



ΣΧΟΛΗ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΟΠΤΟΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ

Πτυχιακή Εργασία

Ακουστική Μελέτη για Κατασκευή Ραδιοφωνικού Σταθμού: Εφαρμογή  
για το Πειραματικό Γυμνάσιο Ρεθύμνου

Σωτήριος Πορφύριος Νικολογιάννης (ΑΜ 1314)  
Ορέστης Παπαδόπουλος (ΑΜ 1308)

Επιβλέποντες

Νεκτάριος Παπαδογιάννης  
Νικόλαος Μ. Παπαδάκης

Μάρτιος 2021  
Ρέθυμνο

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Θέμα της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η ακουστική μελέτη υφιστάμενου χώρου στο Πειραματικό Γυμνάσιο Ρεθύμνου με σκοπό την μελλοντική χρήση του σαν χώρο ραδιοφωνικού σταθμού. Σκοπός της εργασίας είναι μέσω της εκτίμησης της παρούσας ακουστικής του χώρου, η παρουσίαση και πρόταση κατάλληλων ακουστικών παρεμβάσεων που θα καταστήσουν τον χώρο κατάλληλο να αξιοποιηθεί για αίθουσα εκπομπής ραδιοφωνικού σταθμού.

Το πρώτο μέρος της εν λόγω εργασίας απαρτίζεται από τρία κεφάλαια τα οποία παρουσιάζουν το απαραίτητο θεωρητικά γνωστικά ακουστικό υπόβαθρο σχετικό με την παρούσα μελέτη. Αναλυτικότερα το πρώτο κεφάλαιο κάνει αναφορά στην επιστήμη της ακουστικής και στους όρους απορρόφηση, διάχυση, στάσιμα κύματα. Το δεύτερο κεφάλαιο διαπραγματεύεται το θεωρητικό πλαίσιο της ακουστικής κλειστών χώρων κάνοντας αναφορά σε όρους όπως: ο χρόνος αντήχησης, οι παράμετροι καλής ακουστικής, ακουστικές απαιτήσεις χώρων καθώς και οι βέλτιστοι χρόνοι αντήχησης. Το θεωρητικό μέρος της εργασίας ολοκληρώνεται με το τρίτο κεφάλαιο, το οποίο κάνει αναφορά στην ανάλυση του ήχου και στις μεθόδους μέτρησης(μέθοδοι μηδενισμού πηγής και μέθοδος Maximum Length Sequence (MLS)).

Το πειραματικό μέρος της εργασίας περιλαμβάνει το τέταρτο και πέμπτο κεφάλαιο, τα οποία σχετίζονται με την μελέτη που πραγματοποιήθηκε στον προαναφερόμενο χώρο. Πιο συγκεκριμένα, στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται η μέθοδος, η οποία αξιοποιήθηκε για την μέτρηση της κρουστικής απόκρισης σε διάφορα σημεία από την οποία στην συνέχεια έγινε η εξαγωγή του χρόνου αντήχησης. Επίσης στο μέρος αυτό αξιοποιείται πρόγραμμα τρισδιάστατης απεικόνισης (Sketch Up) για την παρουσίαση του χώρου και των θέσεων μέτρησης.

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί, το οποίο ολοκληρώνει το πειραματικό μέρος της εργασίας παρουσιάζεται η διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των ακουστικών προτάσεων καθώς και η περιγραφή τους. Σκοπός για τις προτεινόμενες ακουστικές παρεμβάσεις αποτελεί ο βέλτιστος χρόνος αντήχησης σύμφωνα με την χρήση του χώρου τον οποίο θέλει να προσεγγίσει η προτεινόμενη μελέτη. Για την επίτευξη του βέλτιστου αυτού χρόνου αντήχησης, η μελέτη παραθέτει τρεις προτάσεις ακουστικής διαμόρφωσης με διαφορετικό κόστος η κάθε μία. Τέλος, η παρούσα εργασία ολοκληρώνεται με την παράθεση των συμπερασμάτων που παράχθηκαν από την διαδικασία εκπόνησής της.

Λέξεις – Φράσεις κλειδιά: Ακουστική κλειστών χώρων, χρόνος αντήχησης, απορροφητικά στοιχεία, διαχυτές, βέλτιστος χρόνος αντήχησης

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Σε αυτό το σημείο θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τους κ. Νεκτάριο Παπαδογιάννη και κ. Νικόλαο Μ. Παπαδάκη, για την πολύτιμη βοήθειά και την καθοδήγησή τους καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της πτυχιακής εργασίας, έτσι ώστε να παραχθεί άρτια το επιστημονικό δοκίμιο. Επιπροσθέτως, ευχαριστούμε θερμά τον διευθυντή του Πειραματικού Γυμνάσιου Ρεθύμνου κ. Γιάννη Μαρκαντέ για την παραχώρηση του χώρου, με σκοπό την πραγματοποίηση της διαδικασίας των μετρήσεων, οι οποίες ήταν απαραίτητες για την διεξαγωγή οικείας πτυχιακής εργασίας.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφαλαίο 1 <sup>ο</sup> .....	10
Στοιχεία Ακουστικής .....	10
Εισαγωγή 1ου Κεφαλαίου .....	10
1. Ακουστική ως επιστήμη .....	10
1.1 Ήχος .....	11
1.1.2 Διάδοση Ηχητικών Κυμάτων .....	12
1.2 Ανάκλαση -Διάδοση- Απορρόφηση .....	13
1.2.1 Απορρόφηση.....	13
1.2.2 Διάχυση .....	16
1.2.3 Εξασθένηση του ήχου λόγω Απορρόφησης του από το Μέσο Διάδοσης .....	17
1.2.4 Θερμική Μοριακή Αποκατάσταση.....	18
1.2.5 Μέτρηση Συντελεστή Απορρόφησης Υλικών.....	19
Κεφαλαίο 2 <sup>ο</sup> .....	22
Ακουστική Κλειστών Χώρων .....	22
Εισαγωγή 2 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου .....	22
2. Διάδοση του Ήχου σε Κλειστό Χώρο. ....	23
2.1 Μικροί Χώροι.....	24
2.1.2 Στάσιμα Κύματα.....	24
2.1.3 Μεγάλοι Χώροι .....	26
2.1.4 Διάγραμμα Bolt-Beraneck-Newman-Ελεγκτής Σταθερής Κατάστασης της Ακουστικής Απόκρισης Δωματίου .....	27
2.1.5 Χρόνος Αντήχησης.....	29
2.1.6 Επίδραση του Χρόνου Αντήχησης .....	30
2.1.7 Μέσος Συντελεστής Απορρόφησης.....	30
2.2.1 Ηχώ (Echo).....	31
2.2.3 Φαινόμενο Haas.....	31
2.2.4 Πολλαπλή Ηχώ.....	32
2.2.5 Η επίδραση του Χρόνου Αντήχησης κατά την Διεξαγωγή ομιλιών.....	32
2.3.1 Χρωματισμός.....	33
2.3.2 Αρχικός Χρόνος Μείωσης του Αντηχητικού Πεδίου EDT (Early Decay Time) ...	33
2.3.3 Αρχική Χρονική Καθυστέρηση ITD (Initial Time Delay) .....	33
2.3.4 Ευκρίνεια (Clarity) .....	33
2.3.5 Βέλτιστος Χρόνος Αντήχησης .....	34
2.3.6 Εξίσωση Βέλτιστης Αντήχησης Stephens-Bate .....	34

2.3.7 Διάγραμμα Βέλτιστων Χρόνων Αντήχησης για Διάφορους Χώρους Beranek .....	35
Κεφαλαίο 3 <sup>ο</sup> .....	36
Εισαγωγή 3 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου .....	36
3. Ανάλυση του Ήχου .....	36
3.1 Καμπύλες Ακουστότητας .....	38
3.1.2 Θόρυβος.....	38
3.1.3 Θόρυβος Βάθους .....	39
3.1.4 Μέθοδος Μηδενισμού της Πηγής .....	40
3.1.5 Μέθοδος Παλμικής Διέγερσης (Impulse Response) .....	40
3.1.6 Μέθοδος Ακολουθίας Μέγιστου Μήκους (MLS-Maximum Length Sequence)...	41
Εισαγωγή 4 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου .....	42
4. Περιγραφή Χώρου.....	42
4.1 Τρισδιάστατη Απεικόνιση του Χώρου- Δωματίου.....	44
4.1.2 Καταγραφή Εξοπλισμού.....	45
4.2 Πειραματική Διαδικασία .....	48
4.2.1 Ανάλυση Δεδομένων .....	50
4.2.1 Επεξεργασία Δεδομένων του Χρόνου Αντήχησης.....	52
4.2.2 Χρόνος Αντήχησης Μετρήσεων.....	54
Κεφαλαίο 5 <sup>ο</sup> .....	56
Ακουστικές προτάσεις .....	56
Εισαγωγή 5 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου .....	56
5.1 Θεωρητικός Υπολογισμός Χρόνου Αντήχησης .....	56
5.1.3 Σύγκριση Χρόνου Αντήχησης Συχνοτήτων Μετρήσεων και Θεωρητικού Υπολογισμού .....	58
5.1.4 Παρατηρήσεις.....	58
5.1.5 Συχνότητα Αποκοπής .....	59
5.2 Τρόποι Βελτίωσης.....	59
5.2.1 Μαθηματικός Υπολογισμός Βέλτιστου Χρόνου Αντήχησης και Βέλτιστης Απορρόφησης Δωματίου.....	60
5.2.2 Προτάσεις Ακουστικής Διαμόρφωσης .....	61
5.2.2.1.Πρόταση I.....	61
5.2.2.2 Πρόταση II.....	68
5.2.2.3 Πρόταση III .....	70
5.2.3 Τοποθέτηση .....	72
5.2.4 Κόστος.....	73
Κεφάλαιο 6 <sup>ο</sup> .....	77
Συμπεράσματα .....	77

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....78

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Εικόνα 1 – Διαχυτές Schroeder.....	17
Εικόνα 2 – Μέθοδος διαχωρισμού προσπίπτουσας- ανακλώμενης γωνίας, για τη μέτρηση συντελεστή απορρόφησης για πλάγια πρόσπτωση .....	20
Εικόνα 3 – Διάγραμμα Bolt-Beranek-Newman.....	27
Εικόνα 4 – Βέλτιστος χρόνος αντήχησης .....	35
Εικόνα 5 – Απόκριση συχνοτήτων .....	36
Εικόνα 6 – Φασματογράφος, τρισδιάστατη απεικόνιση της κατανομής των συχνοτήτων .....	37
Εικόνα 7 – Καμπύλες ακουστότητας Equal-loudness contours (ISO 226:2003) Καμπύλες Fletcher-Munson.....	38
Εικόνα 8 – Φωτογραφίες χώρου από την πειραματική διαδικασία των μετρήσεων ...	43
Εικόνα 9 – Φωτογραφίες χώρου από την πειραματική διαδικασία των μετρήσεων ...	43
Εικόνα 10 – Φωτογραφίες χώρου από την πειραματική διαδικασία των μετρήσεων .	43
Εικόνα 11 – Απεικόνιση χώρου σε τρισδιάστατη απεικόνιση.....	44
Εικόνα 12 – Pc Toshiba .....	47
Εικόνα 13 – Κάρτα ήχου Mackie blackjack onyx .....	47
Εικόνα 14 – Ενισχυτής Behringer A500 .....	47
Εικόνα 15 – Μικρόφωνο Behringer ecm 8000 .....	47
Εικόνα 16 – Δωδεκαεδρικό Ηχείο .....	48
Εικόνα 17 – Μέτρηση κρουστικής απόκρισης με χρήση του προγράμματος Arta .....	49
Εικόνα 18 – Μετρούμενος χρόνος αντήχησης του δωματίου.....	51
Εικόνα 19 – Τρισδιάστατη απεικόνιση της ηχητικής συμπεριφοράς του χώρου .....	52
Εικόνα 20 – Ηχοαπορροφητικό Studio foam metro 2 της εταιρίας Auralex .....	64
Εικόνα 21 – Ηχοαπορροφητικό Studio foam metro 2 της εταιρίας Auralex.....	64
Εικόνα 22 – Διαχυτές.....	66
Εικόνα 23 – Γραφική παράσταση σύγκριση χρόνων αντήχησης. . .....	67
Εικόνα 24 – Υλικά απορρόφησης χαμηλών συχνοτήτων Hofa.....	69
Εικόνα 25 – Γραφική παράσταση σύγκριση χρόνων αντήχησης. ....	70
Εικόνα 26 – Παράθυρο τριών φύλλων Alumil supreme S77 .....	71
Εικόνα 27 – Πόρτα Alumil supreme SD77 .....	71
Εικόνα 28 – Τελική μορφή του χώρου (ανατολική πλευρά, επιφάνεια s2).....	75
Εικόνα 29 – Τελική μορφή του χώρου (δυτική πλευρά, επιφάνεια s4).....	76

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 - Βέλτιστος όγκος .....	34
Πίνακας 2 - Θέσεις ηχείου και μικροφώνου .....	50
Πίνακας 3 - Μέτρηση σημείου 1 .....	53
Πίνακας 4 - Μέτρηση σημείου 2 .....	54
Πίνακας 5 - Μέτρηση σημείου 3 .....	54
Πίνακας 6 - Χρόνοι αντήχησης.....	55
Πίνακας 7 - Συντελεστές υλικών .....	57
Πίνακας 8 - Σύγκριση χρόνου αντήχησης .....	58
Πίνακας 9 - Υλικά απορρόφησης .....	63
Πίνακας 10 - Συντελεστής απορρόφησης υλικού Metro 2 .....	65
Πίνακας 11 - Χρόνοι αντήχησης χωρίς υλικά απορρόφησης/ με υλικά απορρόφησης.....	67
Πίνακας 12 - Συντελεστές απορρόφησης Hofa bass trap .....	69
Πίνακας 13 - Κόστος πρότασης I .....	73
Πίνακας 14 - Κόστος πρότασης II .....	73
Πίνακας 15 - Κόστος πρότασης III.....	74



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Θέμα της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η ακουστική μελέτη ενός χώρου για την κατασκευή ραδιοφωνικού σταθμού σε αυτό. Στόχος της συγκεκριμένης μελέτης είναι η μείωση του χρόνου αντήχησης στον χώρο, για να είναι εφικτή η πραγματοποίηση μιας ραδιοφωνικής εκπομπής μέσα σε αυτόν. Αυτό πραγματοποιείται με την εγκατάσταση υλικών ακουστικής διαμόρφωσης στις επιφάνειες του χώρου. Το πρόβλημα που υπήρξε ήταν ότι, οι επιφάνειες του χώρου δεν ήταν όλες ίδιες, με συνέπεια σε ορισμένες επιφάνειες να τοποθετηθούν διαφορετικά υλικά ακουστικής διαμόρφωσης σε σχέση με τις υπόλοιπες. Ακόμη οι ιδιότητες των υλικών ακουστικής διαμόρφωσης θα πρέπει να μην έχουν μεγάλη διαφορά μεταξύ τους, διότι η νέα απορρόφηση από τον χώρο, θα πρέπει να είναι ισορροπημένη. Με σκοπό να μην υπάρξει μεγάλη απορρόφηση σε κάποια συχνοτική μπάντα του ακουστικού φάσματος. Επομένως, ζητούμενο της εν λόγω πτυχιακής εργασίας είναι ο συνδυασμός όλων των υλικών μαζί να δημιουργεί την επιθυμητή ακουστική ισορροπία στον χώρο για την συγκεκριμένη χρήση.

# Κεφαλαίο 1<sup>ο</sup>

## Στοιχεία Ακουστικής

### Εισαγωγή 1ου Κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στην επιστήμη της ακουστικής. Ποιο συγκεκριμένα, το εν λόγω κεφάλαιο παραθέτει αναφορές στη φύση της ακουστικής, στον τρόπο με οποίο η συγκεκριμένη επιστήμη μελετά και επεξεργάζεται τα κυματικά φαινόμενα.

Στην συνέχεια το κεφάλαιο ασχολείται με την έννοια του ήχου. Αναλυτικότερα, περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο ορίζεται ο ήχος στην φύση. Επίσης, γίνεται εκτενής αναφορά στον τρόπο της διάδοσής του μέσω των ηχητικών κυμάτων και στον τρόπο με τον οποίο γίνεται αντιληπτός από τον άνθρωπο. Γίνεται αναφορά στην ανάκλαση του ήχου από τα υλικά ενός κλειστού χώρου καθώς και στη διάδοση του ήχου μέσω κάποιου μέσου διάδοσης.

Εν κατακλείδι αναφέρετε στην απορρόφηση του ήχου από τα υλικά του χώρου και τα είδη των απορροφητικών υλικών. Μελετάται το φαινόμενο της διάχυσης του ήχου καθώς και τα είδη των διάχυτων που χρησιμοποιούνται γι' αυτό το σκοπό. Παραθέτετε ο ορισμός του συντελεστή απορρόφησης και ο τρόπος μέτρησης του συγκεκριμένου συντελεστή. Γίνονται αναφορές στον λόγο για τον οποίο ο ήχος εξασθενεί όταν διαδίδεται μέσα από ένα μέσο διάδοσης, εξαιτίας της απορρόφησης που πραγματοποιείται από το μέσο αυτό.

### 1. Ακουστική ως επιστήμη

Η ακουστική είναι ο κλάδος της φυσικής που μελετά τις ιδιότητες και τη συμπεριφορά του ήχου, καθώς επίσης και τις εφαρμογές του. Μεταξύ των άλλων μελετά την παραγωγή, τη μετάδοση, τη λήψη και την αλληλεπίδραση του ήχου με τα διάφορα υλικά μέσα, καθώς επίσης και τις τεχνικές ελέγχου και επεξεργασίας για την εκμετάλλευση του ήχου σε εξειδικευμένες εφαρμογές. Η ακουστική είναι από τους αρχαιότερους κλάδους της φυσικής επιστήμης. Η πρώτη αναφορά για τη φύση του ήχου έγινε από τον Πυθαγόρα το 570-497π.χ. Ο ίδιος υποστήριζε ότι ο ήχος δημιουργείται από ταλαντευόμενα σώματα. Αργότερα, ο Αριστοτέλης ισχυρίστηκε ότι η παραγωγή του ήχου είναι αποτέλεσμα της συμπίεσης του αέρα που δημιουργείτε από μία πηγή (Σκαρλάτος, 2008).

Ο Gassendi το 1635 μ.Χ. μέτρησε την ταχύτητα του ήχου στα 478 m/s και διατύπωσε την άποψη ότι η ταχύτητα του ήχου δεν εξαρτάται από τη συχνότητα, σε

αντίθεση με τον Αριστοτέλη που υποστήριζε ότι οι πρίμες συχνότητες διαδίδονται γρηγορότερα από τις μπάσες. Ύστερα, ο Γάλλος φιλόσοφος φραγκισκανός μοναχός Marin Mersenne το 1636 μ.Χ. προσδιόρισε τη συχνότητα των 84 Hz, δίνοντας έτσι τον πρώτο ορισμό της συχνότητας των ακουστών ήχων και τον ορισμό του μουσικού διαστήματος. Ο ιησουΐτης ιερέας Athanasius Kircher, το 1660 μ.Χ., τοποθέτησε μία μικρή καμπάνα σε ένα γυάλινο δοχείο από το οποίο αφαίρεσε τον αέρα, δείχνοντας έτσι ότι ο ήχος δε διαδίδεται στο κενό. Ο Galileo διαπίστωσε τη σχέση μεταξύ φωνής και χροιάς. Το 1687 μ.Χ. ο Isaac Newton διατύπωσε τη μηχανική εξίσωση του ήχου. Θεώρησε τον ήχο ως παλμούς πίεσης που διαδίδονται στον αέρα μέσω των γειτονικών τους σωματιδίων (Σκαρλάτος, 2008).

Τον 20<sup>ο</sup> αιώνα η ακουστική γνώρισε μεγάλη ανάπτυξη με τη δημιουργία νέων κλάδων · η αρχιτεκτονική ακουστική, η κτιριακή ακουστική, η υποβρύχια ακουστική, η ηλεκτροακουστική, η ακουστική εκπομπή και η ακουστική των υπερήχων είναι μερικοί από τους κλάδους αυτούς. Τέλος, επειδή οι περισσότερες μονάδες στην ακουστική εκφράζουν σχετικά μεγέθη, θα πρέπει η σύγκριση να γίνεται πάντα ως προς την τιμή αναφοράς την ίδια τη μονάδα, για να υπάρχει απόλυτη συμφωνία των μετρούμενων μονάδων. Οι τιμές αναφοράς των σχετικών μεγεθών έχουν τυποποιηθεί. Στην Ελλάδα, οι ισχύουσες τυποποιήσεις δίνονται από τον ΕΛΟΤ (Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης). Όταν δεν υπάρχουν Ελληνικοί οργανισμοί, ισχύουν οι τυποποιήσεις από τον διεθνή οργανισμό ISO (International Standard Organization) (Σκαρλάτος, 2008).

## 1.1 Ήχος

Ο ήχος για την επιστήμη της φυσικής είναι ένα είδος ενέργειας, η οποία ονομάζεται ακουστική ενέργεια. Η ακουστική ενεργεία είναι η εναλλαγή της πίεσης του αέρα, δηλαδή της μετατόπισης των μορίων του, προκαλώντας μεταβαλλόμενα κύματα τα όποια διαδίδονται σε ένα ελαστικό μέσο, όπως για παράδειγμα είναι ο αέρας. Ο ήχος παράγεται, όταν ο αέρας ή κάποιο άλλο μέσο αρχίζει να δονείται. Δονούμενα σώματα που μπορούν να παράγουν ήχο είναι οι χορδές ενός μουσικού οργάνου, τα δέρματα των τυμπάνων, το διάφραγμα ενός μεγαφώνου και άλλα (Χαδέλλης, 2010).

Ο ήχος γίνεται αντιληπτός από τον άνθρωπο μέσω του αισθητήριου οργάνου της ακοής (αυτί) και θεωρείται υπαρκτός. Όταν ένα ηχητικό κύμα συναντήσει κάποιο

δέκτη, όπως το ανθρώπινο αυτί, τότε γίνεται αντιληπτό σαν ήχος. Οι ήχοι διακρίνονται:

- απλούς ήχους ή απλούς τόνους (ήχοι διαπασών), στους οποίους η μορφή του ηχητικού κύματος είναι περιοδική και ημιτονοειδής
- σύνθετους ήχους ή τόνους, που αποτελούνται από τη σύνθεση πολλών απλών ήχων και η κυματομορφή τους είναι περιοδική αλλά όχι ημιτονοειδής
- θορύβους, που αντιστοιχούν σε μη περιοδικά κύματα
- κρότους, που είναι διαφορετικοί θόρυβοι μικρής διάρκειας

Οι κρότοι και οι θόρυβοι διαφέρουν από τους απλούς και σύνθετους ήχους γιατί δεν είναι περιοδικοί και η συχνότητα ή το ύψος τους είναι δυσδιάκριτο ή απροσδιόριστο (Χαδέλλης, 2010).

### **1.1.2 Διάδοση Ηχητικών Κυμάτων**

Για τη μετάδοση των κυμάτων είναι απαραίτητη η ύπαρξη κάποιου υλικού μέσου μεταξύ πομπού και δέκτη. Το μέσο μπορεί να βρίσκεται σε οποιαδήποτε κατάσταση ύλης στερεό, υγρό, αέριο ή πλάσμα. Ο ήχος δεν διαδίδεται στο απόλυτο κενό (Σκαρλάτος, 2008).

Όταν εξαιτίας κάποιου ερεθίσματος δημιουργηθεί μια μορφή διατάραξης στο υλικό μέσο, τότε τα μετατοπισμένα μόρια ύλης ασκούν δυνάμεις στα γειτονικά μόρια, αναγκάζοντάς τα να έλθουν εκτός θέσης ισορροπίας. Με αυτό τον τρόπο η διατάραξη ταξιδεύει στο μέσο - το φαινόμενο ονομάζεται διάδοση (Σκαρλάτος, 2008).

Για παράδειγμα, υποθέτουμε ότι έχουμε μια ταλαντωμένη επίπεδη επιφάνεια. Καθώς η επιφάνεια κινείται δεξιά σπρώχνει τα μόρια του αέρα που βρίσκονται σε επαφή με αυτήν προς την ίδια κατεύθυνση. Τα εν λόγω μόρια με τη σειρά τους ωθούν τα γειτονικά τους προς την ίδια κατεύθυνση. Αύτη η ενέργεια έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ατμοσφαιρικής πίεσης ηρεμίας  $P$  κατά  $p$  προς τη φορά κίνησης. Η διάδοση της διαταραχής αυτής γίνεται με πεπερασμένη ταχύτητα στον αέρα. Αντιθέτως, από την άλλη μεριά, θα δημιουργηθεί μια υποπίεση  $p$ , λόγω του ότι η ταχύτητα των μορίων του αέρα είναι πεπερασμένη. Καθώς η επιφάνεια επιστρέφει στην αρχική της θέση από τη δεξιά μεριά θα δημιουργηθεί μια υπερπίεση. Καθώς από την αριστερή μια υποπίεση και το ανάποδο. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται περιοδικά με αποτέλεσμα τη δημιουργία και μετάδοση ενός μηχανικού κύματος, το οποίο φτάνοντας στον άνθρωπο θα διεγείρει το αυτί του δημιουργώντας την αίσθηση του ήχου (Σκαρλάτος, 2008).

Αυτό μας οδηγεί στον έξης ορισμό: «*Ήχος ορίζεται ως η μηχανική διαταραχή που διαδίδεται με ορισμένη ταχύτητα μέσα σε ένα μέσο που μπορεί να αναπτύξει εσωτερικές δυνάμεις και έχει τέτοιο χαρακτήρα ώστε μπορεί να διεγείρει το αισθητήριο ακοής και να προκαλέσει ακουστικό αίσθημα*» (Σκαρλάτος, 2008, σελ.28).

## 1.2 Ανάκλαση -Διάδοση- Απορρόφηση

Ένα ηχητικό κύμα, όταν πέσει επάνω σε μία επιφάνεια, ένα μέρος της ενέργειας του ανακλάται από αυτήν, ένα μέρος του απορροφάται ή διαδίδεται μέσω αυτής σε ένα άλλο μέσο (Σκαρλάτος, 2008). Για τη μελέτη της ανάκλασης, της απορρόφησης και της διάδοσης του ήχου ορίζονται οι συντελεστές (Σηφάκης & Κουτσοδιμάκης, 2012).

Συντελεστής ανάκλασης  $a_r$ , είναι ο λόγος της ανακλώμενης ηχητικής ενέργειας ( $W_r$ ) προς την προσπίπτουσα ( $W_i$ ).

$$a_r = \frac{W_r}{W_i} \quad (1)$$

Συντελεστής διάδοσης  $\tau$ , ορίζεται ο λόγος της ηχητικής ενέργειας που διαδίδεται από την επιφάνεια στο άλλο μέσο ( $W_\tau$ ), προς την προσπίπτουσα ενέργεια ( $W_i$ ).

$$\tau = \frac{W_\tau}{W_i} \quad (2)$$

Συντελεστής απορρόφησης  $\alpha$ , ορίζεται ο λόγος της ηχητικής ενέργειας που απορροφάται από την επιφάνεια ( $W_\alpha$ ), προς την προσπίπτουσα ενέργεια ( $W_i$ ) (Σκαρλάτος, 2008).

$$\alpha = \frac{W_\alpha}{W_i} \quad (3)$$

### 1.2.1 Απορρόφηση

Η απορρόφηση του ήχου από τα τοιχώματα παίζει σημαντικό ρόλο για την ακουστική των χώρων, καθώς το ηχητικό κύμα εισχωρεί στο υλικό (τοίχος, δάπεδο, έπιπλο, κτλ.), μεταξύ του μέσου διάδοσης (πχ. αέρας) και του υλικού κατά τη διάρκεια της ταλάντωσης δημιουργούνται τριβές, με αποτέλεσμα να μετατρέπεται η ηχητική ενέργεια σε θερμική. Το ηχητικό κύμα διεγείρει τα μόρια του υλικού, τα

οποία ταλαντώνονται, οπότε η ενέργεια του ηχητικού κύματος μειώνεται (Σκαρλάτος, 2008).

Ο συντελεστής απορρόφησης είναι αδιάστατο μέγεθος, εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης και δίνεται από τη σχέση:  $\alpha = 1 - \alpha$ . Συνήθως η γωνία πρόσπτωσης είναι άγνωστη ή μεταβάλλεται, οπότε στην πράξη χρησιμοποιείται ο στατικός συντελεστής απορρόφησης ( $\alpha_{st}$ ). Συγκεκριμένα, συντελεστής απορρόφησης ορίζεται ως ο λόγος της απορροφημένης ενέργειας από μια απείρων διαστάσεων επιφάνεια προς την προσπίπτουσα, σε διάχυτο ηχητικό πεδίο. Επειδή ένα 100% διάχυτο ηχητικό πεδίο είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί, αντί για τον στατικό συντελεστή απορρόφησης χρησιμοποιείται ο συντελεστής κατά Sabine ( $\alpha_s$ ), που υπολογίζεται με τη βοήθεια του χρόνου αντήχησης. Για να καθοριστεί η απορροφητικότητα μιας επιφάνειας, ορίζεται ο συντελεστής απορρόφησης για κάθε οκτάβα ή τριτοκτάβα από τα 125 Hz στα 8000 Hz. Ως απορρόφηση μιας επιφάνειας ορίζεται το γινόμενο του εμβαδού της επί τον συντελεστή απορρόφησης:  $A = \alpha s$ . Την απορρόφηση των επιφανειών την μετράμε σε sabine (Σκαρλάτος, 2008).

Απορροφητικά υλικά: Τα απορροφητικά υλικά διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: στα πορώδη απορροφητικά, απορροφητικά τύπου μεμβράνης και τους συντονιστές (Σκαρλάτος, 2008).

Πορώδη απορροφητικά: Στα πορώδη απορροφητικά υλικά, η απορρόφηση γίνεται με την βοήθεια της τριβής που δημιουργείται, καθώς ο αέρας κινείται στους πόρους του υλικού με αποτέλεσμα τη μετατροπή της ηχητικής ενέργειας σε θερμική-θερμότητα. Για να είναι η απορρόφηση του ήχου αποτελεσματική, πρέπει ο συντελεστής ανάκλασης του υλικού να είναι μικρός. Όσο πιο μικρή διαφορά υπάρχει μεταξύ των εμποδίων του αέρα και του υλικού, τόσο μικρότερη είναι η ανάκλαση και επομένως έχουμε μεγαλύτερη διάδοση. Αυτό για να είναι εφικτό, πρέπει τα πορώδη απορροφητικά υλικά να έχουν μικρή πυκνότητα. Στην πράξη, όμως, η πυκνότητα ενός απορροφητικού είναι δύο με τρεις φορές μεγαλύτερη από την πυκνότητα του αέρα και επιπλέον, η διάμετρος των πόρων θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το μήκος κύματος του ήχου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα πορώδη απορροφητικά υλικά να αποδίδουν μεγαλύτερη απορρόφηση στις υψηλές συχνότητες, λόγω του ότι το μήκος κύματος τους είναι μικρό. Ένας τρόπος μεγιστοποίησης της απορρόφησης του ήχου μέσω των πορωδών απορροφητικών είναι να τοποθετηθούν τα υλικά σε θέση, όπου η ταχύτητα των σωματιδίων του ηχητικού κύματος είναι μέγιστη. Τέτοια κατάσταση έχουμε, όταν το ηχητικό κύμα προσπίπτει σε ανένδοτη

επιφάνεια (πχ. τοίχος μπετό) σχηματίζοντας στάσιμα κύματα, δηλαδή σε απόσταση από την επιφάνεια  $\lambda/4$ ,  $3\lambda/4$  κλπ. (Σκαρλάτος, 2008).

Απορροφητικά μεμβράνης: Τα απορροφητικά μεμβράνης αποτελούνται από μία λεπτή μεμβράνη, συνήθως από ύφασμα, η οποία βρίσκεται σε μικρή απόσταση από τοίχο, όταν το ηχητικό κύμα πέσει επάνω της, αυτή διεγείρεται σε ταλάντωση, με αποτέλεσμα λόγω των τριβών που δημιουργούνται, η ηχητική ενέργεια να μειώνεται γιατί μετατρέπεται σε θερμική. Τα απορροφητικά τέτοιου τύπου έχουν μεγάλη απορρόφηση κυρίως στις χαμηλές συχνότητες σε αντίθεση με τα πορώδη. Όταν κάποια συχνότητα από το ηχητικό κύμα που προσπίπτει στη μεμβράνη και την διεγείρει σε ταλάντωση είναι ίδια με την συχνότητα ταλάντωσης της μεμβράνης, ο συντελεστής απορρόφησης παίρνει μέγιστη τιμή. Επίσης, όσο λεπτότερη είναι η μεμβράνη, τόσο μεγαλύτερη είναι η απορρόφηση, γιατί διεγείρεται ευκολότερα και, αν τοποθετήσουμε ένα πορώδες απορροφητικό υλικό πίσω από το απορροφητικό μεμβράνης, πετυχαίνουμε απορρόφηση σε μεγαλύτερο συχνотικό φάσμα (Σκαρλάτος, 2008).

Απορροφητικά συντονισμού (Συντονιστές): Οι συντονιστές αποτελούνται από μια κοιλότητα μέσα στο εσωτερικό του υλικού τους. Όταν ο ήχος πέσει επάνω στο στόμιο της κοιλότητας, διεγείρει τα μόρια του αέρα που υπάρχουν μέσα στον συντονιστή και εκείνα ταλαντώνονται με αποτέλεσμα να έχουμε απώλεια ενέργειας λόγω των τριβών που προκαλούνται από την ταλάντωση. Η ταλάντωση γίνεται γύρω από μια συχνότητα, τη συχνότητα συντονισμού  $f_0$ , η οποία εξαρτάται από τις διαστάσεις του συστήματος (στόμιο- κοιλότητα). Ο συντελεστής απορρόφησης είναι μεγάλος μόνο στην περιοχή γύρω από την συχνότητα συντονισμού, ενώ για τις υπόλοιπες συχνότητες είναι σχεδόν μηδέν. Για να αυξηθεί ο συντελεστής απορρόφησης για τις υπόλοιπες συχνότητες τοποθετείται στο εσωτερικό της κοιλότητας απορροφητικό υλικό με αποτέλεσμα τη μείωση της απορρόφησης για τη συχνότητα συντονισμού  $f_0$ . Με αυτό τον τρόπο, έχουμε σχεδόν ίδια απορρόφηση σε περισσότερες συχνότητες. Οι συνήθεις συχνότητες συντονισμού βρίσκονται στην χαμηλή περιοχή συχνοτήτων (Σκαρλάτος, 2008).

Μια άλλη μορφή συντονιστών είναι οι διάτρητες επιφάνειες. Κατασκευάζονται από διάφορα υλικά όπως κόντρα πλακέ, λαμαρίνα και άλλα. Οι διατρήσεις είναι δύο ειδών κυκλικές ή σε σχήμα σχισμών. Για να έχουμε απορρόφηση σε παραπάνω από μια συχνότητες οι διατρήσεις επάνω στο υλικό μπορούν να είναι δύο ή περισσότερων ειδών, αναλόγως το μέγεθος της οπής ή της σχισμής αλλάζει και η συχνότητα συντονισμού. Η διάτρηση μπορεί να είναι

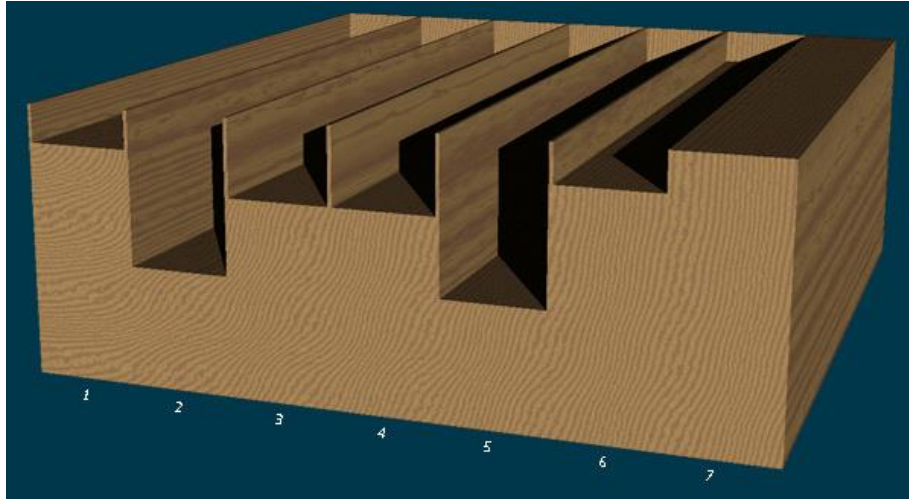
συμμετρική ή τυχαία. Εάν σε μια διάτρητη επιφάνεια η διάτρηση υπερβαίνει το 20% της επιφάνειας, τότε η επιφάνεια είναι διαφανής ως προς τον ήχο (Σκαρλάτος, 2008).

### 1.2.2 Διάχυση

Διάχυση είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ο ήχος διαδίδεται ομοιόμορφα σε κάθε κατεύθυνση με την ίδια ένταση. *«Σε ένα χώρο, αν το μέσο τετράγωνο της πίεσης για κάθε επίπεδο κύμα έχει την ίδια τιμή, ανεξάρτητα από την κατεύθυνσή του, τότε ο ήχος ονομάζεται διάχυτος.* Ο παραπάνω ορισμός δηλώνει ότι η καθαρή ροή ισχύος από κάθε στοιχείο του όγκου είναι μηδέν (Σκαρλάτος, 2008).

Σε ένα διάχυτο ηχητικό πεδίο ισχύουν οι παρακάτω ιδιότητες: Ο ρυθμός μείωσης της ηχητικής ενέργεια είναι ομαλός μετά τον μηδενισμό της πηγής. Ο ρυθμός μείωσης αυτός είναι εκθετικός. Ο χρόνος αντήχησης (παρουσιάζεται παρακάτω) είναι ίδιος σε όλα τα σημεία- θέσεις του χώρου. Ο ρυθμός μείωσης της ηχητικής ενέργειας παραμένει σταθερός ανεξάρτητα από τη συχνότητα. Επίσης, ο ρυθμός μείωσης δεν εξαρτάται από την κατευθυντικότητα του μικροφώνου που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση και τέλος, οι αποκλίσεις από τη μόνιμη κατάσταση σε διαφορετικές συχνότητες είναι αμελητέες. Στην πραγματικότητα ένα διάχυτο 100% πεδίο είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί, όμως μπορεί να προσεγγιστεί σε μεγάλο βαθμό. Αυτό γίνεται με τη χρήση επιφανειών που διαχέουν τον ήχο, τις οποίες εγκαθιστούμε στον χώρο. Οι επιφάνειες έχουν διάφορα σχήματα με καθορισμένο βάθος που σχετίζεται με το μήκος κύματος του ήχου. Τέτοιου είδους διαχυτές είναι οι ορθογώνιοι ή διαχυτές Schroeder. Αποτελούνται από ορθογώνια σχήματα διαφορετικού ύψους το κάθε ένα, τοποθετημένα το ένα δίπλα στο άλλο.





*Εικόνα 1 - Διαχυτές Schroeder*

Διαχυτές Schroeder:  $h$  είναι το ύψος κάθε διαχυτή και  $\lambda$  το μήκος του. Η ανάλυση των διαχυτών αυτών γίνεται με τη βοήθεια των αριθμών Galoi (Σκαρλάτος, 2008). Η λειτουργία των διαχυτών Schroeder βασίζεται στην κατανομή φάσης, επιδρώντας στη φάση του συντελεστή ανάκλασης της επιφάνειας. Αυτή η μεταβολή συντελείται από το διαφορετικό τους βάθος (Dadiotios, Angus & Cox, 2010).

### 1.2.3 Εξασθένηση του ήχου λόγω Απορρόφησης του από το Μέσο Διάδοσης

Η εξασθένηση του ήχου που διαδίδεται σε κάποιο μέσο, ονομάζεται απώλεια της ηχητικής ενέργειας του. Αυτό συμβαίνει για δύο λόγους κυρίως: πρώτον, λόγω κλασικής απορρόφησης και δεύτερον, λόγω του φαινομένου της θερμικής μοριακής αποκατάστασης. Στην πρώτη περίπτωση, η κυματική εξίσωση καταλήγει στη μορφή εξίσωσης Helmholtz (Σκαρλάτος, 2008).

$$(V^2 + K^2)p = 0 \tag{4}$$

Στην πρόσπτωση τα κύματα διαδίδονται επίπεδα κατά τη διεύθυνση των  $x$ , και η λύση της εξίσωσης δίνεται από τη σχέση (Σκαρλάτος, 2008).

$$p = p_0 e^{-ax} \tag{5}$$

Η σχέση αυτή δηλώνει ότι ανεξάρτητα από την απόσταση, το πλάτος στα επίπεδα κύματα δεν παραμένει σταθερό, αλλά μειώνεται εκθετικά με αυτήν.

Αν πάρουμε τις rms (ενεργός τιμή) τιμές της πίεσης της εξίσωσης 2, τότε έχουμε:

$$p_{rms,x}^2 = p_{rms}^2 \quad (6)$$

Άρα, για την ένταση του ήχου ισχύει ότι είναι ανάλογη του τετραγώνου της rms τιμής πίεσης.

Οπότε:

$$I_x = I_0 e^{-2ax} \quad (7)$$

Όπου:  $I_x$  είναι η ένταση του ήχου μετά τη διέλευση του από στρώμα πάχους  $x$ ,

$I_0$  είναι η ένταση του ήχου στην είσοδο του στρώματος,

$a$  είναι ο συντελεστής απορρόφησης του υλικού .

Αν χρησιμοποιήσουμε την κλίμακα των  $dB$  , η σχέση γράφεται :

$$\Delta L = 10 \log e^{-2ax} = 8.7ax = mx \quad (8)$$

Ο συντελεστής απορρόφησης  $m=8.7a$  που έχει διαστάσεις  $dB/m$  μπορεί να γράφει:

$$m = a_c + a_m \text{ όταν } a/k \ll 1 \quad (9)$$

Όπου  $a_c$  ο κλασικός συντελεστής απορρόφησης,  $a_m$  ο συντελεστής απορρόφησης που οφείλεται στη μοριακή θερμική αποκατάσταση και  $k$  ο αριθμός των κυμάτων (Σκαρλάτος, 2008).

#### 1.2.4 Θερμική Μοριακή Αποκατάσταση

Η θερμική μοριακή αποκατάσταση είναι το φαινόμενο κατά το οποίο η ηχητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική. Όταν υπάρχουν συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας λόγω ταλάντωσης, περιστροφής κίνησης και μεταφορά κίνησης, η συνολική θερμική ενέργεια που περιέχει μία ποσότητα ομοιόμορφου

πολυατομικού αερίου, κατανέμεται στους βαθμούς ελευθερίας του αερίου. Κατά τη διάρκεια διάδοσης του ηχητικού κύματος, το αέριο συμπιέζεται και την ίδια στιγμή (ταυτόχρονα) η ενέργεια του αυξάνεται. Η επιπλέον ενέργεια λόγω μεταφοράς μετατρέπεται σε κινητική και ύστερα συμβαίνει μια σταδιακή ανακατανομή των ενεργειών σε όλου τους βαθμούς ελευθερίας. Απαιτείται ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα για την ολοκλήρωση αυτής της διαδικασίας. Η θερμική ισορροπία παραμένει σταθερή, όταν η συχνότητα του ήχου είναι μικρή, σε αντίθεση με μεγαλύτερες συχνότητες, όπου η μεταβολή της πίεσης είναι γρήγορη και ο χρόνος αποκατάστασης πεπερασμένος. Τότε έχουμε μη ισοκατανομή των ενεργειών. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε μετατροπή της ηχητικής ενέργειας σε θερμική. Η μέγιστη μετατροπή συμβαίνει όταν η περίοδος των ταλαντώσεων των σωματιδίων λόγω του ήχου είναι ίση με τον χρόνο θερμικής αποκατάστασης. Η μετατροπή της ηχητικής ενέργειας σε θερμική λόγω θερμικής μοριακής αποκατάστασης είναι σημαντική μόνο για τις συχνότητες που μεγιστοποιείται (Σκαρλάτος, 2008). Δηλαδή:

$$\omega\tau = 1 \quad (10)$$

### 1.2.5 Μέτρηση Συντελεστή Απορρόφησης Υλικών

Για να μετρήσουμε τον συντελεστή απορρόφησης των υλικών υπάρχουν τρεις παράγοντες που πρέπει να εξετάσουμε, οι οποίοι έχουν να κάνουν με τη γωνία πρόσπτωσης του ηχητικού κύματος επάνω στο υλικό (Σκαρλάτος, 2008):

- I. Συντελεστής απορρόφησης για κάθετη πρόσπτωση: Στην περίπτωση αυτή το ηχητικό κύμα προσπίπτει (χτυπάει) κάθετα στο υλικό. Η μέτρηση του συντελεστή απορρόφησης πραγματοποιείται με τη βοήθεια της μεθόδου σωλήνα στάσιμου κύματος. Για τη μέθοδο χρησιμοποιείται ένας σωλήνας κλειστός, με διάμετρο μικρότερη από το μήκος κύματος του ήχου ( $D > 0.59\lambda$ ) και μήκος μεγαλύτερο από τα τρία τέταρτα του μήκους κύματος του  $3/4\lambda$ . Το υλικό προς μέτρηση τοποθετείται στη μια άκρη του σωλήνα και στην άλλη άκρη είναι τοποθετημένη μια πηγή που εκπέμπει μια συχνότητα. Λόγω της απορρόφησης του ήχου από το υλικό, το πλάτος του ανακλώμενου κύματος ( $p_r$ ) είναι μικρότερο από εκείνο που προσπίπτει σε αυτό ( $p_i$ ). Οπότε στα σημεία που δημιουργούνται δεσμοί, το συνιστώμενο πλάτος θα είναι ή διαφορά  $p_i - p_r$ . Αντιθέτως, στα σημεία που δημιουργούνται κοιλίες δηλαδή μέγιστο, το συνιστώμενο πλάτος θα είναι το άθροισμα  $p_i + p_r$  (Σκαρλάτος, 2008)

$$\frac{P_{max}}{P_{min}} = \frac{|p_i + p_r|}{|p_i - p_r|} = n \quad (11)$$

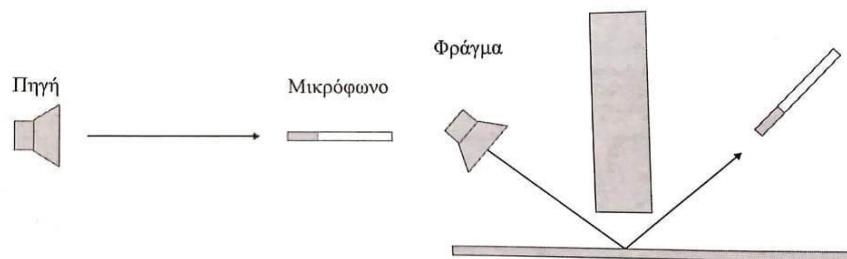
n= Λόγος στάσιμου κύματος

II. Συντελεστής απορρόφησης για πλάγια πρόσπτωση: Στην περίπτωση αυτή το ηχητικό κύμα προσπίπτει πλάγια (υπό κάποια γωνία) στο υλικό. Για τον υπολογισμό του συντελεστή απορρόφησης χρησιμοποιούμε τη μέθοδο διαχωρισμού ανακλώμενης – ανακλώμενης ακτίνας. Κατά τη μέθοδο αυτή, για τον υπολογισμό του συντελεστή απορρόφησης γίνεται διαχωρισμός της προσπίπτουσας από την ανακλώμενη ηχητική ακτίνα. Ο διαχωρισμός μπορεί να γίνει με τους παρακάτω τρόπους:

- Διαχωρισμός με τη βοήθεια κατευναστικού μικροφώνου.
- Διαχωρισμός με τη βοήθεια των συναρτήσεων συσχέτισης
- Διαχωρισμός με τη βοήθεια τόνου μικρής διάρκειας

Κατά τη μέθοδο αυτή παρατηρείται ότι μια πηγή τοποθετημένη μέσα σε αντηχητικό θάλαμο εκπέμπει ριπές τόνων. Οι στάθμες των ριπών μετρώνται από έναν δέκτη, ο οποίος βρίσκεται σε συγκεκριμένη απόσταση από την πηγή. Στη συνέχεια, μεταξύ της πηγής και του δέκτη (χωρίς να αλλάξει η μεταξύ τους απόσταση) τοποθετείται φράγμα μεγάλης ηχομείωσης και μετρίεται η στάθμη των ριπών που προέρχεται από ανάκλαση για δεδομένη γωνία πρόσπτωσης. Από τη διαφορά στάθμης υπολογίζεται ο συντελεστής απορρόφησης για τη συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης (Σκαρλάτος, 2008).

Μέθοδος διαχωρισμού προσπίπτουσας- ανακλώμενης γωνίας, για τη μέτρηση συντελεστή απορρόφησης για πλάγια πρόσπτωση .



Εικόνα 2 - Μέθοδος διαχωρισμού προσπίπτουσας- ανακλώμενης γωνίας, για τη μέτρηση συντελεστή απορρόφησης για πλάγια πρόσπτωση

III. Συντελεστής απορρόφησης για τυχαία πρόσπτωση: Η μέθοδος που ακολουθείται για τον απολογισμό του συντελεστή απορρόφησης για τυχαία πρόσπτωση είναι στατιστική και εξαρτάται από τη μέτρηση του χρόνου αντήχησης. Οπότε σε έναν χώρο με όγκο  $V$ , επιφάνεια  $S$ , μετριέται ο χρόνος αντήχησης  $RT60$ . Με τον παρακάτω τύπο υπολογίζεται ο συντελεστής απορρόφησης (Σκαρλάτος, 2008):

$$\bar{a} = \frac{0,161 * V}{S * T_{60}} \quad (12)$$

Ύστερα, μια μεγάλη επιφάνεια του χώρου με εμβαδόν  $x$  και συντελεστή απορρόφησης  $\alpha_1$ , καλύπτεται με το υλικό του οποίου θέλουμε να μετρήσουμε τον συντελεστή απορρόφησης και παράλληλα, μετράμε τον νέο χρόνο αντήχησης  $T'_{60}$ . Τέλος, ο συντελεστής απορρόφησης του υλικού προκύπτει από τον τύπο (Σκαρλάτος, 2008):

$$\bar{a} = \frac{0,161 * V}{x} * \left[ \frac{1}{T'_{60}} - \frac{1}{T_{60}} \right] + \alpha_1 \quad (13)$$

## Κεφαλαίο 2<sup>ο</sup>

### Ακουστική Κλειστών Χώρων

#### Εισαγωγή 2<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

Το οικείο κεφάλαιο περιγράφει τους τρόπους συμπεριφοράς του ήχου μέσα σε κλειστούς χώρους. Οι τρόποι συμπεριφοράς του ήχου, με τη σειρά τους, παρουσιάζουν διαφορές σύμφωνα με τις εκάστοτε διαστάσεις του χώρου που μελετάται. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στη δημιουργία στάσιμων κυμάτων μέσα σε έναν κλειστό χώρο. Αναλύονται, δηλαδή, τα είδη των στάσιμων κυμάτων σύμφωνα με τους τρόπους δόνησης που προκαλούν, όταν παράγονται μέσα σε έναν κλειστό χώρο. Επίσης, γίνεται αναφορά στους τρόπους μελέτης των κλειστών χώρων ανά κατηγορία καθώς και στον χρόνο αντήχησης και στον ορισμό του. Μελετάται η επίδραση του χρόνου αντήχησης μέσα σε έναν κλειστό χώρο και ο μέσος συντελεστής απορρόφησης.

Στην συνέχεια το κεφάλαιο κάνει λόγο για τις παραμέτρους καλής ακουστικής ενός κλειστού χώρου. Αναφέρονται σε τρία βασικά φαινόμενα της ακουστικής: το φαινόμενο της ηχούς, το φαινόμενο Hass, το οποίο σχετίζεται με την ηχώ και το φαινόμενο της πολλαπλής ηχούς. Παράλληλα, παρατίθενται οι τρόποι εμφάνισης των φαινομένων αυτών. Αναλύεται η επίδραση του χρόνου αντήχησης σε έναν κλειστό χώρο κατά τη διάρκεια μιας ομιλίας, αλλά και πώς ο χρόνος αντήχησης επηρεάζει την ποιότητα της ομιλίας.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου γίνεται αναφορά στις ακουστικές απαιτήσεις των κλειστών χώρων με σκοπό την βελτίωση της ακουστικής τους. Πιο συγκεκριμένα, διευκρινίζεται το φαινόμενο του χρωματισμού και αναλύονται οι παρακάτω έννοιες: ο αρχικός χρόνος μείωσης του αντηχητικού πεδίου, η αρχική χρονική καθυστέρηση και η ευκρίνεια. Στο τέλος εκτίθεται εκτενώς ο βέλτιστος χρόνος αντήχησης ενός κλειστού χώρου. Σε πίνακα, επίσης, παρουσιάζεται ο βέλτιστος όγκος που απαιτείται να έχει ένας κλειστός χώρος σύμφωνα με τη χρήση του. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παράθεση διαγράμματος της εξίσωσης βέλτιστης αντήχησης και του βέλτιστου χρόνου αντήχησης.

## 2. Διάδοση του Ήχου σε Κλειστό Χώρο.

Η διάδοση του ήχου στους ανοικτούς χώρους διαφέρει σε σχέση με τους κλειστούς. Στους ανοικτούς χώρους όταν εκπέμπει μια ηχητική πηγή, ο ήχος διαδίδεται απ' ευθείας από την πηγή στον ακροατή. Αντιθέτως, όταν μια πηγή βρίσκεται μέσα σε έναν κλειστό χώρο ο εκπεμπόμενος ήχος, εκτός από την απευθείας διάδοση, ανακλά στα τοιχώματα του χώρου. Οπότε η ηχητική πίεση σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου είναι το άθροισμα της ηχητικής πίεσης της πηγής και της πίεσης που προέρχεται από τις ανακλάσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αλλοιώνεται η αρχική κυματομορφή του εκπεμπόμενου ήχου. Ειδικότερα, στους μικρούς εμφανίζονται φαινόμενα συμβολής, τα όποια είναι εντονότερα όταν οι διαστάσεις του χώρου μικραίνουν (Σκαρλάτος, 2008).

Για να μελετήσουμε ακουστικά τους κλειστούς χώρους, τους διακρίνουμε σε ακουστικά μικρούς, μεγάλους και πολύ μεγάλους. Ένας χώρος θεωρείται ακουστικά μεγάλος, όταν η μικρότερη διάστασή του είναι κατά δύο μήκη κύματος τουλάχιστον μεγαλύτερη από το μήκος κύματος της συχνότητας που εξετάζουμε. Ένας χώρος θεωρείται πολύ μεγάλος όταν οι αποστάσεις των επιφανειών που ορίζουν το χώρο είναι τόσο μεγάλες ώστε η απορρόφηση του ήχου από τον αέρα να είναι σημαντική. Για παράδειγμα ένας χώρος 2\*2\*2m θεωρείται ακουστικά μικρός για συχνότητα 100Hz ενώ θεωρείται μεγάλος για συχνότητα 1000HZ. Παράδειγμα μικρών χώρων είναι το ηχείο ενός μουσικού οργάνου, ένα μικρό δωμάτιο σε χαμηλές συχνότητες. Παράδειγμα μεγάλων χώρων είναι μία αίθουσα διδασκαλίας, και ένας πολύ μεγάλος χώρος θεάτρου ή μία μεγάλη εκκλησία (Σκαρλάτος, 2008).

Ακόμη, ένας τρόπος διαχωρισμού ακουστικά μεγάλων χώρων από μικρούς είναι η συχνότητα αποκοπής  $f_c$ . Η συχνότητα αυτή ορίστηκε από τον Manfred Schroeder ως η συχνότητα διαχωρισμού ενός μεγάλου από έναν μικρό χώρο. Πιο συγκεκριμένα, για συχνότητες μεγαλύτερες της  $f_c$ , ο χώρος θεωρείται ακουστικά μεγάλος, γιατί στον χώρο – δωμάτιο δημιουργείται μεγάλος αριθμός στάσιμων κυμάτων που προέρχονται από την πηγή. Συνεπώς, όταν η συχνότητα ενδιαφέροντος βρίσκεται κάτω από την  $f_c$ , ο χώρος-δωμάτιο θεωρείται ακουστικά μικρός (Σκαρλάτος, 2008).

Συχνότητα αποκοπής:

$$f_c = k * \sqrt{\frac{RT60}{V}} \quad (14)$$

**K:** μια σταθερά με τιμή 2102 στο S.I. και 11885 στο U.S. μετρικό σύστημα

**RT60:** ο χρόνος αντήχησης σε δευτερόλεπτα (s)

**V:** ο όγκος του χώρου σε κυβικά μέτρα ( $m^3$ )

## **2.1 Μικροί Χώροι**

Στους μικρούς ακουστικά χώρους κυριαρχούν τα κυματικά φαινόμενα του ήχου. Παρατηρούνται συμβολές μεταξύ του εκπεμπόμενου ήχου και των ανακλάσεων, που δημιουργούνται κατά την εκπομπή του από τα τοιχώματα του χώρου. Ακόμη εμφανίζεται ένα φαινόμενο κατά το οποίο, όταν το μήκος κύματος κάποιας συχνότητας συμπίπτει με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του χώρου, τότε ο χώρος συμπεριφέρεται σαν ένας συντονιστής και σχηματίζονται στάσιμα κύματα. Αυτό συμβαίνει στις χαμηλές συχνότητες κυρίως (Σηφάκης & Κουτσοδιμάκης, 2012).

### **2.1.2 Στάσιμα Κύματα**

Για να κατανοήσουμε τη δημιουργία στάσιμων κυμάτων ακολουθεί ένα απτό παράδειγμα: Έστω ότι έχουμε έναν κλειστό σωλήνα από τα δύο άκρα. Στο ένα άκρο του σωλήνα παράγεται ένας τόνος, ο οποίος διαδίδεται μέσα σε αυτόν. Φτάνοντας στο άλλο άκρο ο ήχος ανακλάται από αυτό και επιστρέφει. Κατά την επιστροφή του συμβάλλει με τον εκπεμπόμενο ήχο. Κάτω από ορισμένες συνθήκες μήκους κύματος του ήχου (συχνότητας) ως προς το μήκος του σωλήνα το αποτέλεσμα της συμβολής των δυο κυμάτων (οδεύοντος και ανακλώμενου) προκαλούνται σημεία μέγιστης πίεσης (κοιλίες) μηδενικής (δεσμοί). Τότε λέμε ότι δημιουργήθηκε ένα στάσιμο κύμα. Η ονομασία αναφέρεται στο γεγονός ότι το κύμα φαίνεται σαν να μην κινείται στον χώρο και η ενέργεια εγκλωβίζεται μέσα στον σωλήνα. Το ίδιο συμβαίνει σε έναν μικρό χώρο με τη διαφορά ότι, αντί για τα δύο κλειστά άκρα έχουμε έξι παράλληλες επιφάνειες (Σηφάκης & Κουτσοδιμάκης, 2012).

Η ενέργεια του ήχου ανακλάται από τις επιφάνειες του χώρου όχι με τυχαίο τρόπο και ένα μέρος της διαδίδεται σε κλειστές διαδρομές μεταξύ συγκεκριμένων τοίχων. Όταν στο μήκος τους χωράει ακριβώς ένα ακέραιο πολλαπλάσιο του μισού μήκους κύματος μιας συγκεκριμένης συχνότητας (υπάρχει άπειρο πλήθος τέτοιων διαδρόμων για διάφορες συχνότητες), δημιουργούνται στάσιμα κύματα τα οποία δε



μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου. Έτσι, οι θέσεις στις οποίες εμφανίζονται δεσμοί και κοιλιές δε μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου (Σκαρλάτος, 2008).

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι τα στάσιμα κύματα σε έναν κλειστό χώρο:

- i. Δεν ανακλώνται σε όλους του τοίχους με την ίδια πιθανότητα. Κινούνται μεταξύ συγκεκριμένων τοίχων.
- ii. Οι γωνίες πρόσπτωσης δεν είναι τυχαίες, αλλά συγκεκριμένες.
- iii. Για τη δημιουργία του στάσιμου κύματος είναι απαραίτητη η επιστροφή του σε έναν αρχικό τοίχο. Δηλαδή η διαδρομή του κύματος σε κάποια κλειστή κυκλική διαδρομή, μήκους πολλαπλάσιου του μισού μήκους κύματος.
- iv. Οι συχνότητες εμφάνισης συντονισμών καθορίζονται από τη γεωμετρία του χώρου (Σκαρλάτος, 2008).

Οι συχνότητες εμφάνισης στάσιμων κυμάτων στην κλασική περίπτωση ενός χώρου σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου δίνονται από τη σχέση (Σκαρλάτος, 2008, Σηφάκης & Κουτσοδιμάκης, 2012).

$$f(x, y, z) = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{nx}{Lx}\right)^2 + \left(\frac{ny}{Ly}\right)^2 + \left(\frac{nz}{Lz}\right)^2} \quad (15)$$

Όπου  $c$  η ταχύτητα του ήχου (m/s),  $Lx, Ly, Lz$ , οι διαστάσεις του χώρου στους αντίστοιχους άξονες και  $nx, ny, nz$  η τάξη του στάσιμου κύματος στον αντίστοιχο άξονα (Σκαρλάτος, 2008).

Όταν αναφερόμαστε σε έναν συντονισμό που προκαλείται από κάποια συχνότητα, πολλές φορές αντί για την τιμή της συχνότητας χρησιμοποιούμε το είδος του τρόπου δόνησης με βάση την τάξη του στάσιμου κύματος και με βάση τους τρεις άξονες. Τα στάσιμα κύματα χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες σύμφωνα με τους τρόπους δόνησης τους (Σκαρλάτος, 2008).

- i. Αξονικοί τρόποι δόνησης: Εμφανίζονται, όταν υπάρχουν διαδοχικές ανακλάσεις και δημιουργούνται στάσιμα κύματα ανάμεσα σε δύο παράλληλες επιφάνειες του χώρου (τοιίχους). Δηλαδή εμφανίζονται σε μια διάσταση από τις τρεις που αποτελείται ο χώρος (Σκαρλάτος, 2008).
- ii. Εφαπτομενικοί τρόποι δόνησης: Εμφανίζονται, όταν υπάρχουν διαδοχικές ανακλάσεις και δημιουργούνται στάσιμα κύματα ανάμεσα σε τέσσερις παράλληλες επιφάνειες (τοιίχους). Δηλαδή όταν χωράει ένα ακέραιο

πολλαπλάσιο του μισού μήκους κύματος σε δυο διαστάσεις (Σκαρλάτος, 2008).

- iii. Πλάγιοι τρόποι δόνησης: Εμφανίζονται, όταν υπάρχουν διαδοχικές ανακλάσεις και δημιουργούνται στάσιμα κύματα ανάμεσα σε έξι παράλληλες επιφάνειες του χώρου (τοιίχους). Δηλαδή και στις τρεις διαστάσεις. (Σκαρλάτος, 2008).

Σε κάθε μια από τις παραπάνω κατηγορίες εμφανίζονται στάσιμα κύματα σε μια ελάχιστη συχνότητα και σε μια σειρά από αρμονικούς αυτής. Αντιθέτως, οι συχνότητες συντονισμού στο σύνολο τους δε σχετίζονται αρμονικά (Σκαρλάτος, 2008 ).

Η χαμηλότερη συχνότητα συντονισμού είναι η συχνότητα του αρμονικού συντονισμού (για  $n=1$ ) που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη διάσταση του χώρου (Σκαρλάτος, 2008).

$$f_{min} = \frac{c}{2L_{max}} \quad (16)$$

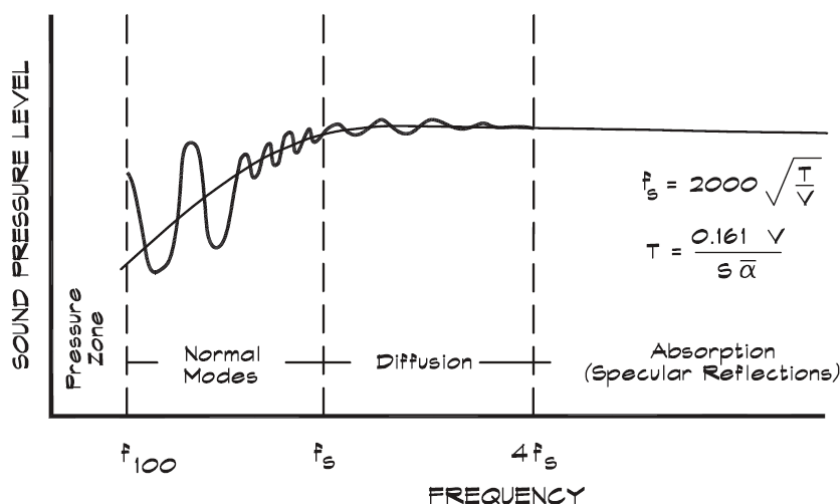
Οι αξονικοί τρόποι δόνησης κουβαλούν τη μεγαλύτερη ενέργεια και είναι αυτοί που κάνουν τη μεγαλύτερη ζημία σε έναν χώρο σε σχέση με τους εφαπτομενικούς και τους πλάγιους, όπου προκαλούνται από ανακλάσεις σε περισσότερες από δυο επιφάνειες. Σε κάθε ανάκλαση ένα μέρος της ενέργειας απορροφάται από το υλικό της επιφάνειας και αυτό που επιστρέφει κουβαλά λιγότερη ενέργεια κάθε φορά. Συγκεκριμένα, οι εφαπτομενικοί έχουν το μισό ( $1/2$ ) της ενέργειας των αξονικών,  $-3$  decibel χαμηλότερη στάθμη. Και οι πλάγιοι το ένα τέταρτο ( $1/4$ ),  $-6$  decibel χαμηλότερη στάθμη. Παρ' όλα αυτά στις γωνίες ενός χώρου παρουσιάζονται κοιλίες (μέγιστα πίεσης) σε όλους τους τρόπους δόνησης . Ενδιάμεσα έχουμε ένα πλήθος από δεσμούς (ελάχιστα πίεσης) και κοιλίες, το οποίο αλλάζει ανάλογα με τον τρόπο δόνησης. Οπότε σε κάθε περίπτωση υπάρχει ένα πλήθος συχνοτήτων που εμφανίζονται στάσιμα κύματα σε έναν χώρο (Σκαρλάτος, 2008).

### 2.1.3 Μεγάλοι Χώροι

Στους μεγάλους χώρους τα κυματικά φαινόμενα είναι εκφυλισμένα και η μελέτη γίνεται με τη βοήθεια στατιστικών τύπων. Θεωρούμε ότι ο ήχος διαδίδεται σε ευθεία γραμμή σαν ακτίνα μεταξύ ανακλαστικών επιφανειών. Ανακλάται από όλες τις επιφάνειες με ίση πιθανότητα και το πεδίο που δημιουργείται είναι διάχυτο. Στους

πολύ μεγάλους χώρους π.χ. εκκλησίες και θέατρα, εκτός από τα κυματικά φαινόμενα λαμβάνεται υπόψη και η απορρόφηση από τον αέρα (Σκαρλάτος, 2008).

### 2.1.4 Διάγραμμα Bolt-Beranek-Newman-Ελεγκτής Σταθερής Κατάστασης της Ακουστικής Απόκρισης Δωματίου



Εικόνα 3 - Διάγραμμα Bolt-Beranek-Newman

Το διάγραμμα Bolt-Beranek-Newman ονομάζεται ελεγκτής σταθερής κατάστασης της ακουστικής απόκρισης δωματίου. Παρουσιάζεται ο διαχωρισμός της συμπεριφοράς ενός χώρου σύμφωνα με το μήκος κύματος του ήχου ως προς τις διαστάσεις του χώρου (Σηφάκης & Κουτσοδιμάκης, 2012)

Η συχνότητα  $f_c$  είναι το όριο διαχωρισμού ανάμεσα σε μεγάλους και μικρούς κλειστούς χώρους, σε έναν μικρό κλειστό χώρο η εν λόγω συχνότητα μπορεί να φτάσει την τιμή των 500Hz, ενώ σε ένα μεγάλο κλειστό χώρο μπορεί να πέσει ακόμη στα 30 Hz. Σύμφωνα με το διάγραμμα το ακουστικό φάσμα σε έναν χώρο μπορεί να χωριστεί σε τέσσερις συχνοτικές περιοχές :

- i. Ζώνη πίεσης (pressure zone). Εκτείνεται από 0Hz μέχρι τη συχνότητα  $f=c/L$  ( $L$  είναι η μεγαλύτερη διάσταση του δωματίου και  $c$  ταχύτητα του ήχου στον αέρα ( $c=344$  m/s ). Κάτω από αυτήν τη συχνότητα δεν υπάρχει συντονισμός υποστηριζόμενος από το δωμάτιο. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να υπάρξει μια ή πολλές συχνότητες κάτω από αυτήν, χωρίς να ενισχυθούν, προκαλώντας συντονισμό στο δωμάτιο, γιατί το μήκος κύματος τους είναι μεγαλύτερο από τη μεγαλύτερη διάσταση του δωματίου (Σκαρλάτος, 2008).
- ii. Ζώνη στάσιμων κυμάτων (modal zone). Εκτείνεται από  $f=c/L$  έως  $f_c$ . Είναι η περιοχή στην οποία τα μήκη κύματος των συχνοτήτων είναι της τάξεως των

διαστάσεων του δωματίου. Δηλαδή δημιουργούνται συντονισμοί λόγω ομοιότητας των διαστάσεων και των μηκών κύματος των συχνοτήτων. Το ηχητικό πεδίο μελετάται με τη χρήση της κυματικής ακουστικής (Σκαρλάτος, 2008).

iii. Ζώνη διάχυσης (diffusion zone). Εκτείνεται από  $f_c$  έως  $4f_c$ , είναι μια μεταβατική περιοχή (Σκαρλάτος, 2008).

iv. Ζώνη ανακλάσεων (specular reflection zone). Εκτείνεται από  $4f_c$  και επάνω. Οι διαστάσεις του χώρου είναι πολύ μεγαλύτερες από το μήκη κύματος των συχνοτήτων και για τη μελέτη του δωματίου χρησιμοποιούμε τη γεωμετρική ακουστική. Δηλαδή, η διάδοση της ηχητικής ενέργειας προσομοιάζεται με τη διάδοση ηχητικών ακτινών (Σκαρλάτος, 2008)

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

- i. Κυματική ακουστική: Με τη μέθοδο αυτή μελετάμε τους μικρούς χώρους, όπου τα κυματικά φαινόμενα είναι πολύ έντονα και κυρίως οι συντονισμοί (Σηφάκης & Κουτσοδιμάκης, 2012).
- ii. Στατιστική ακουστική: Με τη μέθοδο αυτή μελετάμε μεγάλους και πολύ μεγάλους χώρους, προσεγγίζοντάς τους με τη βοήθεια της στατιστικής ανάλυσης και αυτό γίνεται, επειδή τα κυματικά φαινόμενα του εκπεμπόμενου ήχου είναι πολύπλοκα (Σηφάκης & Κουτσοδιμάκης, 2012).
- iii. Γεωμετρική ακουστική: Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται σε μεγάλους χώρους και οι υπολογισμοί γίνονται με τη βοήθεια των τύπων της γεωμετρικής οπτικής, κατά την οποία η μετάδοση της ηχητικής ενέργειας γίνεται μέσω «ακτινών». Οι «ακτίνες» ταξιδεύουν με την ταχύτητα του ήχου και ανακλώνται από λείες επιφάνειες (Σηφάκης & Κουτσοδιμάκης, 2012).

Η αντήχηση, φαινόμενο σύμφωνα με το οποίο το ηχητικό πεδίο ενός χώρου διατηρείται για μικρό χρονικό διάστημα μετά το σταμάτημα της ηχητικής πηγής, καθώς φθίνει εκθετικά με τον χρόνο, αυτό είναι το κύριο χαρακτηριστικό των κλειστών χώρων. Οι διαστάσεις του χώρου, η γεωμετρία του και τα υλικά με τα οποία είναι κατασκευασμένες όλες οι επιφάνειές του, είναι παράγοντες που επηρεάζουν την αντήχηση. Ο χρόνος αντήχησης αποτελεί τη βασικότερη παράμετρο ακουστικής συμπεριφοράς των κλειστών χώρων (Σηφάκης & Κουτσοδιμάκης, 2012).

### 2.1.5 Χρόνος Αντήχησης

Σε έναν κλειστό χώρο έχουμε μία πηγή η οποία τον τροφοδοτεί με ηχητική ενέργεια. Όταν η πηγή μηδενιστεί, δε μηδενίζεται η ηχητική ενεργεία ακαριαία, αλλά διατηρείται για μικρό χρονικό διάστημα μέχρι οι ηχητικές ακτίνες να απορροφηθούν από τα τοιχώματα του. Παρατηρούμε ότι η μείωση της ηχητικής ενέργειας γίνεται εκθετικά σε σχέση με τον χρόνο και ο ρυθμός μείωσης της στάθμης (σε λογαριθμική κλίμακα) είναι γραμμικός. Αυτό εκφράζεται με τον χρόνο αντήχησης, ο οποίος είναι η βασικότερη παράμετρος που σχετίζεται με την ακουστική των κλειστών χώρων (Σκαρλάτος, 2008).

Ως χρόνος αντήχησης (RT60) ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται ώστε η στάθμη της ηχητικής πίεσης σε κάποιο σημείο να ελαττωθεί κατά 60dB αμέσως μετά το μηδενισμό του εκπεμπόμενου θορύβου από την πηγή (Σκαρλάτος, 2008).

$$RT60 = 0.161 \frac{V}{As} \quad (17)$$

RT60: ο χρόνος αντήχησης σε δευτερόλεπτα (s)

V: ο όγκος του χώρου σε κυβικά μέτρα (m<sup>3</sup>)

s: εμβαδών επιφανειών δωματίου (m<sup>2</sup>)

As: Ως απορρόφηση του δωματίου ονομάζουμε το άθροισμα των γινομένων του εμβαδού κάθε επιφάνειας με τον συντελεστή απορρόφησης του υλικού που την

$$V = x * y * z \quad (18)$$

αποτελεί. Και μετριέται σε sabine (Σκαρλάτος, 2008).

$$As = S\bar{a} = a_1s_1 + a_2s_2 + \dots + a_n s_n \quad (19)$$

n= 1, 2, 3.....

S1, S2, S3..... είναι το εμβαδό κάθε επιμέρους επιφάνειας.

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$  Είναι οι συντελεστές απορρόφησης υλικού της κάθε επιφάνειας, για κάθε συχνότητα .

### 2.1.6 Επίδραση του Χρόνου Αντήχησης

Ο χρόνος αντήχησης παίζει σημαντικό ρόλο σε έναν χώρο ανάλογα με τη χρήση του. Σε χώρους που προορίζονται για ομιλία (αίθουσες συνεδριάσεων, αμφιθέατρα, αίθουσες διαλέξεων) ο χρόνος αντήχησης πρέπει να είναι κατάλληλος, ώστε οι συλλαβές των λέξεων που εκφωνεί ο ομιλητής να φτάνουν στο ακροατήριο ακέραιες. Συγκεκριμένα σε ένα χώρο με μεγάλο χρόνο αντήχησης παρατηρείται το φαινόμενο, οι συλλαβές των λέξεων που εκφωνούνται από τον ομιλητή να καλύπτουν η μια την άλλη, με αποτέλεσμα να μην γίνονται κατανοητές από το ακροατήριο (Σκαρλάτος, 2008).

Αντίθετα, σε έναν χώρο που προορίζεται για μουσική (μουσικές σκηνές, συνολικοί χώροι) ο χρόνος αντήχησης σύμφωνα με ερευνητές, επηρεάζει την ποιότητα της μουσικής. Οπότε σε γενικές γραμμές ο χρόνος αντήχησης πρέπει να είναι μεγάλος σε χώρους που προορίζονται για τη συγκεκριμένη χρήση (Σκαρλάτος, 2008).

### 2.1.7 Μέσος Συντελεστής Απορρόφησης

Ο μέσος συντελεστής απορρόφησης μας δίνει την απορρόφηση σε έναν κλειστό χώρο για μία δεδομένη συχνότητα (Σηφάκης & Κουτσοδιμάκης, 2012).

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 s_1 + \alpha_2 s_2 + \alpha_3 s_3 + \dots + \alpha_n s_n}{s_1 + s_2 + s_3 + \dots + s_n} \quad (20)$$

Ο χρόνος αντήχησης για έναν χώρο εξαρτάται από τη συχνότητα του ήχου, για αυτόν τον λόγο ορίζεται για κεντρικές συχνότητες κάθε οκτάβας και τριτοκτάβας όπως και ο συντελεστής απορρόφησης . Οι παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή του χρόνου αντήχησης για μια συγκεκριμένη συχνότητα είναι η απορρόφηση του χώρου και ο όγκος του . Για αυτόν τον λόγο ο υπολογισμός τους παίζει σημαντικό ρόλο στην ακουστική ποιότητα των χώρων. Στις σύγχρονες συσκευές μέτρησης του χρόνου αντήχησης υπάρχει η δυνατότητα απεικόνισης του στις συχνοτικές ζώνες 125-4000Hz (Σηφάκης & Κουτσοδιμάκης, 2012).

## 2.2 Παράμετροι Καλής Ακουστικής

Όταν σε έναν κλειστό χώρο βρίσκεται μια πηγή ήχου, η οποία εκπέμπει ένα σήμα, οι ανακλάσεις που θα προκληθούν από τις επιφάνειες του χώρου θα φτάσουν στον ακροατή με διαφορετικές χρονικές καθυστερήσεις. Η κατανομή των ανακλάσεων παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην ακουστική συμπεριφορά ενός κλειστού χώρου, για τον λόγο ότι ορισμένες ανακλάσεις βελτιώνουν την ακουστική του χώρου, ενώ άλλες την χειροτερεύουν. Για την περιγραφή της ακουστικής ενός κλειστού χώρου έχουν προταθεί κάποιες ακουστικές ποσότητες, οι οποίοι μπορούν να μετρηθούν και να προταθούν ως στόχοι για μια ακουστική μελέτη. Κάποιες από τις κυριότερες παρουσιάζονται παρακάτω (Σκαρλάτος, 2008).

### 2.2.1 Ηχώ (Echo)

Όταν εκπέμπει μια πηγή μέσα σε έναν χώρο και ένας ακροατής που βρίσκεται μέσα σε αυτόν, αντιληφθεί αμέσως μετά τον εκπεμπόμενο ήχο, τον ανακλώμενο σαν ξεχωριστό ήχο, τότε εμφανίζεται το φαινόμενο της ηχούς. Το φαινόμενο της ηχούς είναι διαφορετικό από την αντήχηση, διότι στην προκειμένη περίπτωση, οι ανακλάσεις αποτελούν ξεχωριστό ηχητικό γεγονός. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την αλλοίωση του ηχητικού σήματος της πηγής κάνοντας το δυσδιάκριτο και σε ορισμένες περιπτώσεις (όταν φαινόμενο είναι πολύ έντονο) το κάνει να ακούγεται διαφορετικό σε θέμα ρυθμού και χροιάς. Η ηχώ σε έναν κλειστό χώρο δεν εξαρτάται μόνο από την χρονική καθυστέρηση των ανακλάσεων σε σχέση με τον απευθείας ήχο, αλλά και από την κατεύθυνση πρόσπτωσης των ανακλάσεων στις επιφάνειες και από την ηχητική ασταθία αυτών. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται όταν η χρονική καθυστέρηση των ανακλάσεων από τον απευθείας ήχο είναι μεγαλύτερη ή ίση με 100ms. Όταν η ταχύτητα του ήχου σε κανονικές συνθήκες είναι 340m/s για να εμφανιστεί το φαινόμενο αυτό πρέπει μία διάσταση του χώρου να είναι τουλάχιστον 17m (Σκαρλάτος, 2008).

### 2.2.3 Φαινόμενο Haas

Το φαινόμενο της ηχούς μπορεί να πραγματοποιηθεί και για μικρότερες καθυστερήσεις των δευτερογενών ήχων (ανακλάσεις) σε σχέση με τον παραγόμενο από την πηγή. Υπό την προϋπόθεση ότι οι καθυστερημένοι ήχοι θα πρέπει να έχουν μεγαλύτερη ηχητική στάθμη (ένταση) από τον παραγόμενο ήχο. Το γεγονός αυτό γίνεται όταν ο δευτερογενής ήχος προέρχεται από αναπαραγωγή (πχ. ανάκλαση ή αναπαραγωγή του δευτερογενούς ήχου μέσα από μια μικροφωνική εγκατάσταση).

Πειράματα που πραγματοποίησε ο Helmut Hass το 1950 έδειξαν ότι αν ο αναπαραγόμενος ήχος (ή ανάκλαση) καθυστερήσει από 5 έως 35ms, θα πρέπει να είναι 10 dB μεγαλύτερος από τον παραγόμενο ήχο για να γίνει αντιληπτός σαν ηχώ από τον ακροατή. Το φαινόμενο αυτό ονομάστηκε φαινόμενο Hass. Στην περίπτωση που η καθυστέρηση είναι μεγαλύτερη από 100ms το φαινόμενο υπάρχει ανεξάρτητα από τη στάθμη του δευτερογενούς ήχου (Σκαρλάτος, 2008).

#### **2.2.4 Πολλαπλή Ηχώ**

Όταν σε ένα κλειστό χώρο υπάρχουν πολλές παράλληλες επιφάνειες, όπως τοίχοι, ταβάνι, πάτωμα, με μεγάλο συντελεστή ανάκλασης, τότε οι ήχοι μικρής διάρκειας, όπως χειροκρότημα και άλλοι παλμικοί ήχοι προκαλούν ηχώ που επαναλαμβάνεται. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται πολλαπλή ηχώ (Σκαρλάτος, 2008).

#### **2.2.5 Η επίδραση του Χρόνου Αντήχησης κατά την Διεξαγωγή ομιλιών.**

Όταν ένας ομιλητής εκφωνεί μια συλλαβή μέσα σε έναν χώρο με αντήχηση, συμβαίνει πολλές φορές το σύμφωνο της συλλαβής μετά το τονισμένο φωνήεν να μην είναι ευδιάκριτο και να μην καταλαβαίνει ο ακροατής τη συλλαβή που εκφωνήθηκε. Αυτό συμβαίνει γιατί το άτομο σύμφωνο έχει στάθμη μικρότερη κατά 25 dB από την τονισμένη συλλαβή και εκπέμπεται περίπου 320ms μετά από αυτήν. Όταν ο ομιλητής εκπέμπει τη συλλαβή, η στάθμη του εκπεμπόμενου ήχου φθίνει γραμμικά. Στην περίπτωση που ο χρόνος αντήχησης του χώρου είναι μεγάλος η στάθμη της τονισμένης συλλαβής μειώνεται λιγότερο από 25 dB σε χρόνο 320ms. Τότε, το σύμφωνο της συλλαβής μετά το τονισμένο φωνήεν πνίγεται, με αποτέλεσμα να μην είναι καθαρή η ομιλία. Πράγμα που σε χώρους με μικρούς χρόνους αντήχησης δε συμβαίνει (Σκαρλάτος, 2008).

### **2.3 Ακουστικές Απαιτήσεις Κλειστών Χώρων**

Ένας κλειστός χώρος για να έχει καλή ακουστική πρέπει να πληροί τις παρακάτω προϋποθέσεις (Σηφάκης & Κουτσοδιμάκης, 2012):

- i. Ο ήχος πρέπει να φτάνει σε όλα τα σημεία του χωρίς να μειώνεται αισθητά και να κατανέμεται ομοιόμορφα παντού.
- ii. Δεν πρέπει να εμφανίζεται το φαινόμενο της επανάληψης. Σε περίπτωση που δεν γίνεται να εξαλειφτεί, πρέπει να είναι περιορισμένο.
- iii. Ο ρυθμός μείωσης του ήχου να είναι ο βέλτιστος, ώστε να υπάρχει καθαρότητα στην ομιλία και βελτίωση της μουσικής.



- iv. Να μην υπάρχουν ηχητικές σκιές, ηχώ, ηχητικές παραμορφώσεις και ηχητικές συγκεντρώσεις.
- v. Ο χώρος να διαθέτει επαρκεί ηχομόνωση. Η τιμή των κριτηρίων του εισερχόμενου θορύβου πρέπει να είναι μικρότερη από 18 dB.

### **2.3.1 Χρωματισμός**

Στην περίπτωση που σε έναν κλειστό χώρο, η καθυστέρηση των ανακλώμενων ήχων είναι μικρή (10ms περίπου), η χροιά των ήχων αλλάζει στη συμβολή των φράσεων. Τότε παρουσιάζεται το φαινόμενο του χρωματισμού (Σκαρλάτος, 2008).

### **2.3.2 Αρχικός Χρόνος Μείωσης του Αντηχητικού Πεδίου EDT (Early Decay Time)**

Είναι παρόμοιος με τον χρόνο αντήχησης RT60, με τη διαφορά ότι υπολογίζεται με βάση τον ρυθμό μείωσης των πρώτων 10 dB αμέσως μετά τον μηδενισμό της πηγής. Σε περιπτώσεις χώρων με διάχυτο πεδίο αντικαθιστά τον χρόνο αντήχησης RT60. Επίσης, σύμφωνα με ψυχιατρικά τεστ αποδείχτηκε ότι ο EDT σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με την υποκειμενική αίσθηση της αντήχησης (Παπαδάκης, 2016).

### **2.3.3 Αρχική Χρονική Καθυστέρηση ITD (Initial Time Delay)**

Είναι ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ της άφιξης του απευθείας ήχου της ηχητικής πηγής και των πρώτων ανακλάσεων. Μετρείται σε second (s) και υπολογίζεται από την κρουστική απόκριση μεταξύ δύο θέσεων (Παπαδάκης, 2016).

### **2.3.4 Ευκρίνεια (Clarity)**

Συνδέεται με την ισορροπία του απευθείας ήχου και των πρώτων ανακλάσεων προς το συνολικό αντηχητικό πεδίο λόγω της αντήχησης. Σύμφωνα με τη χρήση ενός χώρου ορίζονται δυο δείκτες C50,C80 : Ο δείκτης C50 χρησιμοποιείται για ομιλία και ο C80 για μουσική. Ο κάθε δείκτης ισούται με δέκα φορές το δεκαδικό λογάριθμο του λόγου ηχητικής ενέργειας που φθάνει στο σημείο καταγραφής τα πρώτα 50ms ή 80ms, μετρούμενης με σαμιακή πηγή ήχου. Μονάδα μέτρησης decibel (dB) και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80ms} |p(t)|^2 dt}{\int_{80ms}^{-00} |p(t)|^2 dt} \quad (21)$$

Αφού είναι γνώστη η κρουστική απόκριση μεταξύ δύο σημείων ενός χώρου οι δείκτες C50 και C80 υπολογίζονται με αριθμητική ολοκλήρωση της κρουστικής απόκρισης των διαστημάτων αυτών. Οι υψηλές τιμές για το Clarity αποδεικνύουν μεγάλες τιμές ενέργειας στα πρώτα στάδια του ήχου, το οποίο συνδέεται με την υποκειμενική αντίληψη της αίσθησης της ευκρίνειας (Παπαδάκης, 2016).

### 2.3.5 Βέλτιστος Χρόνος Αντήχησης

Οι τιμές του βέλτιστου χρόνου αντήχησης διαφέρουν ανάλογα με τη χρήση του εκάστοτε κλειστού χώρου. Για να επιτευχθούν οι βέλτιστες ακουστικές συνθήκες σε ένα χώρο, πρέπει ο όγκος του να είναι κατάλληλος για την εκάστοτε χρήση. Γι' αυτό έχουν προταθεί τιμές για τον βέλτιστο όγκο ανά άτομο σύμφωνα με τη χρήση του χώρου (Σηφάκης & Κουτσοδιμάκης, 2012).

Πίνακας 1 - Βέλτιστος όγκος

Όγκος	Ελάχιστος	Βέλτιστος	Μέγιστος
Αίθουσα συναυλιών	6,5	7,1	9,9
Ιταλικού τύπου αίθουσες όπερας	4,0	4,2-5,1	5,7
Εκκλησιές	5,7	7,1-7,9	11,9
Κινηματογράφοι	-	3,1	4,2
Αίθουσες ομιλίας	-	2,8	4,9

Βέλτιστος όγκος/άτομο ( $m^3/\text{άτομο}$ ) ανάλογα με τη χρήση του χώρου (Σηφάκης & Κουτσοδιμάκης, 2012).

### 2.3.6 Εξίσωση Βέλτιστης Αντήχησης Stephens-Bate

Ο παρακάτω τύπος είναι μια εμπειρική μέθοδος για τον βέλτιστο χρόνο αντήχησης από τους Stephens και Bate για κεντρική συχνότητα 500Hz (Σηφάκης & Κουτσοδιμάκης, 2012).

$$RT_{60} = r(0.012\sqrt[3]{V} + 0.107) \quad (22)$$

$RT_{60}$ : χρόνος αντήχησης σε δευτερόλεπτα (s)

V: όγκος του δωματίου σε κυβικά ( $m^3$ )

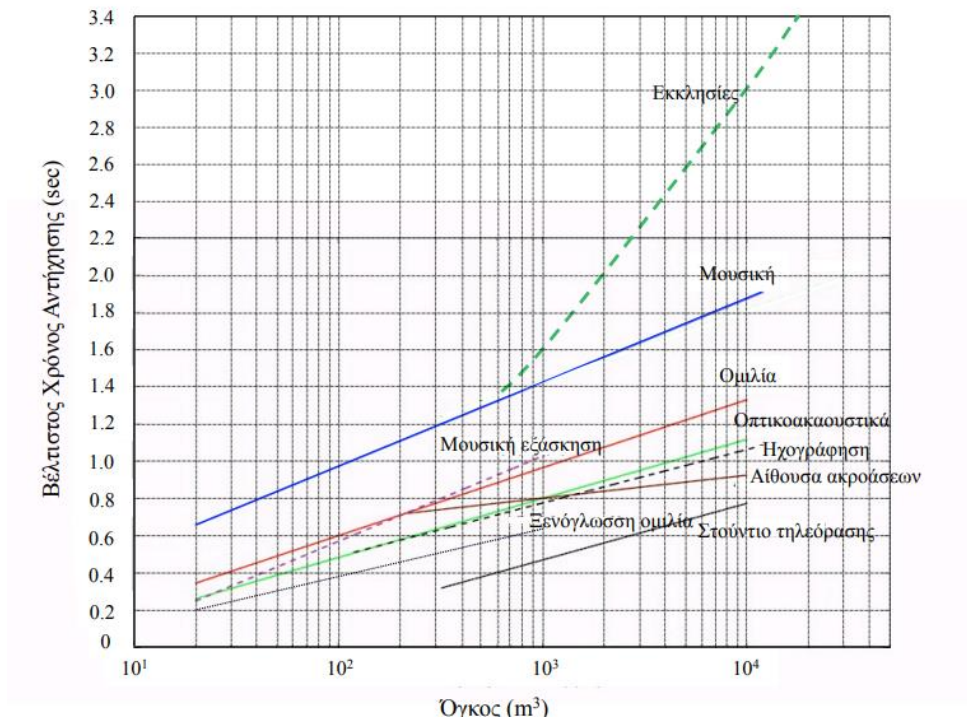
$r = 4$  για λόγο

$r = 5$  για ορχήστρα

$r = 6$  για χορωδία

Μια άλλη προσέγγιση για τον βέλτιστο χρόνο αντήχησης γίνεται από τον Beranek, ο οποίος χρησιμοποιεί γραφήματα για την απεικόνιση των βέλτιστων χρόνων αντήχησης σε διαφορετικούς χώρους για τη συχνότητα των 500HZ (Σηφάκης & Κουτσοδιμάκης, 2012).

### 2.3.7 Διάγραμμα Βέλτιστων Χρόνων Αντήχησης για Διάφορους Χώρους Beranek



Εικόνα 4 - Βέλτιστος χρόνος αντήχησης

Στον κάθετο άξονα είναι ο βέλτιστος χρόνος αντήχησης σε second και στον οριζόντιο ο όγκος του χώρου σε κυβικά.. Παρατηρούμε ότι για studio εκπομπής και χώρους ομιλίας, ο χρόνος αντήχησης κυμαίνεται μεταξύ 0,3-0,6 second ενώ για καθολικές αίθουσες μεταξύ 1-2,5 second (Σκαρλάτος, 2008).

# Κεφαλαίο 3<sup>ο</sup>

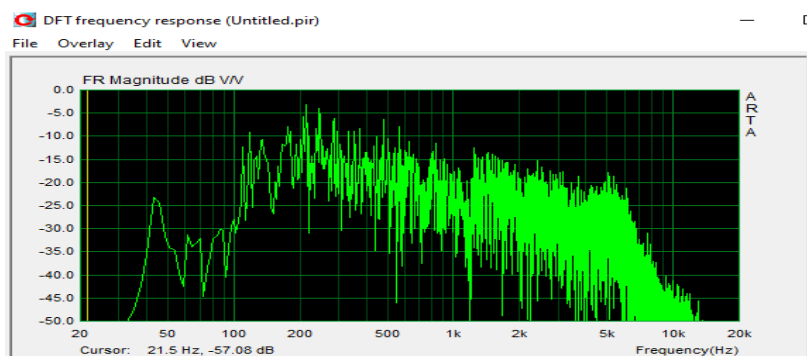
## Μελέτη και Ανάλυση του Ήχου

### Εισαγωγή 3<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

Το τρίτο κεφάλαιο περιγράφει τον τρόπο ανάλυσης του ήχου με την βοήθεια μηχανημάτων ανάλυσης φάσματος και τις κατηγορίες τους. Επίσης, αναφέρεται στις καμπύλες ακουστότητας και στη σημασία που έχουν. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στον θόρυβο, στα είδη των θορύβων και τη χρήση τους. Ακόμη γίνεται λόγος στον θόρυβο βάθους και στη σημασία του κατά τη διεξαγωγή μίας μέτρησης. Τέλος, περιγράφονται οι μέθοδοι μέτρησης του χρόνου αντήχησης σε έναν κλειστό χώρο και οι κατηγορίες τους.

### 3. Ανάλυση του Ήχου

Η ανάλυση του ήχου γίνεται με ειδικά μηχανήματα, τα όποια ονομάζονται αναλυτές φάσματος. Ο αναλυτής φάσματος κόβει το σήμα σε μικρά κομμάτια ή σε περιοχές χρονικού εύρους  $\Delta t$  (ζώνες) και στη συνέχεια τα αναλύει. Το αποτέλεσμα της ανάλυσης (φάσμα) παρουσιάζεται σε μια οθόνη με δύο άξονες, τον κάθετο, όπου συνήθως απεικονίζονται οι τιμές του πλάτους της έντασης (ή πίεσης, ή ισχύος, ή ενέργειας) και τον οριζόντιο, ο οποίος περιλαμβάνει τις τιμές των συχνοτήτων αναλυμένες σε κλίμακα 1/1οκτάβας ή 1/3 οκτάβας ή 1/N οκτάβας. Η κάθε ράβδος αντιστοιχεί σε μία ζώνη του φάσματος της οποίας το ύψος είναι ανάλογο της ηχητικής ενέργειας που περιέχεται σε αυτήν (Πασχαλίδου, 2006).

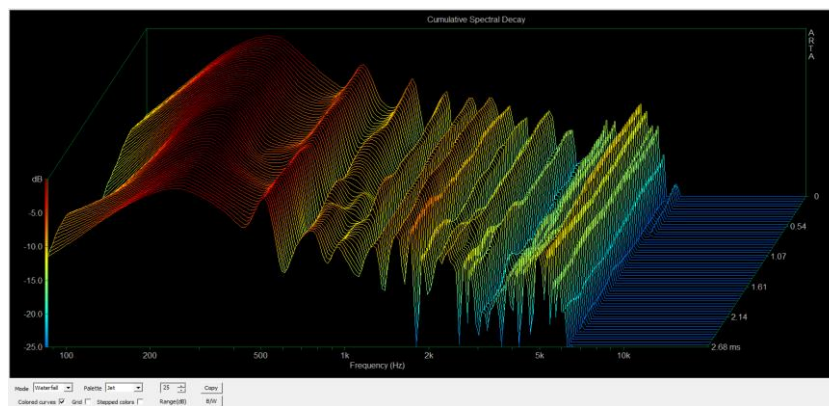


Εικόνα 5 - Απόκριση συχνοτήτων

Οι αναλυτές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, στους αναλογικούς και στους ψηφιακούς :

- I. Στους αναλογικούς, η ανάλυση του σήματος γίνεται με αναλογικά φίλτρα. Τα φίλτρα είναι ηλεκτρονικές συσκευές που αφήνουν να περάσει από μέσα τους μόνο ο ήχος, που οι συχνότητες του βρίσκονται εντός κάποιας ζώνης.
- II. Στους ψηφιακούς, το σήμα πρώτα μετατρέπεται σε ψηφιακό και στη συνέχεια αναλύεται με τη βοήθεια ψηφιακών αλγορίθμων.

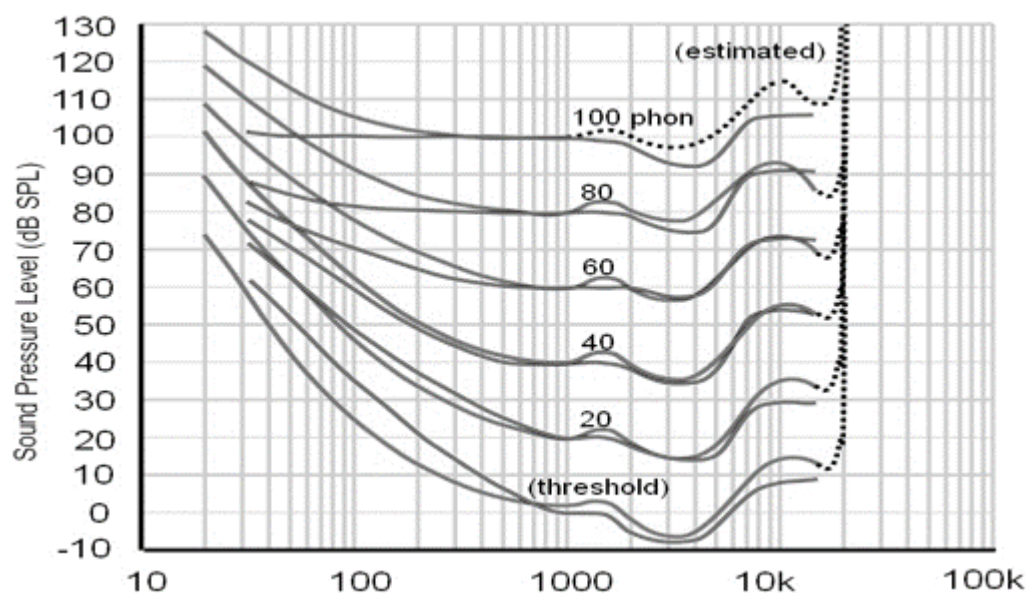
Για να μπορέσουμε να συσχετίσουμε τη συχνότητα με την ένταση και την χρονική διάρκεια, έχουμε το φασματογράφημα. Η συγκεκριμένη λειτουργία είναι μια τρισδιάστατη απεικόνιση της κατανομής των συχνοτήτων του αναλυμένου σήματος με τον χρόνο (Πασχαλίδου, 2006).



*Εικόνα 6 - Φασματογράφος, τρισδιάστατη απεικόνιση της κατανομής των συχνοτήτων*

### 3.1 Καμπύλες Ακουστότητας

Οι καμπύλες ίσης ακουστότητας Fletcher-Munson μας δίνουν τις συνθήκες που πρέπει να υπάρχουν μεταξύ συχνότητας και ηχητικής στάθμης για να αντιληφθεί ένα άτομο με φυσιολογική ακοή τις συχνότητες στην ίδια στάθμη (Ξενικάκης, 2013).



Εικόνα 7 - Καμπύλες ακουστότητας *Equal-loudness contours* (ISO 226:2003) Καμπύλες Fletcher-Munson

Το ανθρώπινο αυτί παρουσιάζει διαφορετική ευαισθησία στις διάφορες συχνότητες. Παρατηρούμε, δηλαδή, ότι το ανθρώπινο ακουστικό όργανο έχει μεγάλη ευαισθησία στα 3-4kHz που είναι εντός της συχνοτικής περιοχής ομιλίας. Σε αντίθεση με την προαναφερθείσα ένταση, το αυτί έχει λιγότερη ευαισθησία στις υψηλές συχνότητες και ελάχιστη στις χαμηλές. Συγκεκριμένα, για να ακουστεί ένας ήχος με σταθερή ηχητική ισχύ εξίσου δυνατά σε όλες τις συχνότητες, πρέπει να αυξήσουμε την ηχητική στάθμη στις χαμηλές συχνότητες, ενώ στις συχνότητες κοντά στα 4kHz που είναι η περιοχή μέγιστης ευαισθησίας του αυτιού απαιτείται η χαμηλότερη δυνατή στάθμη (Πασχαλίδου, 2006).

#### 3.1.2 Θόρυβος

Θόρυβος ονομάζεται κάθε απεριοδικός σύνθετος ήχος, που η στιγμιαία του τιμή αυξάνεται γενικά με στιγμιαίο τρόπο. Ο θόρυβος αυτός καθ' εαυτόν δημιουργείται από τη συμβολή πολλών ηχογόνων παραγόντων, που οφείλονται στις ηχητικές συνθήκες του χώρου. Επίσης, ο θόρυβος χρησιμοποιείται στις ακουστικές μελέτες ως εργαλείο κατά τη διαδικασία των μετρήσεων. Και διακρίνεται σε δύο είδη:

- I. Λευκός θόρυβος: περιέχει ένα μεγάλο φάσμα από τυχαίους θορύβους. Η ηχητική του ενέργεια είναι σταθερή σε όλο το φάσμα, δηλαδή όλες οι συχνότητες έχουν την ίδια στάθμη (Ευθυμιάτος, 2007).
- II. Ροζ θόρυβος: περιέχει ένα μεγάλο φάσμα από τυχαίους θορύβους. Σε αντίθεση με τον λευκό θόρυβο έχει περισσότερη ηχητική ενέργεια στις χαμηλές συχνότητες και μπορεί να προκύψει από τον λευκό με φιλτράρισμα. Επίσης έχει την ίδια ενέργεια ανά οκτάβα (Ευθυμιάτος, 2007).

### 3.1.3 Θόρυβος Βάθους

Θόρυβος βάθους ονομάζεται το επίπεδο της ηχητικής στάθμης των ανεπιθύμητων ήχων που υπάρχει στον χώρο χωρίς η πηγή να λειτουργεί και οφείλεται σε ενδογενείς και εξωγενείς παράγοντες. Εξωγενείς παράγοντες θεωρούνται αυτοί που προκαλούν θόρυβο έξω από τον κλειστό χώρο προς το εσωτερικό του, όπως για παράδειγμα αυτοκίνητα, αεροπλάνα, έντονα καιρικά φαινόμενα, έντονη δραστηριότητα ομάδας ανθρώπων. Ενδογενείς παράγοντες θεωρούνται αυτοί που παράγονται μέσα στον χώρο όπου βρίσκεται η πηγή, όπως ήχοι που προκαλούνται από ανθρώπους (ομιλία, βήματα) μηχανήματα σε λειτουργία (ηλεκτρονικοί υπολογιστές σταθεροί ή φορητοί, ηλεκτρικές σκούπες, ράδιο, τηλεόραση) (Ευθυμιάτος, 2007) .

Για να υπολογιστεί ο χρόνος αντήχησης μια αίθουσας, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης ποικίλων εργαλείων που σε συνδυασμό με τις κατάλληλες τεχνικές δίνουν ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα. Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 3382, όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> της παρούσας εργασίας, περιγράφεται αναλυτικά το πλαίσιο λειτουργίας των παραπάνω τεχνικών. Για να μπορεί να καταγραφεί επιτυχώς η παλμική απόκριση ενός χώρου και κατά συνέπεια ο χρόνος αντήχησης RT30, η πηγή διέγερσης θα πρέπει να είναι κατά το μέγιστο βαθμό παντοκατευθυντική. Σε θέση, δηλαδή, που να παράγει τέτοια ηχητική πίεση, η οποία να υπερβαίνει τουλάχιστον κατά 45 dB το θόρυβο βάθους στο σημείο της μέτρησης. Μια από τις πιο αξιόπιστες πηγές είναι το δωδεκαεδρικό ηχείο, το οποίο καλύπτει το πρότυπο ISO 3382. Μπορούν να αξιοποιηθούν και εναλλακτικές πηγές με μικρότερη αποτελεσματικότητα (Papadakis, Stavroulakis, 2020), (Rick de Voss et.al, 2020). Όσον αφορά το μέγεθος και το βάρος του συγκεκριμένου εργαλείου, σε συνδυασμό πάντα με τον απαιτούμενο ενισχυτή σήματος και το ενδεχόμενο χρήσης μπαταριών, θα πρέπει να ξεπερνά κατά πολύ τα 25kg. Ωστόσο, το εν λόγω εργαλείο δεν αποτελεί

οικονομικότερη λύση στον τόπο μέτρησης και γι' αυτό δεν χρησιμοποιείται συχνά σε μελέτες (Μωραΐτης, 2010).

Ολοκληρώνοντας, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι μέθοδοι μέτρησης του χρόνου αντήχησης σε έναν χώρο είναι τρεις: πρώτον, η μέθοδος του μηδενισμού της πηγής, δεύτερον, η μέθοδος παλμικής διέγερσης (impulse response) και τέλος η μέθοδος ακολουθίας μέγιστου μήκους (MLS-Maximum Length Sequence), για τις οποίες γίνεται εκτενής αναφορά στα ακόλουθα υποκεφάλαια (Σηφάκης & Κουτσοδιμάκης, 2012).

### **3.1.4 Μέθοδος Μηδενισμού της Πηγής**

Ένας χώρος μέσω μιας πηγής διεγείρεται με θόρυβο ροζ ή λευκό (pink noise or white noise) που μηδενίζεται ακαριαία. Ένα ηχόμετρο καταγράφει τη μείωση της στάθμης του ηχητικού πεδίου σε συνάρτηση με τον χρόνο μέχρι τον μηδενισμό του. Από την κλίση της καμπύλης που δημιουργείται από τη χρονική στιγμή του μηδενισμού της πηγής μέχρι την απόσβεση της ηχητικής έντασης, υπολογίζεται ο χρόνος αντήχησης (Σηφάκης & Κουτσοδιμάκης, 2012).

### **3.1.5 Μέθοδος Παλμικής Διέγερσης (Impulse Response)**

Ένας χώρος μέσω μιας πηγής διεγείρεται με παλμό (πχ. ακουστικό πιστόλι, μπαλόκι) που μηδενίζεται ακαριαία. Ένα ηχόμετρο καταγράφει τη μείωση της στάθμης του ηχητικού πεδίου σε συνάρτηση με τον χρόνο μέχρι τον μηδενισμό του. Από την κλίση της καμπύλης που δημιουργείται από την χρονική στιγμή του μηδενισμού της πηγής μέχρι την απόσβεση της ηχητικής έντασης υπολογίζεται ο χρόνος αντήχησης (Σηφάκης & Κουτσοδιμάκης, 2012).



### 3.1.6 Μέθοδος Ακολουθίας Μέγιστου Μήκους (MLS-Maximum Length Sequence)

Μια πηγή εκπέμπει μέσα σε έναν χώρο μια ψευδοτυχαία ακολουθία που έχει ομοιότητες με τον τυχαίο θόρυβο. Η ακολουθία έχει σταθερό μήκος  $l = 2^n - 1$  ( $n$  είναι ακέραιος αριθμός) και κάθε δείγμα της εκτός από το πρώτο το οποίο παίρνει πάντοτε την τιμή 1, αποτελείται από συναρτήσεις δέλτα. Δηλαδή παίρνει τιμή 0 ή 1. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι δεν επηρεάζεται εύκολα από εξωτερικούς θορύβους (θόρυβος βάθους), δηλαδή επιτυγχάνεται μεγάλος λόγος σήματος προς τον εξωτερικό θόρυβο (Σηφάκης & Κουτσοδιμάκης, 2012).

## Κεφαλαίο 4<sup>ο</sup>

### Πειραματική διαδικασία

#### Εισαγωγή 4<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> της εν λόγω εργασίας γίνεται αναφορά στην πειραματική διαδικασία.

Για τις ανάγκες εκπόνησης της συγκεκριμένης εργασίας πραγματοποιήθηκε μελέτη του κλειστού χώρου - δωματίου του Πειραματικού Γυμνασίου Ρεθύμνου. Αναλυτικότερα, σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται περιγραφή του χώρου αυτού, η οποία συμπεριλαμβάνει και τη τρισδιάστατη απεικόνισή του. Γίνεται, ακόμα, αναφορά της καταγραφής του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων, της επεξεργασίας των δεδομένων που συλλέχτηκαν από τις μετρήσεις και της απεικόνισής τους σε πίνακες.

#### 4. Περιγραφή Χώρου

Ο χώρος στον οποίον θα εγκατασταθεί ο ραδιοφωνικός σταθμός είναι μια μικρή αίθουσα του Πειραματικού Γυμνασίου Ρεθύμνου στην περιοχή Περιβόλια. Η αίθουσα βρίσκεται στο ισόγειο τμήμα του κτηρίου και η πρόσβαση σε αυτήν γίνεται μέσω του προαύλιου χώρου. Οι διαστάσεις του χώρου στον οποίο εκτελέστηκαν οι μετρήσεις είναι οι εξής : Μήκος X (4.12m) Πλάτος Y ( 4.00m) Ύψος Z (3.04m). Ο χώρος, επίσης, αποτελείται από μια ξύλινη πόρτα με τις εξής διαστάσεις: μήκος X<sub>π</sub> (0,98m), ύψος Z<sub>π</sub> (2,09m). Η συγκεκριμένη πόρτα είναι είσοδος και έξοδος. Όσον αφορά τη δόμηση της αίθουσας όπου πραγματοποιείται η εν λόγω μελέτη, υπάρχουν σοβατισμένοι λευκοί τοίχοι, πλαστικό γυαλιστερό πάτωμα και ένα παράθυρο ψηλά κατά μήκος του βορινού τοίχου, του οποίου οι διαστάσεις είναι: μήκος X<sub>παρ</sub> (3,90m), ύψος Z<sub>παρ</sub> (0,98m). Τέλος, στον τοίχο που υπάρχει δεξιά, όπως εισέρχεται κάποιος στον χώρο, υπάρχει ένα καλοριφέρ διαστάσεων X<sub>κ</sub> (0,83m), Z<sub>κ</sub>(0,58m).



*Εικόνα 8 - Φωτογραφίες χώρου από την πειραματική διαδικασία των μετρήσεων*



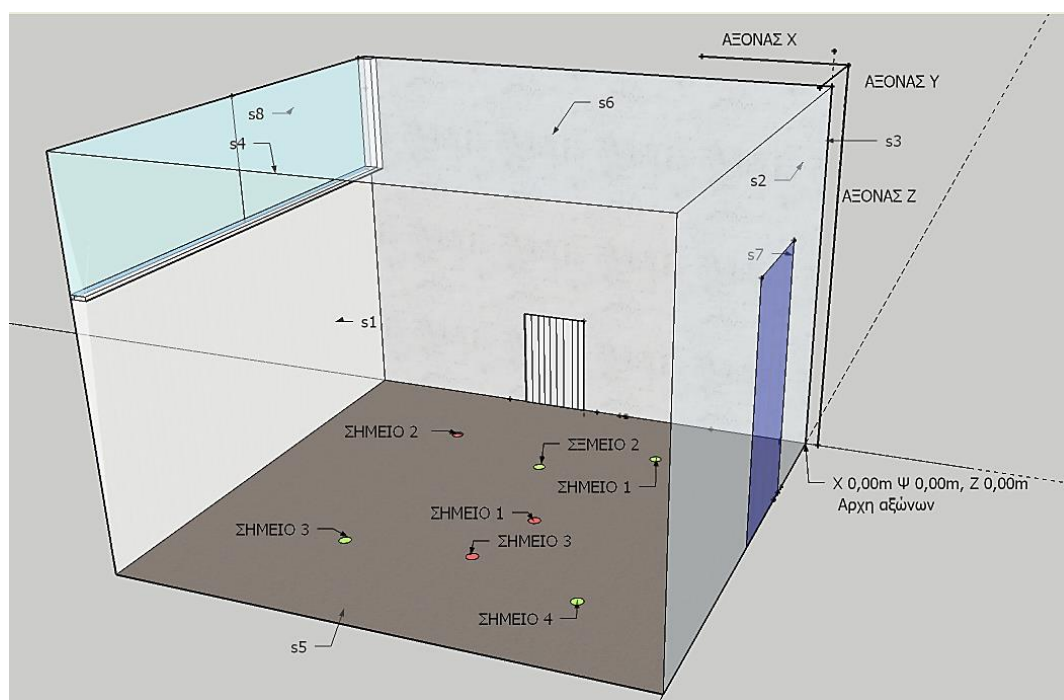
*Εικόνα 9 - Φωτογραφίες χώρου από την πειραματική διαδικασία των μετρήσεων*



*Εικόνα 10 - Φωτογραφίες χώρου από την πειραματική διαδικασία των μετρήσεων*

#### 4.1 Τρισδιάστατη Απεικόνιση του Χώρου- Δωματίου

Παρακάτω απεικονίζεται τρισδιάστατα ο χώρος-δωμάτιο που σχεδιάστηκε με το σχεδιαστικό πρόγραμμα Sketch Up. Το πρόγραμμα αυτό προσφέρεται δωρεάν στους χρήστες από την ομώνυμη εταιρία και δίνει τη δυνατότητα να σχεδιάσει κάποιος ένα καλό τρισδιάστατο μοντέλο χώρου εύκολα και γρήγορα και με μεγάλη λεπτομέρεια. Αυτό βοηθά στην καλύτερη κατανόηση του χώρου σχετικά με τις διαστάσεις του, τα δομικά υλικά που τον αποτελούν και την ιδιομορφία των επιφανειών του. Επίσης, επισημαίνονται οι επιφάνειες του χώρου συντεταγμένες όπως: η αρχή των αξόνων σημείο X,Y,Z. (0 ,0 ,0) m, οι άξονες X,Y,Z και τα σημεία μέτρησης. Έτσι, υπάρχει πλήρης εικόνα της πειραματικής διαδικασίας. Τέλος, ακολουθεί περιγραφή των επιφανειών του χώρου.



Εικόνα 11 - Απεικόνιση χώρου σε τρισδιάστατη απεικόνιση

Τα σημεία μέτρησης χωρίζονται σε δυο κατηγορίες: με πράσινο χρώμα είναι τα σημεία που τοποθετήθηκε το μικρόφωνο και με κόκκινο τα σημεία που τοποθετήθηκε το ηχείο.

Επιφάνεια s1: επιφάνεια τοίχου με παράθυρο βόρεια.

Επιφάνεια s2: επιφάνεια τοίχου ανατολικά με καλοριφέρ.

Επιφάνεια s3: επιφάνεια τοίχου με πόρτα ξύλινη νότια.

Επιφάνεια s4: επιφάνεια τοίχου δυτικά.

Επιφάνεια s5: επιφάνεια πατώματος με πλαστικό πλακάκι.

Επιφάνεια s6: επιφάνεια ταβανιού, όπου είναι τοποθετημένα τρία φώτα παράλληλα στον άξονα X. Τα συγκεκριμένα παράθυρα έχουν μήκος 1,16m (άξονας X) και 16cm πλάτος και η απόσταση μεταξύ τους είναι 1,40m. Τέλος, η απόσταση των φώτων από την πόρτα και κατά συνέπεια από την επιφάνεια s3 είναι 57cm και από την επιφάνεια s1 είναι 59 cm.

Επιφάνεια s7: πόρτα ξύλινη.

Επιφάνεια s8: παράθυρο

#### **4.1.2 Καταγραφή Εξοπλισμού**

Για την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε εξοπλισμός του Α.Τ.Ε.Ι. και παρουσιάζεται παρακάτω:

Ηλεκτρονικός υπολογιστής

Pc Toshiba (εικόνα 12)

Κάρτα ήχου

Audio interface Mackie blackjack onyx (εικόνα 13)

Μικρόφωνο παντοκατευθυντικού διαφράγματος, κατάλληλο για μετρήσεις

Mic Behringer ecm 8000 (εικόνα 14)

Ενισχυτής

Amplifier Behringer A500 (εικόνα 15)

Ηχείο δώδεκα εδρών (ΠΗΓΗ) κατάλληλο για ακουστικές μετρήσεις χωρών

Loudspeaker TEI (εικόνα 16)

Για να είναι αξιόπιστη η μέτρηση πρέπει η σημειακή πηγή του ήχου να εκπέμπει σε όλες τις κατευθύνσεις και για αυτόν το λόγο χρησιμοποιείται για πηγή ένα ηχείο με δώδεκα έδρες, το οποίο εκπέμπει σε όλες τις κατευθύνσεις σαν σφαίρα. Μπορούν να αξιοποιηθούν και άλλες πηγές (Papadakis, Stavroulakis, 2018), (Papadakis, Stavroulakis, 2019).

## Πρόγραμμα ακουστικής Arta (αναλυτής)

Το πρόγραμμα ακουστικής Arta χρησιμοποιείται για την ακουστική μέτρηση χώρων (αίθουσες, γήπεδα θέατρα, studio, κινηματογράφοι κτλ.). Πιο συγκεκριμένα, το εν λόγω πρόγραμμα χρησιμοποιείται από τους ειδικούς για την ανάλυση και την επεξεργασία των μετρήσεων που πραγματοποιούνται σε αυτούς τους χώρους. Αναλυτικότερα, το Arta είναι ένα πρόγραμμα μέτρησης της απόκρισης παλμών (impulse response), ανάλυσης φάσματος και μέτρηση της απόκρισης συχνότητας σε πραγματικό χρόνο. Είναι ένα εργαλείο, δηλαδή, για ακουστικές μετρήσεις που βοηθά τον χειριστή να κατανοήσει με μεγάλη λεπτομέρεια τη συμπεριφορά των ηχητικών κυμάτων σε έναν χώρο, ενώ παράλληλα παρέχεται η δυνατότητα τρισδιάστατης απεικόνισης τους σε σχέση με τον χρόνο. Το Arta περιλαμβάνει λειτουργίες των ακόλουθων συστημάτων μέτρησης όπως:

- i. Σύστημα μέτρησης απόκρισης παλμού με γεννήτριες σημάτων: περιοδικός λευκός θόρυβος, περιοδικός ροζ θόρυβος, MLS, SWEEP TONE (Antoniadou et al., 2018), γραμμική και λογαριθμική σάρωση-ημιτονοειδής.
- ii. Αναλυτής Fourier διπλού καναλιού με γεννήτριες σημάτων: λευκού θορύβου, ροζ θορύβου, περιοδικού λευκού θορύβου.
- iii. Αναλυτής Fourier ενός καναλιού με γεννήτριες σημάτων: περιοδικού λευκού θορύβου και περιοδικού ροζ θορύβου.
- iv. Φάσμα φάσματος, οκτάβας και αναλυτής THD με γεννήτριες σημάτων: ημιτονοειδής, λευκού θορύβου, ροζ θορύβου, περιοδικού λευκού θορύβου και περιοδικού ροζ θορύβου.
- v. Πλαίσιο αποθήκευσης με ενεργοποιημένη ανάλυση φάσματος και σύντομο χρονικό μετασχηματισμό Fourier.
- vi. Μετρητής στάθμης τάσης δύο καναλιών και αναλυτής τριτοκτάβας.



*Εικόνα 12 - Pc  
Toshiba*



*Εικόνα 13 - Κάρτα  
ήχου Mackie blackjack  
onyx*



*Εικόνα 14 -  
Ενισχυτής  
Behringer A500*



*Εικόνα 15-  
Μικρόφωνο Behringer  
ecm 8000*



*Εικόνα 16 - Δωδεκαεδρικό Ηχείο*

## **4.2 Πειραματική Διαδικασία**

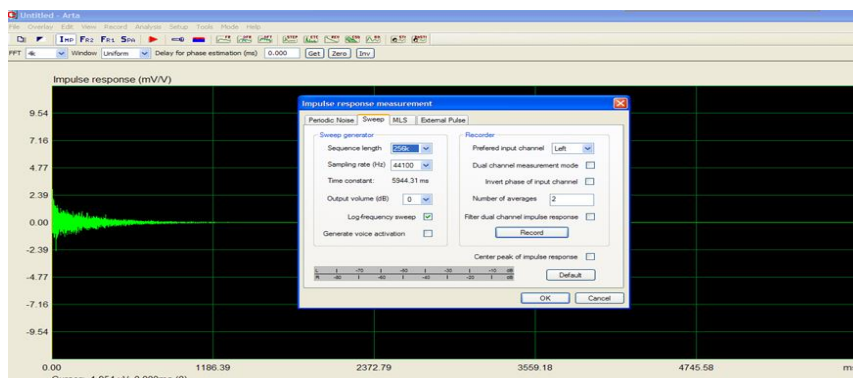
Κατά την πειραματική διαδικασία, η οποία πραγματοποιήθηκε για τη μελέτη του χώρου που έχει προαναφερθεί, μετρήθηκε ο θόρυβος βάθους στα 40 dB και εν συνεχεία έγιναν δώδεκα μετρήσεις συνολικά σύμφωνα με το ISO 3382-1 . Κατά την επεξεργασία για κάθε μέτρηση έγινε καταγραφή του χρόνου αντήχησης κάθε συχνότητας ξεχωριστά.

Στη συνέχεια, έγινε ο υπολογισμός του συνολικού χρόνου αντήχησης κάθε συχνότητας, ο οποίος προέκυψε από τον μέσο όρο των καταγεγραμμένων χρόνων αντήχησης. Καταγράψαμε, επίσης, τα δεδομένα αυτά σε τρεις πίνακες σύμφωνα με τις τρεις θέσεις της πηγής ήχου, οι οποίοι παρουσιάζονται παρακάτω.

Αρχικά, τοποθετήθηκε μια παντοκατευθυντική πηγή στον χώρο και στην προκειμένη περίπτωση το δωδεκαεδρικό ηχείο. Το ηχείο (πηγή) συνδέθηκε στην έξοδο του ενισχυτή, ενώ ταυτοχρόνως στην είσοδο του ενισχυτή ήταν συνδεδεμένη η έξοδος της κάρτας ήχου. Η κάρτα ήχου ήταν συνδεδεμένη με τον φορητό υπολογιστή που λειτούργησε το πρόγραμμα Arta. Έπειτα, τροφοδοτήθηκε το σύστημα με ρεύμα και στη συνέχεια μέσω του προγράμματος πραγματοποιήθηκε η ηχοβολία του δωματίου. Για τον ηχοβολισμό έγινε χρήση της μεθόδου μηδενισμού της πηγής. Αντί για ροζ ή λευκό θόρυβο χρησιμοποιήθηκε Exponential Sine Sweep tone. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ευκρίνεια κατά την εκπομπή των συχνοτήτων από το ηχείο, καθώς οι συχνότητες εκπέμπονται σε όλο το ακουστικό φάσμα από τα 0Hz - 20000Hz διαδοχικά με σταθερή ένταση.



Στη συνέχεια, με τη βοήθεια ενός μετρητικού παντοκατευθυντικού μικροφώνου, το οποίο ήταν τοποθετημένο στο δωμάτιο, ηχογραφήθηκε ο ήχος που εξέπεμψε η πηγή (δωδεκαεδρικό ηχείο) στο δωμάτιο και καταγράφηκε στο πρόγραμμα Arta.



*Εικόνα 17 - Μέτρηση κρουστικής απόκρισης με χρήση του προγράμματος Arta*

Σύμφωνα με την εικόνα 17, στο πρόγραμμα ρυθμίστηκε το μήκος της αλληλουχίας (Sequence length) αλλά και ο αριθμός των δειγμάτων (Sampling rate) σύμφωνα με τις αντίστοιχες προδιαγραφές της κάρτας ήχου. Παράλληλα, έγινε η κατάλληλη ρύθμιση του σήματος εκπομπής του ηχείου στην ίδια στάθμη με το σήμα εισόδου (αυτό που λαμβάνει το μικρόφωνο), προκειμένου να έχουμε μεγαλύτερη λεπτομέρεια στα δείγματα (Output volume).

Μέσα από αυτή τη διαδικασία θα μελετηθεί η ακουστική συμπεριφορά του δωματίου, ώστε να προταθούν τρόποι βελτίωσης της ακουστικής του για τη συγκεκριμένη χρήση. Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το ηχείο τοποθετήθηκε σε τρεις διαφορετικές τυχαίες θέσεις στο δωμάτιο.

Όσον αφορά τη μεθοδολογία των μετρήσεων, σε κάθε θέση πραγματοποιήθηκαν τέσσερις μετρήσεις με το μικρόφωνο σε διαφορετική θέση για κάθε μέτρηση. Πιο συγκεκριμένα, ανά μέτρηση άλλαζε το ύψος του μικροφώνου σε δυο σημεία με αποτέλεσμα να καταγράφεται η συμπεριφορά του ήχου σε πολλά διαφορετικά σημεία με μεγαλύτερη λεπτομέρεια. Σύμφωνα, δηλαδή, με τη μεθοδολογία που εφαρμόστηκε, ανοίγουν περισσότερα χρονικά παράθυρα (στιγμιότυπα), τα οποία διευκολύνουν τον ειδικό να έχει μεγαλύτερο εύρος δειγμάτων για την ανάλυση του ήχου. Απόρροια αυτού ήταν να επιτευχθούν καλύτερα και πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Ολοκληρώνοντας, τα σημεία που ορίστηκαν για τις θέσεις του ηχείου είναι τα ακόλουθα: σημείο1 X, Y (1.65m, 2.11m), σημείο2 X, Y (2m, 1.50m), σημείο 3 X, Y (1.70m, 2.82m). Και οι θέσεις του μικροφώνου είναι οι εξής: σημείο1 X,Y (1.14m, 0.81m), σημείο2 X, Y (2.94m, 1.31m), σημείο3 X, Y (2.80m, 3m), σημείο4 X, Y (0.87m, 3.21m). Τέλος, όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, τα δυο διαφορετικά ύψη του μικροφώνου που χρησιμοποιήθηκε για την καλύτερη λήψη του ήχου είναι: ύψος 1 (1.50 m) και ύψος 2 (1.76m). Ως αρχή των αξόνων, X, Y, Z (0m, 0m, 0m), επιλέχθηκε η δεξιά γωνία του δωματίου εισερχόμενοι από την πόρτα εισόδου, εξόδου (εικόνα 11) .

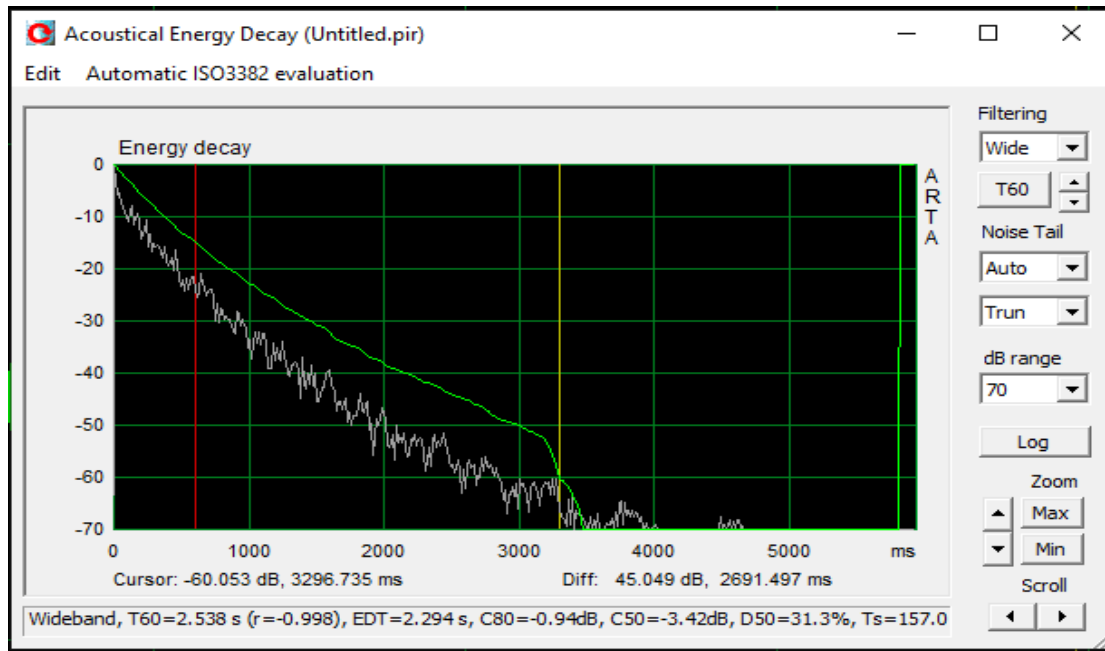
Πίνακας 2 - Θέσεις ηχείου και μικροφώνου

<u>Άξονας με το ύψος του ηχείου</u>	<u>Άξονας X</u>	<u>Άξονας Y</u>	<u>Θέσεις μικροφώνου</u>	<u>Άξονας X</u>	<u>Άξονας Y</u>	<u>Άξονας Z</u>
<u>Σημείο 1</u>	1,65 m	2,11 m	<u>Σημείο 1</u>	1,14 m	0,81 m	1,50 m
<u>Σημείο 2</u>	2,00 m	1,50 m	<u>Σημείο 2</u>	2,94 m	1,31 m	1,76 m
<u>Σημείο 3</u>	1,70 m	2,82 m	<u>Σημείο 3</u>	2,80 m	3,00 m	1,50 m
<u>Σημείο 4</u>	0,00 m	0,00 m	<u>Σημείο 4</u>	0,87 m	3,21 m	1,76 m

Ο πίνακας 2 περιλαμβάνει αναλυτικά τα σημεία τοποθέτησης της πηγής και του δέκτη (μικροφώνου) κατά την πειραματική διαδικασία. Αναλυτικότερα, στην πρώτη στήλη είναι τα σημεία τοποθέτησης της πηγής και στην δεύτερη και τρίτη στήλη οι συντεταγμένες κάθε σημείου σύμφωνα με την αρχή των αξόνων. Αντίστοιχα στην τέταρτη στήλη τα σημεία του δέκτη, στην πέμπτη, έκτη και εβδόμη οι συντεταγμένες τους. Μονάδα μέτρησης σε μετρά (m).

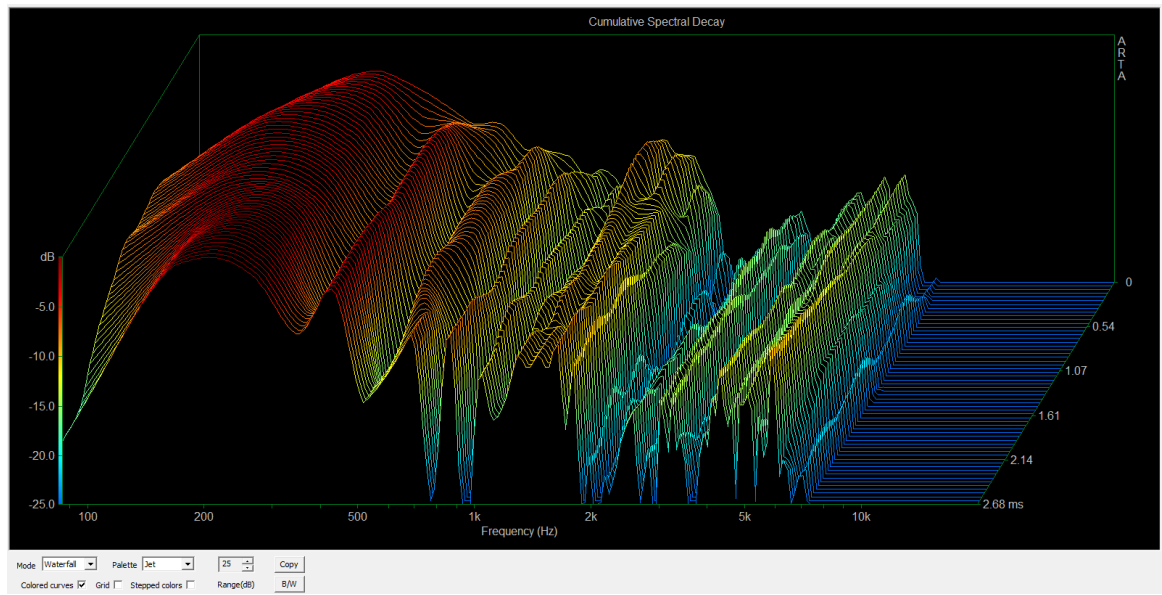
#### 4.2.1 Ανάλυση Δεδομένων

Ύστερα από την συλλογή και την καταγραφή δεδομένων της μέτρησης για την μελέτη του χώρου, πραγματοποιήθηκε η ανάλυση δεδομένων μέσω του προγράμματος Arta. Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο της εν λόγω εργασίας, το πρόγραμμα Arta χρησιμοποιείται αποκλειστικά για τις ακουστικές μετρήσεις σε κλειστούς χώρους και την επεξεργασία των δεδομένων αυτών.



*Εικόνα 18 - Μετρούμενος χρόνος αντήχησης του δωματίου*

Αναλυτικότερα, στην εικόνα 18 απεικονίζεται ο χρόνος αντήχησης του δωματίου κατά την δεύτερη μέτρηση από τις 12 που πραγματοποιήθηκαν. Επάνω δεξιά και με σειρά από επάνω προς τα κάτω είναι η παράμετρος «επιλογή συχνότητας για τον χρόνο αντήχησης». Έχουμε επιλέξει τη ρύθμιση wide, δηλαδή έναν γενικό χρόνο αντήχησης για όλες τις συχνότητες. Επίσης, στον χρόνο αντήχησης έχει επιλεγεί η ρύθμιση T60, όπου είναι ο χρόνος που απαιτείται μέχρι ή στάθμη του ήχου να μειωθεί κατά 60 dB μετά τον μηδενισμό της πηγής. Από κάτω είναι ο απόηχος του θορύβου «η ουρά». Έπειτα, αναγράφονται το κατώτατο όριο σε decibel και τέλος, τα εργαλεία μεγέθυνσης και σμίκρυνσης της κυματομορφής. Τέλος, σύμφωνα με την εικόνα 18, στον κάθετο άξονα είναι η ένταση του ήχου σε dB και στον οριζόντιο η διάρκεια σε millisecond. Όπως παρατηρείται και στην παραπάνω εικόνα ο χρόνος αντήχησης RT60 είναι 2,538s.



Εικόνα 19 - Τρισδιάστατη απεικόνιση της ηχητικής συμπεριφοράς του χώρου

Στην εικόνα 19 απεικονίζεται η συμπεριφορά του ήχου στον χώρο σε τρεις άξονες (τρισδιάστατη απεικόνιση). Στον κάθετο άξονα απεικονίζεται η ακουστική ένταση του ήχου σε decibel(dB), με ανάλυση  $\pm 5$ dB. Στον οριζόντιο άξονα είναι οι συχνότητες του ακουστικού φάσματος σε Hz ανάλυση  $1/1$  της οκτάβας με κεντρικές συχνότητες (100 200 500 1000 2000 5000 10000) Hz. Επιπροσθέτως, στον διαγώνιο άξονα απεικονίζεται ο χρόνος αντήχησης, ο οποίος μετριέται σε millisecond. Το κόκκινο χρώμα που υπάρχει στις κυματομορφές αντιστοιχεί στη μεγάλη ένταση των συχνοτήτων (peak), ενώ το μπλε αντιστοιχεί στη χαμηλή ένταση των συχνοτήτων. Όπως γίνεται ευδιάκριτο από τη τρισδιάστατη απεικόνιση της ηχητικής συμπεριφοράς του χώρου, στο δωμάτιο υπάρχει μεγάλη συσσώρευση ενέργειας στις μπάντες των χαμηλών και χαμηλομεσαίων συχνοτήτων από 100Hz έως 400 Hz.

#### 4.2.1 Επεξεργασία Δεδομένων του Χρόνου Αντήχησης.

Για την εκπόνηση της εν λόγω εργασίας και για την καλύτερη εξαγωγή συμπερασμάτων της πειραματικής μελέτης είναι απαραίτητη η επεξεργασία του χρόνου αντήχησης. Διότι με αυτόν τον τρόπο μπορεί να μελετηθεί με εκτενέστερη λεπτομέρεια η ακουστική συμπεριφορά του χώρου που μελετάται.

Δίνοντας έμφαση στους παρακάτω πίνακες γίνεται αντιληπτό ότι περιλαμβάνονται οι χρόνοι αντήχησης των κεντρικών συχνοτήτων σε οκταβική ανάλυση (1/1-οκτάβας) για κάθε μια από τις 4 μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα 3 τυχαία σημεία της πηγής. Κάθε πίνακας μετρήσεων αντιπροσωπεύει μία από τις τρεις θέσεις (σημεία) του ηχείου. Στην τελευταία γραμμή κάθε πίνακα περιλαμβάνεται ο χρόνος αντήχησης κάθε

συχνότητας, που προκύπτει από τον υπολογισμό του μέσου όρου των χρόνων αντήχησης κάθε μέτρησης. Σύμφωνα με τον τύπο 23 ο μέσος όρος προκύπτει από τη διαίρεση του αθροίσματος των χρόνων αντήχησης κάθε μέτρησης με τον αριθμό του συνόλου των μετρήσεων (πλήθος).

$$M = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n}{n} \quad (23)$$

Ο υπολογισμός του μέσου όρου βοηθά στο να υπάρχει μια συνολική εικόνα για τη συμπεριφορά του χώρο-δωματίου.

Πίνακας 3 - Μέτρηση σημείου

Συχνότητες Hz		125	250	500	1000	2000	4000
Μέτρηση 1	RT60 (s)	3,043	2,852	2,645	1,994	1,587	1,287
Μέτρηση 2	RT60 (s)	3,429	2,937	2,503	1,954	1,616	1,331
Μέτρηση 3	RT60 (s)	3,348	3,211	2,711	2,164	1,720	1,378
Μέτρηση 4	RT60 (s)	2,936	2,647	2,495	1,982	1,718	1,380
Μέσος όρος	RT60 (s)	3,189	2,911	2,588	2,023	1,667	1,344

Στον πίνακα 3 περιλαμβάνονται οι χρόνοι αντήχησης για κάθε μέτρηση στο σημείο 1 X, Y (1.65m, 2.11m), σε ανάλυση οκτάβας. Τα δεδομένα είναι τα αποτελέσματα του προγράμματος που χρησιμοποιήσαμε για τις μετρήσεις. Μονάδα μέτρησης των χρόνων αντήχησης είναι σε second.

Πίνακας 4 - Μέτρηση σημείου 2

Συχνότητες Hz		125	250	500	1000	2000	4000
Μέτρηση 1	RT60 (s)	3.891	2.949	2.733	2.026	1.648	1.363
Μέτρηση 2	RT60 (s)	3.808	2.916	2.292	2.144	1.594	1.354
Μέτρηση 3	RT60 (s)	3.014	2.848	2.469	2.011	1.655	1.351
Μέτρηση 4	RT60 (s)	3.031	3.061	2.593	2.037	1.644	1.321
Μέσος όρος	RT60 (s)	3.436	2.943	2.521	2.054	1.635	1.347

Στον παραπάνω πίνακα 4 περιλαμβάνονται οι χρόνοι αντήχησης για κάθε μέτρηση στο σημείο 2 X, Y(2.00m 1.50m),σε ανάλυση οκτάβας. Τα δεδομένα είναι τα αποτελέσματα του προγράμματος που χρησιμοποιήσαμε για τις μετρήσεις . Μονάδα μέτρησης των χρονών αντήχησης είναι σε second (s).

Πίνακας 5 - Μέτρηση σημείου 3

Συχνότητες Hz		125	250	500	1000	2000	4000
Μέτρηση 1	RT60 (s)	3,456	2,972	2,540	2,035	1,593	1,361
Μέτρηση 2	RT60 (s)	3,767	2,779	2,544	2,188	1,625	1,345
Μέτρηση 3	RT60 (s)	3,496	2,632	2,637	2,048	1,604	1,326
Μέτρηση 4	RT60 (s)	3,712	3,266	3,129	2,094	1,698	1,368
Μέσος όρος	RT60 (s)	3,607	2,912	2,712	2,091	1,630	1,350

Στον παραπάνω πίνακα 5 περιλαμβάνονται οι χρόνοι αντήχησης για κάθε μέτρηση στο σημείο 3 X, Y(1.70m, 2.82m),σε ανάλυση οκτάβας. Τα δεδομένα είναι τα αποτελέσματα του προγράμματος που χρησιμοποιήσαμε για τις μετρήσεις. Μονάδα μέτρησης σε second (s).

#### 4.2.2 Χρόνος Αντήχησης Μετρήσεων

Στον πίνακα 6 απεικονίζονται οι μέσοι χρόνοι αντήχησης που προκύπτουν από τις μετρήσεις για κάθε συχνότητα ξεχωριστά. Οι συγκεκριμένοι χρόνοι αντήχησης προκύπτουν από τον μέσο όρο των συνολικών χρόνων αντήχησης που αναφέρονται στους τρεις πίνακες προηγούμενος. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι χρόνοι αντήχησης για κάθε συχνότητα ξεχωριστά, με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων τους. Αντιπαρατίθενται δηλαδή, τα αποτελέσματα του θεωρητικού υπολογισμού με αυτά των μετρήσεων ώστε να ελεγχθεί η ακρίβεια των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν.

Πίνακας 6 - Χρόνοι αντήχησης

Συχνότητες Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Μέτρηση RT60 (s)	3,410	2,922	2,607	2,056	1,644	1,343

## Κεφαλαίο 5<sup>ο</sup>

### Ακουστικές προτάσεις

#### Εισαγωγή 5<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

Στο τελευταίο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στον θεωρητικό υπολογισμό και στη σύγκριση των δεδομένων του θεωρητικού υπολογισμού με τα δεδομένα των μετρήσεων.

Ύστερα, ακολουθούν οι παρατηρήσεις από τη σύγκριση των δεδομένων που προέκυψαν από τον θεωρητικό υπολογισμό σε αντιδιαστολή με τα δεδομένα της πειραματικής διαδικασίας. Ακολουθώς, δίνονται προτάσεις τρόπων βελτίωσης του χώρου που μελετήθηκε για τις ανάγκες αυτής της εργασίας.

Ολοκληρώνοντας το οικείο κεφάλαιο, με τη βοήθεια της συχνότητας αποκοπής και του βέλτιστου χρόνου αντήχησης παρουσιάζονται τα υλικά που προτείνονται για τη βελτίωση του χρόνου αντήχησης στον κλειστό χώρο –δωμάτιο, μια γραφική παράσταση με τον χρόνο αντήχησης του χώρου πριν την εγκατάσταση και μετά την εγκατάσταση των υλικών.

Τέλος, γίνεται αναφορά στον τρόπο εγκατάστασης των προτεινόμενων υλικών. Επίσης, για την ολοκληρωμένη εικόνα της μελέτης που πραγματοποιήθηκε δίνονται δυο τρισδιάστατες εικόνες στις οποίες απεικονίζεται η μελλοντική μορφή του κλειστού χώρου-δωματίου με τα υλικά ακουστικής διαμόρφωσης εγκατεστημένα.

#### 5.1 Θεωρητικός Υπολογισμός Χρόνου Αντήχησης

Για τις ανάγκες της πειραματικής μελέτης που πραγματοποιήθηκε, ο χρόνος αντήχησης υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας τον τύπο Sabine (17) :

$$RT60 = \frac{0.161 * V}{A} \quad (24)$$

Για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης σύμφωνα με τον τύπο χρειάστηκε να υπολογιστούν δυο παράμετροι: όγκος και η απορρόφηση του δωματίου. Υπολογισμός του όγκου σύμφωνα με τον μαθηματικό τύπο (18) είναι:

$$V = x * y * z \quad (25)$$

Οπού  $x$ = μήκος ,  $y$ = πλάτος και  $z$ = ύψος



Η απορρόφηση του δωματίου από τον τύπο (19) υπολογίζεται:

$$.As = Sa\bar{=} = a1s1 + a2s2 + \dots + ansn \quad (26)$$

$n= 1,2,3,4,\dots$

Επιπροσθέτως, σύμφωνα με το τρισδιάστατο διάγραμμα (εικόνα 11), όλες οι επιφάνειες του χώρου έχουν σχήμα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο. Οπότε για τον υπολογισμό της κάθε επιφάνειας ( $s$ ) χρειάζεται να υπολογίσουμε το εμβαδόν της. Από τη γεωμετρία ο τύπος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του εμβαδού ορθογώνιου παραλληλογράμμου είναι:

$$E= \alpha * \beta \quad (27)$$

Τέλος, οι τιμές των συντελεστών απορρόφησης των υλικών που χρειαζόμαστε για τον υπολογισμό της απορρόφησης δωματίου, απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα. Τα υλικά από τα οποία απαρτίζεται ο χώρος είναι το πάτωμα (πλακάκια πλαστικά), οι τοίχοι (σοβάς), η ξύλινη πόρτα και το παράθυρο.

### 5.1.2 Συντελεστής Απορρόφησης Υλικών Δωματίου

Πίνακας 7 – Συντελεστές υλικών

Συχνότητες Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Πλακάκια πλαστικά m <sup>2</sup>	0,01	0,01	0,01	0,11	0,05	0,05
Σοβάς m <sup>2</sup>	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,04
Παράθυρο γυαλιού 0,68kg/ m <sup>2</sup> m <sup>2</sup>	0,10	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03
Πόρτα ξύλινη m <sup>2</sup>	0,15	0,10	0,06	0,08	0,10	0,05

Ο πίνακας 7 περιλαμβάνει τα υλικά που απαρτίζουν τον χώρο και τους συντελεστές απορρόφησης τους για κάθε συχνότητα και η μονάδα μέτρησης είναι σε sabine (Σκαρλάτος, 2008).

### 5.1.3 Σύγκριση Χρόνου Αντήχησης Συχνοτήτων Μετρήσεων και Θεωρητικού Υπολογισμού

Πίνακας 8 – Σύγκριση χρόνου αντήχησης

Συχνότητες Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Μέτρηση RT60 (s)	3,410	2,922	2,607	2,056	1,644	1,343
ΘΕ/ΟΣ ΥΠ. RT60 (s)	3,106	2,710	2,428	2,890	1,500	1,120

Ο Πίνακας 8 αναφέρεται στους χρόνους αντήχησης μετρήσεων και θεωρητικού υπολογισμού και μονάδα μέτρησης των τιμών που είναι σε second (s). Αναλυτικότερα, ο πίνακας 8 περιλαμβάνει στην πρώτη γραμμή τους χρόνους αντήχησης των μετρήσεων που κάναμε και στη δεύτερη γραμμή του χρόνους αντήχησης του θεωρητικού υπολογισμού.

### 5.1.4 Παρατηρήσεις

Συγκρίνοντας τις τιμές που περιγράφονται στον πίνακα 8 παρατηρούμε ότι:

- I. Ο χρόνος αντήχησης και στις δυο περιπτώσεις είναι μεγάλος στη χαμηλή περιοχή συχνοτήτων και ανεβαίνοντας συχνοτικά, μειώνεται. Αυτό οφείλεται στο ότι το δωμάτιο αποτελείται από παράλληλες ανακλαστικές επιφάνειες που ενδέχεται να προκαλούν συντονισμούς σε χαμηλές συχνότητες (εικόνα 19). Επίσης, όσο αυξάνεται η συχνότητα, μειώνεται το μήκος κύματος της, με αποτέλεσμα η απορρόφηση από τα δομικά υλικά του δωματίου, να είναι μεγαλύτερη στην υψηλή συχνοτική περιοχή, όπως αποδεικνύεται στον παραπάνω πίνακα 8.
- II. Συγκρίνοντας, επίσης, τις τιμές μεταξύ τους παρατηρείται ότι οι χρόνοι αντήχησης των συχνοτήτων που προέκυψαν από τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων διαφέρουν σε μικρό ποσοστό από τις αντίστοιχες τιμές των χρόνων αντήχησης που υπολογίσαμε. Η διαφορά αυτή κυμαίνεται μεταξύ 0,2 s έως 0,3 s. Πράγμα αναμενόμενο, γιατί κατά την διαδικασία των

μετρήσεων, αλλάζοντας το σημείο εκπομπής της πηγής στον χώρο, καταγράψαμε διαφορετικούς χρόνους αντήχησης, λόγω στάσιμων κυμάτων και ιδιομορφίας του χώρου. Επίσης, οι θεωρητικές τιμές των χρόνων αντήχησης ανταποκρίνονται σε ιδανικές συνθήκες πειράματος με θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C. Την ημέρα που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, η εξωτερική θερμοκρασία ήταν 25°C και η εσωτερική θερμοκρασία του χώρου βρισκόταν στους 23°C.

### 5.1.5 Συχνότητα Αποκοπής

Σύμφωνα με τον τύπο (11) η συχνότητα αποκοπής για το δωμάτιο είναι  $f_c = 452$  Hz. Αυτό σημαίνει ότι από τα 452 Hz και κάτω, κυριαρχούν τα κυματικά φαινόμενα, τα οποία με τη σειρά τους δημιουργούν φαινόμενα συντονισμού και ο χώρος θεωρείται ακουστικά μικρός. Ενώ από τη συχνότητα αποκοπής  $f_c$  και πάνω ο χώρος θεωρείται ακουστικά μεγάλος.

$$f_c = k * \sqrt{\frac{RT60}{V}} \quad (28)$$

### 5.2 Τρόποι Βελτίωσης

Στον χώρο θα στηθεί ένας μικρός ραδιοφωνικός σταθμός. Συνεπώς η αντήχηση δεν είναι επιθυμητή για δύο λόγους: πρώτον, η αντήχηση στο δωμάτιο εμφανίζεται λόγω ανακλάσεων που προκαλούνται από τις παράλληλες επιφάνειες του δωματίου. Εάν οι ανακλάσεις αυτές γίνουν διακριτές από τον ακροατή αμέσως μετά τον εκπεμπόμενο ήχο (ανθρώπινη φωνή, μουσική), αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να έχουν χρονική καθυστέρηση πάνω από 10ms σε σχέση με αυτόν. Τότε θα εμφανιστεί το φαινόμενο της ηχούς, κάτι το οποίο αποτελεί δυσμενή συνθήκη για τη βέλτιστη ακουστική του χώρου.

Δεύτερον, λόγω των παράλληλων ανακλαστικών επιφανειών οι παλμικοί ήχοι μικρής διάρκειας (παλαμάκι) προκαλούν ηχώ που επαναλαμβάνεται (φαινόμενο πολλαπλής ηχούς). Εάν κατά τη διάρκεια μίας ραδιοφωνικής εκπομπής προκληθεί ηχώ από το δωμάτιο, η φωνή του ομιλητή δεν θα είναι ευδιάκριτη και καθαρή. Σε περίπτωση μετάδοσης ζωντανής μουσικής, πάλι η ηχώ του δωματίου θα αλλάξει τη φυσική χροιά των μουσικών οργάνων.

Επομένως, συμπεραίνεται ότι η μεθοδολογία τα παρούσας μελέτης πρέπει να εστιάζει στη μείωση του χρόνου αντήχησης του δωματίου. Επίσης, με τη βοήθεια της  $f_c$  παρατηρείται ότι από τα 450Hz και κάτω, ο χώρος (δωμάτιο) θεωρείται ακουστικά

μικρός. Συνεπώς, τα κυματικά φαινόμενα θα είναι εντονότερα, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλη συσσώρευση ενέργειας στη χαμηλή συχνотική περιοχή. Όπως φαίνεται στην εικόνα 19, υπάρχει μεγάλη συσσώρευση ενέργειας από τα 100Hz έως 400 Hz με κορύφωση στα 125-200Hz περίπου. Το γεγονός αυτό καταστρέφει την ηχητική ισορροπία των συχνοτήτων (ισοστάθμιση) στο δωμάτιο και αλλοιώνει οποιονδήποτε εκπεμπόμενο ήχο.

Συνοψίζοντας, ο στόχος της εν λόγω πτυχιακής εργασίας είναι ο χρόνος αντήχησης του δωματίου να ισούται με τον βέλτιστο χρόνο αντήχησης που προτείνεται για τη συγκεκριμένη χρήση. Αυτό επιτυγχάνεται κάνοντας χρήση του μαθηματικού τύπου 21 για τον βέλτιστο χρόνο αντήχησης. Στη συνέχεια, για την ολοκλήρωση της βέλτιστης μορφοποίησης του δωματίου που μελετάται, κρίνεται αναγκαία η τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών υλικών σε αυτό, ώστε να επιτευχθεί ο στόχος και ο εκπεμπόμενος ήχος να διακυμαίνεται ομοιόμορφα και ισορροπημένα σε οποιοδήποτε σημείο του δωματίου.

### 5.2.1 Μαθηματικός Υπολογισμός Βέλτιστου Χρόνου Αντήχησης και Βέλτιστης Απορρόφησης Δωματίου.

Σύμφωνα με τον τύπο (22):

$$RT_{60} = r(0.012\sqrt[3]{V} + 0.107) \quad (29)$$

Όπου ο όγκος  $V$ , κάνοντας χρήση του τύπου (18), είναι  $V = 50,0992 \text{ m}^3$

Σε έναν ραδιοφωνικό σταθμό η κυρία πηγή ήχου είναι η ανθρώπινη φωνή. Συνεπώς, ο βέλτιστος χρόνος αντήχησης του δωματίου πρέπει να είναι ιδανικός για μετάδοση λόγου. Σε αυτήν την περίπτωση η μεταβλητή  $r = 4$ :

$$RT_{60} = 4(0.012\sqrt[3]{50,0992} + 0.107) = 0,60s \quad (30)$$

Σύμφωνα με τον τύπο (22) για κεντρική συχνότητα 500Hz ο βέλτιστος χρόνος αντήχησης στο δωμάτιο πρέπει να είναι  $RT_{60\text{βέλτιστο}} = 0,60s$ . Ο χρόνος αντήχησης το δωματίου είναι  $RT_{60} = 2,60s$ . Άρα πρέπει να μειώσουμε τον χρόνο αντήχησης κατά 2 s.

Για να γίνει αυτό πρέπει να αυξηθεί η απορρόφηση από το δωμάτιο τοποθετώντας στις επιφάνειές του, ηχοαπορροφητικά υλικά. Οπότε από τον τύπο (17) μπορούμε να βρούμε την απορρόφηση του δωματίου λύνοντας τον τύπο προς  $A$  :

Χρόνος αντήχησης (τύπος 17):  $RT_{60} = 0.161 \frac{V}{A} \Rightarrow A = 0.161 \frac{V}{RT_{60}}$

Αντικαθιστώντας τις τιμές βρήκαμε ότι: η απορρόφηση από το δωμάτιο είναι:

$$A = 0,161 \frac{V}{RT_{60}} = 3,1 \text{ m}^2. \quad (31)$$

Επομένως η απορρόφηση από το δωμάτιο είναι  $A = 3,81 \text{ sabine}$

Στην συνέχεια θα λύσουμε τον τύπο (30) με παρονομαστή το  $RT_{60}$  βέλτιστο, για να βρούμε την απορρόφηση που πρέπει να έχει το δωμάτιο, ώστε ο χρόνος αντήχησης να είναι ο βέλτιστος ( $RT_{60}$  βέλτιστο = 0,60s):

$$A_{\text{βέλτιστο}} = 0,161 \frac{V}{RT_{60} \text{ βέλτιστο}} = 13,44 \text{ m}^2. \quad (32)$$

Η απορρόφηση από το δωμάτιο  $A_{\text{βέλτιστο}}$  είναι 13,44 sabine

Καταλήγουμε στο συμπέρασμα, λοιπόν, ότι η απορρόφηση του δωματίου πρέπει να αυξηθεί κατά 9,63 sabine.

Ο επιθυμητός χρόνος αντήχησης είναι  $RT_{60}$  βέλτιστο = 0,60s και η απορρόφηση είναι  $A_{\text{βέλτιστο}} = S\bar{\alpha} = 13,44 \text{ sabine}$ . Ο χρόνος αντήχησης  $RT_{60}$  για τη συχνότητα των 500 Hz (πίνακας 5) είναι 2,607 s. Χρησιμοποιώντας τον τύπο (32) βρήκαμε την απορρόφηση του δωματίου για τη συγκεκριμένη συχνότητα.

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, στόχος της μελέτης αυτής είναι, με τον κατάλληλο συνδυασμό υλικών, ο χρόνος αντήχησης  $RT_{60}$  να ισούται με 0,6 s

Επειδή οι επιφάνειες του δωματίου δεν είναι όλες ίδιες, για να δημιουργηθεί η επιθυμητή απορρόφηση  $A_{\text{βέλτιστο}}$  προτείνεται ένας συνδυασμός διαφορετικών υλικών απορρόφησης. Η σκέψη αυτή στηρίχθηκε στο γεγονός ότι τα ηχοαπορροφητικά υλικά δεν θα εφαρμόζουν σε όλες τις επιφάνειες με τον ίδιο τρόπο. Συνεπώς, κάνοντας χρήση διαφορετικών υλικών υπάρχει η δυνατότητα να καλυφθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια οι ανάγκες κάθε επιφάνειας ξεχωριστά. Στο επόμενο υποκεφάλαιο ακολουθούνε τρεις διαφορετικές προτάσεις σύμφωνα με τις ανάγκες του χώρου και το κόστος της κάθε μίας.

## 5.2.2 Προτάσεις Ακουστικής Διαμόρφωσης

### 5.2.2.1. Πρόταση I

Υστέρα από ενδελεχή έρευνα στο διαδίκτυο και σε ανασκόπηση εγκεκριμένης βιβλιογραφίας, τίθεται ως πρόταση ένας συνδυασμός από ένα τύπο

ηχοαπορροφητικού υλικού (Studio foam metro 2 της εταιρίας Auralex) και υλικά διακόσμησης εσωτερικού χώρου, όπως μοκέτα, χαλί και κουρτίνα.

Στις επιφάνειες s5 και s8 εφαρμόζονται συγκεκριμένα υλικά απορρόφησης για τον λόγο ότι η επιφάνεια s5 είναι το πάτωμα του δωματίου και η επιφάνεια s8 είναι το παράθυρο, με αποτέλεσμα αυτό να περιορίζει τις επιλογές υλικών διαμόρφωσης του χώρου. Επομένως, προτεραιότητα έχει η απορρόφηση του ήχου σε αυτές τις δύο επιφάνειες και έπειτα, σύμφωνα με τις διεργασίες που θα πραγματοποιηθούν σε αυτές τις επιφάνειες, θα καθοριστούν οι διεργασίες που θα πραγματοποιηθούν και στις υπόλοιπες επιφάνειες του χώρου μελέτης.

Αναλυτικότερα, η επιφάνεια s5 (πάτωμα) αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες επιφάνειες του δωματίου με εμβαδόν  $16,48 \text{ m}^2$ . Πιο συγκεκριμένα, το πάτωμα είναι η επιφάνεια με τη μεγαλύτερη φθορά, γιατί πάνω σε αυτό κινούνται άνθρωποι και στηρίζονται διάφορα αντικείμενα. Χρειάζεται, λοιπόν, ένα υλικό το οποίο να ανταπεξέρχεται σε αυτές στις συνθήκες και επομένως να καλύπτει ολόκληρη την επιφάνεια s5, χωρίς να αλλάξουν τα χαρακτηριστικά του. Τα υλικά που πληρούν αυτές τις προδιαγραφές είναι το χαλί ή η μοκέτα.

Η μοκέτα με πάχος 8mm είναι ένα υλικό που από τη μία καλύπτει μεν τις ανάγκες αυτές λειτουργεί δε ως ηχοαπορροφητικό. Πιο αναλυτικά, οι συντελεστές απορρόφησης της μοκέτας είναι 125 Hz  $\alpha = 0,04$  και για 250 Hz  $\alpha = 0,12$  (χαμηλή περιοχή συχνοτήτων). Επιπλέον, η μοκέτα στη μεσαία περιοχή έχει συντελεστές απορρόφησης όπου  $\alpha = 0,26$  για τα 500 Hz και  $\alpha = 0,50$  για 1000 Hz. Στην υψηλή περιοχή συχνοτήτων οι συντελεστές απορρόφησης είναι μικροί, δηλαδή για 2000 Hz  $\alpha = 0,28$  και  $\alpha = 0,29$  για 4000 Hz (πίνακας 9).

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι προτείνεται το υλικό αυτό γιατί έχει τη μεγαλύτερη απορρόφηση στη χαμηλή περιοχή συχνοτήτων σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά. Οι επιλογές που υπήρχαν ήταν μεταξύ 3 υλικών: χαλί βαρύ, μοκέτα πάχους 5mm και μοκέτα πάχους 8mm. Συνεπώς, η επιλογή του υλικού έγινε με βάση την μεγάλη απορρόφηση που είχε σε σχέση με τα άλλα δυο υλικά στη χαμηλή και μεσαία περιοχή συχνοτήτων.

Η επιφάνεια S8 είναι το παράθυρο με εμβαδόν  $3,822 \text{ m}^2$ . Η επιφάνεια αυτή αποτελεί τμήμα της επιφάνειας S1 και είναι το μοναδικό τμήμα του δωματίου στο οποίο υπάρχει παράθυρο. Επειδή δεν γίνεται να στηριχτεί άλλου τύπου υλικό σε αυτό το σημείο, θα τοποθετηθεί σε αυτό κουρτίνα, η οποία θα καλύπτει ακριβώς τις διαστάσεις του παραθύρου. Η συγκεκριμένη ενέργεια πραγματοποιείται επειδή στο υπόλοιπο τμήμα της επιφάνειας s1 και στις υπόλοιπες επιφάνειες θα τοποθετηθεί

άλλου τύπου υλικό. Με την εγκατάσταση της κουρτίνας αποφεύγονται οι τυχόν ανακλάσεις που προκαλούνται από την επιφάνεια του τζαμιού s8. Η κουρτίνα είναι συνθετική, της οποίας οι προδιαγραφές και οι συντελεστές απορρόφησης απεικονίζονται στον πίνακα 9.

Πίνακας 9 – Υλικά απορρόφησης

Υλικά	125 HZ	250 HZ	500 HZ	1000 HZ	2000 HZ	4000 HZ
Μοκέτα 5mm	0,04	0,04	0,15	0,30	0,50	0,60
Μοκέτα 8mm	0,04	0,12	0,26	0,50	0,28	0,29
Χαλί βαρύ	0,02	0,06	0,14	0,37	0,60	0,65
Κουρτίνα συνθετική 0,2kg/m <sup>2</sup> με πτυχές(3:1) σε 20 mm απόσταση	0,00	0,13	0,51	0,66	0,59	0,30

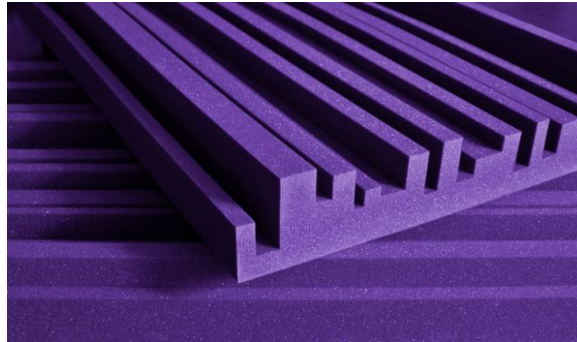
Ο πίνακας 9 περιλαμβάνει τα υλικά που μπορούν να τοποθετηθούν στον χώρο που μελετάται για τη διαμόρφωση της ακουστικής του, καθώς και τους συντελεστές απορρόφησης τους για κάθε συχνότητα. Η μονάδα μέτρησης είναι σε sabine (Σκαρλάτος, 2008).

$$A' = s5\bar{a}_\mu + s8\bar{a}_\kappa + \bar{a}S \quad (33)$$

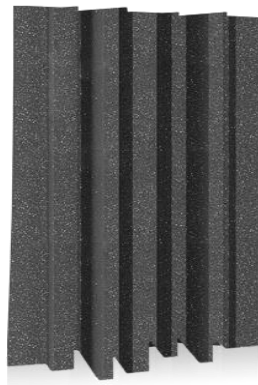
Στον παραπάνω τύπο,  $\bar{a}S$  είναι απορρόφηση του δωματίου. Οι όροι  $\bar{a}_\mu$  και  $\bar{a}_\kappa$  είναι οι μέσοι συντελεστές απορρόφησης των ηχοαπορροφητικών υλικών (μοκέτα, κουρτίνα) για τα 500 Hz. Επίσης, η μεταβλητή S είναι οι διαστάσεις κάθε επιφάνειας. Επομένως, η απορρόφηση του δωματίου μετά την εγκατάσταση των υλικών απορρόφησης (μοκέτα και χαλί) ισούται  $A' = 7,1737$  sabine.

Στη συνέχεια, στις επιφάνειες s2,s3,s4 και s1' (s1'=s1-s8) μπορεί να τοποθετηθεί το υλικό Studio foam metro 2 . Το ηχοαπορροφητικό υλικό Studio foam metro 2'' κατασκευάζεται από την εταιρία Auralex. Το νούμερο 2 αναφέρεται στο

πάχος του υλικού και μετριέται σε ίντσες. Οι διαστάσεις του στο S.I είναι: metro 2  
1,121 m\*0,60 m\*0,05 m (Z,Y,X), Z =ύψος, Y =πλάτος, X= πάχος .



*Εικόνα 20 - Ηχοαπορροφητικό Studio foam metro 2 της εταιρίας  
Auralex*



*Εικόνα 21 - Ηχοαπορροφητικό Studio foam metro 2 της εταιρίας  
Auralex*



Πίνακας 10-Συντελεστής απορρόφησης υλικού Metro 2

Συχνότητα Hz	Συντελεστής απορρόφησης m <sup>2</sup>
125	0,13
250	0,23
500	0,68
1000	0,93
2000	0,91
4000	0,89

Ο πίνακας 10 περιλαμβάνει τους συντελεστές απορρόφησης σε ανάλυση 1/1 της οκτάβας του υλικού metro2, το οποίο επιλέχθηκε μεταξύ των δυο υλικών ώστε να τοποθετηθεί στο δωμάτιο.

Η απορρόφηση του δωματίου με όλα τα ηχοαπορροφητικά υλικά τοποθετημένα θα είναι :

$$A_{\beta\epsilon\lambda\tau\iota\sigma\tau\omicron} = A' + (\bar{\alpha}_{\alpha\pi} x_{\alpha\pi}) \quad (37)$$

Στο τύπο (37), η τιμή A' είναι η απορρόφηση του δωματίου μετά την τοποθέτηση των δύο υλικών στο πάτωμα και στο παράθυρο (μοκέτα, κουρτίνα). Η τιμή  $\bar{\alpha}_{\alpha\pi}$  είναι ο μέσος συντελεστής απορρόφησης του ηχοαπορροφητικού υλικού metro 2. Η τιμή  $x_{\alpha\pi}$  είναι τα τετραγωνικά του ηχοαπορροφητικού υλικού που θα χρειαστούν, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή. Τέλος, η μεταβλητή  $A_{\beta\epsilon\lambda\tau\iota\sigma\tau\omicron}$  είναι η επιθυμητή απορρόφηση δωματίου. Λύνοντας την εξίσωση ως προς  $x_{\alpha\pi}$  προκύπτει η εξής εξίσωση :

$$x_{\alpha\pi} = \frac{A_{\beta\epsilon\lambda\tau\iota\sigma\tau\omicron} - A'}{\bar{\alpha}_{\alpha\pi}} = 9,22m^2 \quad (38)$$

Το ηχοαπορροφητικό υλικό διατίθεται σε τεμάχια, έχει διαστάσεις ανά τεμάχιο  $E = Z * Y = 0,6726m^2$ . Διαιρώντας το  $x_{\alpha\pi}$  με το εμβαδόν E του κάθε τεμαχίου, βρίσκουμε τον ακριβή αριθμό τεμαχίων :

$$T_{\epsilon\mu} = x_{\alpha\pi} / E = 14 \text{ τεμάχια.}$$

Στο ταβάνι (επιφάνεια s6) θα τοποθετηθούν διαχυτές Hemisphere™ 180 της εταιρίας Auralex. Συγκεκριμένα, οι Hemisphere θα διαχέουν τον προσπίπτοντα στο ταβάνι ήχο ομοιόμορφα στο δωμάτιο.



Εικόνα 22- Διαχυτές

Οι διαχυτές έχουν διαστάσεις 58cm\*58cm\*17cm (Z,Y,X). Επίσης, έχουν ημισφαιρικό σχήμα και σκληρή επιφάνεια για να διαχέουν τον ήχο ομοιόμορφα σε όλη την αίθουσα. Έτσι, το ακουστικό φάσμα θα γίνει ομαλότερο και θα υπάρξει καλύτερος έλεγχος του εφέ "echo", όπου echo ονομάζεται το εφέ της αντήχησης. Όταν υπάρχουν γυαλιστερές επιφάνειες σε έναν χώρο, ο ήχος προσπίπτει σε αυτές και αναπαράγεται.

Έτσι, ο νέος χρόνος αντήχησης που προκύπτει για τη συχνότητα των 125 Hz θα είναι:

$$As = \bar{\alpha}_{125}S1' + \bar{\alpha}_{125}S2 + \bar{\alpha}_{125}S3 + \bar{\alpha}_{125}S4 + \bar{\alpha}_{125}S5 + \bar{\alpha}_{125}S6 + \bar{\alpha}_{125}S7 + \bar{\alpha}_{125}S8 + \bar{\alpha}_{125}x_{\alpha\pi} + \bar{\alpha}_{125}\mu + \bar{\alpha}_{125}\kappa \quad (39)$$

Όπου (μ) είναι οι διαστάσεις της μοκέτας και (κ) οι διαστάσεις της κουρτίνας.

$$RT60_{125} = 0.161 \frac{V}{A} = 0,161 \frac{V}{A_{125}} = 2,42 \text{ s} \quad (40)$$

Το ίδιο θα γίνει για τις υπόλοιπες συχνότητες. Οι τιμές των νέων χρόνων αντήχησης για κάθε συχνότητα σε σύγκριση με τις μετρούμενες τιμές παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

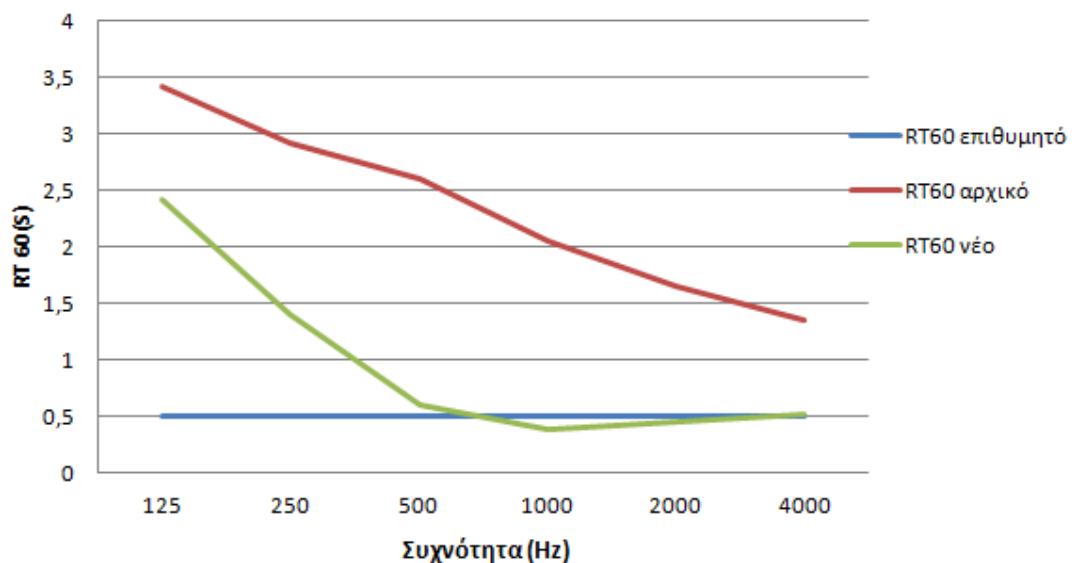
Πίνακας 11 - Χρόνοι αντήχησης χωρίς υλικά απορρόφησης/ με υλικά απορρόφησης

Συχνότητες Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Μέτρηση RT60 (s)	3,41	2,92	2,60	2,05	1,64	1,34
Νέοι RT60 (s)	2,42	1,39	0,60	0,38	0,45	0,51

Στον πίνακα 11 παρατηρείται ότι οι νέοι χρόνοι αντήχησης είναι μικρότεροι απ' τους αρχικούς. Συγκεκριμένα, για τη συχνότητα των 500 Hz, ο χρόνος αντήχησης είναι ίδιος με τον επιθυμητό χρόνο  $RT_{60}$  βέλτιστο. Επιπλέον, οι χρόνοι αντήχησης των 1000 Hz ,2000 Hz και 4000 Hz είναι μικρότεροι από αυτόν. Όμως οι συχνότητες των 125 Hz και 250 Hz σε σχέση με τον  $RT_{60}$  βέλτιστο είναι αρκετά μεγάλοι.

#### Γραφική Παράσταση

Χρόνοι αντήχησης χωρίς υλικά απορρόφησης/ με υλικά απορρόφησης



Εικόνα 23 – Γραφική παράσταση σύγκριση χρόνων αντήχησης. Άξονας x : Χρόνος αντήχησης  $RT_{60}$  σε (s), άξονας y Συχνότητα σε (Hz). Η κόκκινη γραμμή απεικονίζει ο αρχικός χρόνος αντήχησης  $RT_{60}$  χωρίς τα υλικά ακουστικής διαμόρφωσης. Η πράσινη γραμμή είναι ο χρόνος αντήχησης δωματίου  $RT_{60}$  με εγκατεστημένα τα υλικά ακουστικής διαμόρφωσης. Η μπλε γραμμή ο επιθυμητός χρόνος αντήχησης.

Στην γραφική παράσταση παρουσιάζεται ο χρόνος αντήχησης του δωματίου (RT60 αρχικό) πριν την εγκατάσταση των ηχοαπορροφητικών υλικών (γραμμή κόκκινη), ο επιθυμητός χρόνος αντήχησης (μπλε γραμμή) και ο χρόνος αντήχησης (RT60 νέο) μετά την εγκατάσταση αυτών (γραμμή Πράσινη).

Μελετώντας την παραπάνω γραφική παράσταση, παρατηρούμε ότι ο χρόνος αντήχησης *RT60* νέο είναι μικρότερος από τον *RT60* αρχικό. Η διαφορά κυμαίνεται από 2 second για τη χαμηλή περιοχή συχνοτήτων, έως 0,8 second για την υψηλή περιοχή. Στη μεσαία και υψηλή περιοχή συχνοτήτων ο χρόνος αντήχησης (*RT60* νέο) είναι μικρός με την καμπύλη να είναι σχεδόν ευθεία, αρκετά κοντά στον επιθυμητό χρόνο. Στην συνέχεια, ο χρόνος αντήχησης για την χαμηλή περιοχή συχνοτήτων παραμένει μεγάλος σε σχέση με τις άλλες δυο συχνοτικές περιοχές. Αυτό οφείλεται σε δύο παράγοντες: πρώτον, σύμφωνα με τη συχνότητα αποκοπής από τα 452 Hz και κάτω, στο δωμάτιο επικρατούν τα κυματικά φαινόμενα και επομένως οι συντονισμοί είναι εμφανείς. Δεύτερον, τα ηχοαπορροφητικά υλικά που προτείνονται να τοποθετηθούν έχουν μικρούς συντελεστές απορρόφησης στη χαμηλή περιοχή συχνοτήτων σε σχέση με τις υπόλοιπες συχνοτικές περιοχές.

Επιπροσθέτως, στον χώρο η κύρια πηγή εκπομπής θα είναι η ανθρώπινη φωνή. Επειδή η ενεργός περιοχή της ανθρώπινης φωνής βρίσκεται στην μεσαία προς υψηλή περιοχή συχνοτήτων, πιστεύουμε ότι δεν θα δημιουργηθεί μεγάλο πρόβλημα κατά την διάρκεια μιας ραδιοφωνικής εκπομπής.

#### **5.2.2.2 Πρόταση II**

Ένας τρόπος, ώστε να επιτευχθεί η μείωση του χρόνου αντήχησης στις χαμηλές συχνότητες, είναι να τοποθετηθούν στον χώρο υλικά απορρόφησης χαμηλών συχνοτήτων τύπου Helmholtz.

Τα ηχοαπορροφητικά υλικά χαμηλών συχνοτήτων Hofa bass trap της εταιρίας HOFA έχουν μεγάλη απορρόφηση στην συχνότητα 125 Hz. Έχουν διαστάσεις 1,02 m \*0,43m (X,Y) Z = ύψος, Y= πλάτος και τοποθετούνται στο δάπεδο. Για τον χώρο τον οποίο μελετάμε θα χρειαστούν 4 τεμάχια.



*Εικόνα 24 : Υλικά απορρόφησης χαμηλών συχνοτήτων Hofa.*

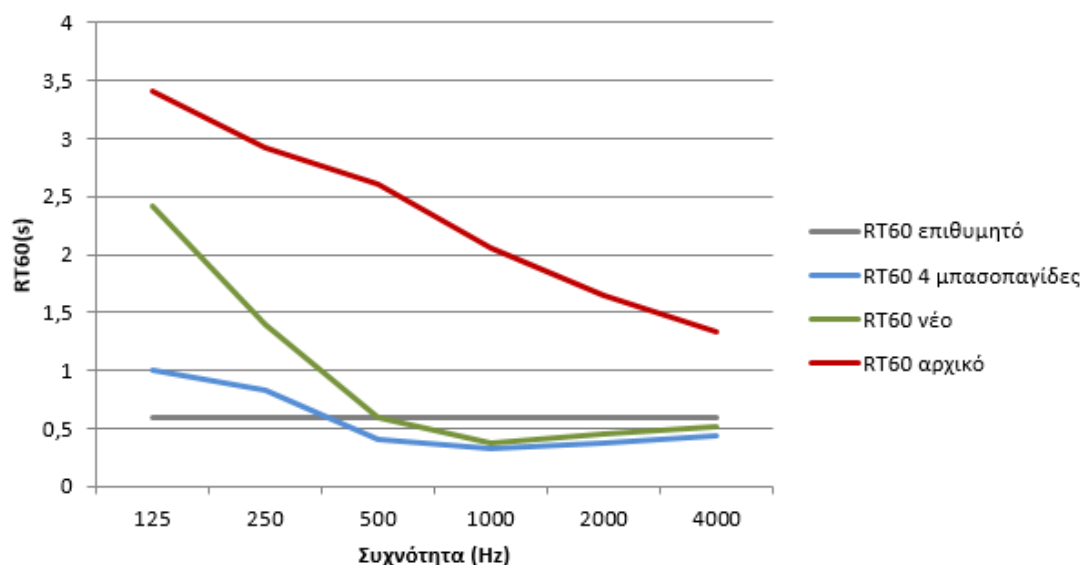
Πίνακας 12 – Συντελεστές απορρόφησης Hofa bass trap

Συχνότητα Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Συντελεστής απορρόφησης (sabine)	1,17	0,98	1,14	1,02	0,82	0,56

Στον πίνακα 12 απεικονίζονται οι συντελεστές απορρόφησης του ηχοαπορροφητικού υλικού Hofa στις συχνότητες ενδιαφέροντος.

## Γραφική Παράσταση

Χρόνοι αντήχησης και με υλικά απορρόφησης χαμηλών συχνοτήτων (μπασοπαγίδες).



Εικόνα 25 – Γραφική παράσταση σύγκριση χρόνων αντήχησης. Άξονας χ : Χρόνος αντήχησης RT60 σε (s), άξονας y Συχνότητα σε (Hz). Κόκκινη γραμμή , είναι ο αρχικός χρόνος αντήχησης RT60 χωρίς τα υλικά ακουστικής διαμόρφωσης. Πράσινη γραμμή είναι ο χρόνος αντήχησης δωματίου RT60 με εγκατεστημένα τα υλικά ακουστικής διαμόρφωσης. Γκρι γραμμή είναι ο επιθυμητός χρόνος αντήχησης. Μπλε γραμμή είναι ο χρόνος αντήχησης δωματίου RT60 με εγκατεστημένα τα υλικά ακουστικής διαμόρφωσης και τα ηχοαπορροφητικά κύλια χαμηλών συχνοτήτων.

### 5.2.2.3 Πρόταση III

Η Πρόταση III αναφέρεται στην περίπτωση που χρειαστεί να μειωθεί ο θόρυβος βάθους στο χώρο. Ο θόρυβος βάθος σύμφωνα με τις μετρήσεις έχει χαμηλή στάθμη (40dB). Προτείνεται, λοιπόν, να τοποθετηθούν στα δύο σημεία του χώρου που υπάρχει επαφή με το περιβάλλον, υλικά ηχομόνωσης, όπου τα δύο αυτά σημεία είναι η πόρτα και το συρόμενο παράθυρο.

Αναλυτικότερα προβλέπονται οι εξής ενέργειες:

- Στην θέση του παράθυρου θα τοποθετηθεί συρόμενο παράθυρο με τριπλό τζάμι supreme S77 της εταιρίας Alumil, το οποίο έχει δείκτη ηχομείωσης 42 dB .
- Στην θέση της πόρτας θα τοποθετηθεί τζαμένια πόρτα ίδιων χαρακτηριστικών με το παράθυρο.



*Εικόνα 26- Παράθυρο τριών φύλλων Alumil supreme S77*

*Διαστάσεις υλικού: Πάχος τζαμιού 5-4mm, με κενό ανάμεσα στα φύλλα 20-25mm*



*Εικόνα 27- Πόρτα Alumil supreme SD77*

*Διαστάσεις υλικού: Πάχος τζαμιού 5-4mm, με κενό ανάμεσα στα φύλλα 20-25mm*

### 5.2.3 Τοποθέτηση

Ολοκληρώνοντας τη μελέτη και την αναφορά των υλικών που πληρούν τις προδιαγραφές βελτίωσης της ακουστικής του χώρου για τη συγκεκριμένη χρήση, προτείνεται η εξής τοποθέτηση: αρχικά, τα ηχοαπορροφητικά υλικά metro2 να τοποθετηθούν ισοκατανεμημένα στους τοίχους, επειδή οι εφαπτομενικοί και οι πλάγιοι τρόποι δόνησης προκύπτουν από ανακλάσεις σε περισσότερες επιφάνειες σε αντίθεση με τους αξονικούς τρόπου δόνησης. Στη συνέχεια, χρειάζονται 14 τεμάχια του προαναφερόμενου ηχοαπορροφητικού υλικού για τους τοίχους, από τα οποία τα 2 τεμάχια θα τοποθετηθούν στην επιφάνεια s1 κάτω από το παράθυρο. Τα υπόλοιπα 12 θα τοποθετηθούν στις επιφάνειες s2,s3 και s4 ανά τετράδες. Τέλος, κάθε επιφάνεια θα χωριστεί σε δυο μέρη, στο πάνω και κάτω μέρος. Δύο τεμάχια θα τοποθετηθούν στο επάνω και δύο στο κάτω μέρος της επιφάνειας ώστε να έχουν την ίδια ευθεία μεταξύ τους.

Στην περίπτωση που τοποθετηθούν τα ηχοαπορροφητικά υλικά χαμηλών συχνοτήτων Hofa bass trap, θα τοποθετηθούν 4 τεμάχια στις τέσσερις γωνίες του χώρου, το κάθε ένα σε μια γωνιά.

Η κουρτίνα θα τοποθετηθεί σε απόσταση 20 cm από το παράθυρο. Επιπλέον, οι πτυχές της μπορούν να λειτουργήσουν σαν ένας μικρός διαχυτής. Αυτό συμβαίνει, επειδή ένα μέρος του ήχου στην υψηλή περιοχή συχνοτήτων, ο οποίος χτυπώντας στην επιφάνεια της κουρτίνας, θα διασπάται σε μικρότερα ηχητικά μέρη, λόγω του μικρού μήκους κύματος των συχνοτήτων αυτών.

Στην επιφάνεια s6, η οποία είναι το ταβάνι, είναι τοποθετημένα τρία φώτα παράλληλα στον άξονα Y. Έχουν μήκος 1,16m, 16cm πλάτος και η απόσταση από το ένα φως στο άλλο είναι 1,40m. Η απόσταση από την πόρτα (επιφάνεια s3) είναι 57cm και από την επιφάνεια s1 (παράθυρο) είναι 59cm. Οι διαχυτές έχουν διαστάσεις 58cm \*58cm\*17cm, γεγονός από το οποίο συμπεραίνεται ότι από την πλευρά της επιφάνειας s3 δεν μπορούν να μπουν. Επίσης, δεν μπορούν να τοποθετηθούν κατά μήκος του άξονα X, δηλαδή κάθετα στον άξονα Y, γιατί τα φώτα που υπάρχουν στο ταβάνι, περιορίζουν την εφαρμογή τους κάθετα σε αυτά. Άρα, θα τοποθετηθούν παράλληλα στον άξονα Y ανάμεσα στα φωτά, έξι διαχυτές στη σειρά, ο ένας μετά τον άλλον, που θα έχουν μήκος 3,48m. Το πλάτος του δωματίου (άξονα Y) είναι 4 m. Επομένως θα δημιουργηθούν 2 σειρές από 6 τεμάχια η κάθε μια, με φορά από την αρχή των αξόνων προς την επιφάνεια s4 (εικόνα 28).



Η ξύλινη πόρτα θα αντικατασταθεί από την ηχομονωτική πόρτα και το παράθυρο από το αντίστοιχο ηχομονωτικό συρόμενο παράθυρο.

#### 5.2.4 Κόστος

Σε τρεις πίνακες προτείνουμε τρεις διαφορετικές εκδοχές κόστους για την διευκόλυνση υλοποίησης του εγχειρήματος.

Πίνακας 13 – Κόστος πρότασης I

Υλικά	Τετραγωνικά/Τεμάχια	Κόστος
Μοκέτα 8mm	16,48 m <sup>2</sup>	280,16 €
Κουρτίνα συνθετική	3,78 m <sup>2</sup>	11,34 €
Metro 2	14 τεμάχια	587,16 €
Hemisphere	12 τεμάχια	1659,24 €
Σύνολο		2.537,9 €

Στον πίνακα 13 εικονίζονται οι τιμές των υλικών και το συνολικό κόστος για την μελέτη της πρότασης I.

Πίνακας 14 – Κόστος πρότασης II

Υλικά	Τετραγωνικά/Τεμάχια	Κόστος
Μοκέτα 8mm	16,48 m <sup>2</sup>	280,16 €
Κουρτίνα συνθετική	3,78 m <sup>2</sup>	11,34 €
Metro 2	14 τεμάχια	587,16 €
Hemisphere	12 τεμάχια	1659,24 €
Hofa bass trap	4 τεμάχια	716 €
Σύνολο		3.253,9€

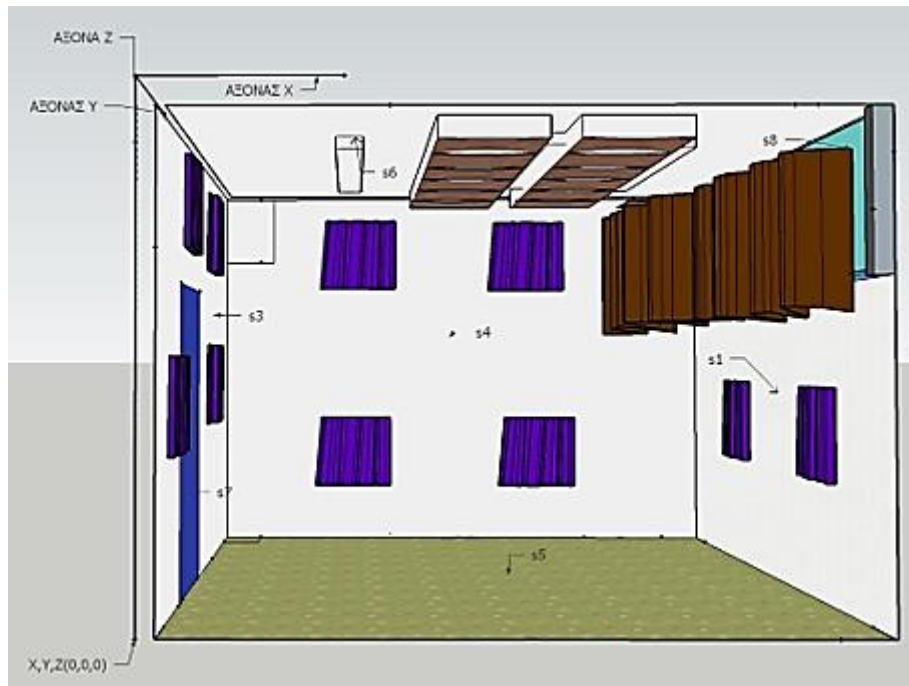
Στον πίνακα 14 εικονίζονται οι τιμές των υλικών και το συνολικό κόστος για την μελέτη της πρότασης II.

Πίνακας 15 – Κόστος πρότασης III

Υλικά	Τετραγωνικά/Τεμάχια	Κόστος
Μοκέτα 8mm	16,48 m <sup>2</sup>	280,16 €
Κουρτίνα συνθετική	3,78 m <sup>2</sup>	11,34 €
Metro 2	14 τεμάχια	587,16 €
Hemisphere	12 τεμάχια	1659,24 €
Hofa bass trap	4 τεμάχια	716 €
Πόρτα Alumil Supreme SD77	2,15 m <sup>2</sup>	1000€
Παράθυρο Alumil Supreme S77	3,822 m <sup>2</sup>	1300€
Σύνολο		5.553,9€

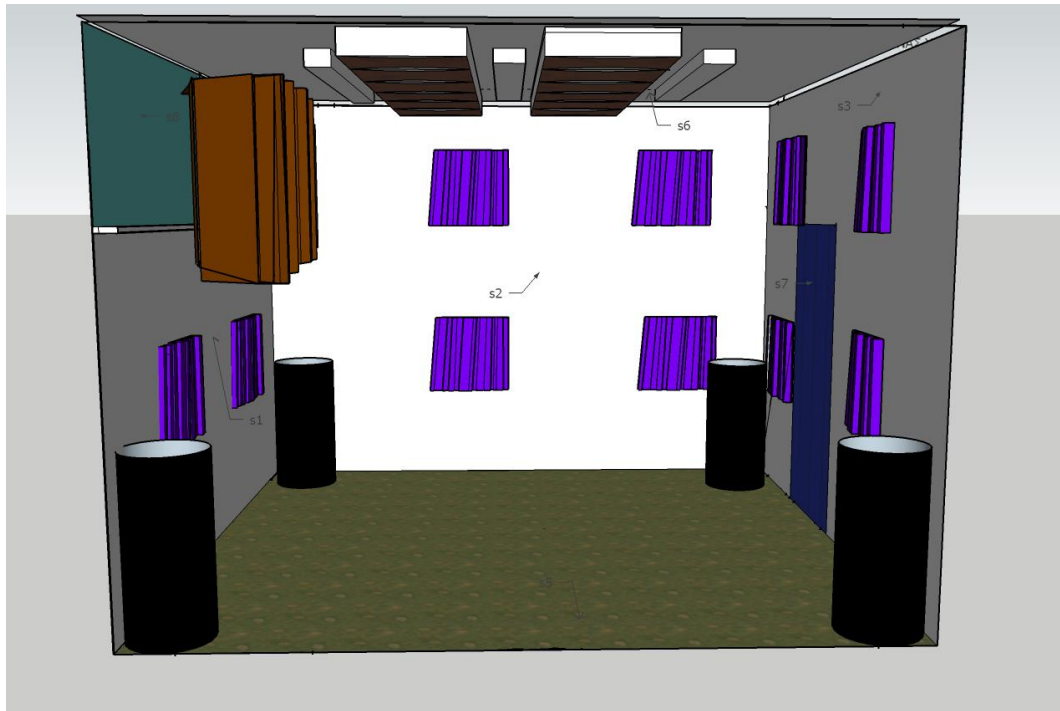
Στον πίνακα 15 εικονίζονται οι τιμές των υλικών και το συνολικό κόστος για την μελέτη της πρότασης III. Επίσης οι τιμές των υλικών ηχομόνωσης (Πόρτα Alumil Supreme SD77, Παράθυρο Alumil Supreme S77) είναι χωρίς ΦΠΑ και εξαρτώνται από τον εκάστοτε τεχνικό τοποθέτηση

Η τοποθέτηση των υλικών απορρόφησης που προτάθηκε και η τελική μορφή του χώρου παρουσιάζονται στις δυο εικόνες.



*Εικόνα 28 - Προτεινόμενη τοποθέτηση των υλικών απορρόφησης και διαχυτών. Τελική μορφή του χώρου (οπτική γωνιά από την ανατολική πλευρά, επιφάνεια s2)*

Στην εικόνα 28 απεικονίζεται το τρισδιάστατο μοντέλο του χώρου, με τη μελλοντική μορφή του μετά την εγκατάσταση των ηχοαπορροφητικών υλικών της πρώτης πρότασης. Είναι ευδιάκριτος ο αριθμός των διαχυτών και η τοποθέτησή τους στο ταβάνι του δωματίου ανάμεσα στα φώτα. Ευδιάκριτος επίσης είναι ο αριθμός των ηχοαπορροφητικών υλικών στους τοίχους, η μοκέτα και η κουρτίνα. Τα χρώματα των υλικών είναι ενδεικτικά χωρίς να είναι υποχρεωτική η επιλογή του συγκεκριμένου συνδυασμού χρωμάτων. Τέλος, στην εικόνα 28 επισημαίνονται ξανά όλες οι επιφάνειες του δωματίου, η αρχή των αξόνων, το ύψος (Z), το μήκος (X) και πλάτος (Y).



*Εικόνα 29– Προτεινόμενη τοποθέτηση των υλικών απορρόφησης και διαχυτών. Τελική μορφή του χώρου (οπτική γωνιά από δυτική πλευρά, επιφάνεια s4)*

Στην εικόνα 29 απεικονίζεται το τρισδιάστατο μοντέλο του χώρου, με τη μελλοντική μορφή του μετά την εγκατάσταση των υλικών ηχητικής διαμόρφωσης όλων των προτάσεων μαζί. Ευδιάκριτος είναι ο αριθμός των υλικών απορρόφησης χαμηλών συχνοτήτων.

## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>

### Συμπεράσματα

Η ακουστική ως επιστήμη περιλαμβάνει σημαντικό εύρος επιστημονικού ενδιαφέροντος και ενασχόλησης. Διότι εκτός από το πεδίο τεχνικών, μεθόδων και διαδικασιών μελέτης του φαινομένου της ακουστικής σε έναν χώρο, η ακουστική συνδέεται άρρηκτα με τον ήχο και την ανθρώπινη ακοή, η οποία είναι ο φυσικός δέκτης του ατόμου ώστε να αντιλαμβάνεται το εξωτερικό του περιβάλλον, φυσικό και τεχνητό. Με αυτόν τον τρόπο η ακουστική εδραιώνει την σημασία που έχει ο ήχος και η μελέτη του στην εξέλιξη της ανθρώπινης ύπαρξης αλλά και τη συμβολή του στην εξελικτική πορεία της τεχνολογίας.

Οι ακουστικές βελτιώσεις που προτάθηκαν είναι καλύτερες δυνατές για την συγκεκριμένη χρήση του χώρου σύμφωνα με την δική μας εμπειρία, για τους εξής λόγους: Πρώτον, κατά τη επεξεργασία των μετρήσεων έγινε θεωρητικός υπολογισμός ώστε, να ταυτοποιηθούν οι τιμές που προέκυψαν από τις μετρήσεις με τις θεωρητικές τιμές, με σκοπό οι ακουστικές βελτιώσεις που θα προταθούν να ανταποκρίνονται όσο το δυνατό περισσότερο στην πραγματικότητα.

Δεύτερον, με τις τρεις κοστολογημένες προτάσεις, οι οποίες είναι αλληλένδετες μεταξύ τους, δίνεται η δυνατότητα υλοποίησης του έργου με τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

Είναι άξιο σημείωσης ότι, η ακουστική μελέτη αυτή αναφέρεται αποκλειστικά στην λειτουργία ραδιοφωνικού σταθμού στον χώρο. Παρόλα αυτά, η παράθεση των τριών προτάσεων δίνει την δυνατότητα χρήσης του χώρου και για μουσική (εξάσκηση μουσικού οργάνου, πρόβα μουσικής μπάντας, μάθημα μουσικής και πρόβα χορωδίας).

Ολοκληρώνοντας, απόρροια αυτού είναι η απόδειξη του μεγαλείου της ακουστικής, καθώς η επιστήμη αυτή γίνεται εργαλείο στα χέρια του ανθρώπου, δίνοντας λύση σε άλυτα προβλήματα του παρελθόντος διευκολύνοντας με αυτόν τον τρόπο, την ζωή του και των συνανθρώπων γύρω του.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Antoniadou, S., Papadakis, N. M., & Stavroulakis, G. E. (2018). Measuring Acoustic Parameters with ESS and MLS methods: Effect of Artificially Varying Background Noise.

Auralex- hemisphere. Ανακτήθηκε 11, Μαΐου, 2018 από <https://www.auralex.com/product/hemisphere/>

Auralex metro2. Ανακτήθηκε 11 Μαΐου, 2018 από <https://www.auralex.com/product/studiofoam-metro/>

Dadiotios, K., Angus, J., & Cox, T. (2010). *Investigation into the accuracy of boundary element modeling prediction of the scattered pressure distribution from partly as absorbing surface*. Στο 5<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Ακουστικής. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (Ed.), Ακουστική 2010 (156-167) Αθήνα: Ελληνικό Ινστιτούτο Ακουστικής – ΕΛ.ΙΝ.Α. & Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Vicoustic super bass 90. Ανακτήθηκε 08 Ιουνίου, 2018, από <https://www.vicoustic.com/product/super-bass-90>

Ευθυμιάτος, Δ. (2007). *Ακουστική και κτηριακές εφαρμογές*. Αθήνα: Παπασωτηρίου.

Μωραΐτης, Χ. (2010). *Ακουστική διέγερση χώρου μέσω ενός χειροκίνητου μηχανισμού παραγωγής κρουστικού θορύβου. Καταγραφή του χρόνου αντήχησης και σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις κλασσικές μεθόδους μέτρησης*. Στο: 5<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Ακουστικής. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (Ed.), Ακουστική 2010 (79-86). Αθήνα: Ελληνικό Ινστιτούτο Ακουστικής – ΕΛ.ΙΝ.Α. & Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Ξενικάκης, Δ. (2013). *Σημειώσεις Θεωρίας Ηχοληψία Ι*. Ρέθυμνο: ΑΤΕΙ Κρήτης, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής.

Παπαδάκης, Ν. (2016). *Συμπληρωματικές Σημειώσεις Εφαρμοσμένη Ακουστική*. Ρέθυμνο: ΑΤΕΙ Κρήτης, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής.

Papadakis, Nikolaos M., and Georgios E. Stavroulakis. "Low Cost Omnidirectional Sound Source Utilizing a Common Directional Loudspeaker for Impulse Response Measurements." *Applied Sciences* 8.9 (2018): 1703.

Papadakis, Nikolaos M., and Georgios E. Stavroulakis. "Review of Acoustic Sources Alternatives to a Dodecahedron Speaker." *Applied Sciences* 9.18 (2019): 3705.

Papadakis, N. M., & Stavroulakis, G. E. (2020, June). Handclap for Acoustic Measurements: Optimal Application and Limitations. In *Acoustics* (Vol. 2, No. 2, pp. 224-245). Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

de Vos, R., Papadakis, N. M., & Stavroulakis, G. E. (2020, December). Improved Source Characteristics of a Handclap for Acoustic Measurements: Utilization of a Leather Glove. In *Acoustics* (Vol. 2, No. 4, pp. 803-811). Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

Πασχαλίδου, Σ. (2006). *Σημειώσεις Εργαστηριακών Ασκήσεων Εφαρμοσμένης Ακουστικής Ι*. Ρέθυμνο: ΑΤΕΙ Κρήτης, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής.

Πρόγραμμα εκτέλεσης μετρήσεων και επεξεργασίας δεδομένων. Ανακτήθηκε 20 Δεκεμβρίου, 2017, από <http://www.artalabs.hr/index.htm>

Σηφάκης, Μ. & Κουτσοδιμάκης, Χ. (2012). *Σημειώσεις θεωρίας Εφαρμοσμένης Ακουστικής Ι* (Δ' έκδοση). Ρέθυμνο: ΑΤΕΙ Κρήτης, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής.

Σκαρλάτος, Δ. (2008). *Εφαρμοσμένη Ακουστική* (Γ' Έκδοση). Πάτρα: GOTSIS.

Χαδέλλης, Λ. (2010). *Τεχνολογία Ήχου*. Αθήνα: Αράκυνθος.

HOFA Basstrap. Ανακτήθηκε 11, Μαΐου, 2018 από [https://hofashop.com/erp/shop\\_HOFA%20Basstrap%20anthracite\\_11111::323::a16718](https://hofashop.com/erp/shop_HOFA%20Basstrap%20anthracite_11111::323::a16718)

Alumil supreme S77. Ανακτήθηκε 11, Μαΐου, 2018 από <https://www.alumil.com/greece/homeowners/products/windows-doors/s77>

Alumil supreme SD77. Ανακτήθηκε 11, Μαΐου, 2018 από <https://www.alumil.com/greece/homeowners/products/entrance-doors/entrance-insulated-door-sd77>