμα σχισμών έτσι ώστε κάθε τρύπα να δρά σαν ο λαιμός ενός συντονιστή Helmholtz. Συχνά χρησιμοποιούνται για την απορρόφηση του ήχου σε κλειστούς ή ανοιχτούς χώρους.

«Στις διάτρητες επιφάνειες το ποσοστό διάτρησης σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να υπερβαίνει το 20% γιατί τότε η επιφάνεια είναι διαφανής ως προς τον ήχο (*«Εφαρμοσμένη Ακουστική»* Δ. Σκαρλάτος σελ.129). Η διάτρηση της κάθε επιφάνειας μπορεί να είναι συμμετρική ή τυχαία. Επίσης όταν απαιτείται η ύπαρξη μεγίστων απορρόφησης σε διαφορετικές συχνότητες, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν δύο ή παραπάνω είδη διατρήσεων σε διαφορετικές ή ακόμα και στην ίδια επιφάνεια. Πλάτυνση της καμπύλης συντονισμού προκαλείται από την επιπλέον προσθήκη απορροφητικού υλικού κάτω από τη διάτρητη επιφάνεια.



Σχήμα 2.4.1. Σχέδιο γυψοσανίδας με κυκλική διάτρηση 15% (από knauf.gr).

2.5 ΕΝΕΡΓΟΙ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΕΣ

Οι ηλεκτρονικοί ή αλλιώς ενεργοί απορροφητές χρησιμοποιούν ήχο για την ακύρωση του αρχικού. Εκπέμποντας ήχο με αντίθετη φάση από αυτήν του αρχικού πετυχαίνουν την ακύρωσή του. Κατά τη λειτουργία ενός ενεργού απορροφητή, ένα μικρόφωνο λαμβάνει το διαδιδόμενο ήχο, αναλύει και «επιλέγει» τη συχνότητα την οποία θέλουμε να ακυρώσουμε και τέλος, εκπέμπει μέσω ενός μεγαφώνου τη συχνότητα αυτή σε αντίθετη φάση από την αρχική.

Οι απορροφητές αυτού του είδους μπορούν να ακυρώσουν αν όχι μία συχνότητα, ένα πολύ μικρό συχνοτικό φάσμα κάθε φορά και το κόστος τους είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό των άλλων κατηγοριών, γι' αυτό και χρησιμοποιούνται σπάνια και μόνο σε περιπτώσεις που κάποιο άλλο είδος απορροφητών δεν μπορεί να καλύψει.

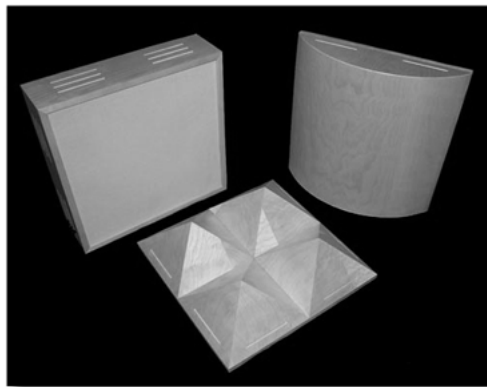
2.6 ΔΙΑΧΥΤΕΣ

Οι διαχυτές είναι διατάξεις φτιαγμένες έτσι ώστε να διαχέουν τον προσπίπτοντα σε αυτές ήχο. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε κλειστούς χώρους στους οποίους είναι αναγκαία η εξομάλυνση της κατανομής της ηχητικής ενέργειας. Επίσης χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση των στάσιμων κυμάτων σε κλειστούς χώρους.



Σχήμα 2.6.1. Είδος διαχυτή με ακανόνιστου σχήματος εξογκώματα.

Συνήθως είναι φτιαγμένοι από ξύλο. Μπορούν είτε να έχουν κοιλότητες είτε εξογκώματα. Μπορούν επίσης να είναι κάποιες απλές κυρτές ανακλαστικές επιφάνειες. Όλα εξαρτώνται από τη λειτουργία για την οποία τους χρησιμοποιούμε.



Σχήμα 2.6.2. Διάφορα είδη διαχυτών.

Οι διαχυτές που χρησιμοποιούν κοιλότητες για τη διάχυση είναι αποτελεσματικοί σε παραπάνω από μία συχνότητες, καθώς κάθε κοιλότητα έχει διαφορετικό βάθος και άρα λειτουργεί σα συντονιστής Helmholtz και διαχέει διαφορετική συχνότητα. Για τις χαμηλές συχνότητες υπάρχουν διαχυτές με μεγαλύτερες κοιλότητες, οι οποίες είναι σα σχισμές.



Σχήμα 2.6.3. Διάταξη διαχυτή με κοιλότητες.

Οι κυρτές επιφάνειες-ανακλαστήρες χρησιμοποιούνται για τη διάχυση όλου του συχνοτικού φάσματος.

3. ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΚΛΕΙΣΤΩΝ ΧΩΡΩΝ



Σχήμα 3.1. Ένα από τα μεγαλύτερα ανηχοϊκά δωμάτια του κόσμου που αποτελεί τον πυρήνα των ακουστικών εργαστηριακών δοκιμών στη πόλη Hiratsuka.

Στους κλειστούς χώρους η συμπεριφορά του ήχου έρχεται σε πλήρη αλληλεπίδραση με τις επιφάνειές αυτών. Στους μικρούς ακουστικά χώρους εμφανίζονται έντονα κυματικά φαινόμενα συμβολής. Τα φαινόμενα αυτά γίνονται εντονότερα καθώς οι διαστάσεις του χώρου μικραίνουν, οπότε για τη μελέτη χώρων τέτοιου μεγέθους ο ήχος θεωρείται ως ένα μεταδιδόμενο κύμα. Μεγάλος ακουστικά χώρος θεωρείται αυτός όπου η μικρότερη διάστασή του είναι τουλάχιστον δύο μήκη κύματος μεγαλύτερη από το μήκος κύματος της συχνότητας που μελετάται. Πολύ μεγάλος ακουστικά χώρος είναι αυτός που έχει πολύ μεγάλες διαστάσεις οπότε σημαντικό ρόλο παίζει η απορρόφηση του ήχου από τον αέρα.

Στη μελέτη των κλειστών χώρων χρησιμοποιείται αρχικά η μέθοδος της γεωμετρικής ακουστικής, εξετάζοντας τη διαδρομή του ήχου ως μία ακτίνα από τη στιγμή που εκπέμπεται από τη πηγή μέχρι που θα ανακλαστεί ή θα απορροφηθεί από κάποια επιφάνεια. Έπειτα, πραγματοποιείται και μία στατιστική μελέτη του ήχου βασισόμενη στο χρόνο αντήχησης και στη φερόμενη ενέργεια των ανακλώμενων ακτινών σε σχέση με τις πρώτες ακτίνες. Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για υλοποίηση σε υπολογιστικά συστήματα.

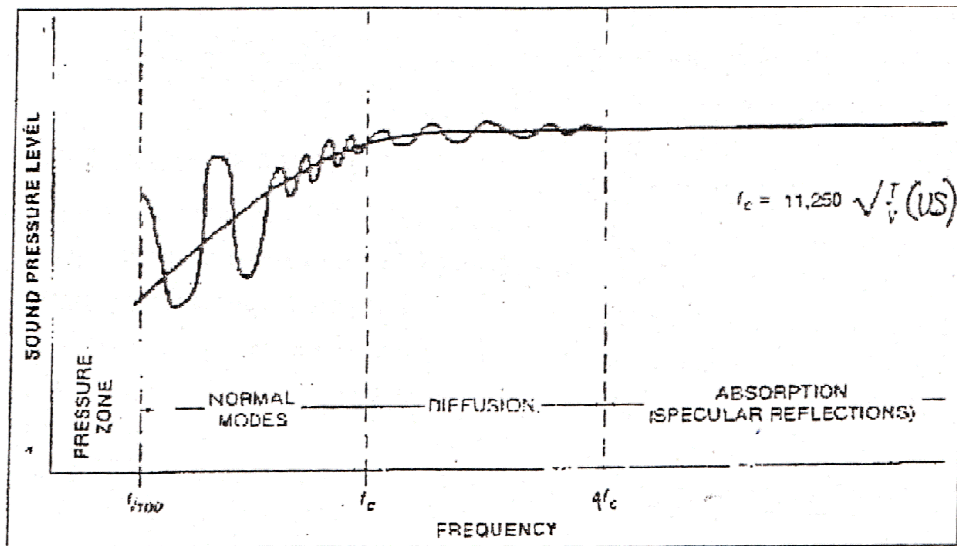
Εφ' όσον ο ήχος έχει κυματική φύση, η διάδοσή του μεταξύ δύο παράλληλων επιφανειών δημιουργεί στάσιμο κύμα. Για το διαχωρισμό των μικρών και μεγάλων

κλειστών χώρων σημαντικός είναι ο ορισμός της συχνότητας αποκοπής f_c από τον Manfred Schroeder:

$$f_c = K \cdot \sqrt{\frac{RT_{60}}{V}} \quad [3.0]$$

Όπου f_c η συχνότητα αποκοπής (Hz),
 RT_{60} ο χρόνος αντήχησης (sec.),
 V ο όγκος (m^3) και
 $K= 2000$.

Σύμφωνα με τον ορισμό, για ένα χώρο με συγκεκριμένο όγκο και χρόνο αντήχησης, από τη συχνότητα αποκοπής και πάνω, θα υπάρξει ομοιόμορφη συχνοτική απόκριση. Από τον τύπο 3.0 μπορεί να εξαχθεί ότι όσο πιο μικρός είναι ο χώρος τόσο πιο μεγάλη θα είναι η συχνότητα αποκοπής. Έτσι όταν εξετάζεται η ακουστική σε κάποιο μικρό ακουστικά χώρο, το ακουστικό φάσμα χωρίζεται σε τέσσερις περιοχές, οι οποίες φαίνονται στο σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2. Διάγραμμα Bolt, Beranek και Neumann [19].

Περιοχή pressure zone(ζώνη πίεσης): κυμαίνεται από 20 Hz έως f_1 και είναι η περιοχή των πολύ χαμηλών συχνοτήτων όπου δεν υπάρχουν συντονισμοί στο χώρο.

Όπου

$$f_1 = \frac{c}{2L_{max}} \quad [3.1]$$

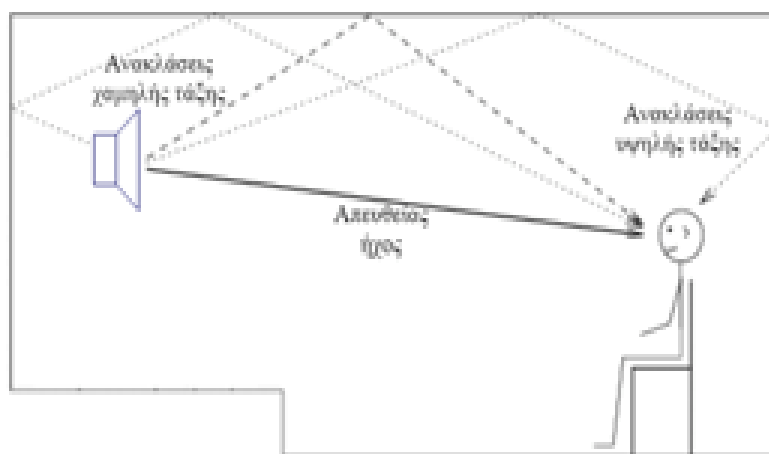
Περιοχή modal zone (ζώνη στάσιμων): κυμαίνεται από f_1 έως f_c και είναι η περιοχή που περιλαμβάνει τις συχνότητες που δημιουργούν τα στάσιμα κύματα ή πιο σωστά η περιοχή όπου δε συντονίζεται ο χώρος αλλά ο αέρας μέσα σε αυτόν. Εδώ εφαρμόζεται η μέθοδος της κυματικής ακουστικής.

Περιοχή diffusion zone (ζώνη διάχυσης): κυμαίνεται από f_c έως $4f_c$ και είναι η περιοχή όπου επικρατεί το φαινόμενο της διάχυσης δηλαδή της τυχαίας εξάπλωσης των ηχητικών κυμάτων στο χώρο.

Περιοχή reflection zone (ζώνη ανακλάσεων): κυμαίνεται από $4f_c$ έως 20kHz και είναι η περιοχή όπου εφαρμόζονται οι αρχές της γεωμετρικής ακουστικής.

3.1 ΑΝΤΗΧΗΣΗ

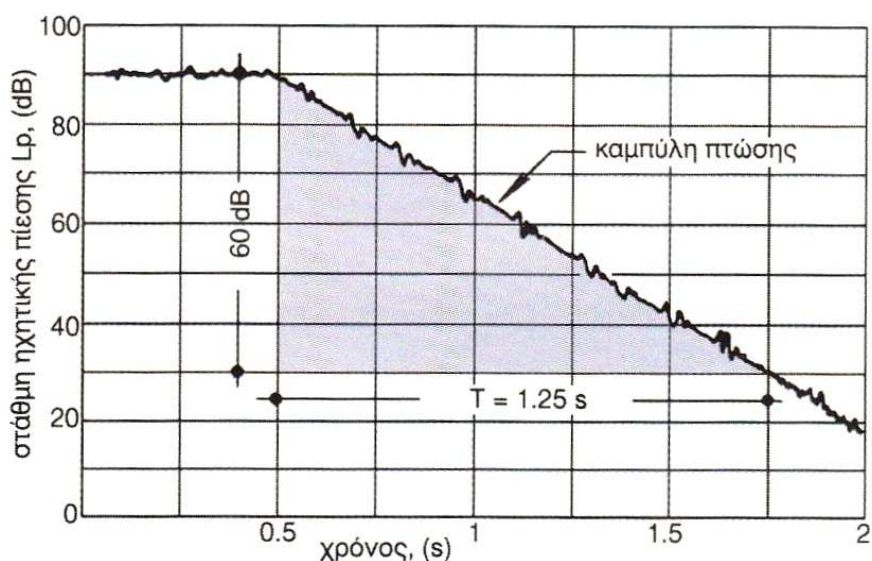
Η αντήχηση είναι μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους της ακουστικής ποιότητας ενός χώρου καθώς περιγράφει το ρυθμό πτώσης της ηχητικής ενέργειας ενός κλειστού χώρου.



Σχήμα 3.1.1. Ηχητικό πεδίο σε κλειστό χώρο.

Στο σχήμα 3.1.1. φαίνονται οι συνιστώσες ενός ηχητικού πεδίου σε κλειστό χώρο. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, ο ακροατής ακούει όχι μόνο τον απευθείας από την πηγή ήχο, αλλά και τις ανακλάσεις του από το χώρο. Όταν σταματήσει απότομα η εκπομπή της ηχητικής πηγής, ο ήχος δε σβήνει ακαριαία, αλλά σταδιακά. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αντήχηση και μετράται σε second μέσω του μεγέθους του χρόνου αντήχησης (RT_{60}).

Χρόνος αντήχησης ονομάζεται ο χρόνος που χρειάζεται για να εξασθενήσει ο ήχος κατά 60dB από τη στιγμή που θα σταματήσει η εκπομπή του ηχητικού σήματος από την πηγή.



Σχήμα 3.1.2. Καμπύλη εξασθένησης του ηχητικού πεδίου βάσει της οποίας υπολογίζεται ο χρόνος αντήχησης [20].

Σύμφωνα με την καμπύλη του σχήματος 3.1.2., σε ένα ιδανικό ηχητικό πεδίο η πτώση της στάθμης είναι γραμμική σε συνάρτηση με το χρόνο. Ο χρόνος αντήχησης έχει σχέση με το μέγεθος του χώρου. Όσο πιο μεγάλος ο χώρος τόσο πιο μεγάλη η αντήχηση του. Παρ' όλα αυτά ο χρόνος αντήχησης σχετίζεται άμεσα και με τη συχνότητα του ήχου. Δηλαδή, είναι διαφορετικός για κάθε συχνότητα. Αυτό συμβαίνει, διότι καθώς ο ήχος προσπίπτει σε μία επιφάνεια ένα ποσοστό του απορροφάται και το υπόλοιπο ανακλάται με τα ποσοστά αυτά να είναι άμεσα εξαρτώμενα από τη συχνότητα και τα δομικά υλικά του χώρου.

3.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι υπολογισμού του χρόνου αντήχησης, θεωρητικά και πρακτικά. Ο χρόνος αντήχησης, σύμφωνα με το *Sabine*, βρέθηκε ότι είναι ίσος με:

$$RT = 0,161 \cdot \frac{V}{A} \quad [3.2]$$

όπου **RT** ο χρόνος αντήχησης (sec),

V ο όγκος του χώρου (m^3) και

A η απορρόφηση του χώρου (Sabins) για την οποία ισχύει:

$$\mathbf{A} = \mathbf{S} \cdot \bar{\alpha} \quad [3.3]$$

όπου \mathbf{S} είναι η συνολική επιφάνεια του χώρου (m^2) και

$\bar{\alpha}$ ο μέσος συντελεστής απορρόφησης αυτής της επιφάνειας.

Ο μέσος συντελεστής απορρόφησης υπολογίζεται από το πηλίκο του αθροίσματος του εμβαδού της κάθε επιφάνειας ξεχωριστά, επί το συντελεστή απορρόφησης της, διά του συνολικού αθροίσματος των εμβαδών των επιφανειών:

$$\bar{\alpha} = \frac{(\mathbf{S}_1 \cdot \alpha_1) + (\mathbf{S}_2 \cdot \alpha_2) + (\mathbf{S}_3 \cdot \alpha_3) \dots}{\mathbf{S}_1 + \mathbf{S}_2 + \mathbf{S}_3 \dots} \quad [3.4]$$

Ο συντελεστής απορρόφησης παίρνει τιμές από 0 έως 1 και είναι αδιάστατο μέγεθος. Ο τύπος του Sabine δίνει αποδεκτά αποτελέσματα σε περίπτωση που ο μέσος συντελεστής απορρόφησης είναι μικρότερος του 0.1. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι ο χώρος διαθέτει επιφάνειες με πολύ μικρή απορρόφηση. Στην περίπτωση που οι επιφάνειες του χώρου έχουν μέσο συντελεστή απορρόφησης $\bar{\alpha} > 0.1$, χρησιμοποιείται ο τύπος των *Norris-Eyring* :

$$\mathbf{RT} = \frac{0.161 \cdot \mathbf{V}}{-\mathbf{S} \cdot \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad [3.5]$$

Ο τύπος αυτός δίνει καλά αποτελέσματα σε χώρους όπου η απορρόφηση είναι ομοιόμορφα κατανομημένη. Στην περίπτωση που η απορρόφηση του χώρου δεν είναι ομοιόμορφη, ο χρόνος αντήχησης υπολογίζεται λαμβάνοντας κάθε διάσταση του χώρου ξεχωριστά. Ο αντίστοιχος τύπος υπολογισμού του χρόνου αντήχησης είναι αυτός του *Fitzroy*:

$$\mathbf{RT} = \frac{0.161 \cdot \mathbf{V}}{2} \cdot \left[\left(\frac{\mathbf{S}_x}{\ln(1 - \bar{\alpha}_x)^{-1}} \right) + \left(\frac{\mathbf{S}_y}{\ln(1 - \bar{\alpha}_y)^{-1}} \right) + \left(\frac{\mathbf{S}_z}{\ln(1 - \bar{\alpha}_z)^{-1}} \right) \right] \quad [3.6]$$

Όπου για ορθογώνιο χώρο θα ισχύει: $\mathbf{S}_x = 2 \cdot \mathbf{X} \cdot \mathbf{Y}$ (το εμβαδόν των επιφανειών στη διάσταση του μήκους), $\mathbf{S}_y = 2 \cdot \mathbf{X} \cdot \mathbf{Z}$ (το εμβαδόν των επιφανειών στη διάσταση του

πλάτους), $S_z = 2 \cdot Y \cdot Z$ (το εμβαδόν των επιφανειών στο πάτωμα και την οροφή). Στην περίπτωση όπου υπάρχει ανομοιόμορφη απορρόφηση, αλλά υπάρχουν και επιφάνειες με πολύ μεγάλο συντελεστή απορρόφησης ($\alpha > 0.63$) τότε χρησιμοποιείται ο τύπος των *Sette-Millington*:

$$RT = \frac{0.161 \cdot V}{A_M} \quad [3.7]$$

όπου $A_M = -[S_1 \cdot \ln(1 - \alpha_1) + S_2 \cdot \ln(1 - \alpha_2) + S_3 \cdot \ln(1 - \alpha_3) + \dots]$

Τέλος, σε πολύ μεγάλους χώρους, όπως εκκλησίες και θέατρα, στον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης λαμβάνεται υπ' όψιν και η απορρόφηση από τον αέρα μέσω του τύπου:

$$RT = \frac{0.161 \cdot V}{A + 4 \cdot m \cdot V} \quad [3.8]$$

όπου m ο συντελεστής εξασθένησης στον αέρα και εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την υγρασία και τη συχνότητα.

Με αυτούς τους τύπους υπολογίζεται ο χρόνος αντήχησης σε οποιοδήποτε κλειστό χώρο. Χρησιμοποιώντας μία παντοκατευθυντική πηγή και ένα μικρόφωνο για την καταγραφή των αποτελεσμάτων, μπορεί να μετρηθεί ο χρόνος αντήχησης με βάση κάποια από τις τρεις ακόλουθες μεθόδους:

- 1) Τη μέθοδο του παλμού.
- 2) Τη μέθοδο του μηδενισμού της πηγής.
- 3) Τη μέθοδο ακολουθίας μεγίστου μήκους (MLS).

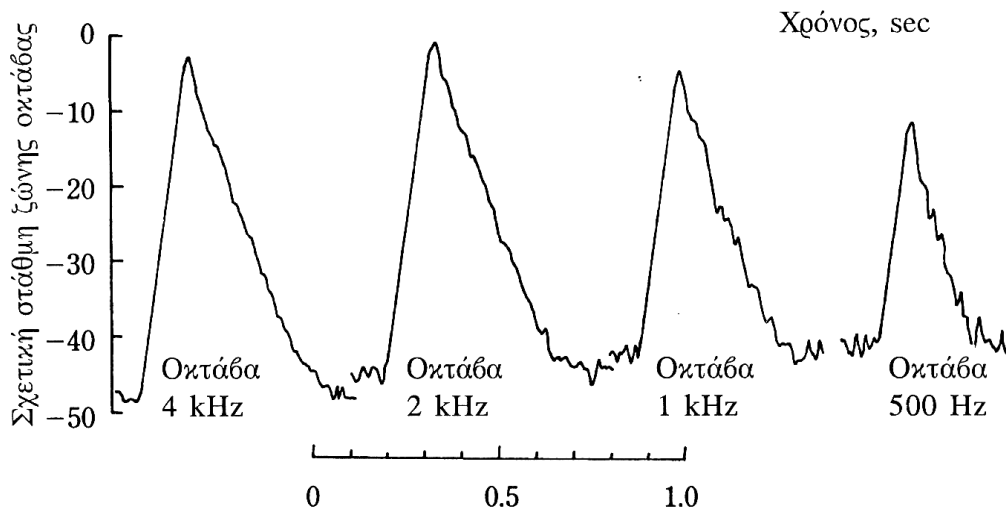
3.2.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΠΑΛΜΟΥ

Η μέθοδος του παλμού είναι πλέον μία ασυνήθιστη μέθοδος μέτρησης του χρόνου αντήχησης, διότι η τεχνολογία έχει εξελιχθεί και λόγω των πολλών μειονεκτημάτων της.

Η ηχητική πηγή που χρησιμοποιείται πρέπει να παράγει αρκετά μεγάλη ενέργεια για να μην επηρεάζονται οι μετρήσεις από το θόρυβο βόθους έτσι ώστε να έχουν όση μεγαλύτερη ακρίβεια είναι εφικτή. Η ενέργεια της πηγής πρέπει να είναι εξίσου κατανεμημένη σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων.

Ως ηχητική πηγή χρησιμοποιείται ένας παλμός όπως ένα παλαμάκι, ένα πιστόλι ή ακόμα και ένα μπαλόνι που σκάει. Στη συνέχεια, μόλις πραγματοποιηθεί αυτό το γεγονός, με το μικρόφωνο καταγράφεται η μείωση της ηχητικής στάθμης στο χώρο,

αλλά απαραίτητος είναι και ένας φασματικός αναλυτής έτσι ώστε οι μετρήσεις να γίνονται για κάθε οκτάβα ξεχωριστά.

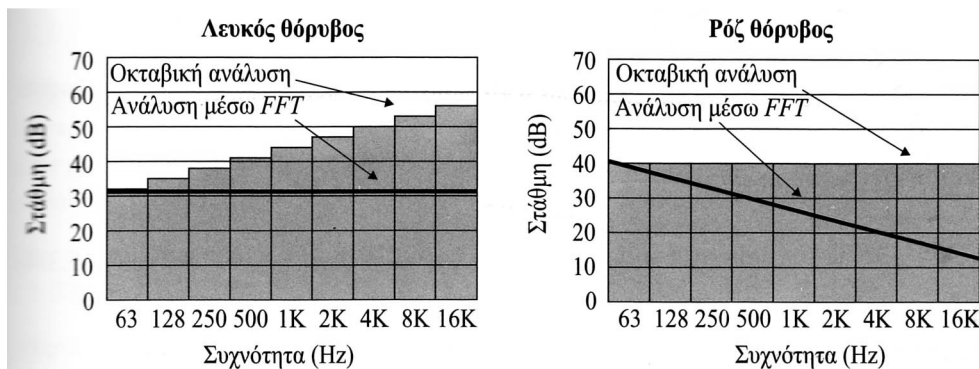


Σχήμα 3.2.1. Μέτρηση του χρόνου αντίληψης με τη μέθοδο του παλμού [2].

Με τη μέθοδο του παλμού η ενέργεια δεν κατανέμεται εξίσου σε όλες τις συχνότητες και ιδιαίτερος στις χαμηλές, καθώς επίσης δεν είναι εφικτή η επαναληψιμότητά της μεθόδου.

3.2.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΗΔΕΝΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΠΗΓΗΣ

Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται ως πηγή ένα παντοκατευθυντικό ηχείο το οποίο τροφοδοτείται με ένα σήμα τυχαίου θορύβου. Οι ζώνες τυχαίου θορύβου δίνουν πιο σταθερές και αξιόπιστες ενδείξεις σε όλο το φάσμα συχνοτήτων και αυτό είναι βασικό του πλεονέκτημα. Ο χρησιμοποιούμενος θόρυβος πρέπει να έχει συνεχές ηχητικό φάσμα και συνήθως χρησιμοποιείται λευκός ή ροζ.



Σχήμα 3.2.2. Φασματική ανάλυση λευκού και ροζ θορύβου[11].

Η καταγραφή του χρόνου αντήχησης γίνεται όπως και με τη μέθοδο του παλμού, δηλαδή αμέσως μετά την παύση της πηγής. Ο χρόνος που θα χρειαστεί μέχρι να διεγερθεί όλος ο χώρος για να βρísκεται πλέον σε ένα σημείο ισορροπίας εξαρτάται από το μέγεθός του.

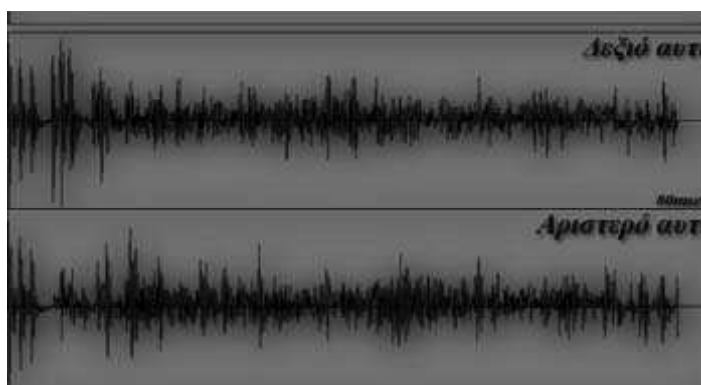
3.2.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑΣ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ (MLS)

Η μέθοδος αυτή είναι παρόμοια με τη μέθοδο μηδενισμού της πηγής μόνο που τώρα ως σήμα εισόδου χρησιμοποιείται η ακολουθία MLS. Πρόκειται για μία ακολουθία που αποτελείται από μία σειρά συναρτήσεων δέλτα με τιμές +1 ή -1 και έχει περίοδο:

$$l = 2^n - 1 \quad [3.9]$$

όπου n είναι ένας θετικός ακέραιος.

Η τεχνική MLS υπολογίζει την κρουστική απόκριση (impulse response) του συστήματος. Κρουστική απόκριση είναι η απόκριση του χώρου στο πεδίο του χρόνου και αποτελεί ένα σημαντικό μέγεθος διότι με βάση αυτή μπορούν να υπολογιστούν οι παράμετροι για τον προσδιορισμό της ακουστικής ποιότητας του χώρου. Παραδείγματα κρουστικής απόκρισης παρατίθενται στα σχήματα 3.2.3. και 3.2.4.



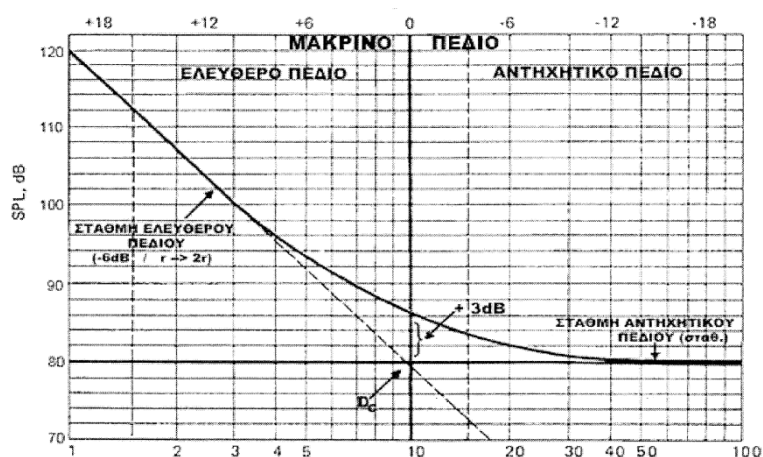
Σχήμα 3.2.3. Κρουστική απόκριση χώρου με πολλές ανακλάσεις [21].



Σχήμα 3.2.4. Κρουστική απόκριση χώρου με μικρή αντήχηση [21].

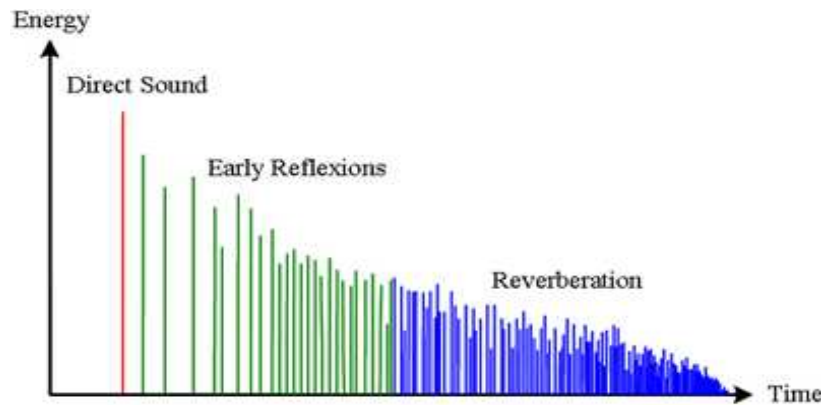
Η επεξεργασία της κρουστικής απόκρισης μπορεί να παρέχει εναλλακτικές τιμές από το RT_{60} σχετικές με την αντήχηση του συστήματος. Αυτές είναι ο RT_{10} , ο RT_{20} , ο RT_{30} και ο EDT.

Ο RT_{10} ορίζεται ως έξι φορές ο χρόνος που απαιτείται, ώστε η στάθμη του ήχου να ελαττωθεί από -5 έως -15dB από την αρχική τιμή μετά το μηδενισμό της πηγής. Ο RT_{20} ορίζεται ως τρεις φορές για να ελαττωθεί από -5 έως -25dB, ενώ ο RT_{30} δύο φορές για να ελαττωθεί από -5 έως -35dB. Αυτοί οι χρόνοι αντήχησης, όπως και ο RT_{60} , είναι διαφορετικοί για κάθε συχνότητα. Στην αρχή της διαδικασίας μέτρησης του χρόνου αντήχησης, ενεργοποιείται η ηχητική μας πηγή για να διεγερθεί ο χώρος και να δημιουργηθεί ηχητικό πεδίο. Το ηχητικό πεδίο κοντά στην πηγή μπορεί να χαρακτηριστεί ως ελεύθερο γιατί ουσιαστικά εκεί υπάρχει μόνο το απευθείας από την πηγή σήμα. Μακρύτερα από την πηγή δημιουργείται αντηχητικό πεδίο όπου σημαντικό ρόλο παίζουν οι ανακλάσεις του ήχου από τις περατωτικές επιφάνειες του χώρου. Σε ένα σημείο του χώρου, η στάθμη του απευθείας πεδίου ισούται με αυτή του αντηχητικού. Αυτό το σημείο ονομάζεται κρίσιμη απόσταση D_c .



Σχήμα 3.2.5. Γραφική απεικόνιση της κρίσιμης απόστασης[19].

Στα σχήματα 3.2.5., 3.2.6. παρατίθεται ο διαχωρισμός του ηχητικού σήματος σε απευθείας και ανακλώμενο σε ένα κλειστό χώρο.



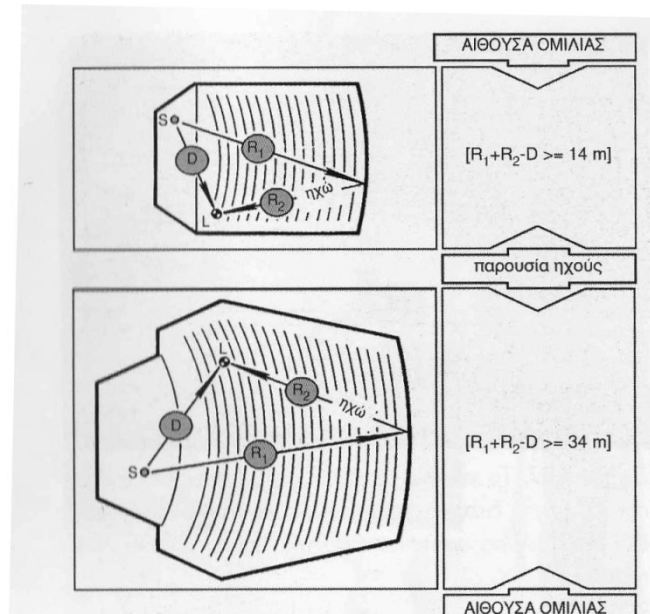
Σχήμα 3.2.6. Ο απευθείας ήχος και οι ανακλάσεις του [21].

Μπορεί να παρατηρηθεί ότι αμέσως μετά τον απευθείας ήχο ακολουθούν οι πρώτες ανακλάσεις (πράσινο χρώμα), οι οποίες διαθέτουν αρκετή ηχητική ενέργεια σε αντίθεση με τις καθυστερημένες ανακλάσεις (μπλε χρώμα).

Ο χρόνος αντήχησης εξαρτάται κυρίως από το σκοπό για τον οποίο προορίζεται ο εκάστοτε χώρος. Για παράδειγμα, όταν ένας χώρος έχει κατασκευαστεί για εκτελέσεις κλασικής μουσικής ή όπερας, οι ακροατές θα επιζητούν ένα ακουστικό περιβάλλον ανάλογο της περιόδου που το συγκεκριμένο έργο είχε γραφτεί. Για προτεινόμενες τιμές χρόνου αντήχησης ανάλογα με τη χρήση θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο.

3.3 ΗΧΩ (ECHO) ΚΑΙ ΠΟΛΛΑΠΛΗ ΗΧΩ (FLUTTER ECHO)

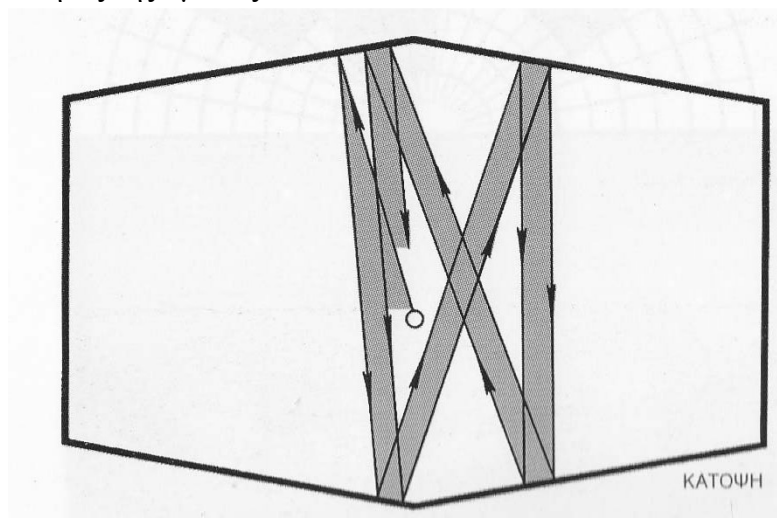
Σε ένα κλειστό χώρο, ο ακροατής ακούει αρχικά τον προερχόμενο από την πηγή ήχο. Στην περίπτωση που το ανακλώμενο σήμα φτάσει στο δέκτη με αρκετή χρονική καθυστέρηση, τότε γίνεται αντιληπτό ως ξεχωριστό γεγονός. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται ηχώ (echo). Η ηχώ εξαρτάται από τη χρονική διαφορά του απευθείας και του ανακλώμενου ηχητικού κύματος καθώς και από την ένταση της ανάκλασης. Συγκεκριμένα, για χρονική διαφορά μικρότερη των 35 msec δε δημιουργείται ηχώ. Από 35 έως 50 msec προσομοιάζει την ηχώ, ενώ από 50msec και πάνω είναι ακουστικά αντιληπτή. Στο σχήμα 3.3.1. παρουσιάζεται η αντίληψη της ηχούς από κάποιο ακροατή.



Σχήμα 3.3.1. Ηχώ σε αίθουσες ακροατηρίου όπου D ο απευθείας ήχος και R₁ R₂ ο ανακλώμενος [20].

Η ηχώ προκαλείται κυρίως από δύο πράγματα, σκληρές επιφάνειες και ψηλά ταβάνια. Τα χειρότερα προς χρήση υλικά είναι από γυαλί, μάρμαρο ή ακόμα και γυψοσανίδα. Για να αντιμετωπιστεί η ηχώ θα πρέπει να αντικατασταθούν οι σκληρές επιφάνειες με διάφορες απορροφητικές διατάξεις. Έτσι θα έχουμε σαν αποτέλεσμα τη μείωση της ενέργειας των ανακλάσεων.

Όταν στο χώρο υπάρχουν ανακλαστικές επιφάνειες η μία απέναντι από την άλλη, όπως οι πλάγιοι τοίχοι σε μικρή μεταξύ τους απόσταση, τότε υπάρχει η πιθανότητα της εμφάνισης του φαινομένου της πολλαπλής ηχούς (flutter echo). Οι διαδοχικές ανακλάσεις μπορούν να προκαλέσουν χρωματισμό στη μουσική καθώς και μείωση της καταληπτότητας της ομιλίας.



Σχήμα 3.3.2. Πολλαπλή ηχώ μπορεί να παρουσιαστεί σε χώρους με όχι παράλληλες επιφάνειες όταν η ηχητική πηγή βρίσκεται ανάμεσά τους [20].

Το φαινόμενο του flutter echo μπορεί να διορθωθεί με δύο τρόπους: με την ηχητική απορρόφηση ή με την ηχητική διάχυση. Το flutter echo μπορεί να μειωθεί με την προσεκτική τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών διατάξεων στους τοίχους ή με ειδικές ακουστικές διατάξεις στο ταβάνι. Η βασική ιδέα είναι ότι πρέπει να απορροφηθεί ο ήχος στη μία ή και στις δύο επιφάνειες και να αποτραπεί η ανάκλασή του από τον πίσω τοίχο προς την πηγή. Επίσης η χρήση διαχυτών, στέλνοντας σε διαφορετικές κατευθύνσεις τα ηχητικά κύματα, βοηθά στην εξάλειψη αυτών των επαναλαμβανόμενων ανακλάσεων.

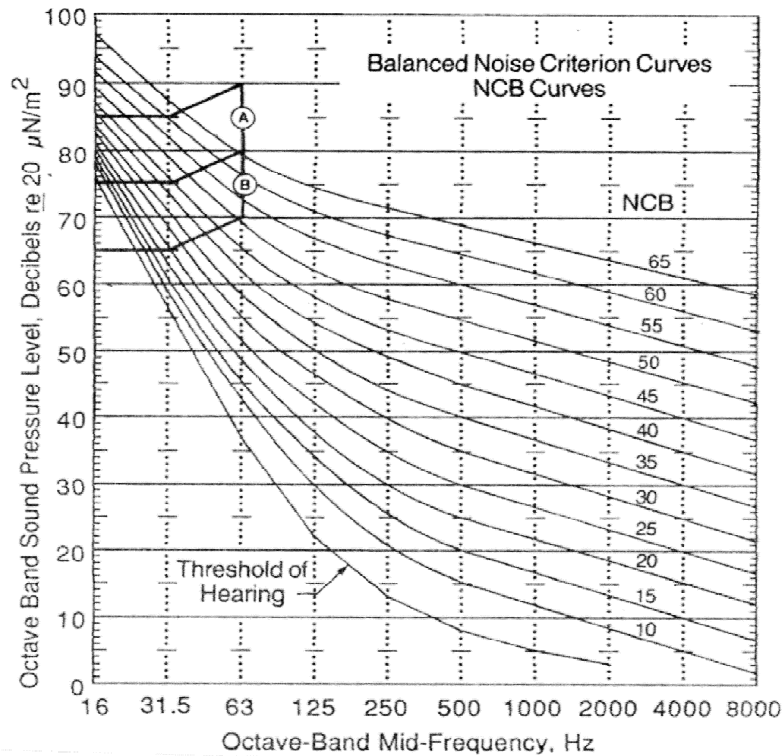
Για τη χρήση αυτών των υλικών αλλά και για τις λειτουργίες τους θα μιλήσουμε πιο αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

3.4 ΘΟΡΥΒΟΣ ΒΑΘΟΥΣ

Θόρυβος βάθους ονομάζεται το επίπεδο της στάθμης των ανεπιθύμητων ήχων που υπάρχει στο χώρο χωρίς τη λειτουργία της πηγής που ενδιαφέρει. Μπορεί να οφείλεται σε ενδογενείς και εξωγενείς παράγοντες. Εξωγενείς παράγοντες θεωρούνται αυτοί που προκαλούν θόρυβο από έξω προς το εσωτερικό του χώρου, όπως για παράδειγμα τα αυτοκίνητα και τα αεροπλάνα. Ενδογενείς θεωρούνται αυτοί που παράγονται μέσα στο χώρο όπου βρίσκεται η πηγή.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τη μείωση του διαδιδόμενου θορύβου χαρακτηρίζονται από έναν δείκτη που ονομάζεται απώλεια μετάδοσης (transmission loss). Αυτός ο δείκτης μετράται σε dB και αντικατοπτρίζει την ποσότητα της ηχητικής ενέργειας του προσπίπτοντος κύματος σε μία επιφάνεια που απορροφάται από την επιφάνεια αυτή. Η απώλεια μετάδοσης βασίζεται κυρίως στη μάζα του υλικού και όχι τόσο στο είδος του υλικού.

Για να υπολογιστεί η στάθμη θορύβου σε ένα χώρο σε σχέση με τη συχνότητα, χρησιμοποιούνται οι καμπύλες αναφοράς NCB (Balanced Noise Criteria) που προτάθηκαν από το Beranek σύμφωνα με τους κανονισμούς των ΗΠΑ (ANSI):



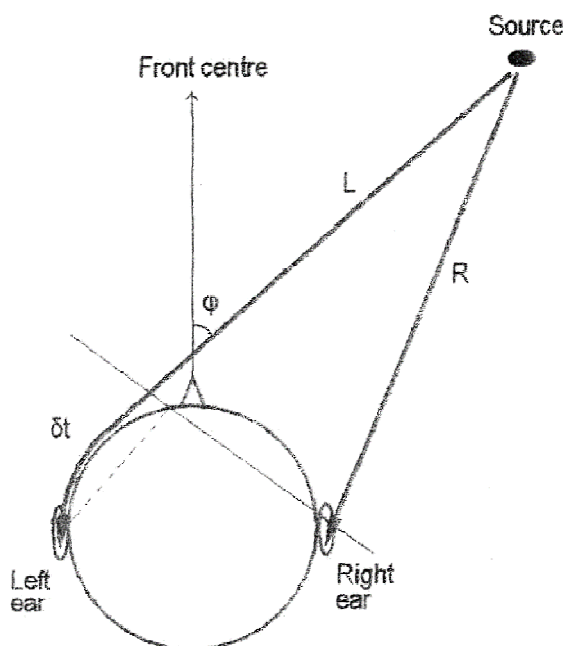
Σχήμα 3.4.1. Πρότυπες καμπύλες αναφοράς για τον προσδιορισμό του NCB [1].

Εκτός από χώρους μουσικής, σημαντικό ρόλο έχει η ηχομόνωση σε χώρους διδασκαλίας, όπως σε σχολικές αίθουσες. Σε τέτοιους χώρους, όπου η ομιλία συνήθως δεν ενισχύεται από κάποιο ηχητικό σύστημα και πρέπει να γίνεται πλήρως κατανοητή στο χώρο χωρίς παρεμβολές θορύβου, σημαντικό είναι να αυξηθεί ο λόγος σήματος προς το θόρυβο (SNR). Για παράδειγμα, σε μία σχολική αίθουσα όπου ο εξωτερικός θόρυβος είναι σταθερός συνήθως χρονικά και κυμαίνεται περίπου στα 35dB, τότε ο λόγος σήματος προς θόρυβο θα πρέπει να είναι +15dB έτσι ώστε να αυξηθεί η ευκρίνεια της ομιλίας. Δηλαδή, αν θεωρήσουμε ότι η φωνή σε φυσιολογικά επίπεδα κυμαίνεται σε στάθμη ηχητικής πίεσης 50dB, τότε το SNR θα είναι 65dB αρκεί ο εξωτερικός θόρυβος να είναι σταθερός στα 35dB.

Για να μην υπάρχουν προβλήματα σχετιζόμενα με το θόρυβο βάθους πρέπει να ακολουθούνται οι παρακάτω προτάσεις. Πρώτον, αν είναι εφικτό, ο χώρος να βρίσκεται σε ήσυχο μέρος μακριά από εξωτερικό θορυβώδες περιβάλλον. Δεύτερον, να ελαττωθεί η ολική ηχητική στάθμη θορύβου που επικρατεί μέσα στο δωμάτιο. Τρίτον, να μειωθεί η στάθμη του θορύβου κατά την εκπομπή του από την πηγή. Τέταρτον, η τοποθέτηση ηχομονωτικού και αντικραδασμικού πλέγματος μεταξύ του θορύβου και του χώρου. Αυτό, γιατί μπορεί να υπάρξει διάδοση θορύβου είτε με αερόφερτο τρόπο, όπως από τη χαραμάδα κάτω από μία πόρτα οπότε είναι απαραίτητη η αεροστεγής μόνωση του χώρου είτε με στερεόφερτο τρόπο, όταν δηλαδή ο ήχος μεταδίδεται μέσω των δομικών υλικών.

3.5 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ HAAS (PRECEDENCE EFFECT)

Το φαινόμενο Haas είναι καθαρά ένα ψυχοακουστικό φαινόμενο και αναφέρεται στο τρόπο με τον οποίο το ανθρώπινο αυτί αντιλαμβάνεται τη σωστή τοποθεσία της πηγής. Αυτό το φαινόμενο δημιουργείται σε χώρους όπου υπάρχει ηχητική εγκατάσταση. Πιο συγκεκριμένα, όταν ο ακροατής δέχεται δύο ίδιους ήχους ίδιας στάθμης από δύο ξεχωριστές πηγές, οι οποίες βρίσκονται σε κάποια απόσταση μεταξύ τους, τότε ως ηχητική πηγή αντιλαμβάνεται αυτή που βρίσκεται πιο κοντά σε αυτόν.



Σχήμα 3.5.1. Εντοπισμός της θέσης της πηγής στο χώρο από το ανθρώπινο αυτί [22].

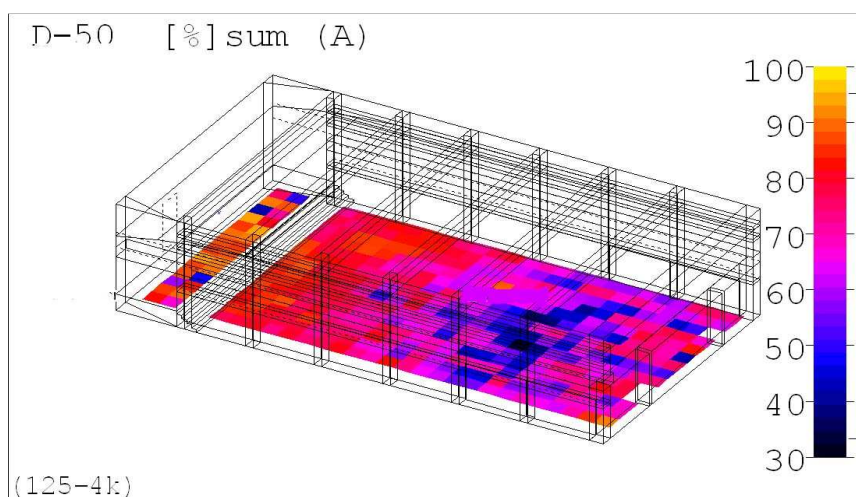
Για παράδειγμα, όπως βλέπουμε από το σχήμα 3.5.1., το δεξί αυτί είναι αυτό που ξεχωρίζει τη θέση της πηγής και λόγω της απόστασης από την πηγή, αλλά και εξ' αιτίας της απόστασης των αυτιών μεταξύ τους, με αποτέλεσμα το αριστερό αυτί να ακούει τον ήχο με μία μικρή χρονική καθυστέρηση. Το φαινόμενο κατά το οποίο, η ακουστική εικόνα που σχηματίζει ο ακροατής είναι σύμφωνη με το σήμα που ακούει πρώτο, ονομάζεται φαινόμενο προβαδίσματος (precedence effect). Το φαινόμενο κατά το οποίο, ο διπλός ήχος που αναπαράγεται, γίνεται αντιληπτός σαν ένας ονομάζεται φαινόμενο Haas. Το φαινόμενο Haas συμβαίνει όταν η διαφορά στη χρονική άφιξη των ήχων κυμαίνεται από 25 έως 35msec. Στην περίπτωση που ξεπεράσει τα 35msec τότε γίνεται αντιληπτός σαν ένας ξεχωριστός ήχος, δηλαδή σαν ηχώ. Το φαινόμενο του Haas ισχύει επίσης όταν η στάθμη του καθυστερημένου σήματος είναι αυξημένη μέχρι 10dB.

4. ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ

Οι κλειστοί χώροι, ανάλογα με τη χρήση τους, πρέπει να τηρούν κάποιες τιμές των πιο βασικών κριτηρίων ακουστικής ποιότητας **C80**, **D50**, **RASTI**, **STI**, **RT₆₀**, **ITD**, **EDT**. Στην εργασία που πραγματοποιήθηκε, έπρεπε να ληφθεί υπ' όψιν ότι οι χώροι προορίζονταν για ομιλία και ελαφριά μουσική. Βάσει αυτού του γνώμονα αναλύονται παρακάτω τα κριτήρια και οι τιμές τους.

D50

Ο δείκτης ευκρίνειας (Definition Coefficient) ορίζεται ως η αναλογία, σε ένα σημείο του χώρου, της ηχητικής ενέργειας κατά τη διάρκεια των πρώτων t_1 (ms) προς τη συνολική ενέργεια. Συνήθως λαμβάνεται $t_1=50$ ms και εκφράζεται είτε ως δεκαδικός αριθμός είτε ως ποσοστό. Το μέγεθος αυτό ορίζει το λόγο μεταξύ του απευθείας πεδίου και των πρώτων ανακλάσεων ως προς το συνολικό πεδίο. Εκφράζει δηλαδή την αρχή του λόγου του χρήσιμου ήχου προς τον οχλούντα και θέτει όριο τα 50 ms. Μία ιδανική τιμή για το **D50** είναι $\geq 55\%$ [1].



Σχήμα 4.1. Κατανομή δείκτη ευκρίνειας (**D50**) στο χώρο [8].

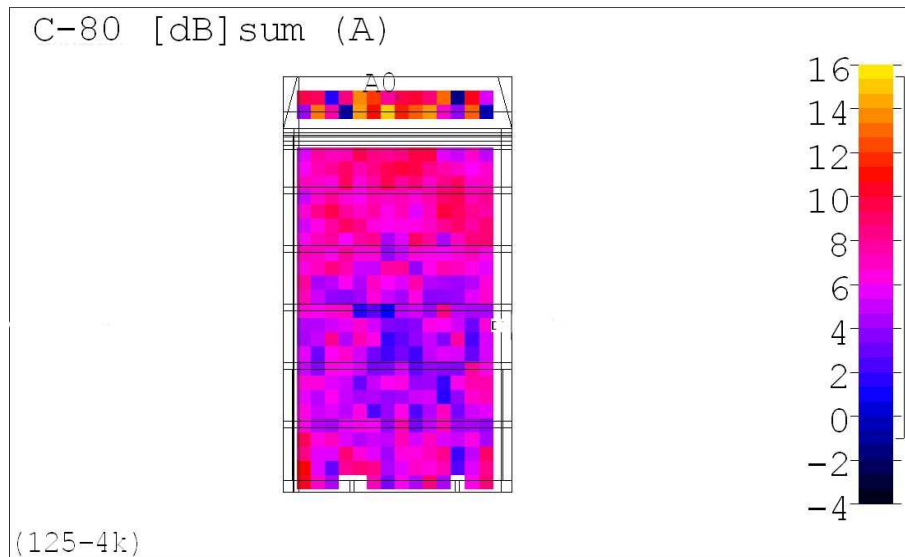
Μετριέται με εφαρμογή του τύπου:

$$D50 = \frac{\int_0^{50} P^2(t) dt}{\int_0^{\infty} P^2(t)} \quad [4.1]$$

Ενώ αυτός ο δείκτης φάνηκε χρήσιμος όσον αναφορά την ομιλία, αποδείχθηκε ανεπαρκής για τις αίθουσες μουσικής, στις οποίες είναι χρήσιμη η ανάμειξη απευθείας ήχου και πρώτων ανακλάσεων. Έτσι ήρθε να το συμπληρώσει ο δείκτης διαύγειας **C80**.

C80

Ο δείκτης διαύγειας (Clarity) ορίζεται ως η αναλογία, σε ένα σημείο του χώρου, της ηχητικής ενέργειας κατά τη διάρκεια των πρώτων t_2 (ms) προς την ενέργεια των καθυστερημένων ανακλάσεων. Ως t_2 λαμβάνονται συνήθως τα 80 ms και έχει μεγάλη σημασία για χώρους μουσικής. Το **C80** συνήθως μετράται στις συχνότητες 500, 1000 και 2000 Hz οπότε το αποτέλεσμα είναι ο μέσος όρος αυτών. Οι τιμές του πρέπει να κυμαίνονται μεταξύ του τέσσερα και του εννιά [2].



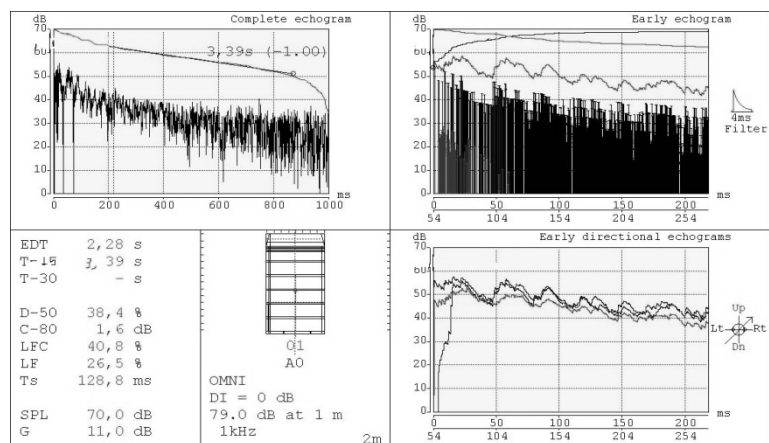
Σχήμα 4.2. Κατανομή δείκτη διαύγειας (C80) στο χώρο [8].

Μετριέται με εφαρμογή του τύπου:

$$C80 = 10 \log \frac{\int_0^{80} P^2(t) dt}{\int_0^{\infty} P^2(t)} \quad [4.2]$$

RT

Ο χρόνος αντήχησης (Reverberation Time) είναι ο χρόνος που απαιτείται για να μειωθεί το αντηχητικό πεδίο που δημιουργείται από ηχητική πηγή σε κλειστό χώρο κατά 60dB μετά την παύση της πηγής. Στην παρούσα εργασία, για χώρο ομιλίας και ελαφριάς μουσικής ο χρόνος αντήχησης πρέπει να λαμβάνει τιμές μεταξύ 0.5 και 1s αναλόγως τη συχνοτική ζώνη και τον όγκο του χώρου.



Σχήμα 4.3. Πληροφορίες για ανακλάσεις στο χώρο [8].

EDT

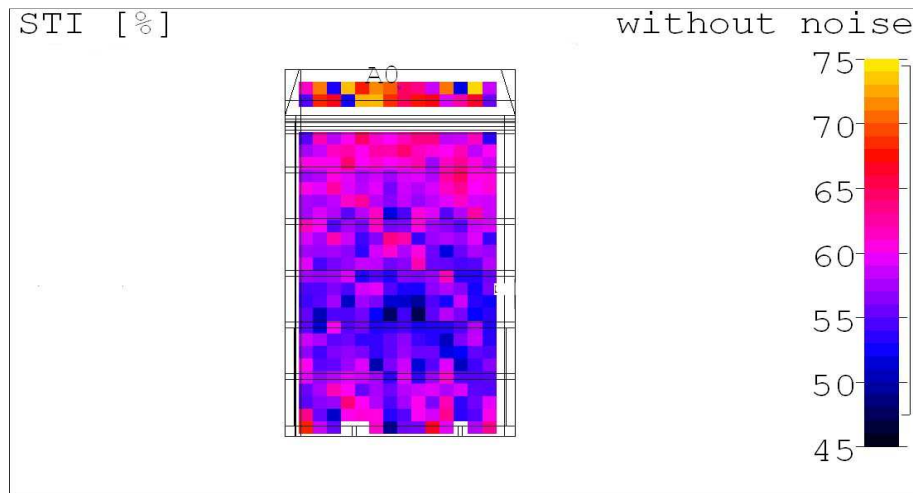
Ο αρχικός χρόνος μείωσης του ηχητικού πεδίου (Early Decay Time) εφευρέθηκε, γιατί ο υπολογισμός του RT_{60} είχε αρκετά μειονεκτήματα και ασάφειες. Στην ουσία, το **EDT** εκφράζει τη μείωση κατά 10 dB από την παύση της ηχητικής πηγής. Είναι δηλαδή ένας πρώιμος χρόνος αντήχησης. Σε διάχυτο πεδίο βέβαια ο αρχικός χρόνος μείωσης του ηχητικού πεδίου (**EDT**) ταυτίζεται με το χρόνο αντήχησης. Η εισαγωγή αυτής της μεθόδου δημιούργησε αντιφάσεις ως προς τη μέθοδο υπολογισμού, ιδιαίτερα από τα αποτελέσματα μετρήσεων. Αν και συνήθως χρησιμοποιείται η τιμή των 10 dB έχουν προταθεί και οι τιμές των 5, 15 και 20 dB. Ακόμα προτάθηκε να μετριέται όχι μόνο με γνώμονα τα 10 dB μείωση αλλά και τα 160 ms από την παύση της ηχητικής πηγής. Αυτή η μέθοδος τεκμηριώθηκε αργότερα αλλά μόνο για χώρους με μεγάλη αντήχηση. Συνήθως, ο χρόνος αντήχησης και ο αρχικός χρόνος μείωσης υπολογίζονται από την αντίστροφη ολοκλήρωση του τετραγώνου της κρουστικής απόκρισης του χώρου.

ITD

Η αρχική χρονική καθυστέρηση μετριέται σε seconds (s) και είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να φτάσει η πρώτη ανάκλαση μετά την άφιξη του απευθείας ήχου. Εάν το διάστημα αυτό είναι πολύ μεγάλο, ο ακροατής αισθάνεται αποκομμένος από τη σκηνή (ορχήστρα, ομιλητή). Παρατηρείται έξαρση του φαινομένου σε μεγάλους χώρους στη μέση της αίθουσας. Οι τιμές του δείκτη μειώνονται όταν υπάρχουν ανακλαστικές επιφάνειες είτε κοντά στη σκηνή είτε κοντά στους ακροατές. Για τους ακροατές που βρίσκονται κοντά στις ανακλαστικές επιφάνειες οι τιμές του δείκτη είναι αμελητέες, καθώς υπάρχουν πρώιμες ανακλάσεις. Η αρχική χρονική καθυστέρηση μπορεί να υπολογιστεί και με την κρουστική απόκριση μεταξύ των δύο θέσεων [1].

STI - RASTI

Οι δείκτες καταληπτότητας ομιλίας είναι ο Speech Transmission Index (**STI**) και ο Rapid Speech Transmission Index (**RASTI**). Εξαρτώνται άμεσα από το λόγο του σήματος προς το θόρυβο. Η μέθοδος **RASTI** προέκυψε από απλοποίηση της μεθόδου **STI** [1].

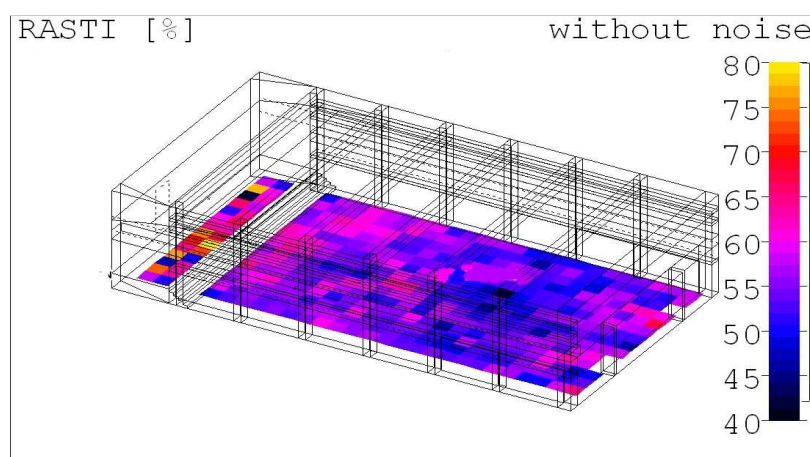


Σχήμα 4.4. Κατανομή δείκτη καταληπτότητας (STI) στο χώρο [8].

Μετρίεται με εφαρμογή του τύπου:

$$\text{STI} = \left(10 \log \frac{\int_{0.02}^{0.1} P^2(t) dt}{\int_0^{0.01} P^2(t)} \right) \quad [4.3]$$

Για τη μείωση των τιμών και τη μεγαλύτερη ευκολία των υπολογισμών έγινε περιορισμός των συχνοτήτων με αποτέλεσμα το **RASTI**.



Σχήμα 4.5. Κατανομή δείκτη καταληπτότητας (RASTI) στο χώρο [8].

Η διαβάθμιση των τιμών για το **STI** αναγράφονται στον παρακάτω πίνακα:

Χαρακτηρισμός	Τιμές STI
Εξαιρετική	$1 > \mathbf{STI} > 0,75$
Πολύ καλή	$0,75 \geq \mathbf{STI} > 0,60$
Μέτρια	$0,60 \geq \mathbf{STI} > 0,45$
Φτωχή	$0,45 \geq \mathbf{STI} > 0,32$
Κακή	$0,32 \geq \mathbf{STI} > 0$

Σχήμα 4.6 Κατάταξη τιμών STI [1].

Centre time

Ο κεντρικός χρόνος (Centre time) εισήχθει από τον Cremer και είναι το κέντρο βάρους κατά μήκος του άξονα του χρόνου, του τετραγώνου της ακουστική απόκρισης [9].

$$\mathbf{Center\ time} = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} P^2(t) dt}{\int_0^{\infty} P^2(t) dt} \quad [4.4]$$

LF

Ο δείκτης πλευρικών ανακλάσεων, (Lateral Energy Fraction-LEF ή LF), εκφράζει τον τρόπο κατανομής κυμάτων σε ένα χώρο. Εκφράζεται από το ποσοστό των πλευρικών ανακλάσεων ως προς ένα συνολικό πεδίο. Η σημασία του είναι πολύ μεγάλη δεδομένου ότι είναι ο μοναδικός ίσως συντελεστής υπολογισμού των ανακλάσεων σε μία αίθουσα. Για τον υπολογισμό του δείκτη χρησιμοποιούνται δύο μικρόφωνα. Το ποσοστό της ένδειξης του πρώτου ως προς την ένδειξη του δεύτερου δίνει το δείκτη.

$$\mathbf{LF} = \frac{\int_5^{80ms} P_L^2(t) dt}{\int_0^{80ms} P^2(t) dt} \quad [4.5]$$

Το χρονικό διάστημα των 5ms έχει εισαχθεί για να καθίσταται βέβαιος ο μη υπολογισμός των απευθείας ηχητικών συνιστωσών. Εκτός από τον παραπάνω δείκτη πλευρικών ανακλάσεων, χρησιμοποιείται συχνά και εκείνος ο οποίος περιλαμβάνει και τον απευθείας ήχο. Στην περίπτωση αυτή, η ολοκλήρωση γίνεται από 5 έως 80 ms [1].

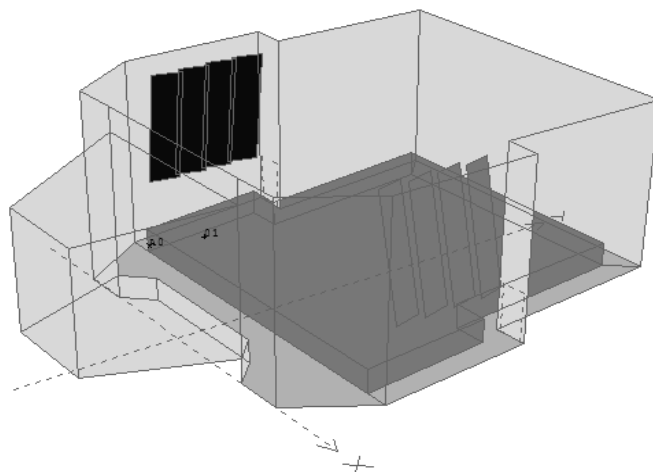
5. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ

5.1 CATT-ACOUSTIC

Το CATT-Acoustic είναι ένα πρόγραμμα που βοηθάει στην εξομοίωση ενός χώρου και των φυσικών χαρακτηριστικών του με αποτέλεσμα την κατασκευή ή την τροποποίησή του για βέλτιστα ακουστικά αποτελέσματα. Είναι ένα πρόγραμμα βασισμένο στην ακουστική και σε προγραμματισμό DSP. Πρέπει να σημειωθεί ότι η χρήση του συγκεκριμένου προγράμματος έγινε για εκπαιδευτικούς σκοπούς και για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε η demo έκδοση.

Τρία είναι τα βασικά αρχεία του CATT-Acoustic:

- Geo-File: Είναι το βασικό αρχείο στο οποίο ορίζονται οι επιφάνειες, σχηματίζεται ο χώρος και ορίζονται οι συντελεστές απορρόφησης και ανάκλασης για κάθε επιφάνεια.



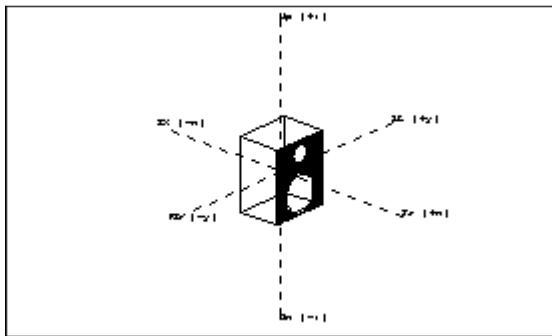
Σχήμα 5.1.1. Χώρος σχεδιασμένος με Catt-Acoustic [7].

- Receiver-File: Είναι το αρχείο στο οποίο ορίζονται οι τοποθεσίες των εικονικών μικροφώνων τα οποία αντιστοιχούν στους ακροατές.

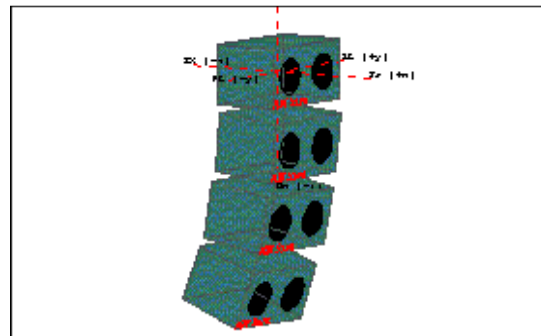


Σχήμα 5.1.2. Τοποθέτηση μικροφώνων για λήψη ήχου [8].

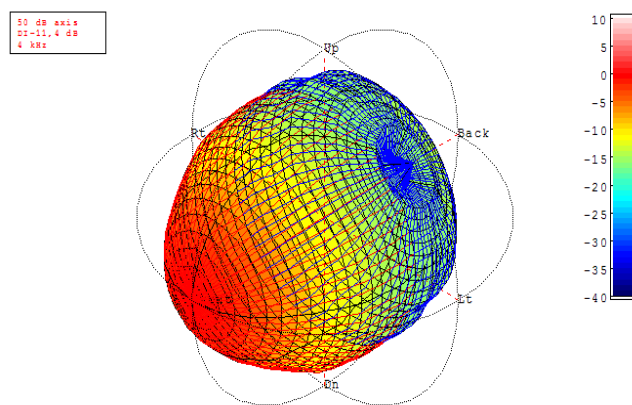
- Source-File: Είναι το αρχείο στο οποίο ορίζεται η τοποθεσία και οι ιδιότητες της πηγής που ηχοβολεί στο χώρο.



Σχήμα 5.1.3. Εισαγωγή ηχείων [7].



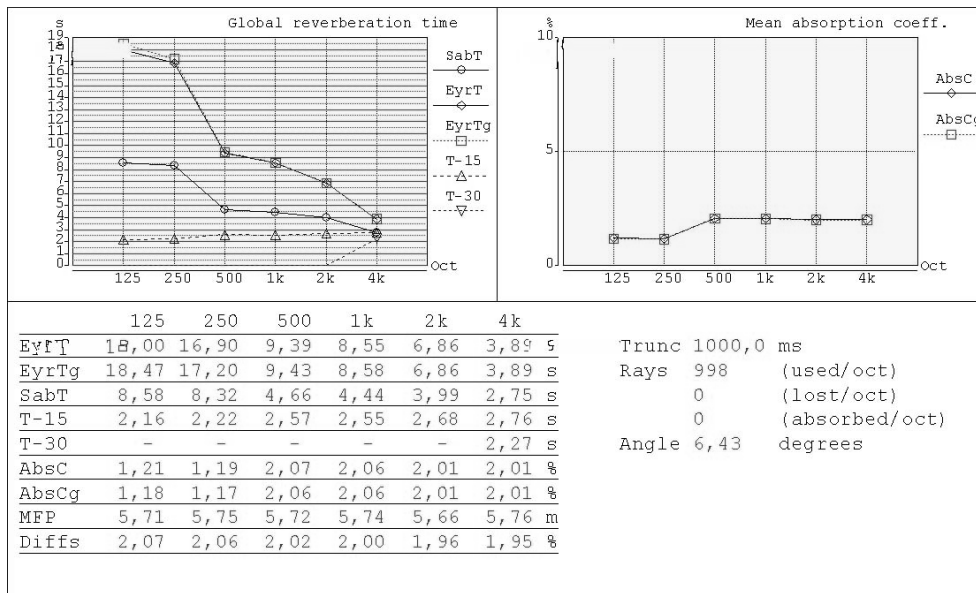
Σχήμα 5.1.4. Εισαγωγή Line-Array διάταξης [7].



Σχήμα 5.1.5. Προσδιορισμός της κατευθυντικότητας της πηγής [7].

Με τις κατάλληλες ρυθμίσεις μπορεί να οριστεί η κατευθυντικότητα της πηγής καθώς και το πολικό της διάγραμμα.

Αφού έχει σχεδιαστεί ο χώρος και έχουν οριστεί τα υλικά της κάθε επιφάνειας και οι ανακλαστικές και απορροφητικές ιδιότητές τους, τοποθετείται η πηγή. Υπάρχουν ρυθμίσεις (μήκος, πλάτος, ύψος) για την ακριβή τοποθέτησή της. Κατόπιν, ορίζεται το πλήθος των αποτελεσμάτων που θα εμφανιστούν κατά το τρέξιμο του προγράμματος.



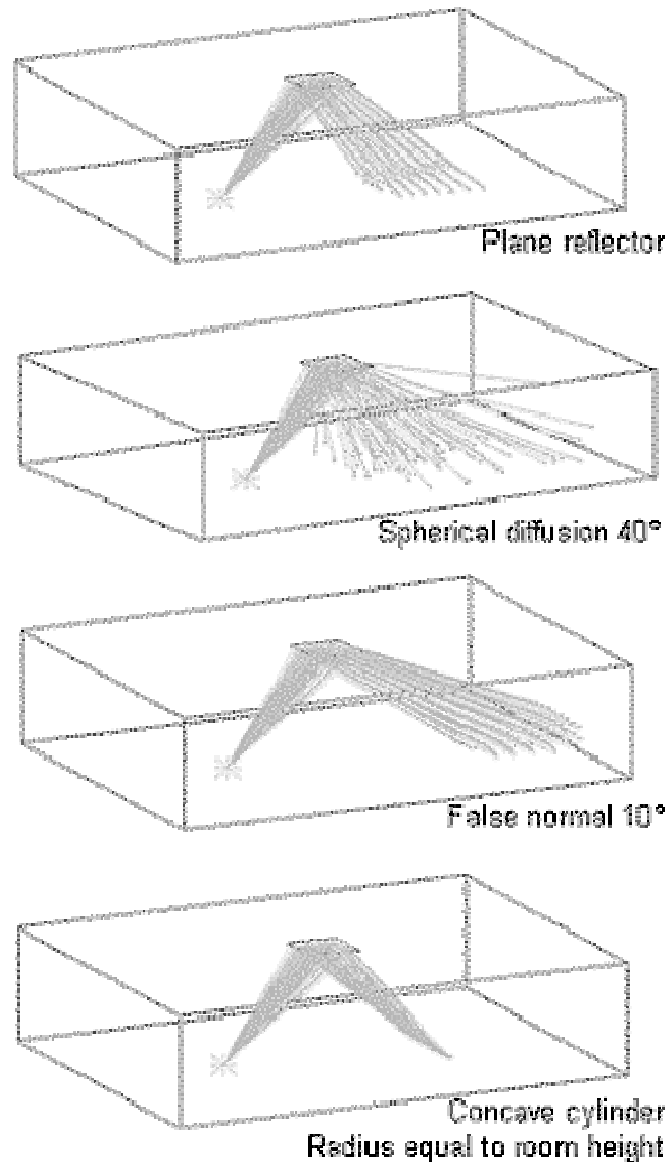
Σχήμα 5.1.6. Οθόνη αποτελεσμάτων Catt-Acoustic [7].

Η σχεδίαση του CATT-Acoustic βασίζεται στην τεχνική Ray tracing (ανίχνευση ακτινών). Σε τέτοια προγράμματα η διάδοση του ήχου προσομοιώνεται ως ένας μεγάλος αριθμός ακτινών που εκπέμπονται από την πηγή σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο δωματίου στον υπολογιστή. Η διάδοση των ακτινών, καθώς επίσης και η ανάκλαση, η διάχυση και η απορρόφηση υπολογίζονται στο πρόγραμμα. Το αποτέλεσμα όλων των ακτινών που χτυπούν ένα δέκτη ή μια σφαίρα, μπορεί να αναλυθεί με διάφορους τρόπους.

Οι διάφοροι τρόποι χρησιμοποιούνται για να παρουσιάσουν τις ακουστικές ατέλειες όπως η εστίαση και η ηχώ, βρίσκοντας τη βέλτιστη γωνία ενός ανακλαστήρα, την ομοιόμορφη κατανομή του ήχου κλπ. Η κατά τη διάρκεια ετών χρήση και η ανάπτυξη έχουν οδηγήσει σε πολλά χρήσιμα χαρακτηριστικά γνωρίσματα αυτής της τεχνικής [3].



Σχήμα 5.1.7. Τεχνική Ray-Tracing στην περιοχή ακροατηρίων. Συγκέντρωση στο οπίσθιο μέρος της αίθουσας σε χρονικό διάστημα 50-100ms μετά από τον άμεσο ήχο. Αίθουσα συναυλιών του Γκέτεμποργκ (Χτίστηκε το1935) [3].

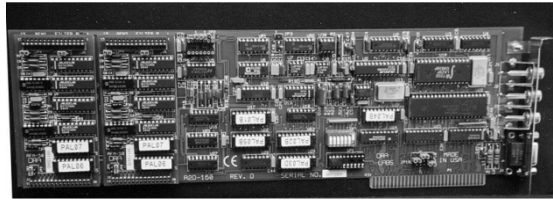


Σχήμα 5.1.8. Διαδρομές ακτίνων σε σχέση με έναν επίπεδο ανακλαστήρα [3].

Έχουν αναπτυχθεί οκτώ διαφορετικές ιδιότητες επιφάνειας, οι οποίες μπορούν να συνδυαστούν στην ίδια επιφάνεια δωματίων. Τα περισσότερα εμπορικά προγράμματα έχουν μόνο την απορρόφηση και την τυχαία διάχυση ως ιδιότητες. Η Ray-Tracing τεχνική έχει την απορρόφηση, τη διαφάνεια (transparency) και την απορρόφηση, την τυχαία διάχυση (σε περίπτωση πολυπλευρικής επιφάνειας), την ελεγχόμενη κυλινδρική διάχυση, την ελεγχόμενη σφαιρική διάχυση, μπορεί η επιφάνεια να οριστεί ως ένας αληθινός κοίλος κύλινδρος (ομοιόμορφη ανάκλαση σε κοίλη επιφάνεια) και ως ψεύτικος κανονικός κύλινδρος (επαναπροσανατολισμός της ανάκλασης που μιμείται μια πριονωτή επιφάνεια). Πολλοί από τους παραπάνω τύπους μπορούν να συνδυαστούν για τον προσδιορισμό μιας επιφάνειας. Αυτές οι ιδιότητες καθιστούν το πρόγραμμα ικανό να μιμηθεί σχεδόν οποιαδήποτε επιφάνεια. Η απλότητα στη μίμηση των διαφορετικών ιδιοτήτων επιφάνειας είναι το κύριο πλεονέκτημα της τεχνικής ανάκλασης ακτίνων [3].

5.2 MLSSA

Το MLSSA, το οποίο αναλύθηκε θεωρητικά σε προηγούμενο κεφάλαιο δημιουργήθηκε για να λύσει το πρόβλημα μετρήσεων σε θορυβώδη δωμάτια.



Σχήμα 5.2.1. Πλακέτα του MLSSA [4].

Η κάρτα του MLSSA περιλαμβάνει ένα, σχεδόν ροζ, φίλτρο ακρίβειας για γρηγορότερες και περισσότερες μετρήσεις θορύβου στα θορυβώδη δωμάτια. Το ροζ φίλτρο είναι επίπεδης απόκρισης σε όλες τις συχνότητες εκτός από τις χαμηλές που εμφανίζουν μία ελαφριά ενίσχυση. Αυτό το φίλτρο συγκρατεί και επιστρέφει στο σύστημα ένα ποσοστό του ερεθίσματος.

Η κάρτα του MLSSA υποστηρίζει συχνότητα δειγματοληψίας 96 kHz για εφαρμογές μεγαφώνων. Μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν και χαμηλότερες συχνότητες δειγματοληψίας.

Η τεχνική της ακολουθίας μεγίστου μήκους προϋποθέτει ένα υπολογιστή με την κάρτα του MLSSA και το λογισμικό του, μια ηχητική πηγή για να ηχοβολήσει το χώρο και ένα μικρόφωνο ακριβείας.

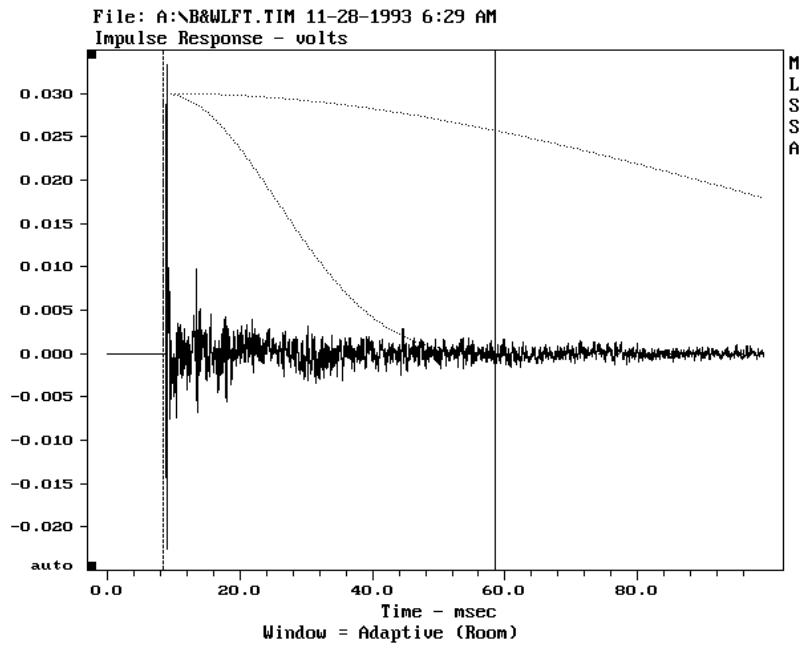


Σχήμα 5.2.2. Σύστημα MLSSA [5].



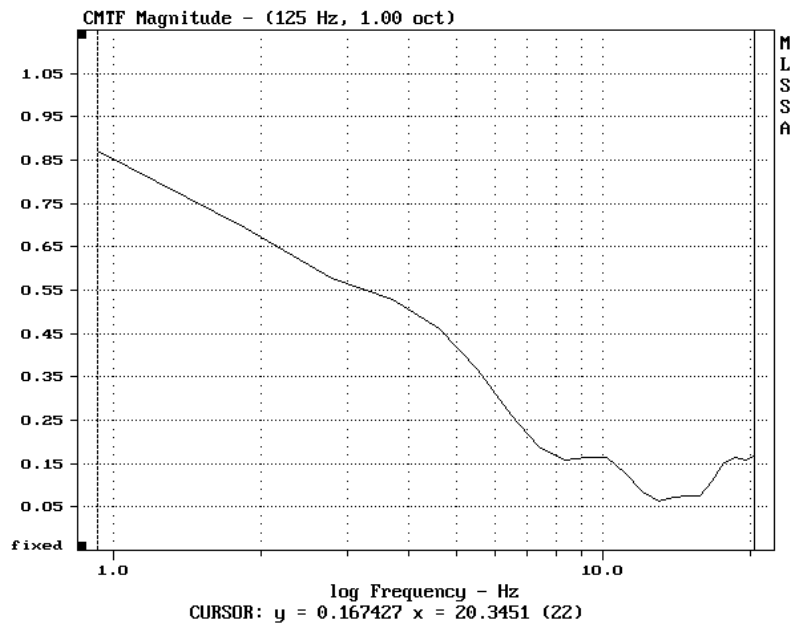
Σχήμα 5.2.3. Σφαιρική πηγή.

Η ολοκλήρωση της διαδικασίας μέτρησης με το MLSSA καταλήγει στην κρουστική απόκριση του σημείου μέτρησης.



Σχήμα 5.2.4. Κρουστική απόκριση συστήματος [6].

Μέσω του μετασχηματισμού Fourier υπολογίζεται η συχνοτική απόκριση του χώρου.



Σχήμα 5.2.5. Συχνοτική απόκριση συστήματος [6].

Από την κρουστική απόκριση μπορούν να υπολογιστούν και οι ακουστικοί δείκτες που ενδιαφέρουν.

6. ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ 2^ο ΓΥΜΝΑΣΙΟ -ΛΥΚΕΙΟ ΡΕΘΥΜΝΟΥ

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε στο 2^ο γυμνάσιο – λύκειο Ρεθύμνου, σε ένα κλειστό χώρο ο οποίος χρησιμοποιείται κατά κόρον ως γυμναστήριο αλλά και για διάφορες άλλες εφαρμογές, όπως ομιλίες και ελαφριά μουσική. Το φαινόμενο που παρατηρήθηκε, το οποίο αποτέλεσε και την αφορμή για την επέμβαση και ακουστική διόρθωση του χώρου, ήταν ο μεγάλος χρόνος αντήχησης.

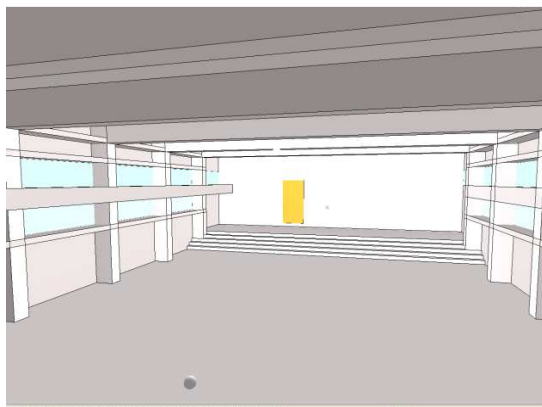
Αρχικά χρησιμοποιήθηκε ένα ηχόμετρο για τη μέτρηση του θορύβου βάθους. Έγινε βαθμονόμηση στο ηχόμετρο και πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Τα αποτελέσματα για τη μέτρηση του θορύβου βάθους παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

31,5Hz	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1KHz	2KHz	4KHz	8KHz	A
49dB	51,1dB	47,9dB	41,1dB	40,7dB	34,8dB	31,1dB	29,5dB	20,3dB	41,4dB

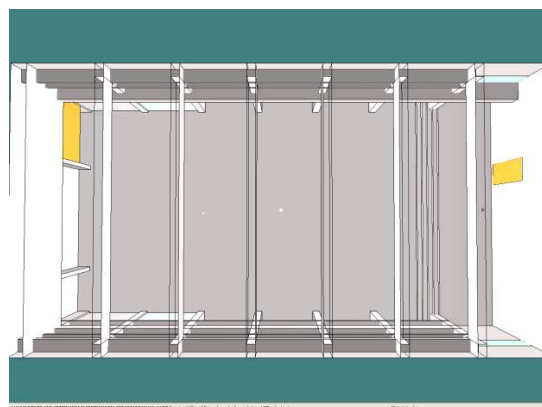
Πίνακας 6.1. Θόρυβος βάθους.

6.1 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΧΩΡΟΥ

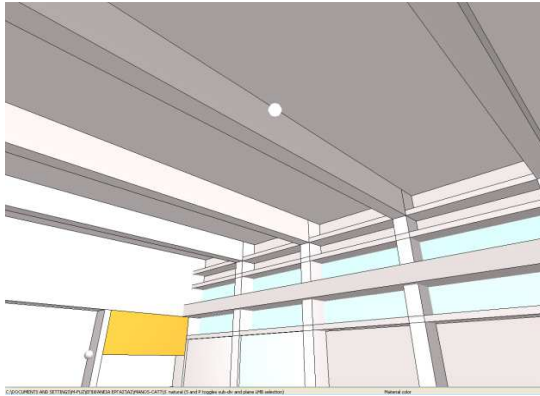
Το μεγαλύτερο μέρος της μελέτης βασίστηκε στο εικονικό μοντέλο του χώρου, το οποίο σχεδιάστηκε με το CATT-Acoustic. Αφού πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις των διαστάσεων του χώρου με ψηφιακό laser μετρητικό καταγράφηκαν και μεταφέρθηκαν στο CATT-Acoustic μέσω κώδικα. Η απεικόνιση του χώρου παρουσιάζεται παρακάτω.



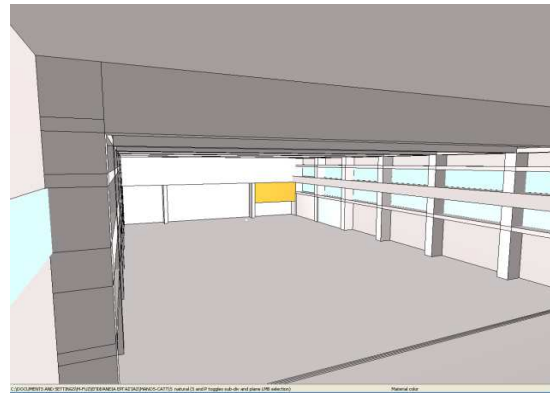
Σχήμα 6.1.1. Πλάνο εισόδου.



Σχήμα 6.1.2. Κάτοψη.

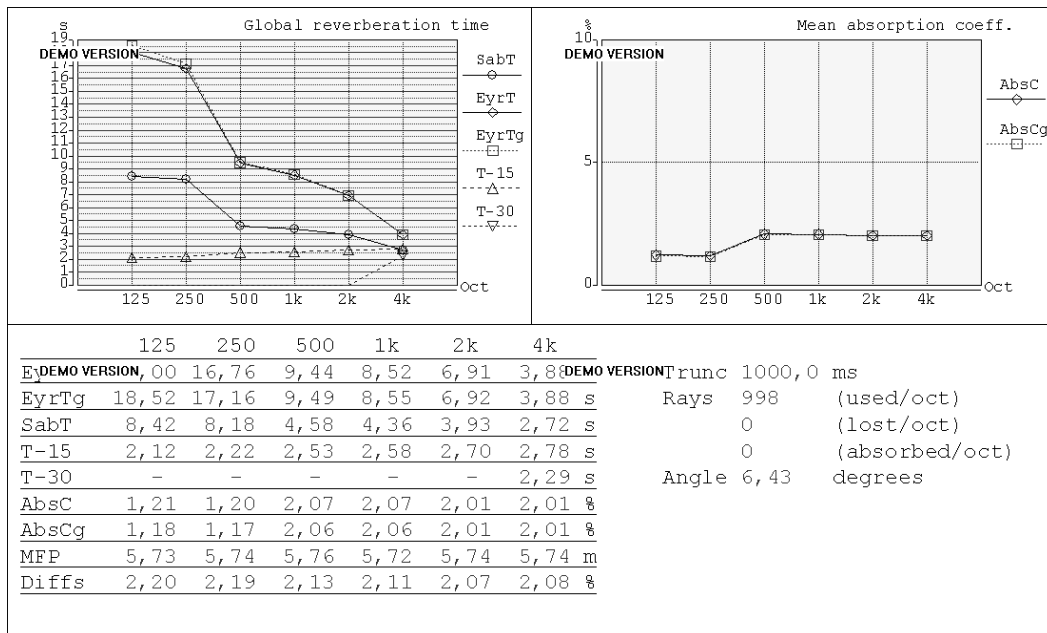


Σχήμα 6.1.3. Δοκοί και πλαϊνή επιφάνεια.

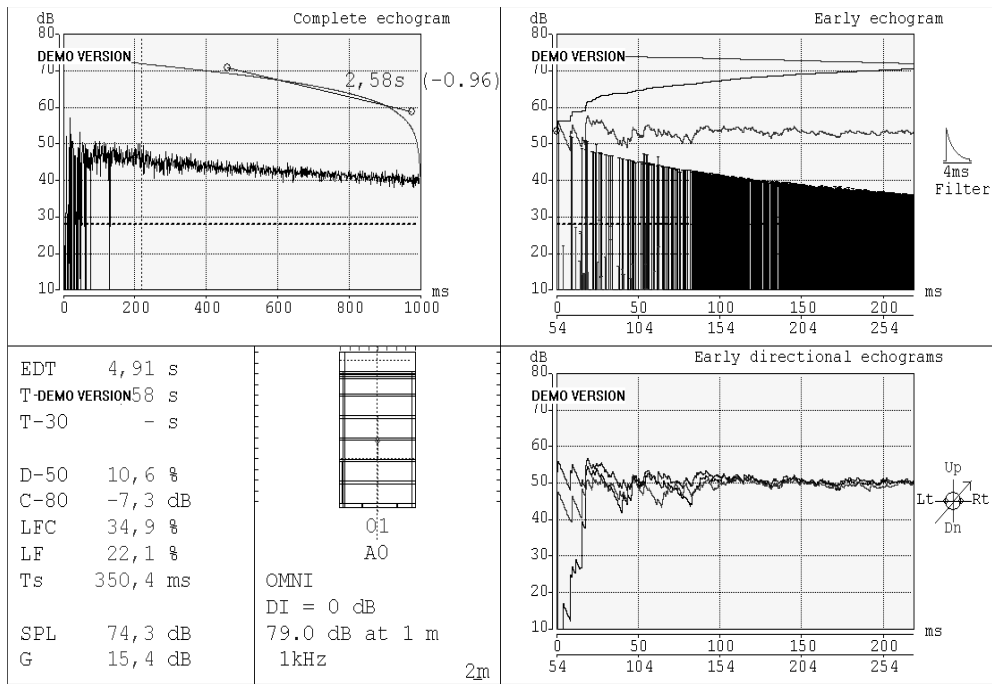


Σχήμα 6.1.4. Πίσω όψη.

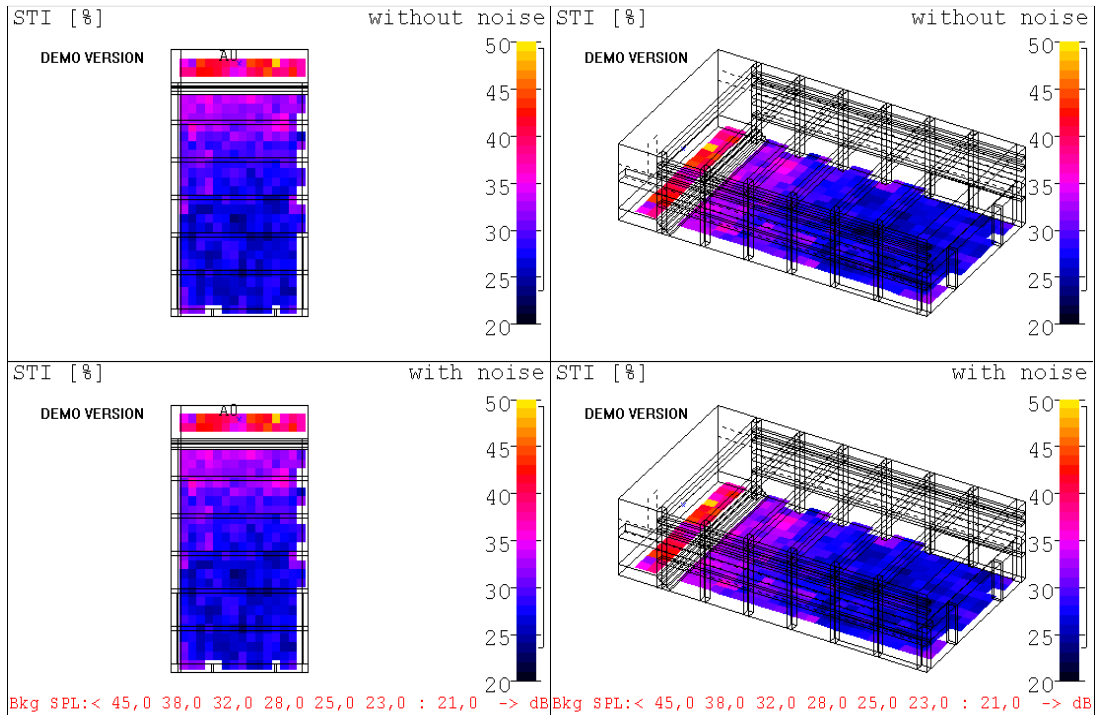
Τα ακουστικά αποτελέσματα που προέκυψαν για το χώρο επαλήθευσαν το MLSSA για τα επίπεδα της αντήχησης μέσα στο χώρο. Μεγάλο χρόνο αντήχησης με τους δείκτες καταληπτότητας σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα.



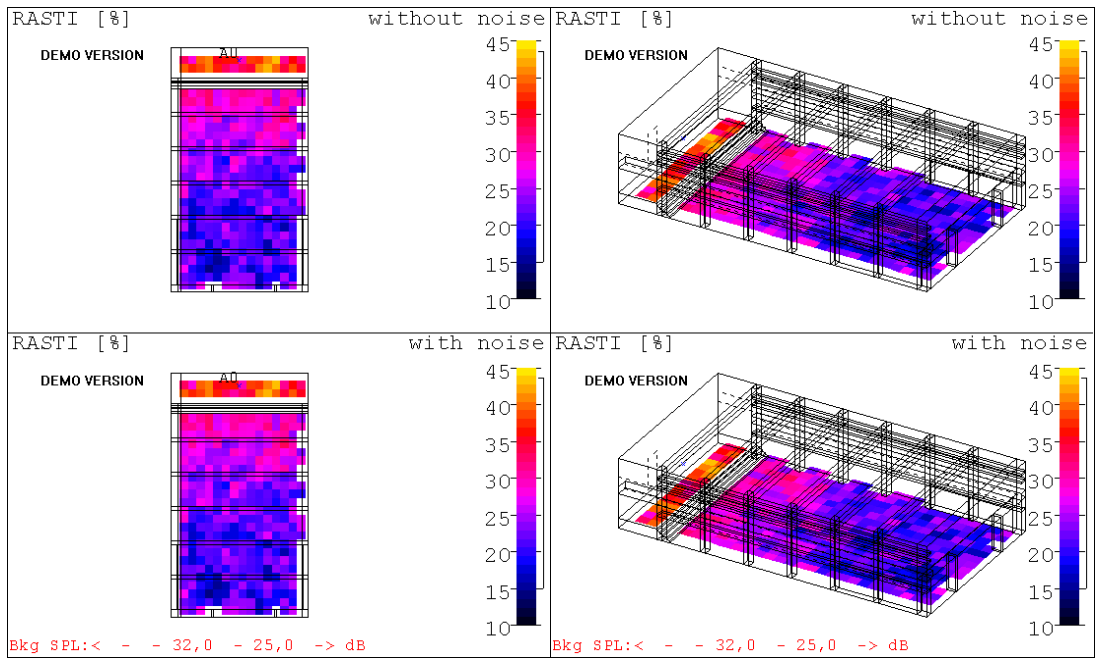
Σχήμα 6.1.5. Χαρακτηριστικά χώρου πριν τη μετατροπή



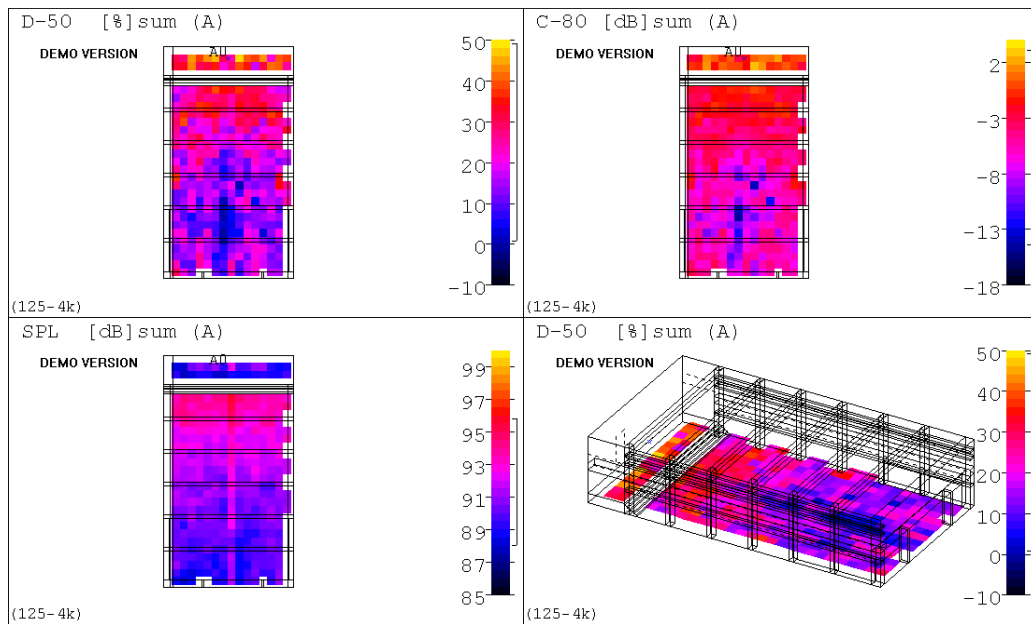
Σχήμα 6.1.6. Χαρακτηριστικά χώρου πριν τη μετατροπή.



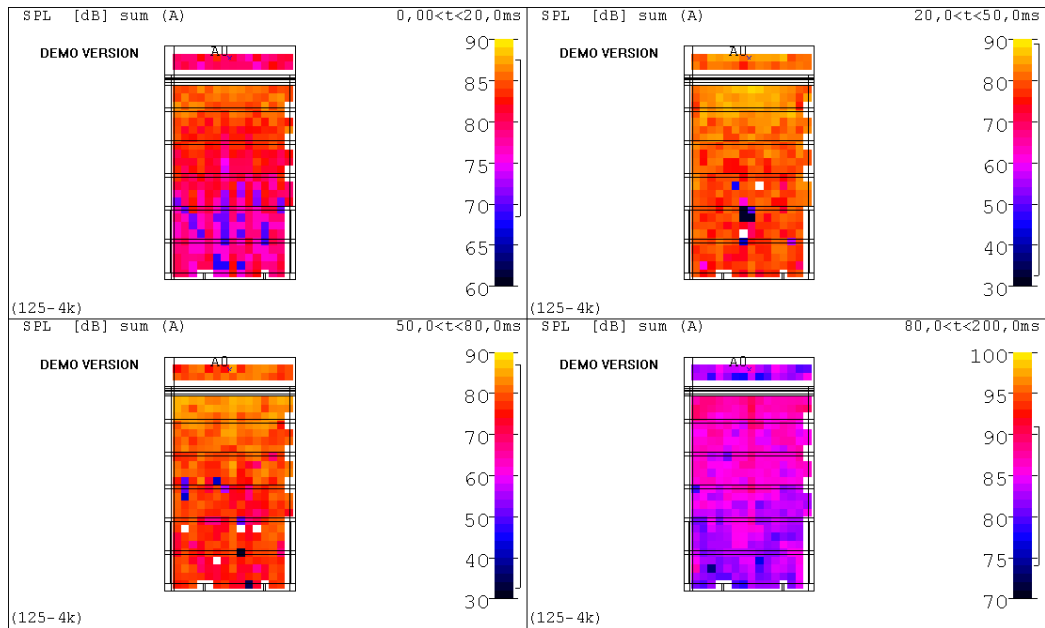
Σχήμα 6.1.7. Δείκτης καταληπτότητας ομιλίας (STI) πριν τη μετατροπή.



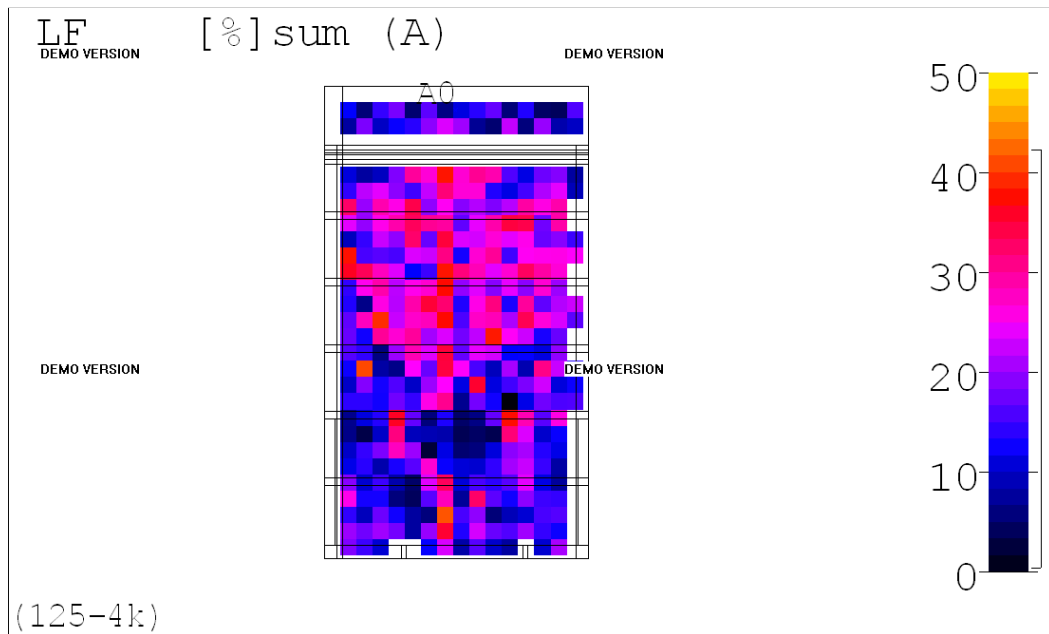
Σχήμα 6.1.8. Δείκτης καταληπτότητας ομιλίας (RASTI) πριν τη μετατροπή.



Σχήμα 6.1.9. Δείκτης Διακριτότητας (D50) και δείκτης διάχυσης (C80) πριν τη μετατροπή.



Σχήμα 6.1.10. Κατανομή στάθμης SPL στο χώρο πριν τη μετατροπή.



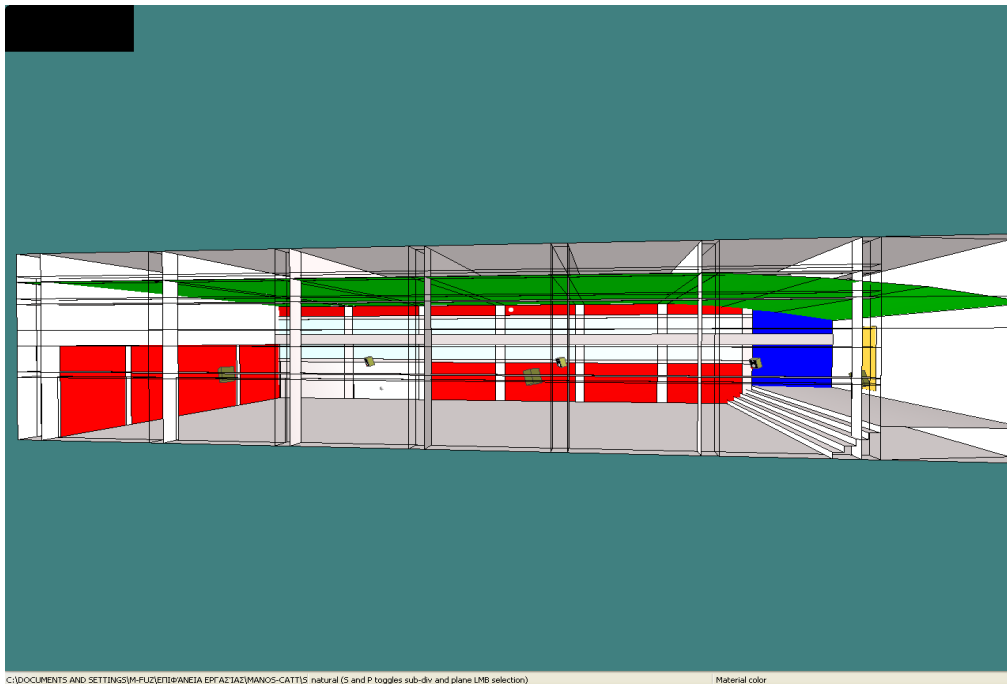
Σχήμα 6.1.11. Κατανομή πλευρικών ανακλάσεων στο χώρο πριν τη μετατροπή.

Βλέποντας αυτά τα αποτελέσματα κρίνεται αναγκαία η επέμβαση στο χώρο, ο οποίος δεν ενδείκνυται, στην αρχική του μορφή, για τις προοριζόμενες χρήσεις. Μια πρώτη και αποτελεσματική ιδέα είναι η προσθήκη ψευδοροφής. Επιλέχθηκε η προσθήκη ψευδοροφής ορυκτών ινών πάχους 16mm. Αυτή η κατασκευή δίνει αρκετά μεγάλη απορρόφηση η οποία παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

125Hz	250Hz	500Hz	1KHz	2KHz	4KHz
0.38	0.28	0.39	0.59	0.64	0.65

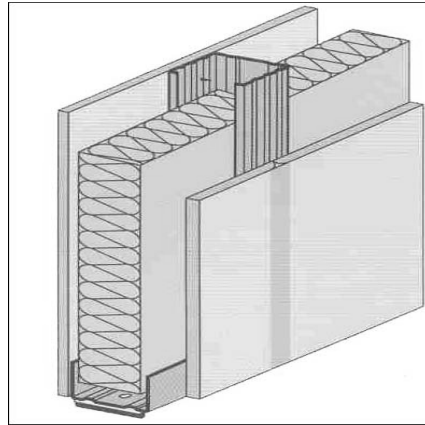
Πίνακας 6.1.1. Συντελεστής απορρόφησης πλάκας ορυκτών ινών.

Η ψευδοροφή θα εκτείνεται σε όλη την οροφή και θα ξεκινήσει 3,67 m πάνω από τη σκηνή. Θα φτάσει με μια μικρή ανοδική κλίση μέχρι το δεύτερο δοκάρι της οροφής, μετά θα ευθυγραμμιστεί κάτω από τα δοκάρια του ταβανιού και θα είναι επίπεδη σε όλο το υπόλοιπο μήκος.



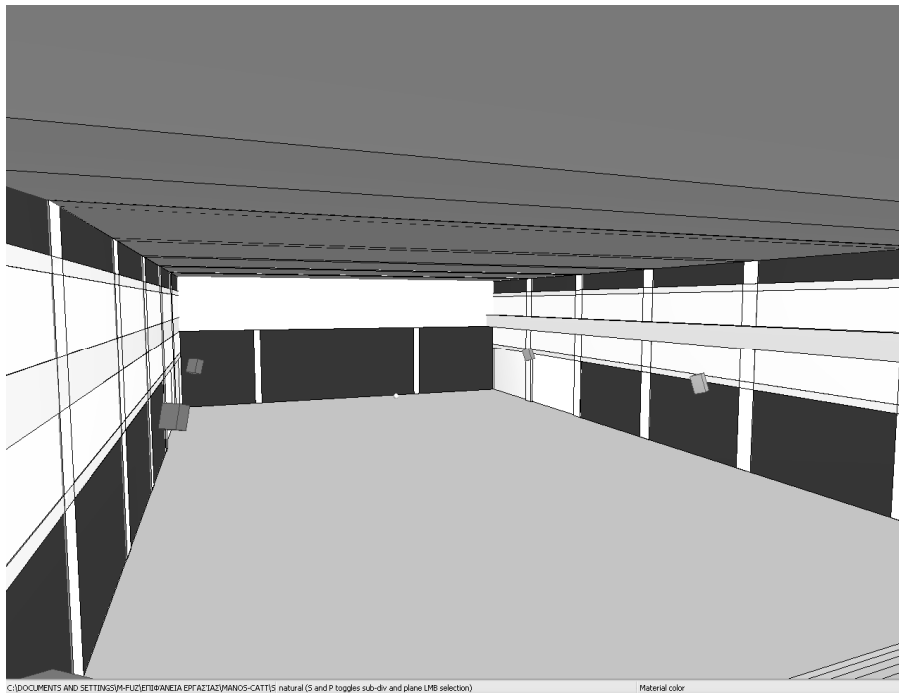
Σχήμα 6.1.12. Ψευδοροφή ορυκτών ινών (με πράσινο χρώμα).

Η επόμενη επέμβαση στο χώρο ήταν το κλείσιμο διάφορων κοιλοτήτων. Υπήρχαν πολλές συμμετρικές κοιλότητες που δημιουργούσαν ηχητικές συγκεντρώσεις σε πολλά σημεία του χώρου. Για να επιτευχθεί μια καλή απορρόφηση και να κλείσουν όλες οι κοιλότητες προτείνεται μια κατασκευή που περιλαμβάνει δύο γυροσανίδες των 13mm σε μεταλλικό σκελετό που διασφαλίζει ένα μεταξύ τους κενό 50mm. Το κενό αυτό προτείνεται να καλυφθεί με ορυκτοβάμβακα.



Σχήμα 6.1.13. Κατασκευή γυψοσανίδας για κάλυψη κοιλοτήτων [10].

Το επόμενο που έπρεπε να γίνει ήταν το κλείσιμο των κοιλοτήτων και στα σημεία που υπήρχαν παράθυρα. Για την κάλυψη των συγκεκριμένων κοιλοτήτων καθώς και την απρόσκοπτη είσοδο φωτός στο χώρο προτείνεται να προστεθούν επιπλέον τζάμια πλεξιγκλάς πάχους 10mm. Το πλεξιγκλάς πρέπει να τοποθετηθεί με την ίδια λογική της γυψοσανίδας που αναφέρθηκε παραπάνω. Ο τοίχος δηλαδή στο τέλος της κατασκευής πρέπει να είναι της μορφής που φαίνεται στο σχήμα 6.1.14.



Σχήμα 6.1.14. Τοίχος επίπεδος, μετά την προσθήκη γυψοσανίδας και πλεξιγκλάς.

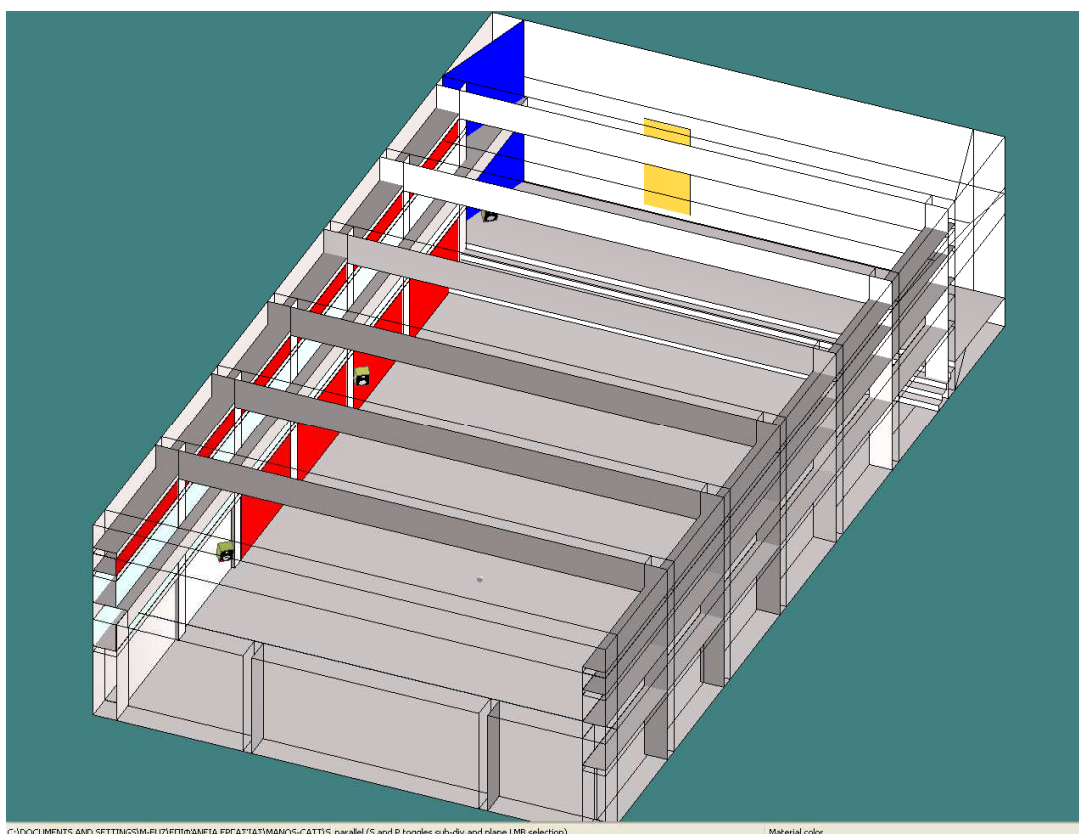
Η τελευταία επέμβαση στο χώρο προτείνεται πάλι για το χώρο της σκηνης. Για την αποφυγή ανακλάσεων επί της σκηνης καθώς και οδήγησής του στο χώρο του ακροατηρίου, προτείνεται η τοποθέτηση δύο επιφανειών γυψοσανίδας με επικάλυψη

λεπτής μοκέτας. Ο συντελεστής απορρόφησής τους παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35

Πίνακας 6.1.2. Συντελεστής απορρόφησης λεπτής μοκέτας.

Οι επιφάνειες αυτές εκτείνονται σε ύψος από το επίπεδο της σκηνης μέχρι την ψευδοροφή. Σε πλάτος ξεκινάνε ένα μέτρο από τον τοίχο που βρίσκεται η πόρτα και φτάνουν στα 3,64m στην επιφάνεια των παραθύρων, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.1.15..



Σχήμα 6.1.15. Πλαϊνές (μπλέ) επιφάνειες.

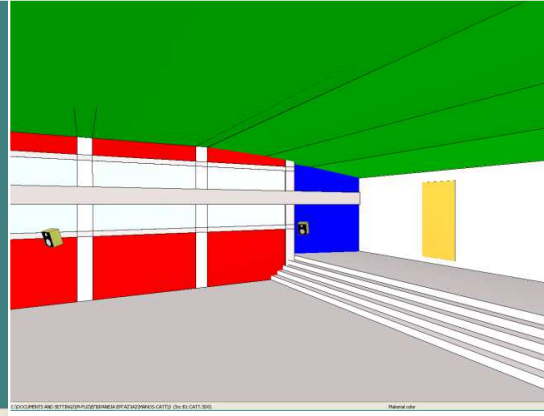
Αφού βελτιώθηκε η ακουστική του χώρου με βάση τη σφαιρική πηγή, τοποθετήθηκαν τα μεγάφωνα έτσι ώστε να δημιουργηθεί μια όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη κατανομή της ηχητικής ενέργειας εντός του χώρου. Μετά από διαφορετικούς συνδυασμούς τοποθετήθηκαν έξι μεγάφωνα. Όλα τα μεγάφωνα τοποθετήθηκαν σε ύψος 2.30m (στο πρώτο δοκάρι) και περίπου 1m από τον τοίχο (με βραχίονα). Το πρώτο ζεύγος βρίσκεται σε απόσταση 3.65m από τον τοίχο (της

εισόδου). Το δεύτερο 13m και το τρίτο στα 23m. Αντίστοιχα, τα ζεύγη βρίσκονται στα 8m, 18m, 27m κατά μήκος της αίθουσας. Είναι γυρισμένα δηλαδή προς το κέντρο της αίθουσας, έτσι ώστε οι κώνοι τους να ευθυγραμμίζονται με αυτές τις αποστάσεις.

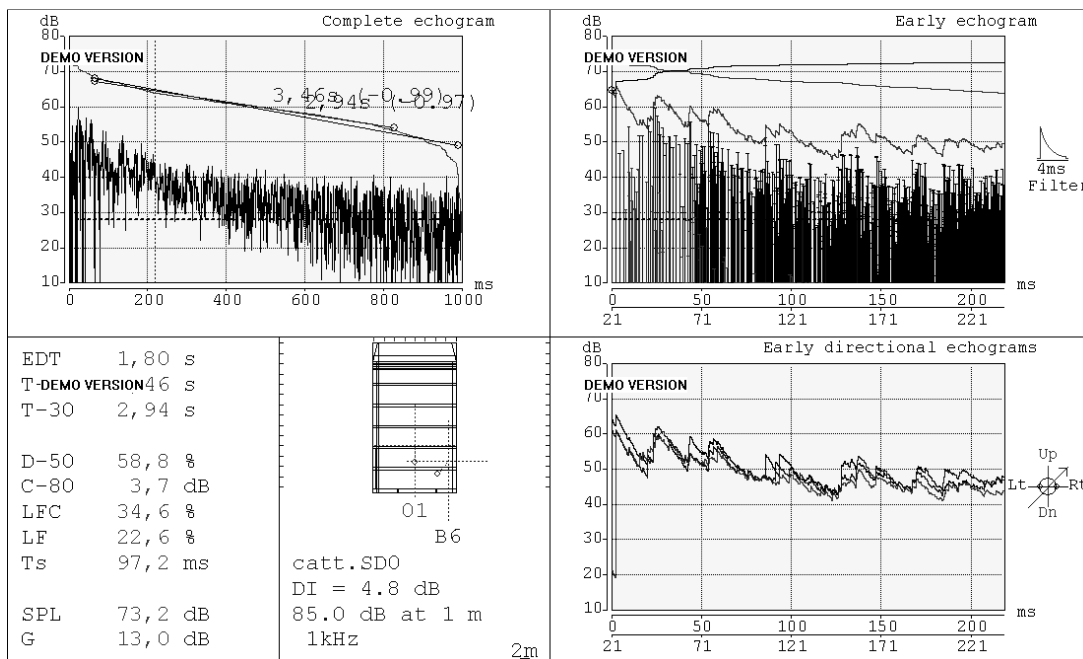
Το αποτέλεσμα της σχεδίασης καθώς και τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται παρακάτω.



Σχήμα 6.1.16. Χώρος μετά την τροποποίηση.

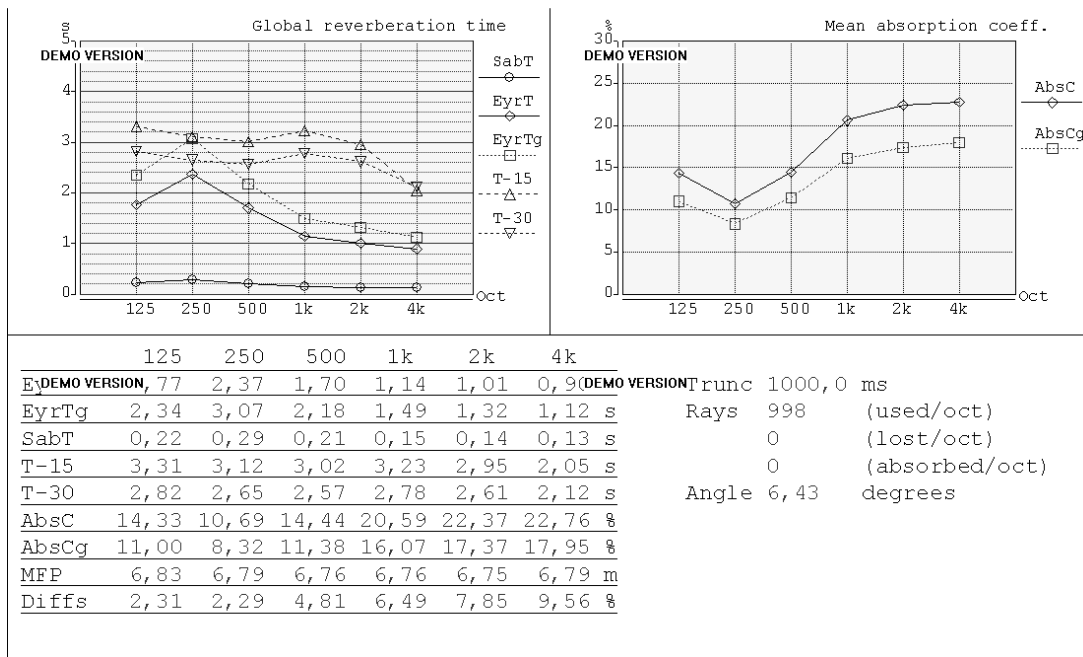


Σχήμα 6.1.17. Μεγάφωνα και κλήση επιφάνειας.

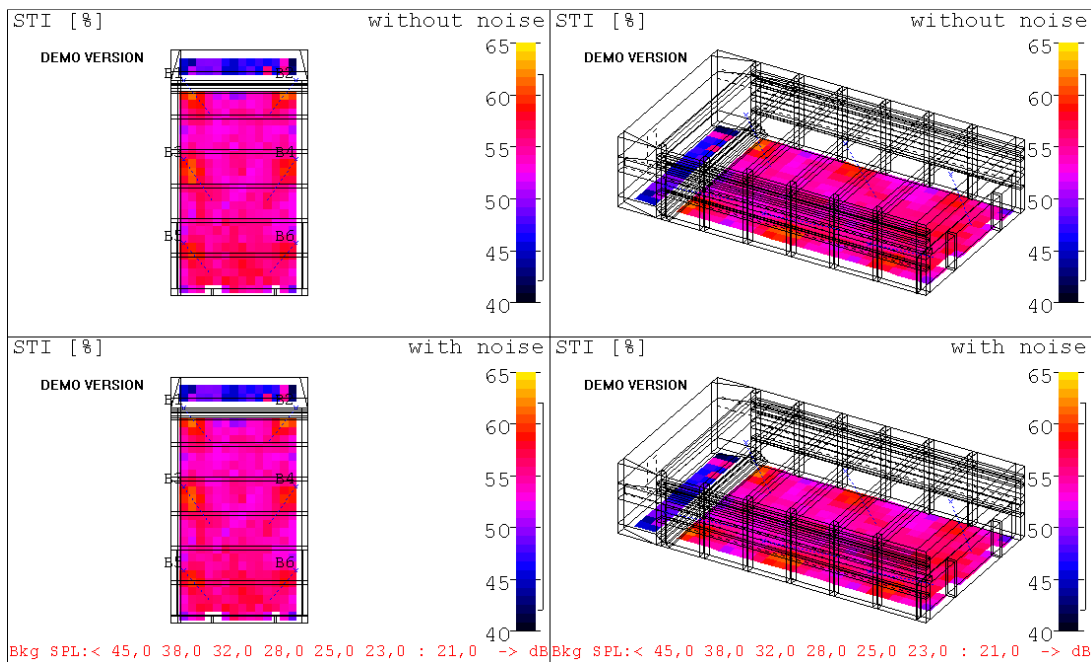


Σχήμα 6.1.18. Χαρακτηριστικά χώρου μετά τη μετατροπή.

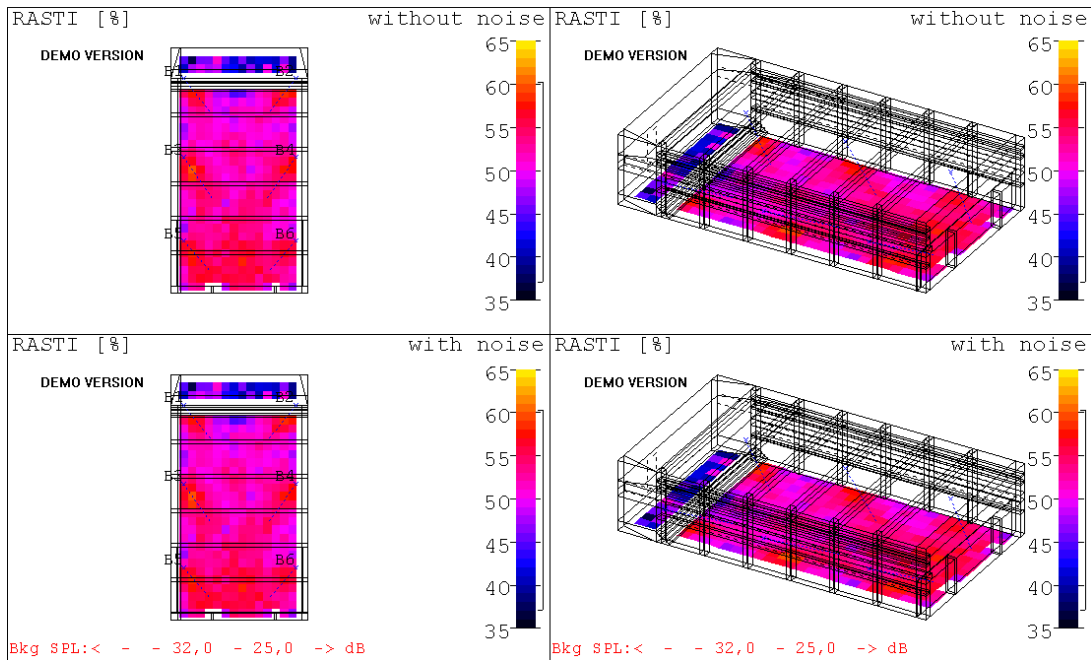
Στα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρείται η αισθητή βελτίωση των τιμών **C80**, **D50** καθώς και η μείωση των καθυστερημένων ανακλάσεων. Επίσης, παρατηρείται πτώση του χρόνου αντήχησης. Η τροποποίηση του χώρου μέχρι εδώ εκτιμάται ως επιτυχής.



Σχήμα 6.1.19. Χαρακτηριστικά χώρου μετά τη μετατροπή.

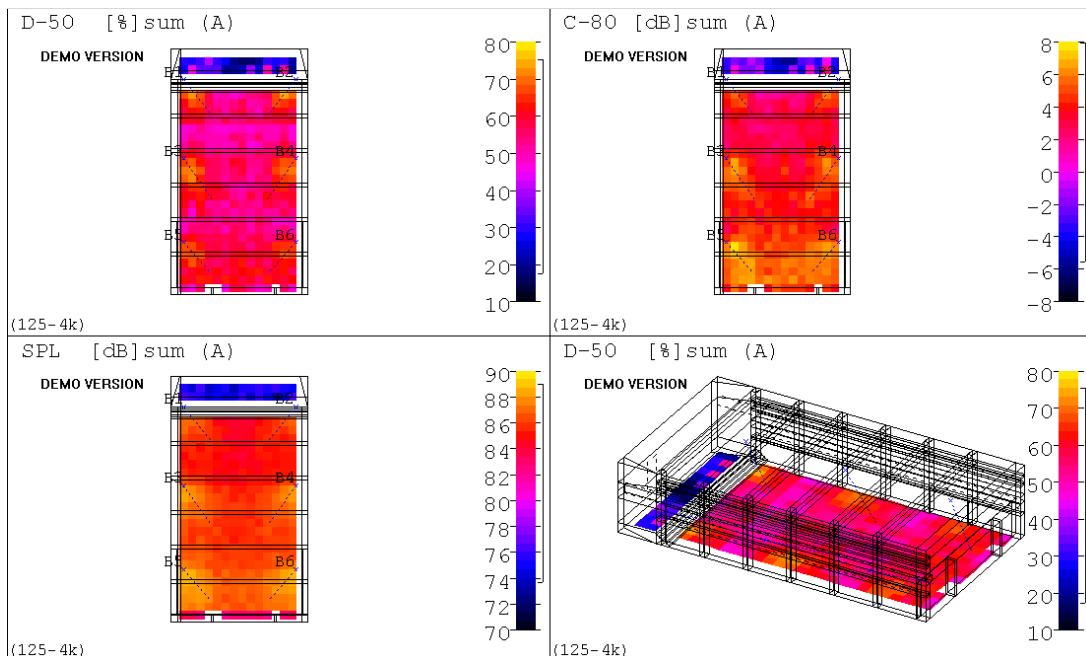


Σχήμα 6.1.20. Δείκτης καταληπτότητας ομιλίας (STI) μετά τη μετατροπή.



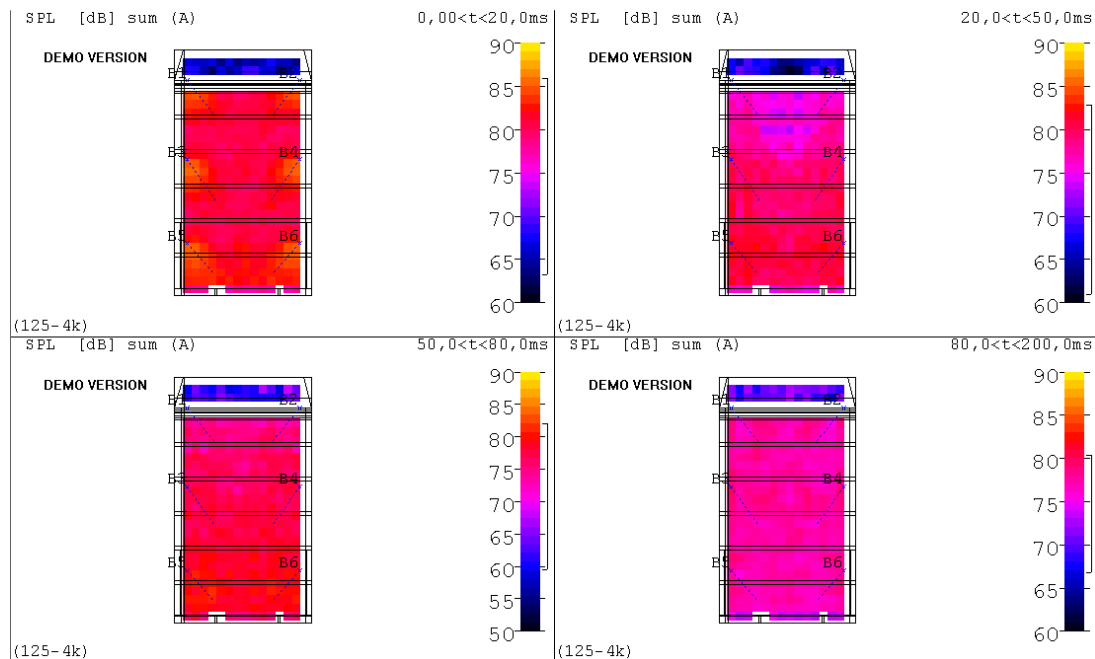
Σχήμα 6.1.21. Δείκτης καταληπτότητας ομιλίας (RASTI) μετά τη μετατροπή.

Παρατηρώντας τα σχήματα 6.1.20. και 6.1.21. είναι εμφανής η αρκετά καλή ομοιομορφία στην κατανομή των δεικτών καταληπτότητας στο χώρο. Επίσης βλέποντας τις τιμές τους, καταλήγουμε στο ότι έχουν επιτευχθεί οι προτεινόμενες τιμές. Να σημειωθεί ότι τα παραπάνω οφείλονται στις τροποποιήσεις του χώρου και τη συγκεκριμένη τοποθέτηση των μεγαφώνων.



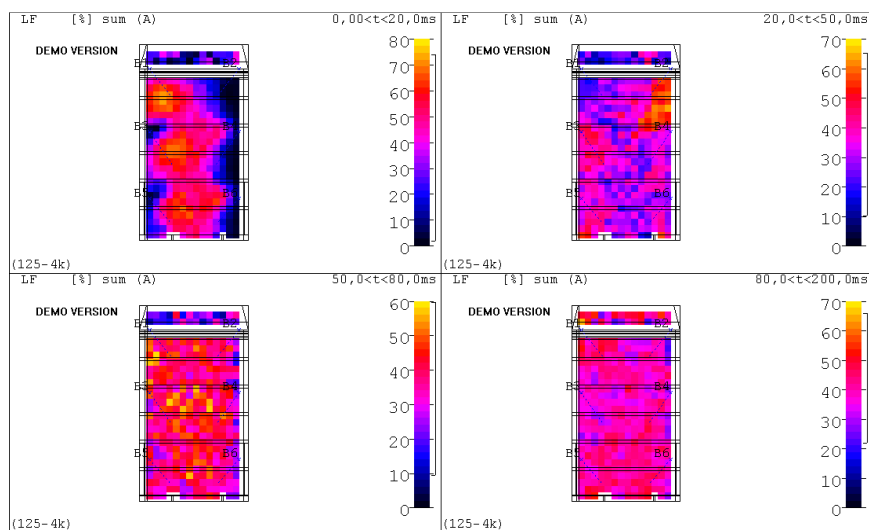
Σχήμα 6.1.22. Δείκτης διακρίτοτητας (D50) και δείκτης διάχυσης (C80) μετά τη μετατροπή.

Στο σχήμα 6.1.22. παρουσιάζονται ο δείκτης διακριτότητας (**D50**) και δείκτης διαύγειας (**C80**) μετά τη μετατροπή του χώρου. Σύμφωνα με το τρίτο κεφάλαιο του θεωρητικού μέρους οι τιμές κυμαίνονται σε ικανοποιητικά επίπεδα. Φαίνεται ότι ο δείκτης διαύγειας (**C80**) κυμαίνεται στις προβλεπόμενες τιμές (4-9) και ο δείκτης διακριτότητας (**D50**) από 55% και πάνω.



Σχήμα 6.1.23. Κατανομή στάθμης SPL στο χώρο μετά τη μετατροπή.

Στο σχήμα 6.1.23. φαίνεται η ομοιόμορφη κατανομή της στάθμης ακουστικής πίεσης (SPL) σε τέσσερα στάδια, από 0 έως 200ms. Να σημειωθεί ότι πέραν της ομοιόμορφης κατανομής έπρεπε να ληφθεί υπ' όψιν και η τιμή της ακουστικής πίεσης σε σχέση με το θόρυβο βάθους (41,4dB). Είναι εμφανές ότι έχει υπερκαλυφθεί επαρκώς ο θόρυβος βάθους σε όλα τα σημεία του χώρου.



Σχήμα 6.1.24. Κατανομή πλευρικών ανακλάσεων στο χώρο μετά τη μετατροπή.

Στο σχήμα 6.1.24. παρουσιάζεται η εξέλιξη των πλευρικών ανακλάσεων για τα πρώτα 200ms. Αυτό που παρατηρείται είναι ότι ενώ αυξάνεται η στάθμη και η πυκνότητά τους, η στάθμη τους δεν ξεπερνάει τα 40dB.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα επιτεύχθηκε ο αρχικός στόχος. Η αίθουσα ενδείκνυται για ομιλία και μουσική, καθώς και για την πιο συχνή χρήση της, σαν κλειστό γυμναστήριο. Να σημειωθεί ότι στόχος ήταν να διεκπεραιωθεί η μελέτη με όσο το δυνατόν χαμηλότερο κόστος. Αυτό καθοδήγησε το σχεδιασμό και κατ' επέκταση τα αποτελέσματα.

6.2 ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΟΣΤΟΥΣ ΑΥΤΩΝ

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τις τροποποιήσεις ήταν γυψοσανίδα 13mm, πετροβάμβακας 50mm, πλεξιγκλάς 6mm, πλαίσια ορυκτών ινών 16mm και λεπτή μοκέτα.

- Ψευδοροφή.
Για την ψευδοροφή χρησιμοποιήθηκαν 477,2m² από πλάκες ορυκτών ινών κόστους 9.000,00 €.
- Πλεξιγκλάς.
Για τις επιφάνειες των παραθύρων χρησιμοποιήθηκαν 84,4m² από πλεξιγκλάς κόστους 255,00 €.
- Κατασκευή με διπλή γυψοσανίδα και ορυκτοβάμβακα στη μέση.
Για την αποφυγή των κοιλοτήτων με την κατασκευή διπλής γυψοσανίδας σε μεταλλικό σκελετό και ορυκτοβάμβακα στο κενό χρησιμοποιήθηκαν 292,86m² γυψοσανίδας πάχους 13mm και 146,43m² ορυκτοβάμβακα πάχους 50mm. Κόστος 3.880,00 €.
- Γυψοσανίδα με επίστρωση λεπτής μοκέτας.
Για τις επιφάνειες που χρησιμοποιήθηκαν πλαγίως της σκηνής χρησιμοποιήθηκε γυψοσανίδα 9,5mm σε μεταλλικό σκελετό 50,4m² και αντίστοιχα επίστρωση μοκέτας πάνω στη γυψοσανίδα 50,4m². Κόστος 450,00 €.
- Μεγάφωνα.
Ο χώρος θα χρειαστεί άλλο ένα ζευγάρι μεγάφωνα, (dB technologies-Arena 10), αξίας 658,00 €.

Συνολικό κόστος κατασκευής 14.243,00 €.

Στις τιμές δε συμπεριλαμβάνονται οι εργατικές αμοιβές, τα μεταφορικά καθώς και ο Φ.Π.Α.

7. 15^ο ΔΗΜΟΤΙΚΟ ΣΧΟΛΕΙΟ ΡΕΘΥΜΝΟΥ



Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιώντας ειδικά υπολογιστικά συστήματα και λαμβάνοντας υπ' όψιν τη χρήση του χώρου που περιλαμβάνει εκδηλώσεις ομιλίας και συναυλίες πραγματοποιήθηκε ακουστική μελέτη με σκοπό να επιτευχθούν τα εξής:

- 1) Τοποθέτηση μόνιμης ηχητικής εγκατάστασης για τη διασφάλιση της αποφυγής ακυρωτικών συμβολών και της ομοιόμορφης ηχητικής κάλυψης του χώρου.
- 2) Ιδανικός ρυθμός μείωσης του ηχητικού πεδίου.
- 3) Βέλτιστα επίπεδα καθαρότητας και ευκρίνειας της μουσικής και της ομιλίας.
- 4) Υπολογισμός του κόστους της προτεινόμενης ακουστικής τροποποίησης του χώρου.

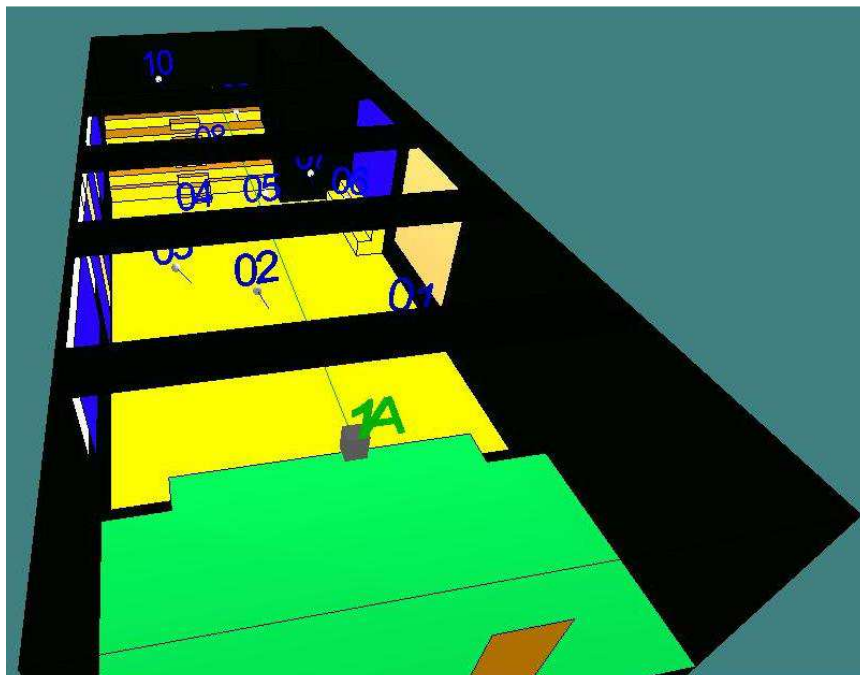
7.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ

Η αρχική μορφή του χώρου είναι αυτή που φαίνεται στο σχήμα 7.1.1.



Σχήμα 7.1.1. Ο χώρος εκδηλώσεων του σχολείου.

Με τη χρήση του προγράμματος CATT-Acoustic, σχεδιάστηκε ο χώρος σε τρισδιάστατη μορφή, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.1.2.



Σχήμα 7.1.2. Προσομοίωση του χώρου στο CATT-Acoustic.

Παρατηρώντας το σχήμα 7.1.2, διακρίνονται τα εξής υλικά:

- Μάρμαρο (κίτρινο χρώμα)
- Ξύλινα καθίσματα και πόρτα(καφέ χρώμα)
- Κουρτίνα (μπλε χρώμα)
- Αναρτημένο ύφασμα (μπεζ χρώμα)
- Παράθυρο (λευκό χρώμα)
- Μοκέτα (πράσινο χρώμα)
- Τσιμέντο (μαύρο χρώμα)

Για την πλήρη σχεδίαση του χώρου και για τον υπολογισμό των απαιτούμενων ακουστικών παραμέτρων είναι απαραίτητη και η παράθεση των συντελεστών απορρόφησης και διάχυσης στον κώδικα του προγράμματος. Οι συντελεστές αυτοί βρέθηκαν μετά από βιβλιογραφική αναζήτηση.

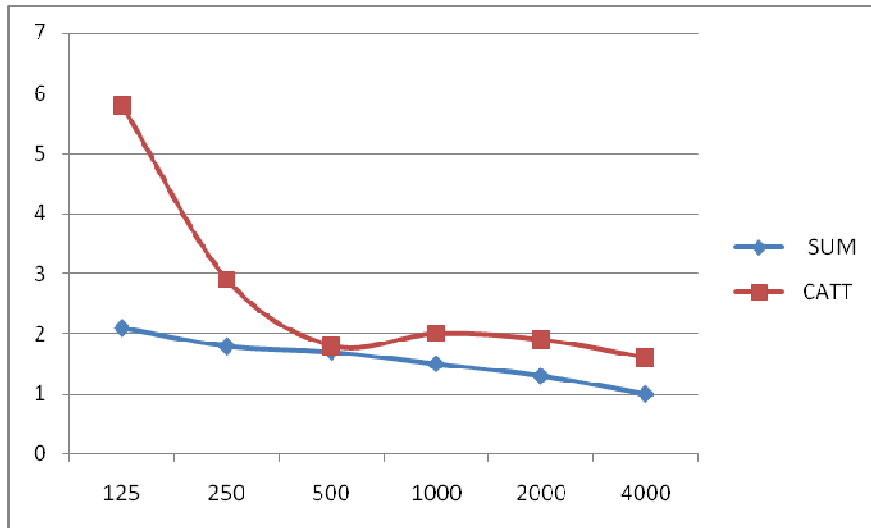
Για την επαλήθευση των σωστών υπολογισμών των ακουστικών παραμέτρων από το πρόγραμμα, πραγματοποιήθηκαν κατάλληλες ακουστικές μετρήσεις στο χώρο με το σύστημα MLSSA. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν σε διαφορετικά σημεία του χώρου, οι τοποθεσίες των οποίων φαίνονται στο σχήμα 7.1.2.

Στους πίνακες 1 και 2 παρατίθενται οι τιμές του χρόνου αντήχησης, όπως προέκυψαν από τις μετρήσεις της άδειας αίθουσας με το σύστημα MLSSA. Ακολουθώς, αυτές οι τιμές συγκρίνονται με αυτές που υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα CATT-Acoustic.

Συχνότητα	Θ1	Θ2	Θ3	Θ4	Θ5	Θ6	Θ7	Θ8	Θ9	Θ10	M.O.
125	2,1	2	2,2	1,8	2,1	2,2	2,1	2,3	2,3	2	2,1
250	1,5	1,7	1,7	1,7	1,6	3,2	1,5	1,6	1,7	1,6	1,8
500	3,2	1,9	1,7	1	1,3	1,8	1,5	1,5	1,6	1,5	1,7
1000	1,1	1,4	1,3	1,9	1,4	1	1,3	1,6	1,5	1,9	1,5
2000	1,1	1,2	1,1	1,4	1,3	1,2	1,3	1,3	1,6	1,5	1,3
4000	1	1	1	1,2	1,1	1	1	1	1	1	1

Πίνακας 7.1. Οι τιμές του χρόνου αντήχησης της αίθουσας για δέκα διαφορετικά σημεία μέτρησης με το σύστημα MLSSA.

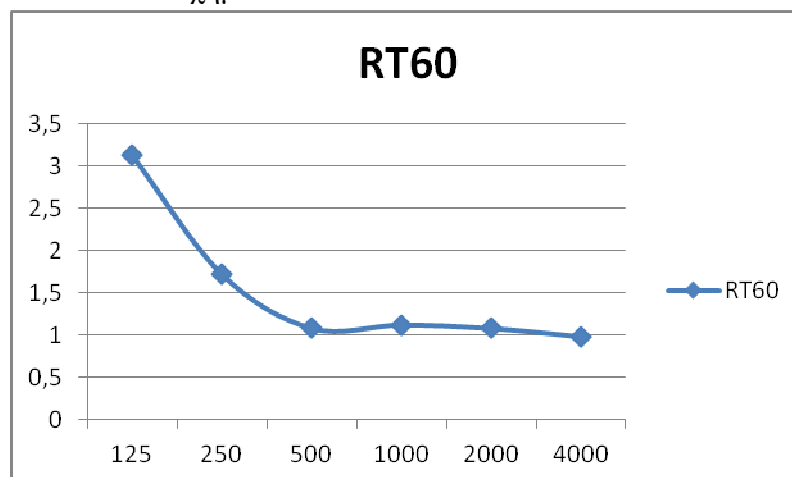
Στο σχήμα 7.1.3. γίνεται σύγκριση των τιμών του χρόνου αντήχησης που προέκυψαν από τη χρήση του συστήματος MLSSA με αυτές που προέκυψαν από το πρόγραμμα CATT-Acoustic.



Σχήμα 7.1.3. Γραφική απεικόνιση του χρόνου αντήχησης ως προς τη συχνότητα-σύγκριση τιμών από το MLSSA με τις τιμές από την προσομοίωση του CATT-Acoustic.

Σύμφωνα με το σχήμα 7.1.3. οι τιμές του χρόνου αντήχησης που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους δεν παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ τους στη συχνοτική περιοχή από 500 έως 4000 Hz. Στην περιοχή 125-250 Hz οι αποκλίσεις οφείλονται στο γεγονός ότι, ενώ στην πραγματικότητα ο χώρος δεν είναι τελείως κλειστός (δεν υπάρχουν περατωτικές επιφάνειες σε όλες τις πλευρές του χώρου), το πρόγραμμα CATT-Acoustic βάση του σχεδιασμού του χώρου πραγματοποίησε την προσομοίωση θεωρώντας το χώρο κλειστό.

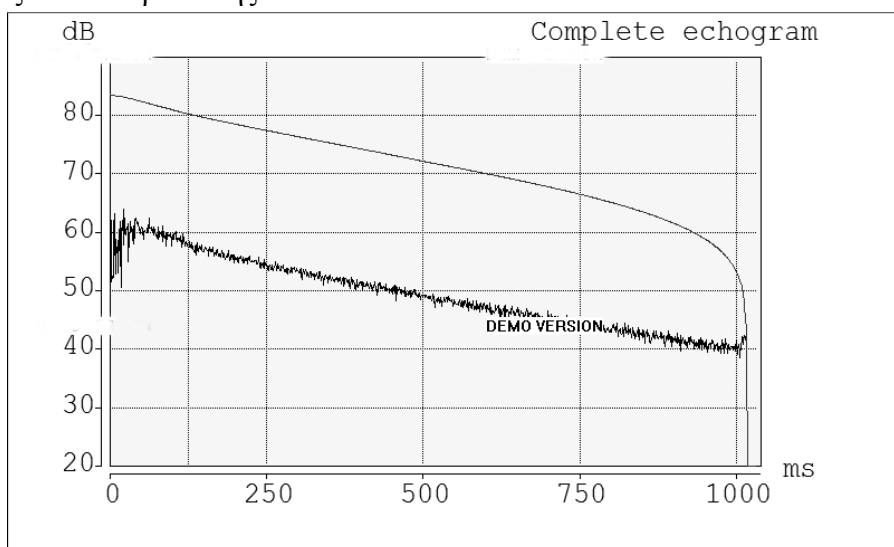
Με βάση τον αριθμό των καθισμάτων τα οποία προϋπήρχαν στο χώρο, πραγματοποιήθηκε υπολογισμός του χρόνου αντήχησης της αίθουσας έχοντας τοποθετήσει στον κώδικα του σχεδίου το κοινό. Τα αποτελέσματα του υπολογισμού αυτού παρατίθενται στο σχήμα 7.1.4..



Σχήμα 7.1.4. Χρόνος αντήχησης του χώρου με κοινό μετά από προσομοίωση.

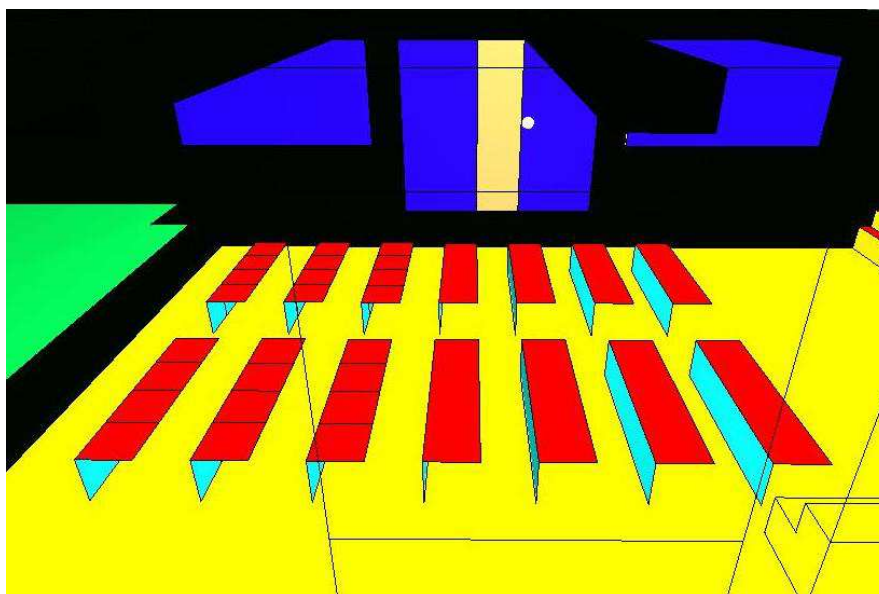
Στο σχήμα 7.1.4. παρατηρείται ότι ο χρόνος αντήχησης, με την παρουσία 106 ατόμων στο χώρο, κυμαίνεται σε υψηλά, για την προοριζόμενη χρήση της αίθουσας, επίπεδα.

Οι υψηλότερες τιμές παρατηρούνται στην περιοχή 125-250Hz και σχετίζονται άμεσα με τον όγκο του χώρου και τη χαμηλή απορρόφηση των δομικών υλικών σε αυτές τις συχνότητες. Στο σχήμα 7.1.5. φαίνεται ο ρυθμός μείωσης του ηχητικού πεδίου της αίθουσας στο κέντρο αυτής.



Σχήμα 7.1.5. Ρυθμός πτώσης του ηχητικού πεδίου της αίθουσας στο κέντρο αυτής.

Η παρουσία του κοινού πραγματοποιήθηκε με προσομοίωση όπως φαίνεται στο σχήμα 7.1.6. και τοποθετήθηκε ως εξής:

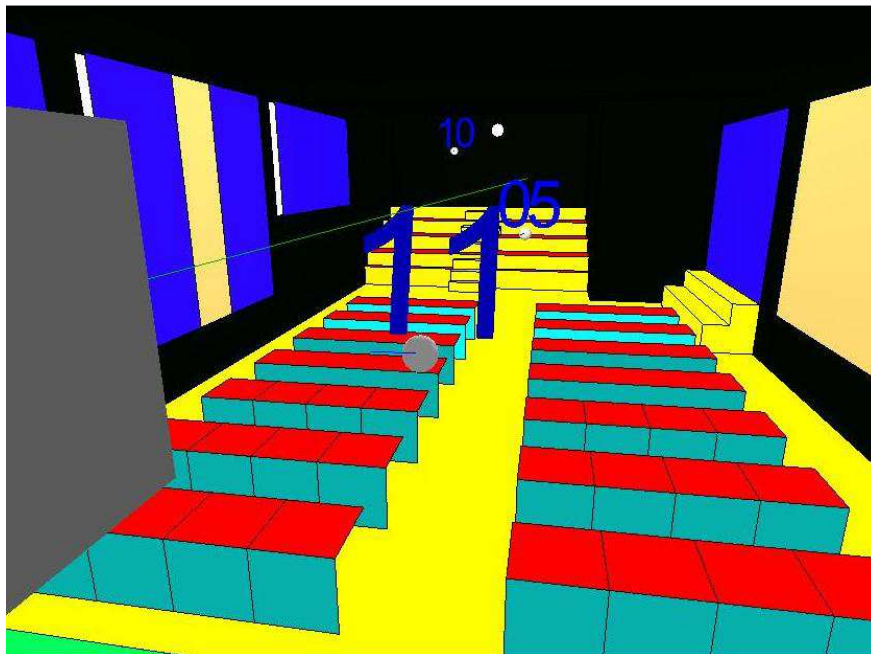


Σχήμα 7.1.6. Τοποθέτηση κοινού στην άδεια αίθουσα.

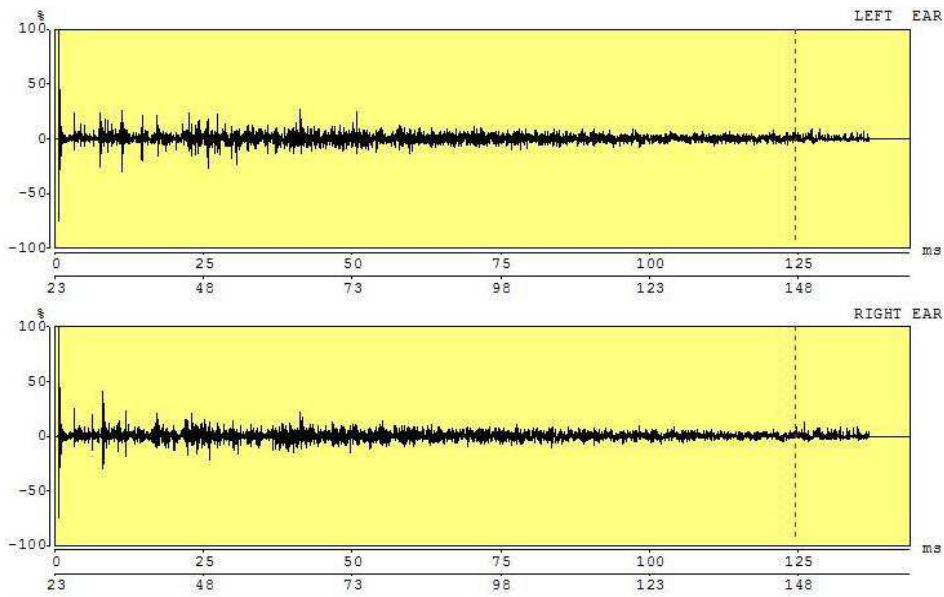
- Επτά σειρές χωρισμένες σε δύο πλευρές.
- Η πρώτη σειρά έχει απόσταση από τη σκηνή ίση με 1m και η κάθε σειρά έχει απόσταση από την επόμενη ίση με 1m.
- Η κάθε σειρά αποτελείται από οκτώ καθίσματα.
- Οι δύο πλευρές έχουν απόσταση από τους πλάγιους τοίχους ίση με 1 m.

- Το κενό μεταξύ των δύο πλευρών είναι 90 cm.
- Στα καθίσματα αντιστοιχούν 56 άτομα.
- Στα ξύλινα καθίσματα στο πίσω μέρος της αίθουσας υπολογίζονται, ανάλογα με την επιφάνεια, ότι σε κάθε σειρά δύνανται να καθίσουν 10 άτομα, με αποτέλεσμα ο συνολικός αριθμός των ατόμων σε αυτή την πλευρά να είναι 50.

Στο σχήμα 7.1.7. φαίνονται οι τρεις εικονικές θέσεις των μικροφώνων βάσει των οποίων έχει υπολογιστεί ο χρόνος αντήχησης. Στο σχήμα 7.1.8. παρατίθεται η κρουστική απόκριση του χώρου για μία εκ των τριών προαναφερθείσων θέσεων τοποθέτησης των μικροφώνων.

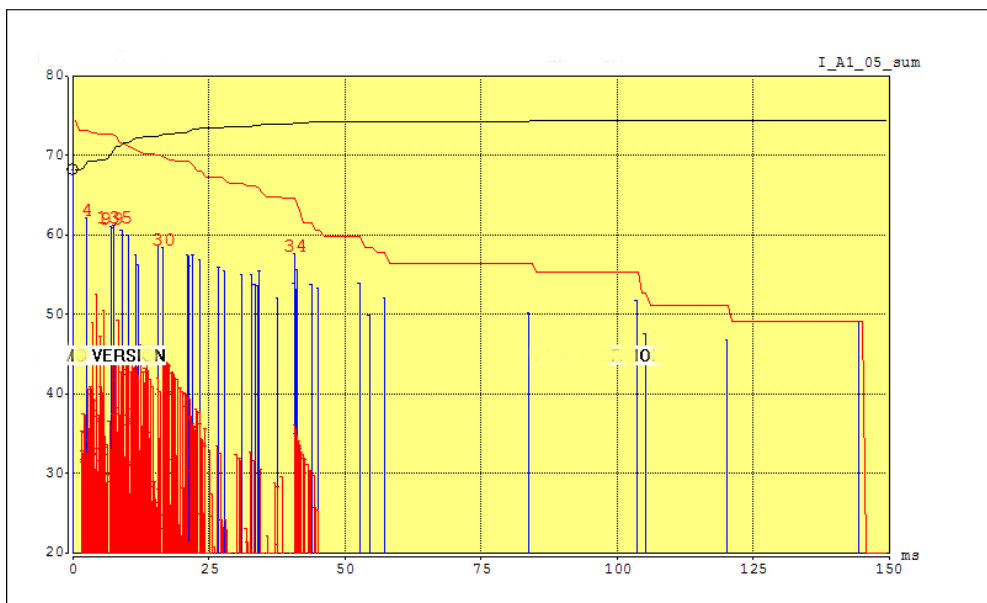


Σχήμα 7.1.7. Οι τοποθετήσεις των μικροφώνων MIC11, MIC5, MIC10.



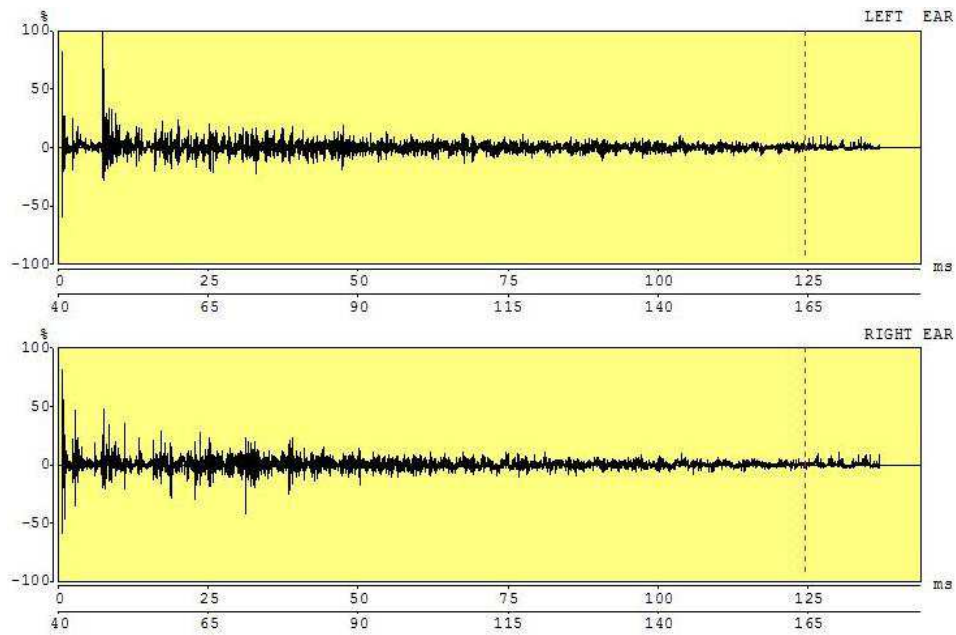
Σχήμα 7.1.8. Κρουστική απόκριση του MIC5 (στο κέντρο του χώρου).

Στο σχήμα 7.1.9. φαίνεται η άφιξη ηχητικού σήματος στο μικρόφωνο MIC5.

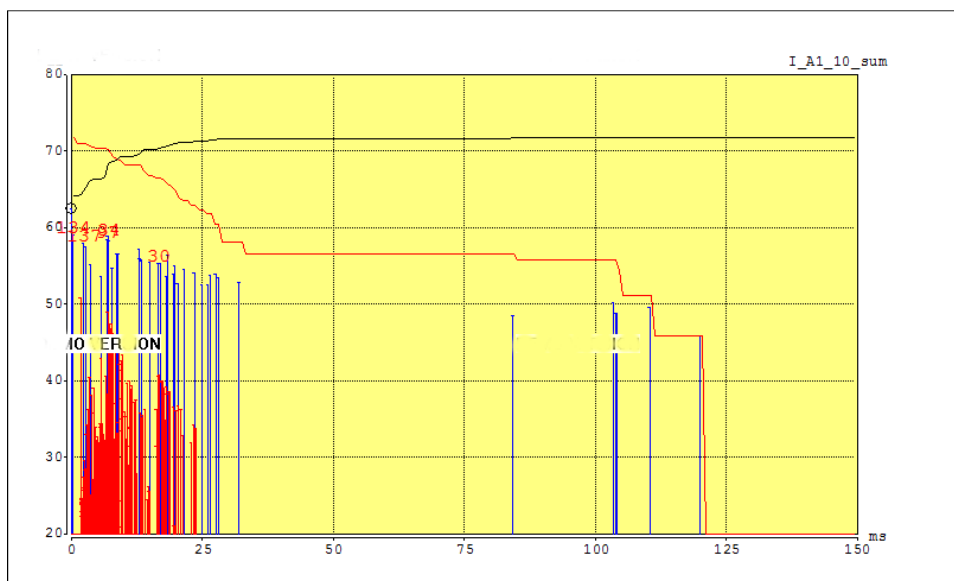


Σχήμα 7.1.9. Αφιξη ηχητικού σήματος στο μικρόφωνο MIC5.

Στην κρουστική απόκριση του MIC5 (σχήμα 7.1.8.) όπως και στην ανάλυση σε απευθείας σήμα και ανακλάσεις μπορούν να παρατηρηθούν καθυστερημένες ανακλάσεις οι οποίες προκαλούν προβλήματα ηχούς λόγω της απόστασης που διανύει η ανάκλαση χωρίς να απορροφηθεί από κάποιο στοιχείο του χώρου. Από την ανάλυση του σήματος του μικροφώνου MIC10, όπως φαίνεται στα σχήματα 7.1.10.-7.1.11., μπορεί να προσδιοριστεί η ύπαρξη του φαινομένου flutter echo, λόγω της μικρής απόστασης των πίσω πλάγιων τοίχων μεταξύ τους.

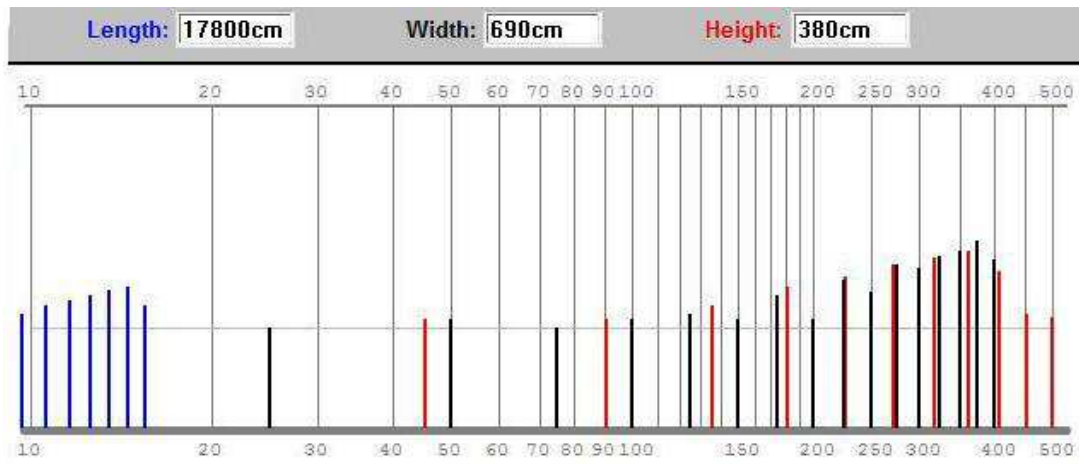


Σχήμα 7.1.10. Κρουστική απόκριση του MIC10 στο πίσω μέρος του χώρου.



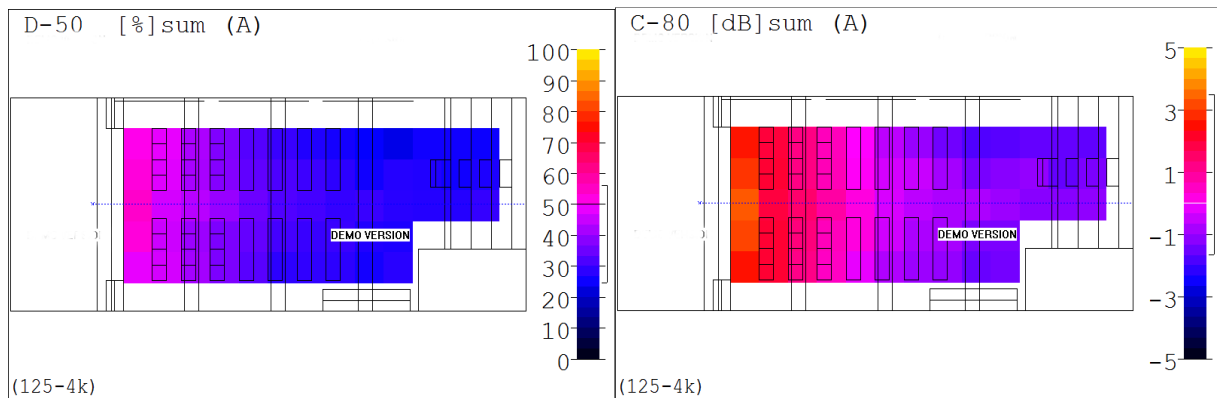
Σχήμα 7.1.11. Το σήμα του μικροφώνου MIC10.

Οι γεωμετρικές διαστάσεις του χώρου καθώς και τα υλικά από τα οποία έχει κατασκευαστεί, επηρεάζουν σε μεγάλο ποσοστό την ακουστική συμπεριφορά του. Τα δημιουργούμενα στο χώρο στάσιμα κύματα προέρχονται από τις κύριες διαστάσεις του χώρου και το ιδανικό είναι η ομοιόμορφη κατανομή τους στο συχνοτικό εύρος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η κατανομή των αξονικών στάσιμων κυμάτων είναι ανομοιόμορφη, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.1.12.



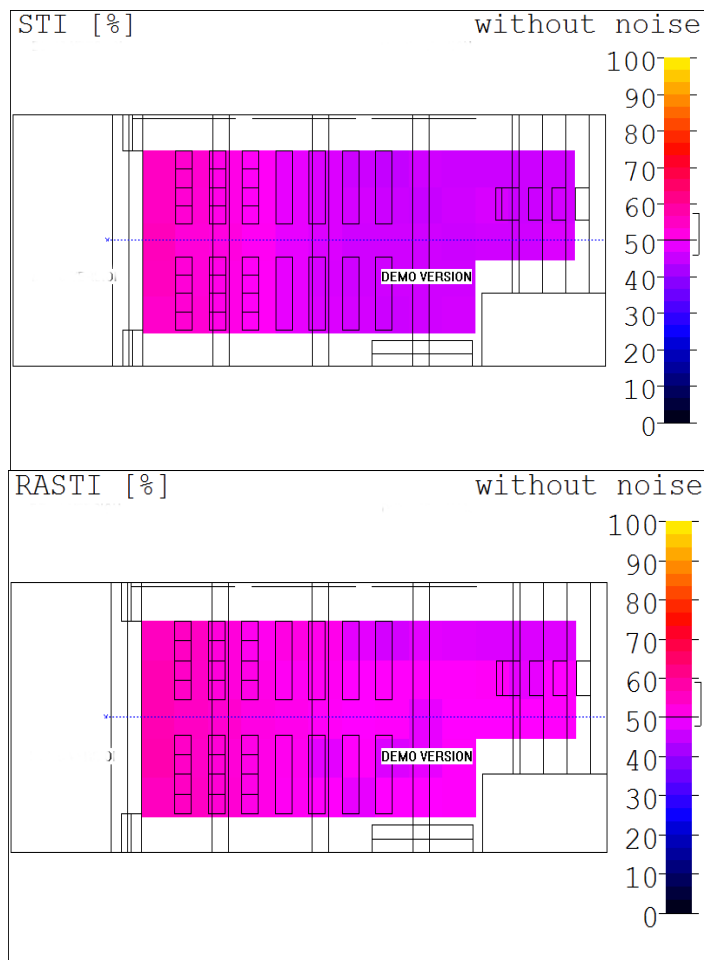
Σχήμα 7.1.12. Συχνοτική κατανομή των αξονικών στάσιμων κυμάτων του χώρου.

Στο σχήμα 7.1.12 φαίνεται η κατανομή των 16 πρώτων αξονικών στάσιμων κυμάτων στις τρεις διαστάσεις του χώρου. Παρατηρείται η ανομοιόμορφη κατανομή αυτών των στάσιμων κυμάτων, ιδιαίτερα στο συχνοτικό εύρος 20-150Hz. Επομένως, τα στάσιμα αυτά κύματα θα πρέπει να αντιμετωπιστούν είτε με απορρόφηση είτε με προσεκτική τοποθέτηση κάποιων ανακλαστικών επιφανειών ώστε να αποφευχθούν οι κλειστές διαδρομές των ηχητικών κυμάτων.



Σχήμα 7.1.13. Δείκτες **D50** και **C80** της μη τροποποιημένης αίθουσας.

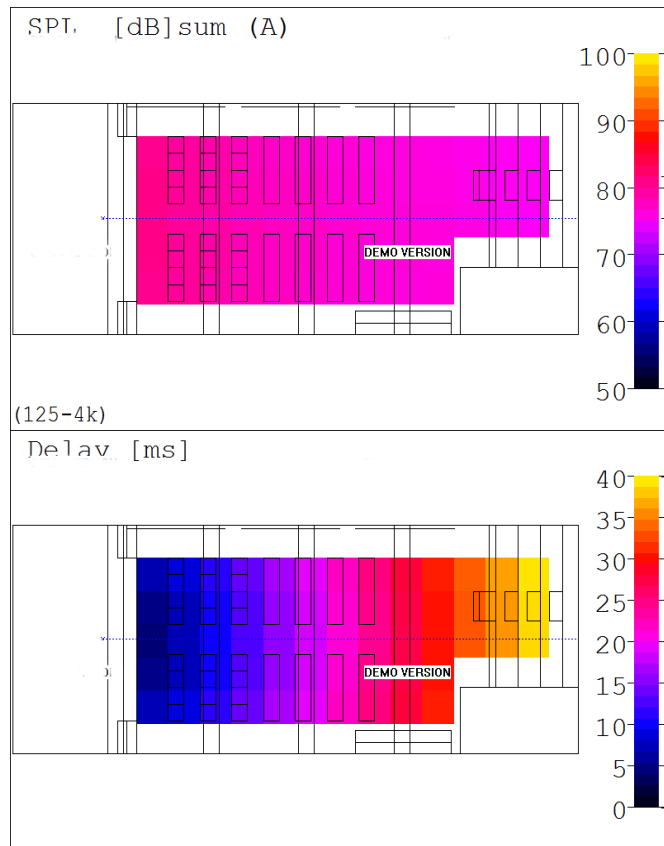
Στο σχήμα 7.1.13. παρατίθενται οι τιμές των δεικτών **D50** και **C80** για όλη την επιφάνεια της αίθουσας. Ο πρώτος δείκτης λαμβάνει αποδεκτές τιμές μόνο σε σημεία κοντά στη σκηνή, ενώ κατά την απομάκρυνση από αυτή μειώνεται. Υπενθυμίζεται ότι οι προτινόμενες τιμές αυτού του δείκτη κυμαίνονται άνω του 55%. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και για το δείκτη **C80**. Είναι επίσης απαραίτητο να αναφερθεί ότι η κατανομή των τιμών αυτών των δεικτών στο χώρο πρέπει να είναι ομοιόμορφη.



Σχήμα 7.1.14. Δείκτες **STI** και **RASTI** της μη τροποποιημένης αίθουσας.

Αντίστοιχα με τους προηγούμενους δείκτες, έτσι και οι δείκτες **STI** και **RASTI** που σχετίζονται με την καταληπτότητα της ομιλίας στο χώρο κυμαίνονται σε μη ικανοποιητικά επίπεδα σύμφωνα με το σχήμα 7.1.14. και τα στοιχεία της θεωρίας.

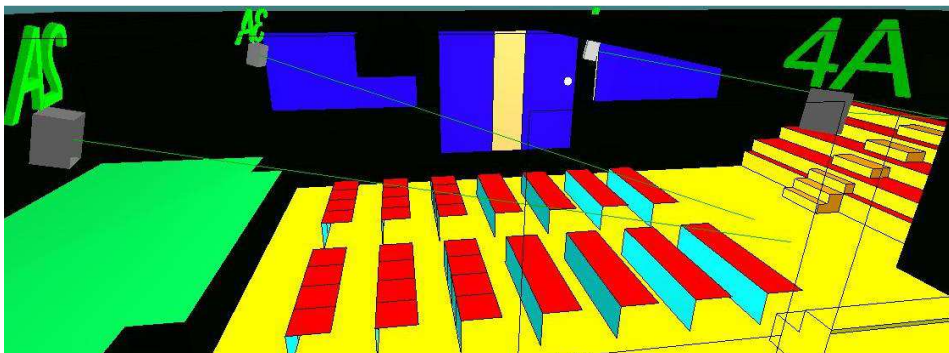
Στο σχήμα 7.1.15. παρατηρούμε ότι η στάθμη της ηχητικής πίεσης μειώνεται σταδιακά ανάλογα με την απόσταση από την πηγή. Είναι επιθυμητή η κατανομή της ηχητικής ενέργειας να είναι ομοιόμορφη. Επίσης υπάρχουν προβλήματα χρονοκαθυστέρησης στην άφιξη του απευθείας από την πηγή ήχου με αποτέλεσμα κυρίως στα πίσω καθίσματα (κίτρινο χρώμα) να δημιουργούνται φαινόμενα echo.



Σχήμα 7.1.15. Κατανομή στάθμης SPL και Delay του ήχου στο χώρο.

7.2 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΗΧΕΙΩΝ

Ξεκινώντας την ακουστική βελτίωση του χώρου, πρώτο βήμα αποτελεί η τοποθέτηση ηχείων στο χώρο. Τα σημεία τοποθέτησής τους είναι σημαντικά καθότι έχουν μελετηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε αφενός να μην υπάρχουν αλληλοακυρώσεις των ηχητικών ακτινοβολιών μεταξύ τους και αφετέρου να υπάρχει μία ομοιόμορφη ηχητική κάλυψη του χώρου. Επιλέχθηκαν τέσσερα ηχεία τύπου JBL AC15 των οποίων οι θέσεις φαίνονται στην ακόλουθη εικόνα:



Σχήμα 7.2.1. Τοποθέτηση ηχείων στο χώρο.

- Το ηχείο 2A τοποθετήθηκε σε απόσταση από τον μπροστινό τοίχο (της σκηνής) ίση με 3,6m όπως και το ηχείο 3A στην απέναντι πλευρά.
- Τα ηχεία 4A και 5A τοποθετήθηκαν σε απόσταση από τον μπροστινό τοίχο (της σκηνής) ίση με 10,5m εκατέρωθεν.
- Όλα τα ηχεία απέχουν από το έδαφος 3m.
- Όλα τα ηχεία έχουν απόσταση από τους πλάγιους τοίχους ίση με 45cm.
- Τα ηχεία 2A και 3A έχουν κλίση ως προς τον οριζόντιο άξονα ίση με 15 μοίρες και ως προς τον κάθετο άξονα ίση με 17 μοίρες.
- Τα ηχεία 4A και 5A έχουν κλίση ως προς τον οριζόντιο άξονα ίση με 30 και 15 μοίρες αντίστοιχα και ως προς τον κάθετο άξονα ίση με 9 και 10 μοίρες αντίστοιχα.
- Οι συχνοτικές περιοχές λειτουργίας των ηχείων έχουν εξομοιωθεί σύμφωνα με τα πολικά διαγράμμάτα τους, όπως αυτά δίδονται από την κατασκευάστρια εταιρεία.

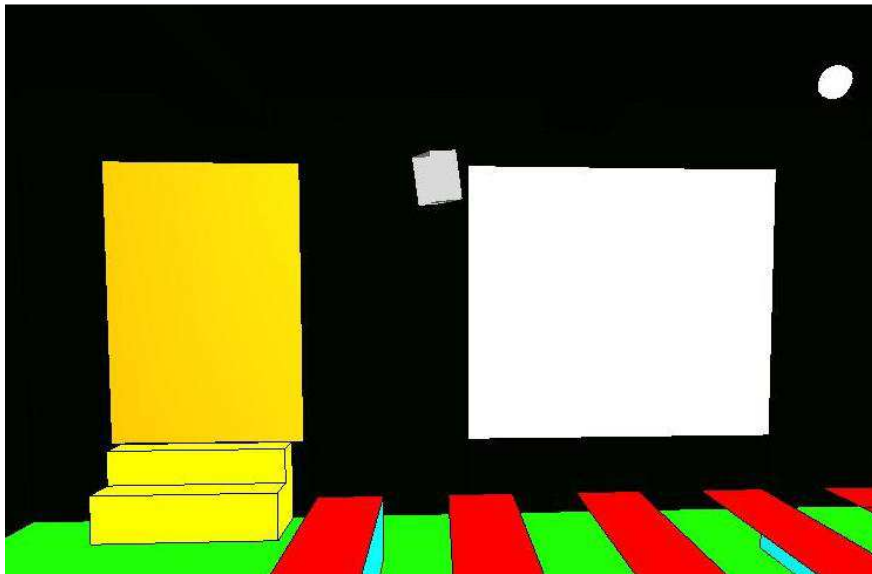
7.3 ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ

Λόγω του αρχικού υψηλού χρόνου αντήχησης στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες, κρίνεται απαραίτητη η τοποθέτηση κάποιων ηχοαπορροφητικών υλικών στο χώρο. Συγκεκριμένα, η τοποθέτηση ενός τάπητα μεγάλης πυκνότητας σε όλο δάπεδο δύναται να αντιμετωπίσει τις ανακλάσεις του ήχου που προέρχονται από το ταβάνι. Επίσης, αντικατάσταση του αναρτημένου πανιού στο μεσαίο παράθυρο με μία κουρτίνα, είναι σε θέση να αυξήσει την απορρόφηση της συγκεκριμένης επιφάνειας, καθώς και να προσδώσει ένα ποσοστό διάχυσης του προσπίπτοντος ήχου με απώτερο σκοπό τη μείωση των πλευρικών ανακλάσεων του χώρου.

Όσον αφορά τη δεξιά πλευρά του χώρου, κρίνεται απαραίτητη η ανάρτηση δύο κατασκευών. Στην αρχική κατάσταση του χώρου, μία κουρτίνα καλύπτει την είσοδο του χώρου, ενώ δίπλα υπάρχει ένα αναρτημένο πανί το οποίο δεν καλύπτει όλη την επιφάνεια. Για τη μετατροπή του χώρου σε τελείως κλειστό, προτίνεται η εγκατάσταση μίας πόρτας στην είσοδο του χώρου και κάλυψη του δίπλα κενού με μία τροπαιοθήκη, η οποία θα φέρει διπλό ηχομονωτικό τζάμι στην πρόσοψη. Έτσι, δε θα υπάρχει πλέον σύζευξη του μελετούμενου χώρου με παρακείμενους. Η πόρτα μπορεί να είναι βαριάς κατασκευής, με τα ακριβή της χαρακτηριστικά να υπαγορεύονται από τα διαθέσιμα κονδύλια για την τροποποίηση του χώρου. Στην προκείμενη περίπτωση, τοποθετήθηκε μια απλή ξύλινη πόρτα με διαστάσεις 1,7m x 2,5m. Η πόρτα έχει απόσταση από το γωνιακό τοίχο εισόδου ίση με 70cm.



Σχήμα 7.3.1. Η είσοδος του χώρου και ο χώρος όπου θα εγκατασταθεί μία τροπαιοθήκη.



Σχήμα 7.3.2. Ξύλινη πόρτα (αριστερά) και διπλό τζάμι (δεξιά), όπως αυτά χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση του χώρου.

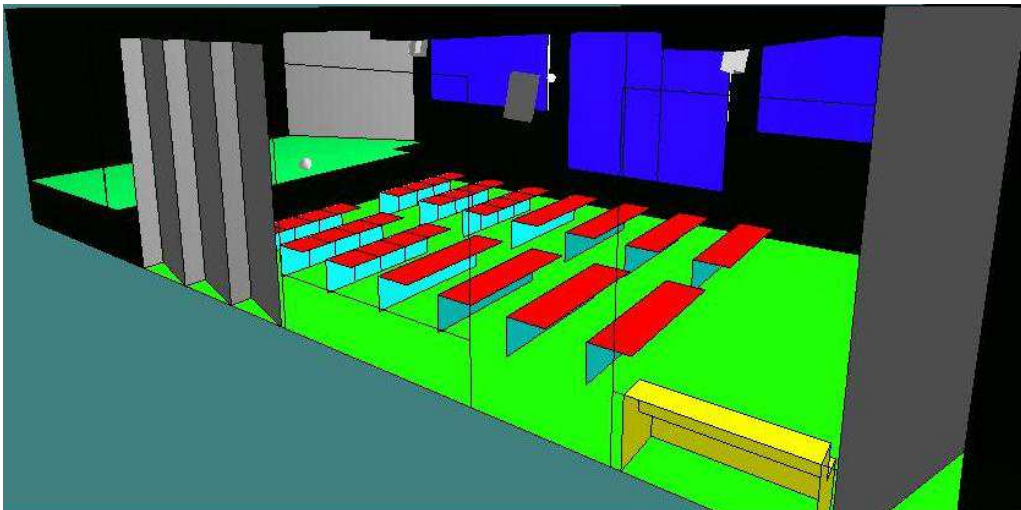
7.4 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΓΥΨΟΣΑΝΙΔΩΝ

Λόγω της αρχικής γεωμετρίας του χώρου, εμφανίζονται σε αυτόν έντονα στάσιμα ηχητικά κύματα. Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου, προτείνεται η τοποθέτηση γυψοσανίδων με κλίση, σε τρία διαφορετικά σημεία του χώρου έτσι ώστε να αποτραπούν οι κλειστές ηχητικές διαδρομές που είναι η αιτία των στάσιμων κυμάτων. Επιπροσθέτως, χρησιμοποίηση γυψοσανίδων είναι σημαντική, διότι λόγω της απορρόφησης που παρουσιάζουν, συμβάλλουν και στη μείωση του χρόνου αντήχησης της αίθουσας. Τα σημεία τοποθέτησης των γυψοσανίδων είναι:

1. Εκατέρωθεν της σκηνής
2. Στην αριστερή σκάλα εισόδου στη σκηνή
3. Δίπλα στην είσοδο της αίθουσας



Σχήμα 7.4.1. Η σκηνή, όπου θα τοποθετηθούν οι γυψοσανίδες.

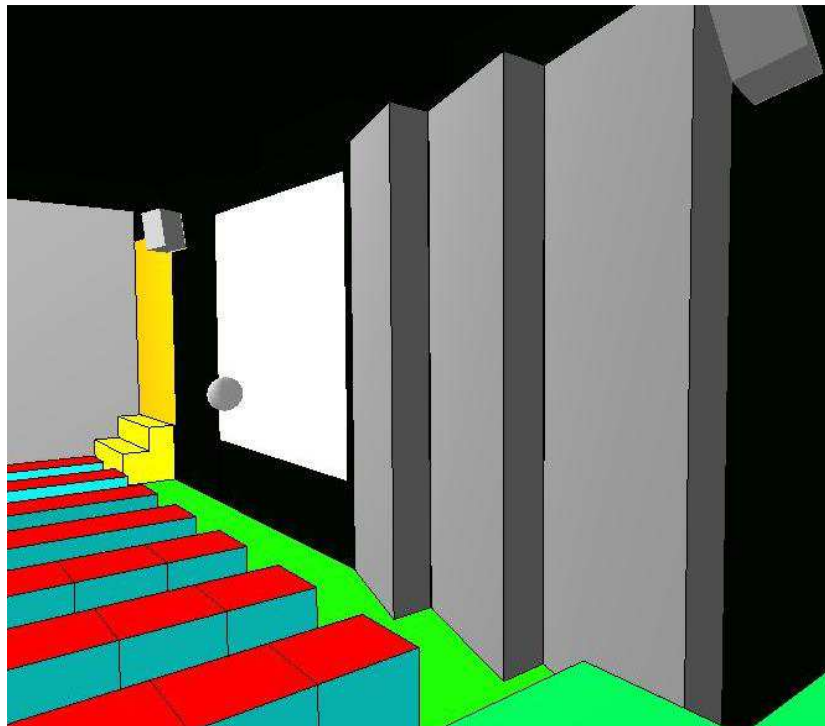


Σχήμα 7.4.2. Τοποθέτηση γυψοσανίδων κατά την προσομοίωση του χώρου.

- Οι γυψοσανίδες πάνω στη σκηνή τοποθετήθηκαν στον μπροστινό τοίχο και έχουν μήκος 3m.
- Το ύψος τους είναι 3m.
- Η τοποθέτησή τους παρουσιάζει κλίση, με αποτέλεσμα να μην είναι παράλληλες στους πλευρικούς τοίχους.
- Στο σημείο τοποθέτησης στον μπροστινό τοίχο της αίθουσας απέχουν από τον κοντινότερο πλάγιο τοίχο 1,3m και καταλήγουν στον πλευρικό τοίχο.
- Οι πλάγιες γυψοσανίδες τοποθετήθηκαν με πριονωτό σχεδιασμό. Η πρώτη έχει μήκος 1,2m, η δεύτερη 1,1m και η τρίτη επίσης 1,1m. Η τοποθέτησή τους

ξεκινάει από τα αριστερά σκαλιά της σκηνης και καταλήγει στα άκρα της τροπαιοθήκης.

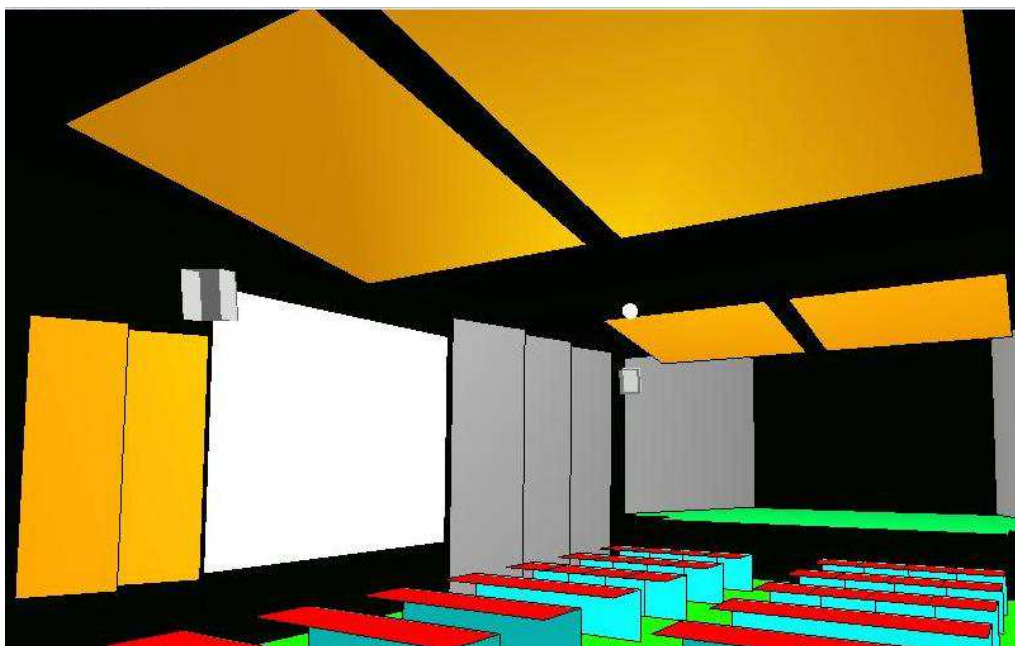
- Οι τρεις γυψοσανίδες έχουν ύψος ίσο με 3,4m.
- Και οι τρεις γυψοσανίδες θα πρέπει να έχουν τη μία τους πλευρά (αυτή που βρίσκεται κοντύτερα στη σκηνή) σε απόσταση από τον πλάγιο τοίχο ίση με 50 cm, ενώ η άλλα πλευρά εφάπτεται στον πλάγιο τοίχο, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.4.3.
- Η γυψοσανίδα κοντά στην είσοδο του χώρου, τοποθετήθηκε από την είσοδο έως τη γωνία του δεξιού τοίχου που είναι δίπλα στην είσοδο (μήκος ίσο με 2,1m).
- Η γυψοσανίδα αυτή εκτείνεται έως το ταβάνι, δηλαδή έχει ύψος ίσο με 3,8m.



Σχήμα 7.4.3. Η πριονωτή τοποθέτηση γυψοσανίδων στην είσοδο της σκηνης.

7.5 ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΑΚΛΑΣΕΩΝ

Οι πρώτες ανακλάσεις σε ένα χώρο είναι πολύ σημαντικές, διότι όπως αναφέρθηκε στη θεωρία φέρουν υψηλή ηχητική ενέργεια σε σχέση με τις υπόλοιπες ανακλάσεις και συμβάλουν σημαντικά στη διαμόρφωση του ηχητικού αποτελέσματος καθώς και στην αντίληψη του χώρου από τον ακροατή. Για τη διασφάλιση της κατεύθυνσης αυτών των ανακλάσεων από την πηγή (σκηνή) στο ακροατήριο χρησιμοποιήθηκαν ειδικά ανακλαστικά υλικά, τα οποία παρουσιάζουν χαμηλή απορρόφηση ούτως ώστε να μην χάνουν οι ανακλάσεις την ηχητική ενέργεια που μεταφέρουν και τοποθετήθηκαν σε τέτοια σημεία που κατευθύνουν το ηχητικό σήμα στο κοινό.



Σχήμα 7.5.1. Τοποθέτηση ανακλαστικών υλικών στην οροφή και στα πλάγια δεξιά της σκηνής (καφέ χρώμα).

- Οι τέσσερις ανακλαστικές διατάξεις της οροφής έχουν μήκος και πλάτος ίσο με 2,4m.
- Οι δύο πλάγιες ανακλαστικές επιφάνειες έχουν μήκος 2m και πλάτος 50cm.
- Οι δύο πρώτες ανακλαστικές επιφάνειες της οροφής τοποθετήθηκαν σε απόσταση από τον μπροστινό τοίχο της σκηνής ίση με 3,3m. Οι επόμενες δύο επιφάνειες τοποθετήθηκαν σε απόσταση από τον μπροστινό τοίχο ίση με 9,3m.
- Η πρώτη πλάγια ανακλαστική επιφάνεια τοποθετήθηκε σε απόσταση 20cm από την τροπαιοθήκη και η δεύτερη σε απόσταση 10cm από την πρώτη.
- Στις ανακλαστικές επιφάνειες της οροφής, η πλευρά προς τη σκηνή τοποθετήθηκε σε ύψος 3,3m και η πλευρά προς τον πίσω τοίχο της αίθουσας εφάπτεται στην οροφή, σχηματίζοντας μία κλίση στοχεύοντας το κοινό.
- Στις δύο πλάγιες ανακλαστικές επιφάνειες, η πλευρά προς τη σκηνή έχει απόσταση από τον πλάγιο τοίχο ίση με 30cm, ενώ η πλευρά προς τον πίσω τοίχο του χώρου εφάπτεται στον τοίχο με σκοπό να κατευθύνουν τις ανακλάσεις προς τα πίσω καθίσματα.
- Τέλος, μετά από τις ανακλαστικές επιφάνειες της οροφής, τοποθετήθηκαν απορροφητικές διατάξεις τύπου W-foam με σκοπό την απορρόφηση και την αποτροπή ανακλάσεων προς τη σκηνή.
- Τα απορροφητικά αυτά τοποθετήθηκαν στις δοκούς της οροφής, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.5.2 με κόκκινο χρώμα. Έχουν απόσταση από τους πλάγιους τοίχους ίση με 70cm και μήκος ίσο με 5,5m.



Σχήμα 7.5.2. Τοποθέτηση απορροφητικών διατάξεων στην οροφή (κόκκινο χρώμα).

7.6 ΑΝΑΚΛΑΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΠΙΣΩ ΧΩΡΟ

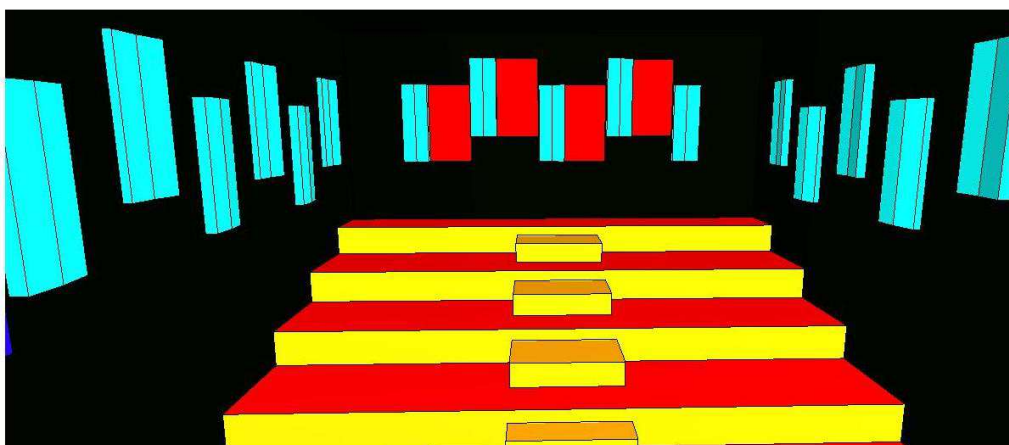


Σχήμα 7.6.1. Πίσω χώρος καθισμάτων.

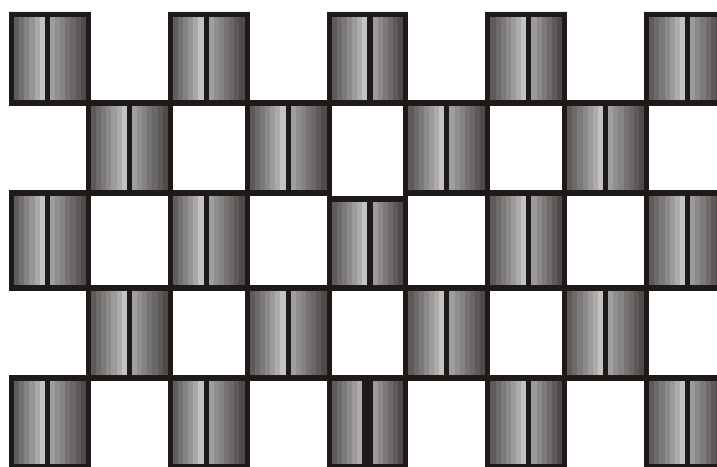
Ο πίσω χώρος της αίθουσας λόγω του γεωμετρικού του σχεδιασμού παρουσιάζει πολλά προβλήματα ανακλάσεων λόγω της μικρής απόστασης των πλάγιων τοίχων, όπως είδαμε και προηγουμένως με την κρουστική απόκριση του MIC 10 (σχήμα 7.1.10.). Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων προτείνεται η χρήση διαχυτών ή απορροφητών. Στη συνέχεια παρατίθενται και οι δύο περιπτώσεις αντιμετώπισης του προβλήματος, οι οποίοι έχουν διαφορετική κοστολόγηση ως προς τα υλικά που προτείνεται να χρησιμοποιηθούν, αλλά είναι περίπου το ίδιο αποτελεσματικοί.

- **ΗΧΟΔΙΑΧΥΣΗ ΠΙΣΩ ΑΝΑΚΛΑΣΕΩΝ**

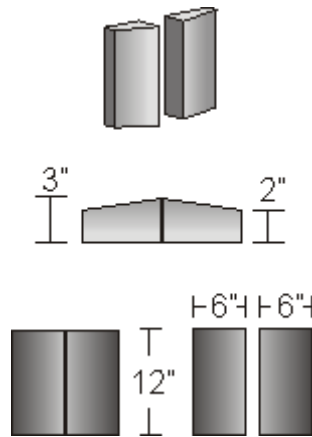
Με τη διάχυση καταφέρνουμε τη μερική ηχοαπορρόφηση των ανακλάσεων, λόγω του υλικού κατασκευής των διαχυτών, όπως επίσης και τη διασπορά τους με αποτέλεσμα την αποφυγή συντονισμών και φαινομένων flutter echo. Έτσι, αρχικά τοποθετήθηκαν διαχυτές στις επιφάνειες του πίσω μέρους του χώρου και απορροφητικά υλικά μεταξύ τους μόνο στον πίσω χώρο όπως φαίνεται στο σχήμα 7.6.2.



Σχήμα 7.6.2. Τοποθέτηση διαχυτών και ηχοαπορροφητικών διατάξεων στο πίσω μέρος του χώρου.



Σχήμα 7.6.3. Τοποθέτηση διαχυτών τύπου Scandia.



Σχήμα 7.6.4. Διαστάσεις πλακιδίων τύπου Scandia.

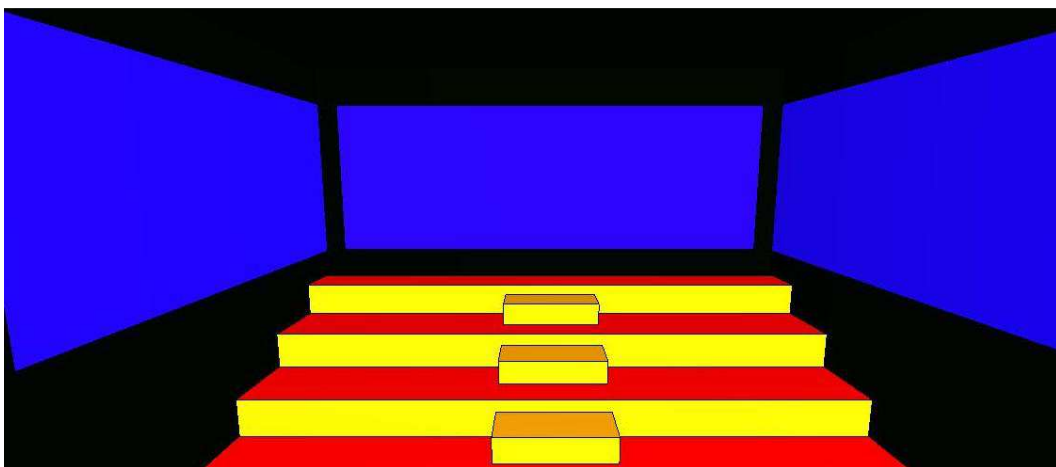
- Τοποθετήθηκαν συνολικά 48 πλακίδια τύπου Scandia (σχήμα 7.6.3. και 7.6.4.). 18 πλακίδια στον αριστερό τοίχο (έξι σειρές αποτελούμενες από τρία πλακίδια) παρατηρώντας το χώρο από τη σκηνή, 15 πλακίδια στον πίσω τοίχο (πέντε σειρές αποτελούμενες από τρία πλακίδια) και 15 πλακίδια στο δεξιό τοίχο (πέντε σειρές αποτελούμενες από τρία πλακίδια).
- Τα πλακίδια τοποθετήθηκαν σε σχεδιασμό όπως φαίνεται στο σχήμα 7.6.3. και με σειρά όπως φαίνεται στο σχήμα 7.6.4., δηλαδή εναλλάξ.
- Στον αριστερό τοίχο, το πρώτο πλακίδιο τοποθετήθηκε σε απόσταση 10cm από το δεξιό παράθυρο και σε ύψος από το έδαφος ίσο με 2m. Το δεύτερο πλακίδιο τοποθετήθηκε ακριβώς από πάνω του σε απόσταση από αυτό 20cm. Το τρίτο πλακίδιο τοποθετήθηκε πάνω από το δεύτερο πλακίδιο και σε απόσταση από αυτό ίση με 20cm. Έτσι τοποθετήθηκε η πρώτη κάθετη σειρά για τον αριστερό τοίχο. Τα πλακίδια αυτής της σειράς έχουν τις διαστάσεις που δείχνει το σχήμα 7.6.4., δηλαδή από τα αριστερά πάχος 8cm και από τα δεξιά πάχος 5cm.
- Η δεύτερη κάθετη σειρά για τον αριστερό τοίχο τοποθετήθηκε ως εξής: το πρώτο πλακίδιο σε απόσταση 30cm από το πρώτο πλακίδιο της πρώτης σειράς και σε ύψος από το έδαφος ίσο με 2,3m. Το δεύτερο πλακίδιο τοποθετήθηκε πάνω από το πρώτο και σε απόσταση 20cm. Το τρίτο τοποθετήθηκε πάνω από το δεύτερο και σε απόσταση από αυτό ίση με 20cm. Ο σχηματισμός των πλακιδίων της δεύτερης σειράς είναι ο αντίθετος από αυτόν της πρώτης σειράς, δηλαδή από τα αριστερά πάχος 5cm και από τα δεξιά πάχος 8cm.
- Έπειτα, η τρίτη σειρά τοποθετήθηκε με την ίδια λογική της πρώτης, η τέταρτη με αυτή της δεύτερης και η πέμπτη ξανά με αυτή της πρώτης. Θα πρέπει να προσεχθεί κατά την τοποθέτηση, όλα τα πλακίδια σε όλους τους τοίχους να έχουν μία διαγώνια τοποθέτηση ακριβώς όπως φαίνεται στο σχήμα 7.6.3. Επίσης θα πρέπει να τηρηθούν αυστηρά οι αντίθετοι σχηματισμοί των σειρών των πλακιδίων μεταξύ τους έτσι ώστε να είναι αποτελεσματική η αντίθετη κατεύθυνση των ανακλάσεων που θα προσκρούουν σε αυτά και συνάμα η διασπορά τους στο χώρο.

- Με την ίδια ακριβώς λογική τοποθετήθηκαν και οι υπόλοιπες σειρές των πλακιδίων στο δεξιό τοίχο.
- Η πρώτη σειρά από αριστερά, όπως παρατηρούμε από τη σκηνή το δεξιό τοίχο, έχει απόσταση από τον πίσω τοίχο ίση με 70cm και συνεχίζει όπως αναφέρθηκε στην τοποθέτηση του αριστερού τοίχου (η δεύτερη σειρά από τη πρώτη απόσταση ίση με 30cm, η δεύτερη από τη τρίτη ίση με 30cm κ.ο.κ.).
- Τέλος, όσον αφορά τον πίσω τοίχο της αίθουσας, η τοποθέτηση έχει ως εξής: η πρώτη κάθετη σειρά τοποθετήθηκε σε απόσταση από τον αριστερό τοίχο, όπως παρατηρούμε από τη σκηνή, ίση με 60cm. Η δεύτερη κάθετη σειρά τοποθετήθηκε σε απόσταση από την πρώτη ίση με 50cm. Στο κενό αυτό των 50cm τοποθετήθηκε απορροφητική διάταξη τύπου W-foam, η οποία έχει διαστάσεις 1m x 50cm. Το ίδιο συνεχίζεται με τις υπόλοιπες τρεις σειρές του πίσω τοίχου ακριβώς όπως φαίνεται στο σχήμα 7.6.2. Με γαλάζιο χρώμα τα πλακίδια Scandia, τα οποία στην πραγματική τους τοποθέτηση θα καταλαμβάνουν περισσότερη επιφάνεια από αυτή που φαίνεται στο σχήμα 7.6.2. και με κόκκινο χρώμα οι τέσσερις απορροφητικές διατάξεις στον πίσω τοίχο.

Η τοποθέτηση των απορροφητικών υλικών στον πίσω τοίχο αποσκοπεί στη μείωση της ηχητικής στάθμης των ανακλάσεων που επιστρέφουν πίσω στο χώρο. Η αποτελεσματικότητά τους παρατίθεται σε διαγράμματα απευθείας σήματος και ανακλάσεων στη συνέχεια της εργασίας.

• ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΑΝΑΚΛΑΣΕΩΝ ΣΤΟΝ ΠΙΣΩ ΤΟΙΧΟ

Σε αυτή την εναλλακτική πρόταση τοποθετήθηκαν μεγάλου πάχους κουρτίνες κατά μήκος όλων των πίσω τοίχων. Οι κουρτίνες φαίνονται στο σχήμα 7.6.5. με μπλε χρώμα. Οι κουρτίνες προσφέρουν απορρόφηση των ανακλάσεων που προσπίπτουν σε αυτές και η αναδίπλωσή τους μπορεί να προσφέρει μερική διάχυση.



Σχήμα 7.6.5. Τοποθέτηση κουρτινών στον πίσω χώρο.

- Η κουρτίνα του αριστερού τοίχου, όπως παρατηρούμε από τη σκηνή, τοποθετήθηκε σε απόσταση από το παράθυρο ίση με 30cm.
- Όλες οι κουρτίνες έχουν ύψος 1,5m και τοποθετήθηκαν σε ύψος από το έδαφος ίσο με 1,9m. Η κουρτίνα στον πίσω τοίχο του χώρου, έχει απόσταση από το τελευταίο κάθισμα ίση με 30cm.
- Όλες οι κουρτίνες έχουν απόσταση από τους τοίχους ίση με 10cm.

7.7 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΠΡΟΣΘΕΤΩΝ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ

Η τοποθέτηση κάποιων πρόσθετων απορροφητικών υλικών στο χώρο της σκηνής αποσκοπεί στην πιο ομοιόμορφη απορρόφηση του ήχου στη σκηνή. Οι γυψοσανίδες που τοποθετήθηκαν έχουν επίδραση κυρίως στις χαμηλές και χαμηλομεσαίες συχνότητες. Τοποθετώντας κάποια επιπλέον απορροφητικά, επιτυγχάνουμε απορρόφηση σε όλο το συχνοτικό φάσμα. Στο σχήμα 7.7.1., με κόκκινο χρώμα παρατηρούμε τα πρόσθετα απορροφητικά υλικά στη σκηνή.



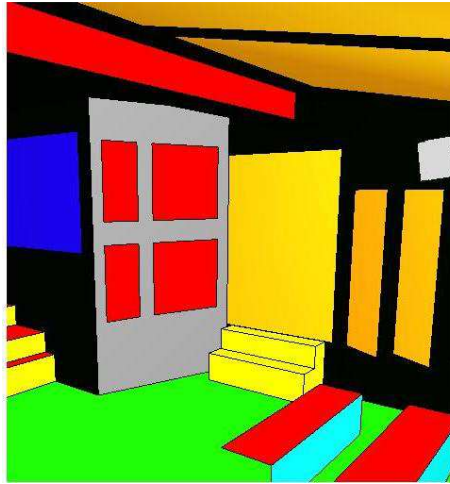
Σχήμα 7.7.1. Τοποθέτηση απορροφητικών υλικών στη σκηνή (κόκκινο χρώμα).

Ξεκινώντας από αριστερά προς τα δεξιά όπως φαίνεται στο σχήμα 7.7.1:

- Τοποθετήθηκε πάνω στην αριστερή γυψοσανίδα μία απορροφητική διάταξη (1m x 1m / μήκος x πλάτος). Δηλαδή το ένα της σημείο έχει απόσταση από τον (μπροστινό) τοίχο της σκηνής ίση με 2,5m και το άλλο σημείο 1,5m. Το ύψος του απορροφητικού από το πάτωμα της σκηνής είναι ίσο με 70cm.
- Πάνω από αυτό και σε απόσταση 30cm, τοποθετήθηκε απορροφητικό (διαστάσεις 1m x 0,5m). Αυτό το απορροφητικό έχει τις ίδιες αποστάσεις με το πρώτο από τον μπροστινό τοίχο της σκηνής.

- Τοποθετήθηκαν δύο ίδια με τα προηγούμενα απορροφητικά σε απόσταση από εκείνα 20cm. Επομένως, η μία τους πλευρά είναι σε απόσταση από τον τοίχο της σκηνής ίση με 1,3m και η άλλη 30cm. Τα ύψη τους από το πάτωμα της σκηνής είναι ίδια με τα προηγούμενα δύο.
- Η τοποθέτηση αυτών των τεσσάρων απορροφητικών είναι η ίδια και για την δεξιά γυψοσανίδα. Η θέση τους είναι ακριβώς πάνω στη γυψοσανίδα.
- Συνεχίζοντας από τα αριστερά, σε απόσταση 1,5m από τον αριστερό τοίχο, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.7.1. και πάνω στον τοίχο της σκηνής τοποθετήθηκε ένα απορροφητικό με διαστάσεις 0,5m x 1m (μήκος x πλάτος). Ακριβώς από πάνω του τοποθετήθηκε ένα άλλο με διαστάσεις 0,5m x 0,5m. Η μία του πλευρά έχει απόσταση από τον πλάγιο τοίχο ίση με 1,5m κι η άλλη 2m. Η πλευρά αυτή των απορροφητικών που είναι στα 2m, έχει απόσταση από τον τοίχο της σκηνής 20cm. Δηλαδή έχει μία κλίση προς τα αριστερά. Το ύψος αυτών των απορροφητικών ξεκινάει από το πάτωμα της σκηνής και φτάνει μέχρι τα 2,3m.
- Πάνω από αυτά σε απόσταση μεταξύ τους 20cm, δηλαδή σε ύψος 2,5m, τοποθετήθηκε απορροφητικό με διαστάσεις 0,5m x 1m. Το απορροφητικό αυτό έχει την ίδια αριστερή κλίση όπως τα προηγούμενα.
- Με τον ίδιο τρόπο τοποθετήθηκαν και στη δεξιά μεριά του τοίχου της σκηνής και σε ίδιες αποστάσεις από το δεξιό πλάγιο τοίχο. Η διαφορά όμως είναι ότι αυτά τα απορροφητικά πρέπει να έχουν κλίση προς τα αριστερά, αντίθετη από τα προηγούμενα. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκε πάνω από την πόρτα εξόδου κινδύνου ένα απορροφητικό με διαστάσεις 1m x 0,5m.
- Επίσης, σε απόσταση 20cm από τη πόρτα προς τα δεξιά, τοποθετήθηκε ένα απορροφητικό με διαστάσεις 1m x 1m και ακριβώς δίπλα του ένα άλλο με διαστάσεις 0,5m x 1m. Αυτό το απορροφητικό βρίσκεται σε απόσταση από τον δεξιό τοίχο ίση με 2,1m. Έχει ύψος από το πάτωμα του της σκηνής ίσο με 50 cm και εκτείνεται έως 2,3m.
- Τοποθετήθηκε πάνω από αυτό και σε απόσταση μεταξύ τους ίση με 20cm, δηλαδή ύψος 2,5m, ένας ίδιος συνδυασμός απορροφητικών υλικών με τον προηγούμενο.
- Συνολικά για το χώρο της σκηνής χρησιμοποιήθηκαν 12 απορροφητικές διατάξεις τύπου W-foam.

Απορροφητικά υλικά του ίδιου τύπου τοποθετήθηκαν επίσης στη γυψοσανίδα που βρίσκεται δίπλα στην είσοδο της αίθουσας.

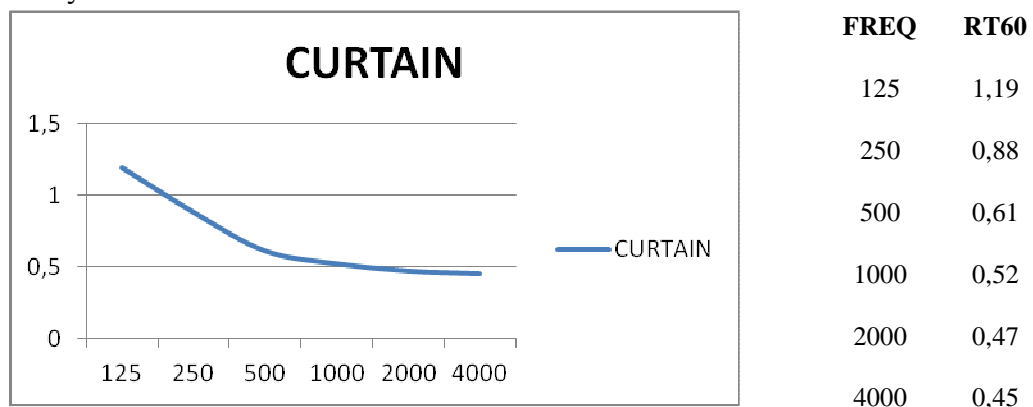


Σχήμα 7.7.2. Τοποθέτηση απορροφητικών υλικών στη γυψοσανίδα παραπλεύρως της εισόδου.

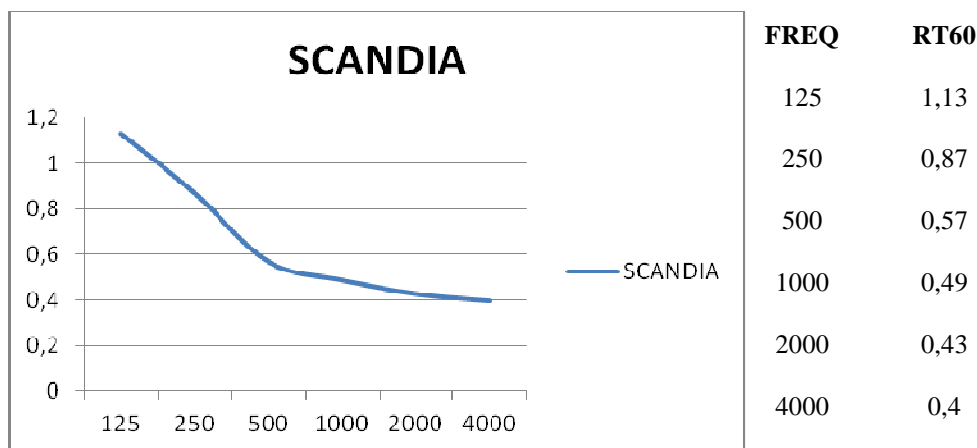
- Ένα απορροφητικό τοποθετήθηκε σε απόσταση από τον τοίχο ίση με 20cm ενώ το άλλο του σημείο είναι σε απόσταση από αυτόν 1,2m. Το ύψος του από το έδαφος είναι στο 1m και φτάνει μέχρι τα 2m.
- Το επόμενο απορροφητικό τοποθετήθηκε πάνω από το προηγούμενο και σε απόσταση μεταξύ τους ίση με 30cm. Δηλαδή το ύψος αυτού του απορροφητικού θα ξεκινάει από τα 2,3m και θα φτάνει μέχρι τα 3,3m.
- Τα επόμενα δύο απορροφητικά έχουν διαστάσεις 0,5m x 1m. Τοποθετήθηκαν παραπλεύρως των δύο προηγούμενων και σε απόσταση από αυτά 20cm.
- Τα δύο αυτά απορροφητικά έχουν ίδιο ύψος από το έδαφος με τα πρώτα δύο, δηλαδή 1m και 2,3m αντίστοιχα και έχουν απόσταση μεταξύ τους ίση με 30cm.

7.8 ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΟΙ ΧΡΟΝΟΙ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ

Στα σχήματα 7.8.1 και 7.8.2 παρουσιάζονται οι χρόνοι αντήχησης της αίθουσας στις δύο ξεχωριστές περιπτώσεις τροποποίησης των πίσω καθισμάτων, με τοποθέτησης κουρτίνας και πλακιδίων τύπου Scandia.

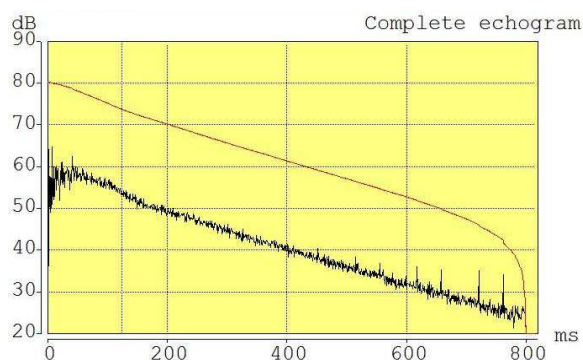


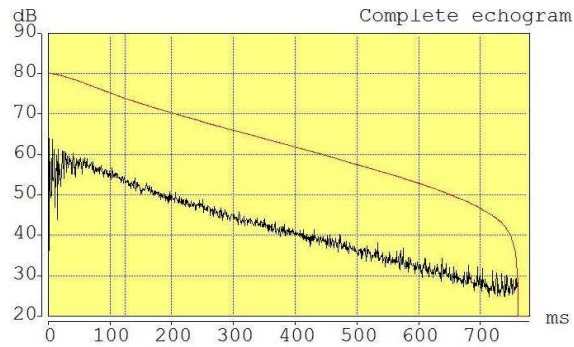
Σχήμα 7.8.1. Χρόνοι αντήχησης της αίθουσας μετά την τοποθέτηση κουρτίνας στα πίσω καθίσματα.



Σχήμα 7.8.2. Χρόνοι αντήχησης της αίθουσας μετά την τοποθέτηση πλακιδίων τύπου Scandia στα πίσω καθίσματα.

Από τα σχήματα 7.8.1. και 7.8.2. μπορούν να παρατηρηθούν πολύ μικρές διαφορές στους χρόνους αντήχησης. Παρατηρείται μία γρήγορη απόσβεση της αντήχησης στη περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων, ενώ από την κεντρική συχνότητα των 500Hz μέχρι αυτή των 4kHz η πτώση του χρόνου αντήχησης είναι πιο ομαλή. Στις χαμηλές συχνότητες ο χρόνος αντήχησης έχει τιμές που δεν ξεπερνούν τις προτεινόμενες από τη βιβλιογραφία με αποτέλεσμα να μη δημιουργούνται προβλήματα ανακλάσεων κάποιων επιφανειών στις συχνότητες αυτές. Οι υψηλές συχνότητες με την ομαλή τους πτώση διατηρούν την αίσθηση της λαμπρότητας και της ευκρίνειας του ήχου. Γενικά, ο χρόνος αντήχησης κυμαίνεται στα προτινόμενα, από τη βιβλιογραφία για την προοριζόμενη χρήση του χώρου, επίπεδα.

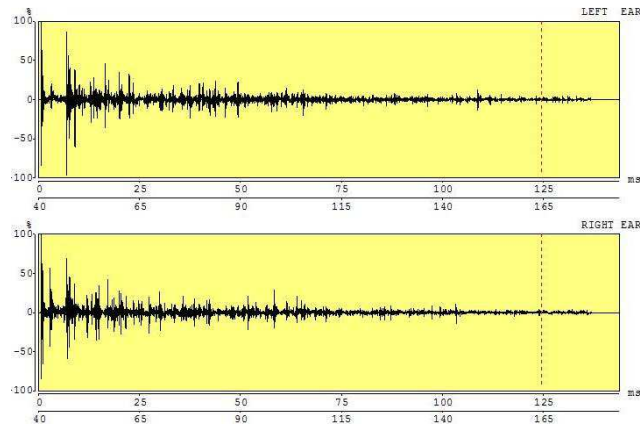


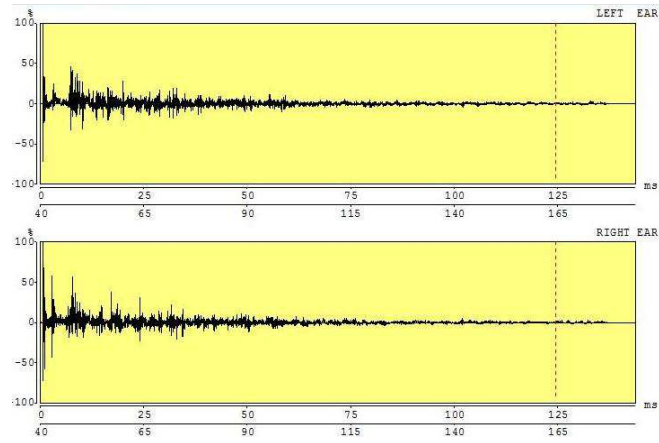


Σχήμα 7.8.3. Ρυθμός πτώσης του ακτιχητικού πεδίου στην περίπτωση τοποθέτησης κουρτίνας (πάνω) και πλακιδίων τύπου Scandia (κάτω) στο πίσω μέρος της αίθουσας.

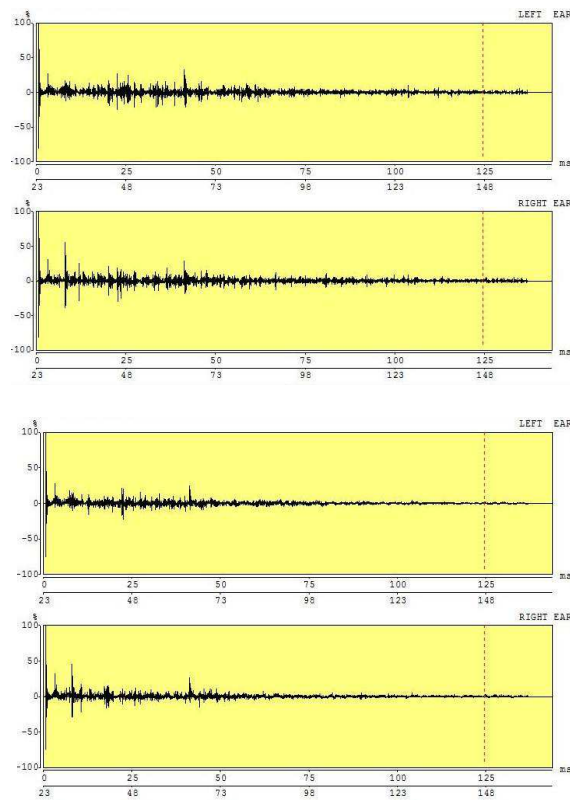
Στο σχήμα 7.8.3. παρατίθεται η πτώση του ακτιχητικού πεδίου στις δύο περιπτώσεις με κουρτίνα και πλακίδια τύπου Scandia στο πίσω μέρος της αίθουσας. Με τη χρήση των πλακιδίων η απόσβεση είναι ομαλότερη (ειδικά μετά την πάροδο 600ms) καθώς προσφέρουν μία ομοιόμορφη διάχυση των ανακλάσεων σε αντίθεση με την κουρτίνα. Πρέπει να αναφερθεί επίσης ο ρυθμός πτώσης του ηχητικού πεδίου στην περίπτωση της κουρτίνας δεν αντιστοιχεί απόλυτα στην πραγματικότητα, διότι αφενός οι κουρτίνες προσομοιώθηκαν ως επίπεδες επιφάνειες αντί διπλωμένες και αφετέρου, ο ανεπαρκής υπολογισμός του προγράμματος γύρω από το τρόπο κατανομής των ανακλάσεων που προσπίπτουν στα υλικά.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι κρουστικές αποκρίσεις των μικροφώνων MIC11, MIC5, MIC10 στις δύο περιπτώσεις.

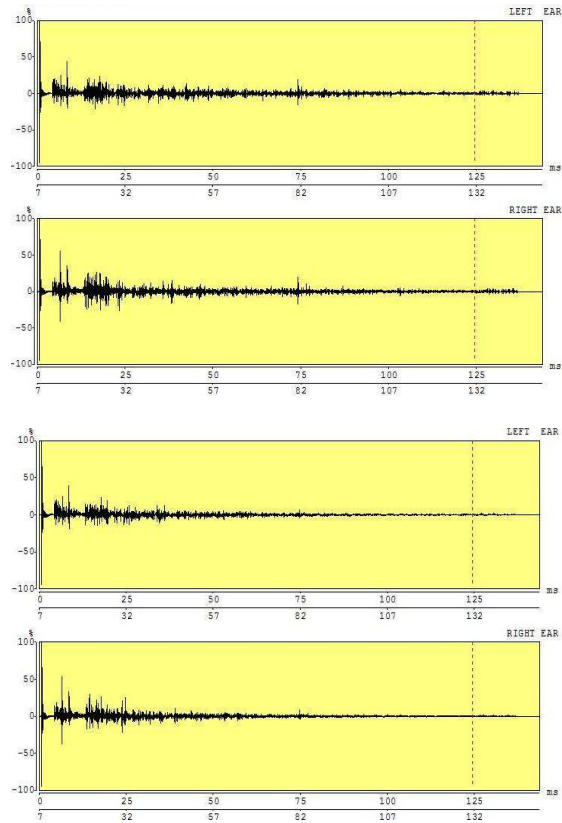




Σχήμα 7.8.4. Κρουστική απόκριση MIC10 (πίσω χώρος) (πάνω κουρτίνα-κάτω πλακίδια).

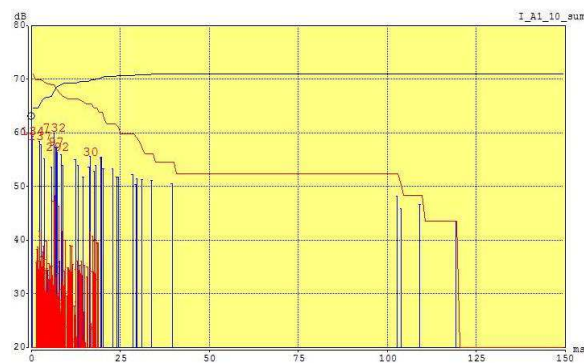


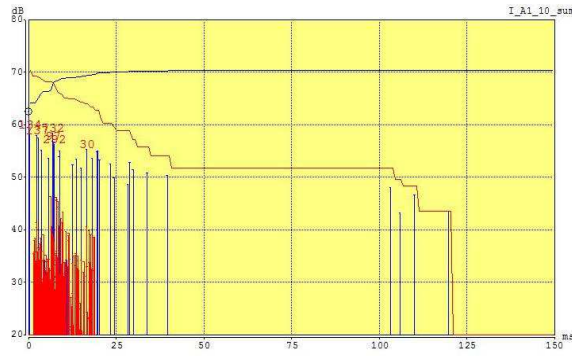
Σχήμα 7.8.5. Κρουστική απόκριση MIC5 (στο κέντρο του χώρου) (πάνω κουρτίνα-κάτω πλακίδια).



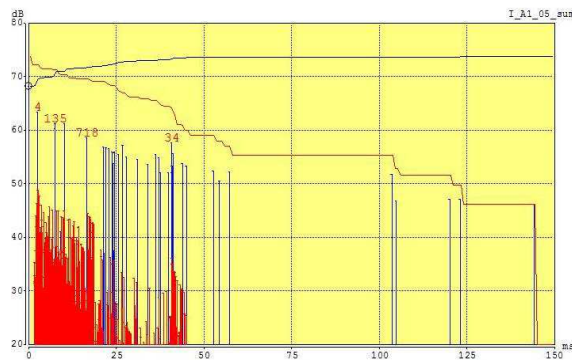
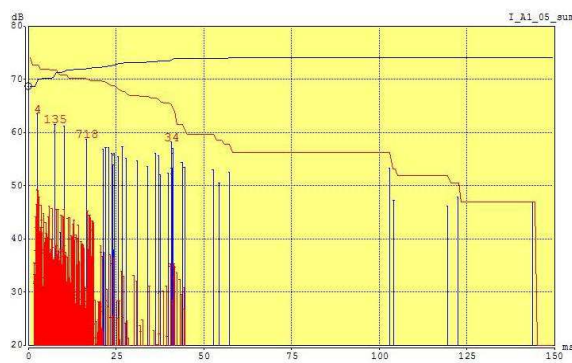
Σχήμα 7.8.6. Κρουστική απόκριση MIC11(μπροστά στο stage) στις δύο περιπτώσεις (κουρτίνα πάνω-κάτω πλακίδια).

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τα σχήματα 7.8.4., 7.8.5. και 7.8.6. οι ανακλάσεις στην περίπτωση τοποθέτησης πλακιδίων τύπου Scandia είναι ομοιόμορφα καταναμημένες στο χώρο. Αυτό σημαίνει πρακτικά ότι τα αρχικά ακουστικά προβλήματα των πίσω καθισμάτων της αίθουσας μπορούν να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικότερα σε αυτή την περίπτωση.





Σχήμα 7.8.7. Κατανομή ανακλάσεων στη θέση MIC10 (κουρτίνα-πλακίδια).

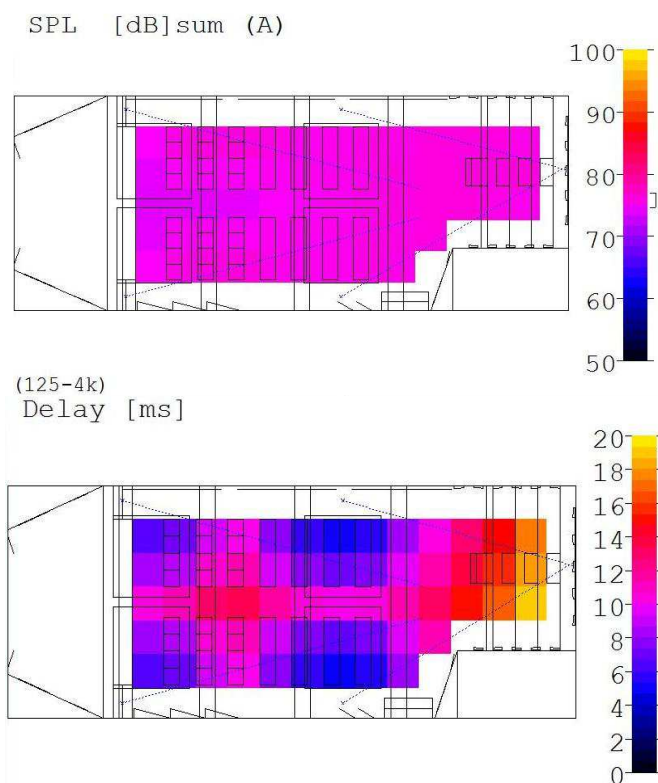


Σχήμα 7.8.8. Σχεδιάγραμμα κατανομής ανακλάσεων στη θέση MIC5 (κουρτίνα- πλακίδια).

Τέλος, στα σχήματα 7.8.7. και 7.8.8. παρατίθεται η χρονική κατανομή των ανακλάσεων στο χώρο για δύο διαφορετικές θέσεις του μικροφώνου μέτρησης. Στο χρονικό τμήμα από 100ms έως 120ms υπάρχουν καθυστερημένες ανακλάσεις, οι οποίες οφείλονται στις ανακλαστικές επιφάνειες του χώρου, όπως το τζάμι στην πρόσοψη της τροπαιοθήκης.

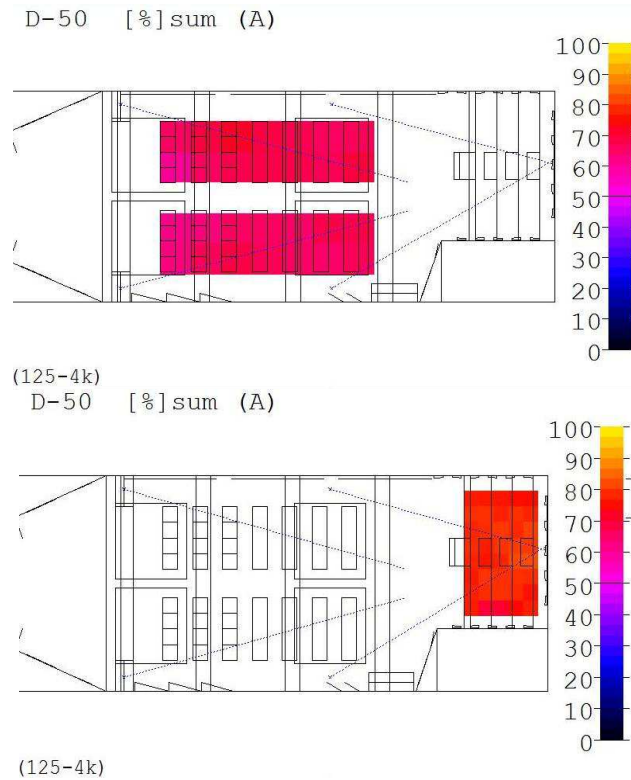
7.9 ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΧΩΡΟΥ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ

Στις ακόλουθες εικόνες παρατίθενται τα ακουστικά κριτήρια του χώρου όπως αυτά προκύπτουν μετά την ακουστική του τροποποίηση.



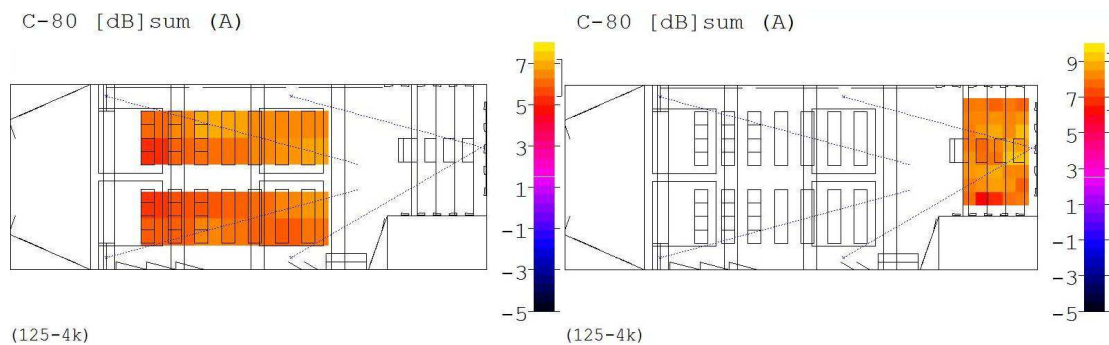
Σχήμα 7.9.1. Σχεδιαγράμματα κατανομής της ηχητικής στάθμης πίεσης SPL και Delay αρχικού ηχητικού σήματος σε όλο το χώρο.

Στο σχήμα 7.9.1. παρατηρείται η δημιουργία ομοιόμορφου ηχητικού πεδίου στο χώρο, δηλαδή η κατανομή της ηχητικής ενέργειας είναι ομαλή σε όλα τα σημεία. Επίσης, δεν παρατηρούνται μεγάλες χρονικές καθυστερήσεις στην άφιξη του απευθείας σήματος σε όλα τα σημεία του χώρου με αποτέλεσμα να αποφεύγονται φαινόμενα ηχούς.



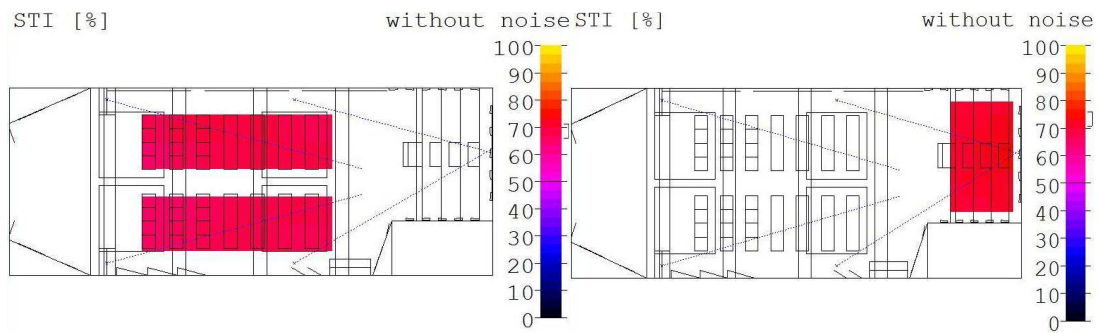
Σχήμα 7.9.2. Σχεδιάγραμμα δείκτη ευκρίνειας **D50** σε όλο το χώρο.

Βάσει του σχήματος 7.9.2. παρατηρείται μία σημαντική αύξηση του δείκτη καταληπτότητας του ήχου **D50** συγκριτικά με τις αρχικές τιμές. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να εξαχθεί ως συμπέρασμα ότι η τροποποίηση του χώρου είναι επιτυχής, διότι η τιμή του **D50** είναι μεγαλύτερη της κατώτατης προτεινόμενης (>55%).



Σχήμα 7.9.3. Σχεδιάγραμμα δείκτη ευκρίνειας **C80** σε όλο το χώρο.

Η αποδεκτή ακουστική τροποποίηση μπορεί επίσης να φανεί μέσω του σχήματος 7.9.3., η οποία παρουσιάζει τις τιμές που λαμβάνει ο δείκτης **C80** στα σημεία που δύναται να υπάρχει κοινό στην αίθουσα. Οι προκύπτουσες τιμές βρίσκονται στο προτεινόμενο πεδίο τιμών.



Σχήμα 7.9.4. Τιμές του δείκτη STI.

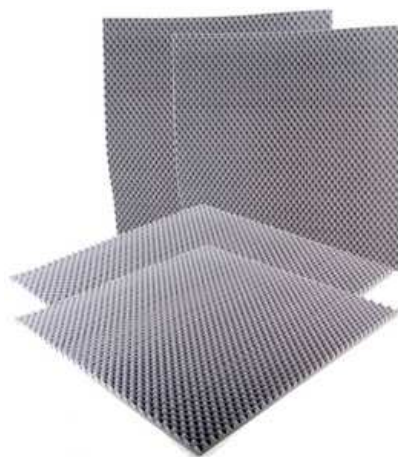
Στο σχήμα 7.9.4. παρουσιάζονται οι τιμές του δείκτη καταληπτότητας της ομιλίας **STI**, οι οποίες κυμαίνονται σε επίπεδα τιμών του 70% περίπου, τη στιγμή που η μέγιστη τιμή που μπορούν να λάβουν είναι 100%.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν της τιμές του χρόνου αντήχησης καθώς κι αυτές των επιμέρους ακουστικών δεικτών, απορρέει το συμπέρασμα ότι η προτεινόμενη ακουστική τροποποίηση του χώρου δύναται να καλύψει τις ακουστικές ανάγκες που υπαγορεύονται από την προοριζόμενη γι' αυτόν χρήση.

7.10 ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΕΝΤΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΟΣΤΟΥΣ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ

Απορροφητικές διατάξεις

- ✓ 21 τεμάχια τύπου “THE T.AKUSTIK SA-N NORPENSCHAUMSTOFF≈
Κόστος: 166€

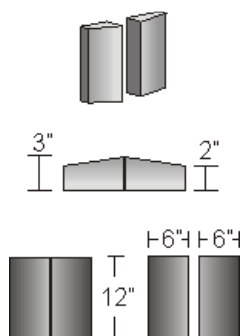


Σχήμα 7.10.1 Προτεινόμενες απορροφητικές διατάξεις.

- Γυψοσανίδες
- ✓ Για τη σκηνή: 2 γυψοσανίδες πάχους 9,5mm τύπου GKB με διαστάσεις 3m x 3m (μήκος x πλάτος)
- ✓ Για την πριονωτή πλευρική διάταξη: μία γυψοσανίδα ίδιου τύπου με διαστάσεις 3m x 1,2m (μήκος x πλάτος), 2 γυψοσανίδες με διαστάσεις 3m x 1,1m (μήκος x πλάτος) η κάθε μία ξεχωριστά και τρεις με διαστάσεις 3m x 0,3m (μήκος x πλάτος) για τα κενά μεταξύ τους
- ✓ Για τον τοίχο δίπλα στην είσοδο: μία γυψοσανίδα ίδιου τύπου με διαστάσεις 3m x 2,2m.

Συνολικό κόστος: 265,00€

- Πλακίδια τύπου SCANDIA
 - ✓ 48 πλακίδια τύπου Scandia Scatter Blocks της εταιρείας Primacoustic με διαστάσεις όπως υπαγορεύονται από την εικόνα 43.
- Κόστος 335,00€



Σχήμα 7.10.2 Διαστάσεις πλακιδίων τύπου SCANDIA.

- Πόρτα εισόδου
 - ✓ Ξύλινη πόρτα με διαστάσεις 1,7m x 2,5m (πλάτος x ύψος)
- Κόστος 200,00€
- Ανακλαστικές επιφάνειες
 - ✓ 4 τεμάχια με διαστάσεις 2,4m x 2,4m(μήκος x πλάτος), της εταιρείας Kinetics Noise Control.



Σχήμα 7.10.3 Ανακλαστήρες της Kinetics Noise Control.

✓ 2 τεμάχια με διαστάσεις 2m x 0,5m (μήκος x πλάτος)
Κόστος: 5.000,00€

• Ηχεία
✓ 4 τεμάχια JBL AC15
Κόστος: 1.375,00€

• Κουρτίνα
✓ 2 κουρτίνες με διαστάσεις 3,4m x 1,5 m (μήκος x πλάτος)
✓ 1 κουρτίνα με διαστάσεις 4 x 1,5m (μήκος x πλάτος)
Κόστος: 60,00€

• Τζάμι τροπαιοθήκης
✓ Διπλό τζάμι με διαστάσεις 2,9m x 2,5m (μήκος x πλάτος)
Κόστος 550,00€

• Χαλί
✓ Καλυπτόμενη επιφάνεια 74,8m²
Κόστος: 1.400,00€

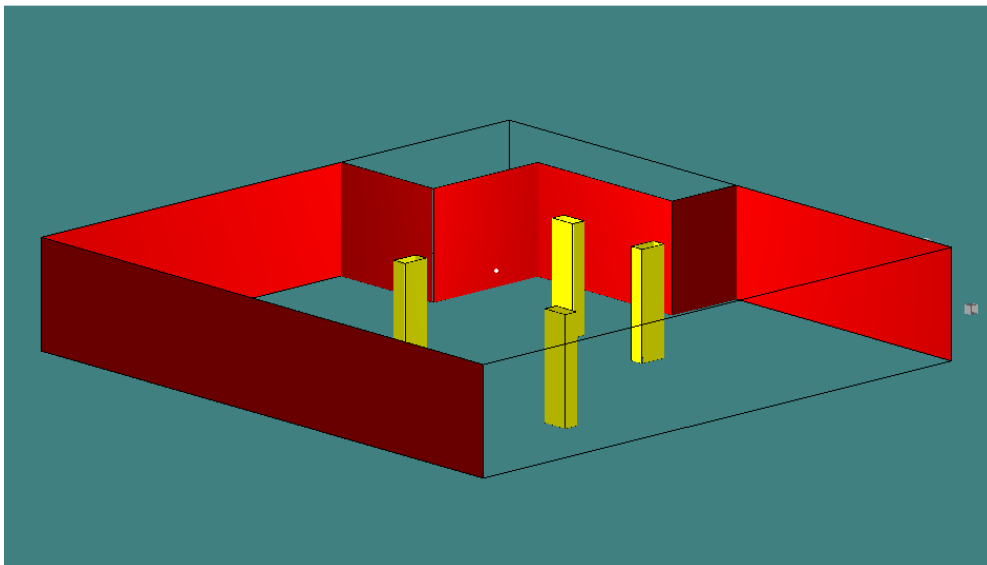
Συνολικό κόστος: 9.350,00€

Στις τιμές δε συμπεριλαμβάνονται οι εργατικές αμοιβές, τα μεταφορικά καθώς και ο Φ.Π.Α.

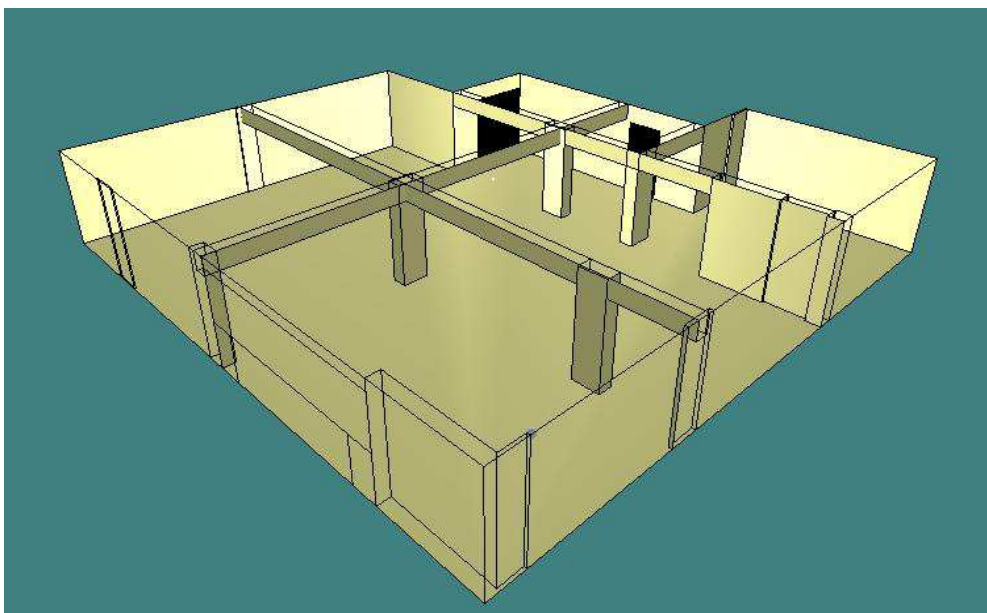
8. ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ ΕΚΔΗΛΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΓΥΜΝΑΣΙΟΥ ΑΤΣΙΠΟΠΟΥΛΟΥ

Ο χώρος αυτός είναι μία αρκετά μεγάλη αίθουσα που όμως έχει μικρό ύψος σχετικά με το μέγεθός της. Ζητήθηκε να γίνει ακουστική βελτίωση στο χώρο αυτό. Το πρώτο βήμα για την πραγματοποίηση της μελέτης είναι η αναπαράσταση του χώρου με πρόγραμμα προσομοίωσης.

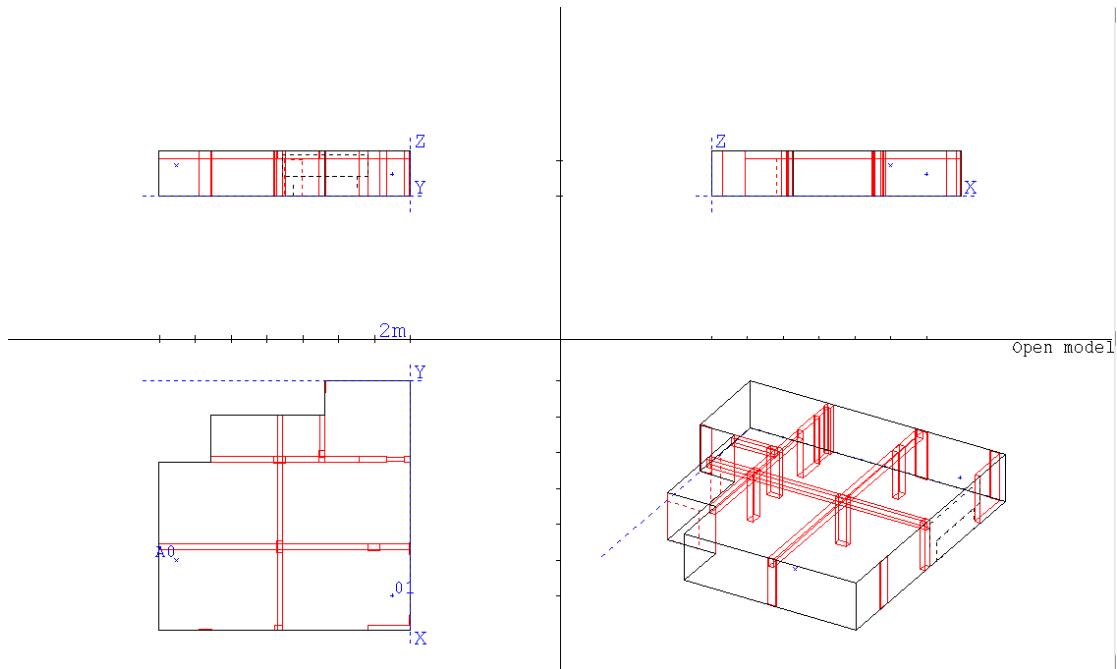
Τα σχήματα 8.1., 8.2., 8.3., παρουσιάζουν την εικονική αναπαράσταση του χώρου.



Σχήμα 8.1. Εμφάνιση του χώρου στα πρώτα στάδια της εικονικής αναπαράστασης.



Σχήμα 8.2. Εμφάνιση του ολοκληρωμένου εικονικού αντιγράφου του χώρου.



Σχήμα 8.4. Οι άξονες στους οποίους βασίστηκε η εικονική απεικόνιση.

8.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΧΩΡΟΥ

Ο χώρος έχει: Μήκος	=	13.9m
Πλάτος	=	14.07m
Ύψος	=	2.55m

Ο χώρος δεν είναι παραλληλεπίπεδος καθώς στη διάσταση του μήκους και του πλάτους υπάρχουν δύο τοίχοι σε μικρότερη και διαφορετική για τον καθένα απόσταση από αυτή του μεγαλύτερου μήκους και πλάτους αντίστοιχα.

Οι 4 κεντρικές κολόνες έχουν:

Μήκος	=	0,65m
Πλάτος	=	0,34m

Υπάρχουν γενικά 13 κολόνες και 4 δοκάρια στο χώρο, με τα δοκάρια να έχουν διαστάσεις:

Μήκος = 0,43m	Πλάτος = 0,29m
---------------	----------------

Υπάρχουν δύο πόρτες, μία της εισόδου στο χώρο και μία που οδηγεί σε ένα διπλανό δωμάτιο. Οι διαστάσεις των οποίων είναι οι εξής:

Πόρτα εισόδου:	Μήκος = 1.70m	Ύψος = 2,08m
Πόρτα δωματίου:	Μήκος = 1,27m	Ύψος = 2,04m

Relative absorption area [%]

Key name	Area	Area	125	250	500	1k	2k	4k	Used
	[m ²]	[%]							
CONCRETE	565.7	97.4	47.5	50.2	70.9	69.1	67.9	75.5	65
GLASS	5.7	1.0	3.8	2.0	1.1	1.0	0.7	0.5	1
OPEN	5.5	0.9	37.1	39.1	27.6	27.0	29.8	23.3	2
ALUMINUM	3.9	0.7	11.5	8.7	0.4	2.9	1.6	0.7	1
	580.9								

Σχήμα 8.5. Παρουσίαση της επιφάνειας κάθε υλικού και του αντίστοιχου συντελεστή απορρόφησης.

Ο χώρος καταλαμβάνει όγκο 358.5m³.

8.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΠΟΣΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ

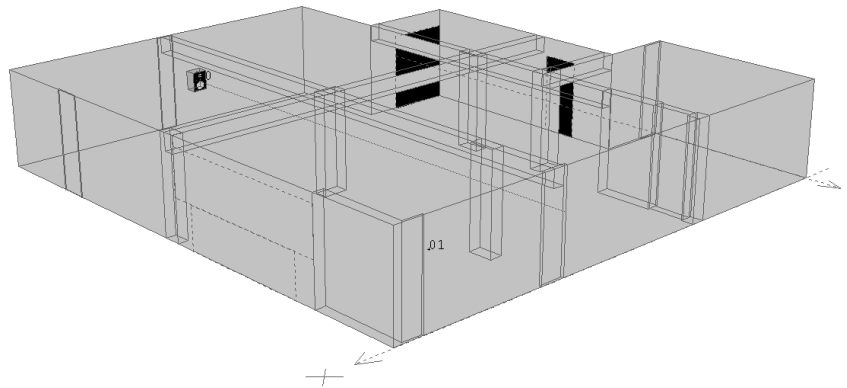
Κάνοντας μια εκτίμηση του χρόνου αντήχησης (RT estimation) με την βοήθεια του CATT-Acoustic ελήφθησαν τα εξής αποτελέσματα:

	125	250	500	1k	2k	4k
EyrT	5,88	6,14	4,20	3,93	3,47	2,07 s
EyrTg	6,08	6,15	4,25	3,97	3,52	2,08 s
SabT	4,74	4,87	3,38	3,19	2,87	1,77 s
T-15	2,56	2,58	2,74	2,74	2,77	2,11 s
T-30	-	-	-	2,26	2,29	1,89 s
AbsC	2,12	1,95	2,79	2,85	2,91	3,88 %
AbsCg	2,05	1,94	2,75	2,82	2,87	3,87 %
MFP	3,18	3,14	3,15	3,15	3,17	3,15 m
DiffS	1,91	1,98	1,97	1,99	2,01	1,95 %

Σχήμα 8.2.1. Εκτίμηση του χρόνου αντήχησης του χώρου πριν τη μελέτη.

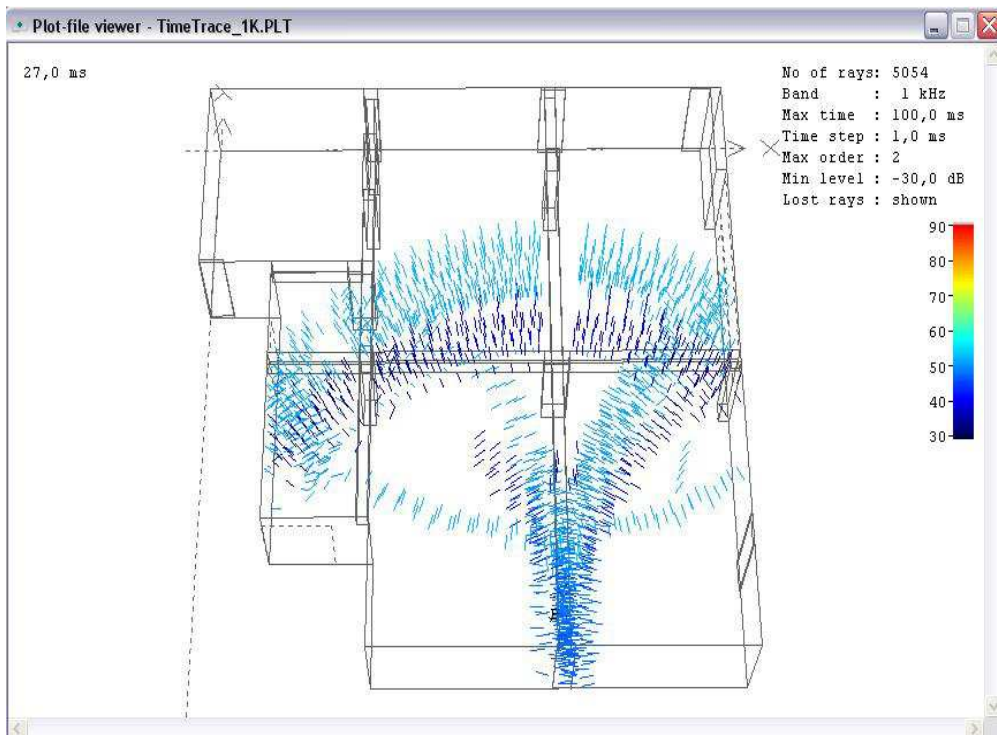
Φαίνεται πως ο χώρος αυτός έχει αρκετά μεγάλο χρόνο αντήχησης, με ιδιαίτερο πρόβλημα στις χαμηλές συχνότητες μέχρι και τα 500Hz. Αυτό το φαινόμενο δείχνει την πιθανή ύπαρξη στάσιμων κυμάτων στο χώρο και κυρίως αξονικών, καθώς οι απέναντι τοίχοι του χώρου είναι παράλληλοι. Για τον εντοπισμό της διαδρομής της ηχητικής ενέργειας στο χώρο χρησιμοποιήθηκε η επιλογή του CATT-Acoustic που ονομάζεται time trace plot-file.

Για να γίνει όμως αυτό έπρεπε πρώτα να τοποθετηθεί μία ηχητική πηγή στο χώρο. Με τη βοήθεια του προγράμματος τοποθετήθηκε ως πηγή ένα ηχείο στην πιθανή θέση ενός ομιλητή ο οποίος κοιτάει τη απέναντι άκρη της αίθουσας προς τους θεατές.



Σχήματα 8.2.2. Θέση της ηχητικής πηγής στο χώρο.

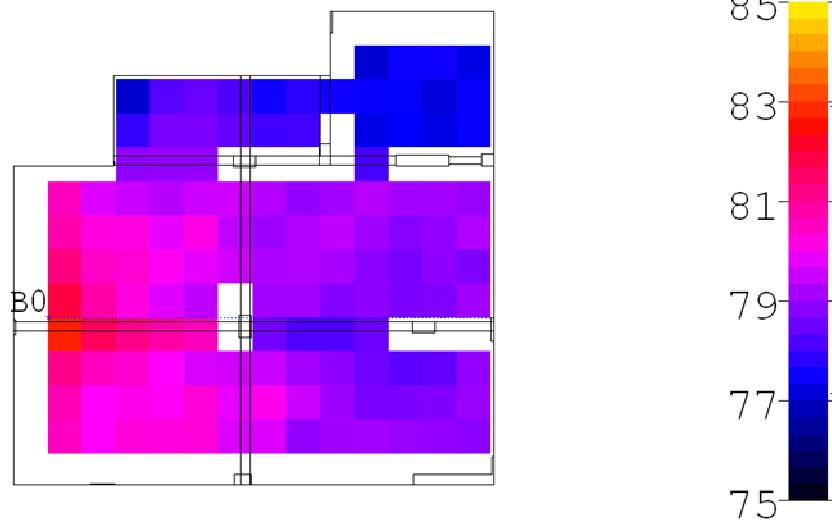
Αφού τοποθετήθηκε η πηγή μπορεί να πραγματοποιηθεί η ανάλυση του χώρου στην συχνότητα των 1000 Hz. Η ανάλυση μπορεί να γίνει με τη μορφή animation, το οποίο αναπαριστά τη διάδοση των ακτίνων στο χώρο. Αυτή η ανάλυση φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 8.2.3. Παρουσίαση της διάδοσης των ακτίνων στην αίθουσα με την βοήθεια του CATT Acoustic.

Με τη βοήθεια του προγράμματος, παρακάτω παρουσιάζονται τα λοιπά ακουστικά στοιχεία του χώρου.

SPL [dB] sum (A)

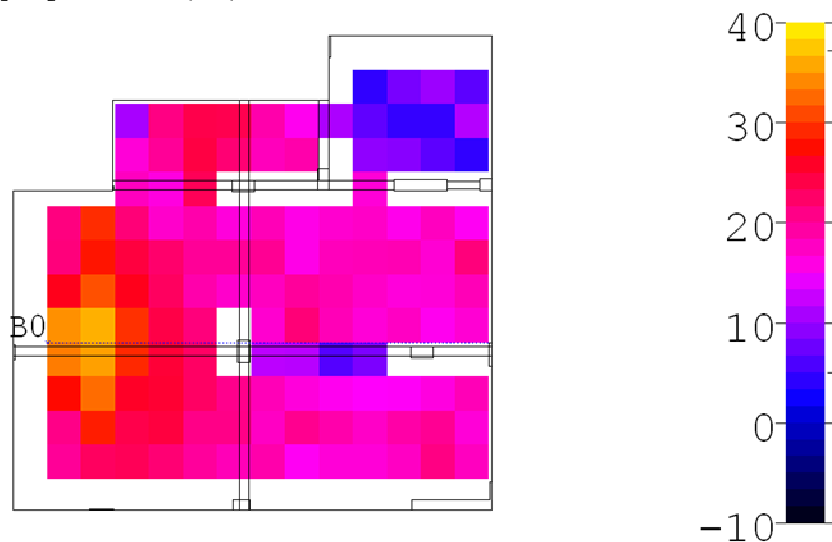


(125-4k)

Σχήμα 8.2.4. Κατανομή της ηχητικής πίεσης στο χώρο (A weighted).

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι στο πίσω μέρος της αίθουσας η στάθμη ηχητικής πίεσης λαμβάνει την κατώτερή της τιμή και είναι πιθανόν με υψηλό θόρυβο βάθους να είναι πολύ δύσκολη η κατανόηση του ήχου στο συγκεκριμένο σημείο. Ειδικά στο πλάι που υπάρχει το χώρισμα, η ηχητική πίεση λαμβάνει την κατώτατη τιμή της.

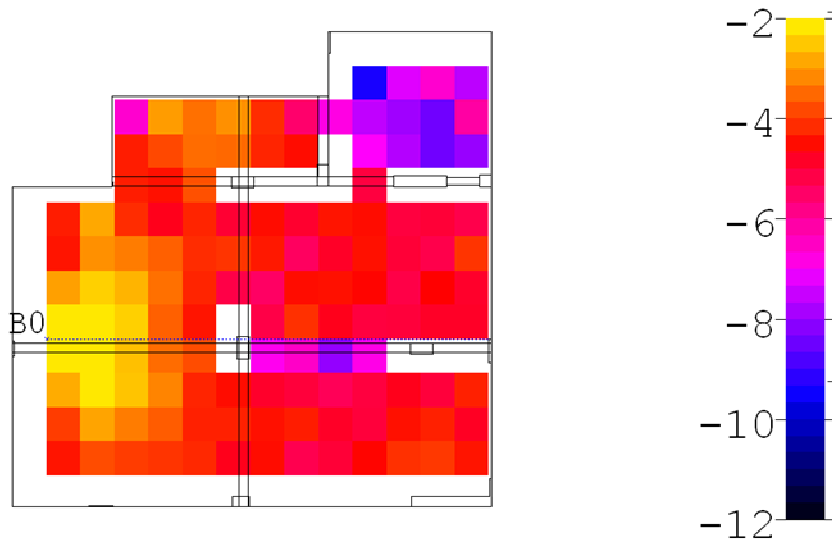
D-50 [%] sum (A)



(125-4k)

Σχήμα 8.2.5. Κατανομή του δείκτη ευκρίνειας **D50** στο χώρο.

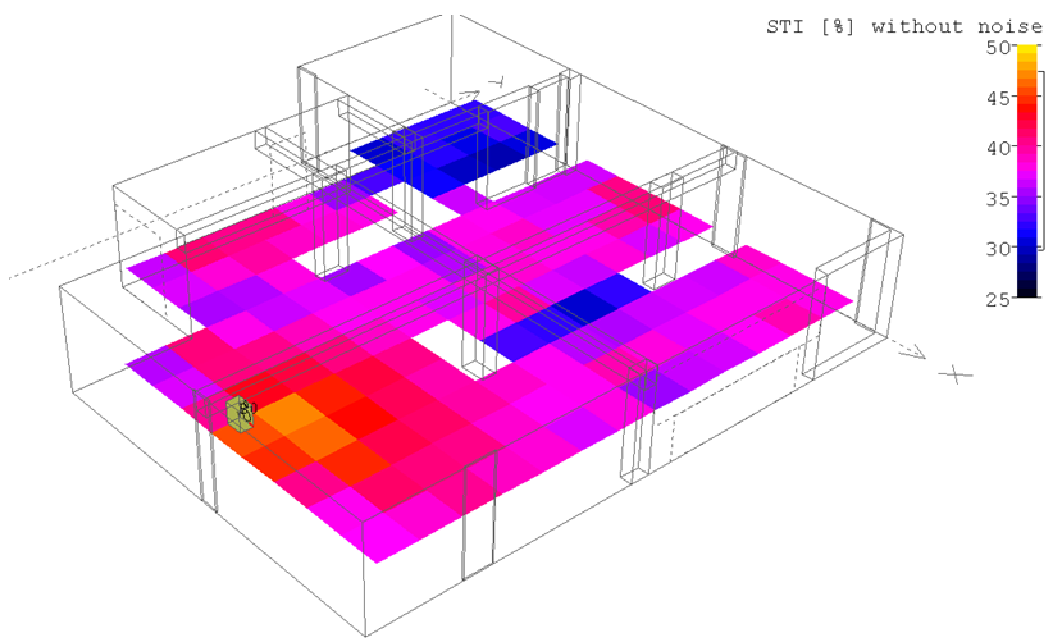
C-80 [dB] sum (A)



(125-4k)

Σχήμα 8.2.6. Κατανομή του δείκτη διαύγειας **C80** στο χώρο.

Στα παραπάνω σχήματα φαίνεται πόσο χαμηλά είναι τα επίπεδα στους δείκτες ευκρίνειας και διαύγειας. Για τον πρώτο μια καλή τιμή είναι πάνω από το 55 % και ο δεύτερος πρέπει να είναι πάνω από 4. Αυτοί οι δείκτες αντικατοπτρίζουν το πρόβλημα που έχει ο χώρος αυτός όσον αφορά την ομιλία και την αντίληψή της από το κοινό. Πιο ξεκάθαρα, αυτό το πρόβλημα φαίνεται και αναλύεται από το δείκτη καταληπτότητας της ομιλίας **STI** που παρουσιάζεται παρακάτω.



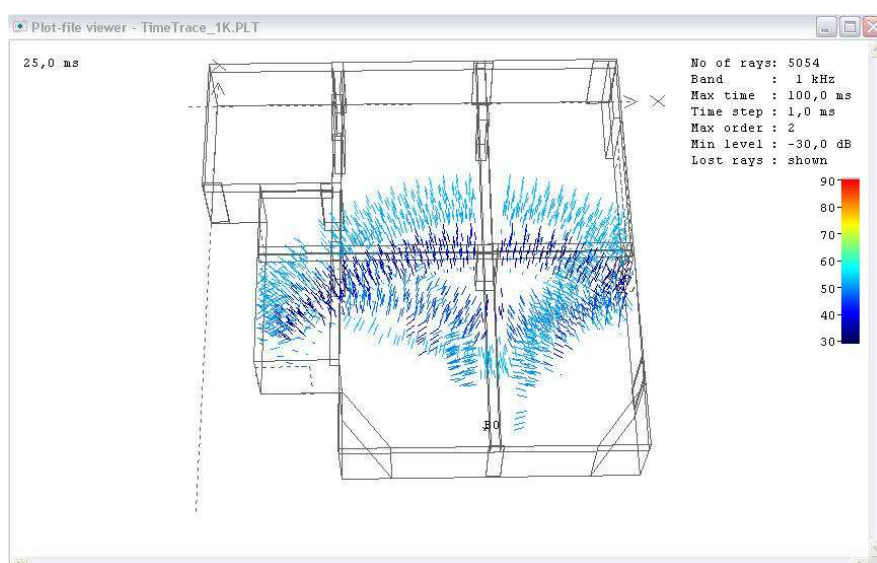
Σχήμα 8.2.7. Κατανομή του δείκτη καταληπτότητας της ομιλίας **STI** στο χώρο.

Το μεγάλο πρόβλημα του χώρου με την ομιλία είναι στη βάθος αριστερά γωνία όπου ο δείκτης πέφτει στα επίπεδα του 30%, το οποίο είναι ένα πολύ χαμηλό ποσοστό αν αντιληφθεί κανείς ότι μία μέτρια τιμή του δείκτη είναι πάνω από 45%. Αυτό είναι δύσκολο να βελτιωθεί σε εκείνο το σημείο του χώρου, καθώς μία κολόνα και ένα χώρισμα εμποδίζουν την απευθείας διάδοση του ήχου.

8.3 ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ

Η μελέτη βασίστηκε στα αποτελέσματα από την αναπαράσταση του χώρου από το CATT-Acoustic. Έπειτα από μελέτη των αποτελεσμάτων αυτών αποφασίστηκε η μελέτη του χώρου να γίνει σε δύο σκέλη. Στο πρώτο σκέλος θα γίνει προσπάθεια να βελτιωθεί η ακουστική του χώρου χωρίς την προσθήκη ηλεκτροακουστικών συστημάτων. Ενώ στο δεύτερο σκέλος, η ακουστική μελέτη θα προσαρμοστεί και στην προσθήκη ηλεκτροακουστικών συστημάτων έτσι ώστε ο χώρος να ανταποκρίνεται και στις δύο περιπτώσεις λειτουργίας (χωρίς χρήση ηχείων αλλά και με τη χρήση τους).

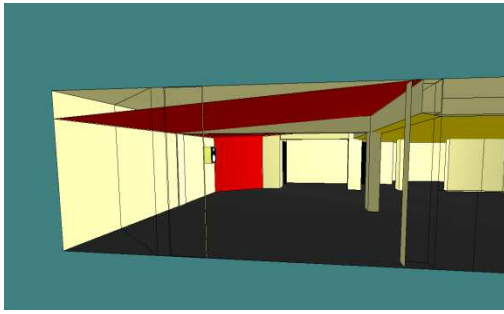
Κατά το πρώτο σκέλος της ακουστικής μελέτης έγινε προσπάθεια να κατευθυνθεί, όσο το δυνατόν μεγαλύτερο ποσοστό της αρχικής ηχητικής ενέργειας του ομιλητή προς τις θέσεις των ακροατών. Το αποτέλεσμα της προσπάθειας αυτής φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 8.3.2.



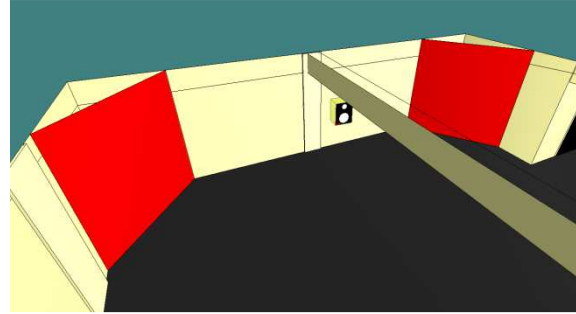
Σχήμα 8.3.2. Διάδοση ηχητικών ακτίνων στο χώρο.

Πρώτος στόχος είναι η οδήγηση μεγάλου ποσοστού της ηχητικής ενέργειας της πηγής προς τους ακροατές. Η θέση της πηγής ορίστηκε 1m περίπου μπροστά από τον πίνακα της αίθουσας.

Για την ικανοποίηση του στόχου αυτού προτείνεται η τοποθέτηση τριών ανακλαστικών επιφανειών γύρω από τη θέση της πηγής. Μία πάνω από τη θέση αυτή, στην οροφή. Δύο δεξιά και αριστερά από τη θέση αυτή.



Σχήμα 8.3.4. Πάνω ανακλαστική επιφάνεια.



Σχήμα 8.3.5. Πλάγιες ανακλαστικές επιφάνειες.

Η πάνω ανακλαστική επιφάνεια θα εκτείνεται από τον τοίχο ο οποίος βρίσκεται πίσω από τη θέση της πηγής-ομιλητή, μέχρι και το πρώτο παράλληλο σε αυτό τον τοίχο δοκάρι. Θα ξεκινάει από την ένωση του δοκαριού και της οροφής, και θα καταλήγει 43cm κάτω από την οροφή στον πίσω από τη θέση της πηγής τοίχο.

Οι δύο πλάγιες ανακλαστικές επιφάνειες θα είναι συμμετρικές σύμφωνα με την θέση της πηγής που ορίστηκε. Η αρχή τους ορίζεται 1,57m από την ένωση των τοιχωμάτων στον πίσω τοίχο και 2m από την ένωση στον αντίστοιχο για κάθε πλευρά πλάγιο τοίχο.

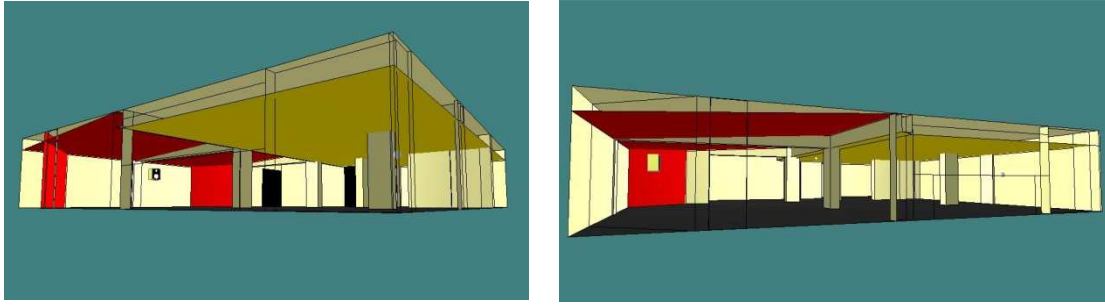


Σχήμα 8.3.6. Διαστάσεις πλαϊνών ανακλαστικών επιφανειών.

Οι ανακλαστήρες θα αποτελούνται από μονή γυψοσανίδα, η οποία στο πίσω μέρος της θα καλύπτεται από πετροβάμβακα.

Δεύτερος στόχος ήταν η απορρόφηση ενός ποσοστού της ηχητικής ενέργειας που διαδίδεται στη διάσταση του ύψους, καθώς και η αντιμετώπιση των στάσιμων κύματων που δημιουργούνται σε αυτή τη διάσταση. Έτσι ώστε να επιτευχθεί καλύτερη τιμή καταληπτότητας του εκπεμπόμενου σήματος από τους ακροατές, καθώς και να μειωθεί ο χρόνος αντήχησης της αίθουσας σε προτεινόμενα επίπεδα.

Για την επίτευξη του δεύτερου στόχου θα τοποθετηθεί αρχικά τάπητας σε όλο το χώρο. Στη συνέχεια θα τοποθετηθεί επιφάνεια ξύλου στην οροφή έτσι ώστε να καλυφθούν οι κοιλότητες που δημιουργούν τα δοκάρια που βρίσκονται στην οροφή του χώρου.



Σχήμα 8.3.7. Αναπαράσταση του χώρου με τις ανακλαστικές και τις απορροφητικές επιφάνειες.

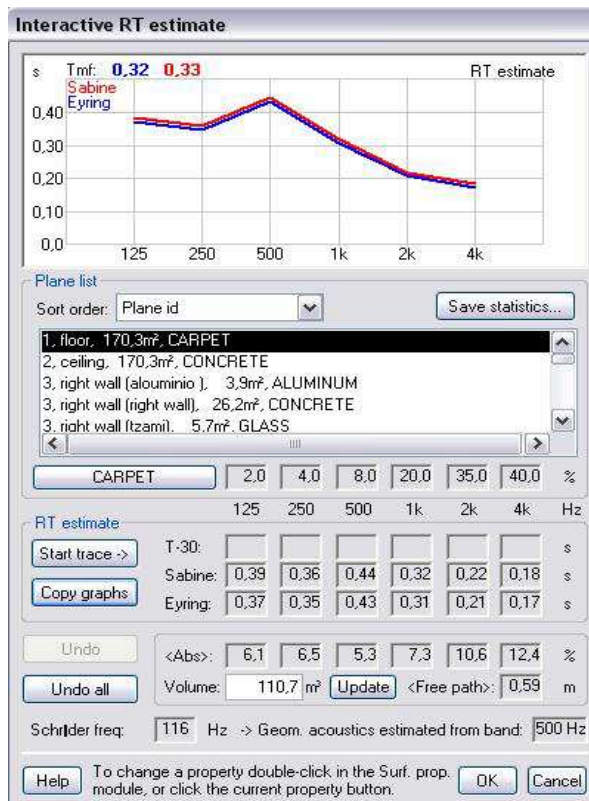
Τα πρόσθετα υλικά που προσθέτονται είναι τα εξής:

- Μοκέτα 170,3m².
- Γυψοσανίδα (πάνω ανακλαστική επιφάνεια) 62m².
- Γυψοσανίδα (δεξιά και αριστερά) 6,5m², η κάθε μία.
- Ψευδοροφή 98,5m².

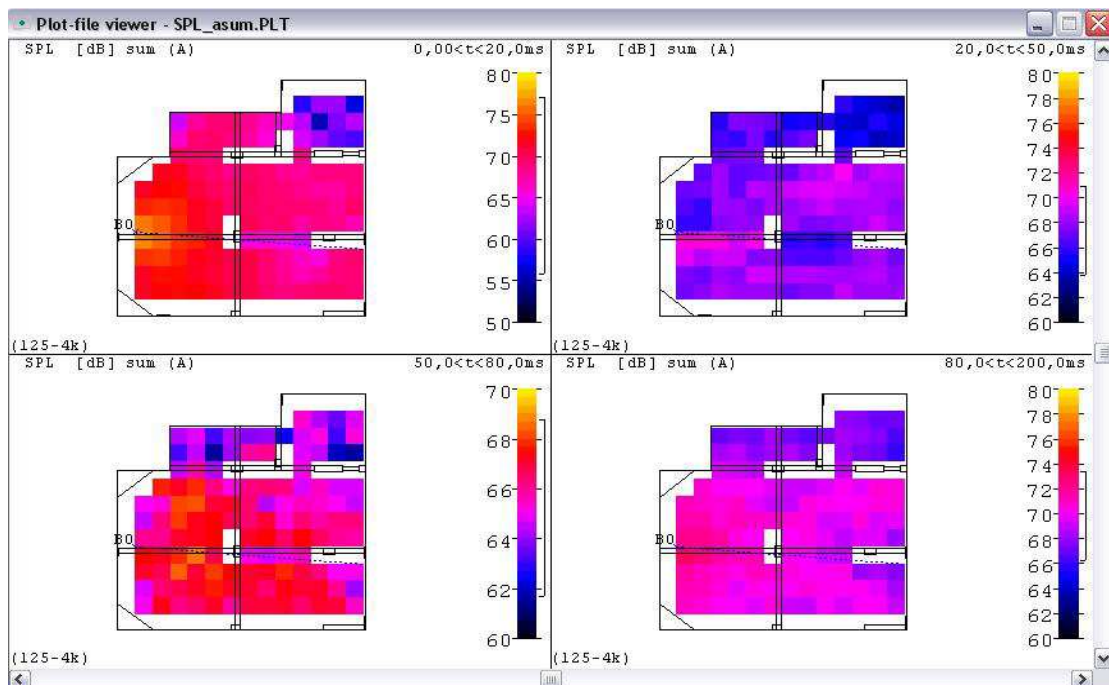
Με τη βοήθεια της αναπαράστασης του χώρου και του ηχητικού πεδίου σε αυτόν εξήχθησαν τα παρακάτω δεδομένα.

	125	250	500	1k	2k	4k	
EyrT	1,37	1,26	1,65	1,15	0,72	0,60	s
EyrTg	1,89	1,75	2,14	1,53	1,00	0,79	s
SabT	0,37	0,35	0,43	0,31	0,21	0,18	s
T-15	2,65	2,52	2,40	2,43	2,23	1,68	s
T-30	2,35	2,32	2,16	2,21	2,01	1,90	s
AbsC	8,45	9,08	6,90	9,81	14,88	16,91	%
AbsCg	6,19	6,61	5,32	7,39	10,76	12,55	%
MFP	3,02	3,02	3,01	3,04	3,00	3,05	m
Diffs	4,54	4,52	4,55	4,55	4,60	4,56	%

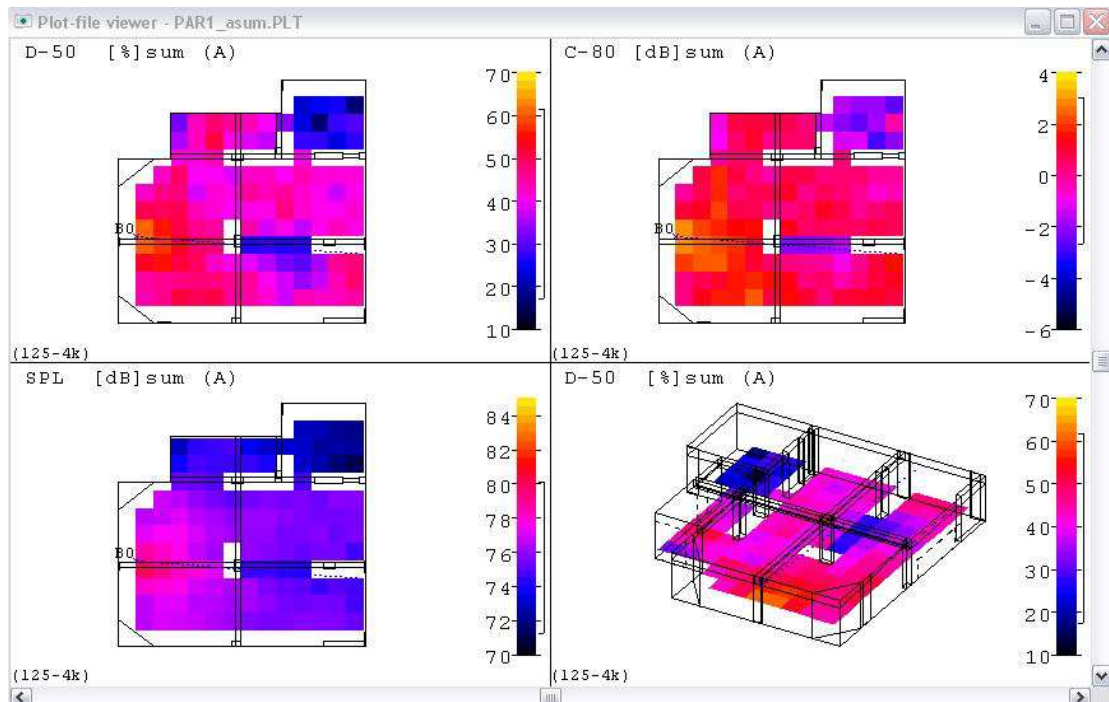
Σχήμα 8.3.8. Επιπλέον στοιχεία για το χρόνο αντήχησης του χώρου.



Σχήμα 8.3.9. Ενδεικτικές τιμές χρόνου αντήχησης οι οποίες υπολογίστηκαν με το Catt Acoustic.

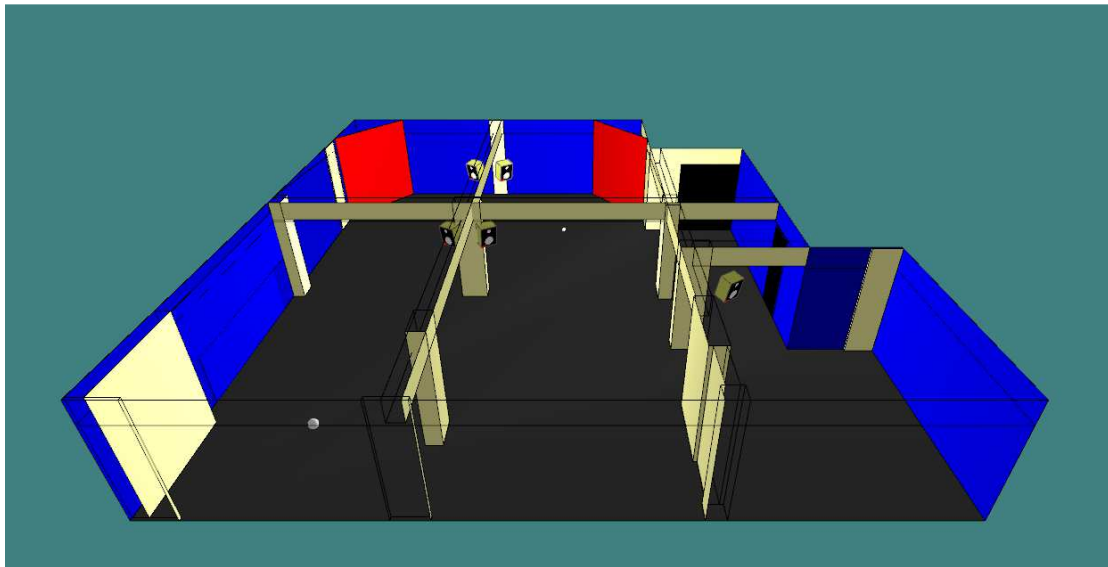


Σχήμα 8.3.10. Τιμές της στάθμης ηχητικής πίεσης σε σχέση με το χρόνο.



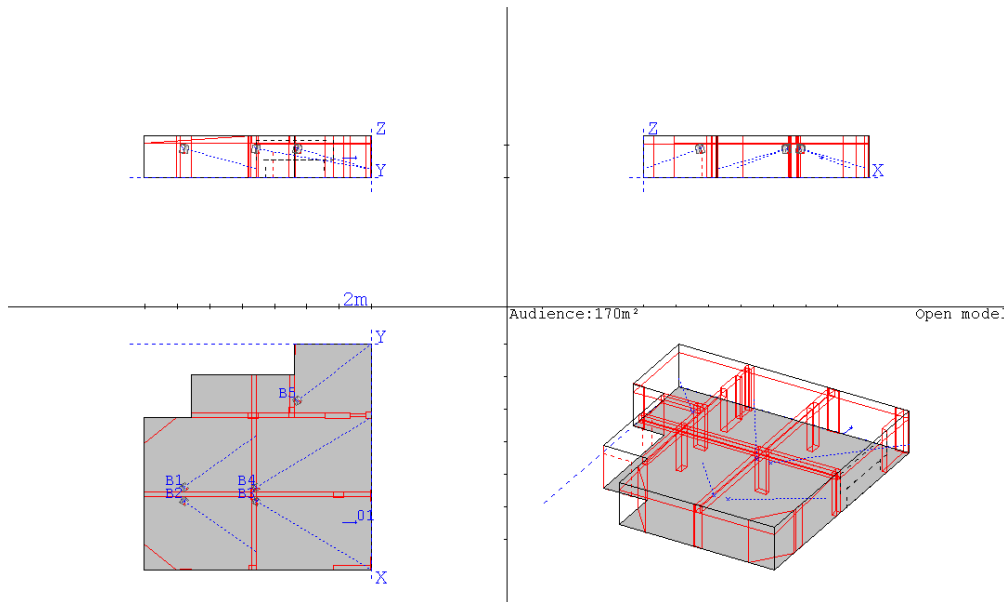
Σχήμα 8.3.11. Τιμές ακουστικών δεικτών μετά την τροποποίηση του χώρου.

Στο δεύτερο σκέλος της μελέτης θα προστεθούν τα στοιχεία που χρειάζονται έτσι ώστε ο χώρος να μπορεί να υποστηρίξει την ακρόαση με, αλλά και χωρίς την χρήση ηλεκτροακουστικών συστημάτων.



Σχήμα 8.3.12. Αναπαράσταση της τελικής μορφής του χώρου.

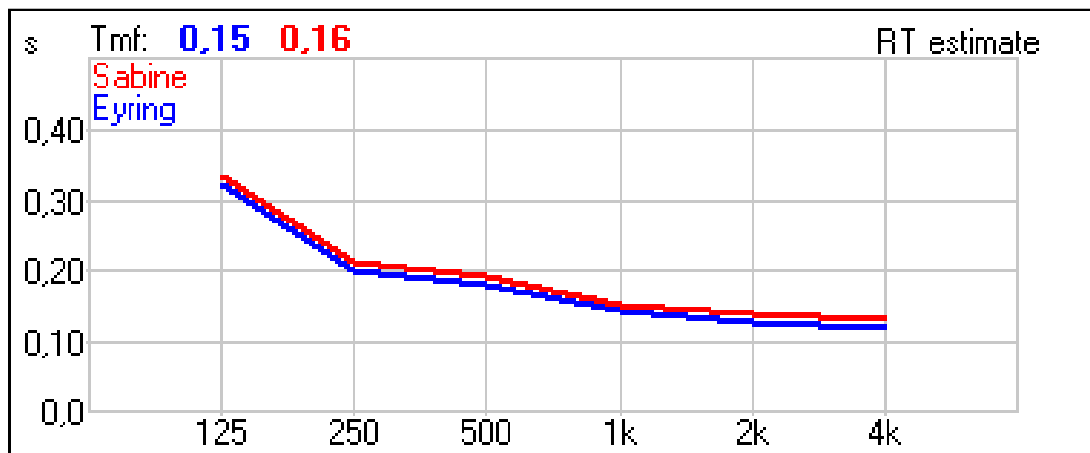
Αρχικά για την ηχητική κάλυψη του χώρου θα τοποθετηθούν 5 ηχεία. Δύο μπρόστα και πάνω από την πηγή, κρεμάμενα από την οροφή, στοχευμένα δεξιά και αριστερά προς τους ακροατές. Δύο στη πρώτη από την πηγή κολώνα στο κέντρο του χώρου, τα οποία θα κοιτούν δεξιά και αριστερα αντίστοιχα με τα προηγούμενα. Ένα στον απομονωμένο χώρο στο βάθος όπου και έχουμε το μεγαλύτερο πρόβλημα έντασης. Η διάταξη των ηχείων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 8.3.13.



Σχήμα 8.3.13. Προτεινόμενη διάταξη των ηχείων στο χώρο.

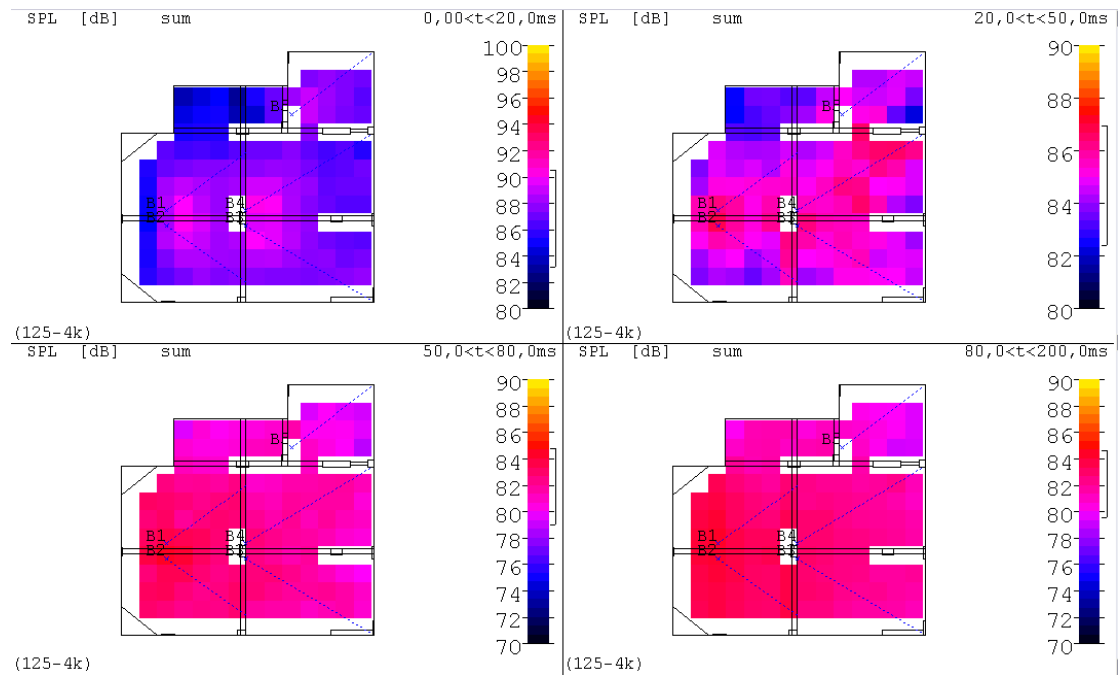
Στη συνέχεια, για τη μείωση των ανακλάσεων από τους πλαϊνούς και πίσω τοίχους που αναπόφευκτα δημιουργούνται με τη χρήση ηχείων θα τοποθετηθεί κουρτίνα κατά μήκος όλων των πλαϊνών και πίσω τοίχων του χώρου. Η κουρτίνα που προτείνεται θα είναι βελούδινη πάχους 5mm. Όμως και κάποιου άλλου είδους κουρτίνα, αλλά περίπου ίδιου πάχους θα ήταν ικανοποιητικά το ίδιο αποτελεσματική.

Για άλλη μία φορά χρησιμοποιώντας τη γραφική και ηχητική, ως προς τη διάδοση, αναπαράσταση εξάγονται τα παρακάτω δεδομένα.



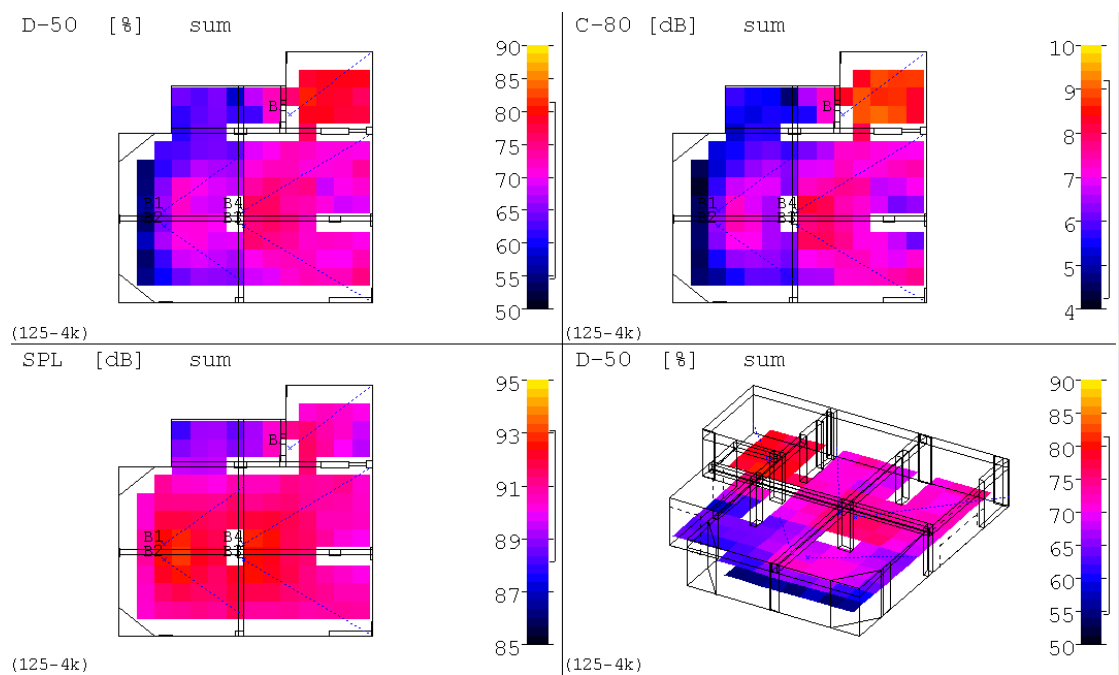
Σχήμα 8.3.14. Παρουσίαση του υπολογισμένου χρόνου αντήχησης.

Όπως διαπιστώνεται από το παραπάνω σχήμα 8.3.14., ο χρόνος αντήχησης έχει μειωθεί δραστικά με τη χρήση και της κουρτίνας. Έτσι επιτυγχάνονται τα παρακάτω ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά την ακουστική ποιότητα του χώρου με τη χρήση των ηχείων.



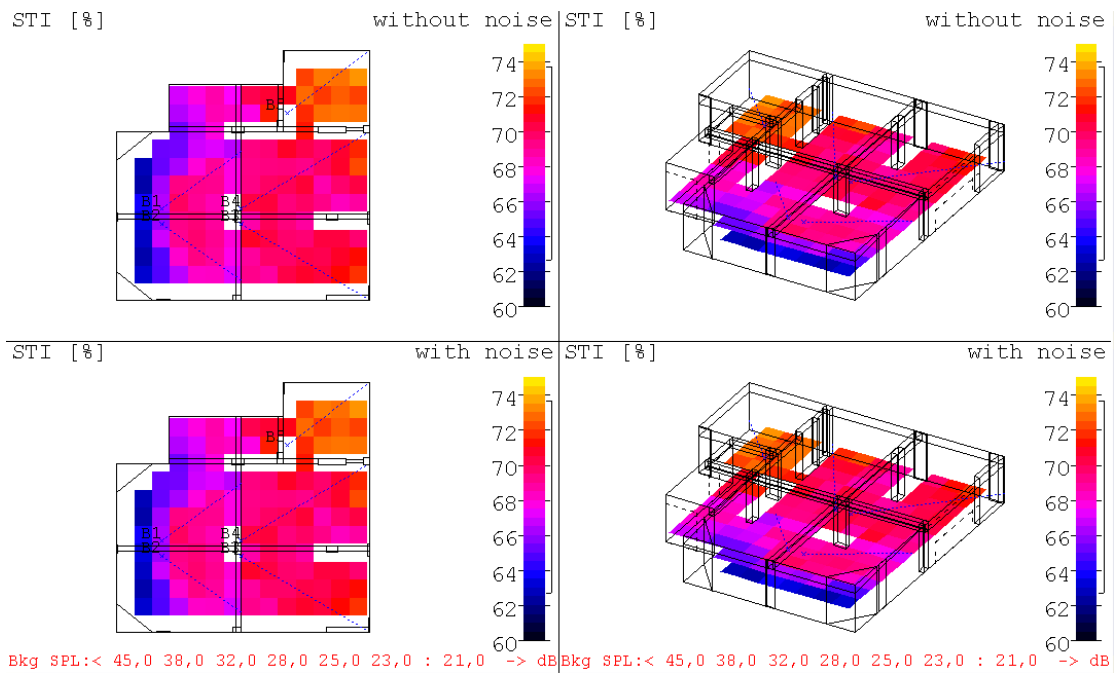
Σχήμα 8.3.15. Παρουσίαση της στάθμης ηχητικής πίεσης σε σχέση με το χρόνο.

Στο σχήμα 8.3.15. παρατηρείται η ομοιόμορφη κατανομή της ηχητικής ενέργειας σε όλο το ακροατήριο.



Σχήμα 8.3.16. Ακουστικά στοιχεία του ηχητικού πεδίου του χώρου με τη χρήση ηχείων.

Στο παραπάνω σχήμα 8.3.16. διαπιστώνεται η εξαιρετική βελτίωση στις τιμές των ακουστικών παραγόντων του ηχητικού πεδίου του χώρου, με τους δείκτες ευκρίνειας αλλά και καταληπτότητας του ήχου να βρίσκονται σε πολύ ικανοποιητικό επίπεδο.



Σχήμα 8.3.17. Παρουσίαση των τιμών του **STI** για την τελική μορφή του χώρου, υπολογισμένους με αλλά και χωρίς θόρυβο βάθους.

Η χρήση της κουρτίνας κατά μήκος των τοιχωμάτων δίνει μία ευελιξία στη χρήση του χώρου. Στην περίπτωση που ο χώρος χρησιμοποιείται για μία διάλεξη λίγων ατόμων στην οποία δεν χρειάζεται η χρήση των ηχείων, τραβώντας τις κουρτίνες στο μπροστινό μέρος το ηχητικό πεδίο συνεχίζει να καλύπτει τις απαιτήσεις για τη διάδοση της ηχητικής ενέργειας από τον ομιλητή προς τους ακροατές.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο χώρος μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε με τον ένα ή τον άλλο τρόπο εξασφαλίζοντας ένα ικανοποιητικό ηχητικό αποτέλεσμα. Τέλος, παρουσιάζεται ο χρόνος αντήχησης του χώρου, υπολογισμένους με τους δύο πιο γνωστούς τύπους. Καθώς και η επιφάνεια κάθε υλικού σε σχέση με τη σχετική επιφάνεια απορρόφησής της.

	125	250	500	1k	2k	4k
Eyring (s)	0.32	0.20	0.18	0.14	0.13	0.12
Sabine(s)	0.34	0.21	0.19	0.15	0.14	0.13

Σχήμα 8.3.18. Υπολογισμένοι χρόνος αντήχησης.

Key name	Relative absorption area [%]								
	Area [m ²]	Area [%]	125	250	500	1k	2k	4k	Used
CONCRETE	279.3	37.0	5.2	3.3	6.0	4.8	4.4	6.2	58
CARPET	170.3	22.5	6.4	8.2	14.7	29.5	46.5	50.8	1
CURTAINS	126.5	16.7	19.0	43.9	59.9	54.8	39.5	33.0	8
WOOD	98.3	13.0	49.8	29.4	10.6	5.1	4.6	4.4	2
PLASTERBOARD	75.3	10.0	11.3	9.9	4.1	2.0	1.2	1.7	3
OPEN	5.5	0.7	8.3	5.3	4.8	3.8	3.9	3.9	2
	755.2								

Σχήμα 8.3.19. Η επιφάνεια κάθε υλικού σε σχέση με τη σχετική απορροφητική επιφάνειά του.

8.4 ΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Πριν την ανάλυση των τιμών της παραπάνω ηχητικής μελέτης, πρέπει να επισημανθεί το ότι οι τιμές που θα αναφερθούν παρακάτω είναι ενδεικτικές και ενδέχεται να υπάρχουν διαφοροποιήσεις σε αυτές, ανάλογα με τις περαιτέρω απαιτήσεις της τοποθεσίας και του χώρου. Επίσης, στις τιμές δε συμπεριλαμβάνονται οι εργατικές αμοιβές, τα μεταφορικά καθώς και ο Φ.Π.Α..

Για την πραγματοποίηση της μελέτης θα χρειαστεί μοκέτα για το δάπεδο με εμβαδόν $170,3\text{m}^2$. Η τιμή μίας μοκέτας μέτριου πάχους από εισαγωγή είναι $40,00\text{€}$ ανά m^2 . Οπότε η τιμή της μοκέτας υπολογίζεται στα $6812,00\text{€}$. Αυτή η τιμή είναι ενδεικτική.

Στη συνέχεια θα χρειαστούν $54,5\text{m}$ κουρτίνας για την κάλυψη των τοίχων. Η τιμή για το κάθε μέτρο απλής μονόχρωμης κουρτίνας είναι $9,50\text{€}$. Οπότε η τιμή της κουρτίνας υπολογίζεται στα $517,75\text{€}$.

Για την ξύλινη ψευδοροφή θα χρησιμοποιηθεί panel με 9 αυλακώσεις των 2mm φτιαγμένο από μελαμίνη και με πλαϊνή εσοχή για την απόκρυψη των μεταλλικών αρμών στήριξης. Η τιμή του είναι $46,00\text{€}$ ανά m^2 . Η συνολική τιμή για την ψευδοροφή υπολογίζεται στα $4521,80\text{€}$.

Για τις ανακλαστικές επιφάνειες θα χρειαστεί να τοποθετηθεί τοίχος μονής στάνταρντ γυψοσανίδας με πετροβάμβακα και συνολική επιφάνεια $75,3\text{m}^2$. Η τιμή της είναι $12,64\text{€}$ ανά m^2 . Οπότε η τιμή των ανακλαστικών επιφανειών ανέρχεται στα $951,80\text{€}$.

Για την ηχητική κάλυψη του χώρου θα χρειαστούν 5 ηχεία MQ-50 της RCF με τιμή τεμαχίου $118,00\text{€}$ και συνολική τιμή $590,00\text{€}$. Επίσης, έναν ολοκληρωμένο μικροφωνικό ενισχυτή ισχύος 320W 4+2 εισόδων, με προτεραιότητα φωνής και phantom power, με τιμή $800,00\text{€}$.

Συνολική τιμή μελέτης $14.193,40\text{€}$.

Στις τιμές δε συμπεριλαμβάνονται οι εργατικές αμοιβές, τα μεταφορικά καθώς και ο Φ.Π.Α..

Σημείωση: Τα ακουστικά υλικά που προτείνονται στην παρούσα πτυχιακή εργασία είναι ενδεικτικά και μπορούν να αντικατασταθούν με άλλα, παρόμοιων ακουστικών χαρακτηριστικών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ευθυμιάτος Διονύσιος. “Ακουστική και κτηριακές εφαρμογές, θεωρία και πράξη”, 1η έκδοση, Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2007, ISBN 978-960-7530-94-3.
- [2] F. Alton Everest, Μετάφραση: Γαβριηλίδης Λ. “Εγχειρίδιο ακουστικής”, 3η έκδοση, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2003, ISBN 960-7219-67-8.
- [3] http://www.akustikon.se/eng/software_e.html, τελευταία επίσκεψη στις 10-09-2010.
- [4] <http://www.mlssa.com/pdf/MLSSA-2000-brochure.pdf>, τελευταία επίσκεψη στις 22-10-2010.
- [5] <http://www.nutshellhifi.com/MLS/index.html>, τελευταία επίσκεψη στις 03-05-2011.
- [6] <http://www.mlssa.com/pdf/MLSSA-Brochure.pdf>, τελευταία επίσκεψη στις 03-05-2011.
- [7] <http://www.catt.se/>, τελευταία επίσκεψη στις 04-05-2011.
- [8] Εγχειρίδιο χρήσης (manual) του προγράμματος Catt-Acoustic.
- [9] Σ.Κουζούπης - Μ.Σηφάκης. “Εργαστηριακές σημειώσεις Εφαρμοσμένης Ακουστικής ΙΙ”, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Παράρτημα Ρεθύμνου, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής, Έκδοση 1.01, 2008.
- [10] <http://www.kael.gr/products.gr>, τελευταία επίσκεψη στις 08-11-2011.
- [11] Δ. Σκαρλάτος. “Εφαρμοσμένη Ακουστική”, Εκδόσεις Φιλομάθεια, ISBN 9789608771017.
- [12] Frank Fahy. “Foundations of Engineering Acoustics”, by Academic Press, ISBN 0-12-247665-4.
- [13] Harry F. Olson. “Acoustical engineering” Philadelphia, Pa: Professional Audio Journals, c1991, ISBN 19147-7718.
- [14] Δεύτερο Ετήσιο συνέδριο ακουστικής εταιρίας: “Ακουστική 84”, Αθήνα: Εκδόσεις Πλαίσιο, 1984.
- [15] Philip M. Morse & K. Uno Ingard. “Theoretical Acoustics”, Princeton, New Jersey: Εκδόσεις Princeton University Press, 1986, ISBN 0-691-08425-4.
- [16] Iain G. Main. “Vibration & Waves in Physics”, 3η έκδοση, Cambridge: Cambridge University Press, 1983, ISBN 0-521-44186-2.
- [17] Daniel R. Raichel. “The Science and Applications of Acoustics”, 2η έκδοση,

City University of New York: Springer Science & Business Media, LLC,
2006, ISBN 978-0387-26062-4.

- [18] Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens, James V. Sanders.
“Fundamentals of Acoustics”, 4η έκδοση, Hoboken: John Wiley & Sons, Inc,
ISBN 0-471-84789-5.
- [19] Μ.Σηφάκης. “Διδακτικές σημειώσεις θεωρίας Εφαρμοσμένης Ακουστικής Ι”,
Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Παράρτημα Ρεθύμνου, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας &
Ακουστικής, 2008.
- [20] Ν.Τσινίκας . “Ακουστικός σχεδιασμός χώρων”, 2^η έκδοση, ISBN 960-12-
1402-X.
- [21] <http://www.ionio.gr/~floros/lessons>, τελευταία επίσκεψη στις 22-08-2011.
- [22] Δ.Ξενικάκης. “Διδακτικές σημειώσεις Ηχοληψία Ι”, Τ.Ε.Ι. Κρήτης,
Παράρτημα Ρεθύμνου, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής, 2006.