

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Σχεδιασμός και ανάλυση ηχοπετάσματος σε δρόμο
ταχείας κυκλοφορίας για τη μείωση αερόφερτου
θορύβου στην περιβάλλουσα περιοχή**



ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΟΙΤΗΤΩΝ

ΟΝΟΜ/ΜΟ	
1.ΠΟΥΛΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ	
2.ΧΑΤΖΑΡΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ	

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΒΑΡΕΛΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Πάτρα 2013

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρών τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολογίας του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πάτρας και αναφέρεται στη μελέτη εγκατάστασης ηχοπετάσματος πλησίον κατοικημένης περιοχής και δρόμου ταχείας κυκλοφορίας. Η εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του νομοθετικού πλαισίου της εποχής για ολοένα και μικρότερες στάθμες θορύβου που απαιτείται να εκτίθεται ο άνθρωπος, αφού είναι γνωστό ότι ο θόρυβος επηρεάζει τη σωματική και ψυχολογική υγεία του ατόμου.

Στην αρχή γίνεται λόγος για τις έννοιες ήχος και θόρυβος ενώ στη συνέχεια αναφέρονται οι εφαρμοσμένες μέθοδοι μείωσης της ηχορύπανσης, κυρίως στους τρόπους κατασκευής των ηχοπετασμάτων (υλικά ,μήκος ,ύψος).

Ευχαριστούμε θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή μας κ. Δημήτριο Βαρέλη, Επιστημονικό Συνεργάτη του Τμήματος Μηχανολογίας, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μας προσέφερε στη διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας.

Πούλης Δημήτριος – Χατζάρας Γεώργιος
Ιανουάριος 2013

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. Ήχος.....	7
2. Διάκριση ήχου – θορύβου.....	7
3. Μείωση του θορύβου (Ηχοαπορρόφηση –ηχομόνωση).....	8

1. ΉΧΟΣ

1.1 Χαρακτηριστικά του ήχου.....	9
1.1.1 Συχνότητα (Frequency).....	9
1.1.2 Ένταση (Intensity).....	10
1.1.3 Ακουστότητα (Loudness).....	12
1.1.4 Ύψος (Pitch).....	13
1.1.5 Χροιά (Timbre).....	14
1.2 Ανάλυση του ήχου.....	15

2. ΠΑΡΑΓΩΓΗ-ΔΙΑΔΟΣΗ-ΜΕΤΡΗΣΗ ΗΧΟΥ

2.1 Παραγωγή του ήχου.....	20
2.1.1 Βασικές παραδοχές.....	20
2.2 Ήχος ως κυματικό φαινόμενο	
2.2.1 Επίπεδο ηχητικό κύμα.....	22
2.2.2 Σφαιρικό ηχητικό κύμα.....	23
2.3 Μέτρηση ταχύτητας του ήχου στα μέσα διάδοσης	
2.3.1 Διαμήκη.....	23
2.3.2 Εγκάρσια.....	24
2.3.3 Επιφανειακά.....	26
2.4 Μέτρηση ήχου	
2.4.1 Όργανα μέτρησης.....	27
2.4.2 Κατηγορίες ηχομέτρων.....	28
2.4.3 Βαθμονόμηση οργάνων.....	28
2.4.4 Σταθμιστικά κυκλώματα (φίλτρα) A, B, C και D.....	29
2.5 Ενεργειακό ισοζύγιο	
2.5.1 Ανάκλαση (Reflection).....	30

2.5.2 Περίθλαση (Diffraction)	31
2.5.3 Διάθλαση (Refraction)	32
2.5.4 Παρεμβολή (Interiection).....	32
2.6 Τι ακούει ο άνθρωπος.....	32
2.7 Επιπτώσεις θορύβου.....	35

3 . ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ

3.1 Τι είναι θόρυβος.....	37
3.2 Είδη θορύβων.....	38
3.2.1 Θόρυβος τυρβώδους ροής.....	38
3.2.2 Θόρυβος μεταβαλλόμενων δυνάμεων.....	38
3.2.3 Θόρυβος μη σταθερής ροής.....	39
3.2.4 Θόρυβος πρόσκρουσης των jet.....	39
3.2.5 Θόρυβος των ρευστών σε σωληνώσεις.....	39
3.2.6 Ταλαντώσεις και συντονισμός σωληνώσεων.....	40
3.2.7 Θόρυβος των συστημάτων κλιματισμού.....	42
3.3 Παραγωγή θορύβου από	
3.3.1 Εκπομπή από πηγή σφαιρική συμμετρία.....	45
3.3.2 Εκπομπή από πηγές με κυλινδρική συμμετρία.....	47
3.3.2.1 Γραμμική πηγή απείρου μήκους.....	48
3.3.2.2 Γραμμή πεπερασμένου μήκους.....	50
3.3.2.3 Γραμμική διάταξη σημειακών πηγών.....	52
3.3.2.4 Κινούμενες πηγές σε γραμμική διάταξη.....	54
3.3.3 Εκπομπή από πηγή με επίπεδη συμμετρία.....	57

4. ΜΕΙΩΣΗ ΑΕΡΟΦΕΡΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ ΑΠΟ ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΔΙΑΔΟΣΗ

4.1 Ηχομείωση.....	62
4.1.1 Ορισμός.....	62
4.1.2 Δείκτης ηχομείωσης.....	62
4.1.3 Υπολογισμός ηχομείωσης.....	62
4.1.3.1 Μετάδοση σε ανοιχτό χώρο.....	62
4.1.3.2 Μετάδοση σε κλειστό χώρο.....	63
4.2 Τρόποι επίδρασης στην ηχομείωση	
4.2.1 Επίδραση της απορρόφησης.....	63
4.2.2 Επίδραση των συνδέσμων.....	63
4.2.3 Επίδραση των ανοιγμάτων.....	64
4.2.4 Επίδραση της απόσβεσης.....	65
4.3 Τρόποι ηχομείωσης	
4.3.1 Φυτικά ηχοπετάσματα.....	66
4.3.2 Προτεινόμενες διεθνώς δένδροφυτεύσεις.....	66
4.4 Νόμος της μάζας.....	68
4.4.1 Κάθετη πρόσπτωση.....	69
4.4.2 Τυχαία πρόσπτωση.....	69
4.5 Προσεγγιστικός υπολογισμός δείκτη ηχομείωσης	
4.5.1 Απλών επιφανειών.....	70
4.5.2 Σύνθετων επιφανειών.....	70

5. ΜΕΙΩΣΗ ΑΕΡΟΦΕΡΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ ΜΕΣΩ ΗΧΟΠΕΤΑΣΜΑΤΩΝ

5.1 Ορισμός ηχοπετασμάτων.....	71
5.2 Κατηγορίες.....	72
5.3 Υλικά.....	72
5.4 Θεμελίωση – Επέκταση – Ύψος.....	73
5.5 Χώροι εγκατάστασης ηχοπετασμάτων.....	78

6. ΜΕΛΕΤΗ ΗΧΟΠΕΤΑΣΜΑΤΟΣ ΣΕ ΔΡΟΜΟ ΤΑΧΕΙΑΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ

6.1 Περιγραφή του προβλήματος.....	79
6.2 Μέτρηση θορύβου σε διώροφη κατοικία πλησίον του δρόμου.....	79
6.3 Χρήση λεπτού ηχοπετάσματος για την μείωση αερόφερτου θορύβου	
6.3.1 Σχήμα.....	81
6.3.2 Τύποι.....	81
6.3.3 Διάγραμμα.....	84
6.4 Χρήση παχιού ηχοπετάσματος για την μείωση αερόφερτου θορύβου	
6.4.1 Σχήμα.....	85
6.4.2 Τύποι.....	85
6.4.3 Διάγραμμα.....	90
6.5 Χρήση διπλού ηχοπετάσματος για την μείωση αερόφερτου θορύβου	
6.5.1 Σχήμα.....	91
6.5.2 Τύποι.....	91
6.5.3 Διάγραμμα.....	94
6.6 Παραμετρική μελέτη.....	95
6.7 Συγκριτικά αποτελέσματα.....	

7. ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ

7.1 Ευρωπαϊκή	102
7.2 Ελληνική.....	103

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ..

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	107
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ.....	108

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αναφέρεται στην μελέτη και εγκατάσταση ηχοπετάσματος σε δρόμο ταχείας κυκλοφορίας για την μείωση του αερόφερτου θορύβου στην περιβάλλουσα περιοχή.

Η παρούσα εργασία απαρτίζεται από οχτώ κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα κύρια χαρακτηριστικά του ήχου όπως η συχνότητα, η ένταση, η ακουστότητα, το ύψος και η χροιά. Επίσης αναφέρεται και ο τρόπος ανάλυσης του ήχου στο πεδίο χρόνου και συχνότητων.

Το δεύτερο κεφάλαιο ασχολείται με την παραγωγή, διάδοση και μέτρηση του ήχου. Αρχικά αναφέρονται οι βασικές παραδοχές της παραγωγής του ήχου, ενώ στη συνέχεια γίνεται λόγος για τον ήχο ως κυματικό φαινόμενο με τον διαχωρισμό του σε επίπεδο και σφαιρικό ηχητικό κύμα. Γίνεται ταξινόμηση του ήχου, ως προς τη μέτρηση της ταχύτητας του ήχου στα μέσα διάδοσης, σε διαμήκη, εγκάρσια και επιφανειακά. Στην συνέχεια γίνεται αναφορά στον ενεργειακό ισοζύγιο και τους τρόπους που μεταφέρεται ο ήχος στο δέκτη.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση του φαινομένου του θορύβου. Αρχικά δίνεται ο ορισμός του θορύβου ενώ στη συνέχεια αναφέρονται τα είδη των θορύβων που παράγονται από τυρβώδη, μεταβαλλόμενη ή σταθερή ροή ενώ ακολουθεί η έννοια της παραγωγής θορύβου από πηγή με σφαιρική, κυλινδρική και επίπεδη συμμετρία. Ειδικότερα για την κυλινδρική συμμετρία γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στην γραμμική πηγή απείρου και πεπερασμένου μήκους αλλά και στη γραμμική διάταξη των σημειακών πηγών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναπτύσσεται η έννοια της ηχομείωσης του αερόφερτου θορύβου από ελεύθερη διάδοση. Αρχικά δίνεται ο ορισμός της ηχομείωσης και του δείκτη ηχομείωσης, γίνεται αναφορά στον υπολογισμό της ηχομείωσης σε ανοιχτό και κλειστό χώρο, ενώ στην συνέχεια παρουσιάζονται οι τρόποι επίδρασης στην ηχομείωση (μέσω απορρόφησης, μέσω των συνδέσμων, των ανοιγμάτων και της απόσβεσης). Επιπλέον αναφέρονται οι τρόποι ηχομείωσης και ο νόμος της μάζας για κάθετη και τυχαία πρόσπτωση. Το κεφάλαιο τέταρτο καταλήγει με τον προσεγγιστικό υπολογισμό του δείκτη ηχομείωσης απλών και σύνθετων επιφανειών.

Στο πέμπτο κεφάλαιο ακολουθεί η εισαγωγή στην έννοια των ηχοπετασμάτων ή ηχοφραγμάτων. Ουσιαστικά γίνεται αναφορά στον ορισμό, στις κατηγορίες, στα υλικά, στη θεμελίωση, διαστάσεις, ώστε να έχουν επιθυμητό αποτέλεσμα.

Στο έκτο κεφάλαιο μελετάται η εγκατάσταση ηχοπετασμάτων σε διώροφη κατοικία η οποία είναι πλησίον σε δρόμο ταχείας κυκλοφορίας. Αρχικά γίνεται περιγραφή του προβλήματος ενώ στην συνέχεια παρατίθενται οι πίνακες από τις πειραματικές μετρήσεις που καταγράφηκαν στην περιοχή. Ακολούθως παρουσιάζεται μια παραμετρική μελέτη ως προς την απόδοση του κάθε είδους και συγκεκριμένα για α) λεπτό, β) παχύ και γ) διπλό.

Το έβδομο κεφάλαιο αναφέρεται στη νομοθεσία και πιο συγκεκριμένα στην Ελληνική και Ευρωπαϊκή.

Τέλος στο όγδοο κεφάλαιο αναπτύσσονται τα σπουδαιότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα πτυχιακή εργασία τα οποία έχουν να κάνουν με τα ηχοπετάσματα. Επίσης υπάρχουν και προτάσεις για μελλοντική εργασία στον τομέα αυτό.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. ΉΧΟΣ

Ως ήχος ορίζεται η μηχανική διαταραχή που διαδίδεται με ορισμένη ταχύτητα μέσα σε ένα μέσο που μπορεί να αναπτύξει εσωτερικές δυνάμεις (π.χ. ελασικότητας, εσωτερικής τριβής) κι έχει τέτοιο χαρακτήρα, ώστε μπορεί να διεγείρει το αισθητήριο της ακοής και να προκαλέσει ακουστικό αίσθημα. Το ακουστικό αίσθημα που προκαλείται όταν το αισθητήριο της ακοής διεγείρεται από μια μηχανική διαταραχή ορίζεται:

- Ως απλός ήχος, απλός τόνος, καθαρός τόνος (ο ήχος που παράγεται από αρμονική διαταραχή).
- Ως σύνθετος ήχος (κάθε ήχος που δεν είναι απλός ήχος).

2. ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΗΧΟΥ – ΘΟΡΥΒΟΥ

Ο θόρυβος μπορεί να περιγραφεί γενικώς ως ένας ανεπιθύμητος ήχος. Από υποκειμενική άποψη, ο θόρυβος είναι ένας παλμός του αέρα που γίνεται αντιληπτός από το ανθρώπινο αυτί. Από αντικειμενική άποψη, αντιθέτως, ο ήχος είναι μια διακύμανση πίεσης που έχει ένταση και μήκος κύματος (βήμα). Η ένταση του ήχου εξαρτάται από το επίπεδο της πίεσης που εκφράζεται σε decibel (dB) και μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια από ειδικό tester. Η συχνότητα εκφράζεται αντιθέτως σε κύκλους ανά δευτερόλεπτο και έχει ως μονάδα μέτρησης το hertz (Hz).

Από φυσική άποψη ο θόρυβος είναι ένα σύμπλεγμα ηχητικών κυμάτων με ελάχιστη ή καμιά περιοδικότητα. Οι φυσικές έννοιες δεν επαρκούν για να καθορίσουν μόνες τους τη διαφορετική αίσθηση που προκαλεί ένας ήχος από ένα θόρυβο. Αυτή η διαφορά καθορίζεται από υποκειμενικούς παράγοντες που προσδίδουν σε κάθε ηχητικό ερέθισμα που γίνεται αντιληπτό, έναν επιθυμητό ή ανεπιθύμητο χαρακτήρα.

3. ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ

Η μείωση του θορύβου γίνεται με δύο τρόπους:

∅ Ηχοαπορρόφηση

Οι λείες και σκληρές επιφάνειες έχουν την ιδιότητα να αντανακλούν τον ήχο, με αποτέλεσμα να ενισχύεται σημαντικά ο ήχος που παράγεται από εσωτερικές πηγές σε αυτούς τους χώρους. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αντήχηση, ενώ "θάλαμος αντήχησης" ονομάζεται ο χώρος που χρησιμοποιείται για τη δοκιμή της ηχοαπορροφητικότητας των υλικών. Η ιδιαίτερη ικανότητα ενός υλικού να απορροφά τον ήχο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση της αντήχησης και του αντανακλώμενου θορύβου στους εσωτερικούς χώρους.

∅ Ηχομόνωση

Η ηχομόνωση αφορά την ικανότητα ενός συστήματος να απομονώνει ακουστικά ένα χώρο από τους ήχους που προέρχονται από το εξωτερικό περιβάλλον και αντιστρόφως. Ο ήχος μεταδίδεται από ένα χώρο σε κάποιον άλλο με διάφορους τρόπους, και συνεπώς οι αναγκαίες επεμβάσεις για την αντιμετώπιση αυτής της μετάδοσης εξαρτώνται από αυτή τη διαφορετικότητα. Ουσιαστικά με την ηχομόνωση επιδιώκεται:

- είτε ο ήχος να μην μπει σε ένα συγκεκριμένο χώρο (π.χ. το υπνοδωμάτιό μας).
- είτε να μην βγει από ένα συγκεκριμένο χώρο (π.χ. κέντρο διασκέδασης).

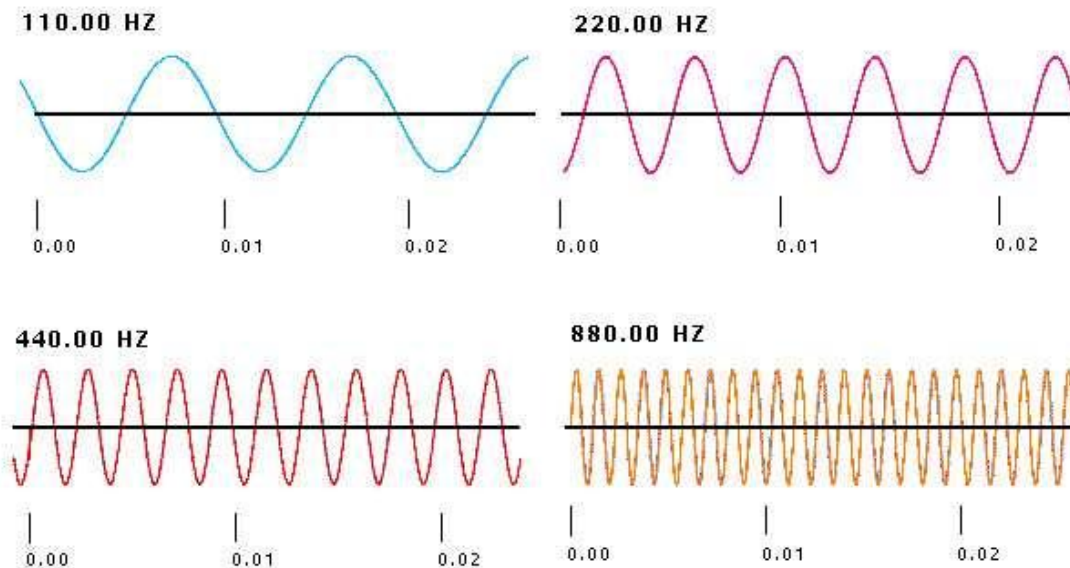
1. ΗΧΟΣ

1.1 ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΗΧΟΥ

Τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα ενός ήχου μπορούν να χωριστούν σε 2 κατηγορίες, αυτά τα οποία είναι ανεξάρτητα από την προσωπική αντίληψη του ακροατή και αποκαλούνται αντικειμενικά και αυτά που είναι άμεσα συνδεδεμένα με τον ακροατή και λέγονται υποκειμενικά χαρακτηριστικά του ήχου. Τέτοια αντικειμενικά χαρακτηριστικά, είναι η συχνότητα και η ένταση και υποκειμενικά η ακουστότητα, το ύψος και η χροιά.

1.1.1 Συχνότητα (Frequency)

Ο αριθμός των μεταβολών της πίεσης ανά δευτερόλεπτο καλείται **συχνότητα** του ήχου (εικόνα 1.1) και μετράται σε Χερτζ (Hz). Υποκειμενικό χαρακτηριστικό του ήχου, αντίστοιχο της συχνότητας, είναι το **ύψος** του. Ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται την αύξηση της συχνότητας του ηχητικού κύματος ως αύξηση του τονικού ύψους του ήχου. Όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα, τόσο οξύτερος είναι και ο ήχος. Οι χαμηλές συχνότητες γίνονται αντιληπτές ως βαθύς ήχος. Για παράδειγμα, το μπουμπουνητό ενός μακρινού κεραυνού έχει χαμηλή συχνότητα, ενώ το σφύριγμα υψηλή συχνότητα. Το ωτολογικά φυσιολογικό άτομο αντιλαμβάνεται συχνότητες από 16 έως 20.000 Hz. (Ως ωτολογικά φυσιολογικό άτομο ορίζεται κάθε υγιές άτομο του οποίου τα αυτιά δεν εμφανίζουν κανένα σύμπτωμα αρρώστιας, οι ακουστικοί του πόροι είναι απαλλαγμένοι από κυψελίδα και δεν έχει προίστορία επιβλαβούς έκθεσης σε θόρυβο). Η περιοχή αυτή ονομάζεται **ακουστικό φάσμα συχνοτήτων**. Δονήσεις συχνότητας μικρότερης των 16 Hz ονομάζονται **υπόηχοι**, ενώ δονήσεις συχνότητας άνω των 20 kHz ονομάζονται **υπέρηχοι**.



Εικόνα 1.1: Διάφορα είδη κυματομορφών ανάλογα με την συχνότητα.

Οι μεταβολές της πίεσης διαδίδονται μέσα σε κάθε ελαστικό μέσο, π.χ. στον αέρα, από την πηγή παραγωγής του ήχου έως τα αυτιά του ακροατή.

Οι ήχοι κινούνται με διαφορετική ταχύτητα στα διάφορα υλικά μέσα. Οι ήχοι κινούνται γρήγορα στα στερεά, αργά στα αέρια και με ενδιάμεσες ταχύτητες στα υγρά. Δείχνουν δηλαδή διάθεση να κινηθούν γρηγορότερα στα πυκνότερα υλικά. Π.χ. στο ασφάλι ο ήχος διαδίδεται με ταχύτητα 6100 μέτρα ανά δευτερόλεπτο, στο νερό με ταχύτητα 1480 περίπου μέτρα ανά δευτερόλεπτο, ενώ στον αέρα με 343 περίπου μέτρα ανά δευτερόλεπτο. Ακόμη θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο ήχος ταξιδεύει πιο γρήγορα στα θερμά παρά στα ψυχρά σώματα. Έτσι στον αέρα και σε θερμοκρασία 0 °C ο ήχος διανύει απόσταση 331 μέτρα σε ένα δευτερόλεπτο, ενώ στον ίδιο χρόνο στους 100 °C έχει καλύψει απόσταση 391 μέτρα. Γενικά για την ταχύτητα του ήχου στον αέρα σε οποιαδήποτε θερμοκρασία με ικανοποιητική προσέγγιση μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον εξής τύπο:

$$c = 331 + 0.6 \cdot \theta$$

όπου θ η θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου.

Γνωρίζοντας την ταχύτητα και την συχνότητα ενός ήχου υπολογίζουμε το μήκος κύματος (λ) αυτού, δηλαδή, την απόσταση από μία κορυφή του κύματος ως την επόμενη ή από μία κορυφοτιμή της πίεσης ως την επόμενη, εφαρμόζοντας την σχέση:

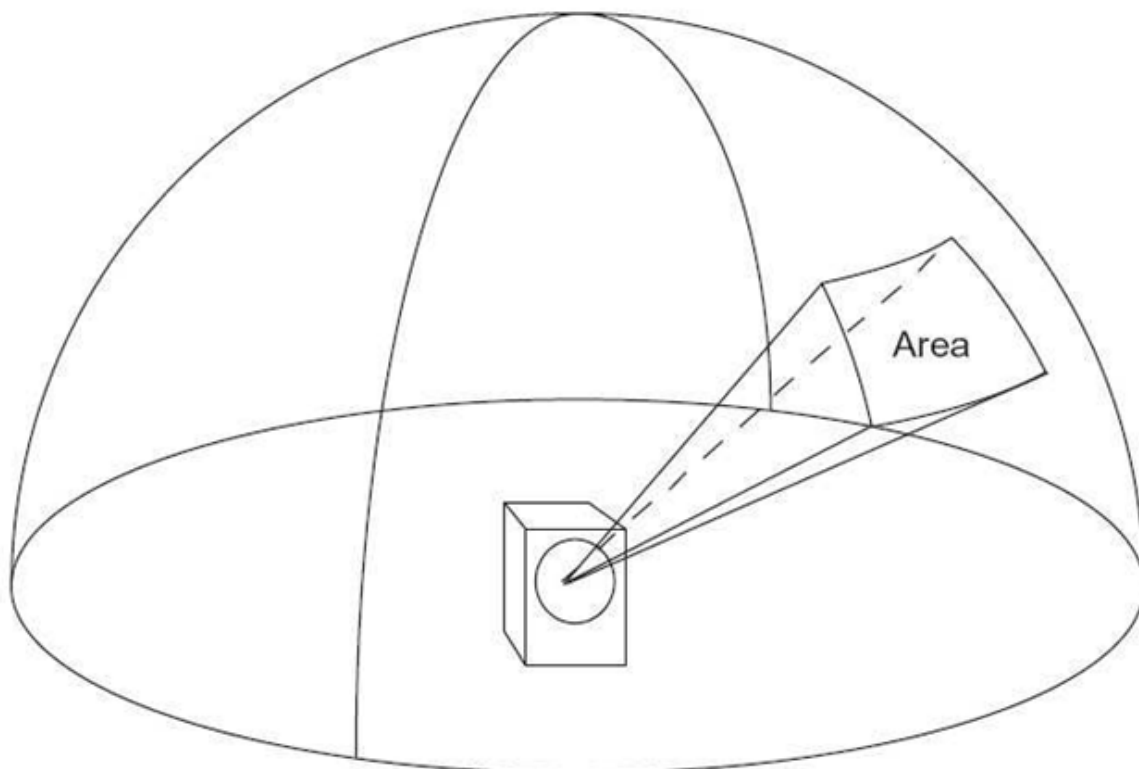
$$\text{Μήκος κύματος}(\lambda) = \frac{\text{Ταχύτητα ήχου} (c)}{\text{Συχνότητα} (f)}$$

1.1.2 Ένταση (Intensity)

Η **ένταση** του ηχητικού κύματος ορίζεται ως η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου που μεταδίδεται από το κύμα ανά μονάδα επιφανείας κάθετης στη φορά διάδοσης του κύματος. Μονάδα μέτρησης της έντασης είναι το Watt ανά τετραγωνικό μέτρο. Είναι γνωστό ότι 1 Watt=1 Joule/sec. Παρόλα αυτά η ένταση του ήχου τις περισσότερες φορές εκφράζεται ως προς μια τιμή αναφοράς σε λογαριθμική κλίμακα και μετριέται σε decibels (dB). Αυτή η κλίμακα προσομοιάζει περισσότερο με την υποκειμενική αντίληψη του ανθρώπου για την ένταση του ήχου και μας παρέχει μεγάλη ευχέρεια σε πρακτικούς υπολογισμούς. Ως τιμή αναφοράς, χρησιμοποιείται η ελάχιστη τιμή έντασης που μπορεί να ακούσει ο άνθρωπος, η οποία είναι 10-12 W/m² και αντιστοιχεί σε 0 dB. Το μέγεθος αυτό ονομάζεται **στάθμη έντασης ήχου (Sound Intensity Level)** (εικόνα 1.2) και η ακριβής σχέση που το συνδέει, με την ένταση είναι:

$$IL = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) [db]$$

$$\text{Όπου } I_0 = 10^{-12} \text{ W / m}^2$$



Εικόνα 1.2: Στάθμη έντασης ήχου σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση

Ο ασθενέστερος ήχος (ελάχιστα ακουστός) που μπορεί να αντιληφθεί ένα υγιές ανθρώπινο αυτί, έχει εύρος 20 μPa το οποίο ισοδυναμεί με 5 δις φορές λιγότερο από την κανονική ατμοσφαιρική πίεση. (Το Pascal είναι μονάδα μέτρησης πίεσης και είναι ίσο με 1 N/m^2 . Η μέση ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνεια της θάλασσας είναι 1013,25 mbar, όπου $1 \text{ mbar} = 100 \text{ Pa}$). Αυτή η μεταβολή της πίεσης των 20 μPa είναι τόσο μικρή, που προκαλεί μια απόκλιση του τυμπάνου του ανθρώπινου αυτιού μικρότερη από τη διάμετρο ενός μορίου υδρογόνου. Κατά θαυμαστό τρόπο, το αυτί αντέχει ηχητικές πιέσεις πάνω από ένα εκατομμύριο φορές υψηλότερες των 20 μPa . Εάν, λοιπόν, η μέτρηση του ήχου γινόταν σε Pa θα προέκυπταν πολύ μεγάλα και δύσχρηστα αριθμητικά ποσά. Για αυτό χρησιμοποιείται η **κλίμακα των ντεσιμπέλ ή κλίμακα dB**.

Το ντεσιμπέλ δεν είναι μία απόλυτη μονάδα μέτρησης. Είναι μία αναλογία μεταξύ ενός μετρούμενου μεγέθους και ενός συμφωνημένου επιπέδου αναφοράς. Η κλίμακα dB είναι λογαριθμική και χρησιμοποιεί τα 20 μPa ως ηχητική πίεση αναφοράς. Το **κατώφλι ακοής** ορίζεται ως 0 dB. Κάθε φορά που πολλαπλασιάζεται, επομένως, η ηχητική πίεση εκφρασμένη σε μPa επί 10, προστίθενται 20 dB στη στάθμη των dB. Έτσι, τα 200 μPa αντιστοιχούν σε 20 dB (ως προς 20 μPa), τα 2000 μPa σε 40 dB κ.ο.κ.

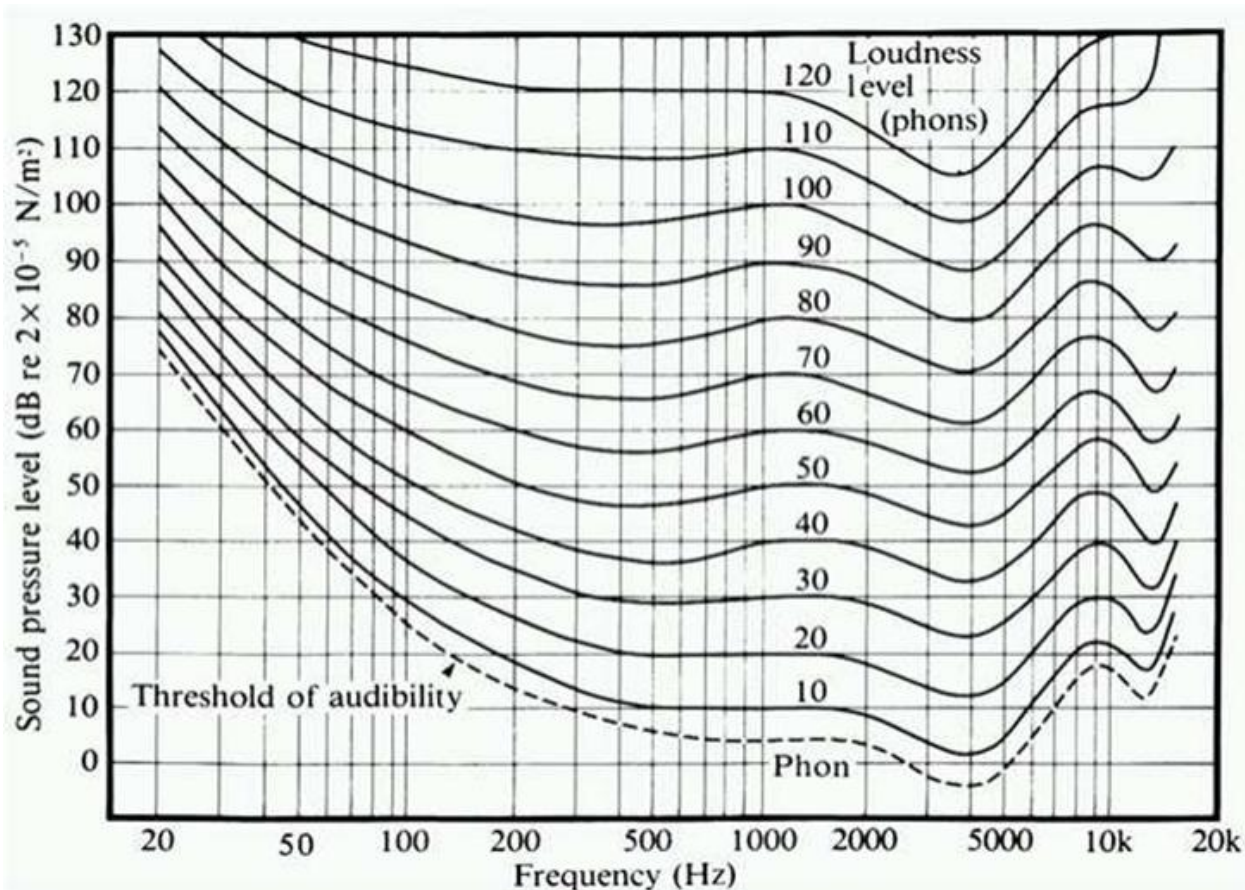
Η **κλίμακα των dB** παρέχει μία πολύ καλύτερη προσέγγιση της αντίληψης από τον άνθρωπο της σχετικής ακουστότητας του ήχου, συγκριτικά με την κλίμακα των μPa . Αυτό συμβαίνει επειδή το ανθρώπινο αυτί αντιδρά σε λογαριθμική μεταβολή της στάθμης ηχητικής πίεσης, γεγονός που απεικονίζεται στη κλίμακα των ντεσιμπέλ, στην οποία το 1 dB αντιστοιχεί στην ίδια σχετική μεταβολή οπουδήποτε στην κλίμακα. Στην κλίμακα αυτή κάθε διαδοχική αύξηση της ηχητικής πίεσης κατά 3 dB αντιπροσωπεύει διπλασιασμό της ηχητικής ενέργειας.

1.1.3 Ακουστότητα Loudness)

Το πλάτος του ηχητικού κύματος αντιστοιχεί σε αυτό που ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται ως **ακουστότητα**. Το αυτί ανταποκρίνεται σε ένα πολύ μεγάλο φάσμα πλατών ηχητικών κυμάτων. Η αναλογία ανάμεσα στο κατώφλι του πόνου του αυτιού και στο κατώφλι της αίσθησης ενός ήχου, είναι της τάξεως των 120dB. Η διακριτική ικανότητα του αυτιού όσον αφορά την ακουστότητα εκτείνεται από τα 3 dB για ήχους κοντά στο κατώφλι της ακοής ως το εντυπωσιακό 0,5 dB για ηχηρούς ήχους. Είναι ενδεικτικό ότι ο άνθρωπος δεν έχει καταφέρει να κατασκευάσει ηλεκτρομηχανικά συστήματα συλλογής ηχητικών σημάτων με τέτοιες επιδόσεις στην διακριτικότητα. Μονάδα μέτρησης της ακουστότητας είναι το phon. Τόνος συχνότητας 1kHz έχει ακουστότητα τόσα phons, όσο και η στάθμη ηχητικής πίεσης σε dB. Η αίσθηση της ακουστότητας επηρεάζεται και από την συχνότητα του λαμβανομένου ηχητικού κύματος.

Οι **Fletcher** και **Munson** κατασκεύασαν μία δέσμη από καμπύλες ελάχιστης ακουστότητας (εικόνα 1.3) (οι οποίες περιγράφουν την στάθμη ηχητικής πίεσης που πρέπει να έχει ένας ήχος για να είναι μόλις ακουστός σε συνάρτηση με την συχνότητά του), όπου φαίνεται πώς η ευαισθησία της ακοής μεταβάλλεται όχι μόνο με την συχνότητα, αλλά και με την ένταση (loudness). Όσο μικρότερη είναι η ένταση, τόσο μικρότερη η ευαισθησία της ακοής και τόσο μεγαλύτερη στάθμη απαιτείται για να γίνει ακουστή μία συγκεκριμένη συχνότητα.

Οι καμπύλες Fletcher/Munson προσφέρουν ένα πρώτο κριτήριο για την συμπίεση: Οι πληροφορίες κάτω από το κατώφλι ακουστότητας μπορούν να αποκοπούν από το σήμα ή, σκεπτόμενοι αντίστροφα, μπορούν να αποθηκευθούν ανεπιθύμητα σήματα -όπως ο θόρυβος κβαντισμού- σε περιοχές όπου το κατώφλι ακουστότητας είναι υψηλό.



Εικόνα 1.3: Η δέσμη καμπυλών Fletcher και Munson δείχνουν πως μεταβάλλεται το κατώφλι ακουστότητας σε συνάρτηση με την συχνότητα και την ένταση ενός ήχου.

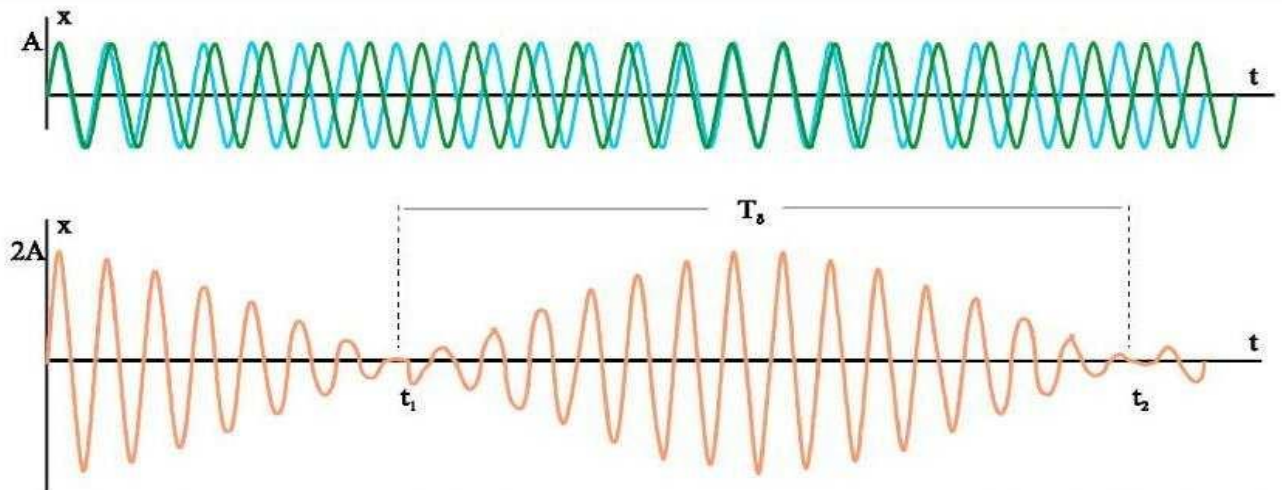
Κοντά στο κάτω φράγμα του φάσματος των ακουστικών συχνοτήτων, το αυτί είναι λιγότερο ευαίσθητο σε απαλούς ήχους αντίθετα με το κατώτερο όριο πόνου και την ικανότητα διάκρισης ηχηρών ήχων που δεν επηρεάζονται σημαντικά. Στις υψηλές συχνότητες η αλλαγή στην ευαισθησία είναι πιο απότομη, με την αίσθηση να διακόπτεται εξ ολοκλήρου στην περιοχή των 20 kHz. Η ανθρώπινη ικανότητα διάκρισης της ακουστότητας των ήχων περιορίζεται για ήχους διάρκειας μικρότερης των 200 msec. Κάτω από αυτό το όριο η αντίληψη της ακουστότητας επηρεάζεται από τη διάρκεια. Μικρότερη διάρκεια σημαίνει και μικρότερη ακουστότητα. Ηχητικά σήματα διάρκειας μεγαλύτερης των 200 msec δεν επηρεάζουν την διακριτική ικανότητα του ανθρώπου για την ακουστότητα, αν εξαιρέσουμε το γεγονός ότι ο άνθρωπος τείνει να αγνοεί ηχητικά σήματα μεγάλης διάρκειας αμετάβλητου τόνου.

1.1.4 Ύψος (Pitch)

Το **ύψος** είναι η υποκειμενική απόκριση του αυτιού, στη συχνότητα και μας επιτρέπει να κατατάξουμε τους ήχους σε οξείς, μέσους και βαρείς. Το ύψος μεταβάλλεται μη γραμμικά με τη συχνότητα, δηλαδή ίσες μεταβολές στη συχνότητα δεν προκαλούν ίδιες μεταβολές στην «αίσθηση» του ύψους. Επίσης καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει και η στάθμη του ήχου. Αν η στάθμη ενός τόνου 180Hz αυξηθεί χωρίς αλλαγή της συχνότητας, η αίσθηση του ύψους χαμηλώνει. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα ισχυρό για συχνότητες μικρότερες των 300Hz. Αντίθετα, στην περιοχή από 500 έως 3000 Hz η στάθμη δεν επηρεάζει ιδιαίτερα το ύψος. Τέλος, στην περιοχή άνω των 4000

Hz η αίσθηση του ύψους για την ίδια συχνότητα αυξάνει με τη στάθμη. Μονάδα μέτρησης του ύψους είναι το Mel. Ήχος συχνότητας 1kHz και στάθμης 60dB έχει ύψος 1000 Mel.

Ο άνθρωπος έχει περιορισμένη διακριτική ικανότητα συχνοτήτων. Εάν οι κεντρικές συχνότητες f_1 και f_2 δύο ήχων είναι πολύ κοντινές, ο διαχωρισμός τους είναι δύσκολος έως αδύνατος. Αυτό συμβαίνει διότι οι περιοχές της βασικής μεμβράνης που διεγείρονται είναι πολύ κοντά. Ο εγκέφαλος «αναγνωρίζει» ήχο με συχνότητα $(f_1+f_2)/2$ και πλάτους που μεταβάλλεται με συχνότητα $(f_1-f_2)/2$. Το διάγραμμα που προκύπτει ονομάζεται διακρότημα (εικόνα 1.4).



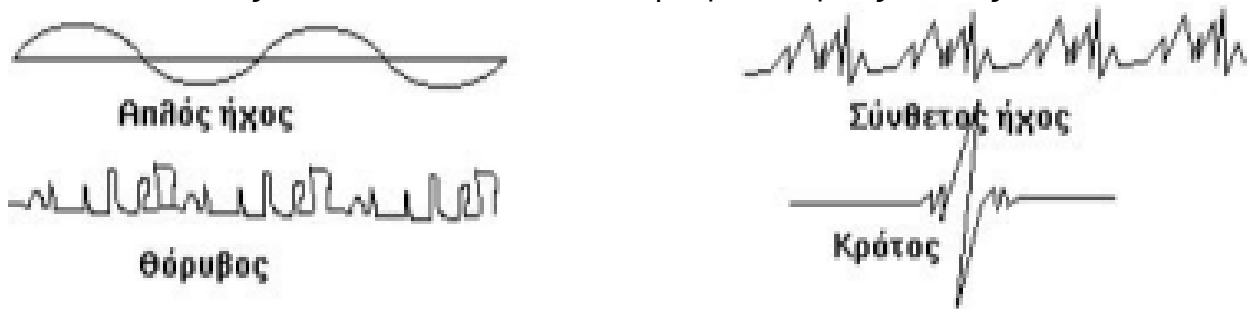
Εικόνα 1.4: Από τη σύνθεση δύο ταλαντώσεων που οι συχνότητές τους διαφέρουν πολύ λίγο (πράσινη και μπλε γραμμή) προκύπτει ιδιόμορφη περιοδική κίνηση (κόκκινη γραμμή) που παρουσιάζει διακροτήματα.

Όπως και με την αντίληψη της ακουστότητας, έτσι και η αντίληψη του ύψους γίνεται δυσκολότερη όταν η διάρκεια του ηχητικού σήματος είναι μικρότερη από 200 msec και αδύνατη για σήματα διάρκειας μικρότερα από 50 msec. Τέλος, η αντίληψη του τονικού ύψους επηρεάζεται και από το φασματικό περιεχόμενο του ηχητικού σήματος. Όσο το φασματικό περιεχόμενο παρεκκλίνει από το αρμονικό μοντέλο, η αίσθηση του τόνου μειώνεται.

1.1.5 Χροιά (Timbre)

Χροιά είναι το υποκειμενικό χαρακτηριστικό του ήχου που κάνει δυνατό το διαχωρισμό δύο τόνων της ίδιας έντασης και θεμελιώδους συχνότητας. Χρησιμοποιείται κυρίως για τον χαρακτηρισμό ήχων μουσικών οργάνων και της ανθρώπινης φωνής. Π. χ. φλάουτο και όμποε ακούγονται διαφορετικά αν και παίζουν την ίδια νότα. (Η διαφοροποίηση της χροιάς οφείλεται κυρίως στη διαφορά του πλήθους και της σχετικής στάθμης των αρμονικών ως προς τη στάθμη της θεμελιώδους συχνότητας.) Ο αντίστοιχος φυσικός όρος για τη χροιά είναι το φάσμα. Για να καταλάβουμε τη φύση της χροιάς πρέπει να γνωρίζουμε τα εξής:

- ο κρότος που είναι μια απότομη ηχητική μεταβολή,
- ο θόρυβος που αποτελείται από τυχαία μεταβολή των συχνοτήτων του,
- ο απλός που μεταβάλλεται ημιτονοειδώς μετά του χρόνου,
- ο σύνθετος, που αποτελείται από δύο ή περισσότερους απλούς



Εικόνα 1.5: Γραφικές παραστάσεις τυχαίων ήχων.

Με μαθηματικό τρόπο μπορούμε να αναλύσουμε τον κάθε σύνθετο ήχο στους επιμέρους απλούς που τον συνθέτουν. Τα χαρακτηριστικά που θα πάρουμε θα είναι η ένταση και η συχνότητα των συνιστούντων ήχων. Η ανάλυση αυτή ονομάζεται ανάλυση κατά **Fourier**. Από τους ήχους αυτούς, αυτόν με τη χαμηλότερη συχνότητα ονομάζουμε πρώτο αρμονικό ή θεμελιώδη. Ο τρίτος πχ. αρμονικός θα έχει τριπλάσια συχνότητα από τον θεμελιώδη. Η χροιά εξαρτάται από το πλήθος των απλών ήχων που αποτελούν τον ήχο που ακούμε καθώς το αυτί μας πραγματοποιεί μια ιδιότυπη "ανάλυση κατά Fourier". Όταν πρωτακούμε έναν ήχο, το αποτέλεσμα της ανάλυσης είναι η χροιά, το χρώμα, η ποιότητα του ήχου.

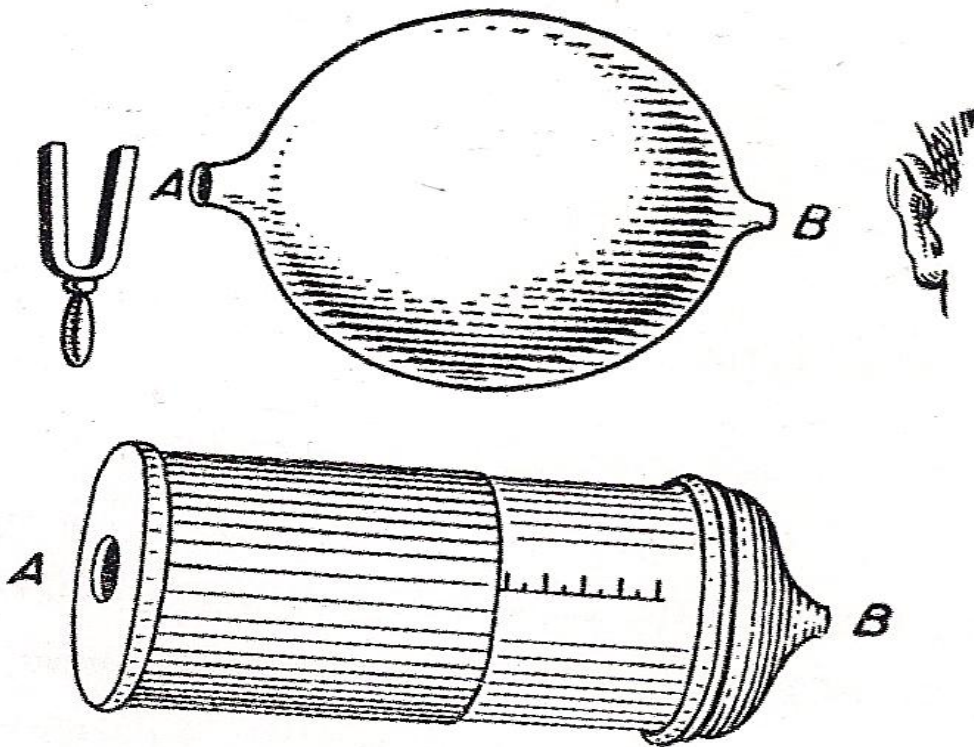
1.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΗΧΟΥ

Η λύση της κυματικής εξίσωσης δηλώνει ότι στην περίπτωση που έχουμε μια απλή πηγή, η εκπεμπόμενη ηχητική ενέργεια «μεταφέρεται» από μία μόνο συχνότητα. Το ηχητικό κύμα είναι τότε μία αρμονική (ημιτονοειδής) κυματομορφή. Στην περίπτωση που η ίδια ή άλλη πηγή εκπέμπει και άλλο κύμα διαφορετικής συχνότητας; η τελική κυματομορφή θα είναι η σύνθεση των δύο πρώτων. Οι συνήθεις ηχητικές πηγές εκπέμπουν ήχους που η ενέργειά τους κατανέμεται σε περισσότερες από μία συχνότητες και τελικός ήχος που προκύπτει είναι σύνθετος (περιοδικός ή όχι). Μπορούμε δηλαδή να υποθέσουμε στηριζόμενοι στην αρχή της επαλληλίας ότι η στιγμιαία τιμή της πίεσης ενός σύνθετου ήχου αποτελείται από ένα άθροισμα απλών ήχων μιας συχνότητας και δίδεται από την γενική σχέση:

$$p(t) = \sum_{i=1}^N p_i(t)$$

Το πρόβλημα που συναντάμε συνήθως είναι το αντίστροφο. Θέλουμε δηλαδή να αναλύσουμε δηλαδή ένα σύνθετο ήχο σε άλλους απλούστερους. Στις αρχές του αιώνα και στα τέλη του προηγούμενου η ανάλυση αυτή στηριζόταν στο φαινόμενο του συντονισμού. Δύο από τους μεθόδους αυτούς ήταν τα αντηχεία του Helmholtz και το αντηχείο του Konig. Τα αντηχεία αυτά ήταν κοίλα δοχεία συνήθως σφαιρικού σχήματος από χαλκό ή γυαλί. Το κάθε δοχείο είχε διαφορετικό μέγεθος και συντονιζόταν σε διαφορετική συχνότητα. Κάθε δοχείο είχε δύο στόμια. Ο προς ανάλυση ήχος ανάλογα με τις τις συχνότητες που περιείχε συντόνιζε τα αντίστοιχα

ηχεία. Ο συντονισμός γινόταν αντιληπτός, τοποθετώντας το αυτί στο πίσω στόμιο των αντηχείων.



Σχήμα 1.2.1: Αντηχεία Helmholtz και Konig

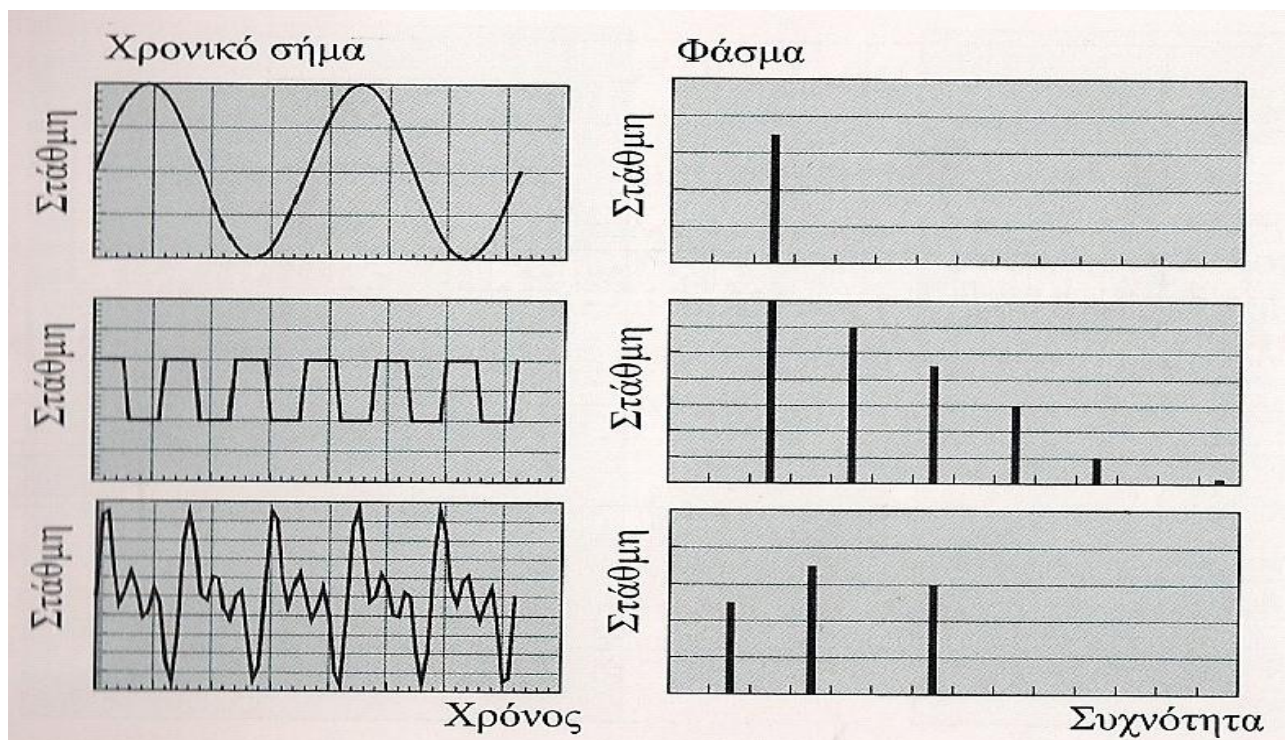
Τον σύνθετο ήχο όπως έδειξε ο Fourier με αντίστροφη διαδικασία μπορούμε να τον αναλύσουμε σε απλούς ήχους. Αν κατασκευάσουμε ένα ραβδόγραμμα, του πλάτους (ή συνηθέστερα της στάθμης) του κάθε απλού ήχου συναρτήσει της συχνότητας, τοποθετώντας μία ράβδο με ύψος ανάλογο με την ενέργεια που μεταφέρει στην αντίστοιχη συχνότητα, προκύπτει μία γραφική παράσταση που ονομάζεται φάσμα.

Όταν το ηχητικό σήμα είναι ένας απλός τόνος, το φάσμα του θα περιλαμβάνει μία και μόνο ράβδο. Αν το ηχητικό σήμα είναι περιοδικό τότε το φάσμα του θα αποτελείται από άπλες γραμμές τοποθετημένες στις συχνότητες που αντιστοιχούν στους απλούς ήχους στους οποίους αναλύεται. Θα περιέχει δηλαδή μια αρμονική κύματομορφή με συχνότητα ίση με αυτή του περιοδικού σύνθετου ήχου που ονομάζεται θεμελιώδης, και μια άπειρη (θεωρητικά) σειρά άλλων απλών ήχων διαφορετικού πλάτους με συχνότητες που η κάθε μια θα είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της συχνότητας της θεμελιώδους (αρμονικές). Όταν ο ήχος δεν είναι περιοδικός, που είναι και η πιο συνηθισμένη περίπτωση, το φάσμα θα είναι μία συνεχής γραμμή. Σε όλες τις περιπτώσεις το φάσμα θα δείχνει πως κατανέμεται η ισχύς του σήματος στις διάφορες συχνότητες.

Σήμερα η ανάλυση του ήχου κατά συχνότητα γίνεται με ειδικά μηχανήματα που ονομάζονται αναλυτές φάσματος. Οι αναλυτές φάσματος διακρίνονται σε δύο κατηγορίες στους ψηφιακούς και τους αναλογικούς. Στην πρώτη κατηγορία το σήμα μετατρέπεται σε ψηφιακό και με διάφορους αλγόριθμους [όπως ο ταχύς

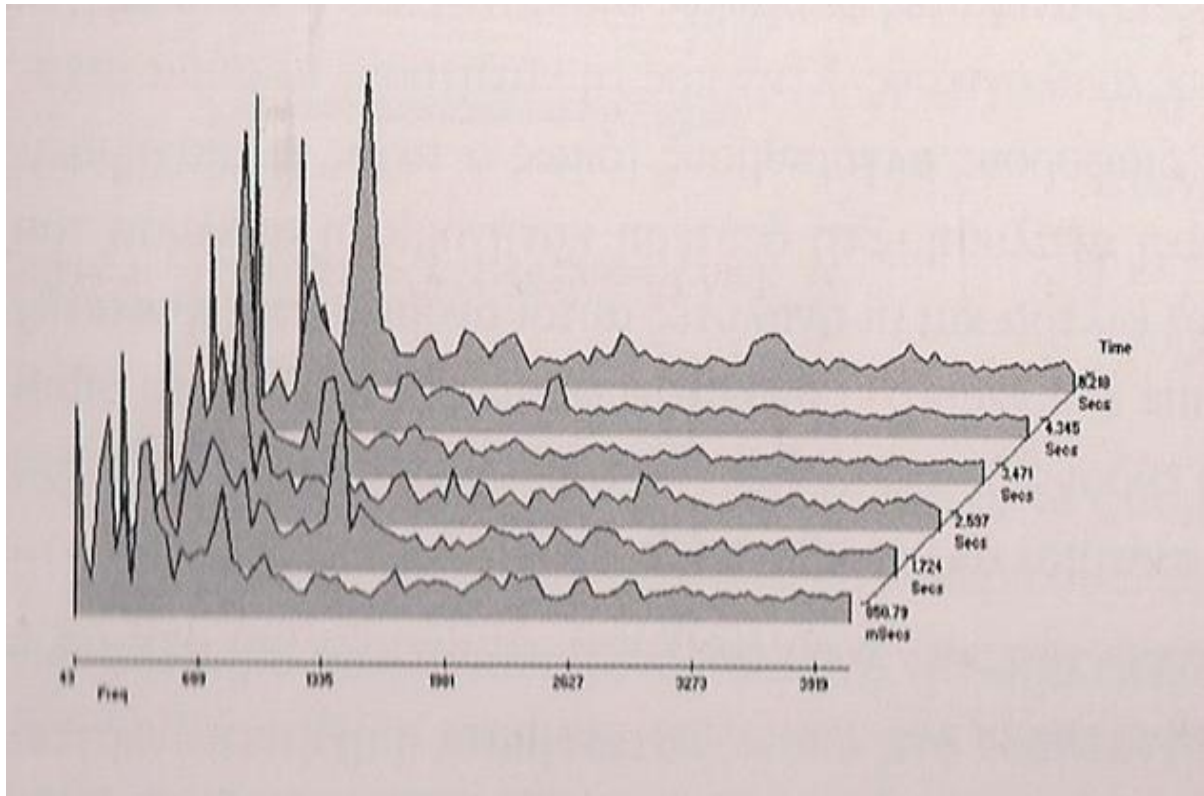
μετασχηματισμός Fourier (PPT)], γίνεται η ανάλυση. Στη δεύτερη κατηγορία η ανάλυση του σήματος γίνεται με αναλογικά φίλτρα και οι αναλυτές αυτοί ονομάζονται αναλυτές πραγματικού χρόνου (real time analyzers). Ο αναλυτής φάσματος «κόβει» το σήμα σε μικρά κομμάτια χρονικού εύρους Δt και στην συνέχεια τα αναλύει. Το αποτέλεσμα της ανάλυσης συνήθως φαίνεται σε μία οθόνη.

Στο φάσμα όπως αυτό προκύπτει από την ανάλυση ενός ακουστικού σήματος, δεν υπάρχει άμεση σχέση των συχνοτήτων στις οποίες κατανέμεται η ηχητική ενέργεια με το χρόνο. Για το λόγο αυτό όταν θέλουμε να συσχετίσουμε τον χρόνο εκπομπής με τις συχνότητες στις οποίες κατανέμεται η ηχητική ενέργεια χρησιμοποιούμε το Φασματογράφημα (Spectrogram)



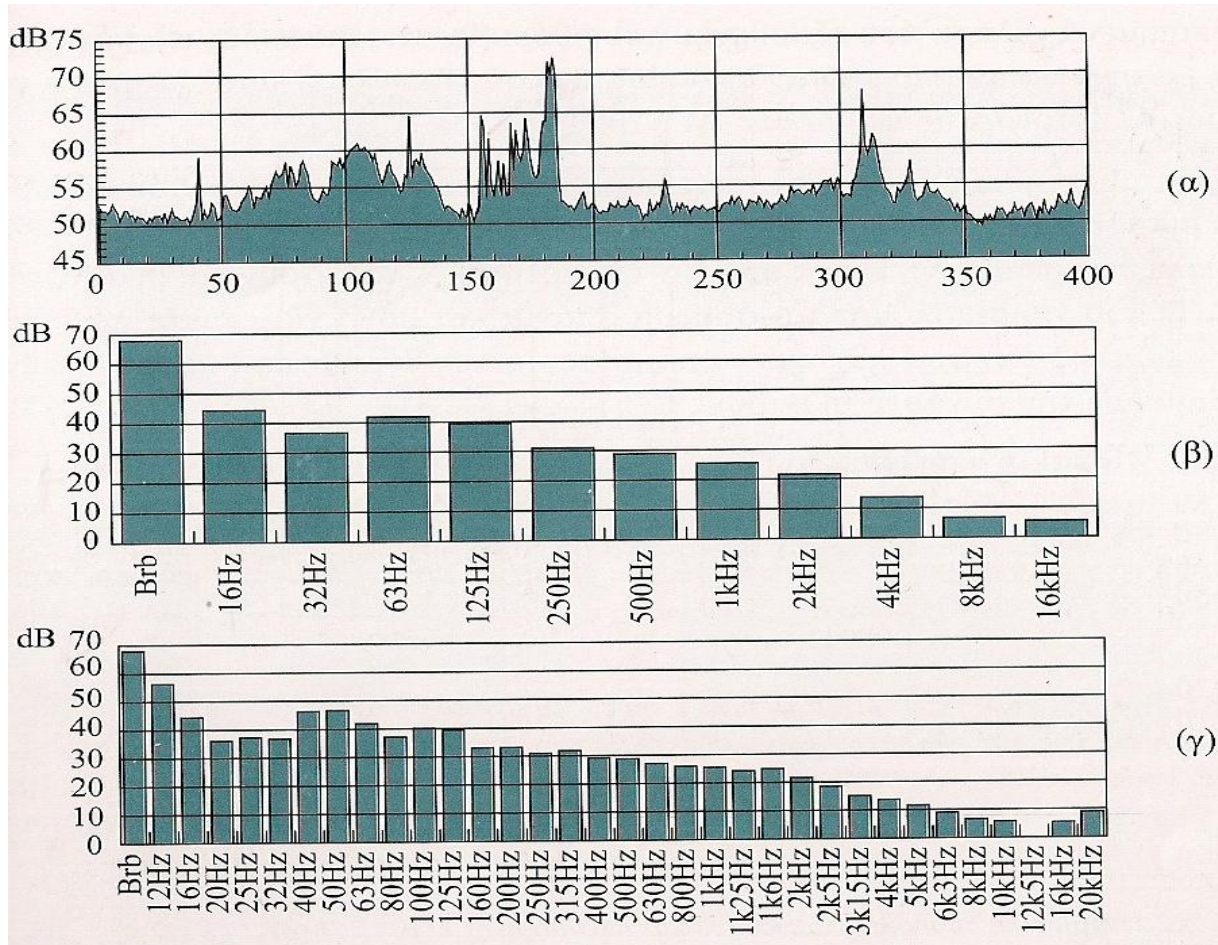
Σχήμα 1.2.2 : Διάφοροι ήχοι με τα φάσματά τους . Στους απλούς ήχους το φάσμα αποτελείται από μια μόνο γραμμή στην αντίστοιχη συχνότητα. Ο ήχος στο κάτω μέρος είναι η σύνθεση των απλών ήχων που βρίσκονται πιο πάνω.

Το φασματογράφημα είναι τρισδιάστατο, δίνει την κατανομή των συχνοτήτων που προκύπτει από την ανάλυση Fourier συναρτήσει του χρόνου. Στην ανάλυση της φωνής πχ η κυματομορφή που προκύπτει από την καταγραφή της ομιλίας χωρίζεται σε μικρά τμήματα Δt τις φωνητικές μονάδες και για κάθε μια υπολογίζεται το φάσμα. Το παρακάτω σχήμα (1.2.3) δίνει το φασματογράφημα μιας φράσης. Το φασματογράφημα δίνει ποιοτική κυρίως μελέτη του φασματικού περιεχομένου κάθε φράσης.



Σχήμα 1.2.3 : Φασματογράφημα φωνής

Η ανάλυση του ήχου κατά συχνότητα μπορεί να γίνει και με την βοήθεια αναλογικών ή ψηφιακών φίλτρων. Τα φίλτρα είναι ηλεκτρονικές συσκευές που αφήνουν να περάσει από μέσα τους μόνο ο ήχος που οι συχνότητες του βρίσκονται στην περιοχή (ζώνη) $f, f+\Delta f$. Συνήθως η ζώνη αυτή είναι οκτάβα, $1/3, 1/10, 1/N$ οκτάβας κτπ. Στο φάσμα σε κάθε ζώνη αντιστοιχεί μια ράβδος της οποίας το ύψος είναι ανάλογο με την ηχητική ενέργεια που περιέχεται σε αυτήν (ζωνική στάθμη). Το σχήμα 1.2.4 α δείχνει την μεταβολή της στάθμης ενός ήχου. Στα σχήματα 1.2.4β και 1.2.4γ φαίνονται τα φάσματα του ήχου όταν αυτά ληφθούν μέσω φίλτρων $1/1$ και $1/3$ της οκτάβας αντίστοιχα.

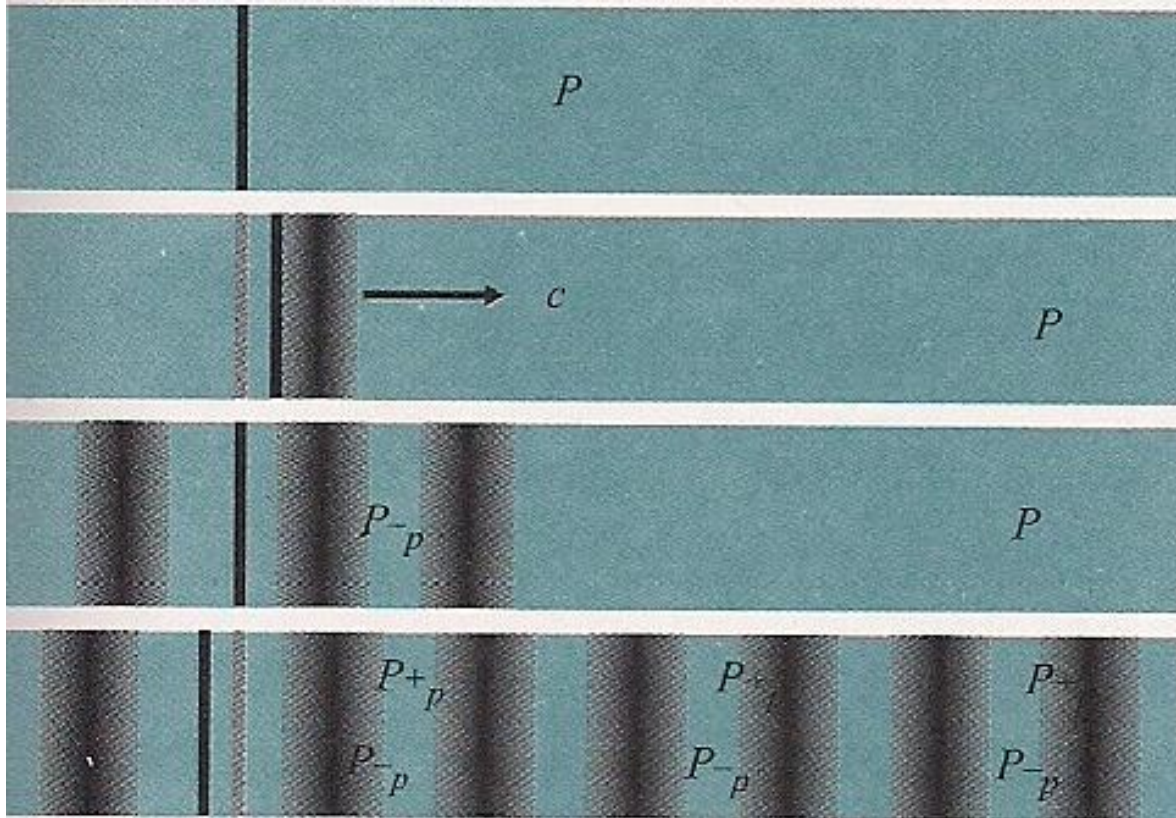


Σημα 1.2.4 : Κυματομορφή τυχαίου θορύβου

2. ΠΑΡΑΓΩΓΗ – ΔΙΑΔΩΣΗ – ΜΕΤΡΗΣΗ ΗΧΟΥ

2.1 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΧΟΥ

Καθώς η επιφάνεια κινείται δεξιά ωθεί τα μόρια του αέρα που βρίσκονται σε επαφή με αυτό στην ίδια κατεύθυνση τα οποία με τη σειρά τους ωθούν στην ίδια κατεύθυνση τα αμέσως γειτονικά τους



Σχήμα 2.1.1 Παραγωγή ηχητικών κυμάτων

Αποτέλεσμα της ενέργειας αυτής είναι η αύξηση της ατμοσφαιρικής πίεσης ηρεμία P κατά p , κατά τη φορά κίνησης του σκέλους. Η διαταραχή αυτή διαδίδεται με πεπερασμένη ταχύτητα στον αέρα.

Αντίθετα από την άλλη μεριά της επιφάνειας λόγω του ότι η ταχύτητα των μορίων του αέρα είναι πεπερασμένη, θα δημιουργηθεί μία υποπίεση p . Καθώς η επιφάνεια επιστρέφει στην αρχική της θέση με τον ίδιο μηχανισμό, από τη δεξιά μεριά θα δημιουργηθεί μια υποπίεση ενώ από την αριστερή υπερπίεση. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται περιοδικά και έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή και διάδοση ενός μηχανικού κύματος το οποίο όταν φθάσει στο αυτί μας θα διεγείρει το αισθητήριο δημιουργώντας το αίσθημα του ήχου.

2.1.1 Βασικές παραδοχές

Για την μελέτη παραγωγής και διάδοσης του ήχου σε κάποιο μέσο γίνονται οι

εξής παραδοχές:

1. Το μέσο διάδοσης πρέπει να είναι ελαστικό και να υπακούει στους νόμους της διατήρησης της μάζας και της ορμής.

2. Λόγω του ότι οι μεταβολές της πίεσης που οφείλονται στη διάδοση των ηχητικών κυμάτων στην ακουστική περιοχή των συχνοτήτων, είναι ταχείς, δεν συμβαίνει ροή θερμότητας από το περιβάλλον σε ένα στοιχείο όγκου και οι μεταβολές της πίεσης μπορούν να θεωρηθούν αδιαβατικές (αν και σε μερικές περιπτώσεις ιδίως σε χαμηλές συχνότητες θεωρούνται ισόθερμες). Συνεπώς όταν σε ένα στοιχείο όγκου V ενός αερίου λόγω της διάδοσης του ήχου μεταβάλλεται η πίεση, ισχύουν οι σχέσεις:

$$PV^\gamma = \text{σταθ}, \quad \gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

όπου C_p , C_v οι ειδικές θερμότητες του αερίου υπό σταθερή πίεση και όγκο αντίστοιχα,

P η ατμοσφαιρική πίεση

V το θεωρούμενο στοιχείο όγκου

Στην ανάλυση που ακολουθεί για την περιγραφή των ηχητικών κυμάτων χρησιμοποιούμε την ακουστική πίεση (p), την ποσότητα που μετρούν τα μικρόφωνα. Με τον όρο ηχητική πίεση στην ακουστική εννοούμε τη δημιουργούμενη υπερπίεση ή υποπίεση (σε σχέση με την ατμοσφαιρική πίεση) που δημιουργεί το ηχητικό κύμα, κατά τη διάδοσή του. Σε αντίθεση με την ακουστική πίεση με τον όρο στατική πίεση (P) εννοούμε την στατική πίεση του μέσου διάδοσης, που για την περίπτωση διάδοσης του ήχου στον αέρα είναι η ατμοσφαιρική πίεση.

Άλλες ποσότητες που χρησιμοποιούμε είναι :

- Το μήκος κύματος (λ) που είναι η απόσταση μεταξύ δύο μέγιστων ή ελάχιστων της πίεσης, ή σύμφωνα με τον (ΕΛΟΤ 263.2) μήκος κύματος ή κυματικό μήκος ενός διαδομένου επίπεδου αρμονικού κύματος σε ισότροπο μέσο διάδοσης είναι η απόσταση ανάμεσα σε δύο κυματικά μέτωπα που έχουν μεταξύ τους χρονική διαφορά ίση με την περίοδο του κύματος.
- Τον γωνιακό ή κυκλικό κυματάριθμο (k) που είναι το γινόμενο του κυματάριθμου επί 2π
- Την συχνότητα του ήχου (j) που είναι η συχνότητα ταλάντωσης των σωματιδίων του ελαστικού μέσου λόγω της διάδοσης του ηχητικού κύματος,
- Την ταχύτητα των σωματιδίων (u) που είναι η ταχύτητα ταλάντωσης των σωματιδίων του μέσου διάδοσης. Με τον όρο σωματίδια εννοούμε μικρές ποσότητες του μέσου διάδοσης, (που υποτίθεται συνεχές), και όχι απαραίτητα μόρια. Σε μερικές περιπτώσεις όμως, όπως π.χ, κατά τη διάδοση υπήσυχων ηχητικών κυμάτων στον αέρα, η ταχύτητα των σωματιδίων περιγράφει τη

μακροσκοπική μέση κίνηση των μορίων του αέρα, η οποία επικαλύπτει την κίνηση Brown.

- Την ταχύτητα όγκου (U) που ορίζεται ως ο ρυθμός ροής του μέσου διάδοσης από μία επιφάνεια εμβαδού s κάθετη στην ταχύτητα ροής. Η ταχύτητα όγκου και η σωματιδιακή ταχύτητα συνδέονται με την σχέση:
 $U = su$
- Την ταχύτητά του ήχου (c) που είναι η ταχύτητα διάδοσης της διαταραχής (ταχύτητα του κύματος) στο υλικό μέσο.

2.2 ΉΧΟΣ ΩΣ ΚΥΜΑΤΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

2.2.1 Επίπεδο ηχητικό κύμα

Οι μεταβολές της πίεσης δημιουργούν ένα επίπεδο κύμα. Επίπεδο θεωρείται το κύμα που διαδίδεται μόνο κατά μια διεύθυνση π.χ, τη διεύθυνση των X . Δηλαδή υποθέτουμε ότι στο επίπεδο YZ που είναι κάθετο στη διεύθυνση διάδοσης X , η πίεση την ίδια χρονική στιγμή παίρνει την ίδια τιμή. Τα μέτωπα κύματος (επιφάνειες στις οποίες φθάνει το κύμα σε χρόνο t) στην περίπτωση αυτή είναι επίπεδα απείρων διαστάσεων, παράλληλα μεταξύ τους οποιαδήποτε χρονική στιγμή, κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης.

Επίπεδο μπορεί να θεωρηθεί ένα κύμα όταν αυτό παράγεται από πηγή της οποίας η επιφάνεια εκπομπής είναι ένα επίπεδο για μικρές αποστάσεις, ή πρακτικά από μια σημειακή πηγή που βρίσκεται σε πολύ μεγάλη (άπειρη θεωρητικά) απόσταση, όπου οι σφαιρικές επιφάνειες κύματος εκφυλίζονται σε επίπεδες. Για την περίπτωση επίπεδων κυμάτων που διαδίδονται σε μέσο χωρίς απώλειες (πχ απορρόφηση) η πίεση του ήχου ικανοποιεί τη σχέση :

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$$

Η σχέση αυτή είναι μονοδιάστατη κυματική εξίσωση γεγονός που αποδεικνύει την κυματική φύση του ήχου.

2.2.2 Σφαιρικό ηχητικό κύμα

Σφαιρικό ηχητικό κύμα θεωρείται το κύμα του οποίου το μέτωπο κύματος είναι επιφάνεια σφαίρας και παράγεται από σημειακή πηγή όταν αυτή εκπέμπει ομοιόμορφα σε όλες τις κατευθύνσεις στον χώρο. Η σχέση που ικανοποιεί την ηχητική πίεση είναι η κυματική εξίσωση στον χώρο των τριών διαστάσεων και στην περίπτωση διάδοσης σε μέσο χωρίς απώλειες δίνεται από την σχέση :

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

2.3 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΗΧΟΥ ΣΤΑ ΜΕΣΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ

2.3.1 Διαμήκη ηχητικά κύματα (longitudinal waves)

Στα κύματα αυτά όπως είναι γνωστό η ταχύτητα διάδοσης με την ταχύτητα ταλάντωσης των σωματιδίων του μέσου σε κάθε σημείο του ηχητικού κύματος είναι παράλληλες. Η ταχύτητα του ήχου που εξαρτάται από το μέσο διάδοσης για την περίπτωση διαμηκών κυμάτων που διαδίδονται σε αέρια, δίνεται από τη σχέση:

$$c = \sqrt{\frac{B}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{MB}}$$

Όπου c , η ταχύτητα του ήχου

T , η απόλυτη θερμοκρασία του αερίου,

R , σταθερά ($R = 8317 \text{ m/s/}^\circ\text{K}$),

γ , Ο λόγος των ειδικών θερμοτήτων υπό σταθερά πίεση και υπό σταθερό όγκο, (για τον αέρα η τιμή $\gamma = 1,4$ είναι ικανοποιητική),

MB , το μοριακό βάρος του μέσου διάδοσης,

ρ , η πυκνότητα του μέσου διάδοσης

B , το μέτρο συμπιεστότητας των ρευστών.

Η σχέση για τον αέρα στη θερμοκρασία των 0°C δίνει ταχύτητα του ήχου:

$$C = 331 \text{ m/s}$$

Στην περίπτωση που υπάρχει υγρασία τα μόρια των υδρατμών, αυτά μεταβάλλουν το μέσο μοριακό βάρος του αέρα και συνεπώς σύμφωνα με τη σχέση την ταχύτητα του ήχου. Στην περίπτωση παρουσίας υγρασίας στην ατμόσφαιρα αποδεικνύεται ότι η ταχύτητα του ήχου δίδεται από τη σχέση:

$$C_w = c \sqrt{1 - \frac{Pa}{Po} \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_w} - \frac{5}{8} \right)}$$

Όπου C_w η ταχύτητα του ήχου σε υγρό περιβάλλον,
 Pa η μερική πίεση των ατμών

Po , η ατμοσφαιρική πίεση

γ_a , γ_w , Ο λόγος των ειδικών θερμοτήτων για τον αέρα και το νερό

Προσεγγιστικά για την ταχύτητα του ήχου σε οποιαδήποτε θερμοκρασία με ικανοποιητική προσέγγιση μπορούμε να γράψουμε:

$$C = 331 + 0.6 \Theta$$

Σύμφωνα με τους διεθνείς κανονισμούς ISO 9613-1 (1993) όταν απαιτείται προσεγγιστικός προσδιορισμός της ταχύτητας του ήχου σε μια θερμοκρασία (T) χρησιμοποιείται η σχέση :

$$C = 343.2 \sqrt{\frac{T}{T_0}}$$

Όπου T η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin

$$T_0 = 293.5 \text{ } ^\circ K$$

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι η διάδοση των διαμηκών κυμάτων σε ομογενές και ισότροπο μέσο γίνεται με σταθερή ταχύτητα.

2.3.2 Εγκάρσια κύματα

Εγκάρσια που είναι τα κύματα στα οποία η ταχύτητα διάδοσης με την ταχύτητα ταλάντωσης των σωματιδίων του μέσου είναι κάθετες. Για τα εγκάρσια κύματα αποδεικνύεται ότι η ταχύτητα του ήχου , που είναι διαφορετική από αυτή για τα διαμήκη , δίνεται από την σχέση :

$$C = \sqrt{\frac{E}{2(1+\sigma)\rho}}$$

Η ταχύτητα του ήχου για τα εγκάρσια κύματα είναι μικρότερη από αυτή που ισχύει για τα διαμήκη.

Μέσο	Θερμοκρ. °C	Πυκνότη. kg/m ³	c (m/sec)	Μέσο	Θερμοκρ. °C	Πυκνότη. kg/m ³	c (m/sec)
ΑΕΡΙΑ				ΥΓΡΑ			
Αέρας	0	1.29	331	Μεθ.αλκοόλη		810	1240
Αέρας	20	1.20	343	Αιθ. αλκοόλη	12.5		1210
Αμμωνία	0		415	Αιθ. αλκοόλη	20		1170
Διοξ. άνθρακα	0	1.98	259	Χλωροφόρμιο	20	900	1000
Μονοξ. άνθρακα	0	1.25	333	Αιθέρας		740	1020
Χλώριο	0	1.98	206	Υδράργυρος	20	1350	1450
Αιθάνιο	0		308	Γλυκερίνη	15		1920
Αιθυλένιο	0		317	Πετρέλαιο	17	680	1330
Υδρογόνο	0	0.09	1270	Νερό	17		1430
Υδρογόνο	20		1330	Νερό (Θαλ.)		1030	1510
Αζωτο	0		334				
Αζωτο	20	1.25	351				
Οξ. αζώτου	0		324				
Οξυγόνο	0		316				
Οξυγόνο	20	1.43	328				
Υδρατμός	100	0.58	405				
Μεθάνιο	0	0.72	432				

Σχήμα 2.3.1 Ταχύτητα του ήχου για μερικά ρευστά

Υλικό	Μέτρο Young (N/m ²)	Λόγος Poisson	Πυκνότητα (kg/m ³)	Χαρακτηριστ. Εμπέδηση	Ταχύτητα του ήχου (m/sec)
Μέταλλα					
Αλουμίνιο	7.1×10 ¹⁰	0.33	2700	1.4×10 ⁷	5200
Μπρούντζος	10.4×10 ¹⁰	0.37	8500	2.98×10 ⁷	3500
Χαλκός	12.2×10 ¹⁰	0.35	8900	3.12×10 ⁷	3500
Μόλυβδος	1.7×10 ¹⁰	0.43	11300	1.36×10 ⁷	1200
Σίδηρος	10.5×10 ¹⁰	0.28	7700	3.35×10 ⁷	4350
Νικέλιο	21×10 ¹⁰	0.31	8800	5.15×10 ⁷	5850
Ατσάλι	19.5×10 ¹⁰	0.28	7700	4.70×10 ⁷	6100
Ψευδάργυρος	10.3×10 ¹⁰	0.17	7100	2.96×10 ⁷	3810
Δομικά Υλικά					
Γυαλί (Σκληρό)	8.7×10 ¹⁰		2400	1.44×10 ⁷	6000
Γυαλί (Μαλακό)	6×10 ¹⁰		2400	1.2×10 ⁷	5000
Γυαλί (Pyrex)	6.2×10 ¹⁰	0.24	2300	1.2×10 ⁷	5200
Γρανίτης	9.8×10 ¹⁰		2700	1.62×10 ⁷	6000
Μάρμαρο	3.8×10 ¹⁰		2600	9.88×10 ⁶	3800
Ξύλο	1.2×10 ¹⁰		650	2.8×10 ⁶	4300
Μπετόν	2.5×10 ¹⁰		2600	8.06×10 ⁶	3100
Τούβλο (συμπαγές)	2.5×10 ¹⁰		1800	6.66×10 ⁷	3700
Γύψος			650	4.42×10 ⁶	6800
Πορσελάνη	4.2×10 ¹⁰		2400	10×10 ⁶	4200
Πολυουρεθάνη	0.0019×10 ¹⁰		72	0.4 10 ⁵	513
PVC	0.0055×10 ¹⁰		66	0.6 10 ⁵	913
Λάστιχο σκληρό	0.23×10 ¹⁰	0.4	1100		2400
Λάστιχο μαλακό	0.0005×10 ¹⁰		950		1050
Μαόνι	1.1×10 ¹⁰		670	27×10 ⁵	4000
Ελατο	1.1×10 ¹⁰		510	24×10 ⁵	4700
Άρνυς	1.2×10 ¹⁰		720	29.5×10 ⁵	4100
Ρελλός			250	1.25×10 ⁵	500
Ζοντραπλακέ			600	18.4×10 ⁵	3080
Λοριοσανίδα			750	5×10 ⁵	669
Ξύλο (σκληρό)	1×10 ¹⁰		600	0.24×10 ⁷	4000
Hexiglas	0.4×10 ¹⁰	0.4	1200	0.22×10 ⁷	1830

Σχήμα 2.3.2 Χαρακτηριστικές σταθερές υλικών

2.3.3 Επιφανειακά κύματα

Επιφανειακά ή καμπτικά κύματα (Bending, Surface, Rayleigh waves) είναι τα κύματα που διαδίδονται στην ελεύθερη επιφάνεια των στερεών, και τα σωματίδια του μέσου διάδοσης διαγράφουν ελλειπτικές τροχιές με τον μεγάλο άξονα κάθετο στην επιφάνεια και εστία την θέση ισορροπίας. Στα κύματα αυτά όσο αυξάνεται η απόσταση από την επιφάνεια προς το εσωτερικό του στερεού το πλάτος μειώνεται εκθετικά. Η ταχύτητα διάδοσης του ήχου στα επιφανειακά κύματα που διαδίδονται σε επιφάνεια πάχους h δίδεται από τη σχέση :

$$c^2 = \sqrt{\frac{\omega^2 E h^2}{12 \rho S}}$$

Όπου h , το πάχος της επιφάνειας,

S , το εμβαδόν τομής της επιφάνειας,

ω , η κυκλική συχνότητα του ηχητικού κύματος.

Όπως παρατηρούμε η ταχύτητα του ήχου στα στερεά είναι μεγαλύτερη από αυτή των υγρών και των αερίων από αυτή των αερίων. Η ταχύτητα διάδοσης του ήχου, σε αντίθεση με τα εγκάρσια και διαμήκη, στα επιφανειακά κύματα εξαρτάται από τη συχνότητα πράγμα που έχει μεγάλη σημασία στη μελέτη της διάδοσης του ήχου μέσω των στερεών. Επιπλέον για τα επιφανειακά κύματα η ακουστική εμπέδηση έχει πολύ μικρές τιμές.

2.4 ΜΕΤΡΗΣΗ ΗΧΟΥ

Όπως προαναφέρθηκε, ως θόρυβος ορίζεται κάθε ανεπιθύμητος ήχος. Ο θόρυβος οφείλεται στις ηχητικές συνθήκες του χώρου και προκαλείται από την συμβολή πολλών ηχογόνων παραγόντων, όπως βροχή, άνεμος, τροχαία κίνηση, ανθρώπινες δραστηριότητες, μέσα ψυχαγωγίας (ραδιόφωνο, τηλεόραση), παρακείμενες βιομηχανικές εγκαταστάσεις και χώροι διασκέδασης, υπαίθριοι κινηματογράφοι, χώροι στάθμευσης κ.ά. Τρεις είναι οι παράγοντες που καθορίζουν την επικινδυνότητα του θορύβου:

- Η στάθμη ηχητικής πίεσης που μετράται σε dB. Το μέγεθος αυτό συνδέεται άμεσα με την ένταση (ισοδύναμα, με την ακουστότητα) του ήχου.
- Η συχνότητα (δηλαδή το ύψος) του ήχου. Μετράται σε Hz.
- Η διάρκεια της έκθεσης.

Οι μετρήσεις θορύβου πραγματοποιούνται με ένα ειδικό όργανο μέτρησης, το ηχόμετρο. Το ηχόμετρο είναι σχεδιασμένο για να ανταποκρίνεται στον ήχο κατά

τον ίδιο, κατά προσέγγιση, τρόπο όπως το ανθρώπινο αυτί και να παρέχει αντικειμενικά και επαναλαμβανόμενα αποτελέσματα μετρήσεων της στάθμης ηχητικής πίεσης L_p , η οποία αποτελεί το αποτέλεσμα μέτρησης των μεταβολών της πίεσης του αέρα. Στην περίπτωση ηχητικής μέτρησης περιβαλλοντολογικού θορύβου ησυνεχής διακύμανση της στιγμιαίας τιμής της ηχητικής πίεσης σε συνάρτηση με το χρόνο ελαχιστοποιεί την πρακτική σημασία της παραπάνω μέτρησης. Για τον λόγο αυτό έχει ορισθεί το μέγεθος **ισοδύναμη στάθμη θορύβου (L_{eq})**, το οποίο ορίζεται ως η σταθερή στάθμη ηχητικής πίεσης που θα παραγόταν από την πηγή του θορύβου, εάν η συνολική ακουστική ενέργεια του ηχητικού γεγονότος ήταν ισοκατανεμημένη στην χρονική διάρκεια T της μέτρησης.

Παράλληλα, στην πράξη κρίνεται χρήσιμη η ανάλυση του θορύβου με άλλα στατιστικής φύσης κριτήρια, όπως π.χ. η εύρεση της μέγιστης τιμής της στιγμιαίας στάθμης ηχητικής πίεσης (L_{max}) για τη διάρκεια της μέτρησης, της μέσης τιμής, κ.λ.π.

2.4.1 Όργανα μέτρησης ήχου

Λειτουργία ηχόμετρου για τη μέτρηση της στάθμης του θορύβου χρησιμοποιούμε τα ηχόμετρα. Η μετρούμενη ποσότητα ουσιαστικά είναι η rms τιμή πίεσης. Τα ηχόμετρα είναι εφοδιασμένα με ένα κύκλωμα χρόνου που δίδει δύο σταθερές χρόνου ως προς τις οποίες γίνεται ο υπολογισμός της rms τιμής. Η πρώτη σταθερά είναι 125 ms και αντιστοιχεί στην ένδειξη fast και η δεύτερη 1000 ms και αντιστοιχεί στην ένδειξη Slow. Συνήθως τα καλής ποιότητας ηχόμετρα είναι εφοδιασμένα με κύκλωμα ολοκλήρωσης για τον υπολογισμό της ισοδύναμης στάθμης και έχουν έξοδο αναλογική ή ψηφιακή για την είσοδο των δεδομένων σε υπολογιστή.

Κάθε ηχόμετρο (εικόνα 2.4.1) αποτελείται, κατά βάση, από τα ίδια επί μέρους τμήματα:

- Μικρόφωνο
- Μονάδα επεξεργασίας (Κύκλωμα ενίσχυσης, φίλτρα, επεξεργαστής)
- Μονάδα απεικόνισης αποτελεσμάτων μετρήσεων



Εικόνα 2.4.1: Ηχόμετρο του οίκου CASELLA

Το μικρόφωνο μετατρέπει το ηχητικό σήμα σε ισοδύναμο ηλεκτρικό. Ο καταλληλότερος τύπου μικροφώνου είναι το μικρόφωνο πυκνωτικού τύπου, το οποίο συνδυάζει την ακρίβεια με την σταθερότητα και την αξιοπιστία. Πριν αρχίσει η επεξεργασία του, το ηλεκτρικό σήμα που παράγεται από το μικρόφωνο, ενισχύεται από έναν προενισχυτή. Το σήμα είναι δυνατόν να υποστεί διαφόρων τύπων επεξεργασία. Συνήθως, διέρχεται από κατάλληλο σταθμιστικό κύκλωμα, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η ιδιαίτερα περίπλοκη απόκριση του ανθρώπινου αυτιού κατά συχνότητα του ακουστού ηχητικού φάσματος.

2.4.2 Κατηγορίες Ηχομέτρων

Τα ηχόμετρα ανάλογα με την ακρίβεια που έχουν διακρίνονται σε τρεις τύπους:

- Τα ηχόμετρα τύπου 1, (κατηγορία υψηλής ακρίβειας και τιμής)
- Τα ηχόμετρα τύπου 2 (μέτριας ακρίβειας με αρκετή απόκλιση σε υψηλές συνήθως συχνότητες),
- Τα ηχόμετρα τύπου εκτίμησης (survey).

Τα ηχόμετρα τύπου 1 είναι πιο ακριβή (και συνεπώς πιο ακριβά) από αυτά του τύπου 2, τα οποία έχουν σημαντικό σφάλμα σε υψηλές συνήθως συχνότητες. Το μέγιστο επιτρεπόμενο σφάλμα των ηχομέτρων ανάλογα με τον τύπο τους περιγράφεται από τους κανονισμούς της διεθνούς ηλεκτροτεχνικής επιτροπής (IEC).

2.4.3 Βαθμονόμηση οργάνων (Calibration)

Βασική προϋπόθεση για έγκυρες ηχητικές μετρήσεις αποτελεί η σωστή βαθμονόμηση του ηχομέτρου πριν από κάθε χρήση. Αυτό γίνεται συνήθως με τη βοήθεια ενός φορητού ακουστικού βαθμονομητή (εικόνα 2.2), ο οποίος εκπέμπει

συγκεκριμένη ηχητική στάθμη σε συγκεκριμένη συχνότητα (π.χ. 94dB στο 1kHz) και τοποθετείται απευθείας στο μικρόφωνο.



Εικόνα 2.4.2: Βαθμονομητές του οίκου CASELLA

2.4.4 Σταθμιστικά κυκλώματα (φίλτρα) A, B, C και D

Η ακουστότητα είναι η υποκειμενική εκδοχή της έντασης και η διαφοροποίηση έντασης – ακουστότητας δίδεται από τις καμπύλες ίσης ακουστότητας Fletcher – Munson. Ένας θόρυβος θα μπορούσε να προσδιοριστεί με τη μέτρηση της έντασης σε κάθε οκτάβα, αλλά αυτός ο τρόπος μέτρησης θα μπορούσε να εφαρμοστεί κυρίως στις περιπτώσεις όπου ο έλεγχος των πηγών γίνεται με χρήση ηχομονωτικών, τα οποία στις περισσότερες περιπτώσεις είναι αποτελεσματικά σε μια συγκεκριμένη περιοχή συχνοτήτων, οπότε ο αναλυτικός προσδιορισμός των εντάσεων του θορύβου της πηγής σε κάθε οκτάβα είναι απαραίτητος για την επιλογή του σωστού μέσου.

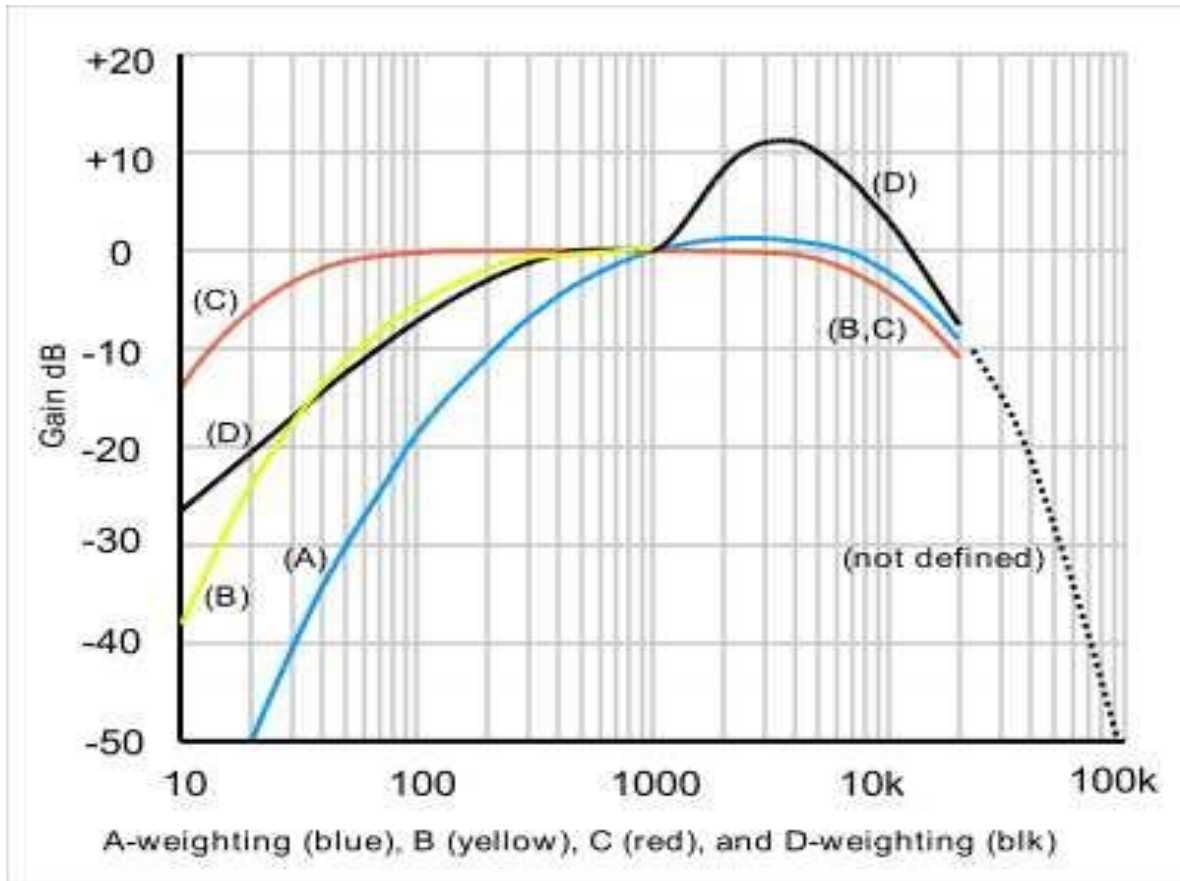
Πρακτικά, η εκτίμηση της ακουστότητας των θορύβων που δημιουργούν προβλήματα στον άνθρωπο, γίνεται με τη χρήση κατάλληλων σταθμιστικών φίλτρων, τα οποία είναι ηλεκτρονικά κυκλώματα ενσωματωμένα στους ηχομετρητές, με σκοπό να «απαλύνουν» κάποιες συχνότητες, επιτρέποντας στον μετρητή να αντιδρά περισσότερο, από ότι σε κάποιες άλλες συχνότητες (εικόνα 2.4.3).

Σταθμιστικό κύκλωμα A: Το σταθμιστικό κύκλωμα A φιλτράρει αρκετά αυστηρά τις πολύ χαμηλές συχνότητες και αντιστοιχεί στην καμπύλη ακουστότητας των 40dB στο 1KHz και 20-55dB τιμή ηχοστάθμης, προσομοιώνοντας περισσότερο από τα υπόλοιπα φίλτρα την ευαισθησία της ανθρώπινης ακοής. Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιείται διεθνώς για τη μέτρηση του θορύβου στο εργασιακό περιβάλλον.

Σταθμιστικό κύκλωμα B: Το σταθμιστικό κύκλωμα B φιλτράρει μέτρια τις πολύ χαμηλές συχνότητες με τιμές ηχοστάθμης 55-85dB.

Σταθμιστικό κύκλωμα C: Το σταθμιστικό κύκλωμα C δε φιλτράρει σχεδόν καθόλου τις χαμηλές συχνότητες, αντιστοιχώντας σε καμπύλες ακουστότητας των 70 και 100dB περίπου, στο 1KHz με τιμές ηχοστάθμης 85-140dB.

Σταθμιστικό κύκλωμα D: Χρησιμοποιείται σε ειδικές περιπτώσεις, όπως στη μέτρηση του θορύβου από αεροσκάφη.

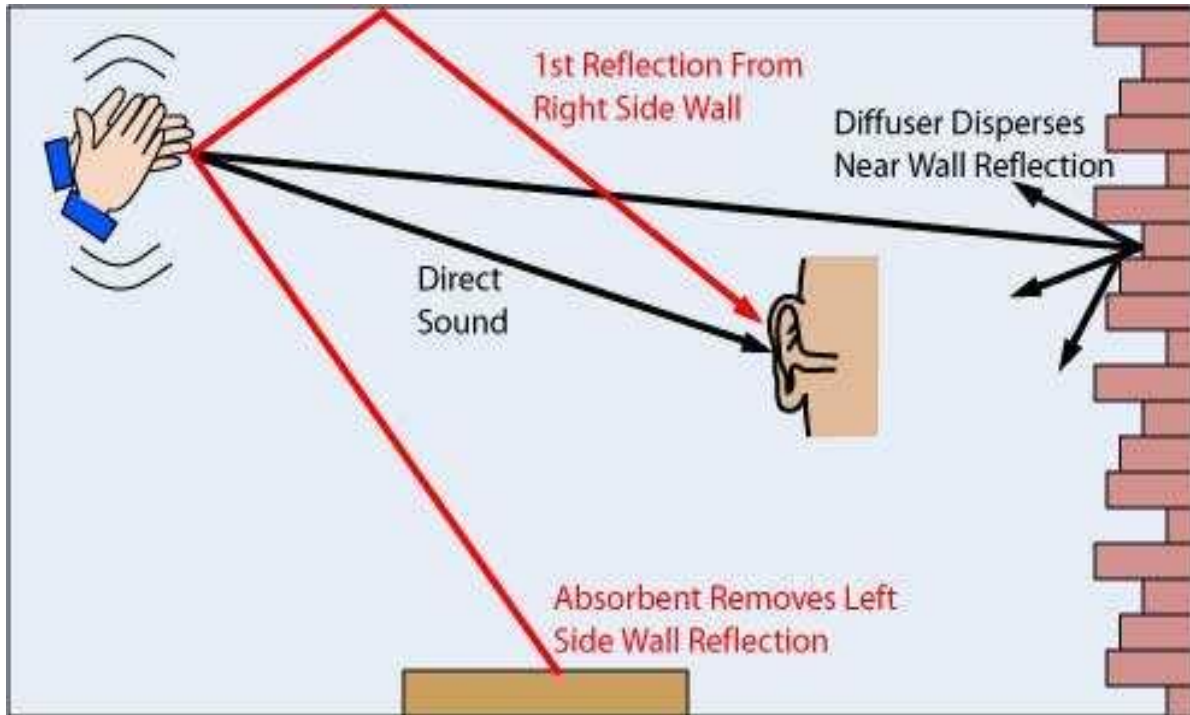


Εικόνα 2.4.3 Φασματικές καμπύλες στάθμησης τύπου A, B, C και D.

2.5 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ

2.5.1 Ανάκλαση (Reflection)

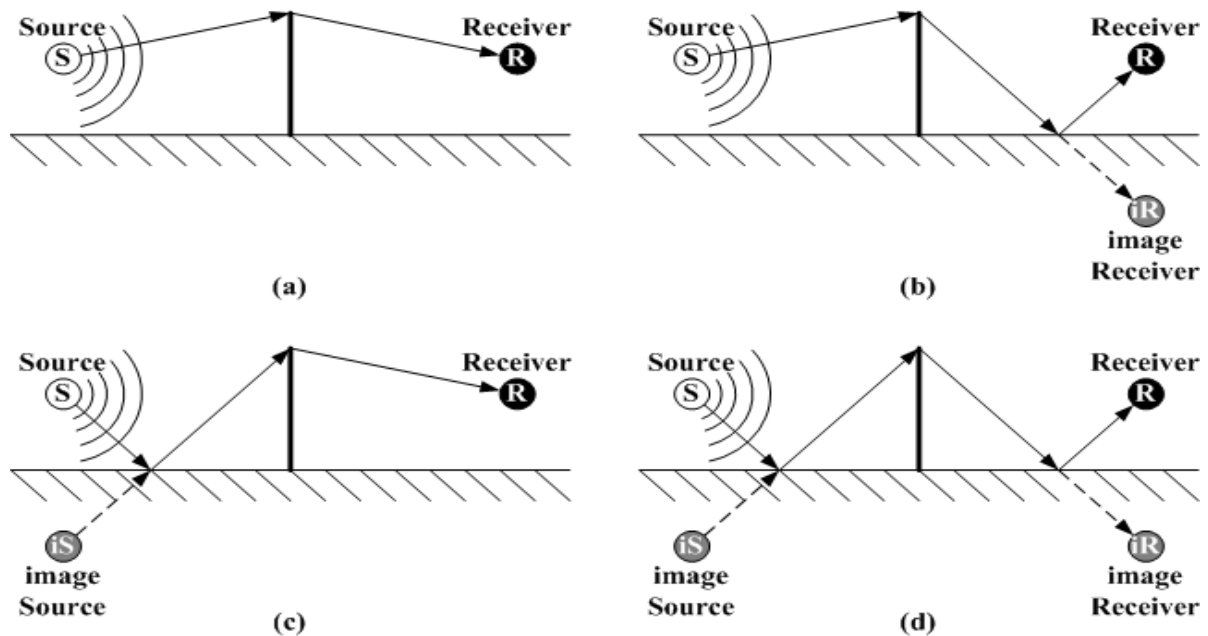
Όταν ένα ξένο σώμα διαφορετικής ύλης από αυτή του μέσου παρεμβάλλεται στην κατεύθυνση των ηχητικών κυμάτων, τότε αυτά υφίστανται ανάκλαση (εικόνα 2.5.1). Εάν για παράδειγμα, σταθούμε μπροστά από έναν τοίχο και κτυπήσουμε παλαμάκια, τα κύματα που θα φτάσουν στον τοίχο θα αναγκαστούν να αλλάξουν κατεύθυνση. Αν το εμπόδιο βρίσκεται σε απόσταση μεγαλύτερη από 17 μέτρα, τότε παρατηρούμε πως ο κρότος που δημιουργήσαμε επαναλαμβάνεται - αυτό το φαινόμενο ονομάζεται ηχώ. Αν όμως το εμπόδιο βρίσκεται σε απόσταση μικρότερη από 17 μέτρα, τότε ο ήχος απλώς δυναμώνει. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αντήχηση και στηρίζεται στο ότι τα ηχητικά κύματα ανακλώνται και επιστρέφουν ενισχυμένα όταν συναντήσουν ένα πολύ κοντινό εμπόδιο.



Εικόνα 2.5.1: Σχηματική παράσταση της ανάκλασης.

2.5.2 Περίθλαση (Diffraction)

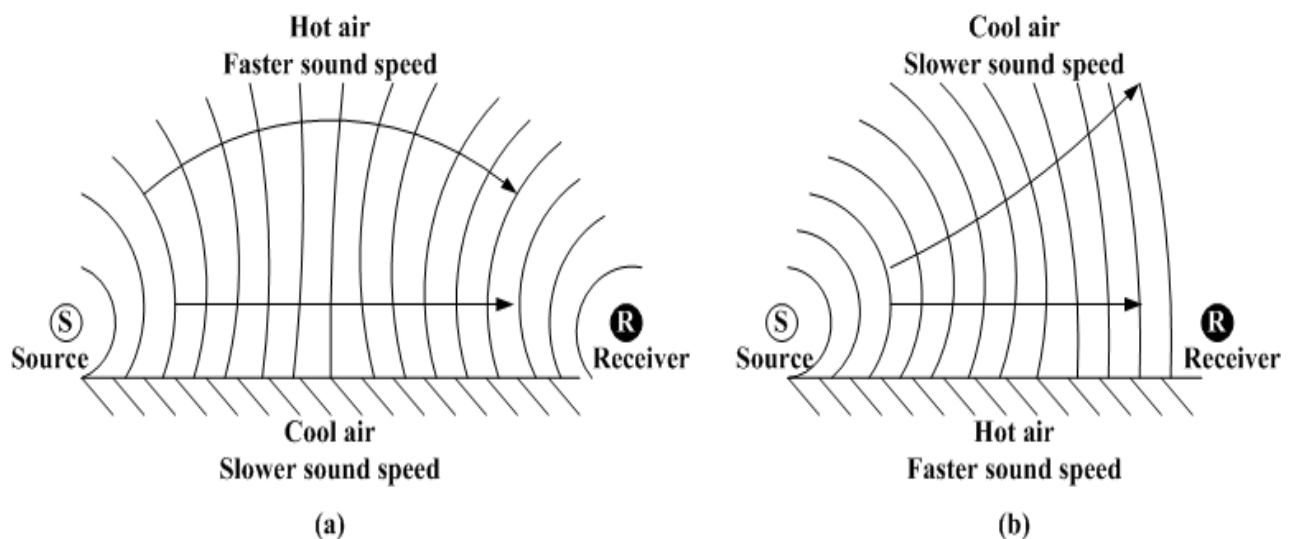
Τα ηχητικά κύματα που ανακλώνται αλλάζουν γωνία κατεύθυνσης. Τα κύματα που περνούν γύρω από ένα εμπόδιο ή που το διαπερνούν (εξαιτίας, λόγου χάριν, κάποιου ανοίγματος στο σώμα) έχουν τη δυνατότητα να κυρτώνονται και γεμίζουν τον χώρο πέρα του εμποδίου. Αυτή η ιδιότητα ονομάζεται περίθλαση (εικόνα 2.5.2).



Εικόνα 2.5.2: Διάφορες διαδρομές περίθλασης.

2.5.3 Διάθλαση (Refraction)

Όταν η υπόσταση του υλικού μέσου αλλάζει σταδιακά, τότε τα κύματα μπορεί να αλλάξουν κατεύθυνση. Το φαινόμενο αυτό λέγεται διάθλαση και παρατηρείται, για παράδειγμα, όταν ο ήχος ταξιδεύει σε στρώματα αέρα με διαφορετική θερμοκρασία (εικόνα 2.5.3).



Εικόνα 2.5.3 : Διάθλαση σε στρώματα αέρα με διαφορετική θερμοκρασία.

2.5.4 Παρεμβολή (Interjection)

Όταν ηχητικά κύματα παραγόμενα από δυο διαφορετικές πηγές διαδίδονται στο ίδιο μέσο, τότε η διατάραξη που επιδέχεται κάθε μάζα προκύπτει από το άθροισμα των μετατοπίσεων που θα επιδεχόταν από κάθε κύμα ξεχωριστά. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται παρεμβολή. Η παρεμβολή μπορεί να είναι *καταστρεπτική* όταν τα ηχητικά κύματα ακυρώνουν πλήρως τη μετατόπιση που θα σημειωνόταν σε σημείο του μέσου.

2.6 ΤΙ ΑΚΟΥΕΙ Ο ΑΝΘΡΩΠΟΣ

Όπως έχει ήδη ορισθεί, ήχος είναι οποιαδήποτε μεταβολή της πίεσης που μπορεί να γίνει ακουστή από το ανθρώπινο αυτί. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι η ζώνη συχνοτήτων που αντιλαμβάνεται ένας υγιής, νέος άνθρωπος εκτείνεται από 16 Hz έως 20 KHz. Σε όρους ηχητικής πίεσης οι ακουστοί ήχοι περιλαμβάνονται από το κατώφλι ακοής των 0 dB έως το όριο του πόνου που υπερβαίνει τα 120 dB (εικόνα 2.6.1).

Το ανθρώπινο αυτί δεν είναι εξίσου ευαίσθητο σε όλες τις συχνότητες. Μεγαλύτερη ευαισθησία παρουσιάζει σε ήχους μεταξύ 2 και 5 KHz ενώ είναι

λιγότερο ευαίσθητο σε χαμηλότερες και υψηλότερες συχνότητες. Το γεγονός αυτό αποκτά ιδιαίτερη σημασία κατά τη μέτρηση του θορύβου, δεδομένου ότι δύο ήχοι ίσης έντασης αλλά διαφορετικών συχνοτήτων κρίνονται υποκειμενικά ως ήχοι διαφορετικής ακουστότητας. Η ακουστότητα ενός ήχου είναι μέγεθος που σχετίζεται άμεσα με το μέτρο του υποκειμενικού αισθήματος της έντασης του ήχου που αντιλαμβάνεται ο φυσιολογικός ακροατής.

Η διαφοροποίηση της ευαισθησίας ανάλογα με τη συχνότητα, είναι πιο έντονη στις χαμηλές στάθμες ηχητικής πίεσης σε σύγκριση με τις υψηλές. Οι παλμικοί θόρυβοι δημιουργούν ακόμα ένα πρόβλημα κατά την αξιολόγηση της ακουστότητας. Ως παλμικός θόρυβος ορίζεται ο μεταβλητός θόρυβος που αποτελείται από μία ή περισσότερες εξάρσεις ηχητικής ενέργειας (ηχητικούς παλμούς) κάθε μία με διάρκεια μικρότερη από ένα δευτερόλεπτο.

Λόγω της μικρής διάρκειας των παλμικών ήχων (λιγότερο του 1 δευτερολέπτου) το αυτί παρουσιάζει μειωμένη ευαισθησία στην αντίληψη της ακουστότητάς τους. Οι ερευνητές συμφωνούν γενικά στο εξής: η υποκειμενικά αντιληπτή ακουστότητα ήχων βραχύτερης διάρκειας των 70 msec είναι μικρότερη από εκείνη που παράγουν ήχοι της ίδιας στάθμης ηχητικής πίεσης αλλά μεγαλύτερης διάρκειας.



140 DECIBELS

Immediate danger to hearing
Gunshot, Jet engine at take-off

120 DECIBELS

Risk of hearing damage in 7.5 minutes
Rock concert, Sandblasting



110 DECIBELS

Risk of hearing damage in 30 minutes
Snowmobile from driver's seat

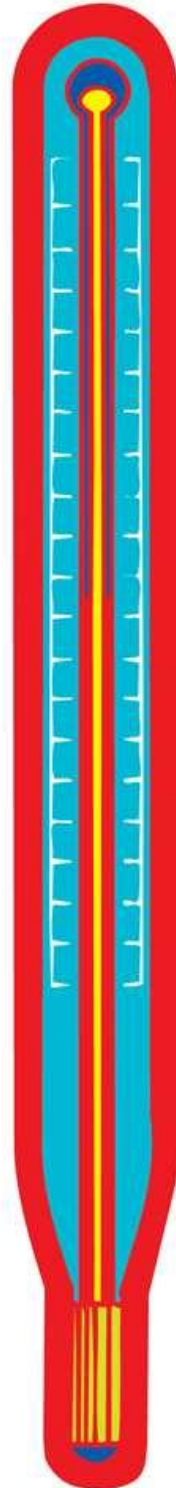


100 DECIBELS

Risk of hearing damage in 2 hours
Chainsaw, Stereo headphones

90 DECIBELS

Risk of hearing damage in 8 hours
Lawn mower, Truck traffic



NOISE THERMOMETER

125 DECIBELS

Pain threshold
Air raid siren, Firecracker



115 DECIBELS

Risk of hearing damage in 15 minutes
Baby's cry, Stadium football game



105 DECIBELS

Risk of hearing damage in 1 hour
Jackhammer, Helicopter



95 DECIBELS

Risk of hearing damage in 4 hours
Motorcycle, Power Saw



85 DECIBELS

Beginning of OSHA regulations

30 DECIBELS

Faint sound
Whisper



©1997, 2004 Sight & Hearing Association. All Rights Reserved.

Sight & Hearing Association: 1-800-992-0424 * 674 Transfer Road, St. Paul, MN 55114 * www.sightandhearing.org

Εικόνα 2.6: Διάφορα επίπεδα θορύβου.

2.7 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΘΟΡΥΒΟΥ

Ο θόρυβος αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες υποβάθμισης του περιβάλλοντος και επομένως της ποιότητας ζωής . Το είδος των επιπτώσεων του θορύβου στην ανθρώπινη υγεία ήταν για πολλά χρόνια βασικό πεδίο έρευνας και μελέτης. Σήμερα έχει επαρκώς τεκμηριωθεί ότι οι επιπτώσεις του θορύβου στον άνθρωπο διακρίνονται σε φυσιολογικές και ψυχολογικές . Σημειώνεται ότι, σύμφωνα με την Παγκόσμια Οργάνωση Υγείας (W.H.O.), "υγεία" δεν θεωρείται μόνο η απουσία αρρώστιας αλλά γενικότερα η φυσική και ψυχολογική ευεξία.

Τρεις περιπτώσεις που συνδέουν το θόρυβο με την υγεία είναι αναγνωρισμένες πλέον διεθνώς :

- Ο θόρυβος επιδρά δυσμενώς στο σύστημα ακοής του ανθρώπου. Υπάρχει αποδεδειγμένα ένας βιολογικός μηχανισμός σύμφωνα με τον οποίο ο θόρυβος προκαλεί ουσιαστικές δυσμενείς επιπτώσεις στην ακοή με τη μορφή παροδικής ή μόνιμης ακουστικής απώλειας.
- Ο θόρυβος επιδρά δυσμενώς στην ψυχική και σωματική υγεία, δεδομένης της συνεισφοράς του στη δημιουργία άγχους (stress).
- Ο θόρυβος έχει καθοριστική επίπτωση στους ανθρώπους που ήδη πάσχουν από κάποια αρρώστια ή μη ομαλή φυσιολογία.

Ορισμένα μέρη του πληθυσμού είναι περισσότερο ευπαθή στις ψηλότερες στάθμες θορύβου, παραδείγματος χάριν αυτοί που πάσχουν από υπέρταση ή που έχουν ψυχικά προβλήματα κλπ. Τέλος, εκτός των παραπάνω επιπτώσεων που αφορούν στην υγεία, η ενόχληση από το θόρυβο έχει επιπτώσεις στην ικανότητα απόδοσης του ατόμου και κατ' επέκταση στην Εθνική Οικονομία.

ΟΙ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΕΡΕΣ ΠΗΓΕΣ ΘΟΡΥΒΟΥ

Οι πιο σημαντικές πηγές θορύβου, που ευθύνονται για την υποβάθμιση του ακουστικού περιβάλλοντος, είναι οι ακόλουθες :

- Η κυκλοφορία των μέσων μεταφοράς κάθε είδους
- Οι βιομηχανικές και βιοτεχνικές εγκαταστάσεις
- Οι εγκαταστάσεις αναψυχής και διασκέδασης
- Οι οικιακές συσκευές

Ο περιοχές με ιδιαίτερο πρόβλημα υποβάθμισης του ακουστικού περιβάλλοντος, όπως προκύπτει από τα στοιχεία του Υπουργείου Περιβάλλοντος, είναι σχεδόν όλες οι αστικές περιοχές της χώρας. Βεβαίως το πρόβλημα είναι σαφώς εντονότερο στα μεγάλα αστικά κέντρα όπως στην **Αθήνα**, (που συγκεντρώνει το 40% του πληθυσμού, το 50% της βιομηχανικής και βιοτεχνικής δραστηριότητας, το 55 % των οχημάτων και το 70 % των Υπηρεσιών), στη **Θεσσαλονίκη** κλπ.

Εκτός από τις μεγάλες αστικές περιοχές, εντονότατο πρόβλημα θορύβου αντιμετωπίζουν και σχεδόν όλες οι τουριστικές περιοχές της χώρας. Οι συνέπειες

φαίνεται ότι επηρεάζουν τόσο την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών, με αποτέλεσμα τη μείωση του τουριστικού ρεύματος, όσο και την ποιότητα ζωής των μονίμων κατοίκων αυτών των περιοχών. Το Υπουργείο Περιβάλλοντος έχει εντάξει, στο Β' ΚΠΣ, ένα **ειδικό έργο αντιμετώπισης του θορύβου στις τουριστικές περιοχές**, με στόχο την διαμόρφωση στρατηγικής για την εφαρμογή δέσμης ειδικών μέτρων και παρεμβάσεων.

3.ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ

3.1 ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΘΟΡΥΒΟΣ

Ως **θόρυβος** ορίζεται:

- κάθε ακανόνιστος απεριοδικός σύνθετος ήχος του οποίου η στιγμιαία τιμή αυξομειώνεται, γενικά, με τυχαίο τρόπο
- κάθε δυσάρεστος ή ανεπιθύμητος ήχος

Θόρυβος συνήθως είναι ο ήχος που δεν φέρει καμία πληροφορία και που η έντασή του συνήθως μεταβάλλεται τυχαία στο χρόνο. Η λέξη θόρυβος συνήθως χρησιμοποιείται με την έννοια του ήχου που είναι ανεπιθύμητος από τον ακροατή. Παρεμβάλλεται με τους επιθυμητούς ήχους και είναι πιθανόν να είναι επιβλαβής ψυχολογικά. Ο θόρυβος δεν έχει κάποιο συγκεκριμένο φυσικό χαρακτηριστικό που να του δίνει την δυνατότητα να διαχωριστεί από τον επιθυμητό ήχο. Κανένα όργανο δεν μπορεί να κάνει διαχωρισμό μεταξύ θορύβου και ήχου. Μόνο η ανθρώπινη αντίδραση. Επίσης θόρυβος λέγεται και κάθε ανεπιθύμητη ηλεκτρική διαταραχή μέσα σε μια γραμμή μετάδοσης ή σε μια ηλεκτρική διάταξη. Στην περίπτωση αυτή ο θόρυβος χαρακτηρίζεται

«ηλεκτρικός θόρυβος» σε αντίθεση με τον «ακουστικό θόρυβο».

Οι θόρυβοι προέρχονται από το φυσικό ή το ανθρωπογενές περιβάλλον και για τον λόγο αυτό ονομάζονται περιβαλλοντικοί θόρυβοι. Κάποιοι κοινοί τύποι περιβαλλοντικού θορύβου είναι οι εξής:

Ανθρωπογενείς:

- Από μεταφορές: π.χ.: αεροσκάφη, τρένα, οχήματα
- Από βιομηχανικά κτίρια: π.χ.: εργοστάσια, μηχανήματα
- Από εμπορικά κτίρια: π.χ.: κτίρια γραφείων, συστήματα κλιματισμού, εστιατόρια, μπαράκια
- Από εργοτάξια: π.χ.: εκσκαφές, κατεδαφίσεις, ανακαινίσεις
- Από κατοικίες: π.χ.: μουσικά όργανα, τηλεόραση, κατοικίδια
- Από δημόσιους χώρους: π.χ.: λαϊκές αγορές, παιδικές χαρές, δρόμοι
- Από προϊόντα: π.χ.: συναγερμοί κτιρίων και αυτοκινήτων, κόννες

Φυσικοί:

- Από τη φύση: π.χ.: βροντές, εκρήξεις ηφαιστείων, τυφώνες

3.2 ΕΙΔΗ ΘΟΡΥΒΩΝ

3.2.1 Θόρυβος τυρβώδους ροής

Ο θόρυβος που παράγεται σε μικρές αποστάσεις είναι όμοιος με το θόρυβο που παράγεται από τετράπλο. Αιτία της παραγωγής του θορύβου αυτού είναι η τυρβώδης ροή. Για τη δημιουργούμενη πίεση μπορούμε να γράψουμε:

$$p(x, t) \cong \left(\frac{M}{D}\right)^2 \frac{D^3 u^2 p}{4 \pi r} \cong \frac{p D}{4 \pi r c^2} u^4$$

όπου D η διάμετρος της ηχητικής πηγής (π.χ, η διάμετρος του στομίου εξόδου) Για την ένταση αντίστοιχα μπορούμε να γράψουμε:

$$I(x, t) \cong \frac{p^2 D^2}{16 \pi^2 c^4 (\rho c)_o} u^8$$

Το $(\rho c)_o$ είναι η πυκνότητα του μέσου διάδοσης και η ταχύτητα του ήχου στο σημείο του αποδέκτη ενώ P η πυκνότητα στο σημείο παραγωγής.

Η παραπάνω σχέση δηλώνει ότι η ένταση του ήχου, που αντιστοιχεί στην εκπεμπόμενη ισχύ, είναι ανάλογη με την όγδοη δύναμη της ταχύτητας ροής, και αποτελεί το νόμο του Lighthill. Η στάθμη ακουστικής ισχύος της πηγής εξαρτάται αφ' ενός μεν από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της πηγής αφ' ετέρου αλλά και από τις παραμέτρους της ροής. Για τη στάθμη ακουστικής ισχύος μπορούμε να γράψουμε τη σχέση:

$$L_w = L_{w0} + 20 \log D + 80 \log u$$

όπου L_{w0} χαρακτηριστική σταθερά της πηγής που προσδιορίζεται συνήθως πειραματικά.

3.2.2 Θόρυβος μεταβαλλόμενων δυνάμεων

Ο θόρυβος που παράγεται σε μεγάλες αποστάσεις είναι όμοιος με τον θόρυβο που παράγεται από δίπολο. Αιτία παραγωγής του θορύβου αυτού είναι οι μεταβαλλόμενες δυνάμεις. Για την ακουστική πίεση και ένταση που προέρχεται από την πηγή αυτού του θορύβου μπορούμε να γράψουμε:

$$p(x, t) \cong \left(\frac{M}{D}\right) \frac{D^2 u^2 p}{4 \pi r} \cong \frac{p D}{4 \pi r} u^3$$

Για τη δε στάθμη ισχύος:

$$I(x, t) \cong \frac{p^2 D^2}{16 \pi^2 c^4 (\rho c) o} u^6$$

Οι παραπάνω σχέσεις δηλώνουν ότι ο εκπεμπόμενος θόρυβος από αυτήν την αιτία είναι ανάλογος της έκτης δύναμης της ταχύτητας ροής.

3.2.3 Θόρυβος μη σταθερής ροής

Η τρίτη συνιστώσα αντιστοιχεί στην ταλάντωση των στερεών μερών (πχ σωληνώσεων). Για την πίεση και την ακουστική ένταση που προέρχεται από την τρίτη συνιστώσα παραγωγής θορύβου, η οποία μπορεί να προσομοιωθεί με μονόπολο, μπορούμε να γράψουμε:

$$p(x, t) \cong \left(\frac{M}{D}\right) \frac{D^2 u^2 p}{4 \pi r} \cong \frac{p D}{4 \pi r} u^2$$

$$I(x, t) \cong \frac{p^2 D^2}{16 \pi^2 c^4 (\rho c) o} u^4$$

Αιτία παραγωγής του θορύβου αυτού είναι η κυμαινόμενη κίνηση των στερεών. Για τη στάθμη ισχύος της πηγής αυτής μπορούμε να γράψουμε :

$$L_w = L_{w0} + 20 \log D + 40 \log u$$

3.2.4 Θόρυβος πρόσκρουσης των jet

Όταν κοντά στο στόμιο ενός jet βρεθεί μία μεταλλική σκληρή επιφάνεια, τότε το αέριο καθώς προσκρούει στην επιφάνεια σχηματίζονται ασταθείς δυνάμεις με αποτέλεσμα παραγωγή επί πλέον θορύβου σε υψηλές κυρίως συχνότητα. Οι διακυμάνσεις της πίεσης είναι όμοιες με αυτές των διπόλων. Ο προσδιορισμός της στάθμης του θορύβου αυτού είναι πολύ δύσκολο να προβλεφθεί με μαθηματικές σχέσεις, ωστόσο μετρήσεις που έγιναν έδειξαν ότι μπορεί να αυξηθεί η στάθμη του παραγόμενου θορύβου των jet κατά 10-15 dB στις υψηλές συχνότητες. Η στάθμη αυτή αυξάνει όταν η επιφάνεια πρόσκρουσης δεν είναι επίπεδη αλλά παρουσιάζει ανωμαλίες και για τον λόγο αυτό όπου είναι δυνατόν οι επιφάνειες πρόσκρουσης πρέπει να είναι λείες.

3.2.5 Θόρυβος των ρευστών σε σωληνώσεις

Ο θόρυβος που προέρχεται από τα συστήματα των σωληνώσεων συνήθως είναι αμελητέος, υπάρχουν όμως περιπτώσεις (κυρίως όταν έχουμε ροή αερίων) που ο θόρυβος αυτός υπερβαίνει το θόρυβο που εκπέμπεται από τη μηχανή. Στις περιπτώσεις που υπάρχουν μεγάλοι συμπιεστές, αντλίες ή παρόμοιες συσκευές, οι σωληνώσεις θα πρέπει να υπολογίζονται σε συνδυασμό με το είδος της μηχανής ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή μείωση του θορύβου. Τη σπουδαιότητα του θορύβου των σωληνώσεων την καταλαβαίνει κανείς αν λάβει υπόψη του το γεγονός: εάν ο θόρυβος από τις σωληνώσεις είναι ο ίδιος με το θόρυβο της μηχανής, μηδενίζοντας το θόρυβο της μηχανής επιτυγχάνει μείωση της ολικής στάθμης μόνο κατά 3 dB. Γενικά ο θόρυβος ροής στις σωληνώσεις αυξάνεται με την ταχύτητα ροής.

Αύξηση της διατομής του σωλήνα σημαίνει μείωση της ταχύτητας και συνεπώς μείωση του θορύβου. Από την άλλη μεριά όμως αύξηση της διατομής συνεπάγεται αύξηση της επιφάνειας εκπομπής και συνεπώς αύξηση του εκπεμπόμενου θορύβου. Ο θόρυβος του καυστήρα ή του κυκλοφορητή πχ μεταδίδεται μέσω του συστήματος των σωληνώσεων.

Η μεγάλη επιφάνεια των θερμαντικών σωμάτων ευνοεί την εκπομπή του θορύβου. Από τα δυο παραπάνω αντικρουόμενα γεγονότα ισχυρότερο είναι το πρώτο με συνέπεια αύξηση της διατομής τελικά να σημαίνει μείωση του θορύβου. Στην περίπτωση ροής αερίου από ευθύ σωλήνα η αντίσταση της ροής που οφείλεται στην τριβή, είναι η κύρια αιτία παραγωγής θορύβου. Η μηχανική ισχύς που παράγει το θόρυβο είναι ανάλογη με την πτώση πίεσης που οφείλεται στην τριβή. Η εκπεμπόμενη ακουστική ισχύς δίνεται από τη σχέση:

$$W_a = \frac{\eta (\Delta p) m}{\rho} = \eta_a (\Delta p) A u$$

όπου A το εμβαδόν διατομής του σωλήνα σε m²,
u η μέση ταχύτητα σε m/sec,

P η πυκνότητα του αερίου,

η_a η ακουστική απόδοση και

m η παροχή σε kg/sec.

Η ολική στάθμη πίεσης στο εσωτερικό των σωληνώσεων υπολογίζεται από τη παραπάνω σχέση. Για τον προσδιορισμό της στάθμης πίεσης που εκπέμπεται στο περιβάλλον πρέπει να ληφθεί υπόψη η ηχομείωση του υλικού των σωληνώσεων. Για τον υπολογισμό αυτό χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση, που είναι παρόμοια με τον νόμο της μάζας :

$$R_w = 17 \log(mf) - 48$$

όπου m η επιφανειακή μάζα (kg/m²) και f η συχνότητα.

Οι τύποι αυτοί είναι προσεγγιστικοί και δίνουν μικρότερη στάθμη από την πραγματική από 2 έως 4 dB για αέρια με πυκνότητα περίπου ίση με την πυκνότητα του αέρα και μεγαλύτερη κατά 2 έως 4 dB για αέρια υψηλής πυκνότητας (περίπου 30 φορές την πυκνότητα του αέρα.)

Για γραμμές κενού η ακουστική ισχύς δίνεται από τη σχέση:

$$W_a = 1.2 \eta A u^3$$

3.2.6 Ταλαντώσεις και συντονισμός σωληνώσεων

Μηχανικές ταλαντώσεις

Οι ταλαντώσεις των σωληνώσεων αποτελούν συνήθως σημαντική πηγή

εκπομπής θορύβου. Οι δονήσεις των αντλιών ή του συμπιεστή μεταδίδονται μέσω των σωληνώσεων και του ρευστού που ρέει σ' αυτές (όπου ο ήχος έχει μικρότερη απόσβεση).

Οι σωληνώσεις με τη σειρά τους εκπέμπουν το θόρυβο στο περιβάλλον. Σε γενικές γραμμές μείωση των ταλαντώσεων σημαίνει και μείωση του θορύβου. Μηχανική μόνωση συνεπώς των ταλαντωμένων επιφανειών βελτιώνει σημαντικά την εκπεμπόμενη στάθμη. Λάστιχα, ελατήρια, εύκαμπτοι σύνδεσμοι, τσόχες είναι μερικά από τα χρησιμοποιούμενα υλικά για τη μόνωση των ταλαντώσεων. Επένδυση των σωληνώσεων με απορροφητικό υλικό περιορίζει σημαντικά το θόρυβο. Η χρήση εύκαμπτων συνδέσμων στις σωληνώσεις περιορίζει σημαντικά την μετάδοση των ταλαντώσεων.

Συντονισμός των σωληνώσεων

Στην περίπτωση που υπάρχει κάποιο σύστημα που περιλαμβάνει φυγοκεντρικές αντλίες ή γενικότερα περιστροφικές μηχανές, τότε το σύστημα ταλαντούται σε συγκεκριμένες συχνότητες. Οι ταλαντώσεις αυτές διαδίδονται μέσω της κατασκευής σε όλο το δίκτυο. Κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις είναι δυνατόν να σχηματιστούν στάσιμα κύματα στις σωληνώσεις, με αποτέλεσμα το συντονισμό τους και την αύξηση της στάθμης του εκπεμπόμενου θορύβου. Η συχνότητα συντονισμού του σωλήνα είναι συνάρτηση του μήκους του και της ταχύτητας του ήχου στο ρευστό.

Η θεμελιώδης και οι αρμονικές συχνότητα; ταλάντωση ς των σωληνώσεων δίδονται από τις σχέσεις:

- Σωλήνας πακτωμένος στα δυο άκρα του:

$$f = \frac{fu}{2l}$$

Όπου k σταθερά με τιμές 1,2,3,4 ... ,
 l το μήκος του σωλήνα,

u ταχύτητα ροής στο ρευστό.

- Σωλήνας ελεύθερος στο ένα άκρο του:

$$f = \frac{(2k + 1)u}{2l}$$

Οι συχνότητες αυτές μεταβάλλονται όταν παρεμβληθούν στις σωληνώσεις διάφορα στοιχεία (πχ, βάνες), όταν υπάρχει καμπύλωση των σωληνώσεων, όταν αλλάζει η διάμετρος των σωληνώσεων κ.λπ. Ειδικότερα όταν σε κάποιο δίκτυο υπάρχουν πολλές βάνες τότε αυτές λειτουργούν σαν δεσμοί ταλαντώσεων. Οι αποστάσεις μεταξύ τους δεν θα πρέπει να είναι ίδιες ώστε τα τμήματα των σωληνώσεων που μεσολαβούν να μη συντονίζονται όλα μαζί.

Γωνίες και εμπόδια σε σωληνώσεις

Απότομες γωνίες και εμπόδια στους σωλήνες δημιουργούν επιπρόσθετο στροβιλισμό και συνεπώς περισσότερο θόρυβο. Για την αποφυγή του θορύβου αυτού, θα πρέπει να αυξηθεί η ακτίνα καμπυλότητας του αγωγού ή να ομαλοποιηθούν οι γωνίες. Ένας καλός εμπειρικός κανόνας σχεδιασμού είναι ο εξής:

$$r \geq 5d$$

Όπου r η ακτίνα καμπυλότητας κάθε στροφής
Και d η διάμετρος των σωληνώσεων

Στην περίπτωση αεραγωγών ο παραγόμενος θόρυβος εξασθενεί ανάλογα με το μήκος των σωληνώσεων και το σχήμα της τομής τους. Μεγάλοι ορθογώνιας διατομής αγωγοί έχουν μικρότερη μείωση του θορύβου από αντίστοιχους μικρότερης διατομής.

3.2.7 Θόρυβος των συστημάτων κλιματισμού.

Πηγές θορύβων

Όταν, ένα κτίριο διαθέτει σύστημα κλιματισμού τότε κατά γενικό κανόνα μειώνεται ο θόρυβος που προέρχεται από το περιβάλλον, όπως π.χ. ο κυκλοφοριακός θόρυβος διότι τα παράθυρα και οι πόρτες είναι κλειστές. Αν η κατασκευή είναι θερμομονωτική (π.χ., έχει διπλά παράθυρα), τότε η μείωση του εξωτερικού θορύβου είναι ακόμη μεγαλύτερη διότι πολλά (όχι όλα) από τα χρησιμοποιούμενα στοιχεία προσφέρουν συγχρόνως και ηχομόνωση. Οι συσκευές κλιματισμού όμως δημιουργούν τα εξής προβλήματα:

Προσθέτουν νέες πηγές θορύβου.

Μεταδίδουν εύκολα τον παραγόμενο θόρυβο μέσω των αεραγωγών στους διαφόρους χώρους. Οι κυριότερες πηγές θορύβου των, κλιματιστικών μηχανημάτων είναι ο θόρυβος του συμπιεστή, ο θόρυβος των ανεμιστήρων, ο θόρυβος των αεραγωγών και ο θόρυβος που προέρχεται από τις γρίλιες εξόδου του αέρα. Η στάθμη ισχύος του θορύβου που προέρχεται από τις γρίλιες εξόδου των αεραγωγών είναι ανάλογη με την 6η δύναμη της ταχύτητας ροής και μπορεί να προσεγγισθεί με την παρακάτω σχέση:

$$L_w \cong 30 + 60 \log u \text{ dB/m}^2$$

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

Ο θόρυβος που παράγεται στο χώρο A μαζί με αυτόν που μεταφέρεται από το συμπιεστή μεταδίδονται μέσω των αεραγωγών στους υπολοίπους χώρους. Στις ενώσεις, στα σημεία καμπής και γενικότερα στα σημεία ασυνέχειας των αεραγωγών δημιουργείται θόρυβος, του οποίου η στάθμη είναι ανάλογη με την 5η ή 6η δύναμη

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

Θόρυβος ανεμιστήρων

Υπάρχουν δυο κυρίως τύποι ανεμιστήρων στα συστήματα κλιματισμού: οι αξονικοί και οι φυγοκεντρικοί. Οι φυγοκεντρικοί με τη σειρά τους διακρίνονται σε τρεις τύπους ανάλογα με την κλίση των πτερυγίων τους. Ως σχετική ακουστική ισχύς ορίζεται η στάθμη της ακουστικής ισχύος σε συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων με στάθμη αναφοράς τη μέση ακουστική ισχύ ολοκλήρου του φάσματος. Η επιλογή του καλύτερου ανεμιστήρα από πλευράς εκπεμπόμενου θορύβου είναι συνάρτηση της στατικής πίεσης και της παροχής.

Φυγοκεντρικοί ανεμιστήρες

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

Η πρώτη συνιστώσα του εκπεμπόμενου θορύβου αποτελείται από ορισμένους τόνους συγκεκριμένης συχνότητας και αντιστοιχεί στο θόρυβο που παράγεται από τα πτερύγια. Η συχνότητα των τόνων δίνεται από τη σχέση:

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

όπου B ο αριθμός των πτερυγίων,
N η συχνότητα περιστροφής,

n η τάξη των αρμονικών, n =1,2,3 ...

Αιτία του θορύβου αυτού (θόρυβος πρόσκρουσης) είναι η διάβαση των πτερυγίων από το σημείο ασυνέχειας A. Η δεύτερη συνιστώσα (θόρυβος στροβιλισμού) αποτελείται από έναν αεροδυναμικό θόρυβο, που εκτείνεται σε ευρεία περιοχή συχνοτήτων και οφείλεται στη διαταραχή της πίεσης του αέρα λόγω της περιστροφής.

Όσον αφορά τη στάθμη θορύβου των ανεμιστήρων, αυτή είναι δύσκολο να προβλεφθεί και εξαρτάται κυρίως από τον κατασκευαστή. Με αρκετά μεγάλη ανοχή όταν δεν έχουμε στοιχεία από τον κατασκευαστή για τη στάθμη πίεσης που οφείλεται σε φυγοκεντρικούς ανεμιστήρες, μπορούμε να γράψουμε τη σχέση:

$$L_p = 10 \log Q + 20 \log P_t + k$$

όπου Q η παροχή σε cjin,

P_t η στατική πίεση σε inch H₂O,

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

Αξονικοί ανεμιστήρες

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

$$L_p = 10 \log Q + 20 \log P_T + 48$$

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

Αιολικός θόρυβος (Karman Vortex Noise)

Ο Αιολικός θόρυβος που συναντά κανείς στους αξονικούς ανεμιστήρες είναι γνωστός από την αρχαιότητα. Είναι ίσως η πρώτη αναφορά για πηγή παραγωγής θορύβου που έγινε από τους αρχαίους Έλληνες. Καθώς ο άνεμος φυσά μέσα από τους κίονες των αρχαίων ναών παράγονται διακριτοί τόνοι που μοιάζουν με ψιθύρους. Οι αρχαίοι Έλληνες θεωρούσαν τον ήχο αυτό ως φωνή του Αιόλου, απ' όπου πήρε και το όνομά του. Η αιτία παραγωγής του θορύβου αυτού είναι η εξής: Καθώς ο άνεμος φυσά κάθετα στον άξονα μιας κυλινδρικής επιφάνειας, από την αντίθετη πλευρά από αυτήν που φυσά ο άνεμος, σχηματίζονται περιοδικοί στροβιλισμοί του αέρα με αποτέλεσμα να παράγεται θόρυβος που περιέχει ισχυρούς τόνους. Η συχνότητα των τόνων αυτών δίνεται από την εμπειρική σχέση

$$f = \frac{N_s u}{d}$$

όπου u η ταχύτητα του αέρα,

d η διάμετρος του κυλίνδρου και

N_s ο αριθμός Strouhal περίπου $\alpha=0.2$.

Αιολικός θόρυβος παράγεται και στους αξονικούς ανεμιστήρες ως εξής: Έστω ένα μικρό τμήμα του πτερυγίου κοντά στον άξονα. Καθώς αυτό περιστρέφεται παράγεται αιολικός θόρυβος λόγω των στροβίλων που σχηματίζονται, με συχνότητα που δίνεται από τον παραπάνω τύπο. Το διπλανό τμήμα θα παράγει όμοιο θόρυβο αλλά με λίγο διαφορετική συχνότητα. Το ίδιο συμβαίνει και με τα υπόλοιπα τμήματα με αποτέλεσμα ο θόρυβος τελικά να είναι ευρέως φάσματος.

Για τη μείωση του αιολικού θορύβου συνιστάται

- η αύξηση της διατομής των αγωγών για την μείωση της ταχύτητας ροής .

- η απομάκρυνση των εμποδίων .
- η λείανση των επιφανειών:
- οι βαθμιαίες μεταβολές στις διαμέτρους των σωληνώσεων.

Έλεγχος του θορύβου των ανεμιστήρων

Ο έλεγχος του θορύβου των ανεμιστήρων γενικά δεν είναι δύσκολη υπόθεση. Οι φυγοκεντρικοί ανεμιστήρες είναι γενικά συσκευές χαμηλής πίεσης αλλά υψηλής παροχής. Η χρήση απορροφητικών, παράλληλων, κυκλικών σιγαστήρων είναι κατάλληλη για τη μείωση του θορύβου. Η μείωση του θορύβου γίνεται ακόμη μεγαλύτερη αν χρησιμοποιηθούν ράβδοι εξάρτησης που απορροφούν τους κραδασμούς.

Θόρυβος συμπιεστών

Οι αεροσυμπιεστές είναι σημαντική πηγή θορύβου. Ο θόρυβος που εκπέμπουν εξαρτάται από το είδος του συμπιεστή, την ποιότητα κατασκευής και από τη μηχανική ισχύ τους.

Φυγοκεντρικοί συμπιεστές

Η στάθμη ισχύος των συμπιεστών αυτών στην έξοδο των συμπιεστών και μέσα στο στόμιο εξαγωγής δίνεται από τη σχέση:

$$L_w = 20 \log W + 50 \log U - 45$$

όπου U η ταχύτητα του άκρου των πτερυγίων και W η ισχύς σε kW.

Η ισχύς αυτή είναι η ολική ισχύς σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων. Η στάθμη ισχύος, που αντιστοιχεί στην οκτάβα που βρίσκεται η συχνότητα του μεγίστου, είναι 4.5 dB χαμηλότερα. Η στάθμη στις πλευρικές οκτάβες φθίνει με ρυθμό 3 dB/ οκτάβα.

Η συχνότητα στην οποία έχουμε το μέγιστο δίνεται από τη σχέση:

$$f = 4.1U$$

3.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΘΟΡΥΒΟΥ

3.3.1 Εκπομπή από πηγή με σφαιρική συμμετρία

Η ένταση του θορύβου σε ελεύθερη διάδοση είναι αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της απόστασης για σφαιρικά κύματα. Στην περίπτωση σφαιρικής

διάδοσης από ισότροπη πηγή για την ένταση σύμφωνα με τον ορισμό της έντασης μπορούμε να γράψουμε:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2}$$

W είναι η ακουστική ισχύς της πηγής.

Αν λύσουμε ως προς την ακουστική ισχύ έχουμε:

$$W = 4\pi r^2 I = 4\pi r^2 \frac{p^2}{\rho c}$$

Αν διαιρέσουμε κατά μέλη με την στάθμη ισχύος αναφοράς $w_{ref} = I_{ref} S_{ref}$ λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές αναφοράς ($S_{ref} = 1 \text{ m}^2$, $\rho c_{ref} = 400 \text{ Rayls}$) με λογαρίθμηση προκύπτει τελικά:

$$L_w = L_p + 10 \log \frac{4\pi r^2}{S_{ref}} + 10 \log \frac{(\rho c)_{ref}}{(\rho c)}$$

Για συνήθεις ατμοσφαιρικές συνθήκες $\rho c = 415 \text{ Rayls}$, κάνοντας τις πράξεις καταλήγουμε τελικά:

$$L_w = L_p + 20 \log r + 10.8$$

Λύνοντας ως προς τη στάθμη πίεσης έχουμε:

$$L_p \cong L_w - 11 - 20 \log r$$

Αν η πηγή δεν είναι ισότροπη αλλά έχει κατευθυντικότητα Q τότε η σχέση μπορεί να γραφεί:

$$I = \frac{QW}{4\pi r^2}$$

Όταν δεν είναι γνωστή η στάθμη ισχύος και η κατευθυντικότητα της πηγής, εργαζόμαστε ως εξής: μετράμε την στάθμη πίεσης σε δύο σημεία που απέχουν αποστάσεις r_1 και r_2 τα οποία βρίσκονται στην ίδια ευθεία με την πηγή. Έστω ότι οι στάθμες είναι L_{p1} και (L_{p2}) αντίστοιχα.

Τότε ισχύουν οι σχέσεις

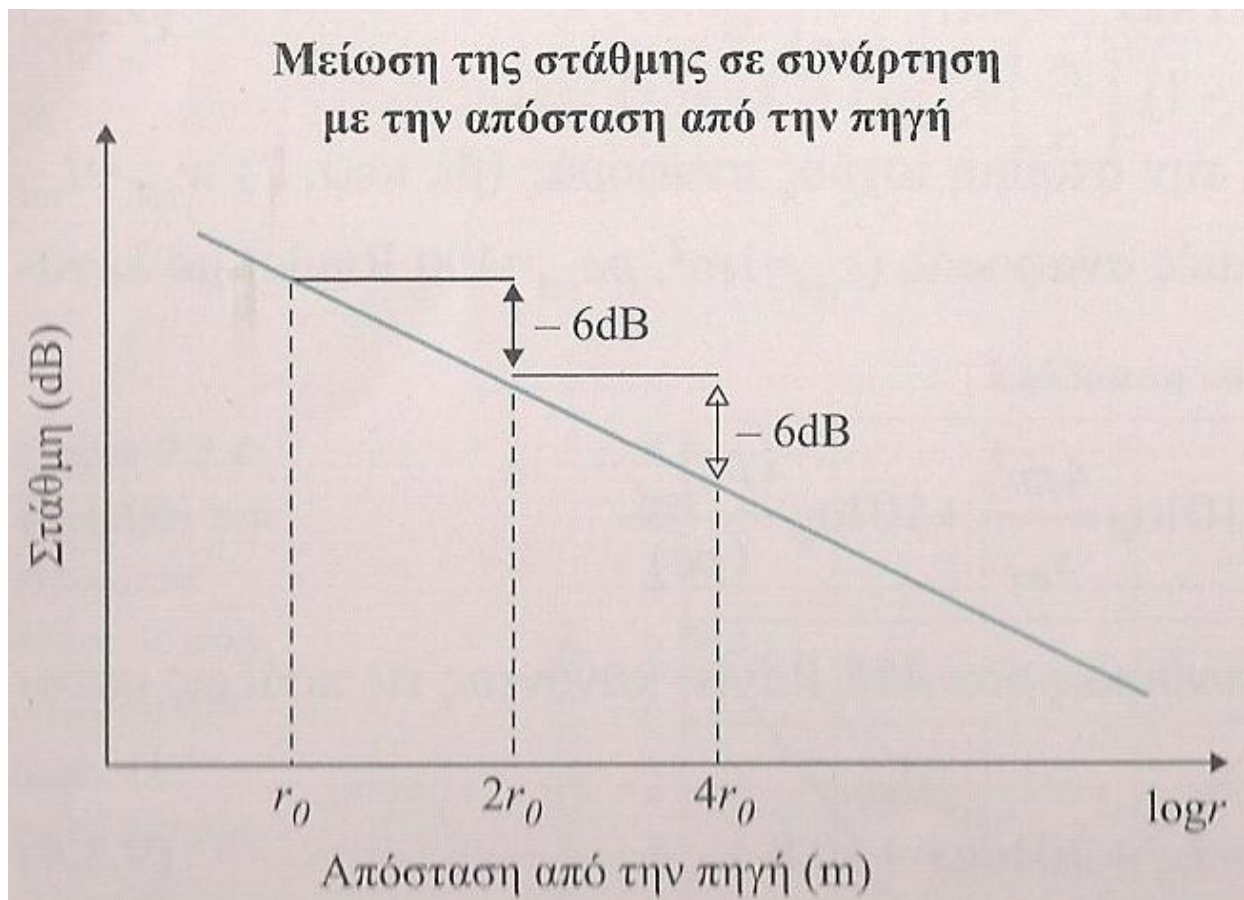
$$L_{p1} \cong L_w - 11 - 20 \log r_1 + 10 \log Q$$

$$L_{p2} \cong L_w - 11 - 20 \log r_2 + 10 \log Q$$

Με αφαίρεση κατά μέλη προκύπτει τελικά:

$$L_{p2} = L_{p1} - 20 \log \frac{r_1}{r_2}$$

Η παραπάνω σχέση δηλώνει ότι η στάθμη μειώνεται ανάλογα με το λογάριθμο της απόστασης. Αν στην παραπάνω σχέση θέσω όπου $r_2=2r_1$ και λάβω υπόψη μου ότι η ποσότητα $20 \log 2 \cong 6$, τότε βλέπω ότι σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, η στάθμη πίεσης μειώνεται κατά 6 dB για κάθε διπλασιασμό της απόστασης. Αυτό σημαίνει ότι αν η στάθμη σε απόσταση 2 μέτρα από την πηγή είναι 70 dB, σε απόσταση 4 μέτρα θα είναι 64 dB, σε απόσταση 8 μέτρα 58 dB κλπ.

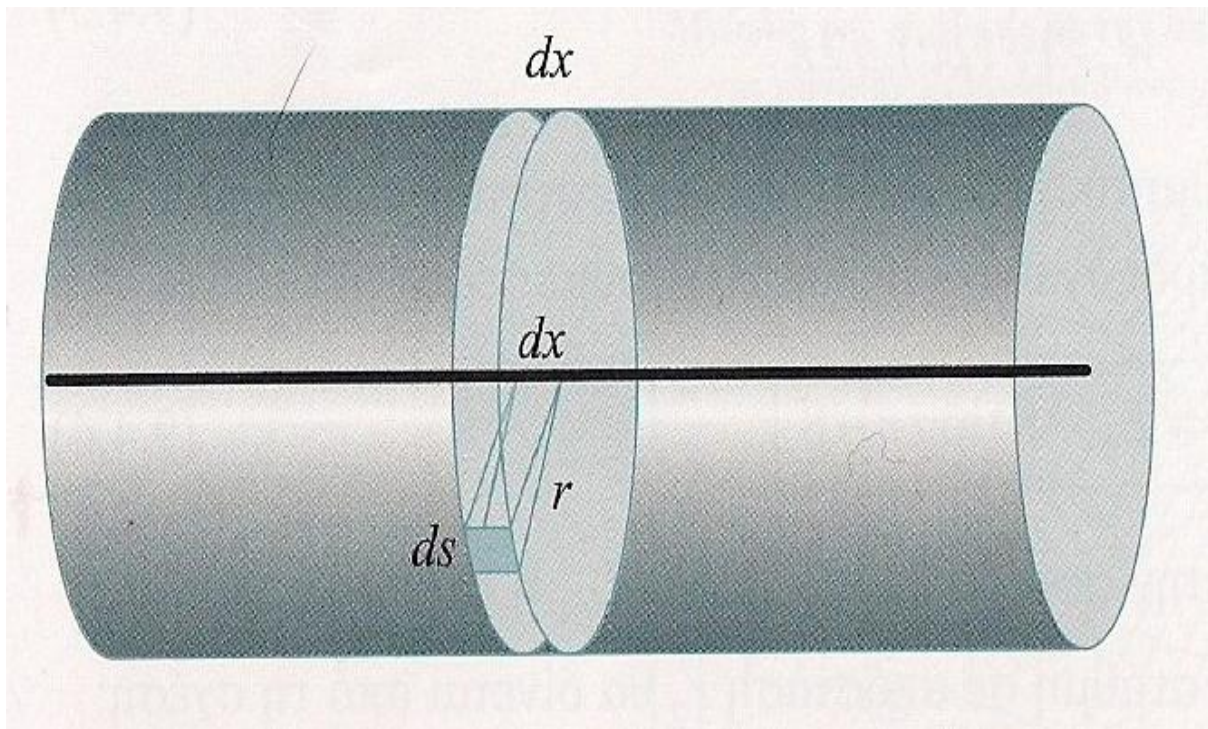


Σχήμα 3.3.1 : Μείωση της στάθμης του θορύβου πηγής με σφαιρική συμμετρία συναρτήση του λογαριθμικού της απόστασης.

3.3.2 Εκπομπή από πηγές με κυλινδρική συμμετρία

Κυλινδρική συμμετρία παρουσιάζουν οι γραμμικές πηγές. Γραμμική πηγή απείρου dx μήκους ονομάζεται μία πηγή που αποτελείται από ένα άπειρο αριθμό πηγών σε διάταξη ευθείας γραμμής, με αμελητέα απόσταση μεταξύ τους. Μία γραμμική πηγή μπορεί να αποτελείται από N όμοιες σημειακές πηγές τοποθετημένες κατά μήκος ευθείας γραμμής κοντά ή μία στην άλλη μη συσχετιζόμενες μεταξύ τους.

Ως γραμμική πηγή απείρου μήκους μπορεί να θεωρηθεί ο άξονας ενός αυτοκινητοδρόμου, μία ηχοστήλη που αποτελείται από Ν μεγάφωνα κ.λπ.



Σχήμα 3.3.2 : Γραμμική συνεχής πηγή απείρου μήκους με κυλινδρική συμμετρία

3.3.2.1 Γραμμική πηγή απείρου μήκους

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε μία συνεχή γραμμική πηγή απείρου μήκους. Στην περίπτωση αυτή η ένταση του ήχου με την πίεση συνδέονται με την ίδια σχέση όπως και στα επίπεδα κύματα. Αν W η εκπεμπόμενη ισχύς ανά μονάδα μήκους, τότε η ισχύς που εκπέμπεται από το στοιχείο μήκους dx είναι:

$$Wdx$$

Η ένταση του ήχου σε απόσταση r σύμφωνα με τον ορισμό, θα βρεθεί αν διαιρέσω την εκπεμπόμενη ισχύ από το θεωρούμενο στοιχείο με το εμβαδόν της ζώνης στην οποία κατανέμεται:

$$I = \frac{W}{2\pi r} \frac{dx}{dx} = \frac{W}{2\pi r} = \frac{p^2}{\rho c}$$

Αν λύσουμε την παραπάνω εξίσωση ως προς την πίεση και διαιρέσουμε με την πίεση αναφοράς που δίνεται από την σχέση:

$$P^2_{ref} = I_{ref}(\rho c)_{ref} = \frac{W_{ref} (PC)_{ref}}{S_{ref}}$$

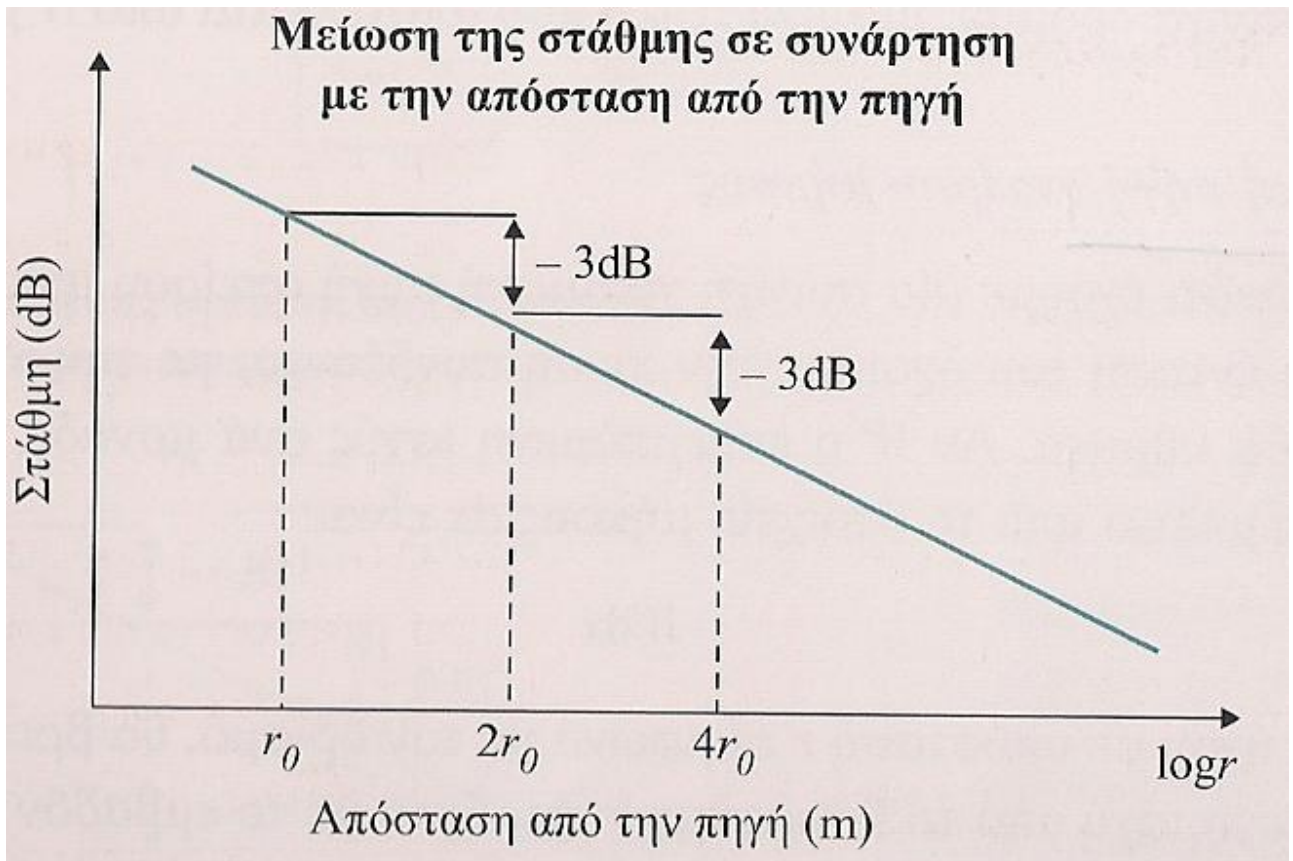
Αν αντικαταστήσουμε τα αριθμητικά δεδομένα των ποσοτήτων αναφοράς, με

λογαρίθμηση της παραπάνω σχέσης καταλήγουμε τελικά:

$$L_p = L_w - 10 \log r - 8$$

Με ανάλογο τρόπο όπως και στην σφαιρική διάδοση αν L_{p1} η στάθμη σε μία απόσταση r_1 από την πηγή, τότε η στάθμη σε απόσταση r_2 θα δίνεται από τη σχέση:

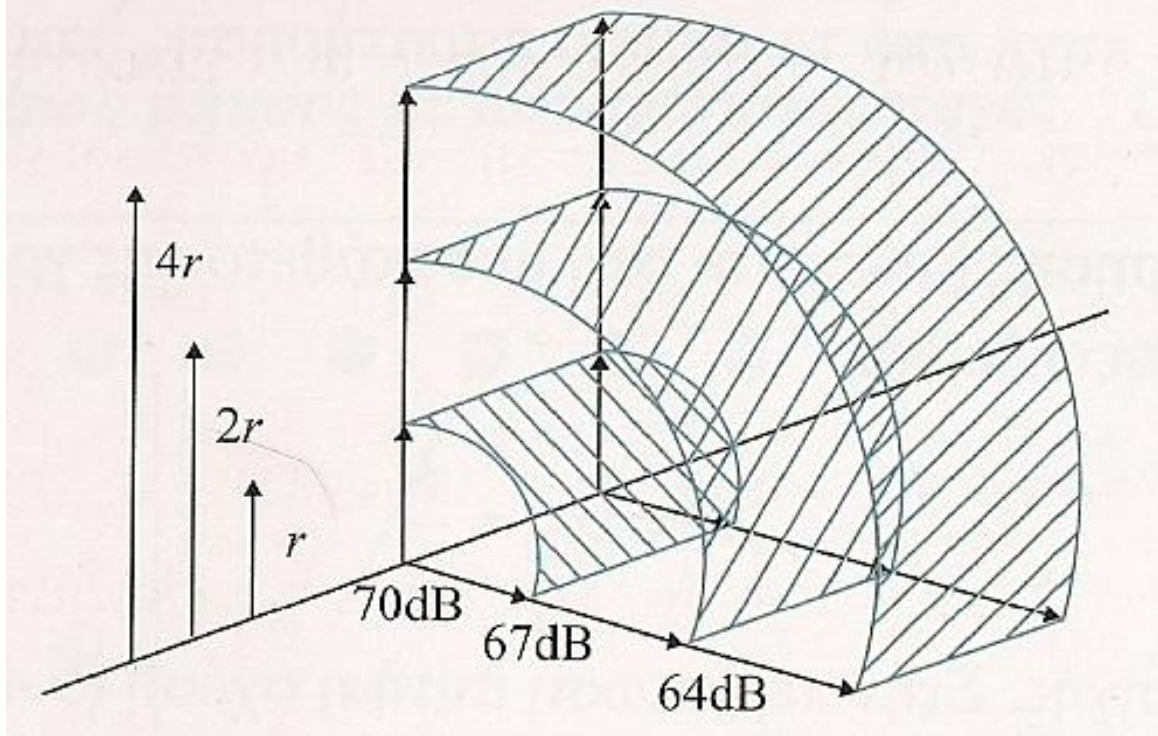
$$L_{p2} = L_{p1} - 10 \log \frac{r_1}{r_2}$$



Σχήμα 3.3.3 : Μείωση της στάθμης του θορύβου πηγής με κυλινδρική συμμετρία συναρτήσει του λογάριθμου της απόστασης

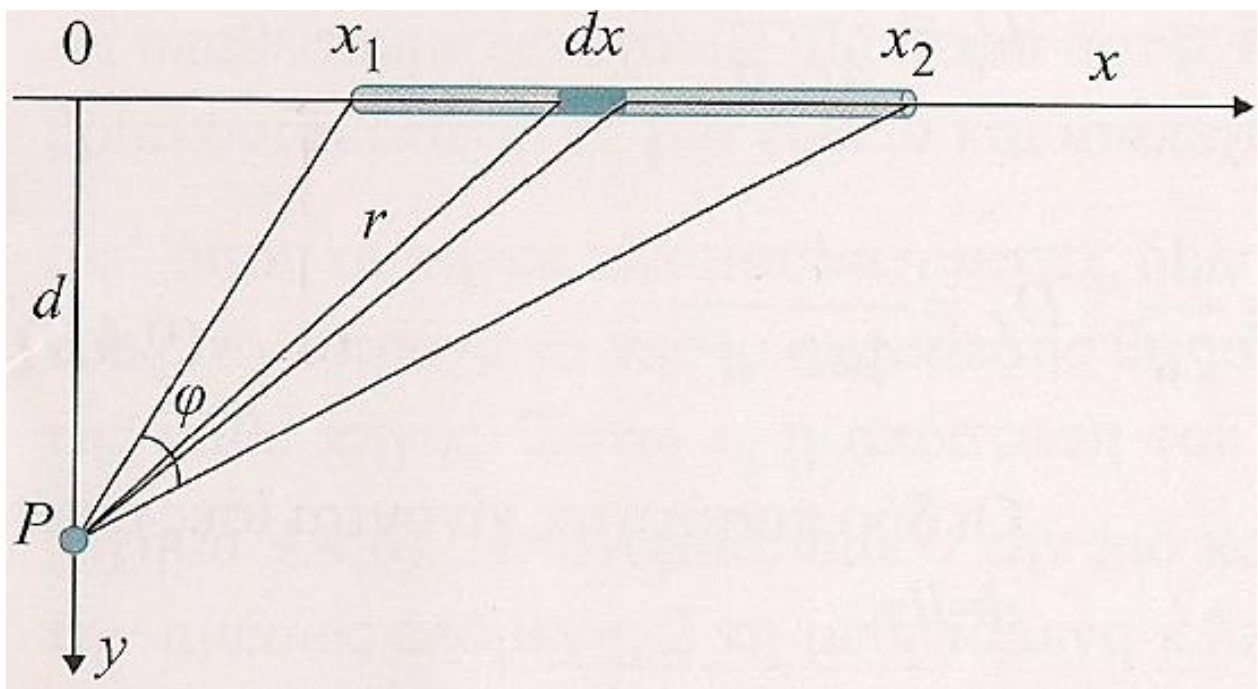
Από τη σχέση αυτή με ανάλογο τρόπο όπως και στην σφαιρική πηγή προκύπτει ότι η στάθμη μειώνεται ανάλογα με τον λογάριθμο της απόστασης κατά 3 dB για κάθε διπλασιασμό της απόστασης. Στην περίπτωση ηχοστήλης κατά μήκος του άξονα έχουμε σφαιρική διάδοση με αποτέλεσμα η ένταση να μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης και κάθετα στον άξονα έχουμε κυλινδρική διάδοση μείωση της έντασης αντιστρόφως ανάλογα με την απόσταση. Αυτός είναι ο λόγος για το οποίο οι ηχοστές τοποθετούνται κάθετα σε μεγάλους χώρους.

**Μείωση της στάθμης με την απόσταση -
για πηγή με κυλινδρική συμμετρία**



Σχήμα 3.3.4 : Μείωση της στάθμης με την απόσταση

3.3.2.2 Γραμμή πεπερασμένου μήκους



Σχήμα 3.3.5 : Γραμμική πηγή πεπερασμένου μήκους

Στην περίπτωση που οι διαστάσεις της πηγής είναι πεπερασμένες δηλαδή η πηγή είναι τοποθετημένη τον άξονα των X και εκτείνεται από την θέση x_1 στην θέση x_2 η πυκνότητα ενέργειας στον δέκτη που βρίσκεται σε απόσταση d από το άξονα της πηγής μπορεί να υπολογισθεί αν θεωρήσουμε ότι η πηγή αποτελείται από ένα άπειρο αριθμό σημειακών πηγών με αμελητέα απόσταση μεταξύ τους. Η ολοκλήρωση της στοιχειώδους πυκνότητας ενέργειας που δημιουργεί η κάθε στοιχειώδης πηγή στο σημείο παρατήρησης με όρια ολοκλήρωσης τα X_1 X_2 δίνει:

$$D = \int_{x_1}^{x_2} \frac{w dx}{4\pi r^2 c} = \frac{w}{4\pi c} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{(d^2 + x^2)}$$

Ο υπολογισμός του ολοκληρώματος δίνει:

$$D = \frac{w}{4\pi c} \frac{1}{d} \left[\tan^{-1} \frac{x_2}{d} - \tan^{-1} \frac{x_1}{d} \right] = \frac{w}{4\pi c} \frac{\varphi}{d}$$

Όπου φ η γωνία (σε rad) με την οποία φαίνεται η πηγή από τον παρατηρητή. Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι η πυκνότητα ενέργειας είναι ανάλογη με τη γωνία που φαίνεται η πηγή από το σημείο παρατήρησης, και αντιστρόφως ανάλογη με την απόσταση d . Αν το σημείο παρατήρησης βρίσκεται στη μεσοκάθετο της γραμμής τότε οι απόλυτες τιμές των αποστάσεων είναι:

$$|x_1| = |x_2| = \frac{l}{2}$$

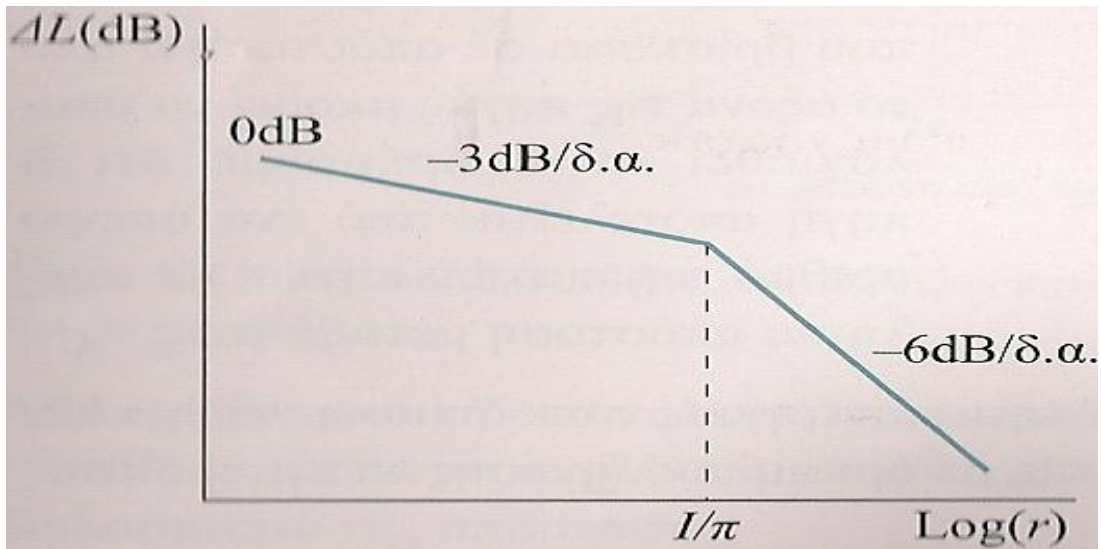
όπου l το μήκος της πηγής. Στην περίπτωση αυτή η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί:

$$D = \frac{w}{2\pi c d} \left[\tan^{-1} \frac{l}{2d} \right]$$

Στη παραπάνω σχέση διακρίνω δύο προπτώσεις:

$$d \ll l \quad \left[\tan^{-1} \frac{l}{2d} \right] \cong \frac{\pi}{2}, \quad D_n = \frac{w}{4c} \frac{1}{d}$$

$$d \gg l \quad \left[\tan^{-1} \frac{l}{2d} \right] \cong \frac{l}{2d} \quad D_f = \frac{wl}{4\pi c} \frac{1}{d^2}$$

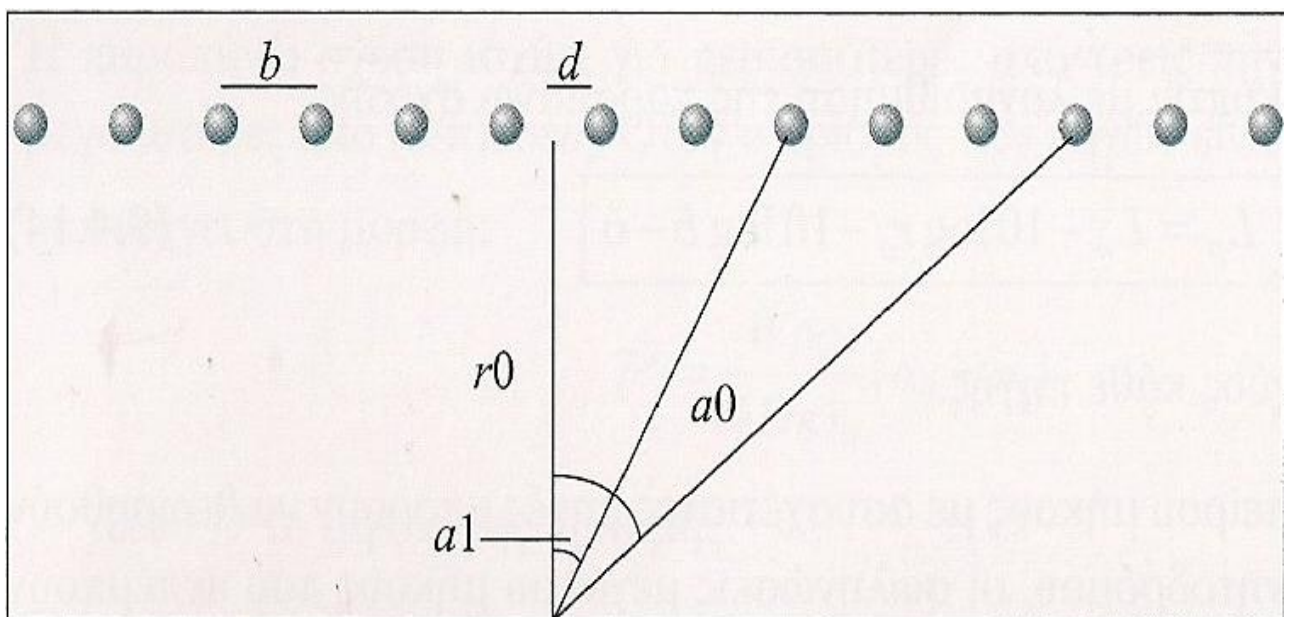


Σχήμα 3.3.6 : Μείωση της στάθμης συναρτήσει της απόστασης για γραμμική πηγή πεπερασμένου μήκους

Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι για μικρές αποστάσεις (δηλαδή μέχρι την απόσταση που οι δύο όροι γίνονται ίσοι, δηλαδή την απόσταση l/π) η πυκνότητα ενέργειας είναι αντιστρόφως ανάλογη του d (εγγύς πεδίο) και αντιστοιχεί σε κλίση 3dB για κάθε διπλασιασμό της απόστασης, δηλαδή η πηγή συμπεριφέρεται ως γραμμική, ενώ για μεγάλες αποστάσεις είναι αντιστρόφως ανάλογη του J^2 (απομακρυσμένο πεδίο), με κλίση 6dB για κάθε διπλασιασμό της απόστασης οπότε η πηγή συμπεριφέρεται ως σημειακή. Το παρακάτω σχήμα δείχνει πως μεταβάλλεται η στάθμη πίεσης συναρτήσει της απόστασης από την πηγή.

3.3.2.3 Γραμμική διάταξη σημειακών πηγών

Γραμμική πηγή απείρου μήκους με ασυσχέτιστες πηγές



Σχήμα 3.3.7 : Γραμμή άπειρου μήκους με σημειακές ισοπέχουσες πηγές

Όταν η απόσταση των πηγών είναι συγκρίσιμη με αυτήν του παρατηρητή από την γραμμή των πηγών, τότε οι τύποι που περιγράφηκαν παραπάνω δεν δίνουν ικανοποιητική ακρίβεια. Ας υποθέσουμε ότι έχουμε μία σειρά ασυσχέτιστων πηγών με ισχύ W η κάθε μία που βρίσκονται επάνω σε μία ευθεία και ισαπέχουν. Έστω b η απόσταση μεταξύ τους. Εφ' όσον οι πηγές είναι ασυσχέτιστες δηλαδή βρίσκονται σε τυχαία φάση μεταξύ τους, το τετράγωνο της μέσης πίεσης θα ισούται με το άθροισμα των τετραγώνων της κάθε πηγής. Έστω r_0 η απόσταση του σημείου παρατήρησης από τη γραμμή.

Αν ονομάσουμε O την πιο κοντινή στο σημείο παρατήρησης πηγή 1 την αμέσως επόμενη, 2 τη μεθεπόμενη κ.λπ., τότε για το μέσο τετράγωνο της πίεσης στο σημείο παρατήρησης θα μπορούσαμε να γράψουμε

$$\bar{p}^2 = \frac{W\rho c}{4\pi} \sum_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{r_n^2} \left[1 - 2d(d - 2nb)r_n^{-2} + \dots \right]$$

Στην παραπάνω σχέση το d μπορεί να πάρει τιμές από 0 έως $0.5b$. Για αποστάσεις το μεγαλύτερες του $3b$ η παραπάνω σχέση γράφεται:

$$\bar{p}^2 = \frac{W\rho c}{4\pi} \sum_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\left[r_0^2 + n^2 b^2 \right]}$$

Το σφάλμα που γίνεται με αυτήν την προσέγγιση είναι μικρότερο του 1 dB. Η παραπάνω σχέση μπορεί επίσης να γραφεί:

$$\bar{p}^2 = \frac{W\pi\rho c}{4b^2} \left| \frac{b}{\pi r_0} \coth\left(\frac{\pi r_0}{b}\right) \right|$$

Η στάθμη πίεσης προκύπτει με λογαρίθμηση της παραπάνω σχέσης :

$$L_p = L_w - 10\log r_0 - 10\log b - 61$$

όπου L_w η στάθμη ισχύος κάθε πηγής.

Σαν γραμμική πηγή απείρου μήκους με ασυσχέτιστες πηγές μπορούν να θεωρηθούν ο άξονας ενός αυτοκινητοδρόμου, οι σωληνώσεις μεγάλου μήκους που εκπέμπουν θόρυβο ευρέως φάσματος κ.λπ,

Γραμμή απείρου μήκους με σύγχρονες πηγές

Στην περίπτωση που οι πηγές είναι σύγχρονες δηλαδή όλες έχουν την ίδια φάση, η μέση στάθμη στο σημείο παρατήρησης δίνεται από τη σχέση:

$$\overline{p^2} = \frac{Wpc}{2br_0}$$

και η στάθμη πίεσης που αντιστοιχεί είναι:

$$L_p = L_w - 10 \log r_0 - 10 \log b - 8$$

Σύγχρονες πηγές είναι σχετικά σπάνιο να παρατηρηθούν στην πράξη. Ωστόσο γραμμή με σύγχρονες πηγές μπορεί να θεωρηθεί ένας σωλήνας που εκπέμπει θόρυβο μίας συχνότητας. Από τις παραπάνω σχέσεις βλέπουμε ότι για το θόρυβο αυτής της κατηγορίας:

- Η στάθμη μειώνεται κατά 3 dB για κάθε διπλασιασμό της απόστασης είτε οι πηγές είναι σύγχρονες είτε όχι.
- Οι σύγχρονες πηγές εκπέμπουν 2 dB μικρότερη στάθμη από τις μη σύγχρονες με την ίδια ισχύ.

Γραμμική πηγή πεπερασμένου μήκους

Εάν η γραμμή έχει πεπερασμένο μήκος, για σχετικά μεγάλες αποστάσεις από τη γραμμή, τοποθετώντας τα όρια της γραμμής στη σχέση για την πίεση παίρνουμε:

$$\overline{p^2} = \frac{Wpc}{4b\pi r_0} (\alpha_\theta - \alpha_l)$$

όπου α_u, α_l το πάνω και το κάτω όριο της γραμμής σε ακτίνια.

Η παραπάνω σχέση ισχύει για περισσότερες από τρεις πηγές και για αποστάσεις μεγαλύτερες από $(b/\pi) \cos \alpha_l$. Όταν ο αριθμός των πηγών είναι άπειρος η σχέση αυτή καταλήγει στη μορφή:

$$\overline{p^2} = \frac{Wpc}{4D\pi r_0} (\alpha_\theta - \alpha_l)$$

όπου D το μήκος της γραμμής.

3.3.2.4 Κινούμενες πηγές σε γραμμική διάταξη – κυκλοφοριακός θόρυβος

Στην περίπτωση αυτή οι πηγές βρίσκονται μεν σε γραμμική διάταξη αλλά κινούνται ευθύγραμμα. Χαρακτηριστική περίπτωση αυτής της μορφής των πηγών είναι ο κυκλοφοριακός θόρυβος. Η στάθμη του θορύβου αυτού εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η ταχύτητα των οχημάτων, η κατάσταση των δρόμων, το είδος των οχημάτων, το είδος των ελαστικών κ.λπ. Η στάθμη του θορύβου μεμονωμένων οχημάτων σε απόσταση 15 μέτρων από αυτά δίνεται από την προσεγγιστική σχέση:

$$L_p = 71 + 32 \log\left(\frac{u}{88}\right)$$

όπου u η ταχύτητα του οχήματος σε km/h

Για τα δίκυκλα ισχύει η σχέση :

$$L_p = 78 + 25 \log\left(\frac{u}{88}\right)$$

Για τα φορτηγά και γενικά μεγάλα αυτοκίνητα:

$$L_p = 84 \quad u < 48 \text{ km/h}$$

$$L_p = 88 + 20 \log\left(\frac{u}{88}\right) \quad u > 48 \text{ km/h}$$

Για τη μέτρηση του κυκλοφοριακού θορύβου χρησιμοποιείται η ωριαία ισοδύναμη στάθμη ($L_{eq,h}$) δηλαδή η ισοδύναμη στάθμη σε χρόνο παρατήρησης μιας ώρας. Για την ωριαία ισοδύναμη στάθμη μπορούμε να γράψουμε τη σχέση:

$$L_{eq,h} = 10 \log N - 13 \log D + 2.5 TM + 30 \log V - 3$$

όπου: N η πυκνότητα ροής σε αυτοκίνητα την ώρα

D η απόσταση της πλησιέστερης λωρίδας κυκλοφορίας σε m

V η μέση ταχύτητα σε km/h

TM το % ποσοστό σε βαρέα οχήματα.

Σύμφωνα με το σχέδιο ΕΛΟΤ 868 η στάθμη του θορύβου L_{Aeq} που προέρχεται από την κυκλοφορία σε συνάρτηση με την απόσταση από το δρόμο για ελεύθερη διάδοση του θορύβου, για δρόμο χωρίς κλίση και για μέση ταχύτητα 50 km/h δίνεται από τον πίνακα:

ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΛΗΣΙΕΣΤΕΡΗ ΛΩΡΙΔΑ (m)				
Αριθμός οχημάτων ανά ώρα	5 m	15m	50m	150m
15	49	44	39	34
50	54	49	44	39
150	59	54	49	44
500	64	59	54	49
1500	69	64	59	54
5000	74	69	64	59

Σχήμα 3.3.8 Στάθμη θορύβου που προέρχεται από την κυκλοφορία

Για τον παραπάνω πίνακα ισχύουν:

- Για κάθε διπλασιασμό του κυκλοφοριακού φόρτου αυξάνουμε τη στάθμη κατά 3 dB
- Για κάθε υποδιπλασιασμό του κυκλοφοριακού φόρτου μειώνουμε τη στάθμη κατά 3 dB
- Για κάθε διπλασιασμό της απόστασης μειώνουμε τη στάθμη κατά 3 dB
- Για κάθε υποδιπλασιασμό της απόστασης αυξάνουμε τη στάθμη κατά 3 dB
- Όταν η μέση ταχύτητα αυξηθεί λαμβάνουμε υπόψη τις διορθώσεις:

Διόρθωση [dB(A)]	Αύξηση της ταχύτητας (km/h)
+4	70
+6	90
+7	110

Σχήμα 3.3.9: Διόρθωση της στάθμης λόγω αύξησης της ταχύτητας

- Όταν ο κυκλοφοριακός φόρτος περιλαμβάνει βαρέα οχήματα ανάλογα με το ποσοστό των μικρών οχημάτων κάνουμε τις διορθώσεις:

Ποσοστό μικρών οχημάτων (%)	Διόρθωση
100%	0
90%	+1
70%	+3
50%	+5

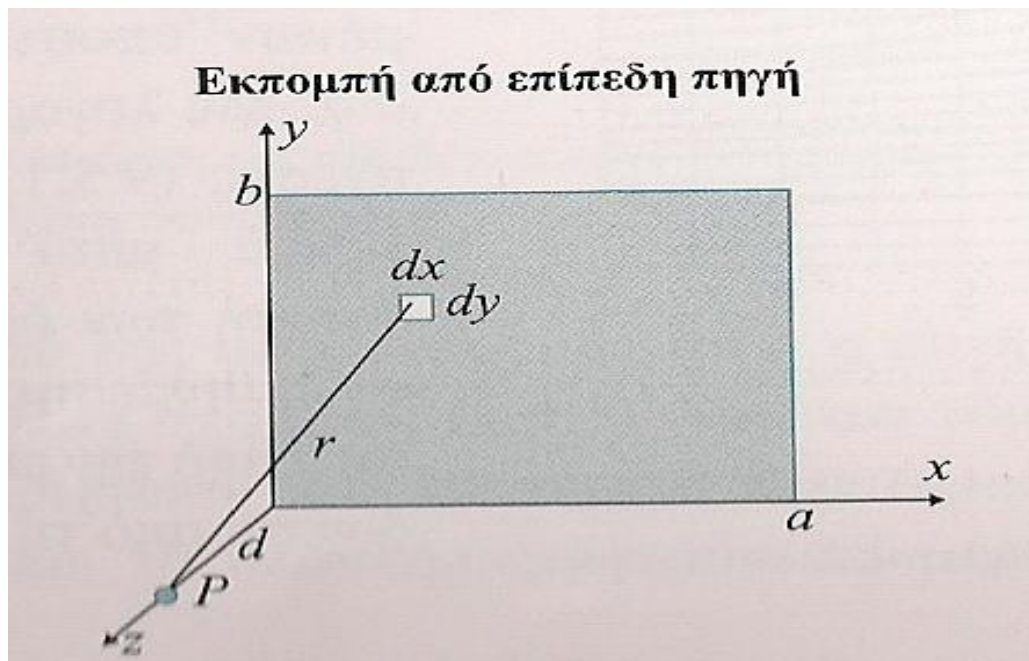
Σχήμα 3.3.10: Διορθωση της στάθμης λόγω ποσοστού μικρών οχημάτων

- Ανάλογα με τις συνθήκες δόμησης κάνουμε τις εξής διορθώσεις :

Είδος Δόμησης	Διόρθωση
Συνεχής δόμηση με απόσταση προσόψεων 10 m	μέχρι 10 dB (A)
Συνεχής δόμηση με απόσταση προσόψεων 20–30 m	μέχρι 5 dB (A)
Ανοικτή δόμηση	μέχρι 3 dB (A)
Κοντά σε διασταυρώσεις με σηματοδότη	μέχρι 7 dB (A)

Σχήμα 3.3.11: Διόρθωση της στάθμης λόγω συνθηκών δόμησης

3.3.3 Εκπομπή από πηγή με επίπεδη συμμετρία



Σχήμα 3.3.12: Επίπεδη πηγή περιορισμένων διαστάσεων

Έστω μια επίπεδη ηχητική πηγή με διαστάσεις a, b που βρίσκεται στο επίπεδο $Χοy$ ενός συστήματος αναφοράς. Η επιφάνεια της εκπομπής της πηγής μπορούμε να θεωρήσουμε ότι αποτελείται από ένα άπειρο αριθμό στοιχειωδών πηγών εμβαδού $dx dy$ η κάθε μία. Η πυκνότητα ενέργειας στο σημείο παρατήρησης P το οποίο βρίσκεται στον άξονα των Z και απέχει d από την αρχή μπορεί να υπολογιστεί λαμβάνοντας υπόψη την εκπεμπόμενη ακτινοβολία από κάθε επιμέρους ηχητική πηγή της θεωρούμενης επιφάνειας, και συνεπώς δίδεται από το διπλό ολοκλήρωμα:

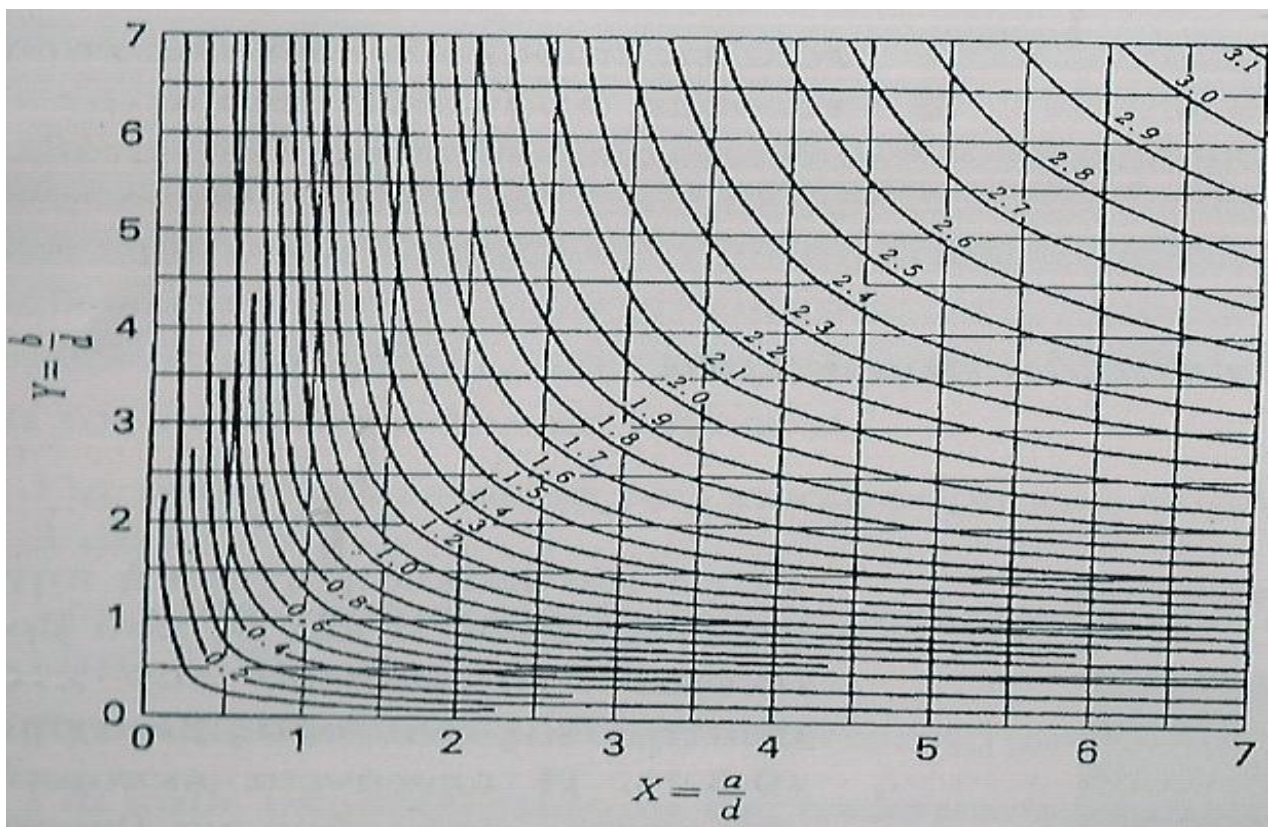
$$D = \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \frac{w dx dy}{2\pi r^2 c} = \frac{w}{2\pi c} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \frac{dx dy}{(d^2 + x^2 + y^2)}$$

Στην παραπάνω σχέση w είναι η ακτινοβολούμενη ακουστική ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας από την πηγή. Οι οριακές τιμές της επιφάνειας είναι: $x_1=0$, $x_2=a$, $y_1=0$, $y_2=b$. Χρησιμοποιώντας τις ανηγμένες αποστάσεις $X=x/d$ και $Y=y/d$ το ολοκλήρωμα της παραπάνω σχέσης μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\Sigma = \int_0^{a/d} \int_0^{b/d} \frac{dXdY}{(1^2 + X^2 + Y^2)}$$

Η λύση του ολοκληρώματος είναι δύσκολη και για το λόγο αυτό λύνεται αριθμητικά. Η τιμή του ολοκληρώματος μπορεί να υπολογισθεί και με την βοήθεια του σχήματος. Το σχήμα 3.3.12 δίνει την τιμή του ολοκληρώματος Σ συναρτήσει των ανηγμένων αποστάσεων b/d , a/d . Με λογαρίθμηση της παραπάνω σχέσης προκύπτει τελικά -μετά την τακτοποίηση των όρων-, ότι η στάθμη πίεσης σε απόσταση d από την επίπεδη πηγή δίνεται από τη σχέση:

$$L_p = L_w + 10 \log [\Sigma] - 8$$



Σχήμα 3.3.13: Αριθμητική λύση του ολοκληρώματος Σ συναρτήσει των ανηγμένων αποστάσεων

Από τη μελέτη των τιμών της στάθμης που προκύπτει από την εξίσωση αυτή ότι ο χώρος μπροστά από την πηγή χωρίζεται σε τρεις περιοχές, που καθορίζουν οι

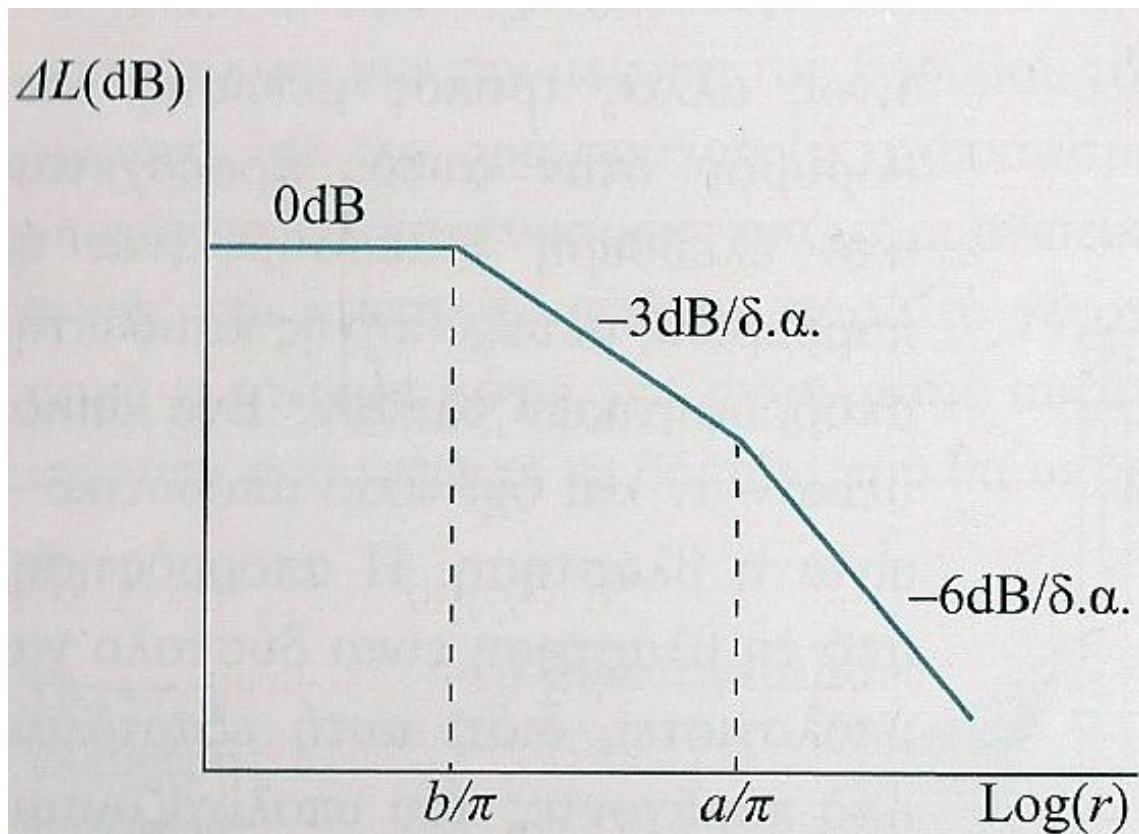
αποστάσεις r_b και r_a ($r_b < r_a$):

$$r_b = \frac{b}{\pi}, \quad r_a = \frac{a}{\pi}$$

Η μείωση σε συνάρτηση με την απόσταση για κάθε περιοχή δίνεται από τη σχέση:

$$L_{p2} = \begin{cases} L_{p1} & , \quad 0 < r_1, r_2 < r_b \\ L_{p1} - 10 \log \frac{r_2}{r_1} & , \quad r_b < r_1, r_2 < r_a \\ L_{p1} - 20 \log \frac{r_2}{r_1} & , \quad r_a < r_1, r_2 \end{cases}$$

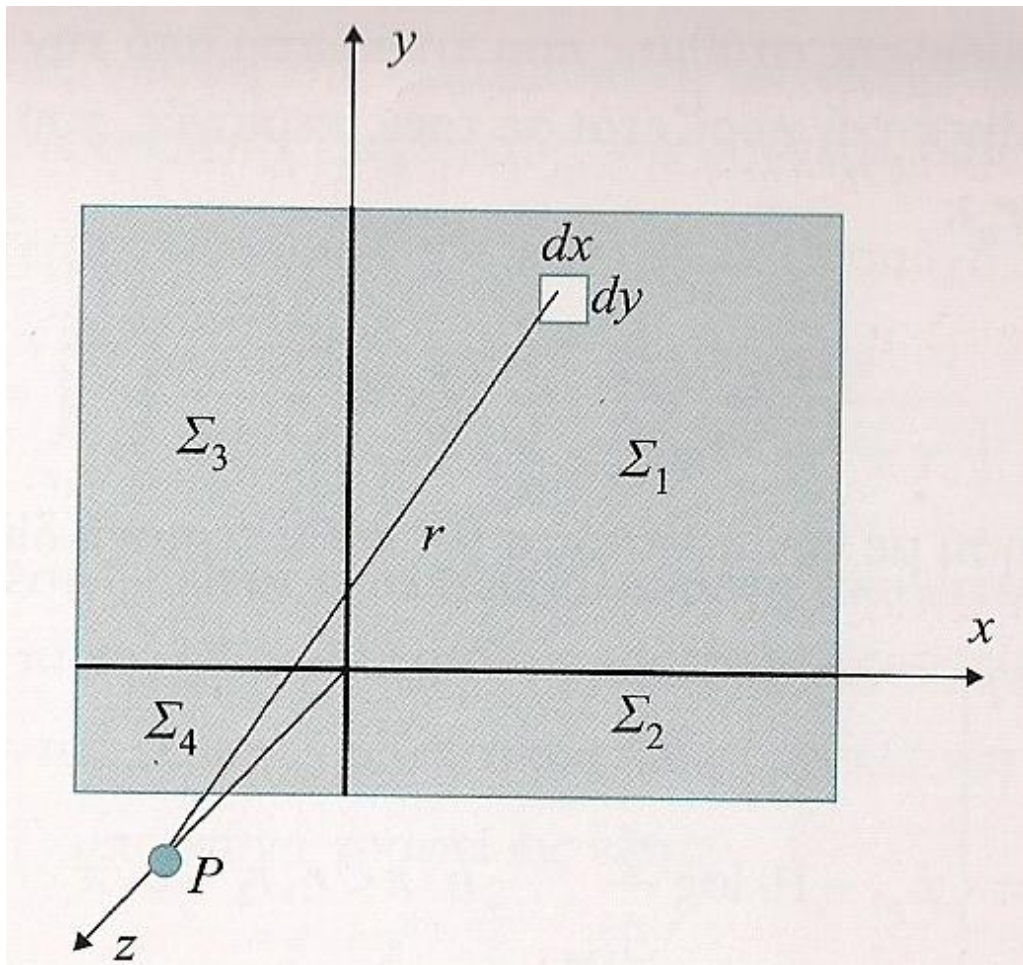
όπου L_{p2}, L_{p1} οι στάθμες σε αποστάσεις r_2 και r_1 αντίστοιχα.



Σχήμα 3.3.14 : Μείωση της στάθμης πίεσης συναρτήσει της απόστασης για επίπεδη πηγή

Από τις παραπάνω σχέσεις παρατηρούμε ότι καθώς απομακρυνόμαστε από την πηγή η στάθμη παραμένει σταθερή μέχρι να φθάσουμε σε απόσταση b/π , που σημαίνει ότι η πηγή συμπεριφέρεται ως επίπεδη. Από αυτό το σημείο- αυτό και μέχρι την απόσταση a/π η πηγή συμπεριφέρεται σαν γραμμική πηγή οπότε η στάθμη θα μειώνεται κατά 3 dB για κάθε διπλασιασμό της απόστασης. Από εκεί και πέρα η μείωση του θορύβου είναι 6 dB για κάθε διπλασιασμό της απόστασης. Δηλαδή η πηγή συμπεριφέρεται σαν σημειακή. Το διάγραμμα του σχήματος (3.3.13) δίδει τον νόμο μείωσης συναρτήσει της απόστασης. Σε περίπτωση που το σημείο παρατήρησης δεν βρίσκεται στον άξονα τότε υπολογίζουμε το ολοκλήρωμα κάθε επί μέρους επιφάνειας όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η τελική τιμή του ολοκληρώματος είναι :

$$\Sigma = \Sigma_1 + \Sigma_2 + \Sigma_3 + \Sigma_4$$



Σχήμα 3.3.15 : Διαχωρισμός επιφάνειας

4. ΜΕΙΩΣΗ ΑΕΡΟΦΕΡΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ ΑΠΟ ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΔΙΑΔΟΣΗ

4.1 ΗΧΟΜΕΙΩΣΗ

4.1.1 Ορισμός

Ηχομείωση είναι η μονάδα που μας δείχνει το κατά πόσο επιτυγχάνουμε μείωση του θορύβου στο περιβάλλον γύρω μας.

4.1.2 Δείκτης Ηχομείωσης

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

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

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

4.1.3 Υπολογισμός ηχομείωσης αερόφερτου θορύβου

4.1.3.1 Μετάδοση σε ανοιχτό χώρο

Όταν η πηγή του θορύβου βρίσκεται σε κλειστό χώρο όπου το ηχητικό πεδίο είναι 100% διάχυτο, η έκφραση για τη στάθμη στο σημείο λήψης που βρίσκεται στον ελεύθερο χώρο όπου δε υπάρχουν ανακλάσεις δίνεται από τη σχέση:

$$L_{p2} = L_{p1} - R$$

Δηλαδή η στάθμη στον ανοικτό χώρο είναι ίση με αυτήν του κλειστού μειωμένη κατά τον δείκτη ηχομείωσης των τοιχωμάτων που περιορίζουν τον χώρο.

4.1.3.2 Μετάδοση σε κλειστό χώρο

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

$$L_{p2} = L_{p1} - R + 10 \log \frac{A_w}{A_n}$$

Όπου

A_w το εμβαδόν της διαχωριστικής επιφάνειας και

A_n η απορρόφηση του χώρου λήψης κατά Norris- Eyring.

Στις παραπάνω σχέσεις βασικό ρόλο παίζει όχι η απορρόφηση του χώρου λήψης (A_n)' αλλά ο συντελεστής ηχομείωσης του οποίου ο υπολογισμός είναι σχετικά πολύπλοκος. Συνεπώς αν θέλουμε να μειώσουμε τον αερόφερτο θόρυβο σημαντικά θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε υλικά με μεγάλο δείκτη ηχομείωσης. Ο συντελεστής αυτός δίνεται με ικανοποιητική ακρίβεια από πίνακες για διάφορα υλικά που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές.

4.2 ΤΡΟΠΟΙ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΗΧΟΜΕΙΩΣΗ

4.2.1 Επίδραση της απορρόφησης

Το διάκενο μεταξύ των επιφανειών στις χαμηλές συχνότητες δρα σαν αποσβεστήρας των ταλαντώσεων που κάνουν, εφόσον βέβαια η απόσταση των επιφανειών είναι πολύ μεγαλύτερη από το μήκος κύματος του ήχου. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή σε αποστάσεις συγκρίσιμες με το μήκος κύματος, σχηματίζονται στάσιμα κύματα πράγμα που δίνει μεγάλες αποκλίσεις της προβλεπόμενης από την πραγματική ηχομείωση.

Όταν μεταξύ των επιφανειών δεν υπάρχει απορροφητικό υλικό το πλάτος των στάσιμων κυμάτων είναι μεγάλο και η εκπομπή (διέλευση) του ήχου σημαντική. Η προσθήκη απορροφητικού υλικού στο διάκενο σε γενικές γραμμές βελτιώνει την ηχομόνωση στις χαμηλές συχνότητες. Η βελτίωση αυτή είναι σημαντική σε ελαφρές κατασκευές (πχ γυψοσανίδες) ενώ λίγο συμβάλει σε βαριές κατασκευές (πχ πέτρινοι τοίχοι). Σε περίπτωση που δεν μπορούμε να γεμίσουμε το διάκενο με απορροφητικό υλικό (π.χ, διπλά παράθυρα), το απορροφητικό μπορεί να τοποθετηθεί περιμετρικά στο παράθυρο. Όσο μεγαλύτερο το πάχος του απορροφητικού τόσο καλύτερη η ηχομόνωση στις χαμηλές πάντα συχνότητες. Στα διπλά παράθυρα πάντως πρέπει να αποφεύγονται τα τετράγωνα σχήματα.

4.2.2 Επίδραση των συνδέσμων

Στην περίπτωση των διπλών και τριπλών επιφανειών οι σχέσεις ισχύουν μόνο όταν οι δύο επιφάνειες είναι απόλυτα μονωμένες μεταξύ τους. Εάν υπάρχουν γέφυρες

ήχου, τότε για μία συχνότητα ζ, και επάνω που ονομάζεται συχνότητα ηχογέφυρας (bridging Frequency) και που βρίσκεται μεταξύ των συχνοτήτων f_0 και f_1 ο δείκτης ηχομείωσης δίδεται από τη σχέση:

$$R=R+\Delta R$$

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

- Για σημειακές συνδέσεις :

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

- Για γραμμικές συνδέσεις :

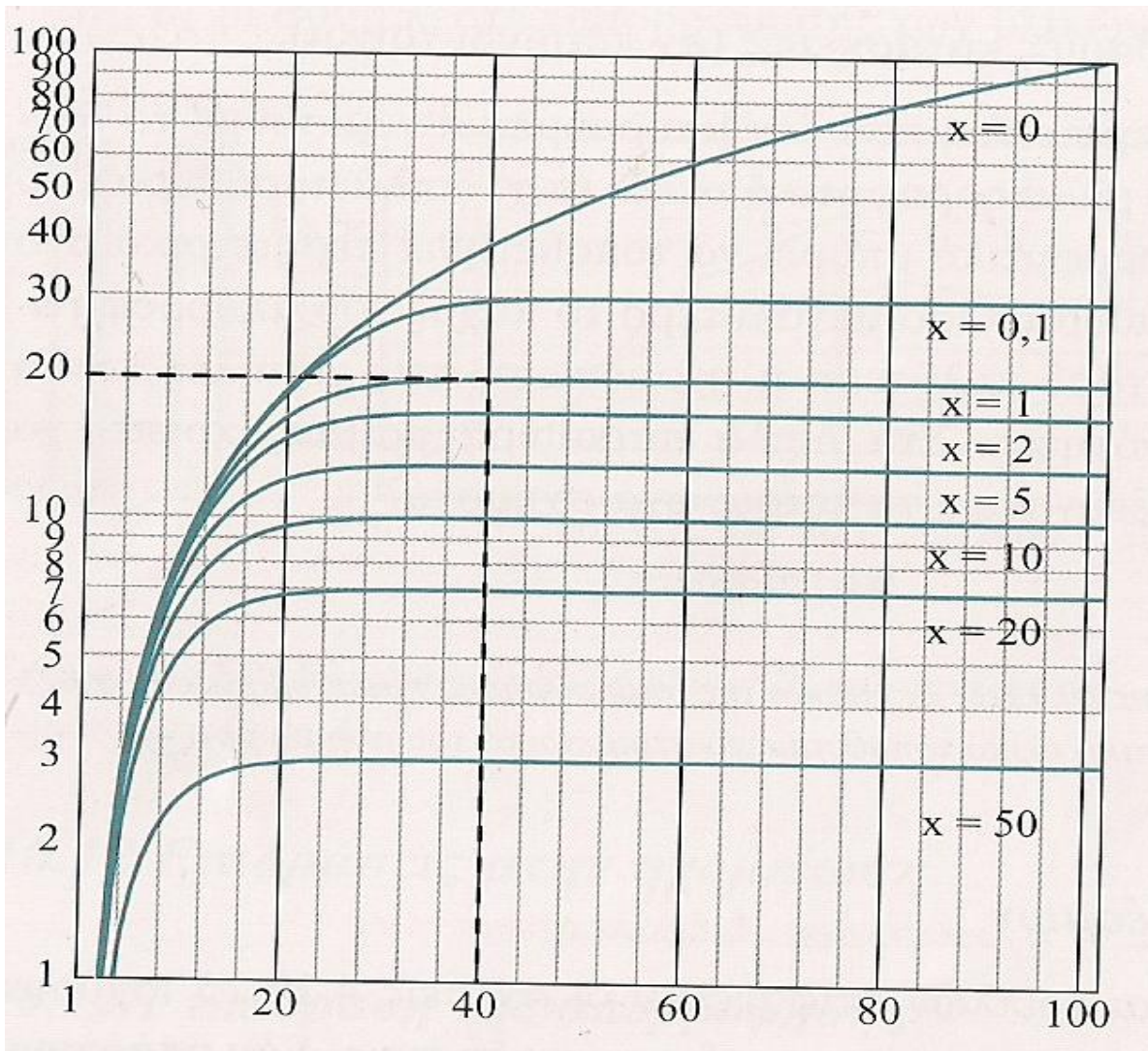
$$\Delta R_m = 20\log(bf_c) + 20\log \frac{m_1}{m_1+m_2} - 18$$

όπου f_c η μέγιστη κρίσιμη συχνότητα,

e, b η οριζόντια απόσταση των σημείων στήριξης σε μέτρα.

4.2.3 Επίδραση των ανοιγμάτων

Όταν σε μία επιφάνεια υπάρχουν ανοίγματα τότε αυτά περιορίζουν σε σημαντικό βαθμό την ηχομείωση των επιφανειών. Η μείωση της ηχομείωσης εξαρτάται από το εμβαδόν των ανοιγμάτων σε σχέση με το εμβαδόν των επιφανειών. Το παρακάτω σχήμα δίδει τη μεταβολή της ηχομείωσης ενός χωρίσματος σε συνάρτηση το % ποσοστό του ανοίγματος (σε σχέση με το συνολικό εμβαδόν της επιφάνειας). Η οριζόντια κλίμακα δίδει την ηχομείωση χωρίς ανοίγματα ενώ η κατακόρυφη την αντίστοιχη ηχομείωση ανάλογα με το ποσοστό του ανοίγματος. Από το σχήμα αυτό προκύπτει ότι σ' ένα χωρίσμα με δείκτη ηχομείωσης 40 dB αν υπάρχει άνοιγμα που να καλύπτει το 1 % του συνολικού εμβαδού, τότε η ηχομείωση μειώνεται στα 20 dB.



Σχήμα 4.2.1 Μείωση του συντελεστή ηχομείωσης συναρτήσει του % ποσοστού του ανοίγματος

4.2.4 Επίδραση της απόσβεσης

Σύμφωνα με την σχέση υπάρχει άμεση σχέση του παράγοντα απωλειών και συνεπώς της απόσβεσης με την ηχομείωση των επιφανειών. Η επίδραση αυτή είναι ιδιαίτερα έντονη για συχνότητες μεγαλύτερες από την κρίσιμη συχνότητα καθώς και στην περιοχή του συντονισμού. Από το σχήμα αυτό φαίνεται ότι αύξηση της απόσβεσης σημαίνει αύξηση της ηχομείωσης για συχνότητες μεγαλύτερες της κρίσιμης συχνότητας. Σώματα με μεγάλη σκληρότητα και αντοχή π.χ. ασάλι, αλουμίνιο κ.λπ., (που έχουν καλή συμπεριφορά στις χαμηλές συχνότητες) συνήθως έχουν μικρή απόσβεση ενώ αντίθετα σώματα με μικρή σκληρότητα και μικρή αντοχή π.χ. πλαστικά, ελαστικά σώματα, έχουν μεγάλη απόσβεση.

Αύξηση της απόσβεσης μπορούμε να επιτύχουμε σε σκληρά σώματα με την προσθήκη βισκοελαστικού πολυμερούς (viscoelastic polymer) στην επιφάνεια που δονείται. Για καλύτερη απόδοση, ένας πρακτικός κανόνας είναι να κολληθεί το πολυμερές στην εν λόγω επιφάνεια, το δε πάχος του θα πρέπει να είναι περίπου τριπλάσιο από το πάχος της επιφάνειας και το βάρος του τουλάχιστον κατά 20% μεγαλύτερο από το βάρος της επιφάνειας.

4.3 ΤΡΟΠΟΙ ΗΧΟΜΕΙΩΣΗΣ

4.3.1 Φυτικά ηχοπετάσματα

Τα φυτικά ηχοπετάσματα, η φύτευση δηλαδή δέντρων και θάμνων κοντά στην πηγή του θορύβου, είναι ένας από τους πιο οικολογικούς τρόπους ηχομόνωσης που υπάρχουν. Σύμφωνα με πανεπιστημιακές έρευνες, η βλάστηση κοντά σε πολυσύχναστους δρόμους μπορεί να μειώσει την ένταση του θορύβου από τα αυτοκίνητα έως και 10 ντεσιμπέλ.

Οι βασικές αρχές σύμφωνα με τις οποίες λειτουργούν τα φυτά ως ηχοπετάσματα είναι:

- Οι ήχοι απορροφώνται από τα φύλλα, τους μίσχους και τα κλαδιά των φυτών.
- Πιο αποτελεσματικά είναι τα δέντρα και οι θάμνοι με σαρκώδη φύλλα και μίσχους.
- Όσο πιο κοντά στην πηγή του θορύβου βρίσκεται ο φράχτης, τόσο καλύτερη ηχομόνωση επιτυγχάνεται.
- Όσο πιο ψηλός και πυκνός είναι ο φράχτης τόσο περισσότερο θόρυβο απορροφά ή αντανακλά.
- Προτιμώνται αειθαλή φυτά που δεν ρίχνουν τα φύλλα τους τον χειμώνα, συνεπώς λειτουργούν «ηχομονωτικά» καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου.
- Ένας φράχτης για να είναι αποτελεσματικός πρέπει να περιλαμβάνει φυτά με πλούσιο φύλλωμα ή πολλά είδη θάμνων σε διαφορετικά μεγέθη και σχήματα.
- Και φυσικά η βλάστηση δεν καταπολεμά μόνο τον θόρυβο. Καθαρίζει την ατμόσφαιρα, προστατεύει από τον άνεμο, δροσίζει, περιορίζει την ανάγκη για κλιματιστικά, προσφέρει καταφύγιο σε πουλιά και ομορφαίνει το περιβάλλον.

4.3.2 Προτεινόμενες διεθνώς δενδροφυτεύσεις

Το κυπαρίσσι Λέυλαντ (*Cupressocyparis Leylandii*) (εικόνα 4.1) είναι το δημοφιλέστερο δέντρο προστασίας από το κυκλοφοριακό θόρυβο γιατί μεγαλώνει σχετικά γρήγορα (περίπου 1μ το έτος). Μπορεί να φτάσει μέχρι και 30μ ύψος. Αυτό το είδος με το πυραμιδοειδές σχήμα παραμένει πράσινο όλο το χρόνο, είναι ανθεκτικό στην ξηρασία και ευδοκιμεί σε όλα τα εδάφη.

Η Τούγια (*Thuja*) (εικόνα 4.2) είναι γένος αποτελούμενο από 5 είδη αειθαλών κωνοφόρων φυτών με λεπιοειδή, σταυρωτά και αντίθετα, ελαφρά αρωματικά φύλλα. Οι καρποί της είναι μικροί σφαιρικοί κώνοι. Προέρχεται από τη Βόρειο Αμερική και την Ανατολική Ασία. Το πιο κοινό είδος είναι η *Thuja Orientalis*. Αναπτύσσεται σε βαθιά, γόνιμα, στραγγιζόμενα, μέτρια υγρά εδάφη και ηλιόλουστες θέσεις, προστατευμένες από τους δυνατούς παγετούς.

Η *Thuja Plicata "Atrovirens"* είναι κωνικό ψηλό φυτό με πράσινο φύλλωμα και μια από τις κυριότερες επιλογές για την κατασκευή φυτοφραχτών σε περιοχές με

ψυχρό κλίμα.

Η Μανόλια (*Magnolia Grandiflora*) είναι μια άλλη αειθαλής ποικιλία που προτιμάται διότι τα κλαδιά τις αναπτύσσονται σχεδόν από τη βάση του κορμού της.

Ο Βραχυχίτωνας (*Brachychiton Populneum*) και η Πικροδάφνη (*Nerium Oleander*) κάποιο είδος κυπαρισσιού και πεύκου, είναι κατάλληλα φυτά. Επειδή, όμως, μεγαλώνουν πολύ, χρειάζονται χώρο.

Άλλες συνιστώμενες ποικιλίες είναι το Δαφνοκέρασο (*Prunus Laurocerasus*) που είναι θάμνος περίφραξης. Συνήθως συνιστάται μια γραμμή φύτευσης από ψηλά αειθαλή δέντρα και στη συνέχεια μια σειρά μικρότερων αειθαλών θάμνων και φυτών. Όσο πιο ψηλό είναι ένα δέντρο τόσο περισσότερο μειώνονται τα επίπεδα του θορύβου. Κάθε επιπλέον 1μ ύψους μειώνει το επίπεδο θορύβου κατά 1,5 dB σύμφωνα με τον Leonard Horper πρώην πρόεδρο τις αμερικανικής εταιρίας αρχιτεκτόνων τοπίου στο βιβλίο του *Landscape architectural graphic standards*.

Τα φυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παγιδεύσουν ή να απορροφήσουν τις δονήσεις των ήχων. Ο ήχος απορροφάται από όλα τα μέρη του φυτού, όπως κορμός, κλαδιά και φύλλα. Όσο τραχύς είναι ο κορμός του φλοιού τόσο καλύτερα απορρόφα τον ήχο. Τα παχιά και σαρκώδη φύλλα είναι επίσης ηχοαπορροφητικά. Βεβαία αυτά τα ειδή πλατύφυλλων χάνουν την αποτελεσματικότητά τους το χειμώνα όταν είναι φυλλοβόλα, όμως έχουν φύλλα τους μήνες που τα παράθυρα είναι ανοιχτά και ο θόρυβος είναι περισσότερο ενοχλητικός.



Εικόνα 4.3.1: Ηχοφράκτης λέυλαντ



Εικόνα 4.3.2: Ηχοφράκτης Τούγια

Η χρήση φυτικών ηχοπετασμάτων σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, όπου δεν υπάρχει χώρος για την φύτευση σε πολλές σειρές, έτσι ώστε να έχουμε ικανοποιητική ηχομείωση, μπορεί να συνυπάρχει επικουρικά με άλλες μεθόδους αποτροπής του θορύβου.

4.4 ΝΟΜΟΣ ΤΗΣ ΜΑΖΑΣ

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

4.4.1 Κάθετη πρόσπτωσηση

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

$$R_0 = 20 \log f_m - 43$$

όπου f η συχνότητα του προσπίπτοντος ήχου και

m η επιφανειακή πυκνότητα (kg/m^2)

4.4.2 Τυχαία πρόσπτωσηση

Όταν ο ήχος προσπίπτει σε μία επιφάνεια πλάγια με γωνία πρόσπτωσης θ τότε εύκολα μπορεί να γραφεί ότι :

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

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

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

Συνήθως στην πράξη η γωνία πρόσπτωσης είναι 0-780 οπότε προσεγγιστικά μπορούμε να γράψουμε :

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

όπου f η συχνότητα του ήχου σε HZ,

m η επιφανειακή πυκνότητα του υλικού σε kg/m^2 .

Η ποσότητα R ονομάζεται δείκτης ηχομείωσης για τυχαία πρόσπτωσηση. Επειδή συνήθως στην πράξη ο ήχος πέφτει στις διάφορες επιφάνειες με τυχαία γωνία, η σχέση αυτή είναι η κατ' εξοχήν χρησιμοποιούμενη. Αν το τοίχωμα είναι συμπαγές και άκαμπτο με μεγάλη επιφανειακή πυκνότητα (μεγαλύτερη από 100 kg/m^2) ο δείκτης ηχομείωσης δίδεται με αρκετά ικανοποιητική προσέγγιση από την παραπάνω σχέση και αποτελεί το νόμο της μάζας.

Ο νόμος της μάζας για δεδομένο υλικό δηλώνει ότι η ηχομείωση του υλικού είναι ανάλογη του λογάριθμου της συχνότητας και για δεδομένη συχνότητα είναι ανάλογα της επιφανειακής ρ πυκνότητας. Πιο συγκεκριμένα ο νόμος της μάζας δηλώνει ότι για δεδομένη συχνότητα η ηχομείωση αυξάνει κατά 6 dB για κάθε διπλασιασμό της επιφανειακής ρ μάζας και για την ίδια επιφάνεια 6 dB για κάθε διπλασιασμό της συχνότητας.

Επί προσθέτως δηλώνει ότι σε χαμηλές συχνότητες οι ηχομονωτικές ιδιότητες των υλικών είναι πτωχές. Η ηχομονωτική συμπεριφορά των διαφόρων υλικών στην πράξη και σε ορισμένες συχνότητες αποκλίνει απ' αυτήν που προβλέπει ο νόμος της

μάζας. Δύο φαινόμενα, το φαινόμενο της σύμπτωσης και το φαινόμενο του συντονισμού είναι κυρίως υπεύθυνα για τη μείωση της ηχομονωτικής ικανότητας των διαφόρων υλικών.

4.5 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΗ ΗΧΟΜΕΙΩΣΗΣ

4.5.1 Προσεγγιστικός υπολογισμός δείκτη ηχομείωσης απλών επιφανειών

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

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

και

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

όπου m η επιφανειακή πυκνότητα του υλικού σε kg/m^2 ,
 n ο παράγοντας απωλειών του υλικού,

ρc η χαρακτηριστική αντίσταση του αέρα (415 MKS Rayls).

Για συχνότητες μεταξύ των δύο παραπάνω αναφερομένων ορίων, υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ θεωρητικών και πραγματικών συντελεστών. Ο υπολογισμός της ηχομείωσης στην περίπτωση αυτή γίνεται με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των τιμών $f_c/2$ και f_c .

4.5.2 Προσεγγιστικός υπολογισμός δείκτη ηχομείωσης σύνθετων επιφανειών

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

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

όπου τ_i ο συντελεστής διάδοσης κάθε ομογενούς επιφάνειας

Ο δείκτης ηχομείωσης που αντιστοιχεί στην σύνθετη επιφάνεια δίδεται τότε από τον τύπο:

$$R = 10 \log \frac{1}{\bar{\tau}}$$

5. ΗΧΟΠΕΤΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΜΕΙΩΣΗ ΑΕΡΟΦΕΡΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ

5.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΗΧΟΠΕΤΑΣΜΑΤΩΝ

Ένας αρκετά αποτελεσματικός τρόπος μείωσης του θορύβου είναι η παρεμβολή μεταξύ της πηγής και του δέκτη ενός φράγματος. Τα φράγματα χρησιμοποιούνται για την μείωση του θορύβου τόσο σε ανοιχτούς όσο και σε κλειστούς χώρους. **Με τον όρο φράγμα (ή ηχοπέτασμα ή ηχώφραγμα) εννοούμε μια στερεή επιφάνεια κατασκευασμένη από ηχομονωτικό υλικό, το οποίο τοποθετείται μεταξύ πηγής και δέκτη.** Το φράγμα παρά το γεγονός ότι στην περιοχή που βρίσκεται η πηγή η στάθμη λόγω της ανάκλασης αυξάνει, δημιουργεί πίσω του μια περιοχή <<σκιάς>> που μειώνει το θόρυβο που θα υπήρχε χωρίς την παρουσία του.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των φραγμάτων διότι επιτρέπουν τη διάδοση του ήχου στην περιοχή της γεωμετρικής σκιάς είναι :

1. Η διάδοση του ήχου μέσα από το υλικό του φράγματος. Για τον λόγο αυτό το υλικό του φράγματος πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να έχει ηχομείωση τουλάχιστον 5dB μεγαλύτερη από την επιθυμητή.
2. Η περίθλαση του ήχου από τις πλευρές και το πάνω όριο της επιφάνειας του φράγματος. Η αιτία αυτή αποτελεί και το σημαντικότερο πρόβλημα. Η επίδραση του φαινομένου της περίθλασης εξαρτάται από τις διαστάσεις του φράγματος αλλά και από το μήκος κύματος του ήχου.
3. Η διάδοση στρερεόφερτου θορύβου μέσω του εδάφους και επανεκπομπή ήχου από την πλευρά του δέκτη. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα έντονο στην περίπτωση που το φράγμα χρησιμοποιείται για τον περιορισμό του θορύβου που προέρχεται από τα τρένα. Στις περιπτώσεις αυτές το φράγμα πρέπει να επεκτείνεται και μέσα στο έδαφος. Ο διαδιδόμενος ήχος με τον τρόπο αυτό είναι ήχος με χαμηλές συχνότητες και συνεπώς με μεγάλο μήκος κύματος, γεγονός που δυσκολεύει την επέκταση του φράγματος μιας και απαιτούνται μεγαλύτερα ύψη φράγματος.

Κατά την κατασκευή των φραγμάτων πρέπει να τηρούνται οι εξής κανόνες σχεδιασμού :

- I. Το ύψος πρέπει να είναι τουλάχιστον δύο φορές μεγαλύτερο από το ύψος της πηγής.
- II. Το μήκος του φράγματος πρέπει να είναι πολλές φορές μεγαλύτερο από το ύψος του.

5.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΗΧΟΠΕΤΑΣΜΑΤΩΝ

Ως προς τον τρόπο μείωσης του θορύβου, τα ηχοπετάσματα διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες :

- Ø Ηχοπετάσματα ανάκλασης : Τα ηχοπετάσματα αυτά μειώνουν το επίπεδο το θορύβου, ανακλώντας τον ήχο που παράγεται από την πλευρά της οδού.
- Ø Ηχοπετάσματα απορρόφησης : Ο ήχος που φτάνει στο ηχοπέτασμα απορροφάται από τα κατάλληλης μορφής υλικά κατασκευής του.
- Ø Ηχοπετάσματα διασποράς ήχου : Διατάξεις οι οποίες μέσω της γωνιώδους μορφής τους διασπείρουν τον ήχο σε διάφορες κατευθύνσεις. Πιο συνήθη ηχοπετάσματα αυτού του τύπου είναι τα κεκλιμένα προς τα έξω, τα οποία στέλνουν τον ήχο προς τα πάνω.
- Ø Ηχοπετάσματα ειδικής διαμόρφωσης κορυφής : Είναι ηχοπετάσματα με ειδική διαμόρφωση στην κορυφή τους, όπως οριζόντια στοιχεία ή πρόσθετες όψεις.

Για πολλά χρόνια ο μοναδικός τύπος ηχοπετασμάτων που εφαρμόστηκε ήταν ο ανακλαστικός. Με την πάροδο του χρόνου όμως, η ανάγκη για πιο αποτελεσματικές λύσεις οδήγησε στην ανάπτυξη και των λοιπών τύπων.

5.3 ΥΛΙΚΑ ΗΧΟΠΕΤΑΣΜΑΤΩΝ

Μέχρι τώρα αφέθηκε να εννοηθεί ότι ο καθολικός σχεδιασμός μίας λύσης με ηχοπετάσματα έγκειται κατά κύριο λόγο στη διαχείριση της ακουστικής, δηλαδή σχετικά με το λόγο που τοποθετούνται. Στην πραγματικότητα, αυτή είναι μόνο η μία όψη του νομίσματος. Τα μεγάλα ύψη των ηχοπετασμάτων, εκτεταμένα σε μεγάλα μήκη, αναμειγνύουν αναγκαστικά και την οπτική διάσταση στο σχεδιασμό. Ένα ηχοπέτασμα μπορεί να είναι μονότονο και αντιαισθητικό, τόσο για τους οδηγούς, όσο και για τους παρόδιους. Τα ηχοπετάσματα, πλέον, αντιμετωπίζονται ως αρχιτεκτονικά στοιχεία, τα οποία, μάλιστα, πρέπει να είναι όχι μόνο αισθητικά αποδεκτά, αλλά και να συμβαδίζουν με το χαρακτήρα του περιβάλλοντος χώρου.

Έτσι, στον καθορισμό της μορφής και των υλικών κατασκευής, μαζί με τη λειτουργική υπεισέρχεται πλέον και η αρχιτεκτονική διάσταση. Χαρακτηριστικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των ηχοπετασμάτων είναι:

Εδαφικά υλικά: Έχουν πιο αποδεκτή εμφάνιση, δεν προκαλούν αίσθημα περιορισμού, μπορούν να φυτευτούν και έχουν απεριόριστη διάρκεια ζωής. Ωστόσο, απαιτούν πολύ μεγάλη επιφάνεια ανάπτυξης, ενώ πρέπει να εξετάζονται και οι γεωτεχνικές παράμετροι του εδάφους.

Ξύλο: Μπορεί να βρεθεί και σε ανακλαστικούς, και σε απορροφητικούς τύπους.

Εξαιρετικά φιλικό, συνδυάζεται αποτελεσματικά με φυσικό υπόβαθρο, είναι όμως ακατάλληλο σε αστικό περιβάλλον. Τα ξύλινα ηχοπετάσματα πρέπει να είναι πάντα κατακόρυφα, ενώ σε μεγάλο μήκος μπορεί να καταντούν μονότονα.

Μεταλλικά φύλλα: Είναι γενικά απορροφητικού τύπου, αλλά μπορεί να βρεθούν και ανακλαστικά ηχοπετάσματα αυτού του είδους. Ταιριάζουν περισσότερο σε αστικό περιβάλλον και μπορούν να συνδυαστούν με διαφανή στοιχεία, ή γενικά να αποκτήσουν ποικιλία στη μορφή τους.

Σκυρόδεμα: Είναι είτε ανακλαστικού, είτε απορροφητικού τύπου. Στεγνές επίπεδες επιφάνειες θα πρέπει να αποφεύγονται, με διαμόρφωση σχημάτων και σχεδίων, ενώ η όψη τους βελτιώνεται σημαντικά σε συνδυασμό με βλάστηση.

Οπτόπλινθοι: Τα ηχοπετάσματα με μορφή τοιχοποιίας αποπνέουν μία διαφορετική αισθητική. Συμπαγείς οπτόπλινθοι είναι ανακλαστικού τύπου, ενώ διάτρητοι, απορροφητικού.

Πλαστικά: Όντας ολοένα και φθηνότερα, και με δεδομένη την ικανότητα να παρέχουν ευρεία ποικιλία σε μορφές, κατέχουν σημαντικό μερίδιο στις εφαρμογές ηχοπετασμάτων.

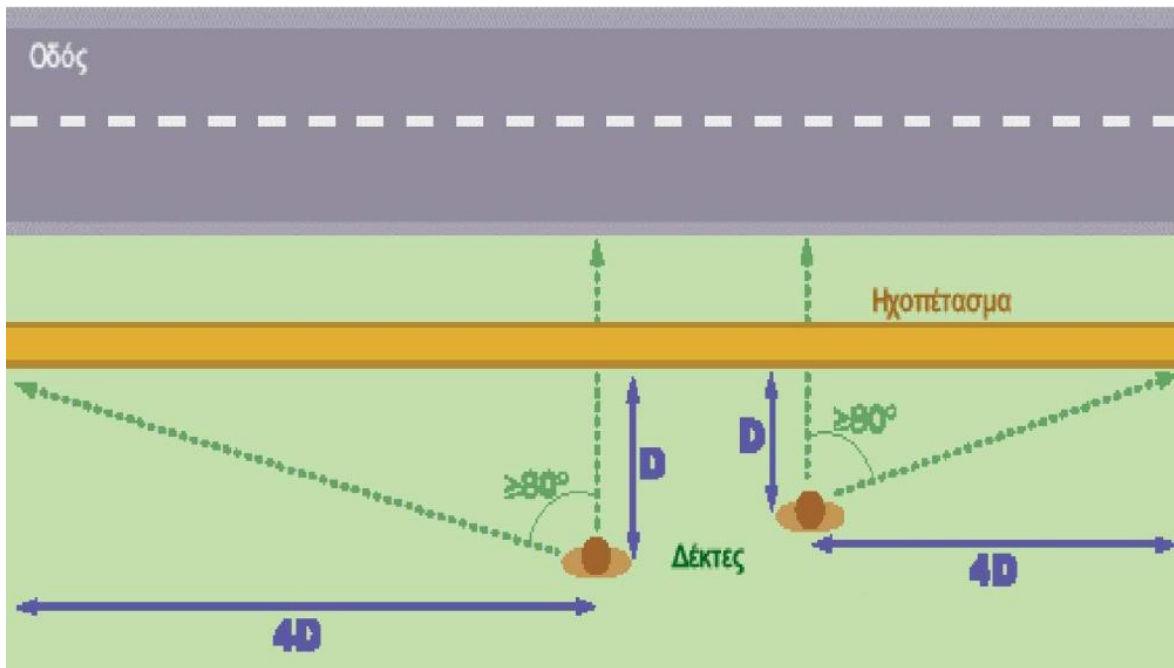
Διαφανή υλικά: Αποτελούμενα από γυαλί, ακρυλικά ή πολυκαρβονικά υλικά, τα διαφανή ηχοπετάσματα είναι ιδεώδη για περιπτώσεις που απαιτείται η διατήρηση του χαρακτήρα του περιβάλλοντος, λόγω της οπτικής τους ουδετερότητας, ενώ δεν προκαλούν αίσθημα περιορισμού στον οδηγό και επιτρέπουν τη διέλευση του φωτός. Ενδείκνυνται για γέφυρες.

Φυτικά υλικά: Τοποθετούνται επάνω σε σκελετό. Έχουν το μειονέκτημα της απαίτησης συντήρησης.

5.4 ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ – ΕΠΕΚΤΑΣΗ – ΥΨΟΣ

ΥΨΟΣ

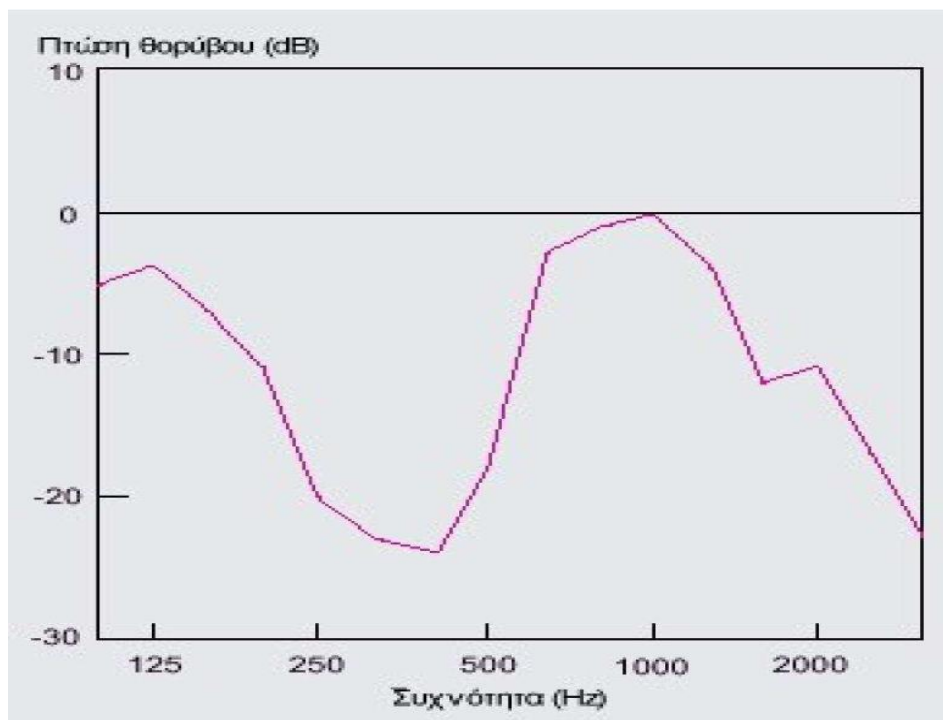
Σαν πρώτη αρχή, για να είναι αποτελεσματικό ένα ηχοπέτασμα θα πρέπει να είναι επαρκώς ψηλό και να έχει επαρκές μήκος, ώστε να αποτρέπει την απευθείας μετάδοση των ηχητικών κυμάτων από την οδό στην προστατευόμενη περιοχή. Αυτό σημαίνει ότι ένα ηχοπέτασμα θα πρέπει να εκτείνεται σε όλο το μήκος της εν λόγω περιοχής, με επιπλέον μήκος εκατέρωθεν τουλάχιστον 4D, όπου D η απόσταση του ηχοπετάσματος από το δέκτη (σύμφωνα με το Υπουργείο Μεταφορών και Αυτοκινητοδρόμων των ΗΠΑ) (εικόνα 5.1)



Εικόνα 5.1: Ελάχιστο μήκος ηχοπετάσματος εκατέρωθεν της προστατευόμενης περιοχής.

Τυπικό ύψος ενός ηχοπετάσματος μαζί με τις στηρίξεις τους είναι τα 5m.

Στο παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 5.2) δίνεται η επιτυγχάνόμενη μείωση του θορύβου από ένα απλό ανακλαστικό ηχοπέτασμα του εν λόγω ύψους, η οποία εξαρτάται και από τη συχνότητα του ήχου.



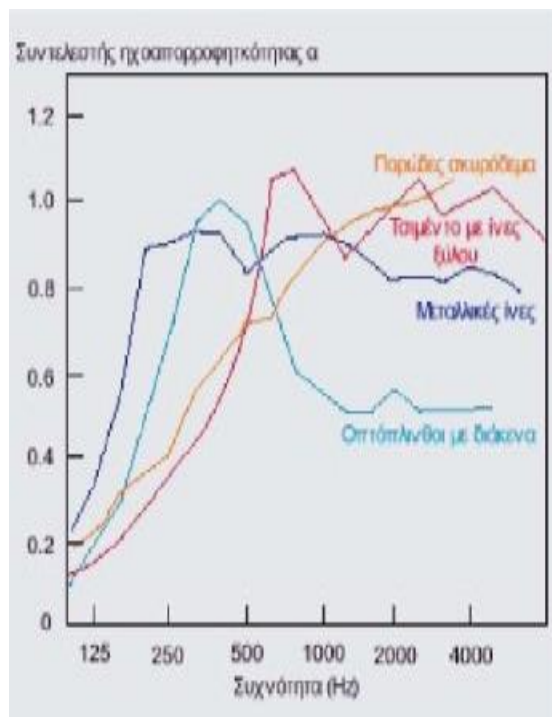
Εικόνα 5.2: Μείωση θορύβου από απλό ανακλαστικό ηχοπέτασμα ύψους 2m.

Για περαιτέρω μείωση του επιπέδου του θορύβου, το ηχοπέτασμα μπορεί να

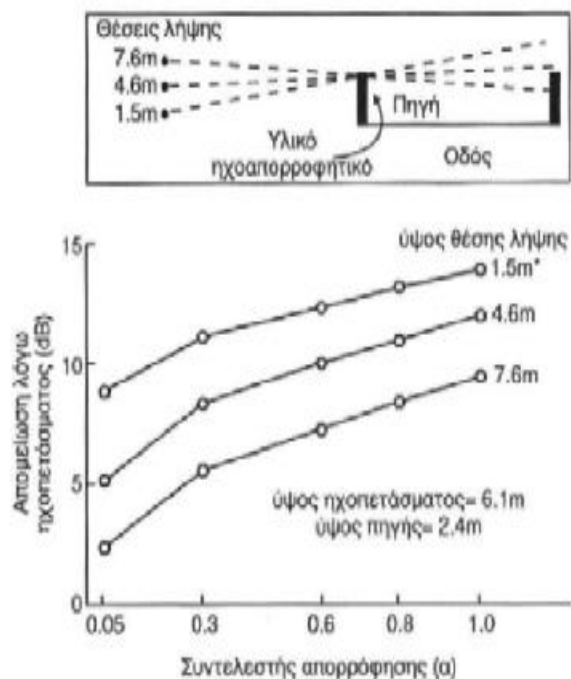
γίνει πιο ψηλό. Βασική παρατήρηση που προκύπτει από τη μελέτη της συμπεριφοράς των ηχοπετασμάτων είναι πως μία σημαντική απομείωση επιτυγχάνεται όταν το ηχοπέτασμα έχει τόσο ύψος, ώστε να αποτρέπει τη άμεση οπτική επαφή του δέκτη από τα οχήματα. Από εκεί και πέρα, για κάθε επιπλέον m αύξησης του ύψους, προκαλείται επιπλέον μείωση κατά περίπου $1,5dB$. Τα συνήθη ύψη των ηχοπετασμάτων φτάνουν το πολύ τα $8-9 m$.

Ένα βήμα προς τη βελτίωση της απόδοσης των ηχοπετασμάτων πραγματοποιήθηκε με την εφαρμογή των απορροφητικών διατάξεων. Οι διατάξεις αυτές ενδείκνυνται σε περιπτώσεις όπου τοποθετούνται ηχοπετάσματα σε κάθε πλευρά της οδού, οπότε παρατηρείται το φαινόμενο της αύξησης του θορύβου μέσα στην οδό, λόγω διαδοχικών ανακλάσεων επάνω στα αντικριστά ηχοπετάσματα. Τα απορροφητικά ηχοπετάσματα αποτελούνται από ινώδη ή πορώδη υλικά, τα οποία απορροφούν ποσοστό του προσπίπτοντος ήχου.

Η απορροφητικότητα ενός υλικού εκφράζεται από το **συντελεστή απορρόφησης α** , ο οποίος κυμαίνεται από 0 για πλήρως ανακλαστικό, έως 1 για πλήρως απορροφητικό υλικό. Ο συντελεστής απορρόφησης προσδιορίζεται για συγκεκριμένη συχνότητα, ή για ομάδα συχνοτήτων (εικόνα 5.3).



Εικόνα 5.3: Συντελεστές απορροφητικότητας ηχοπετασμάτων.



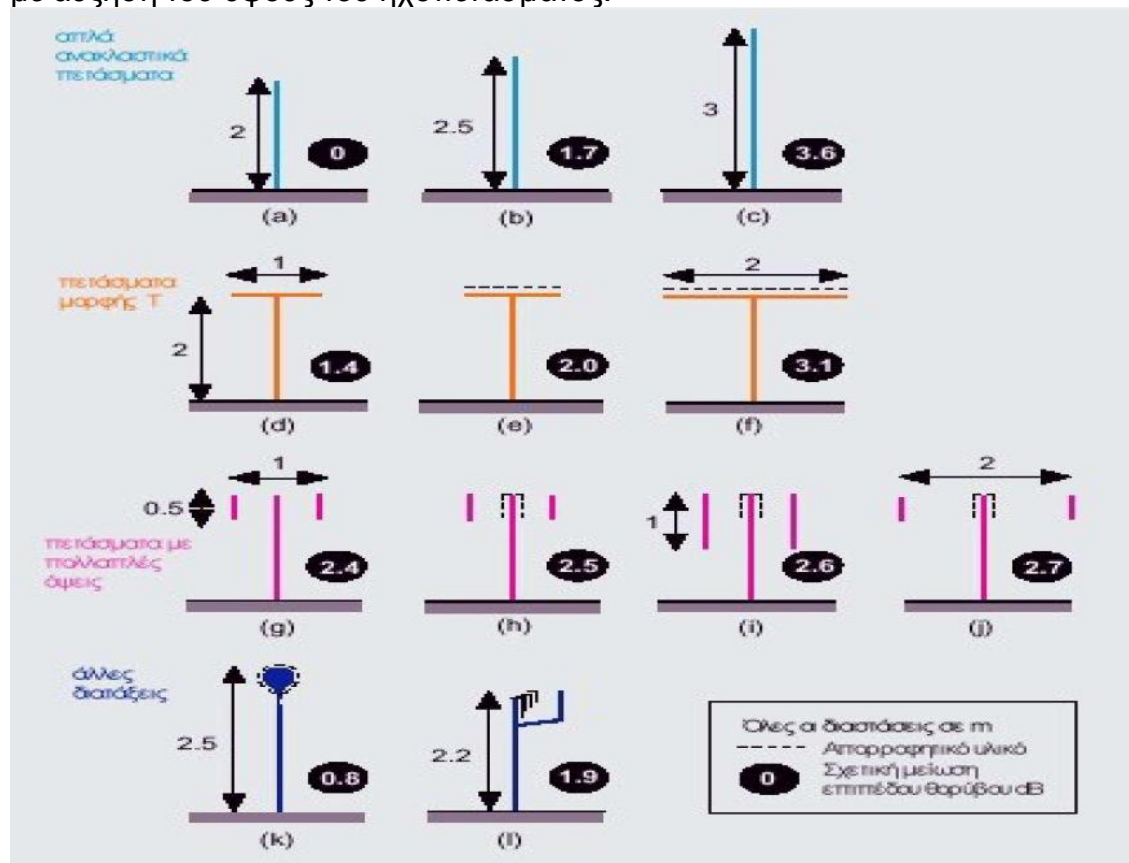
Εικόνα 5.4: Ηχοεξασθένιση α για διάφορα υλικά απορροφητικών ηχοπετασμάτων.

Παραπάνω (εικόνα 5.4) δίνονται τυπικά αποτελέσματα απομείωσης του θορύβου για απορροφητικά ηχοπετάσματα διάφορων συντελεστών απορροφητικότητας α . Σε γενικές γραμμές, πειράματα έχουν δείξει ότι η επιπλέον απομείωση του θορύβου από ένα απορροφητικό ηχοπέτασμα, σε σχέση με το αν

αυτό ήταν απλώς ανακλαστικό, φτάνει να ισοδυναμεί με άρση περισσότερης από της μισής κυκλοφορίας. Για να είναι αποτελεσματικό ένα απορροφητικό υλικό, θα πρέπει να έχει υψηλό συντελεστή απορροφητικότητας (τουλάχιστον 0,6) στις συχνότητες ήχου που εμφανίζονται περισσότερο στην οδό, να είναι ανθεκτικό στις περιβαλλοντικές συνθήκες και να μην μειώνεται η απορροφητικότητά του με το χρόνο.

Μία ακόμη εκδοχή ηχοπετασμάτων, και εναλλακτική των απορροφητικών, είναι τα γωνιώδη και κεκλιμένα ηχοπετάσματα. Οι διατάξεις αυτές ανακλούν τον ήχο προς τα πάνω, μειώνοντας το θόρυβο σε θέσεις κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Έρευνες έδειξαν ότι παράλληλα κεκλιμένα προς τα έξω ηχοπετάσματα με κλίση 10° και άνω επιτυγχάνουν παρόμοια απομείωση σε σχέση με παράλληλα, κατακόρυφα και πλήρως απορροφητικά. Παρόμοια απομείωση με τα πλήρως κεκλιμένα μπορεί να επιτύχουν και κατάλληλα μελετημένα μερικώς πτυχωτά ηχοπετάσματα. Το μειονέκτημα όλων αυτών των διατάξεων είναι πως με συγκεκριμένες καιρικές συνθήκες είναι δυνατόν ο ήχος να επιστρέφει πίσω στο έδαφος.

Τέλος, μία ακόμη ευρεία κατηγορία ηχοπετασμάτων είναι αυτά που έχουν ειδική διαμόρφωση στην κορυφή τους. Τέτοιες περιπτώσεις είναι μορφές T, οι πολλαπλές όψεις κλπ., οι οποίες προκαλούν απομείωση με διάφορους τρόπους. Παρακάτω (εικόνα 5.5) δίνεται η επιπλέον απομείωση που επιτυγχάνεται από διάφορες μορφές, σε σχέση με απλό ανακλαστικό ηχοπέτασμα ύψους 2 m. Παρατηρείται μία μέση γενική απομείωση της τάξης των 2,5-3,5 dB, που αντιστοιχεί με αύξηση του ύψους του ηχοπετάσματος.



Εικόνα 5.5: Επιτυγχονόμενη επιπλέον απομείωση θορύβου από ηχοπετάσματα διαφόρων μορφών, σε σχέση με απλό ανακλαστικό ηχοπέτασμα ύψους 2m.

ΕΠΕΚΤΑΣΗ

Από τα όσα παρατέθηκαν παραπάνω γίνεται φανερό ότι, λίγο ως πολύ, τόσο οι διαστάσεις ενός ηχοπετάσματος, και πιο συγκεκριμένα το ύψος και το μήκος, όσο και η μορφή του, είναι στοιχεία που καθορίζονται από τις λειτουργικές απαιτήσεις της τοποθέτησης, και ειδικότερα από τις ανάγκες απομείωσης του θορύβου.

Ηχοπετάσματα μπορούν, ανάλογα με τις συνθήκες, να τοποθετηθούν είτε στη μία μόνο πλευρά της οδού, είτε και στις δύο, ενώ δεν λείπουν ηχοπετάσματα και στη διαχωριστική νησίδα. Όσο πιο κοντά στην οριογραμμή του οδοστρώματος, δηλαδή στην πηγή του ήχου, βρίσκεται ένα ηχοπέτασμα, τόσο πιο αποτελεσματικά λειτουργεί. Από την άλλη, οι απαιτήσεις ασφάλειας και ορατότητας επιβάλλουν την τοποθέτησή του όσο το δυνατόν μακρύτερα. Σε κάθε περίπτωση, αν το ηχοπέτασμα βρίσκεται σε κοντινή απόσταση από το οδόστρωμα θα πρέπει οπωσδήποτε να προστατεύεται από το κατάλληλο στηθαίο.

Επίσης, ανοίγματα σε ηχοπετάσματα καταστρέφουν την αποτελεσματικότητα τους και θα πρέπει να αποφεύγονται. Εντούτοις, όπου αυτά επιβάλλονται, όπως σε περιπτώσεις διασταυρώσεων, θα πρέπει να διαμορφώνεται εξωτερικό ηχοπέτασμα που να καλύπτει την περιοχή του ανοίγματος, με ανάλογη διαμόρφωση της διασταύρωσης. Σε μεγάλους μήκους ηχοπετάσματα θα πρέπει να προβλέπονται και θύρες διαφυγής.

ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ

Από στατικής απόψεως, τα ηχοπετάσματα είναι εκτεταμένες επιφανειακές κατασκευές που δέχονται κυρίως φορτίσεις ανεμοπίεσης, χωρίς να λείπουν και φορτία βαρύτητας λόγω της μορφής. Κατά συνέπεια, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στο σχεδιασμό του συστήματος παραλαβής οριζόντιων δυνάμεων, κάθετα στο επίπεδο του ηχοπετάσματος, και στη μεταφορά και παραλαβή των εν λόγω φορτίων από τη θεμελίωση.

Ο κανόνας επιβάλλει ότι στις περισσότερες περιπτώσεις τα ηχοπετάσματα συντίθενται από επιμέρους ελαφρά επιφανειακά τεμάχια, που μεταφέρουν τα φορτία τους σε κατακόρυφους στύλους. Σε άλλες περιπτώσεις το ηχοπέτασμα είναι απλώς ένας επιμήκης τοίχος από οπλισμένο σκυρόδεμα, ο οποίος μεταφέρει όλα τα φορτία του απευθείας στη θεμελίωση, ενώ τελευταία η ίδια τεχνική εφαρμόζεται και σε συγκεκριμένα υλικά, που διαμορφώνουν λεπτά επιφανειακά στοιχεία, χωρίς ανάγκη στύλων. Όπου υπάρχουν στύλοι, η μεταξύ τους απόσταση μπορεί να αυξηθεί με εφαρμογή και οριζόντιων φερόντων στοιχείων, στην κορυφή ή στην πλάτη του ηχοπετάσματος.

Η θεμελίωση των διατάξεων είναι και αυτή αρκετά σημαντική παράμετρος στο σχεδιασμό, καθώς μπορεί να χρειαστεί να αντιμετωπίσει αυξημένες ανεμοπιέσεις, δυσμενείς εδαφικές συνθήκες από φτωχής φέρουσας ικανότητας επιχώματα, ή και να συνδυαστεί με το σύστημα αποχέτευσης της οδού.

Επιμήκεις επιφάνειες - πρόβολοι, όπως οι τοίχοι από σκυρόδεμα, εδράζονται

επάνω σε γραμμικά θεμέλια από οπλισμένο σκυρόδεμα. Για τις υπόλοιπες συνήθεις περιπτώσεις, όπου τα φορτία μεταφέρονται στη θεμελίωση από κατακόρυφους στύλους, μπορούν να εφαρμοστούν οι παρακάτω λύσεις θεμελίωσης:

- Σε επίπεδο έδαφος ή σε επιχώματα ύψους το πολύ 3,5 m, και με καλή φέρουσα ικανότητα, αρκούν τοπικά πέδιλα από σκυρόδεμα σε κάθε στύλο.
- Σε ψηλά επιχώματα, και γενικά σε χαμηλής φέρουσας ικανότητας εδάφη ή για υψηλές ανεμοπιέσεις, κάθε στύλος επεκτείνεται σε χαλύβδινο πάσσαλο.
- Εναλλακτικά της προηγούμενης περίπτωσης, και επειδή οι πάσσαλοι κοστίζουν, μπορούν να τοποθετηθούν πάσσαλοι μόνο ανά δύο ή τρεις στύλους, αλλά όλοι οι στύλοι στη βάση τους θα συνδέονται από δοκό οπλισμένου σκυροδέματος, ώστε τα φορτία από τους μη πασσαλωμένους στύλους να μεταφέρονται και αυτά στους υπάρχοντες πασσάλους. Σε αυτήν την περίπτωση οι πάσσαλοι θα είναι μεν λιγότεροι, αλλά μεγαλύτερου μήκους.
- Όπου υπάρχει τοίχος αντιστήριξης, το ηχοπέτασμα μπορεί να εδραστεί επάνω του με κοχλίωση των κατακόρυφων στύλων επάνω σε ειδικές βάσεις, πακτωμένες επάνω στην κορυφή του τοίχου. Η ίδια τεχνική μπορεί να εφαρμοστεί ούτως ή άλλως, με γραμμικό πέδιλο θεμελίωσης. Πάντως, η επιπλέον φόρτιση θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό του τοίχου αντιστήριξης.
- Πάκτωση των κατακόρυφων στύλων μέσα σε στηθαίο τύπου New Jersey, στερεωμένο με τη σειρά του σε γραμμικό πέδιλο από οπλισμένο σκυρόδεμα.

5.5 ΧΩΡΟΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΗΧΟΠΕΤΑΣΜΑΤΩΝ ΣΕ ΚΑΤΟΙΚΗΜΕΝΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ

Συνήθως οι χώροι εγκατάστασης των ηχοπετασμάτων γίνονται σε κατοικημένη περιοχή με σκοπό την μείωση του αερόφερτου θορύβου από όπου και αν προέρχεται. Στην χώρα μας μερικοί από αυτούς τους χώρους που χρειάζεται να τοποθετήσουμε τα ηχοφράγματα είναι οι εξής:

- Εργοτάξια
- Δρόμοι ταχείας κυκλοφορίας , Αυτοκινητόδρομοι
- Σιδηροδρομικές γραμμές
- Λατομεία

6. ΜΕΛΕΤΗ ΗΧΟΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΣΕ ΔΡΟΜΟ ΤΑΧΕΙΑΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ

6.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η παρούσα εργασία αναφέρεται στην μελέτη εγκατάστασης ηχοφράγματος σε δρόμο ταχείας κυκλοφορίας με σκοπό την δραστική μείωση του αερόφερτου θορύβου που προέρχεται από τις μεγάλες ταχύτητες των αυτοκινήτων και των μηχανών. Επειδή ο θόρυβος επηρεάζει αρνητικά την ψυχολογική αλλά και την σωματική υγεία των ανθρώπων είναι σημαντικό να μειωθεί δραστικά. Στη μελέτη που ακολουθεί γίνεται αναφορά σε τρία είδη ηχοφραγμάτων (λεπτό ,παχύ ,διπλό). Παρακάτω γίνεται η περιγραφή και η ποσοτική ανάλυση του καθενός από τα ηχοπετάσματα ως προς την αποτελεσματικότητάς τους στη μείωση του θορύβου.

6.2 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ ΣΕ ΔΙΩΡΟΦΗ ΚΑΤΟΙΚΙΑ ΠΛΗΣΙΟΝ ΔΡΟΜΟΥ ΤΑΧΕΙΑΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ.

Οι μετρήσεις θορύβου ελήφθησαν κατά το χρονικό διάστημα από 3/4/2012 έως 5/4/2012, για τρεις ημερήσιες χρονικές περιόδους (πρωί-μεσημέρι-απόγευμα) και η κάθε μέτρηση λήφθηκε με διαφορά 30 sec από την άλλη. Παρακάτω φαίνονται οι αρχικές μετρήσεις θορύβου.

Ημερομηνία α 3/4/2012		Ημερομηνία α 3/4/2012		Ημερομηνία α 3/4/2012	
Ημέρα α	Ώρα	Ημέρα α	Ώρα	Ημέρα α	Ώρα
Τρίτη	9:00 - 9:30	Τρίτη	14:00 - 4:30	Τρίτη	19:00 - 9:30

A/A	Ήχος (db)
1	79,0
2	82,0
3	84,1
4	88,2
5	81,0
6	79,8
7	82,2
8	80,7
9	83,8
10	85,7

A/A	Ήχος (db)
1	99,3
2	78,3
3	78,8
4	80,6
5	77,2
6	78,6
7	72,0
8	85,5
9	76,9
10	74,1

A/A	Ήχος (db)
1	75,1
2	83,2
3	74,9
4	70,0
5	72,2
6	70,2
7	72,6
8	71,0
9	73,0
10	74,9

Ημερομηνία
4/4/2012
Ημέρα
Τετάρτη
Ώρα
9:00 - 9:30

A/A	Ήχος (db)
1	79,8
2	85,8
3	88,3
4	81,5
5	79,6
6	81,9
7	88,4
8	82,6
9	80,4
10	77,1

Ημερομηνία
4/4/2012
Ημέρα
Τετάρτη
Ώρα
14:00 - 14:30

A/A	Ήχος (db)
1	83,8
2	81,3
3	79,2
4	80,3
5	90,3
6	79,3
7	81,2
8	81,0
9	88,8
10	80,0

Ημερομηνία
4/4/2012
Ημέρα
Τετάρτη
Ώρα
19:00 - 9:30

A/A	Ήχος (db)
1	77,5
2	77,1
3	78,8
4	79,7
5	78,6
6	76,5
7	80,0
8	77,8
9	79,9
10	79,8

Ημερομηνία
5/4/2012
Ημέρα
Πέμπτη
Ώρα
9:00 - 9:30

A/A	Ήχος (db)
1	81,7
2	80,2
3	77,4
4	87,2
5	78,6
6	79,6
7	81,5
8	78,9
9	94,7
10	81,4

Ημερομηνία
5/4/2012
Ημέρα
Πέμπτη
Ώρα
14:00 - 4:30

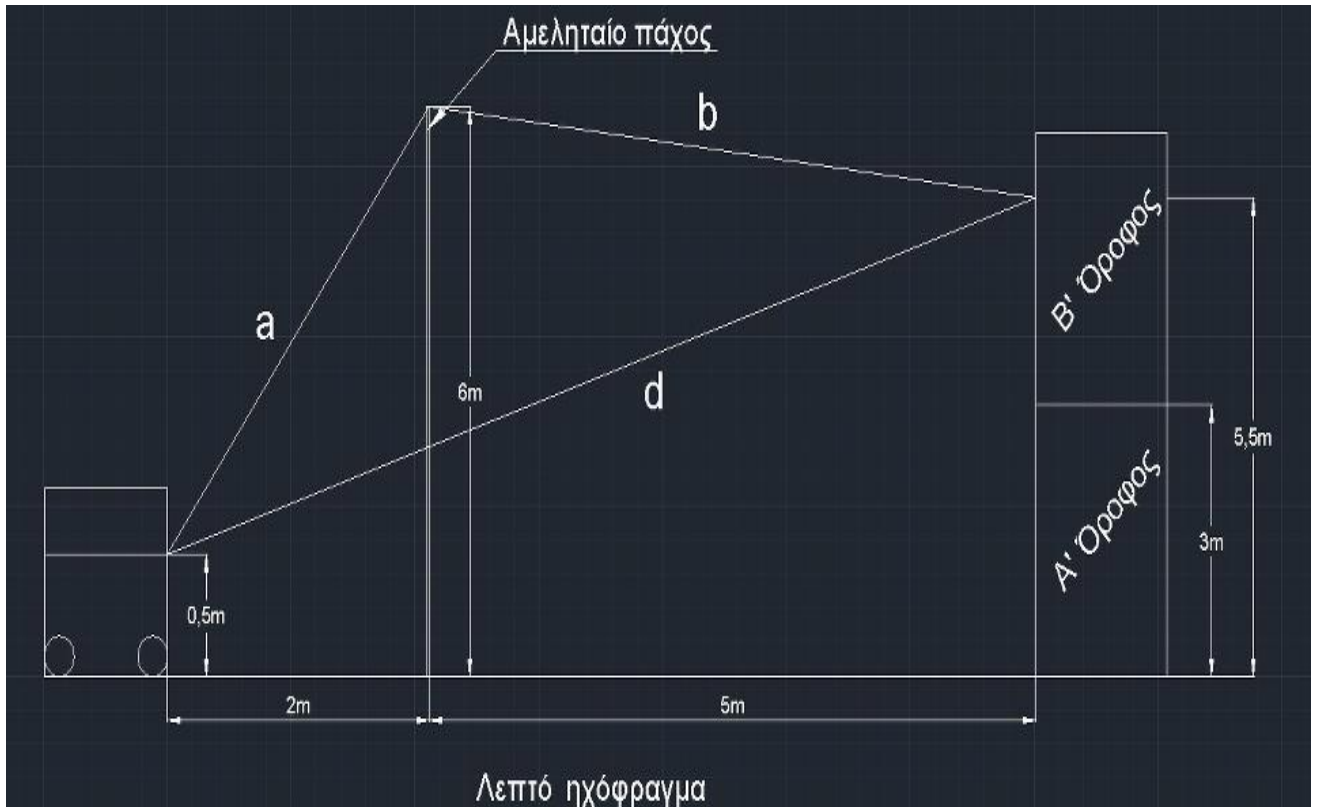
A/A	Ήχος (db)
1	88,1
2	74,7
3	81,5
4	74,0
5	75,7
6	75,1
7	82,3
8	78,3
9	78,7
10	81,1

Ημερομηνία
5/4/2012
Ημέρα
Πέμπτη
Ώρα
19:00 - 9:30

A/A	Ήχος (db)
1	75,6
2	72,1
3	81,2
4	70,3
5	74,0
6	79,3
7	77,5
8	71,7
9	73,0
10	76,5

6.3 ΧΡΗΣΗ ΛΕΠΤΟΥ ΗΧΟΠΕΤΑΣΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΙΩΣΗ ΑΕΡΟΦΕΡΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ

6.3.1 Σχήμα



Σχήμα 6.3. 1 : Λεπτό ηχοφράγμα

6.3.2 Τύπο

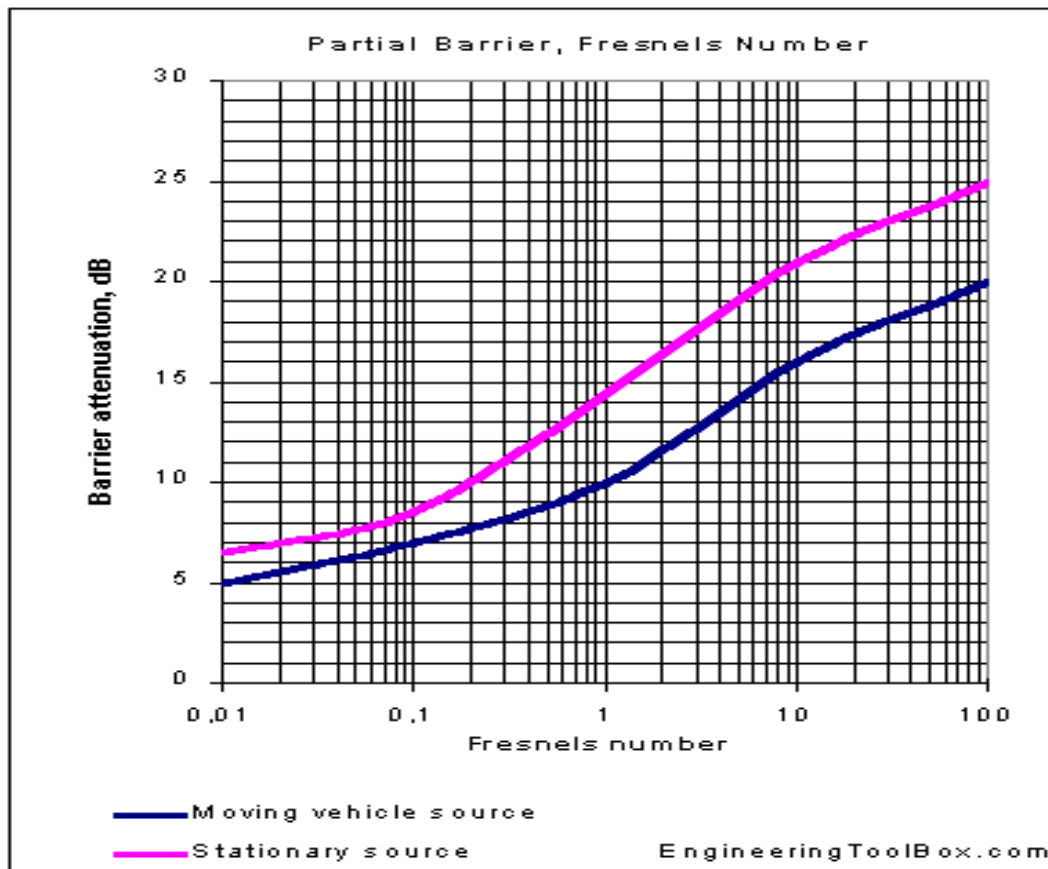
Στο παραπάνω σχήμα (6.3.1) φαίνονται οι αποστάσεις που έχουν ληφθεί στην παρούσα μελέτη για το λεπτό ηχοπέτασμα. Πιο συγκεκριμένα, a είναι η απόσταση από το υψηλότερο σημείο της πηγής μέχρι και υψηλότερο σημείο του ηχοπετάσματος, το b είναι η απόσταση από το υψηλότερο σημείο του ηχοπετάσματος μέχρι και το υψηλότερο σημείο του δέκτη και το d είναι η απόσταση από την πηγή έως και τον δέκτη. Αυτά τα τρία μεγέθη δίδονται από τους παρακάτω τύπους:

$$a = \sqrt{(x - 0,5)^2 + h^2}$$

$$b = \sqrt{(5 - x)^2 + h^2}$$

$$d = \sqrt{7^2 + (5 - 0,5)^2}$$

$$N = \frac{2(a+b-d)}{\lambda} \quad \lambda = \frac{c}{f}$$



Σχήμα 6.3.2

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται το διάγραμμα Fresnel, το οποίο συνδέει την ηχομείωση $R_{\eta\chi}$ με τον αριθμό Fresnel (N).

Όπου:

- h η διαφορά ύψους του πομπού και του δέκτη από το ηχοφράγμα
- X ύψος του ηχοφράγματος
- C η ταχύτητα του ήχου στον αέρα και ισούται με $C = 340$ m/s,
- F η συχνότητα που μετρήσαμε και ισούται με $F = 1000$ Hz
- λ είναι το μήκος κύματος
- N είναι ο αριθμός Fresnel

Στη μελέτη θεωρήθηκαν τα παρακάτω στοιχεία:

- Ύψος ηχοφράγματος 6 m
- Ύψος της οικίας στον δεύτερο όροφο 5,5 m
- Απόσταση από την πηγή ως τον δέκτη 7m

- Απόσταση από την πηγή ως το ηχοφράγμα 2m
- Απόσταση από το ηχοφράγμα ως τον δέκτη 5m

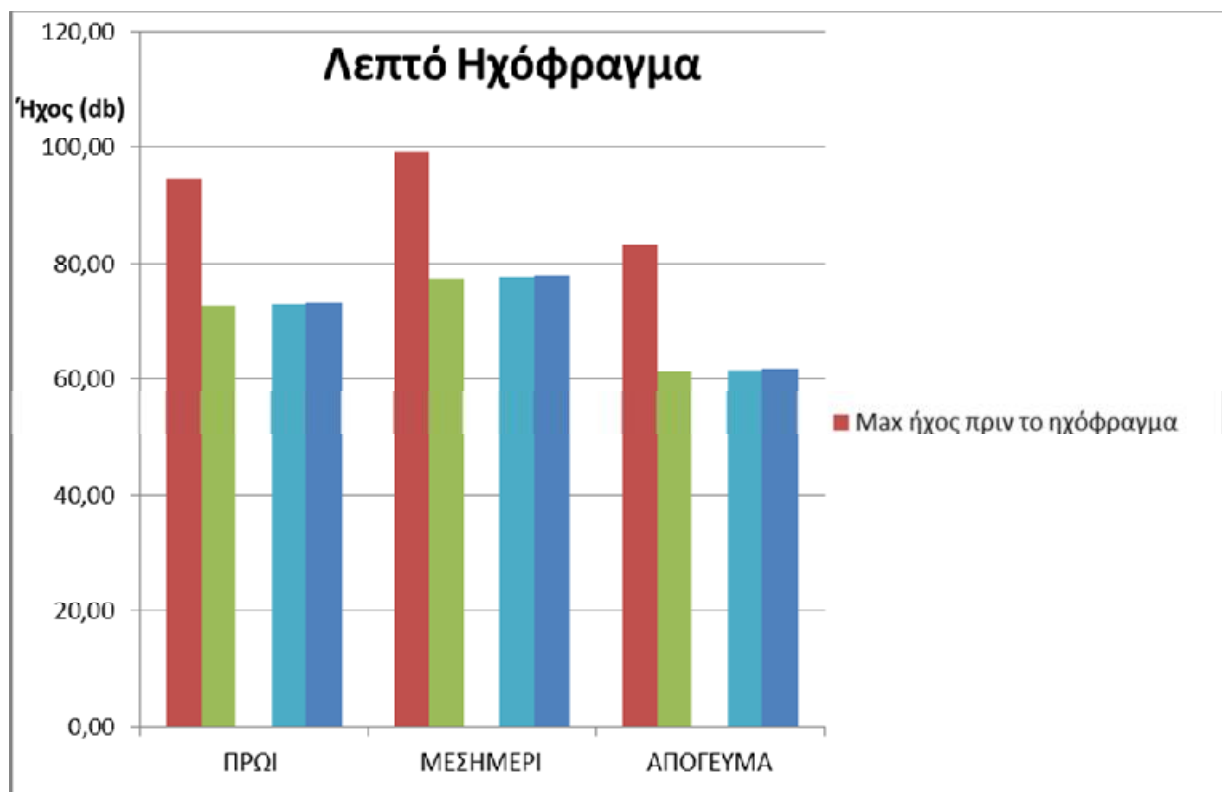
Στους πίνακες που ακολουθούν μελετάται η επίδραση που έχει η απόσταση του λεπτού ηχοφράγματος από την πηγή και το δέκτη (λαμβάνοντας την απόσταση πηγής-δέκτη σταθερή) στην ηχομείωση των θορύβων με τις μέγιστες στάθμες που ελήφθησαν από όλες τις ημέρες τις πρωινές A/A=1, μεσημεριανές (A/A=2) και βραδινές ώρες A/A=3.

A/A	Ήχος (db)	a	b	d	λ	N	Rηχ	c	f	χ(ύψος)	L1000
1	94,7	5,701	5,590	8,322	0,340	17,467	21,900	340,000	1000,000	6,000	72,800
2	99,3	5,701	5,590	8,322	0,340	17,467	21,900	340,000	1000,000	6,000	77,400
3	83,2	5,701	5,590	8,322	0,340	17,467	21,900	340,000	1000,000	6,000	61,300
1.8-5.2											
A/A	Ήχος (db)	a	b	d	λ	N	Rηχ	c	f	χ(ύψος)	L1000
1	94,7	5,787	5,295	8,322	0,340	16,239	21,700	340,000	1000,000	6,000	73,000
2	99,3	5,787	5,295	8,322	0,340	16,239	21,700	340,000	1000,000	6,000	77,600
3	83,2	5,787	5,295	8,322	0,340	16,239	21,700	340,000	1000,000	6,000	61,500
2.0-5.0											
A/A	Ήχος (db)	a	b	d	λ	N	Rηχ	c	f	χ(ύψος)	L1000
1	94,7	5,852	5,099	8,322	0,340	15,469	21,500	340,000	1000,000	6,000	73,200
2	99,3	5,852	5,099	8,322	0,340	15,469	21,500	340,000	1000,000	6,000	77,800
3	83,2	5,852	5,099	8,322	0,340	15,469	21,500	340,000	1000,000	6,000	61,700

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η επίδραση του λεπτού ηχοπετάσματος στη μείωση θορύβου. Πιο συγκεκριμένα με την προσθήκη του ηχοπετάσματος ο θόρυβος μειώνεται κατά 20dB περίπου με πιο αποδοτική την περίπτωση εκείνη, όπου το ηχοπέτασμα τοποθετείται πιο κοντά στην πηγή.

		ΛΕΠΤΟ ΗΧΟΦΡΑΓΜΑ	
		Απόσταση 1.5-5.5	
	ΜΑΧ ΗΧΟΣ (db)	L1000	
ΠΡΩΙ	94,7	72,8	
ΜΕΣΗΜΕΡΙ	99,3	77,4	
ΑΠΟΓΕΥΜΑ	83,2	61,3	
		Απόσταση 1.8-5.2	
	ΜΑΧ ΗΧΟΣ (db)	L1000	
ΠΡΩΙ	94,7	73	
ΜΕΣΗΜΕΡΙ	99,3	77,6	
ΑΠΟΓΕΥΜΑ	83,2	61,5	
		Απόσταση 2-5	
	ΜΑΧ ΗΧΟΣ (db)	L1000	
ΠΡΩΙ	94,7	73,2	
ΜΕΣΗΜΕΡΙ	99,3	77,8	
ΑΠΟΓΕΥΜΑ	83,2	61,7	

6.3.3 Διάγραμμα

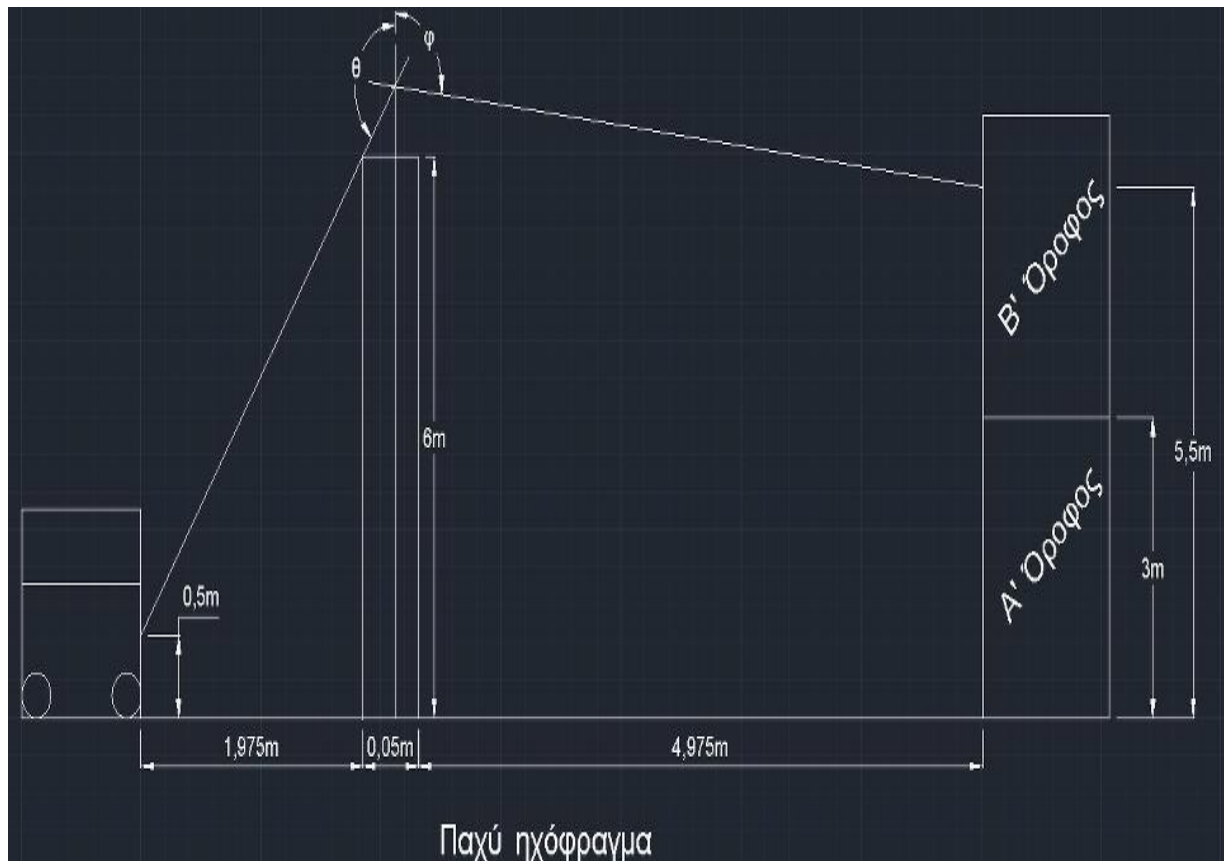


Γράφημα 1

Στο παραπάνω διάγραμμα η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο μέγιστο ήχο που μετρήθηκε πριν χρησιμοποιηθεί το ηχοφράγμα. Η πράσινη , η γαλάζια και η μπλε γραμμή είναι οι μέγιστες τιμές ήχου που υπολογίστηκαν για τις τρεις αποστάσεις (1,5 – 5 μέτρα , 1,8 – 5 μέτρα, 2 – 5 μέτρα) αντίστοιχα, στην συχνότητα των 1000 Hz. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι η μέγιστη ηχομείωση επιτυγχάνεται στη μικρότερη απόσταση πηγής-δέκτη.

6.4 ΧΡΗΣΗ ΜΕΓΑΛΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΗΧΟΠΕΤΑΣΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΑΕΡΟΦΕΡΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ

6.4.1 Σχήμα



Σχήμα 6.4.1: Παχύ ηχοφράγμα

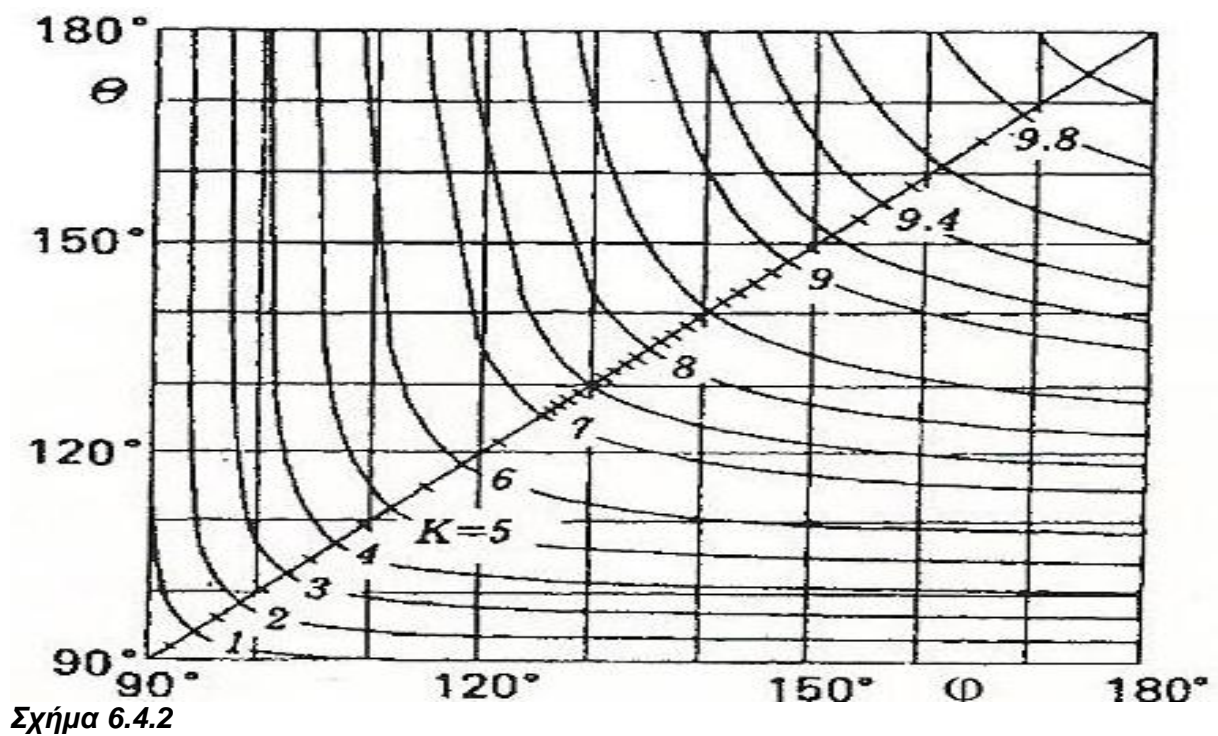
6.4.2 Επίδραση του πάχους του φράγματος.

Το παχύ ηχοπέτασμα είναι παρόμοιο με το σχήμα του λεπτού ηχοπετάσματος με την διαφορά ότι εδώ αλλάζει το πάχος του ηχοπετάσματος με αποτέλεσμα να

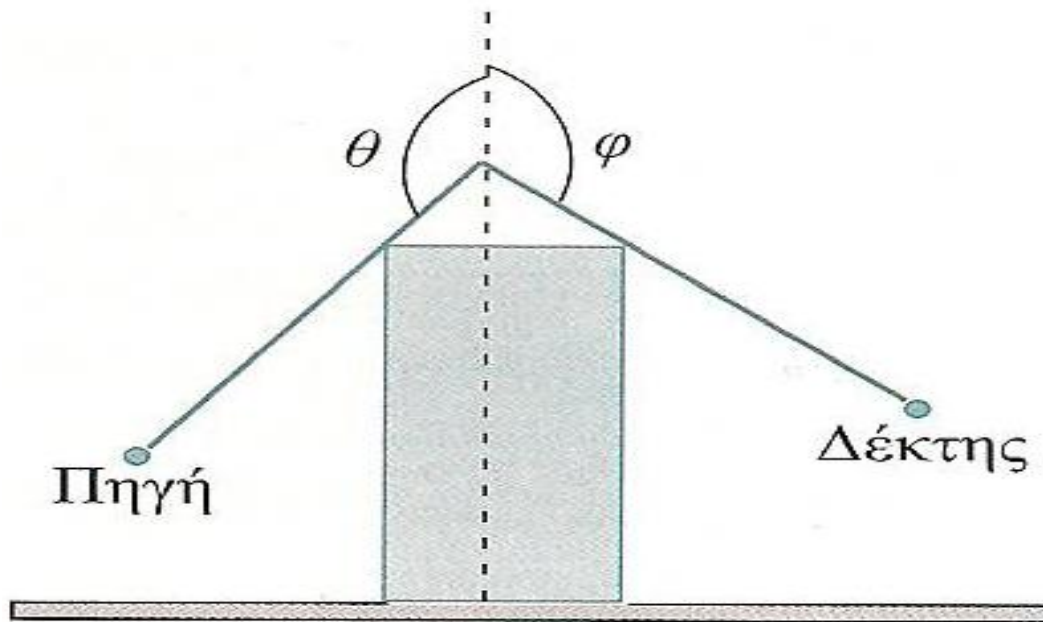
διαφοροποιείται και η ηχομείωση στη συχνότητα που έχουν μετρηθεί και υπολογιστεί οι τιμές της.

Ένα κτήριο μπροστά από μια πηγή θορύβου δρα ως φράγμα με την διαφορά ότι το πάχος του αυξάνει την ηχομείωση. Στην περίπτωση που το φράγμα δεν είναι λεπτό αλλά έχει ένα πάχος w κατά τους Fujiwara, Ando και Maekawa η αύξηση αυτή υπολογίζεται από την σχέση :

$$\Delta C = k \log \frac{2\pi b}{\lambda} \quad (1)$$



Στο παρακάτω σχήμα, φαίνονται οι γωνίες θ και ϕ μέσω των οποίων θα υπολογιστεί ο συντελεστής K της παραπάνω εξίσωσης.



Σχήμα 6.4.3

Ο συντελεστής k δίνεται από το παραπάνω διάγραμμα ως συνάρτηση των γωνιών φ, θ

Όπου:

- $\pi = 3,14$
- b είναι η απόσταση ηχοφράγματος - δέκτη
- λ είναι το μήκος κύματος
- h_1 η απόσταση πηγής από το έδαφος
- h_2 η απόσταση δέκτη από το έδαφος
- w είναι το πάχος του ηχοφράγματος που χωρίζεται σε δυο ίσα πάχη w_1, w_2
- w_1 είναι η παραπληρωματική της θ από το σχήμα
- w_2 είναι η παραπληρωματική της φ από τα σχήμα
- K είναι σταθερά ήχου
- Δc είναι προσαύξηση της ηχομείωσης στο παχύ ηχοφράγμα

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν τα εξής δεδομένα :

- Ύψος ηχοφράγματος 6 m
- Ύψος της οικίας στον δεύτερο όροφο 5,5 m
- Απόσταση από την πηγή ως τον δέκτη 7m
- Απόσταση από την πηγή ως το ηχοφράγμα 2m
- Απόσταση από το ηχοφράγμα ως τον δέκτη 5m
- Πάχος ηχοφράγματος από 0,05 m ως 0,14 m

Στους πίνακες που ακολουθούν μελετάται η επίδραση που έχει η απόσταση του παχύ ηχοφράγματος από την πηγή και το δέκτη (λαμβάνοντας την απόσταση πηγής-δέκτη σταθερή) στην ηχομείωση των θορύβων με τις μέγιστες στάθμες που ελήφθησαν από όλες τις ημέρες. Στους πίνακες παρουσιάζονται αναλυτικά τα δεδομένα, οι συντελεστές που χρησιμοποιήθηκαν στην εξίσωση (1) Με την τελευταία στήλη να αναφέρεται στην τελική στάθμη θορύβου L1000 μετά την τοποθέτηση του ηχοπετάσματος μεγάλου πάχους.

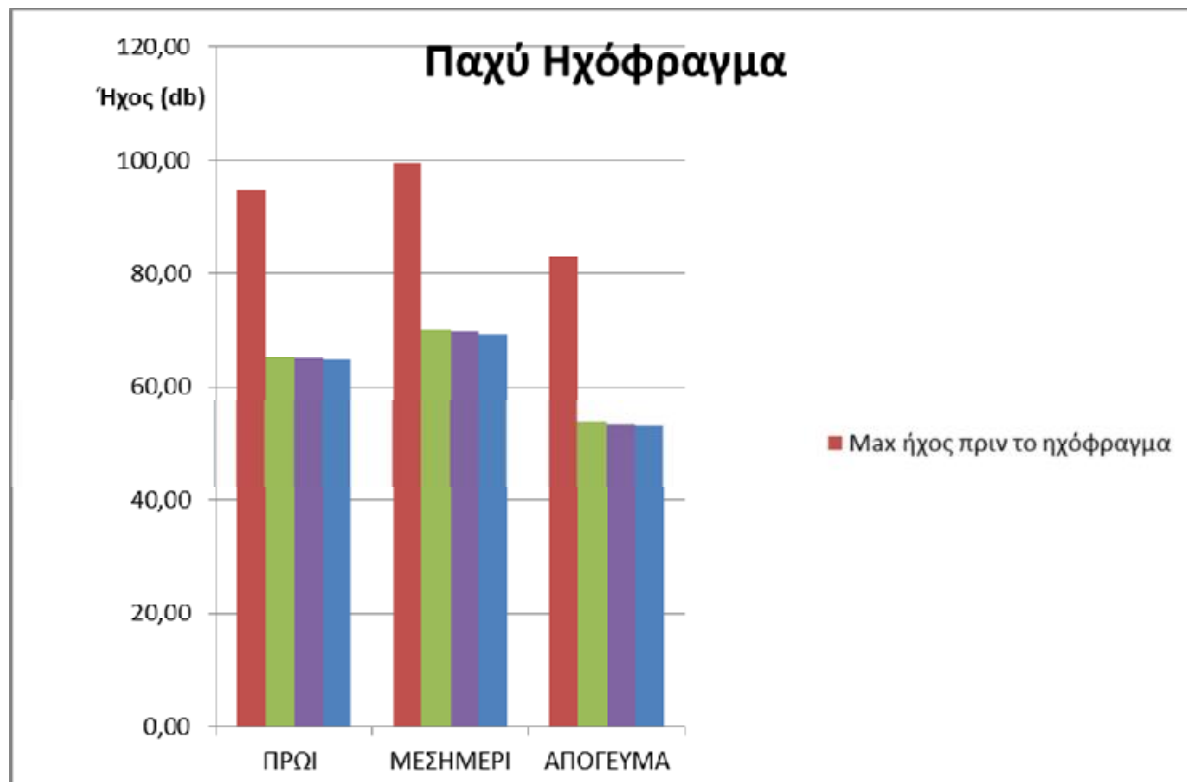
1.5.-5.5												
A/A	Ήχος (db)	λ	c	f	π	h1	h2	χ(ύψος)	w1	w2		
ΠΡΩΙ	94,700	0,340	340,000	1000,000	3,140	5,500	1,000	6,000	0,070	0,070		
ΜΕΣΗΜΕΡΙ	99,300	0,340	340,000	1000,000	3,140	5,500	1,000	6,000	0,070	0,070		
ΑΠΟΓΕΥΜΑ	83,200	0,340	340,000	1000,000	3,140	5,500	1,000	6,000	0,070	0,070		
1.8-5.2												
A/A	Ήχος (db)	λ	c	f	π	h1	h2	χ(ύψος)	w1	w2		
ΠΡΩΙ	94,700	0,340	340,000	1000,000	3,140	5,500	1,000	0,065	0,070	0,070		
ΜΕΣΗΜΕΡΙ	99,300	0,340	340,000	1000,000	3,140	5,500	1,000	6,000	0,070	0,070		
ΑΠΟΓΕΥΜΑ	83,200	0,340	340,000	1000,000	3,140	5,500	1,000	6,000	0,070	0,070		
2.0-5.0												
A/A	Ήχος (db)	λ	c	f	π	h1	h2	χ(ύψος)	w1	w2		
ΠΡΩΙ	94,700	0,340	340,000	1000,000	3,140	5,600	1,100	6,100	0,025	0,025		
ΜΕΣΗΜΕΡΙ	99,300	0,340	340,000	1000,000	3,140	5,600	1,100	6,100	0,025	0,025		
ΑΠΟΓΕΥΜΑ	83,200	0,340	340,000	1000,000	3,140	5,600	1,100	6,100	0,025	0,025		

w	a	b	ω_1	ω_2	θ	ϕ	K	Δc	L1000
0,140	5,852	4,962	19,983	78,373	160,017	101,627	4,000	29,348	65,352
0,140	5,852	4,962	19,983	78,373	160,017	101,627	4,000	29,348	69,952
0,140	5,852	4,962	19,983	78,373	160,017	101,627	4,000	29,348	53,852
w	a	b	ω_1	ω_2	θ	ϕ	K	Δc	L1000
0,140	5,829	5,030	19,336	78,534	160,664	101,466	4,100	29,616	65,084
0,140	5,829	5,030	19,336	78,534	160,664	101,466	4,100	29,616	69,684
0,140	5,829	5,030	19,336	78,534	160,664	101,466	4,100	29,616	53,584
w	a	b	ω_1	ω_2	θ	ϕ	K	Δc	L1000
0,050	5,938	5,095	19,427	77,532	160,573	102,468	4,200	29,348	65,352
0,050	5,938	5,095	19,427	77,532	160,573	102,468	4,200	29,348	69,952
0,050	5,938	5,095	19,427	77,532	160,573	102,468	4,200	29,348	53,852

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η επίδραση του ηχοπετάσματος μεγάλου πάχους στη μείωση θορύβου. Πιο συγκεκριμένα με την προσθήκη του ηχοπετάσματος ο θόρυβος μειώνεται κατά 30dB περίπου με πιο αποδοτική την περίπτωση εκείνη, όπου το ηχοπέτασμα τοποθετείται πιο μακριά από την πηγή.

ΠΑΧΥ ΗΧΟΦΡΑΓΜΑ		
Απόσταση 1.5-5.5		
	ΜΑΧ ΗΧΟΣ	L1000
ΠΡΩΙ	94,70	65,35
ΜΕΣΗΜΕΡΙ	99,30	69,95
ΑΠΟΓΕΥΜΑ	83,20	53,85
Απόσταση 1.8-5.2		
	ΜΑΧ ΗΧΟΣ	L1000
ΠΡΩΙ	94,70	65,08
ΜΕΣΗΜΕΡΙ	99,30	69,68
ΑΠΟΓΕΥΜΑ	83,20	53,58
Απόσταση 2-5		
	ΜΑΧ ΗΧΟΣ	L1000
ΠΡΩΙ	94,70	64,75
ΜΕΣΗΜΕΡΙ	99,30	69,35
ΑΠΟΓΕΥΜΑ	83,20	53,25

6.4.3 Διάγραμμα

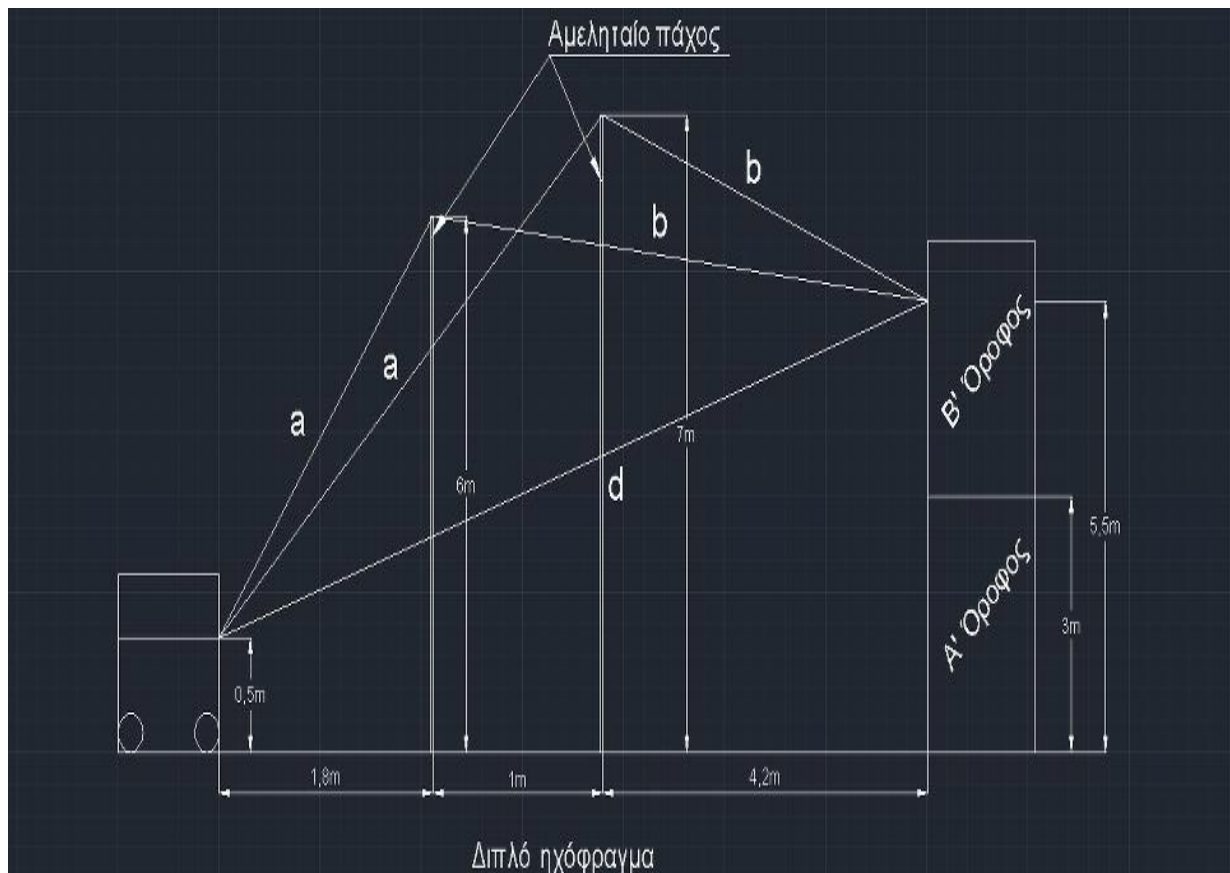


Γράφημα 2

Στο παραπάνω διάγραμμα η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στον μέγιστο ήχο που μετρήθηκε πριν χρησιμοποιηθεί το ηχοφραγμα. Η πράσινη , η γαλάζια και η μπλε γραμμή είναι οι μέγιστες τιμές ήχου που υπολογίστηκαν για τις τρεις αποστάσεις (1,5 – 5 μέτρα , 1,8 – 5 μέτρα, 2 – 5 μέτρα) αντίστοιχα, στη συχνότητα των 1000 Hz.

6.5 ΧΡΗΣΗ ΔΙΠΛΟΥ ΗΧΟΠΕΤΑΣΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΙΩΣΗ ΑΕΡΟΦΕΡΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ

6.5.1 Σχήμα



Σχήμα 6.5.1 : Διπλό ηχοφραγμα

6.5.2

Σε αυτό το σχήμα παρουσιάζεται η διάταξη των δύο λεπτών ηχοπετασμάτων και το πως τοποθετούνται για να επιτύχουμε την καλύτερη ηχομείωση που θα μπορούσαμε. Ακόμα στο σχήμα φαίνονται και οι αποστάσεις μεταξύ της πηγής και του δέκτη και στην συνέχεια βλέπουμε ποιες αποστάσεις έχουμε πάρει σαν a,b,d για να κάνουμε τους απαραίτητους υπολογισμούς μας.

Αύξηση της ηχομείωσης μπορούμε να επιτύχουμε με τα διπλά φράγματα. Με την προϋπόθεση ότι οι αποστάσεις d_1, d_2, w είναι πολύ μεγαλύτερες από τα ύψη των φραγμάτων η τελική τιμή της ηχομείωσης δίνεται από την σχέση :

$$A = A_1 + A_2 - 6 + \left[20 \log\left(\frac{2}{1 - a/\pi}\right) - 12 \right] \left(\frac{q}{p}\right)^{2p}$$

Όπου A_1, A_2 η ηχομείωση από κάθε φράγμα ξεχωριστά και

$$a = \arctg\left(\frac{w(d_1 + w + d_2)}{d_1 + d_2}\right)^{1/2}$$

$$p = \max(\sqrt{2N_1}, \sqrt{2N_2}), \quad q = \min(\sqrt{2N_1}, \sqrt{2N_2})$$

Όπου

- d_1 η απόσταση πηγής με το πρώτο ηχοφράγμα
- d_2 η απόσταση του δεύτερου ηχοφράγματος με τον δέκτη
- W είναι η απόσταση μεταξύ των δύο ηχοφραγμάτων
- A_1 είναι η ηχομείωση του αριστερού ηχοφράγματος
- A_2 είναι η ηχομείωση του δεξιού ηχοφράγματος
- A είναι η συνολική ηχομείωση
- $\pi = 3,14$
- p είναι σταθερά του ήχου
- q είναι σταθερά του ήχου
- N_1 αριθμός Fresnel για το πρώτο ηχοφράγμα
- N_2 αριθμός Fresnel για το δεύτερο ηχοφράγμα
- $a =$ τόξο εφαπτομένης σε εκφρασμένο σε ακτίνια (rad)

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν τα εξής δεδομένα

- Ύψος ηχοφράγματος 6 m και 7 m
- Ύψος της οικίας στον δεύτερο όροφο 5,5m
- Απόσταση από την πηγή ως τον δέκτη 7m
- Απόσταση από την πηγή ως το ηχοφράγμα 2m
- Απόσταση από το ηχοφράγμα ως τον δέκτη 5m

Στους πίνακες που ακολουθούν μελετάται η επίδραση που έχει η απόσταση του διπλού ηχοφράγματος από την πηγή και το δέκτη (λαμβάνοντας την απόσταση μεταξύ πηγής-δέκτη και πρώτου-δεύτερου ηχοφράγματος σταθερή) στην ηχομείωση

των θορύβων με τις μέγιστες στάθμες που λήφθηκαν από όλες τις ημέρες τις πρωινές A/A=1, μεσημεριανές (A/A=2) και βραδινές ώρες A/A=3

Επειδή οι μετρήσεις και ο πίνακας είναι μεγάλοι σε μέγεθος τους παραθέτουμε τον ένα κάτω από τον άλλο:

1ος Πίνακας

		1.5-5.5									
A/A	Ήχος (db)	a	b	d	λ	N	Rηχ	c	f	χ(ύψος)	L1000
1	94,700	5,701	5,590	8,322	0,340	17,467	21,900	340,000	1000,000	6,000	77,400
2	99,300	5,701	5,590	8,322	0,340	17,467	21,900	340,000	1000,000	6,000	56,400
3	83,200	5,701	5,590	8,322	0,340	17,467	21,900	340,000	1000,000	6,000	56,900

A/A	Ήχος (db)	a	b	d	λ	N	Rηχ	c	f	χ(ύψος)	L1000
1	94,700	6,964	4,924	8,322	0,340	20,982	23,000	340,000	1000,000	6,000	76,300
2	99,300	6,964	4,924	8,322	0,340	20,982	23,000	340,000	1000,000	6,000	55,300
3	83,200	6,964	4,924	8,322	0,340	20,982	23,000	340,000	1000,000	6,000	55,800

p	q	a	A	L1000 ΤΕΛΙΚΟ	d1	w	d2
6,477985	5,910498	0,528074	37,56456408	57,10	1,5	1	4,5
6,477985	5,910498	0,528074	37,56456408	61,70	1,5	1	4,5
6,477985	5,910498	0,528074	37,56456408	45,60	1,5	1	4,5

2^{ος} πίνακας

		1.8-5.2									
A/A	Ήχος (db)	a	b	d	λ	N	Rηχ	c	f	χ(ύψος)	L1000
1	94,700	6,127	4,415	8,322	0,340	13,059	22,900	340,000	1000,000	6,000	71,800
2	99,300	6,127	4,415	8,322	0,340	13,059	22,900	340,000	1000,000	6,000	76,400
3	83,200	6,127	4,415	8,322	0,340	13,059	22,900	340,000	1000,000	6,000	60,300

A/A	Ήχος (db)	a	b	d	λ	N	Rηχ	c	f	χ(ύψος)	L1000
1	94,700	5,757	5,394	8,322	0,340	16,639	21,750	340,000	1000,000	6,000	72,950
2	99,300	5,757	5,394	8,322	0,340	16,639	21,750	340,000	1000,000	6,000	77,550
3	83,200	5,757	5,394	8,322	0,340	16,639	21,750	340,000	1000,000	6,000	61,450

p	q	a	A	L1000 ΤΕΛΙΚΟ	d1	w	d2
5,769	5,111	0,528	37,567	58,00	1,700	1,000	4,300
5,769	5,111	0,528	37,567	62,50	1,700	1,000	4,300
5,769	5,111	0,528	37,567	46,40	1,700	1,000	4,300

3^{ος} Πίνακας

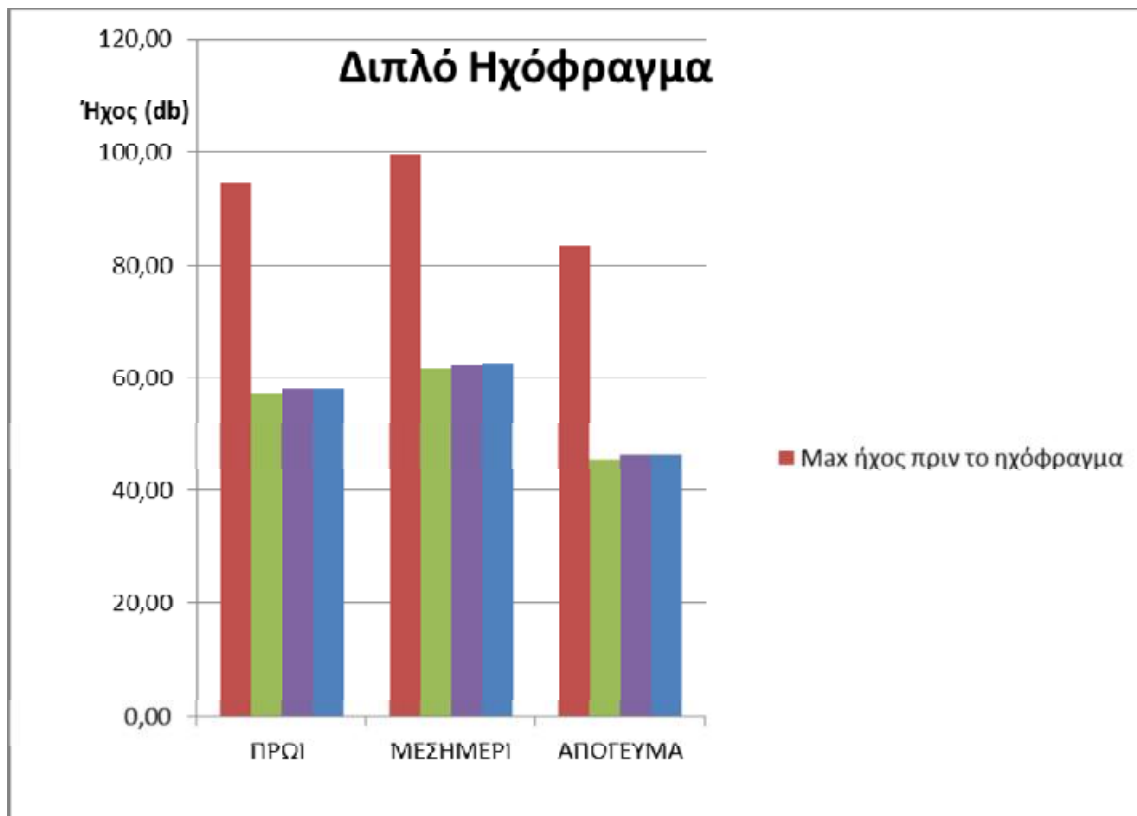
A/A	Ήχος (db)	a	b	d	λ	N	Rηχ	c	f	χ(ύψος)	L1000
1	94,700	5,787	5,295	8,322	0,340	16,239	21,700	340,000	1000,000	6,000	73,000
2	99,300	5,787	5,295	8,322	0,340	16,239	21,700	340,000	1000,000	6,000	77,600
3	83,200	5,787	5,295	8,322	0,340	16,239	21,700	340,000	1000,000	6,000	61,500

A/A	Ήχος (db)	a	b	d	λ	N	Rηχ	c	f	χ(ύψος)	L1000
1	94,700	6,172	4,317	8,322	0,340	12,750	22,500	340,000	1000,000	6,000	72,200
2	99,300	6,172	4,317	8,322	0,340	12,750	22,500	340,000	1000,000	6,000	76,800
3	83,200	6,172	4,317	8,322	0,340	12,750	22,500	340,000	1000,000	6,000	60,700

p	q	a	A	L1000 ΤΕΛΙΚΟ	d1	w	d2
5,699	5,050	0,528	37,097	58,20	1,800	1,000	4,200
5,699	5,050	0,528	37,097	62,64	1,800	1,000	4,200
5,699	5,050	0,528	37,097	46,60	1,800	1,000	4,200

Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται η επίδραση του διπλού ηχοπετάσματος στη μείωση θορύβου. Πιο συγκεκριμένα με την προσθήκη του διπλού ηχοπετάσματος ο θόρυβος μειώνεται κατά 36dB περίπου με πιο αποδοτική την περίπτωση, όπου το πρώτο ηχοπέτασμα τοποθετείται πιο κοντά στη πηγή.

6.5.3 Γράφημα



Γράφημα 3

Στο παραπάνω διάγραμμα η κόκκινη γραμμή δείχνει το μέγιστο ήχο που μετρήθηκε πριν χρησιμοποιηθεί το ηχόφραγμα. Η πράσινη, η μοβ και η μπλε γραμμή είναι οι μέγιστες τιμές ήχου που ακολουθούνται για τις τρεις αποστάσεις που μελετήθηκαν (1,5 – 5 μέτρα, 1,8 – 5 μέτρα, 2 – 5 μέτρα) στην συχνότητα των 1000 Hz. Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι όσο μειώνεται η απόσταση ηχοφραγματος-πηγής επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ηχομείωση.

6.6 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια παραμετρική μελέτη ως προς την επίδραση:

- a) της απόστασης του ηχοπετάσματος από την πηγή
- b) του ύψους ηχοπετάσματος,
- c) του πάχους ηχοπετάσματος στον υπολογισμό της ηχομείωσης του θορύβου.

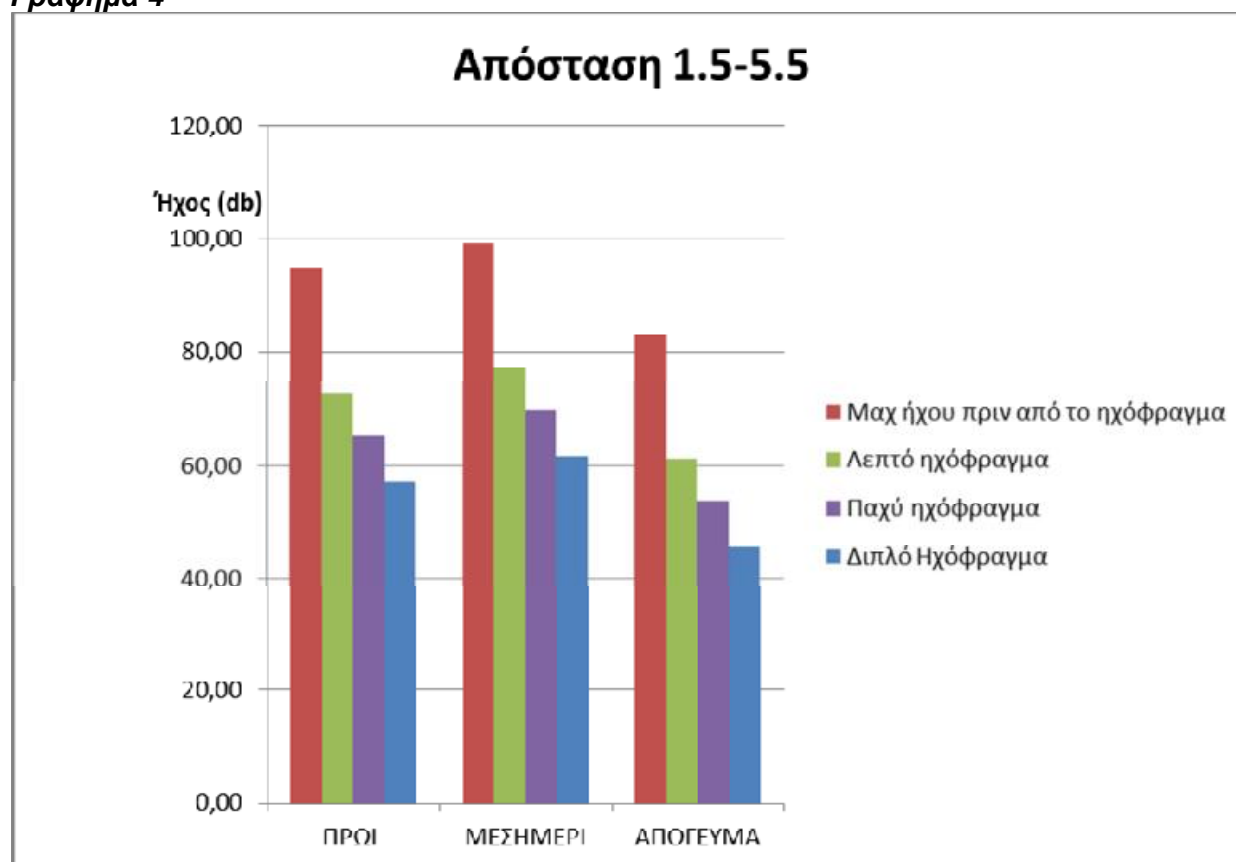
Επίδραση απόστασης ηχοφράγματος από την πηγή

Στην παρούσα παράγραφο μελετάται η επίδραση της απόστασης του ηχοφράγματος από την πηγή και το δέκτη και για τους 3 τύπους ηχοφραγμάτων (λεπτό, παχύ,

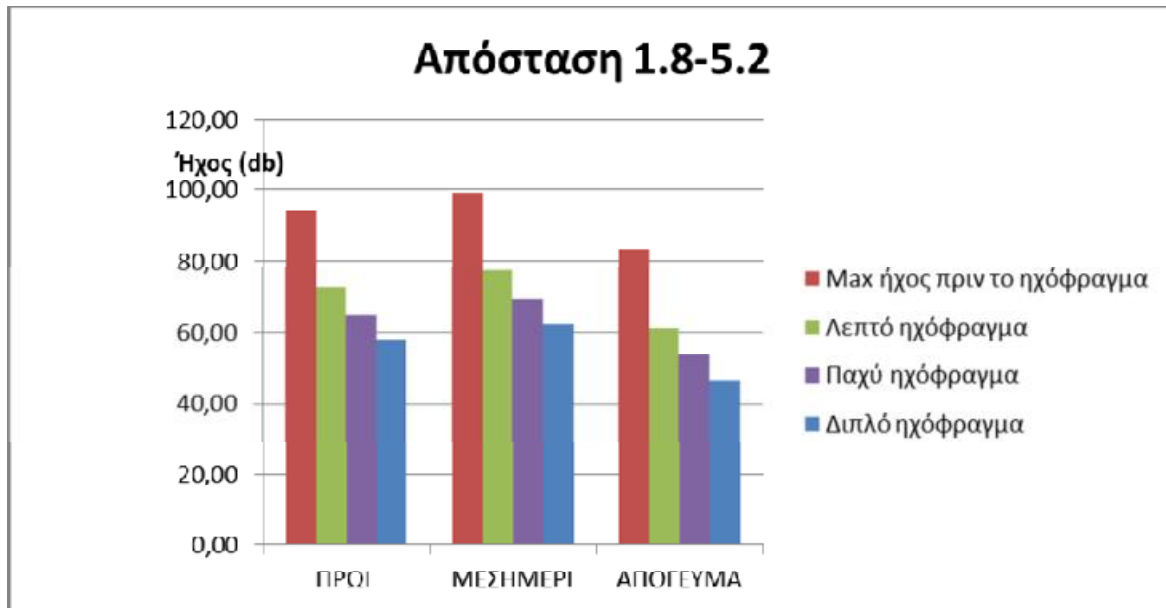
διπλό). Επιλέχθηκαν 3 ζεύγη αποστάσεων 1.5-5.5, 1.8-5.2, 2-5 όπου ο πρώτος αριθμός αναφέρεται στην απόσταση πηγής και ηχοφράγματος, ενώ ο δεύτερος στην απόσταση ηχοφράγματος δέκτη.

	ΛΕΠΤΟ ΗΧΟΦΡΑΓΜΑ		ΠΑΧΥ ΗΧΟΦΡΑΓΜΑ		<u>ΔΙΠΛΟ ΗΧΟΦΡΑΓΜΑ</u>	
	Απόσταση 1.5-5.5		Απόσταση 1.5-5.5		Απόσταση 1.5-5.5	
	ΜΑΧ ΗΧΟΣ (db)	L1000	ΜΑΧ ΗΧΟΣ (db)	L1000	ΜΑΧ ΗΧΟΣ	L1000
ΠΡΩΙ	94,70	72,80	94,70	65,35	94,70	57,10
ΜΕΣΗΜΕΡΙ	99,30	77,40	99,30	69,95	99,30	61,70
ΑΠΟΓΕΥΜΑ	83,20	61,30	83,20	53,85	83,20	45,60

Γράφημα 4

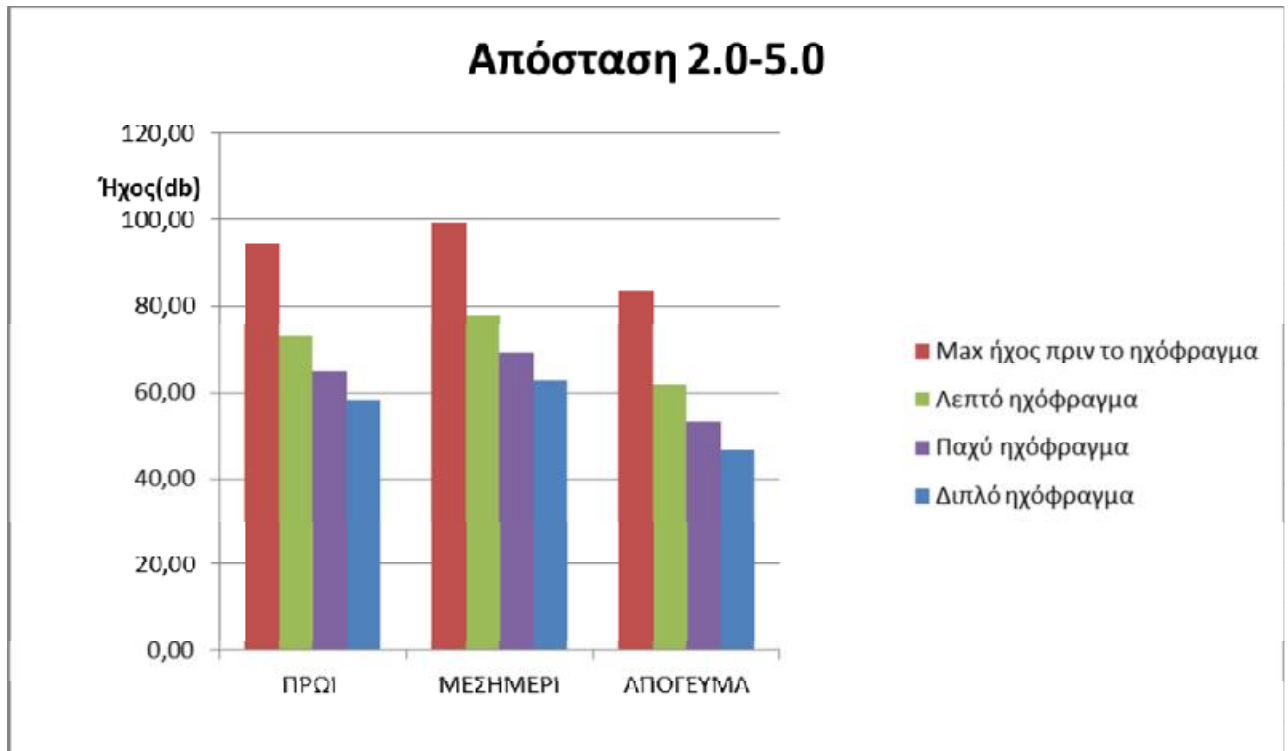


	Απόσταση 1.8-5.2		Απόσταση 1.8-5.2		Απόσταση 1.8-5.2	
	ΜΑΧ ΗΧΟΣ (db)	L1000	ΜΑΧ ΗΧΟΣ (db)	L1000	ΜΑΧ ΗΧΟΣ	L1000
ΠΡΩΙ	94,70	73,00	94,70	65,08	94,70	58,00
ΜΕΣΗΜΕΡΙ	99,30	77,60	99,30	69,68	99,30	62,50
ΑΠΟΓΕΥΜΑ	83,20	61,50	83,20	53,58	83,20	46,40



Γράφημα 5

	Απόσταση 2-5			Απόσταση 2-5			Απόσταση 2-5	
	MAX ΗΧΟΣ (db)	L1000		MAX ΗΧΟΣ (db)	L1000		MAX ΗΧΟΣ	L1000
ΠΡΩΙ	94,70	73,20	ΠΡΩΙ	94,70	64,75	ΠΡΩΙ	94,70	58,20
ΜΕΣΗΜΕΡΙ	99,30	77,80	ΜΕΣΗΜΕΡΙ	99,30	69,35	ΜΕΣΗΜΕΡΙ	99,30	62,64
ΑΠΟΓΕΥΜΑ	83,20	61,70	ΑΠΟΓΕΥΜΑ	83,20	53,25	ΑΠΟΓΕΥΜΑ	83,20	46,60

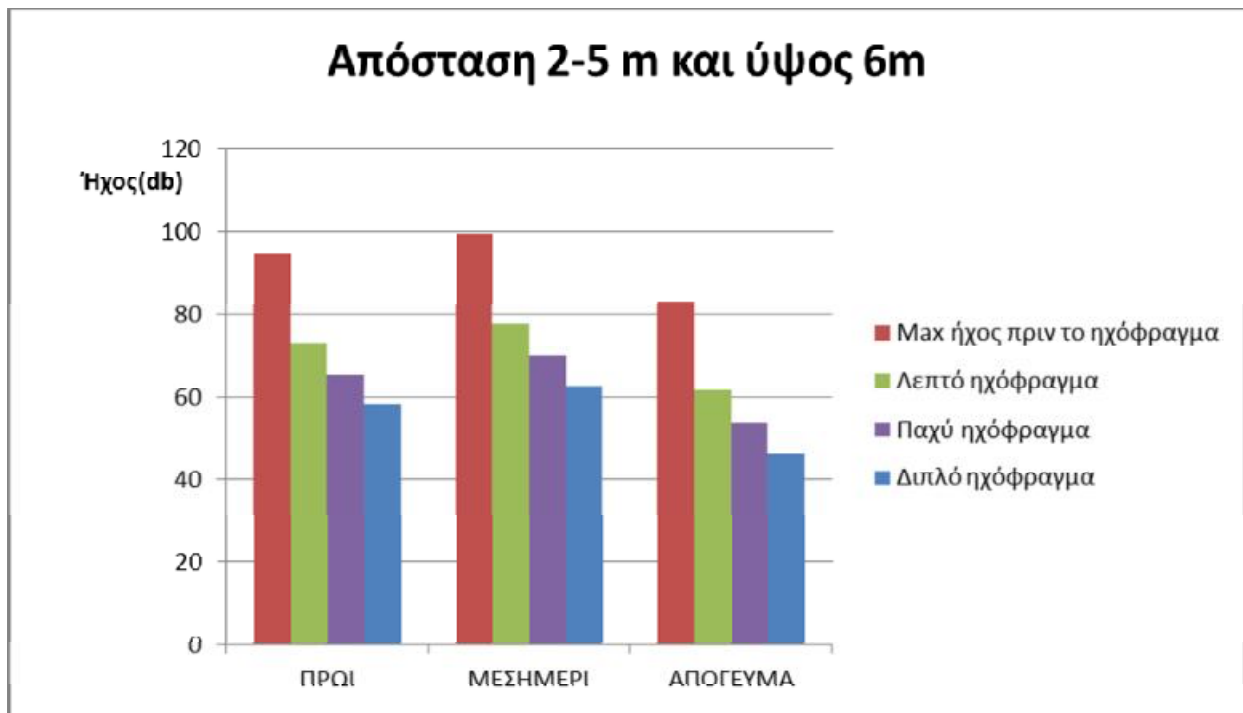


Γράφημα 6

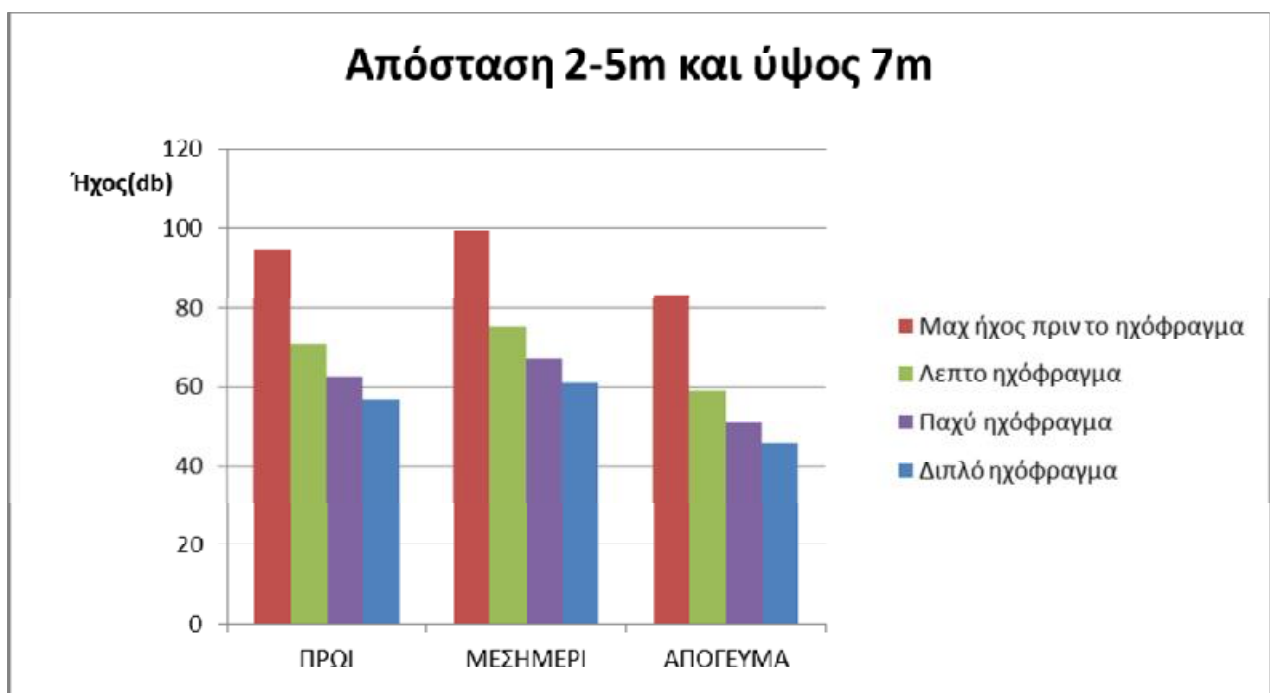
Από τα παραπάνω γραφήματα είναι φανερό ότι η επιλογή τοποθέτησης διπλού ηχοφράγματος αποτελεί την καλύτερη λύση ως προς τη μείωση θορύβου σχετικά με τις δυο άλλες επιλογές (μη λαμβάνοντας όμως υπόψη τον παράγοντα κόστος). Επίσης η τοποθέτηση του ηχοφράγματος όσο γίνεται πιο κοντά στην πηγή συμβάλλει σε ένα πολύ μικρό ποσοστό στη μείωση του θορύβου

Επίδραση ύψους ηχοφράγματος με βάση και τα τρία είδη

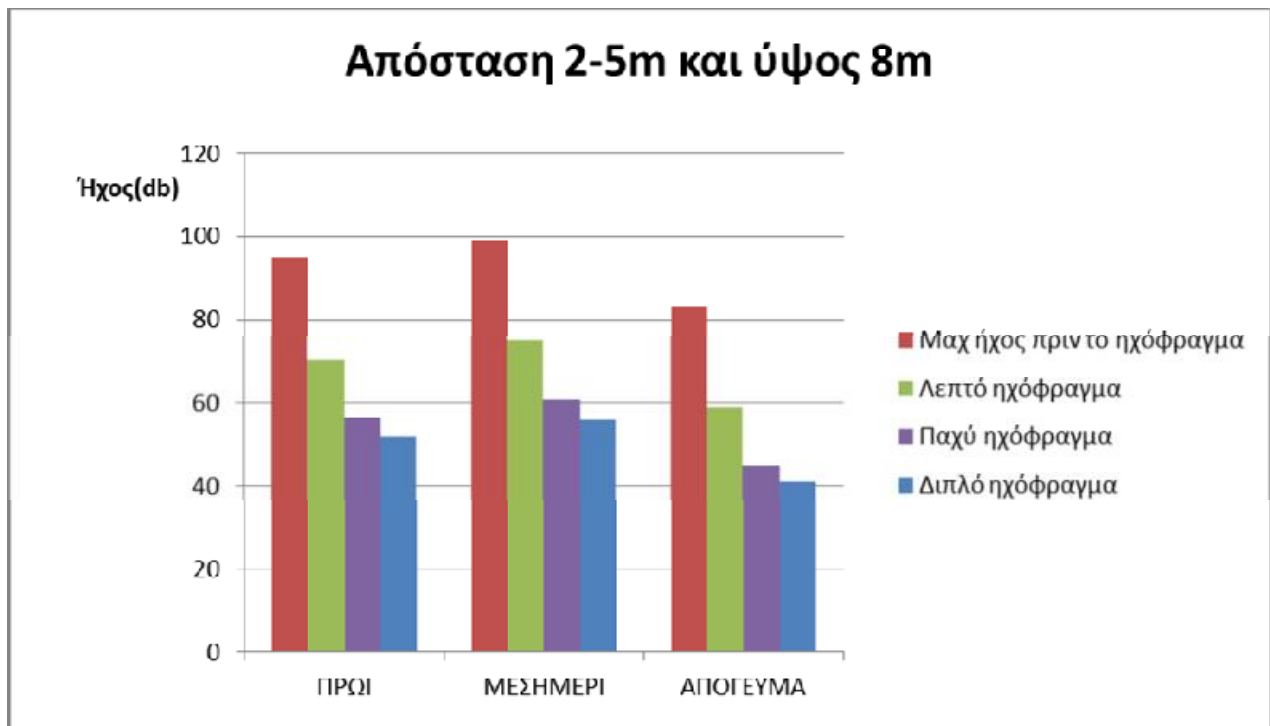
Στην παρούσα παράγραφο μελετάται η επίδραση του ύψους ηχοφράγματος διατηρώντας σταθερή την απόσταση πηγή-ηχοφράγματος-δέκτη και ίση με 2.0 και 5.0 αντίστοιχα.



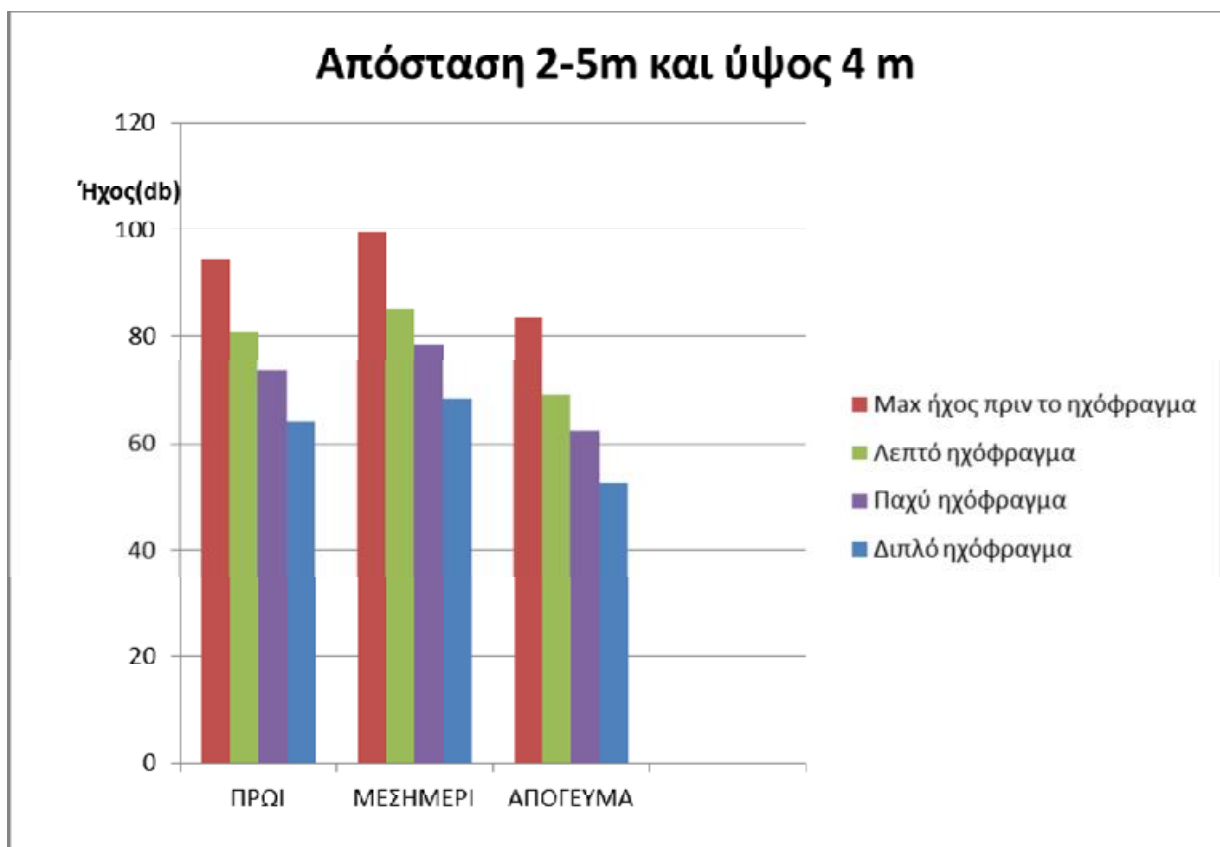
Γράφημα 7



Γράφημα 8



Γράφημα 9



Γράφημα 10

Στο παραπάνω διάγραμμα η κόκκινη γραμμή δείχνει το μέγιστο ήχο που μετρήθηκε πριν χρησιμοποιηθεί το ηχοφραγμα. Η πράσινη δείχνει την μέγιστη ηχομείωση του

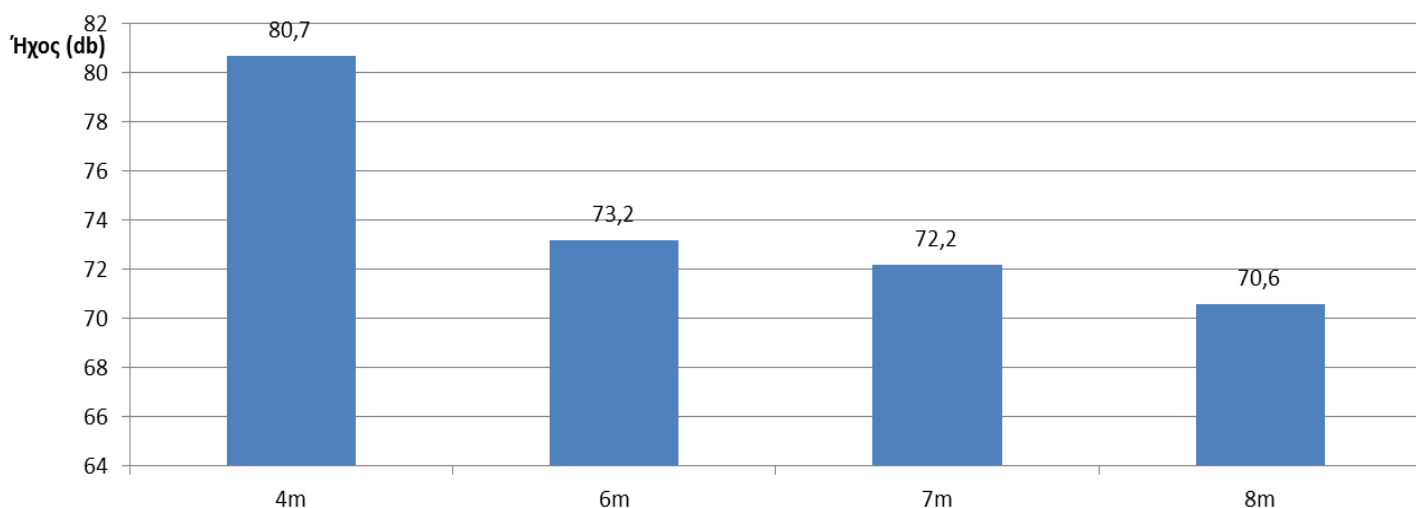
λεπτού ηχοφράγματος , η μοβ του παχύ ηχοφράγματος, ενώ η μπλε του διπλού ηχοφράγματος. Ξεκάθαρα φαίνεται ότι μεγαλύτερη ηχομείωση επιτυγχάνεται για ψηλότερο ηχοφράγμα.

Επίδραση ύψους λεπτού ηχοφράγματος

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η περίπτωση να τοποθετηθεί το λεπτό ηχοφράγμα στην απόσταση πηγής-δέκτη 2-5 μέτρα αντίστοιχα, για ύψος 4 έως 8 μέτρα. Η επιλογή των 2-5 μέτρων έγινε για το λόγο ότι η συγκεκριμένη απόσταση είναι η μέγιστη στις μετρήσεις όπου έχει υπολογιστεί η μικρότερη ηχομείωση.

A/A	Ήχος (db)	a	b	d	λ	N	Rηχ	c	f	χ(ύψος)	L1000
ΠΡΩΙ	94,7	4,031	5,099	8,322	0,340	4,756	14,000	340,000	1000,000	4,000	80,700
A/A	Ήχος (db)	a	b	d	λ	N	Rηχ	c	f	χ(ύψος)	L1000
ΠΡΩΙ	94,7	5,852	5,099	8,322	0,340	15,469	21,500	340,000	1000,000	6,000	73,200
A/A	Ήχος (db)	a	b	d	λ	N	Rηχ	c	f	χ(ύψος)	L1000
ΠΡΩΙ	94,7	6,801	5,385	8,322	0,340	22,731	22,500	340,000	1000,000	7,000	72,200
A/A	Ήχος (db)	a	b	d	λ	N	Rηχ	c	f	χ(ύψος)	L1000
ΠΡΩΙ	94,7	7,762	5,831	8,322	0,340	31,008	24,100	340,000	1000,000	8,000	70,600

Απόσταση 2-5 m Λεπτό ηχοφράγμα



Στο παραπάνω διάγραμμα μελετάται η ηχομείωση που πετυχαίνεται με βάση το ύψος του ηχοφράγματος. Φαίνεται ξεκάθαρα ότι όσο ψηλότερο είναι το φράγμα τόσο πιο αποδοτικό γίνεται. Αντιθέτως, αξίζει ωστόσο να σημειωθεί ότι μεγαλύτερο ύψος οδηγεί σε αύξηση του κόστους κατασκευής, κάτι που παίζει σημαντικό ρόλο στην επιλογή του μηχανικού.

7.ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ

Νομοθεσία σχετικά με τον θόρυβο

Η χώρα μας διέπεται από ένα πλήθος νόμων – διαταγμάτων – κανονιστικών πράξεων, που προέρχονται είτε από την Βουλή των Ελλήνων (και τα αρμόδια υπουργία) (Εθνικό Δίκαιο), είτε από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Κοινοτικό Δίκαιο) είτε από τον Οργανισμό Ηνωμένων Εθνών (ΟΗΕ) (Διεθνές Δίκαιο).

Σε ότι αφορά τη μείωση του θορύβου, έχουν θεσμοθετηθεί διάφορες Οδηγίες και Κανονισμοί από την Ευρωπαϊκή Ένωση, αλλά και από την Ελληνική νομοθεσία. Έχουν καθορισθεί όρια εκπομπής θορύβου για τα αυτοκίνητα, τις μοτοσυκλέτες, τους γεωργικούς και δασικούς ελκυστήρες, τις οικιακές συσκευές, τα χωματουργικά μηχανήματα, τον κατασκευαστικό εξοπλισμό, τις χλοοκοπτικές μηχανές και τα υποηχητικά αεροπλάνα της πολιτικής αεροπορίας. Ιδιαίτερη προσοχή έχει δοθεί στην οδική και εναέρια κυκλοφορία η οποία συνιστά σημαντική πηγή ηχορύπανσης καθώς επίσης και στην κατασκευή των κτηρίων ώστε να μην επηρεάζονται από τον θόρυβο. Ενδεικτικά αναφέρουμε:

7.1 Ελληνική Νομοθεσία

Όσον αφορά στην Ελληνική Νομοθεσία [8][14]:

- την Κοινή Υπουργική Απόφαση 1220/13/79 σχετικά με τον καθορισμό των επιτρεπόμενων ορίων θορύβου προκαλούμενων από τα αυτοκίνητα, οχήματα, μοτοσυκλετών και μοτοποδηλάτων και του τρόπου μετρήσεων αυτών (ΦΕΚ75/Β'/79) όπου εκτός του καθορισμού των ορίων θορύβου αναφέρεται και στον τρόπο και την διαδικασία μέτρησης της στάθμης του θορύβου ενός μηχανοκίνητου οχήματος
- την Υπουργική Απόφαση ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. 3046/304/89 σχετικά με τον κτηριοδομικό κανονισμό (ΦΕΚ 59/Δ'/3.2.89) όπου υπάρχει ειδικό άρθρο (12) για ηχομόνωση και ηχοπροστασία. Το άρθρο αυτό έχει στόχο το πώς πρέπει να κατασκευάζονται τα κτήρια ώστε να προστατεύονται οι ένοικοι από κάθε μορφής θορύβους μέσα στα όρια της κατοικίας, του τόπου εργασίας και διαμονής τους, όταν οι θόρυβοι προέρχονται από άλλους. Δηλαδή να εξασφαλίζεται αποδεκτή ακουστική άνεση, λαμβάνοντας τα απαραίτητα μέτρα κτηριακής ηχομόνωσης και ηχοπροστασίας. Στον κανονισμό αυτό υπάρχουν πίνακες με τις παραμέτρους ακουστικής άνεσης και τα κριτήρια ηχομόνωσης- ηχοπροστασίας της κατηγορίας Α «υψηλή ακουστική άνεση» και Β «κανονική ακουστική άνεση»
- την Κοινή Υπουργική Απόφαση 69269/5387/90 σχετικά με την κατάταξη έργων και δραστηριοτήτων σε κατηγορίες, το περιεχόμενο Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ), τον καθορισμό περιεχομένου Ειδικών Περιβαλλοντικών Μελετών και λοιπές συναφείς

διατάξεις, σύμφωνα με το Νόμο 1650/86 (ΦΕΚ 678/Β΄/25.10.90), όπου απαιτείται να γίνεται σαφής αναφορά στην ΜΠΕ για τον θόρυβο τόσο κατά την διάρκεια της κατασκευής όσο και της λειτουργίας, ενός έργου ή μιας δραστηριότητας (αναμενόμενα επίπεδα θορύβου, χαρακτηριστικά αυτού, προβλεπόμενα μέτρα ελέγχου)

- την Υπουργική Απόφαση ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. 17252/92 σχετικά με τον καθορισμό δεικτών και ανωτάτων ορίων θορύβου που προέρχεται από την κυκλοφορία σε οδικά και συγκοινωνιακά έργα (ΦΕΚ 395/Β΄/19.6.92), όπου ορίζονται οι δείκτες κυκλοφοριακού θορύβου όλων των νέων αυτοκινητοδρόμων και καθορίζονται τα όρια τους
- την Κοινή Υπουργική Απόφαση 28340/2440/92 (ΦΕΚ 532/ Β΄/92) για τον περιορισμό της ηχορύπανσης από τις μοτοσυκλέτες
- την Κοινή Υπουργική Απόφαση 25006/2234/1993 (ΦΕΚ 523/Β΄/93) για την αποδεκτή ηχοστάθμη και τις διατάξεις εξάτμισης των οχημάτων με κινητήρα σε συμμόρφωση προς τις διατάξεις της οδηγίας 92/97/ΕΟΚ.

7.2 Ευρωπαϊκή Νομοθεσία

Όσον αφορά στην Κοινοτική Νομοθεσία

- την οδηγία 70/157 της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τα επιτρεπόμενα όρια θορύβου και το σύστημα εξάτμισης για τα οχήματα με κινητήρα
- τις οδηγίες 89/235 και 92/97 της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την προσέγγιση των νομοθεσιών των κρατών μελών των αναφερομένων στο αποδεκτό ηχητικό επίπεδο και την διάταξη εξάτμισης των μοτοσυκλετών
- την οδηγία 2002/49/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου σχετικά με την αξιολόγηση και την διαχείριση του περιβαλλοντικού θορύβου. Η οδηγία αυτή αποβλέπει στον καθορισμό μιας κοινής προσέγγισης για την αποφυγή, πρόληψη, ή περιορισμό βάσει ιεράρχησης προτεραιοτήτων, των δυσμενών επιπτώσεων, συμπεριλαμβανομένης της ενόχλησης, από έκθεση στον περιβάλλοντα θόρυβο. Στην οδηγία αυτή δίνονται οι ορισμοί όπως : «Περιβάλλον θόρυβος» «Επιβλαβείς επιδράσεις» «Δείκτες θορύβου» «Χαρτογράφηση θορύβου» κλπ, καθώς επίσης τύπους για τους δείκτες θορύβου και μέθοδοι αξιολόγησης τους.

Νομοθεσία - Θόρυβος

4. ΘΟΡΥΒΟΣ				
	Νομοθεσία	Αναφορά σε:	Σχέση με το χώρο δραστηριοτήτων	Όρια και Διατάξεις
	Ευρωπαϊκή Νομοθεσία			
1	Οδηγία 86/594 που αφορά τον αερόφερτο θόρυβο που δημιουργούν οι οικιακές συσκευές	Επιτρεπόμενα όρια θορύβου οικιακών συσκευών	Αγορά και χρήση οικιακών συσκευών	
2	Οδηγία 86/188/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 12ης Μαΐου 1986 σχετικά με την προστασία των εργαζομένων από τους κινδύνους που διατρέχουν λόγω της έκθεσής τους στο θόρυβο κατά την εργασία	Καθορισμός ορίων θορύβου και λήψη μέτρων προστασίας κατά την υπέρβαση τους.	Ημερήσια ατομική ηχοέκθεση, εβδομαδιαίος μέσος όρος των ημερήσιων τιμών	Έχει ενσωματωθεί στην Ελληνική Νομοθεσία με το Π.Δ.85/91 -ΦΕΚ 38/Α'91 (βλ. παρακάτω)
3	Οδηγία 2003/10/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 6ης Φεβρουαρίου 2003, περί των ελάχιστων προδιαγραφών υγείας και ασφάλειας για την	Καθορισμός ορίων θορύβου και λήψη μέτρων προστασίας κατά την υπέρβαση τους.	Ημερήσια ατομική ηχοέκθεση, υποχρεώσεις εργοδοτών, μέτρα αποφυγής ή μείωσης της έκθεσης, ατομική προστασία	Όριακές τιμές ημερήσιας έκθεσης στο θόρυβο και αιχμές ηχητικής πίεσης:
				$L_{EX,8h} = 87 \text{ dB(A)}$ και $P_{peak} = 200 \text{ Pa}$
				Ανώτερες τιμές για ανάληψη δράσης : $L_{EX,8h} = 85 \text{ dB(A)}$ και $P_{peak} = 140 \text{ Pa}$
				Κατώτερες τιμές για ανάληψη δράσης :

<p>έκθεση των εργαζομένων σε κινδύνους προερχόμενους από φυσικούς παράγοντες (θόρυβος)</p>			<p>$L_{EX,8h} = 80 \text{ dB(A)}$ ΚΑΙ $P_{peak} = 112 \text{ Pa}$</p>
<p>Ελληνική Νομοθεσία</p>	<p>Αναφορά σε:</p>	<p>Σχέση με το χώρο δραστηριοτήτων</p>	<p>Όρια και Διατάξεις</p>
<p>1 Προεδρικό Διάταγμα 85/1991 "Προστασία των εργαζομένων από τους κινδύνους που διατρέχουν λόγω της έκθεσής τους στο θόρυβο κατά την εργασία, σε συμμόρφωση προς την Οδηγία 86/188 της ΕΟΚ" (ΦΕΚ 38/Α/91)</p>	<p>Εναρμόνιση με την Οδηγία 86/188/ΕΟΚ του Συμβουλίου των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων της 12^{ης} Μαΐου 1986. Ανεκτά επίπεδα θορύβου στο εσωτερικό επιχείρησης</p>	<p>Ημερήσια ατομική ηχοέκθεση, εβδομαδιαίος μέσος όρος των ημερήσιων τιμών</p>	<p>Συνεχής θόρυβος στο χώρο εργασίας. Λήψη μέτρων κατά την υπέρβαση των ορίων των μεγεθών: Ημερήσια ηχοέκθεση < 85 dB(A). Μέγιστη τιμή στιγμιαίας μη σταθμισμένης ηχητικής πίεσης < 200 dB(A). Χρήση ατομικών ακοοπροστατευτικών μέσων. Ιατρική παρακολούθηση εργαζομένων όταν δεν είναι εφικτή η μείωση της ημερήσιας ατομικής ηχοέκθεσης σε λιγότερο από 85 dB(A).</p>

8.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τα ηχοπετάσματα είναι μια μέθοδος μείωσης θορύβου (συνήθως αερόφερτου). Χρησιμοποιείται κυρίως κοντά σε δρόμους με συγκοινωνιακή φόρτιση , εργοτάξια ή ακόμα κοντά σε σιδηροδρομικές γραμμές. Η λειτουργία τους είναι αρκετά απλή και επικεντρώνεται στην δημιουργία κάποιου μέσου ανάμεσα στην πηγή παραγωγής θορύβου (δρόμος) και στο δέκτη (κατοικία). Τέσσερις παράγοντες παίζουν σημαντικό ρόλο στην αύξηση της ηχομείωσης:

- i. Η απόσταση μεταξύ του ηχοφράγματος και της κατοικίας. Από τη μελέτη που προηγήθηκε προέκυψε το συμπέρασμα ότι όσο πιο κοντά εγκατασταθεί το ηχοπέτασμα στην πηγή θορύβου αυξάνει η ηχομείωση του θορύβου..
- ii. Το πάχος του ηχοπετάσματος είναι εξίσου ένας σημαντικός παράγοντας προς τη μείωση του θορύβου και συγκεκριμένα, όσο πιο παχύ είναι το ηχοφράγμα τόσο μεγαλύτερη ηχομείωση επιτυγχάνεται.
- iii. Επίσης, σημαντικός παράγοντας στην ηχομείωση είναι το ύψος του ηχοφράγματος, όπου από τη μελέτη προέκυψε αυξανόμενη τάση ηχομείωσης για μεγαλύτερα ύψη ηχοφράγματος
- iv. Τέλος, το υλικό κατασκευής του ηχοπετάσματος, παίζει σημαντικό ρόλο στην ανάκλαση-διάδοση-απορρόφηση του ήχου.

Βάση της παρούσας μελέτης διαπιστώθηκε, ότι η εγκατάσταση διπλών ηχοφραγμάτων αποτελεί την αποδοτικότερη επιλογή μείωσης του θορύβου, παρόλο που έχουν τα παρακάτω μειονεκτήματα:

- Το υψηλό κόστος εγκατάστασης τους
- Το υπάρχον χωροταξικό πρόβλημα στις μεγάλες πόλεις
- Οι λόγοι ακαλαισθησίας στους χώρους τοποθέτησης τους
- Οικολογικοί λόγοι (σε ορισμένες περιπτώσεις)

Όσον αφορά την μελλοντική εργασία στον χώρο μελέτης και εγκατάστασης ηχοφραγμάτων, αξίζει να αναφερθεί ότι τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί ραγδαία η τοποθέτηση ηχοπετασμάτων από κρατικούς ή ιδιωτικούς φορείς και έχουν θεσπιστεί νόμοι για τη μέγιστη μείωση του εκπνεόμενου θορύβου στα μεγάλα έργα που σχεδιάζεται να πραγματοποιηθούν (ανάπτυξη αυτοκινητοδρόμων, σιδηροδρομικών εγκαταστάσεων) στην Ελλάδα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Παπανικολάου, Γιώργος. (2008). *Ηλεκτρακουστικές Μετρήσεις*. Θεσσαλονίκη: University Studio Press.
2. Δρίβας Σ., Γκινάλας Τ., Βαφείδου Ε. (Αθήνα 2005), Ο θόρυβος στην εργασία. Φύση κίνδυνοι και προστασία, εκδόσεις ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε.,
3. Πρότυπο ΕΛΟΤ 263.1 της ορολογίας της ακουστικής.
4. Ευθυμιάτος Διονύσιος (Αθήνα 2007), Ακουστική & Κτιριακές Εφαρμογές – θεωρία και πράξη, εκδόσεις Παπασωτηρίου
5. Σκαρλάτος Δημήτρης (Πάτρα 2003), Εφαρμοσμένη Ακουστική (δεύτερη έκδοση), εκδόσεις Φιλομάθεια
6. Εθνικό Τυπογραφείο.
7. Σκαρλάτος Δημήτριος (Αθήνα 2008), Δραστηριότητες του ΕΛΙΝΑ στην πρόβλεψη και αντιμετώπιση του κυκλοφοριακού θορύβου, Ημερίδα ΤΕΕ «Οι επιπτώσεις της ηχορύπανσης στα αστικά κέντρα – Αναγκαία μέτρα και παρεμβάσεις».
8. ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε. (Αθήνα 1999), Οδηγός νομοθεσίας για την προστασία του περιβάλλοντος, εκδόσεις ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε.

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

1. http://www.helina.gr/index.php?option=com_content&view=frontpage&Itemid=1&lang=el
2. <http://www.acoustics.org/>
3. <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%89%CF%87%CE%BF%CF%82>
4. http://www.elinyae.gr/el/lib_file_upload/thorivos.1138629114265.pdf
5. <http://www.acoumel.gr/Legislation.html>
6. <http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=451&language=el-GR>
7. http://www.fhwa.dot.gov/environment/noise/noise_barriers/design_construction/keepdown.cfm
8. <http://www.et.gr/>
9. <http://www.tsanak.gr/roadequip.htm>
10. <http://www.dynaduct.gr/Technical%20Greek.htm>
11. <http://www.noisecontrol.gr/home.html>
12. <http://ixoripansi.gr/>
13. <http://www.michanikos.gr/>
14. <http://www.odosimansi.gr/9713A87F.el.aspx>
15. <http://portal.tee.gr/portal/page/portal/library>
16. <http://www.ntua.gr/vitruvius/edu.htm>
17. <http://www.acoustics.gr/noisebarriers.html>
18. <http://www.fhwa.dot.gov/>
19. <http://www.temkald.gr/ylikadimosionergon/gr/ixopetasmata/ixopetasmata.htm>
20. <http://www.greenuniversity.gr/gr/86/80/5/7/3/showdoc.html>
21. http://monosimacon.blogspot.gr/2010/06/blog-post_24.html
22. <http://www.rockwool.gr/acoustic/sound+absorption>