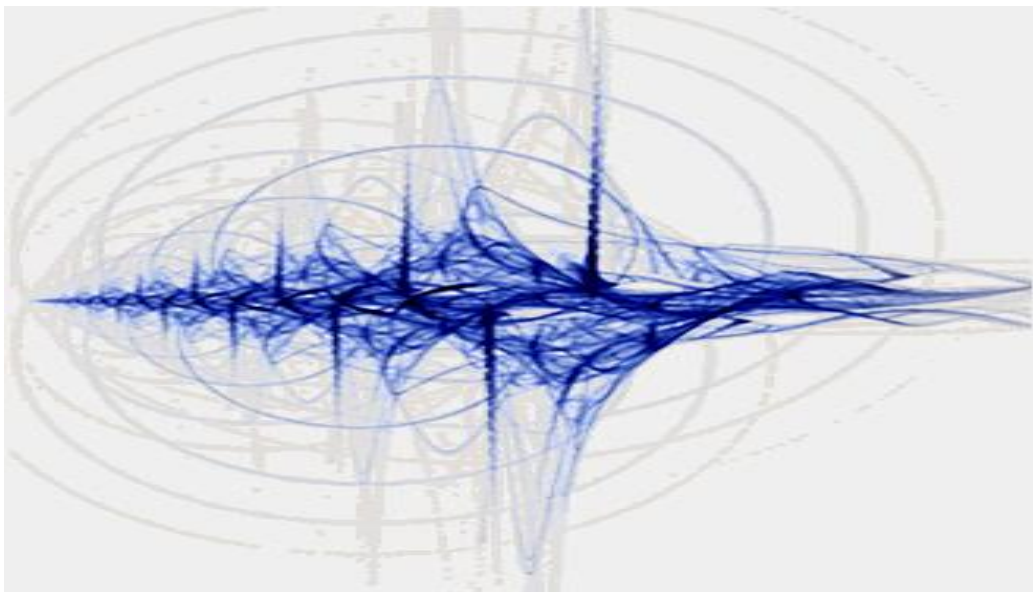


ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΟΡΥΒΟΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΩΝ ΧΩΡΩΝ ΚΑΙ
ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ
ΤΟΥ ΜΕ ΗΧΟΠΕΤΑΣΜΑΤΑ**



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ

ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2013

ΙΣΧΥΣ ΔΙΑ ΤΗΣ ΓΝΩΣΕΩΣ

Η παρούσα εργασία αφιερώνεται
στους γονείς μου και σε όσους
με στήριξαν αυτά τα χρόνια.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή πραγματεύεται θέματα ελέγχου θορύβου σε εξωτερικούς χώρους με την χρήση ηχοπετασμάτων. Μελετάται η συμπεριφορά των ηχοπετασμάτων σε διάφορες συχνότητες και σε διαφορετικά σχήματα.

Από τη θέση αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους με τους οποίους συνεργάστηκα κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της πτυχιακής εργασίας.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Στέφανο Τσινόπουλο, επίκουρο καθηγητή του Τμήματος Μηχανολογίας του Α.Τ.Ε.Ι. Πατρών, χωρίς της πολύτιμες συμβουλές του δε θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας. Τέλος ολοκληρώνοντας τις ακαδημαϊκές μου σπουδές θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του Τμήματος Μηχανολογίας για τη μεταλαμπάδευση των γνώσεων που μου παρείχαν όλο αυτό το διάστημα των σπουδών μου καθώς και όλους αυτούς που με ανέχτηκαν, με στήριξαν και με ώθησαν για την ολοκλήρωση των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός αυτής της Πτυχιακής Εργασίας είναι να αναπτύξει το θέμα «Θόρυβος εξωτερικών χώρων και ελαχιστοποίησή του με ηχοπετάσματα». Όπως είναι γνωστό από την εμπειρία των ανθρώπων που ζουν στις πόλεις, ο κυκλοφοριακός θόρυβος που προκαλείται από τα διάφορων τύπων οχήματα μπορεί να είναι πολύ ενοχλητικός. Ειδικότερα, οι θόρυβοι των οχημάτων γίνονται εντονότεροι στις κατοικήσιμες περιοχές δίπλα στους μεγάλους αυτοκινητόδρομους, όπου και υπάρχει μεγάλος αριθμός οχημάτων που κινούνται σε υψηλές ταχύτητες, γεγονός που αυξάνει τον θόρυβο από τα λάστιχα.

Έχει παρατηρηθεί και μετρηθεί, ότι αυτός ο θόρυβος είναι υπαίτιος για ποικίλων μορφών ψυχολογικές και σωματικές επιπτώσεις στον άνθρωπο. Η αντιμετώπιση αυτής της «δύσκολης» και συνεχούς μορφής ηχορρύπανσης μπορεί να γίνει με τη χρήση *ηχοπετασμάτων (ή ηχοφραγμάτων)*.

Η εργασία αναπτύσσεται σε τρία κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στην θεωρία του ήχου όπου παρουσιάζονται οι βασικές εξισώσεις που περιγράφουν τη διάδοση των ηχητικών κυμάτων κυρίως στον αέρα αλλά και τα αντίστοιχα φυσικά μεγέθη και μονάδες.

Στη συνέχεια, στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται μια παρουσίαση των κανονισμών και νόμων γύρω από την ηχορρύπανση όπως αυτοί έχουν θεσπιστεί από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας, την Ευρωπαϊκή Κοινότητα και φυσικά την Ελληνική Πολιτεία. Ακόμα στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναλυτική περιγραφή της υπάρχουσας τεχνολογίας των ηχοπετασμάτων καθώς και των διάφορων κατασκευαστικών λεπτομερειών σχετικά με αυτά.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται μια εισαγωγή στην μέθοδο των Συνοριακών Στοιχείων, που είναι μια αριθμητική μέθοδος επίλυσης προβλημάτων διαφορικών εξισώσεων, και εξηγείται η εφαρμογή τους στο αντικείμενο του ήχου. Ακόμα παρουσιάζεται το λογισμικό ISOBEM και τελικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στον υπολογιστή του φυσικού μοντέλου πάνω στο οποίο έγινε η εργασία. Στα αποτελέσματα της παραπάνω πειραματικής διαδικασίας έγινε επεξεργασία από την οποία προέκυψαν πίνακες και γραφήματα που παρατίθενται επίσης στο κεφάλαιο αυτό.

Στο τέλος της εργασίας υπάρχει το παράρτημα όπου παραθέτουμε τον κώδικα σε γλώσσα Python ο οποίος γράφτηκε για να προσομοιώσει το φυσικό μοντέλο.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΒΑΣΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΉΧΟ	1
1.1 ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ.....	1
1.2 ΤΙ ΕΙΝΑΙ Ο ΗΧΟΣ;.....	1
1.3 ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΗΧΟΥ	4
1.4 ΕΠΙΠΕΔΑ ΗΧΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ.....	5
1.5 ΗΧΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ ΣΤΟ ΧΩΡΟ	6
1.6 ΤΥΠΟΣ ΗΧΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ	6
1.6.1 Γενικά.....	6
1.6.2 Ηχητικά κύματα στον αέρα.....	7
1.7 ΈΝΤΑΣΗ ΤΟΥ ΉΧΟΥ	9
1.8 ΣΤΑΘΜΕΣ ΤΟΥ ΉΧΟΥ.....	11
1.8.1 Η μονάδα Decibel.....	11
1.8.2 Ισοδύναμη Στάθμη Θορύβου(L _{eq}).....	16
1.8.3 Ηχώμετρα.....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΟΡΥΒΟΣ, ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΚΑΙ ΗΧΟΠΕΤΑΣΜΑΤΑ	19
2.1 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΣ ΘΟΡΥΒΟΣ	19
2.1.1 Νομοθεσία για τον θόρυβο.....	19
2.2 ΔΕΙΚΤΕΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ	21
2.2.1 Ο δείκτης LDEN.....	22
2.2.2 Ποσοστομοριακή στάθμη L _N ή L _{AN}	22
2.2.3 Στάθμη έκθεσης θορύβου (L _{Ax} ή SEL ή LAE).....	24
2.2.4 Στάθμη ηχορύπανσης (NPL).....	25
2.2.5 Στάθμη L _{eq} '.....	25
2.2.6 Δείκτης κυκλοφοριακού θορύβου (TNI).....	26
2.2.7 Τάξη στάθμης ήχου (Rating Sound Level).....	26
2.2.8 Όρια περιβαλλοντικού θορύβου.....	26
2.2.9 Κυκλοφοριακός θόρυβος.....	26
2.2.10 Ειδική νομοθεσία περιβαλλοντικού θορύβου.....	27
2.3 ΗΧΟΠΕΤΑΣΜΑΤΑ.....	28
2.3.1 Γενικές πληροφορίες.....	28
2.3.2 Είδη Ηχοπετασμάτων	33
2.3.3 Τοποθέτηση	38
2.3.4 Υλικά κατασκευής.....	38
2.4 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ.....	39
2.5. ΔΙΠΛΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ.....	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΝΟΡΙΑΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΧΟΦΡΑΓΜΑΤΩΝ	43
3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΣΥΝΟΡΙΑΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (Μ.Σ.Σ.).....	43
3.2 ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ISOBEM.....	43
3.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΟΡΥΒΟΥ ΣΕ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟ ΜΕ ΗΧΟΠΕΤΑΣΜΑΤΑ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΥΠΩΝ.....	44
3.3.1 Περιγραφή προβλήματος	44
3.3.2 Περιγραφή Πειραματικού Μοντέλου.....	44
3.3.3 Κατασκευή του προσομοιώματος	45
3.3.4 Αποτελέσματα-Γραφήματα.....	50
3.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	91
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	93
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	95

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΒΑΣΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΉΧΟ

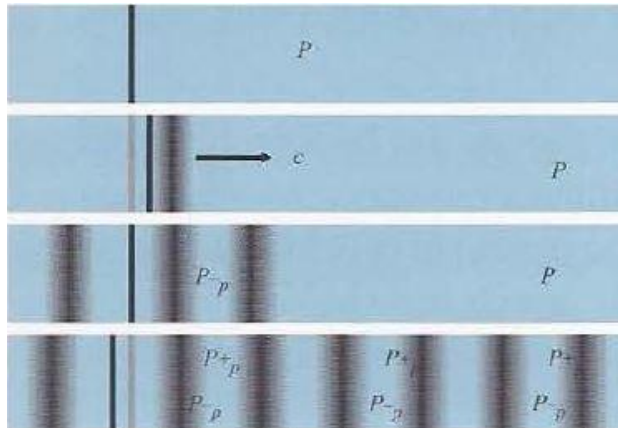
1.1 ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ

Η ακουστική είναι ένας από τους αρχαιότερους κλάδους της φυσικής επιστήμης. Ο πρώτος που χρησιμοποίησε τον όρο ακουστική ήταν ο Sauveur το 1701. Η πρώτη αναφορά για την φύση του ήχου έγινε από τον Πυθαγόρα (579-497 π.Χ.) ο οποίος διατύπωσε την άποψη ότι ο ήχος δημιουργείται από ταλαντούμενα σώματα. Αργότερα ο Αριστοτέλης (384 - 322 π.Χ.) έδωσε μία ακριβή περιγραφή για την παραγωγή και τη διάδοση του ήχου. Ισχυρίστηκε δηλαδή ότι ήχος είναι αποτέλεσμα της συμπίεσης του αέρα που δημιουργείται από μία πηγή.

1.2 ΤΙ ΕΙΝΑΙ Ο ΗΧΟΣ;

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε μία ταλαντούμενη επίπεδη επιφάνεια, όπως είναι το ένα σκέλος του γνωστού μας διαπασών. 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 μέσω γειτονικά τους κ.ο.κ.

Αποτέλεσμα την ενέργειας αυτή είναι η αύξηση της ατμοσφαιρικής πίεσης ηρεμίας P κατά Δp , κατά τη φορά κίνησης του σκέλους. Η μηχανική αυτή διαταραχή 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.



Σχήμα 1.1: Παραγωγή ηχητικών κυμάτων (Εφαρμ. Ακουστική [1])

Μετά από το παράδειγμα αυτό μπορούμε να δώσουμε τον εξής ορισμό για τον ήχο (ΕΛΟΤ 263.1 (1.184)):

Ήχος ορίζεται ως η μηχανική διαταραχή που διαδίδεται με ορισμένη ταχύτητα μέσα σε ένα μέσο που μπορεί να αναπτύξει εσωτερικές δυνάμεις (π.χ. ελαστικότητας, εσωτερικής τριβής) και έχει τέτοιο χαρακτήρα ώστε μπορεί να διεγείρει το αισθητήριο ακοής και να προκαλέσει ακουστικό αίσθημα.

Εδώ είναι απαραίτητο να κάνουμε τη διάκριση μεταξύ ήχου και θορύβου. Ο **ήχος** μπορεί να είναι ευχάριστος (μουσική), ή και πολλές φορές δυσάρεστος. Ενώ ο **θόρυβος** που ορίζεται σαν κάθε ανεπιθύμητος ήχος είναι δυσάρεστος και προκαλεί συνήθως ανεπιθύμητες ενέργειες όπως: απώλεια ακοής, ενόχληση, δυσκολία στην επικοινωνίας και λοιπά. Ως θόρυβος θα μπορούσε να χαρακτηριστεί κάθε ήχος που δεν μεταφέρει καμιά πληροφορία.

Για τη μελέτη παραγωγής και διάδοσης του ήχου σε κάποιο μέσο θα κάνουμε τις εξής **βασικές παραδοχές**:

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

- 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 (άν 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:

$$PV^\gamma = \text{σταθ.} \quad (1.1)$$

όπου $\gamma = c_p/c_v$ και 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 την οποία μετρούν τα μικρόφωνα. Με τον όρο ηχητική πίεση εννοούμε τη δημιουργούμενη υπερπίεση ή υποπίεση (σε σχέση με την ατμοσφαιρική πίεση) που δημιουργεί το ηχητικό κύμα κατά τη διάδοση 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 μεγίστων ή ελαχίστων της πίεσης, ή σύμφωνα με τον (ΕΛΟΤ 263.2) μήκος κύματος ή κυματικό μήκος ενός διαδιδόμενου 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.

Κυματάριθμος είναι το αντίστροφο του μήκους κύματος και ορίζεται:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1.2)$$

Την συχνότητα του ήχου (f) 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 τις 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:

$$U = su \quad (1.3)$$

Την ταχύτητα του ήχου (c) που είναι η ταχύτητα διάδοσης της διαταραχής (ταχύτητα του κύματος) στο υλικό μέσο.

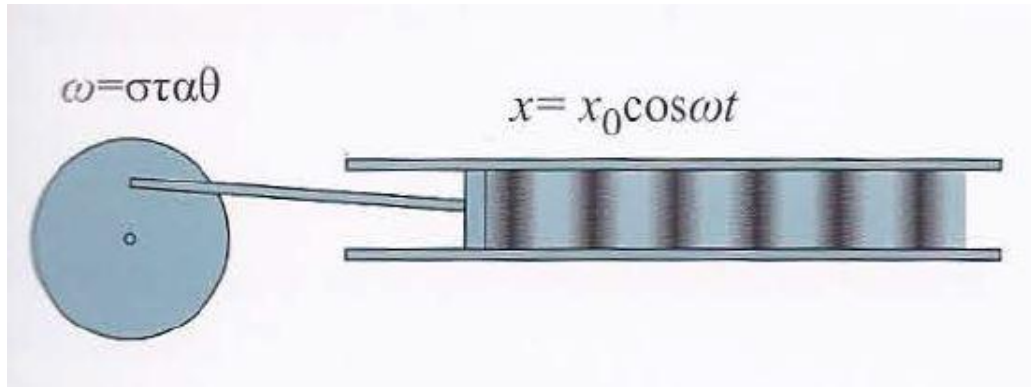
1.3 ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΗΧΟΥ

Ορίζεται ως *συχνότητα του ήχου η συχνότητα ταλάντωσης των σωματιδίων του μέσου διάδοσης* Ισχύουν οι εξής σχέσεις: $f = \frac{\omega}{2\pi}$ και $\lambda = \frac{c}{f}$. Είναι γεγονός ότι η ακουστότητα των ήχων εξαρτάται εκτός των άλλων και από τη συχνότητά τους και με βάση αυτή ταξινομούνται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- 16Hz έως 20KHz είναι οι **ακουστοί** ήχοι και ακούγονται από το ανθρώπινο αυτί
- ήχοι με συχνότητα <16Hz που είναι οι **υπόηχοι** και δεν είναι ακουστοί
- ήχοι με συχνότητα >20KHz που δεν είναι ακουστοί επίσης και ονομάζονται **υπέρηχοι**

1.4 ΕΠΙΠΕΔΑ ΗΧΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

Έστω η διάταξη του σχήματος 1.2.



Σχήμα 1.2 Μηχανισμός παραγωγής επίπεδων ηχητικών κυμάτων (Εφαρμ. Ακουστική [1])

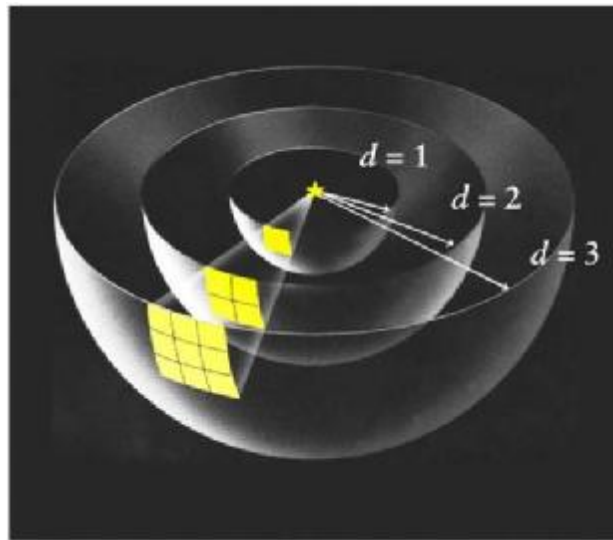
Το έμβολο εκτελεί απλή αρμονική ταλάντωση με κυκλική συχνότητα ω . Κατά την κίνησή του το έμβολο δημιουργεί πυκνώματα και αραιώματα στον αέρα των οποίων η πίεση σε ίσες αποστάσεις από το έμβολο είναι η ίδια. Οι μεταβολές της πίεσης αυτής δημιουργούν ένα επίπεδο κύμα. Επίπεδο θεωρείται το κύμα που διαδίδεται μόνο προς μια διεύθυνση για παράδειγμα αυτή των x . Εάν υποθέσουμε ότι στο επίπεδο yz (κάθετο στη διεύθ. διάδοσης του x) η πίεση τη ίδια χρονική στιγμή παίρνει την ίδια τιμή. Τα μέτωπα κύματος (δηλαδή οι επιφάνειες στις οποίες φτάνει το κύμα σε κάποιο χρόνο t) είναι επίπεδα άπειρων διαστάσεων, παράλληλα μεταξύ τους οποιαδήποτε χρονική στιγμή, κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης, όπως φαίνεται στο προηγούμενο σχήμα. Πότε θεωρούμε; Ένα κύμα επίπεδο θεωρείται επίπεδο όταν αυτό παράγεται από πηγή της οποίας η επιφάνεια εκπομπής είναι ένα επίπεδο για μικρές αποστάσεις, ή πρακτικά απο μία σημειακή πηγή που βρίσκεται σε πολύ μεγάλη (άπειρη θεωρητικά) απόσταση, όπου οι σφαιρικές επιφάνειες κύματος εκφυλίζονται σε επίπεδες. Αποδεικνύεται ότι όταν τα επίπεδα κύματα διαδίδονται σε μέσο χωρίς απώλειες η πίεση του ήχου δίνεται από τον ακόλουθο τύπο που λέγεται μονοδιάστατη κυματική εξίσωση και αποδεικνύει την κυματική φύση του ήχου:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = (c^2) * \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (1.4)$$

1.5 ΗΧΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ ΣΤΟ ΧΩΡΟ

Θεωρούμε σφαιρικό ηχητικό κύμα αυτό το οποίο έχει μέτωπο κύματος μία επιφάνεια σφαίρας. Παράγεται από σημειακή πηγή όταν αυτή εκπέμπει ομοιόμορφα σε όλες τις κατευθύνσεις στο χώρο. Για την περιγραφή της ηχητικής πίεσης παίρνουμε την κυματική εξίσωση στις τρεις διαστάσεις για διάδοση σε μέσο χωρίς απώλειες.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1.5)$$



Σχήμα 1.3: Σφαιρικό ηχητικό κύμα [images.google.com: sound waves]

1.6 ΤΥΠΟΣ ΗΧΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

1.6.1 Γενικά

Ο ήχος διαδίδεται με διαμήκη κύματα. Διαμήκη κύματα (Longitudinal waves) είναι τα κύματα όπου η ταχύτητα διάδοσης με την ταχύτητα ταλάντωσης των σωματιδίων του μέσου σε κάθε σημείο του ηχητικού κύματος είναι παράλληλες.

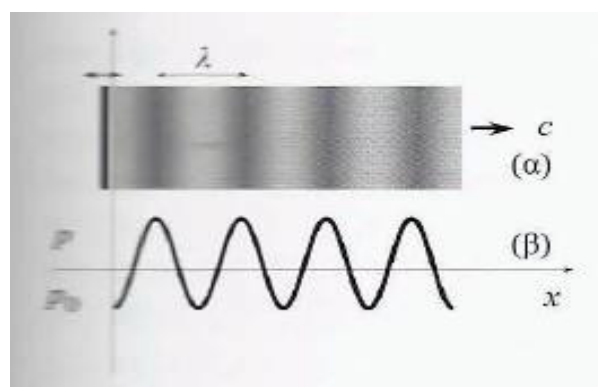
Η βαρύτητα αν και υπάρχει πάντοτε δεν επηρεάζει τα ηχητικά κύματα. Τελευταία έχει βρεθεί ότι υπάρχει ισχυρή επίδραση της βαρύτητας στα ηχητικά κύματα με πολύ μικρή συχνότητα (Infrasonic waves).

1.6.2 Ηχητικά κύματα στον αέρα

Στον αέρα ο ήχος διαδίδεται με διαμήκη ηχητικά κύματα, τα οποία όταν φθάσουν στο αισθητήριο της ακοής δημιουργούν την αίσθηση της ακοής. Εγκάρσια κύματα δεν μπορούν να διαδοθούν στα αέρια διότι τα διάφορα αέρια στρώματα (κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης), δεν αντιδρούν σε τάσεις ολίσθησης, αλλά μόνο σε τάσεις συμπίεσης. Τα κύματα συνήθως είναι αρμονικά ή όταν δεν είναι, μπορούν να αναλυθούν σε αρμονικά με ανάλυση Fourier.

Τα διαμήκη ηχητικά κύματα αποτελούνται από τοπικές μεταβολές της πίεσης του αέρα. Οι μεταβολές αυτές οφείλονται στις ταλαντώσεις των μορίων του αέρα κατά την διεύθυνση της διάδοσης. Η πίεση του αέρα σε κάποιο σημείο αυξάνεται πάνω από την ατμοσφαιρική και κατόπιν ελαττώνεται κάτω απ' αυτήν εκτελώντας αρμονική ταλάντωση με την ίδια συχνότητα που ταλαντώνονται τα μόρια του αέρα.

Ανάλογα με τη μορφή που έχει το μέτωπο του κύματος, τα ηχητικά κύματα διακρίνονται σε επίπεδα, κυλινδρικά, σφαιρικά κ.ο.κ. Η μέγιστη διαφορά της στιγμιαίας πίεσης που δημιουργεί το ηχητικό κύμα από την ατμοσφαιρική σε κάποιο σημείο ονομάζεται πλάτος πίεσης. Όπως βλέπουμε και στο Σχ. 1.4 ένα «στιγμιότυπο» ενός αρμονικού ηχητικού κύματος που δημιουργεί μία ταλαντούμενη επιφάνεια. Στο σχήμα 1.4α φαίνονται οι τοπικές μεταβολές της πυκνότητας που προκαλεί το ηχητικό κύμα κατά την διέλευση του, ενώ το σχήμα 1.4β δίδει τη γραφική παράσταση της πίεσης συναρτήσει της απόστασης, μία ορισμένη χρονική στιγμή (στιγμιότυπο), για ένα αρμονικό κύμα.



Σχήμα 1.4 Στιγμιότυπο ηχητικού αρμονικού κύματος (Εφαρμ. Ακουστική [1])

Η ταχύτητα του ήχου που εξαρτάται από το μέσο διάδοσης για την περίπτωση διαμηκών κυμάτων που διαδίδονται σε αέρια όπως αποδεικνύεται παρακάτω, δίνεται από τη σχέση:

$$c = \sqrt{\frac{B}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{MB}} \quad (1.6)$$

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.

Για τον αέρα στη θερμοκρασία των 0°C παίρνουμε από την σχέση 1.8 την ταχύτητα του ήχου: $c=331 \text{ m/s}$.

Όταν υπάρχει υγρασία τα μόρια των υδρατμών, προκαλούν μεταβολή στο μέσο μοριακό βάρος του αέρα και συνεπώς όπως δίνει και η σχέση 1.7, στην ταχύτητα του ήχου. Αποδεικνύεται ότι στην περίπτωση παρουσίας υγρασίας στην ατμόσφαιρα, η ταχύτητα του ήχου δίδεται από τη σχέση:

$$c_w = c \sqrt{1 - \frac{P_a}{P_0} \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_a} - \frac{5}{8} \right)} \quad (1.7)$$

όπου c_w η ταχύτητα του ήχου σε υγρό περιβάλλον,

P_a , η μερική πίεση των ατμών

P_0 , 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:

$$c = 331 + 0.6 \theta \text{ [m/s]} \quad (1.8)$$

όπου θ η θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου.

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

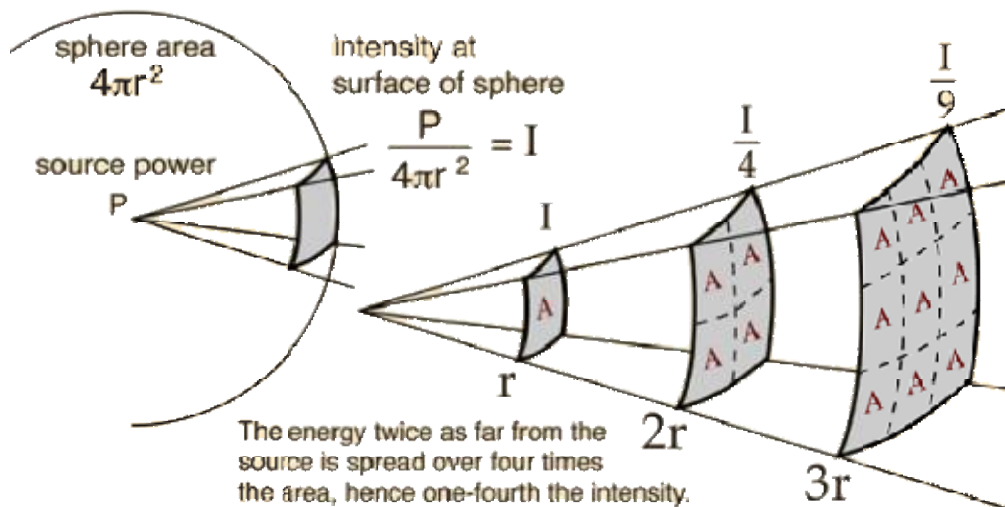
$$c = 343.2 \sqrt{\frac{T}{T_0}} \text{ [m/s]} \quad (1.9)$$

όπου T η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin $T_0 = 293.5^\circ\text{K}$. Μπορούμε να πούμε σαν συμπέρασμα ότι η διάδοση των ηχητικών κυμάτων σε ομογενές και ισότροπο μέσο γίνεται με σταθερή ταχύτητα.

1.7 ΈΝΤΑΣΗ ΤΟΥ ΉΧΟΥ

Ένα ιδιαίτερα χρήσιμο φυσικό μέγεθος στην ακουστική είναι η ένταση του ήχου. Η ένταση αντίθετα από την ηχητική πίεση που είναι μέγεθος βαθμωτό, είναι μέγεθος διανυσματικό και εκφράζει τη ροή της ηχητικής ενέργειας. Ως διανυσματικό μέγεθος παρουσιάζει όμως δυσκολία στη μέτρησή του διότι ο πλήρης καθορισμός ενός διανύσματος απαιτεί εκτός του μέτρου, τη γνώση της διεύθυνσης και φοράς. Σύμφωνα με τον κανονισμό ΕΛΟΤ 556.1 (2.29), για την ένταση μπορούμε να δώσουμε τον ακόλουθο ορισμό: *Ηχητική ένταση σε ένα σημείο του ηχητικού πεδίου και προς μια καθορισμένη διεύθυνση είναι το πηλίκο της μέσης ηχητικής ισχύος που διαπερνά κάθετα μία στοιχειώδη επιφάνεια δια του εμβαδού της επιφάνειας.*

Μονάδα μέτρησης της έντασης είναι το W/m^2 .



Σχήμα 1.5: Ορισμός έντασης ήχου [images.google.com: sound propagation]

Η ισχύς από τη Μηχανική, ορίζεται από τη σχέση:

$$W = Fu \quad (1.10)$$

όπου F η δύναμη που ασκείται σε κάποιο στοιχείο όγκου, u η σωματιδιακή ταχύτητα του θεωρούμενου στοιχείου. Η ηχητική ισχύς που διέρχεται από μια επιφάνεια, ανά μονάδα επιφάνειας είναι:

$$I = \frac{W}{s} = pu \quad (1.11)$$

Σύμφωνα με τον ορισμό της έντασης του ήχου (ως μέσης τιμής ροής ισχύος) για την ένταση μπορούμε να γράψουμε:

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T pudt = \bar{p}\bar{u} \quad (1.12)$$

Η ένταση όπως είδαμε είναι μέγεθος διανυσματικό με διεύθυνση και φορά την διεύθυνση και φορά της ροής της ενέργειας. Αν και υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ έντασης και πίεσης, η ένταση δεν μπορεί να μετρηθεί με τα συνηθη μικρόφωνα που μετρούν την πίεση, διότι αυτά δεν μπορούν να μετρήσουν διεύθυνση και φορά. Για την μέτρηση της έντασης χρησιμοποιείται ειδική διάταξη δύο μικροφώνων.

1.7.1 Ακουστική Ισχύς Πηγής

Για την ακουστική ισχύ μιας πηγής μπορούμε να δώσουμε τον εξής ορισμό:

Ακουστική ισχύς πηγής είναι η ακουστική ενέργεια που εκπέμπει η πηγή ανά μονάδα χρόνου προς όλες τις διευθύνσεις.

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε μια σημειακή πηγή που εκπέμπει ήχο ομοιόμορφα στον χώρο. Η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου του ήχου που διέρχεται από μια σφαιρική επιφάνεια s που περικλείει την πηγή, σύμφωνα με τον ορισμό της έντασης δίνεται από τη σχέση 1.10.

Στην περίπτωση που έχουμε μη ομοιόμορφη εκπομπή, στην πράξη ο υπολογισμός της ακουστικής ισχύος της πηγής γίνεται ως εξής:

Υποθέτουμε μία σφαιρική επιφάνεια (ή συνηθέστερα επιφάνεια σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου) που περικλείει την πηγή και χωρίζεται σε N επιμέρους τμήματα. Μετρούμε την ακουστική πίεση στο κέντρο κάθε τμήματος που έχει εμβαδόν Δs_i και για τον προσδιορισμό της ισχύος χρησιμοποιούμε τον τύπο:

$$W = \sum_{k=1}^N I_i \Delta s_i = \sum_{i=1}^N \frac{p_i^2}{\rho c} \Delta s_i \quad (1.13)$$

1.8 ΣΤΑΘΜΕΣ ΤΟΥ ΉΧΟΥ

1.8.1 Η μονάδα Decibel

Οι χρησιμοποιούμενες μονάδες είναι λογαριθμικές κι αυτό γίνεται για δύο λόγους:

Ο πρώτος λόγος σχετίζεται με το εύρος των τιμών των μετρούμενων μεγεθών. Λόγω του ότι το εύρος των μεγεθών της ακουστικής είναι πολύ μεγάλο, (ένας ήχος μπορεί να έχει ακουστική πίεση από $20 \mu Pa$ έως $10^8 \mu Pa$), οπότε η χρήση λογαριθμικών κλιμάκων είναι πιο εύχρηστη. Ο δεύτερος λόγος είναι ψυχοφυσικός και αφορά την αντίληψη του ήχου από τον άνθρωπο. Σύμφωνα με τον Weber η αλλαγή της υποκειμενικής αντίληψης (R) είναι ανάλογη με την σχετική μεταβολή του ερεθίσματος (S). Δηλαδή:

$$\delta R \propto \frac{\delta S}{S} \quad (1.14)$$

η οποία σχέση ολοκληρώνεται και γίνεται:

$$R = k \log(S) \quad (1.15)$$

όπου k είναι μια σταθερά. Αυτός είναι ο **ψυχοφυσικός Νόμος των Weber-Fechner** και περιγράφει ότι η υποκειμενική αντίληψη είναι ανάλογη με το το λογάριθμο του ερεθίσματος. Χρησιμοποιούμε λοιπόν τις μονάδες bel και decibel για να περιγράψουμε τις στάθμες στα μεγέθη της ακουστικής.

Η μονάδα bel ορίζεται ως ο λογάριθμος μιας αδιάστατης ποσότητας όπως είναι για παράδειγμα ο λόγος δύο ομοειδών ποσοτήτων π.χ. ισχύων, εντάσεων, πιέσεων κ.λπ. Γενικά η μονάδα bel ορίζεται από τη σχέση:

$$A(\text{bel}) = \log \frac{S}{S_{ref}} \quad (1.16)$$

και κατ' επέκταση το decibel είναι:

$$A(\text{dB}) = 10 \log \frac{S}{S_{ref}} \quad (1.17)$$

Όπως προκύπτει από την εξίσωση ορισμού της η μονάδα Decibel (dB) μετρά σχετικά μεγέθη δηλαδή το ίδιο μέγεθος μπορεί να έχει διαφορετικές τιμές αν η ποσότητα στον παρονομαστή είναι διαφορετική. Για να μετράει απόλυτα μεγέθη, καθορίζεται η τιμή του k_{ref} που ονομάζεται τιμή αναφοράς (συμβολίζεται και με k_{ref}). Στην περίπτωση αυτή η σχέση decibel μπορεί να μετρήσει απόλυτα μεγέθη και συμβολίζονται ως εξής: $A = x \text{dB} k_{ref}$. Τα $20 \mu\text{Pa}$ θεωρούνται η ελάχιστη ακουστική πίεση που μπορεί να έχει ένας ήχος για να είναι ακουστός.

Ορίζονται λοιπόν οι εξής στάθμες για τον ήχο:

Στάθμη έντασης ήχου L_I - SIL-Sound Intensity Level

$$L_I = 10 \log \frac{p^2}{p_{ref}^2} \quad (1.18)$$

όπου I , το μέτρο της έντασης σε κάποιο σημείο, και I_{ref} , η ένταση αναφοράς, της οποίας ο υπολογισμός γίνεται από την σχέση

$$I_{ref} = \frac{(p_{ref})^2}{(\rho c)_{ref}} \quad (1.19)$$

Οπότε με αντικατάσταση των τιμών αναφοράς προκύπτει ότι:

$$I_{ref} = \frac{(2 \times 10^{-5} Pa)^2}{400 Rayls} = 10^{-12} W/m^2 \quad (1.20)$$

Στάθμη ισχύος ήχου L_w - SWL-Sound Watts Level

Χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της ολικά εκπεμπόμενης ηχητικής ισχύος από μία πηγή και ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_{ref}} \quad (1.21)$$

όπου W , η ακουστική ισχύς της πηγής σε Watts και W_{ref} η ισχύς αναφοράς. Η ποσότητα αναφοράς προκύπτει με ανάλογο τρόπο από τη σχέση:

$$W_{ref} = I_{ref} S_{ref} = 10^{-12} W/m^2 1m^2 = 10^{-12} Watt \quad (1.22)$$

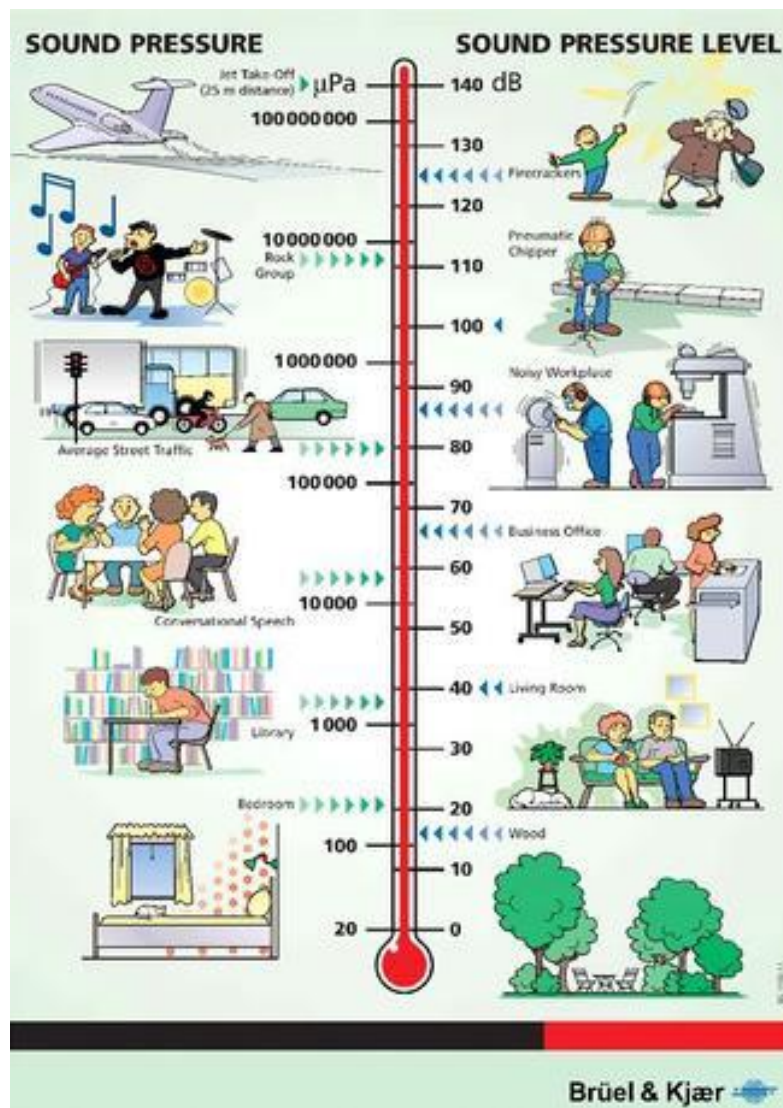
Στάθμη πίεσης ήχου L_p - SPL-Sound Pressure Level

Δίνεται από τη σχέση:

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_{ref}^2} \quad (1.23)$$

όπου p , η πίεση ήχου σε κάποιο σημείο και p_{ref} η πίεση αναφοράς. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι στην παραπάνω σχέση η ακουστική πίεση είναι υψωμένη στο τετράγωνο. Αυτό συμβαίνει γιατί η ενέργεια των ηχητικών κυμάτων, είναι ανάλογη με το τετράγωνο της πίεσης.

Παρακάτω δίνεται ένα σχήμα με τις στάθμες της ηχητικής πίεσης, για διάφορες πηγές ήχου τόσο σε dB όσο και σε μPa :



Σχήμα 1.5 Στάθμη ηχητικής πίεσης για διαφορετικές πηγές ήχου [images.google.com dBSPL]

Θεωρητικά στον αέρα δεν μπορεί να παραχθεί ήχος με στάθμη μεγαλύτερη από 194 dB και αυτό γιατί η δημιουργούμενη υποπίεση δεν μπορεί να πάρει μεγαλύτερη τιμή από την ατμοσφαιρική. Αν συνέβαινε αυτό στην ολική πίεση θα αντιστοιχούσαν και αρνητικές τιμές που είναι αδύνατο.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η μονάδα *decibel* είναι η κατ' εξοχήν μονάδα που χρησιμοποιείται στην ακουστική. Ωστόσο σε ορισμένες περιπτώσεις (αν και σπάνια) χρησιμοποιείται και η μονάδα *bel*. Στους κανονισμούς ISO 9296 π.χ. προτείνεται η στάθμη ισχύος μιας μηχανής να εκφράζεται σε *bel* και η μονάδα στάθμης πίεσης σε *decibel*. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η σύγχυση μεταξύ των δύο μεγεθών.

Στις στάθμες που ορίσαμε στην προηγούμενη παράγραφο, δεν υπεισέρχεται η συχνότητα του ήχου. Όταν μας ενδιαφέρει πως κατανέμεται ο θόρυβος στις διάφορες συχνότητες χρησιμοποιούμε τις παρακάτω στάθμες θορύβου:

Φασματική στάθμη πίεσης (L_{ps}) η οποία δίνει την στάθμη απλών ήχων (τόνων) και ορίζεται από τη σχέση:

$$L_{ps} = 10 \log \frac{(p_s)^2}{(p_{ref})^2} \quad (1.24)$$

όπου p_s η πίεση που οφείλεται σε μια συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων με κεντρική συχνότητα f και εύρος $\Delta f = 1 \text{ Hz}$.

Ζωνική στάθμη πίεσης (L_{pb}) Δίνει τη στάθμη του ήχου όταν αυτός κατανέμεται σε μια ζώνη (1/1, 1/3, 1/10) οκτάβας ορίζεται από τη σχέση:

$$L_{pb} = 10 \log \frac{\int_{f_1}^{f_2} (p_{f,rms})^2 df}{(p_{ref})^2} \quad (1.25)$$

όπου f_1, f_2 είναι οι πλευρικές συχνότητες κάθε ζώνης και $p_{f,rms}$ είναι η rms φασματική πίεση κάθε συχνότητας. Όταν ο θόρυβος ισοκατανέμεται σε όλες τις συχνότητες μιας ζώνης τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη σχέση:

$$L_{pb} = 10 \log \frac{(p_s)^2 \Delta f}{(p_{ref})^2} = L_{ps} + 10 \log \Delta f \quad (1.26)$$

όπου Δf το εύρος ζώνης, $(p_s)^2$ το τετράγωνο της πίεσης της κεντρικής συχνότητας της ζώνης και L_{ps} η αντίστοιχη φασματική στάθμη της κεντρικής συχνότητας της ζώνης.

Ολική στάθμη πίεσης Όπως είναι προφανές η ολική στάθμη πίεσης δηλαδή η στάθμη που οφείλεται στον ήχο ανεξάρτητα από τη συχνότητά του θα δίδεται από τη σχέση:

$$L_{πολ.} = 10 \log \frac{\int_{16}^{20000} (p_{f,rms})^2 df}{(p_{ref})^2} \quad (1.27)$$

Όταν έχουμε θόρυβο που κατανέμεται ομοιόμορφα σε κάθε ζώνη συχνοτήτων τότε η ολική στάθμη πίεσης δίδεται από τη σχέση:

$$L_{πολ.} = 10 \log \frac{1}{(p_{ref})^2} \sum_{k=1}^N (p_{si})^2 \Delta f_i = 10 \log \sum_i^N 20^{0.1L_{pb,i}} \quad (1.28)$$

όπου p_{si} οι πιέσεις στις κεντρικές συχνότητες κάθε ζώνης, Δf_i , το εύρος κάθε ζώνης και $L_{pb,i}$ η στάθμη ζώνης.

Η σχέση 1. 25 είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τον υπολογισμό της ολικής στάθμης πίεσης όταν γνωρίζουμε τις ζωνικές στάθμες ενός ήχου. Η ολική στάθμη όταν γνωρίζουμε τις ζωνικές στάθμες μπορεί συμβολικά να γραφεί με την σχέση:

$$L_{πολ.} = L_B1 \oplus L_B2 \oplus L_B3 \oplus \dots \quad (1.29)$$

όπου το σύμβολο άθροισης των dB. Ανάλογες σχέσεις ισχύουν για την ένταση και την ισχύ των πηγών.

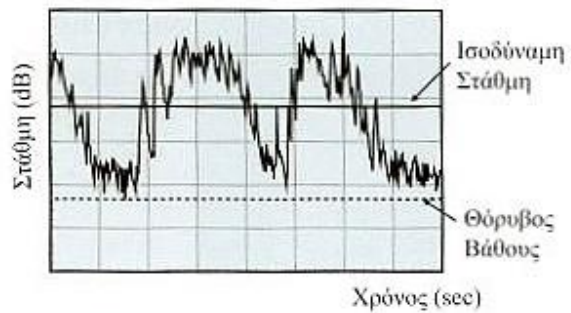
1.8.2 Ισοδύναμη Στάθμη Θορύβου(L_{eq})

Οι στάθμες που αναφέρθηκαν προηγούμενα μετρούν σταθερούς ήχους, δηλαδή ήχους των οποίων το πλάτος δεν μεταβάλλεται με τον χρόνο. Στις περισσότερες όμως περιπτώσεις δεν συμβαίνει αυτό και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούμε άλλες στάθμες που λέγονται και δείκτες. Η ισοδύναμη στάθμη είναι μία από αυτές. Η ισοδύναμη στάθμη θορύβου είναι από τους πιο εύχρηστους δείκτες θορύβου και πολλές φορές χρησιμοποιείται για τον ορισμό άλλων δεικτών. Η ισοδύναμη στάθμη εκφράζει τη στάθμη που θα πρέπει να έχει ένας σταθερής στάθμης ήχος που περικλείει την ακουστική ενέργεια με τον κυμαινόμενο και ορίζεται από τη σχέση:

$$L_{eq} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T 10^{0.1L(t)} dt \right] \quad (1.30)$$

όπου T, ο χρόνος παρατήρησης και L(t), η στιγμιαία στάθμη θορύβου.

Σε πολλές περιπτώσεις (κυρίως για το χαρακτηρισμό του θορύβου μιας περιοχής) ο χρόνος παρατήρησης είναι μια ώρα και η μετρούμενη ισοδύναμη στάθμη συμβολίζεται με : $L_{eq,1h}$. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.7 δίνεται η στάθμη του θορύβου που προέρχεται από την κυκλοφορία οχημάτων (συμπαγής γραμμή). Η συνεχής ευθεία δίνει την ισοδύναμη στάθμη και η διακεκομμένη τον θόρυβο βάθους.



Εικόνα 1.7: Στάθμη Θορύβου από κυκλοφορία οχημάτων (Εφαρμ. Ακουστική [1])

Συνήθως στην πράξη όταν δεν διαθέτουμε ηχόμετρο με κατάλληλο κύκλωμα ολοκλήρωσης, γίνεται δειγματοληψία και στατιστική ανάλυση των δειγμάτων του θορύβου. Από τις μετρήσεις ή το ιστόγραμμα των δειγμάτων του θορύβου υπολογίζεται η ισοδύναμη στάθμη βάσει του τύπου:

$$L_{eq} = 10 \log \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0.1L_i} \right] = 10 \log \left[\frac{1}{100} \sum_{i=1}^N f_i 10^{0.1L_i} \right] \quad (1.31)$$

όπου N ο αριθμός των μετρήσεων και f_i η % συχνότητα επανάληψης της στάθμης L_i . Για το θόρυβο του περιβάλλοντος χρησιμοποιείται επίσης και η ποσοστιαία (ή ποσοστομοριακή) στάθμη L_N .

1.8.3 Ηχόμετρα

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται ένα ηχόμετρο



Σχήμα 1.8 Σύγχρονο ψηφιακό ηχόμετρο [commons.wikimedia.org]

Τα ηχόμετρα χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της στάθμης του θορύβου. 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. Σήμερα πολλά από αυτά όπως αυτό της εικόνας έχουν εξελιγμένα συστήματα επεξεργασίας σε πραγματικό χρόνο και δείχνουν λεπτομέρειες όπως το φάσμα ενός μετρούμενου σήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΟΡΥΒΟΣ, ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΚΑΙ ΗΧΟΠΕΤΑΣΜΑΤΑ

2.1 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΣ ΘΟΡΥΒΟΣ

2.1.1 Νομοθεσία για τον θόρυβο

θα αναφερθούμε στα προβλήματα από την ηχορύπανση και στην ισχύουσα νομοθεσία η οποία ορίζει τα μέγιστα όρια έκθεσης του πληθυσμού στον θόρυβο. Λόγω των πολλών παραμέτρων που υπάρχουν στον ήχο δηλαδή η συχνότητα, η στάθμη, η διάρκεια, η παρουσία αιχμών κ.λ.π., είναι δύσκολος ο καθορισμός ορίων. για να καθοριστούν αυτά τα όρια από τους διάφορους νόμους και κανονισμούς λαμβάνονται υπόψη τρεις επιδράσεις του θορύβου στον άνθρωπο.

- την ενόχληση,
- την δυσκολία επικοινωνίας,
- την απώλεια ακοής.

Ειδικότερα ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO,2008c) έχει προσδιορίσει του ακόλουθους κινδύνους από το θόρυβο:

- Πόνος και ακροαστική κόπωση
- Ενόχληση
- Επιρροή στην κοινωνική συμπεριφορά (επιθετικότητα)
- Παρεμπόδιση της επικοινωνίας μέσω ομιλίας
- Διαταραχές ύπνου με όλες τις επιβλαβείς συνέπειες σε βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη βάση
- Καρδιαγγειακές επιπτώσεις
- Ορμονικές αντιδράσεις και τις πιθανές του συνέπειες στον ανθρώπινο μεταβολισμό και το ανοσοποιητικό σύστημα
- Μειωμένη απόδοση στη δουλειά και το σχολείο

Χαρακτηριστικά του θορύβου που λαμβάνονται υπόψη στη νομοθεσία είναι

- ο χώρος στον οποίο υπάρχει ο θόρυβος,
- η ώρα της ημέρας,
- η διάρκεια της έκθεσης στον ήχο,

- ο τύπος του θορύβου (διαρκής, κρουστικός κ.λπ.).

Στην περίπτωση του εργασιακού θορύβου για τον καθορισμό ενός μεγίστου ορίου κάτω του οποίου δεν προκαλείται σημαντική βλάβη στον άνθρωπο, λαμβάνεται υπόψη η παρακάτω προσθετική ιδιότητα του ήχου: Η βλάβη στην ακοή προκαλείται αθροιστικά από δύο παράγοντες: τη στάθμη του θορύβου και το χρόνο σε αυτόν. Διεθνώς το όριο αυτό καθορίστηκε στα 90 dB(A) συνεχούς έκθεσης ανά οκτάωρο ημερησίως στην περίπτωση που ο θόρυβος είναι ευρέως φάσματος. Από έρευνες όμως βρέθηκε όμως ότι 65% των εκτιθέμενων στο θόρυβο αυτό μετά από 30 έτη έκθεσης έχουν υποστεί κάποια απώλεια ακοής. Ακριβώς για αυτό σε πολλές χώρες το όριο αυτό μειώθηκε στα 87-90 dB(A) με 8ωρη έκθεση ημερησίως. Η Ευρωπαϊκή Ένωση υιοθέτησε όριο των 87 dB(A), που ισχύει και στην Ελλάδα από το 2006. Για την προστασία των εργαζόμενων σε χώρους με μεγάλες στάθμες θορύβου, έχουν καθοριστεί μέγιστα όρια παραμονής σε κάθε στάθμη.

2.1.2 Όρια από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας

Ο παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας συνιστά στο χώρο εργασίας να μην υπερβαίνει τα $85\text{dB}(A)$ και στιγμιαία τα $120\text{dB}(A)$. Αντίστοιχα, στο χώρο του ύπνου, σε σταθερό επίπεδο λιγότερο από $30\text{dB}(A)$ και στιγμιαία όχι περισσότερο από $45\text{dB}(A)$. Τα άτομα που εργάζονται σε επίπεδο θορύβου άνω των $85\text{dB}(A)$ πρέπει να υποβάλλονται σε περιοδική εκτίμηση της ακουστικής τους ικανότητας, ώστε να προληφθεί βλάβη της ακοής (Π.Ο.Υ., 1999). Σύμφωνα με τον Π.Ο.Υ. οι μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές για την ένταση του θορύβου σε καποιους περιβάλλοντες χώρους δίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Περιβάλλον	Επιπτώσεις στην Υγεία	Ένταση θορύβου (dB)	Διάρκεια έκθεσης (ώρες)	Μέγιστη τιμή – Στιγμασία τιμή (dB)
Εξωτερικοί χώροι	Σοβαρή ενόχληση ημέρα και νύχτα	55	16	-
Εξωτερικοί χώροι	Μικρή ενόχληση ημέρα και νύχτα	50	16	-
Κατοικίες – Εσωτερικοί χώροι	Κατανόηση ομιλίας, μικρή ενόχληση ημέρα και νύχτα	35	16	45
Δωμάτια ύπνου	Διαταραχή ύπνου τη νύχτα	45	8	60
Σχολικές αίθουσες	Ενόχληση στην κατανόηση ομιλίας	35	Διάρκεια μαθήματος	
Δωμάτια ύπνου για προσχολική ηλικία	Διαταραχή ύπνου	30	Διάρκεια ύπνου	45
Σχολικές αιυλές	Ενόχληση	55	Διάρκεια ημέρας	-
Νασοκομεία θάλαμοι	Διαταραχή ύπνου	30	8	40
Νασοκομεία ιατρεία		30	16	
Βιομηχανία, εμπορικές επιχειρήσεις, μαγαζιά, συγκοινωνίες	Επίδραση στην ακοή	70	24	110
Τελετές, φεστιβάλ, συναυλίες κλπ.		100	4	110
Συγκεντρώσεις σε κλειστό χώρο		85	1	110
Μουσική και άλλοι ήχοι από ηχεία και ακουστικά		85	1	110
Σειρήνες από παιχνίδια, πυροσβεστική κλπ				140

Πίνακας 1: Οδηγός μέγιστων επιτρεπτών τιμών για την ηχορύπανση σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα (WHO, 2008α)

2.2 ΔΕΙΚΤΕΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ

Ο περιβαλλοντικός θόρυβος είναι πιο επικίνδυνος από τον εργασιακό διότι σε αντίθεση με αυτόν (η έκθεση στον εργασιακό θόρυβο καλύπτει περίοδο 8 ωρών για 250 ημέρες ετησίως) καλύπτει περίοδο 24 ωρών για 365 ημέρες το χρόνο.

Υπάρχει μεγάλη γκάμα δεικτών ηχορύπανσης για τη μέτρηση του περιβαλλοντικού θορύβου που χρησιμοποιούνται ανάλογα με την περίπτωση.

2.2.1 Ο δείκτης LDEN

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση ισχύει ο δείκτης L_{DEN} . Ο δείκτης αυτός ορίζεται να λαμβάνει υπόψη του σε μεγαλύτερο βαθμό από ότι ο δείκτης L_{dn} την ευαισθησία των ανθρώπων στο θόρυβο συναρτήσει της ώρας, της ημέρας και ορίζεται από την ακόλουθη σχέση (Directive 2002/49/EU):

$$L_{DEN} = 10 \log \left[\frac{12}{24} \left[\left(10^{L_d/10} \right) + \frac{4}{24} \left(10^{L_e+5/10} \right) + \frac{8}{24} \left(10^{L_n+10/10} \right) \right] \right] \quad (2.1)$$

όπου L_d η ισοδύναμη στάθμη της ημέρας (από 7 Π.μ. - 7 μ.μ.)

L_e η ισοδύναμη στάθμη του απογεύματος (από 7 μ.μ. - 11 μ.μ.)

L_n η ισοδύναμη στάθμη της νύκτας (από 10 μ.μ. - 7 π.μ.)

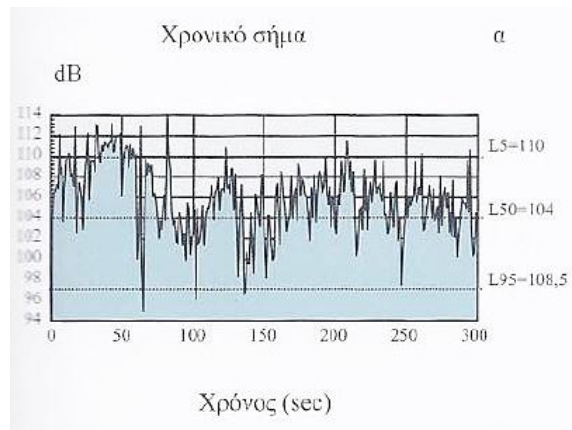
2.2.2 Ποσοστομοριακή στάθμη L_N ή L_{AN}

Η ποσοστομοριακή (ή ποσοστιαία) στάθμη L_N μαζί με την ισοδύναμη στάθμη (L_{eq}) αποτελούν τις πιο σπουδαίες παραμέτρους για τον προσδιορισμό του θορύβου του περιβάλλοντος. Η στάθμη L_N χρησιμοποιείται όταν γίνεται στατιστική ανάλυση του θορύβου, στην περίπτωση που ο θόρυβος είναι κυμαινόμενος. Ως στάθμη L_N ορίζεται η στάθμη ενός σταθερής στάθμης θορύβου, την οποία ο κυμαινόμενος θόρυβος την υπερβαίνει κατά ένα ποσοστό $N\%$ του χρόνου παρατήρησης. Το N παίρνει τιμές από 1-100. Συνήθεις τιμές του N είναι 1, 5, 10, 50, 90, 95, 99. Το L_{99} αντιστοιχεί στο θόρυβο βάθους, ενώ το L_1 αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή του θορύβου, κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Στην πράξη όμως για τον μέγιστο θόρυβο και τον θόρυβο βάθους χρησιμοποιούνται αρκετά συχνά οι τιμές L_{95} και L_5 αντίστοιχα. Συνήθως όμως χρησιμοποιούνται οι τιμές L_{90} και L_{10} . Στην περίπτωση που ο θόρυβος κατανέμεται σύμφωνα με την κατανομή του Gauss τότε μπορούμε να γράψουμε:

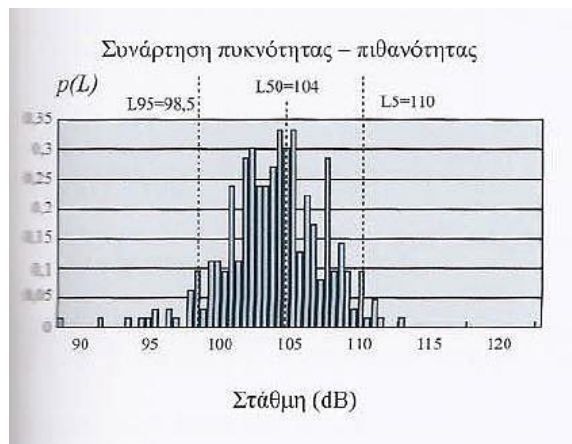
$$L_{eq} = L_{50} + 0.115\sigma^2 \quad \text{ή} \quad L_{eq} = L_{10} + 1.28\sigma + 0.115\sigma^2 \quad (2.2)$$

όπου σ , η τυπική απόκλιση του θορύβου.

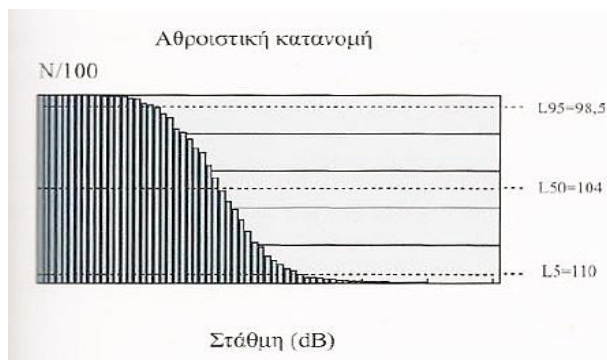
Ακολουθούν τα σχήματα όπου περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού του L_N .



Σχήμα 2.1: Υπολογισμός από τη συνάρτηση του χρόνου (Εφαρμ. Ακουστική [1])



Σχήμα 2.2: Υπολογισμός από την σ.π.π (Εφαρμ. Ακουστική [1])



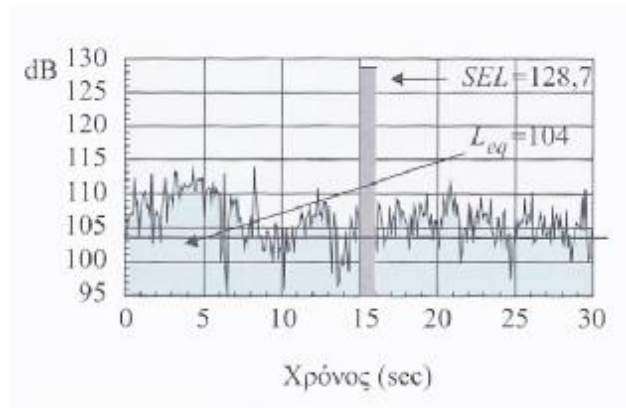
Σχήμα 2.3 Υπολογισμός από την αθροιστική κατανομή (Εφαρμ. Ακουστική [1])

2.2.3 Στάθμη έκθεσης θορύβου (L_{Ax} ή SEL ή LAE)

Δίνεται από τη σχέση:

$$L_{Ax} = 10 \log \frac{1}{T_{ref}} \int_0^T 10^{0.1L(t)} dt \quad (2.3)$$

όπου T ο χρόνος που διαρκεί το φαινόμενο και T_{ref} ο χρόνος αναφοράς.



Σχήμα 2.4: Ορισμός στάθμης SEL (Εφαρμ. Ακουστική [1])

Η στάθμη έκθεσης θορύβου (Sound Exposure Level) είναι η σταθερή στάθμη του θορύβου που διαρκεί 1 sec και περικλείει την ίδια ενέργεια με το θόρυβο που μετριέται.

Κατά τους κανονισμούς ISO το T_{ref} = 1sec. Η στάθμη αυτή χρησιμοποιείται για τη μέτρηση απλών γεγονότων ήχου (όπως Π.χ. πυροβολισμός, πέρασμα αεροπλάνου κ.λπ.), περιορισμένης χρονικής διάρκειας (σήματα ενέργειας) και για τον προσδιορισμό του χρόνου ολοκλήρωσης της ισοδύναμης στάθμης όταν μετριέται ταυτόχρονα μ' αυτήν. Έτσι, προκύπτει ότι η ενέργεια που περιέχει ένα ήχος, είναι ανάλογη με τις ποσότητες:

$$10^{L_{eq}/10} T = 10^{L_{Ax}/10} T_{ref} \quad (2.4)$$

Και με λογαρίθμηση προκύπτει ότι για T_{ref}=1sec:

$$L_{Ax} - L_{eq} = 10 \log \frac{T}{T_{ref}} = 10 \log T \quad (2.5)$$

δηλαδή από τη σχέση 2.5, ο λογάριθμος του χρόνου ολοκλήρωσης επί δέκα είναι ίσος με τη διαφορά $L_{AX} - L_{eq}$. Δηλαδή μετρώντας ταυτόχρονα τις ποσότητες L_{eq} , SEL μπορούμε να υπολογίσουμε το χρόνο ολοκλήρωσης που απαιτείται για τον υπολογισμό της ισοδύναμης στάθμης. Στην περίπτωση που έχουμε πολλά γεγονότα θορύβου η στάθμη έκθεσης με την ισοδύναμη στάθμη συνδέονται με τη σχέση:

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T} \sum_{i=1}^N 10^{L_{AXi}/10} \quad (2.6)$$

Όπου N είναι ο συνολικός αριθμός γεγονότων σε χρόνο T.

2.2.4 Στάθμη ηχορύπανσης (NPL)

Δίνεται από τη σχέση: $NPL = L_{eq} + 2.56\sigma$ και μπορεί να περιλάβει τα παροδικά χαρακτηριστικά του ήχου και κυρίως το μέγεθος της διακύμανσης. Η τυπική απόκλιση της στάθμης του θορύβου σ , ως προς τη μέση τιμή L, δίδεται από τη σχέση:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (L(t) - \bar{L})^2 dt} \quad (2.7)$$

Η στάθμη ηχορύπανσης NPL, είναι δύσκολο να υπολογιστεί στην πράξη. Οπότε, με μιας πρώτης τάξης προσέγγιση για το δείκτη ηχορύπανσης έχουμε:

$$NPL = L_{50} + d + \frac{d^2}{60} \quad (2.8)$$

όπου, $d = L_{10} - L_{90}$.

Στη μέτρηση του κυκλοφοριακού θορύβου όταν το ποσοστό των βαρέων οχημάτων είναι μεγάλο, η προσέγγιση αυτή δίδει μεγάλες αποκλίσεις από την πραγματική τιμή.

2.2.5 Στάθμη L_{eq}'

Προτάθηκε από το Muller για να περιλάβει το ρυθμό μεταβολής της στάθμης του θορύβου. Ορίζεται από τη σχέση:

$$L'_{eq} = L_{eq} + f(\sigma') \quad \text{όπου } \sigma' = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{dL}{dt}\right)^2 dt} \quad \text{και } f(\sigma') = 10 \log(1 + 15\sigma') \quad (2.9)$$

2.2.6 Δείκτης κυκλοφοριακού θορύβου (TNI)

Αναφέρεται στη μέτρηση του κυκλοφοριακού θορύβου επί 24ωρου βάσεως

Δίνεται από τον τύπο:

$$TNI = 4(L_{10} - L_{90}) - 30 \quad (2.10)$$

Όπου οι στάθμες L_{10} και L_{90} εκφράζουν το μέγιστο και το θόρυβο βάθους αντίστοιχα.

2.2.7 Τάξη στάθμης ήχου (Rating Sound Level)

Η στάθμη αυτή ορίζεται για να περιλάβει όσο το δυνατόν περισσότερους παράγοντες που επιδρούν στην ενόχληση, και ορίζεται ως εξής:

A) για ήχους σταθερής στάθμης:

$$L_r = L(t) + x \quad (2.11)$$

B) για ήχους κυμαινόμενους:

$$L_r = L_{eq} + x \quad (2.12)$$

όπου x είναι ένας διορθωτικός όρος που έχει διάφορες τιμές ανάλογα με το είδος του θορύβου.

2.2.8 Όρια περιβαλλοντικού θορύβου.

Σύμφωνα με τον οργανισμό EPA (USA) για την 24ωρη ισοδύναμη στάθμη, υιοθετείται το όριο των 70 dB(A). Δηλαδή $L_{Aeq24h} = 70$ dB(A). Έκθεση στο θόρυβο αυτό για χρόνο άνω των 40 ετών συνεπάγεται μείωση της ακουστικής ικανότητας του 96% του πληθυσμού κατά 5 dB στη συχνότητα των 4000 HZ.

2.2.9 Κυκλοφοριακός θόρυβος

Σύμφωνα με την 17252/92 Υπουργική απόφαση που υπεγράφη στις 20-5-1992 ΕΚ 395/Β119-6-92), τα ανώτατα επιτρεπόμενα όρια των δεικτών του κυκλοφοριακού θορύβου που αφορούν τους νέους κυρίως αυτοκινητοδρόμους είναι:

A) Για τον δείκτη L_{eq} (8-20 ωρ) τα 67 dB(A)

B) Για τον δείκτη L_{10} (18 ωρ) τα 70 dB(A)

Οι δείκτες αυτοί μετρούνται σε απόσταση 2 μέτρα από την πρόσοψη των πλησιέστερων προς το οδικό έργο (ή και τις συνοδές του εγκαταστάσεις) κτιρίων της πολεοδομικής ενότητας. Ο χρόνος ολοκλήρωσης για την ισοδύναμη στάθμη είναι 12 ώρες (08.00-20.00). Ο δείκτης L_{10} αντιστοιχεί στη μέση ωριαία αριθμητική τιμή 18 ξεχωριστών ωριαίων τιμών (από 6.00 -24.00). Επιπλέον η παραπάνω διάταξη ορίζει ότι σε περιπτώσεις που απαιτείται ακουστική προστασία (σχολεία, νοσοκομεία κ.λπ.) τα παραπάνω όρια είναι δυνατόν να μειώνονται κατά 5-10 dB(A).

Γενικά όταν η κυκλοφορία είναι πυκνή προσεγγιστικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι η L_{10} είναι 3 dB υψηλότερη από την ισοδύναμη στάθμη και η L_{50} είναι 1 με 2 dB χαμηλότερη. Το όριο που θέτει ο Π.Ο.Υ. είναι 50-55 dB(A).

2.2.10 Ειδική νομοθεσία περιβαλλοντικού θορύβου

Με βάση την οδηγία 2002/49 της ΕΕ, που υλοποιήθηκε με την απόφαση 13586/724 όπως αυτή ενσωματώθηκε στο ΦΕΚ 384 Τ.Β.' του 2006 κατέστη υποχρεωτική η εκπόνηση στρατηγικών χαρτών μέχρι την 30 Ιουνίου 2006. Η παραπάνω απόφαση αφορά τον περιβαλλοντικό θόρυβο εκτός από τις περιπτώσεις θορύβων από στρατιωτικές δραστηριότητες, χώρων εργασίας, αλλά και θορύβων εντός των μεταφορικών μέσων, και από οικιακές δραστηριότητες. Ως

Δείκτες για την αξιολόγηση αυτών των θορύβων χρησιμοποιούνται οι κυρίως οι δείκτες L_{DEN} και L_N ενώ επίσης χρησιμοποιούνται οι δείκτες L_d , L_e και SEL.

Είναι λοιπόν γεγονός ότι υπάρχουν πολλοί και συνεχείς ήχοι στην καθημερινότητά μας, πολλοί εκ των οποίων έχουν υψηλές εντάσεις και αποτελούν θορύβους. Είναι επιτακτική η ανάγκη λοιπόν να αντιμετωπίσουμε το θόρυβο είτε σε εσωτερικούς, είτε σε εξωτερικούς χώρους. Λύσεις υπάρχουν πάρα πολλές για την κάθε εφαρμογή.

Αναλυτικότερα:

- σε κατοικίες μπορούμε να βελτιώσουμε σημαντικά την ηχομόνωση χρησιμοποιώντας βαριές κουρτίνες, διπλά παράθυρα, ακουστικές πόρτες, χαλιά στο δάπεδο, ακουστικές ψευδοροφές και ηχομονωτικά υλικά στους τοίχους (νέων κατασκευών).

- σε εργοτάξια και χώρους εργασίας δύναται να χρησιμοποιηθούν κλειστές καμπίνες που θα εσωκλείουν πηγές έντονου θορύβου, απορροφητικά υλικά σε τοίχους και ταβάνια, ηχοπετάσματα 1. Επισημαίνεται πως το όριο πάνω από το οποίο είναι απαραίτητη η λήψη προστατευτικών μέτρων σε χώρους εργασίας είναι τα 85 dB(A).

- σε εξωτερικούς χώρους (κατοικημένες περιοχές) είναι κατάλληλη η χρήση ηχοπετασμάτων.

Ο βασικός ρόλος των ηχοπετασμάτων και αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας είναι η μείωση του αερόφερτου θορύβου ο οποίος συναντάται σε *εξωτερικούς χώρους*. Η κύρια αιτία για την εξασθένηση του ήχου είναι η **απόσταση**. Επιπλέον, παραθέτουμε τα αίτια που επηρεάζουν την διάδοση του ήχου και των θορύβων σε εξωτερικούς χώρους:

- *Τη μορφολογία του εδάφους*. Σε περιπτώσεις που η πηγή ήχου βρίσκεται κοντά σε ανακλαστικές επιφάνειες (π.χ. τσιμέντο) η στάθμη του ήχου αυξάνεται. Αντίθετα απορροφητικές επιφάνειες (π.χ. πορώδεις επιφάνειες ή επιφάνειες μέτριας σκληρότητας) συντελούν στην εξασθένηση του ήχου.

- *Την φορά και την ένταση του ανέμου*. Όταν φυσά άνεμος λόγω τριβών τα κατώτερα στρώματα έχουν μικρότερη ταχύτητα από τα ανώτερα. Λόγω αυτής της διαφοράς της ταχύτητας παρουσιάζεται το φαινόμενο της διάθλασης, σύμφωνα με το οποίο όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι αντίθετη (διανυσματικά) με αυτήν της ταχύτητας διάδοσης τα ηχητικά κύματα κατευθύνονται προς τα πάνω. Ενώ όταν έχουν την ίδια κατεύθυνση τα ηχητικά κύματα κάμπτονται προς το έδαφος.

- *Την βλάστηση*. Η επίδραση των δένδρων στην εξασθένηση του θορύβου δεν είναι τόσο αποδοτική. Εκτιμάται επιπλέον ηχομείωση της τάξης των 1 έως 3dB (ανάλογα με τον τύπο της βλάστησης) για την συχνότητα των 1000 Hz σε απόσταση 100 μέτρων. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί και το φαινόμενο του masking, σύμφωνα με το οποίο οι ευχάριστοι ήχοι που δημιουργούνται από τις φυλλωσιές των δένδρων ή από τα κελαηδήματα των πουλιών μπορούν να επικαλύψουν ανεπιθύμητους θορύβους.

- *Την παρουσία κτιρίων γύρω από την ηχητική πηγή*. Τα κτίρια εμποδίζουν την ελεύθερη διάδοση του ήχου. Εγκλωβίζουν τους θορύβους και τελικά προκαλούν την αύξησή τους. Τρανό παράδειγμα είναι οι μεγαλουπόλεις οι οποίες υποφέρουν από την ηχορύπανση που προκαλείται με αυτόν τον τρόπο.

2.3 ΗΧΟΠΕΤΑΣΜΑΤΑ

2.3.1 Γενικές πληροφορίες

Ο πίο απλός αλλά αρκετά αποτελεσματικός τρόπος μείωσης του εξωτερικού θορύβου, είναι η παρεμβολή μεταξύ πηγής και δέκτη ενός φράγματος. Τα φράγματα χρησιμοποιούνται για την μείωση του θορύβου τόσο σε ανοικτούς όσο και σε κλειστούς χώρους. Ορίζεται ως φράγμα (ή ηχοπέτασμα ή ηχοφράγμα) μια επιφάνεια κατασκευασμένη από ηχομονωτικό υλικό, το οποίο τοποθετείται μεταξύ πηγής και δέκτη. Στην περιοχή που βρίσκεται η πηγή η στάθμη λόγω της ανάκλασης αυξάνει, παρόλα

αυτά το φράγμα δημιουργεί πίσω του μια περιοχή «σκιάς» που μειώνει το θόρυβο που θα υπήρχε χωρίς την παρουσία του.

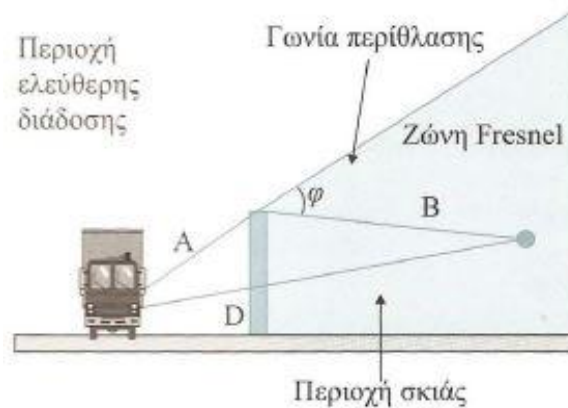
Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των φραγμάτων διότι επιτρέπουν τη διάδοση του ήχου στην περιοχή της γεωμετρικής σκιάς είναι:

- 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 5 dB μεγαλύτερη από την επιθυμητή.

- 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.

- Η διάδοση στερεόφερτου 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 τρέινα. 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. Αυτό ως γεγονός δυσκολεύει την επέκταση του φράγματος μιας και απαιτούνται μεγαλύτερα ύψη φράγματος.

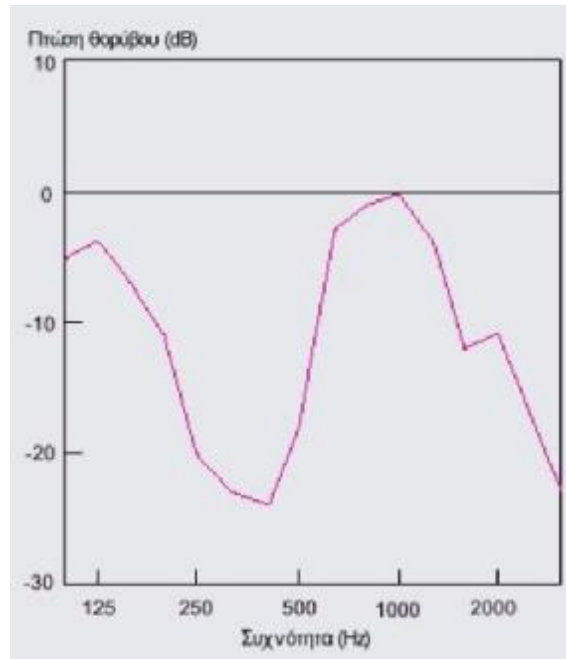
Παρακάτω φαίνεται ένα σχηματικό διάγραμμα ενός Ηχοπετάσματος:



Σχήμα 2.6: Τυπική δομή ηχοπετάσματος (Εφαρμ. Ακουστική [1])

Ο θόρυβος μειώνεται από τα ηχοπετάσματα, ανάλογα με την συχνότητά του. Δηλαδή τα ηχοπετάσματα παρουσιάζουν διαφορετική ηχομονωτική ικανότητα ανάλογα με τη συχνότητα του ηχητικού κύματος που προσπίπτει στην επιφάνειά τους. Σημαντικό ρόλο

παίζει επίσης και το ύψος ενός Ηχοπετάσματος. Βασικό συμπέρασμα είναι πως μία σημαντική απομείωση επιτυγχάνεται όταν το ηχοφράγμα έχει τόσο ύψος, ώστε να αποτρέπει την 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 ηχοφραγμάτων φτάνουν το πολύ τα $8 - 9m$. Παρακάτω φαίνεται ένα διάγραμμα μείωσης του θορύβου με βάση τη συχνότητα του ήχου



Σχήμα 2.6: Διάγραμμα ηχομονωτικής ικανότητας από απλό ανακλαστικό ηχοφράγμα ύψους 2m σε σχέση με τη συχνότητα του ήχου [εκθεση ΕΚΠΑΑ [3]]

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό κατά την κατασκευή των φραγμάτων να τηρούνται οι δύο ακόλουθοι κανόνες σχεδίασης

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

Για τον υπολογισμό της στάθμης του ήχου πίσω από την επιφάνεια του φράγματος, στην περιοχή της σκιάς, χρησιμοποιούνται οι νόμοι της γεωμετρικής οπτικής (θεωρία Fresnel) αφού ληφθεί υπόψη και η ανάκλαση από το έδαφος. Σε πολλές περιπτώσεις τα φράγματα κατασκευάζονται από διπλές παράλληλες επιφάνειες για αύξηση της απόδοσής τους. Σύμφωνα με την θεωρία του Fresnel η ηχομείωση σε dB από ένα φράγμα στην περιοχή της σκιάς δίνεται από την σχέση:

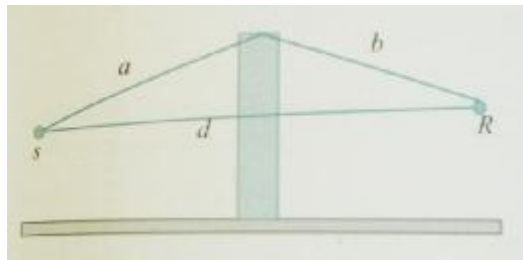
$$A = -20 \log \left| F \left(\frac{\sqrt{\pi N}}{\sqrt{\pi}} \right) \right| \quad (2.13)$$

όπου N ο αριθμός του Fresnel που εξαρτάται από την γεωμετρία της διάταξης γη-δέκτης-φράγμα και $F(x)$ το μιγαδικό ολοκλήρωμα του Fresnel. Τα N και $F(x)$ δίδονται από τις ακόλουθες σχέσεις

$$F(x) = \int_x^i n f e^{i\tau^2} d\tau \quad (2.14)$$

$$N = \frac{2(a+b-d)}{\lambda} \quad (2.15)$$

όπου τα a, b, d παρουσιάζονται στο Σχ. 2.7



Σχήμα 2.7: Γεωμετρία Ηχοπετάσματος (Εφαρμ. Ακουστική [1])

Σύμφωνα με την προσεγγιστική θεωρία του Kirchhoff η ηχομείωση από τα ηχοφράγματα μπορεί να υπολογισθεί από την σχέση.

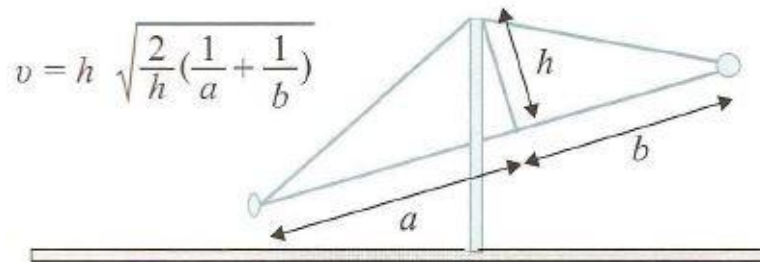
$$A = -10 \log \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{2} - X \right)^2 + \left(\frac{1}{2} - Y \right)^2 \right] \quad (2.16)$$

όπου

$$X = \int_0^{u_1} \cos \frac{\pi}{2} u^2 du \quad (2.17)$$

και

$$Y = \int_0^{u_1} \sin \frac{\pi}{2} u^2 du \quad (2.18)$$



Σχήμα 2.8: Υπολογισμός v (Εφαρμ. Ακουστική [1])

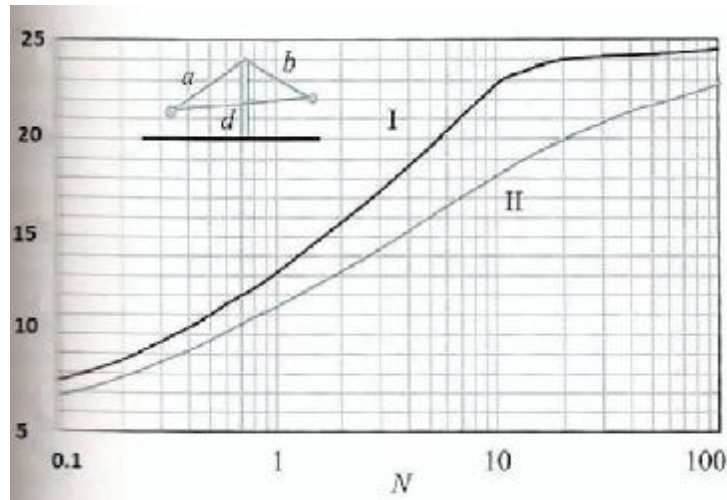
Τα ολοκληρώματα των σχέσεων λύνονται αριθμητικά, και οι τιμές τους δίνονται σε πίνακες.

Κατά τους Defrance και Gabillet [16] η ηχομείωση που προκαλούν τα φράγματα, δίνεται με αρκετά καλή προσέγγιση από τους τύπους:

0	$N < -0.25$
$6 - 12\sqrt{-N}$	$-0.25 < N < 0$
$6 + 12\sqrt{N}$	$0 \leq N \leq 0.25$
$8 + 8\sqrt{N}$	$0.25 \leq N \leq 1$
$16 + 10\log N$	$1 \leq N$

Πίνακας 2: Ηχομείωση ανάλογα με το N

Στις παραπάνω σχέσεις το N είναι αρνητικό όταν η πηγή βρίσκεται σε οπτική επαφή με το δέκτη. Η χρήση των παραπάνω σχέσεων προτείνεται και από το Project HARMONOISE της Ευρωπαϊκής Ένωσης η εφαρμογή της οποίας είναι υποχρεωτική για όλα τα κράτη-μέλη από το 2007. Στην περίπτωση που η πηγή του θορύβου είναι τα αυτοκίνητα, θεωρούμε ότι η πηγή βρίσκεται στο έδαφος διότι για ταχύτητες μεγαλύτερες των 30 km/h ο θόρυβος των ελαστικών είναι η κυρίαρχη πηγή θορύβου. Το διάγραμμα του επόμενου δίδει με ικανοποιητική προσέγγιση την ηχομείωση των φραγμάτων για δύο τύπους πηγών γραμμική και σημειακή. Οι τιμές του διαγράμματος είναι πιο κοντά στα πειραματικά δεδομένα. Η γραμμή I αφορά σημειακή πηγή και η II γραμμική.



Σχήμα 2.9: Ηχομείωση από τα φράγματα συναρτήσεως του αρ. Fresnel. (Εφαρμ. Ακουστική [1])

2.3.2 Είδη Ηχοπετασμάτων

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

- Ηχοπετάσματα ανάκλασης: Τα ηχοπετάσματα αυτά μειώνουν το επίπεδο του θορύβου, ανακλώντας τον ήχο που παράγεται από την πλευρά της οδού.
- Ηχοπετάσματα απορρόφησης: Ο ήχος που φτάνει στο ηχοφραγμα απορροφάται από τα κατάλληλης μορφής υλικά κατασκευής του.
- 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.
- 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.

Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται διάφοροι τύποι ηχοπετασμάτων:



Σχήμα 2.10: Ανακλαστικό ηχοφραγμα σε αεροδρόμιο [images.google.com; noise barrier]



Σχήμα 2.11 Απορροφητικού τύπου ηχοφραγμα σε αεροδρόμιο [images.google.com; noise barrier]



Σχήμα 2.12: Ηχώφραγμα σε αυτοκινητόδρομο στην Rijeka της Κροατίας, όπου έχει στην οροφή του φωτοβολταϊκά στοιχεία [Wikipedia.org]



Σχήμα 2.13: Ανακλαστικό ηχώφραγμα [Wikipedia.org]



Σχήμα 2.14: Το sound tube της Μελβούρνης [images.google.com; noise barrier]



Σχήμα 2.15: Απορροφητικού τύπου ηχοφραγμα αποτελούμενο από φυτά [Wikipedia.org]



Σχήμα 2.16: Ανακλαστικού τύπου ηχοφραγμα [Wikipedia.org]



Σχήμα 2.17: Διαφανές ανακλαστικό ηχοφραγμα [images.google.com; noise barrier]

2.3.3 Τοποθέτηση

Σύμφωνα με τα παραπάνω και με βάση το νόμο του Fresnel, 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 (βλ. Κεφάλαιο 1). Επίσης, ανοίγματα σε ηχοπετάσματα καταστρέφουν την αποτελεσματικότητά τους και θα πρέπει να αποφεύγονται. Εντούτοις, όπου αυτά επιβάλλονται, όπως σε περιπτώσεις διασταυρώσεων, θα πρέπει να διαμορφώνεται εξωτερικό ηχοφραγμα που να καλύπτει την περιοχή του ανοίγματος, με ανάλογη διαμόρφωση της διασταύρωσης. Σε μεγάλους μήκους ηχοπετάσματα θα πρέπει να προβλέπονται και θύρες διαφυγής.

2.3.4 Υλικά κατασκευής

- *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 οι 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 ιδανικά για περιπτώσεις που απαιτείται η διατήρηση του χαρακτήρα του περιβάλλοντος, λόγω της οπτικής τους.

2.4 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΙΔΡΟΥΝ ΣΤΗΝ ΗΧΟΜΕΙΩΣΗ

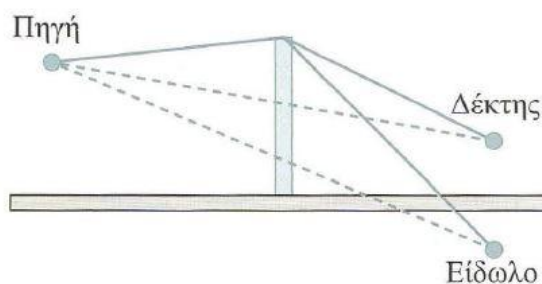
2.4.1 Επίδραση του εδάφους

Όταν το έδαφος στον δέκτη είναι σκληρό και συμπαγές, παρουσιάζει δηλαδή μικρό συντελεστή απορρόφησης η απόδοση του φράγματος μειώνεται. Για να υπολογίσουμε τη μείωση σ' αυτές τις περιπτώσεις κάνουμε την εξής διαδικασία: Υπολογίζουμε τον αριθμό Fresnel για το δέκτη και στη συνέχεια την ηχομείωση για το δέκτη (L_1). Στη συνέχεια υπολογίζουμε τον αριθμό Fresnel για την εικόνα του δέκτη και την ηχομείωση για την εικόνα δέκτη (L_2). Η τελική ηχομείωση δίνεται από την σχέση:

$$L_3 = L_1 - C(\Delta L) \quad (2.19)$$

όπου $C(\Delta L)$ ο διορθωτικός παράγοντας που εξαρτάται από τη διαφορά στάθμης.

Στο σχήμα 2.18, παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα γεωμετρικά η ανάκλαση του εδάφους:

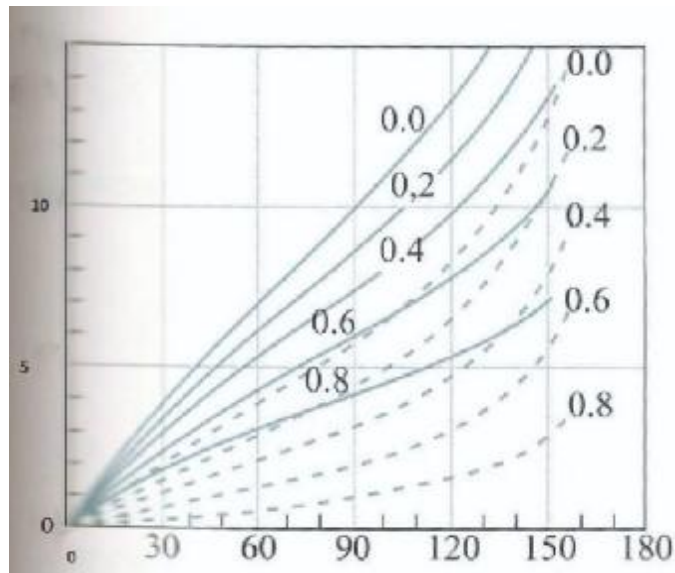


Σχήμα 2.187: Ανάκλαση του ήχου από το έδαφος στη θέση του δέκτη (Εφαρμ. Ακουστική [1])

2.4.2 Επίδραση της απορρόφησης

Όταν η επιφάνεια του φράγματος που είναι στραμμένη προς την πηγή παρουσιάζει απορροφητικές ιδιότητες, τότε η απόδοση του φράγματος αυξάνει. Η αύξηση αυτή

εξαρτάται από τη γωνία περίθλασης καθώς και από τον συντελεστή απορρόφησης της επιφάνειας αυτής και μπορεί να φθάσει τα 8 dB. Η επιπλέον μείωση δίνεται από τη σχέση: $\Delta L = \Delta L + \Delta L_{\alpha}$, όπου ΔL η ηχομείωση από το φράγμα και ΔL_{α} η επιπλέον ηχομείωση που οφείλεται στην απορρόφηση από το φράγμα, δίνεται από το διάγραμμα του σχήματος 2.19.



Σχήμα 2.19: Επίδραση της απορρόφησης (Εφαρμ. Ακουστική [1])

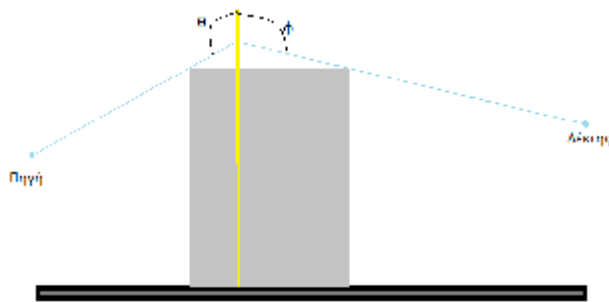
Στο διάγραμμα φ λέγεται η γωνία περίθλασης. Οι συνεχείς γραμμές αναφέρονται σε γραμμικές πηγές, ενώ οι διακεκομμένες σε σημειακές. Παράμετρος στις καμπύλες είναι ο συντελεστής απορρόφησης.

2.4.3 Επίδραση του πάχους του φράγματος

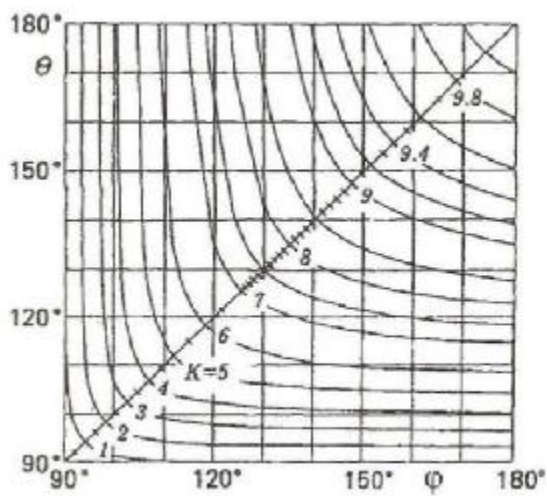
Ένα κτίριο μπροστά από μία πηγή θορύβου δρά ως φράγμα, με τη διαφορά ότι το πάχος του αυξάνει την ηχομείωση. Στην περίπτωση που το φράγμα δεν είναι λεπτό αλλά έχει ένα πάχος w , η αύξηση αυτή δίνεται από την σχέση:

$$\Delta C = k \ln\left(\frac{2\pi b}{\lambda}\right) \quad (2.20)$$

Στο διάγραμμα του επόμενου σχήματος δίνεται ο συντελεστής k ως συνάρτηση των θ και φ .



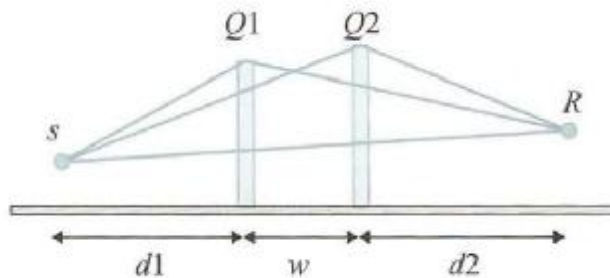
Σχήμα 2.20: Γωνίες θ και ϕ



Σχήμα 2.81: Επίδραση ύψους του φράγματος ως συνάρτηση των γωνιών θ και ϕ (Εφαρμ. Ακουστική [1])

2.5 ΔΙΠΛΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ

Στο σχήμα 2.22 παρουσιάζεται ένα διπλό ηχοφράγμα.



Σχήμα 2.92: Ζεύγος ηχοπετασμάτων (Εφαρμ. Ακουστική [1])

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:

$$A = A_1 + A_2 - 6 + \left[20 \log \left(\frac{2}{1 - \frac{a}{\pi}} \right) - 12 \right] \left(\frac{q}{p} \right)^{2p} \quad (2.21)$$

όπου A_1 και A_2 η ηχομείωση από κάθε φράγμα ξεχωριστά και

$$\alpha = \arctg \sqrt{\left(\frac{w(d_1 + w + d_2)}{d_1 + d_2} \right)} \quad (2.22)$$

$$\text{με } p = \max (\sqrt{2N_1}, \sqrt{2N_2}) \quad (2.23)$$

$$\text{και } q = \min (\sqrt{2N_1}, \sqrt{2N_2}) \quad (2.24)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΝΟΡΙΑΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΧΟΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΣΥΝΟΡΙΑΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (Μ.Σ.Σ.)

Η Μέθοδος Συνοριακών Στοιχείων (ΜΣΣ, Boundary Elements Method, BEM.) είναι μια αριθμητική υπολογιστική μέθοδος για την επίλυση γραμμικών μερικών διαφορικών εξισώσεων. Βρίσκει εφαρμογή σε πολλά επιστημονικά προβλήματα και σε εφαρμογές των μηχανικών, όπως η μηχανική ρευστών, η ακουστική, ο ηλεκτρομαγνητισμός και η μηχανική των θραύσεων. Η ακριβής λύση της μερικής διαφορικής εξίσωσης του προβλήματος είναι μία ολοκληρωτική εξίσωση, η οποία και επιλύεται αριθμητικά με τη ΜΣΣ. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της Μεθόδου έναντι άλλων, όπως των πεπερασμένων στοιχείων, είναι πως είναι ακριβέστερη από αυτές και ο υποβιβασμός της γεωμετρικής τάξης του προβλήματος κατά ένα, δηλαδή στα προβλήματα τριών διαστάσεων διακριτοποιούνται επιφάνειες και στα δύο διαστάσεων γραμμές. Το πλεονέκτημα αυτό οδηγεί σε σημαντική μείωση των υπολογιστικών δεδομένων σε προβλήματα όπου έχουμε μικρή αναλογία επιφάνειας/όγκου. Σημαντική παράμετρος της μεθόδου είναι ότι καταλήγει σε πλήρεις πίνακες πράγμα που σημαίνει ότι οι απαιτήσεις για αποθηκευτικό χώρο και για υπολογιστικό χρόνο μεγαλώνουν σύμφωνα με το τετράγωνο του μεγέθους του προβλήματος.

Βασική απαίτηση για την εφαρμογή της ΜΣΣ είναι να μπορεί να υπολογιστεί η συνάρτηση του Green, ώστε να παραχθεί η ολοκληρωτική μορφή του διαφορικού τελεστή του προβλήματος.

3.2 ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ISOBEM

Το Integrated Software in BEM (ISoBEM) είναι ένα εξελιγμένο λογισμικό, φιλικό προς το χρήστη για την επίλυση μεγάλου εύρους τεχνολογικών προβλημάτων όπως τα ακόλουθα:

- Ακουστική (διάδοση του ήχου, ακτινοβολία και σκέδαση)
- Ηλεκτρομαγνητισμός (διάδοση και σκέδαση ηλεκτρικών και μαγνητικών κυμάτων)
- Θερμικά Προβλήματα
- Ελαστοδυναμική (διάδοση και σκέδαση κύματος)

Καθώς και άλλες εφαρμογές της Επιστήμης και της Μηχανικής.

Το λογισμικό κάνει ανάλυση σε 2D, Axisymmetric και 3D κάτω από στατικές, αρμονικές και στο πεδίο του χρόνου συνθήκες.

Έχει ένα πολύ εξελιγμένο γραφικό περιβάλλον εργασίας (GUI) το οποίο βοηθάει στην αλληλεπίδραση με το χρήστη και είναι ικανό τόσο για τη δημιουργία του μοντέλου όσο και στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Ο χρήστης/προγραμματιστής μπορεί να εκμεταλλευτεί τις δυνατότητες της γλώσσας Python στη δημιουργία παραμετρικών μοντέλων, μέσω ενός ενσωματωμένου Python shell και μία βιβλιοθήκη ειδικά τροποποιημένων εντολών της Python οι οποίες υποστηρίζονται από το ISoBEM.

3.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΟΡΥΒΟΥ ΣΕ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΔΡΟΜΟ ΜΕ ΗΧΟΠΕΤΑΣΜΑΤΑ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΥΠΩΝ

3.3.1 Περιγραφή προβλήματος

Σκοπός της μελέτης αυτής είναι η μελέτη της απόδοσης διαφόρων τύπων ηχοφραγμάτων σε διάφορες συχνότητες του ήχου που χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό του θορύβου σε κατοικημένες περιοχές κοντά σε αυτοκινητόδρομο. Το πρόβλημα επιλύεται με χρήση του λογισμικού ISOBEM.

Πιο συγκεκριμένα οι συχνότητες στις που δοκιμάστηκαν είναι 50, 55, 60, 65, 75, 90, 100, 120, 130, 160, 180, 200, 230, 250, 300, 350 και 400Hz. Επιθυμητό αποτέλεσμα είναι ο προσδιορισμός της αποτελεσματικότητας των ηχοπετασμάτων ανάλογα με τη γεωμετρική τους διαμόρφωση. Τα μελετώμενα ηχοπετάσματα είναι 4 διαφορετικών διαμορφώσεων:

- i. Άγκιστρα
- ii. Κάθετα στο έδαφος (90μοίρες)
- iii. Κεκλιμένα προς το εσωτερικό του οδοστρώματος (11 μοίρες)
- iv. Κεκλιμένα προς τις κατοικίες (11 μοίρες)

3.3.2 Περιγραφή Πειραματικού Μοντέλου

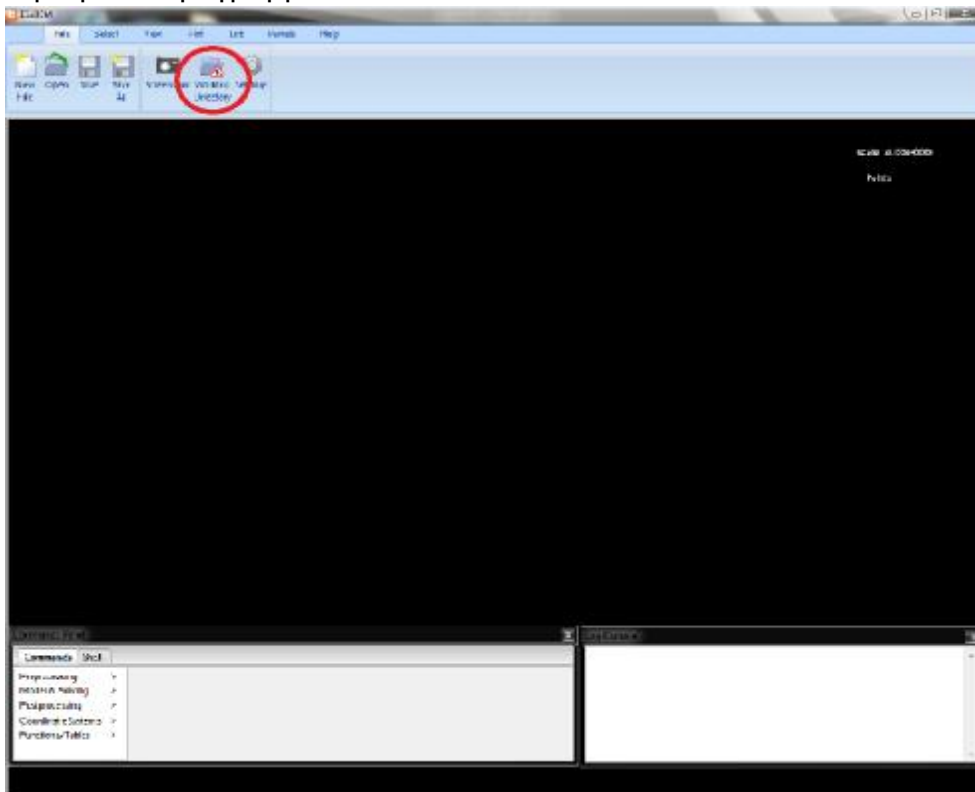
Το μοντέλο έχει ως εξής :

Η πηγή του θορύβου έχει τοποθετηθεί σε ύψος ενός μέτρου από το έδαφος και απόστασης ενός μέτρου από τη διαχωριστική νησίδα. Το αρχικό σημείο των ηχοπετασμάτων έχει οριστεί στα 12m από την νησίδα ενώ το πάχος τους είναι 0.5m και το ύψος τους 5.5m. οι κατοικίες είναι τοποθετημένες στα 30 m από την νησίδα και στα 17.5m από το τέλος των ηχοπετασμάτων ενώ το ύψος τους είναι 15 m.

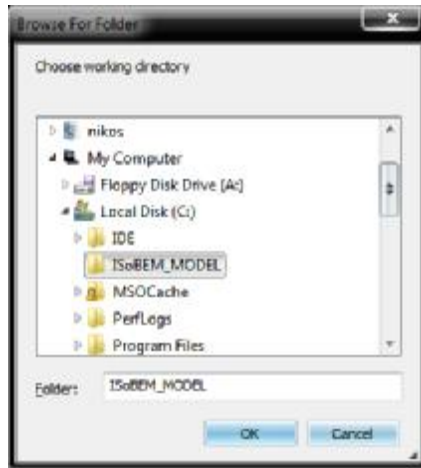
3.3.3 Κατασκευή του προσομιώματος

Βήματα :

1. Γράφουμε τον κώδικα σε γλώσσα προγραμματισμού PYTHON και τον αποθηκεύουμε σε αρχείο με την κατάληξη .py (ολόκληρος ο κώδικας εμφανίζεται στο παράρτημα)
2. Ανοίγουμε το πρόγραμμα ISoBEM

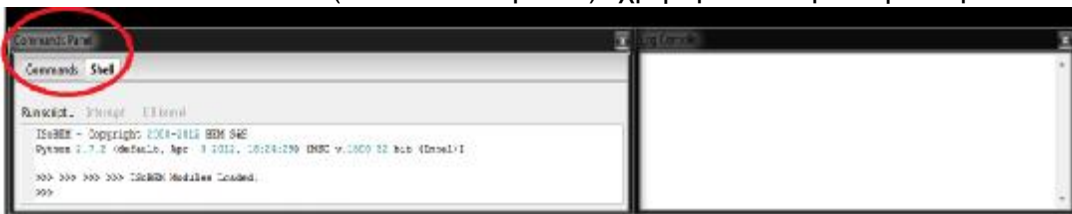


Στο αρχικό παράθυρο που ανοίγει κατά την εκτέλεση του προγράμματος χρησιμοποιούμε το εικονίδιο working directory, βρίσκουμε τον φάκελο στον οποίο είναι αποθηκευμένο το αρχείο .py και το επιλέγουμε



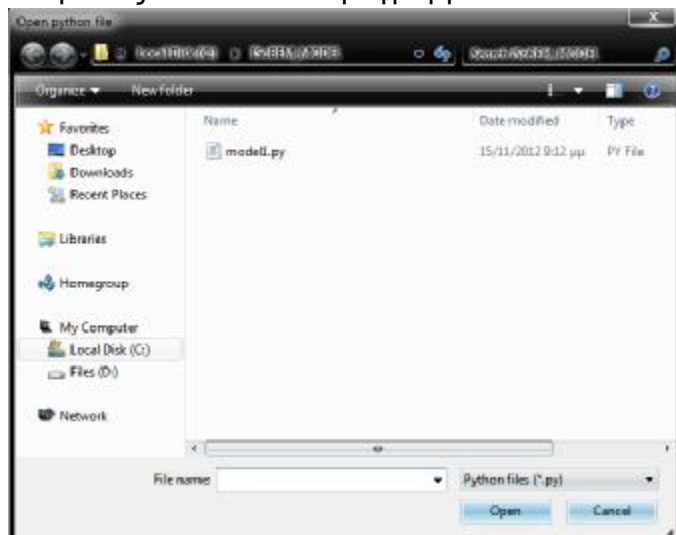
Σε αυτόν το φάκελο θα αποθηκευτούν και τα εξαγόμενα αποτελέσματα.

3. Στον πίνακα εντολών (commands panel) χρησιμοποιούμε την καρτέλα Shell



και επιλεγουμε την εντολή Run script με την οποία εμφανίζεται παράθυρο με το περιεχόμενο του φακέλου που επιλέξαμε στο παραπάνω βήμα.

Αφού επιλέξουμε το αρχείο στο οποίο εμπεριέχεται ο κώδικας και πατήσουμε το κουμπί open, αυτομάτως εκτελείτε το πρόγραμμα.

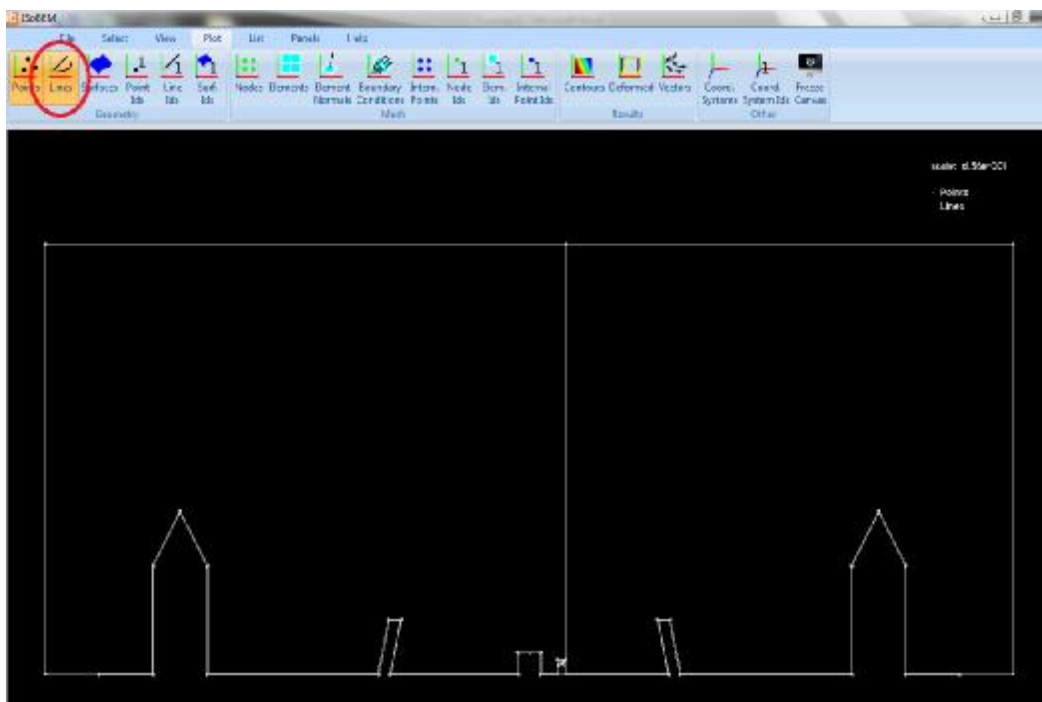


Το αρχικό αποτέλεσμα που παίρνουμε είναι η αποτύπωση των σημείων που έχουμε ορίσει στο κώδικα

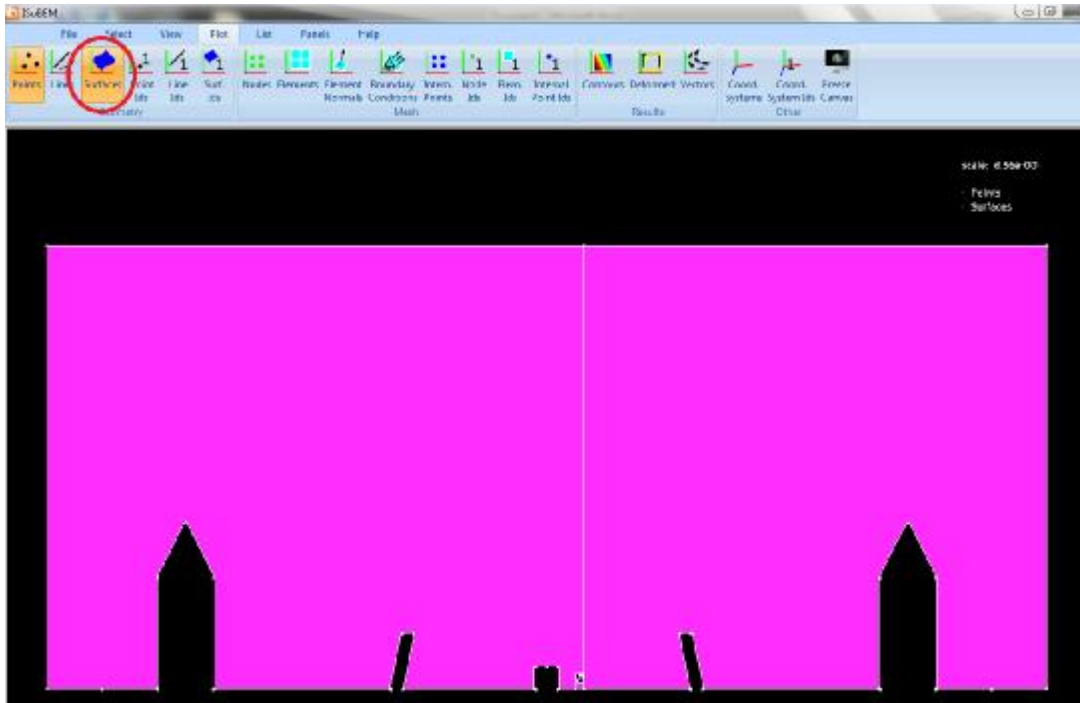
4. Κάνουμε μια σειρά από ελέγχους για να επαληθεύσουμε την ορθότητα του κώδικα χρησιμοποιώντας την καρτέλα plot:



Αρχικά πατώντας την επιλογή lines βλέπουμε το αποτύπωμα των γραμμών που έχουμε προγραμματίσει στο κεντρικό παράθυρο του προγράμματος ISoBEM.



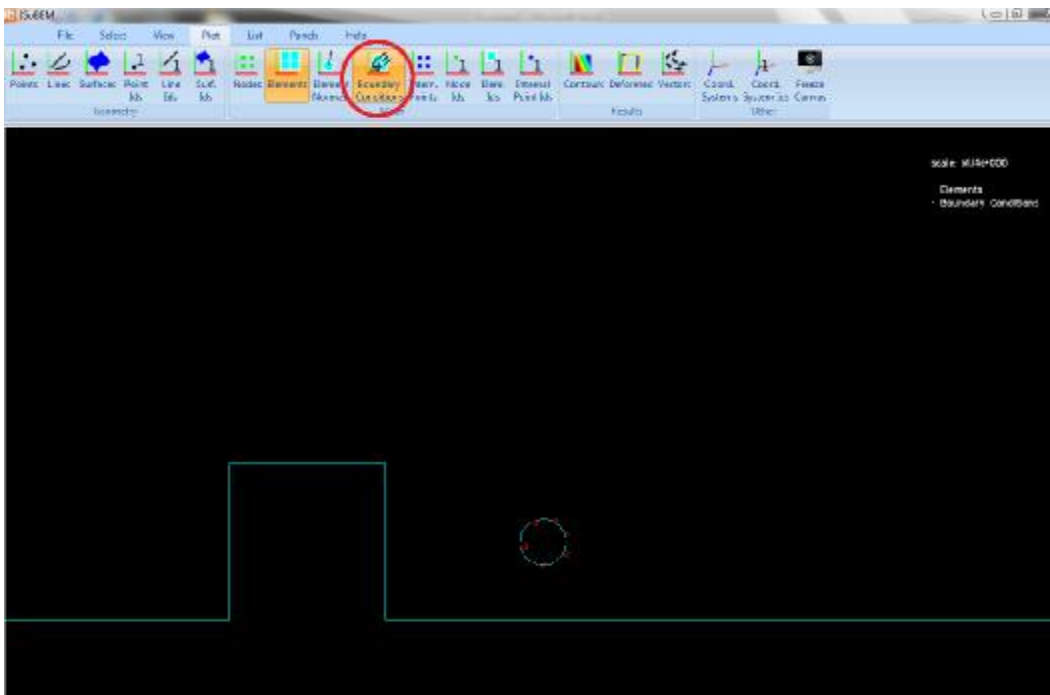
- i. Ελέγχουμε τον ορισμό των επιφανειών με το κουμπί surfaces.



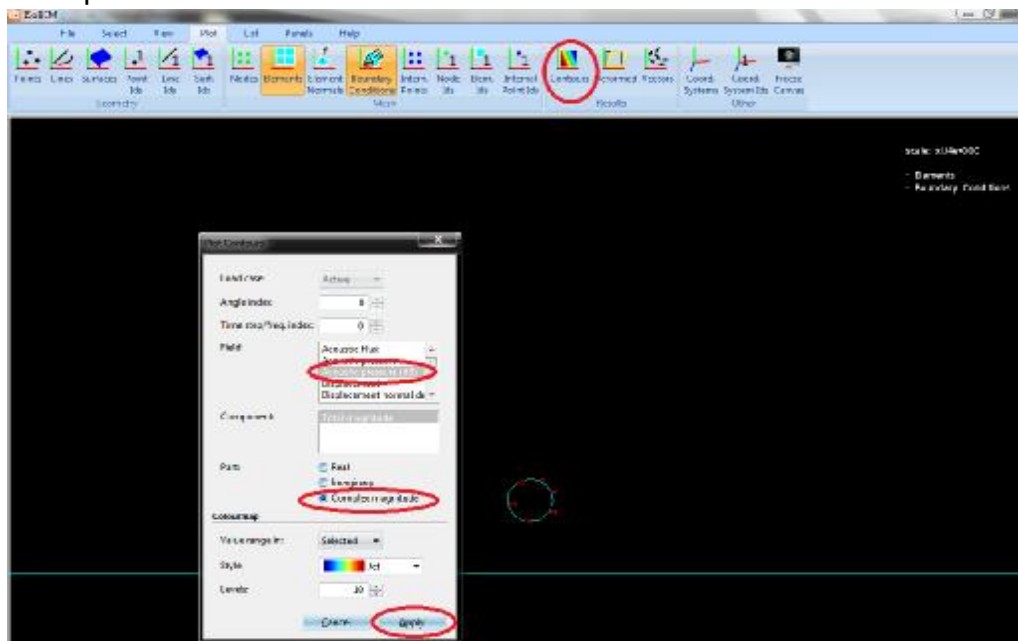
- ii. Ελέγχουμε την φορά που έχουν τα μοναδιαία κάθετα, με την επιλογή element normals



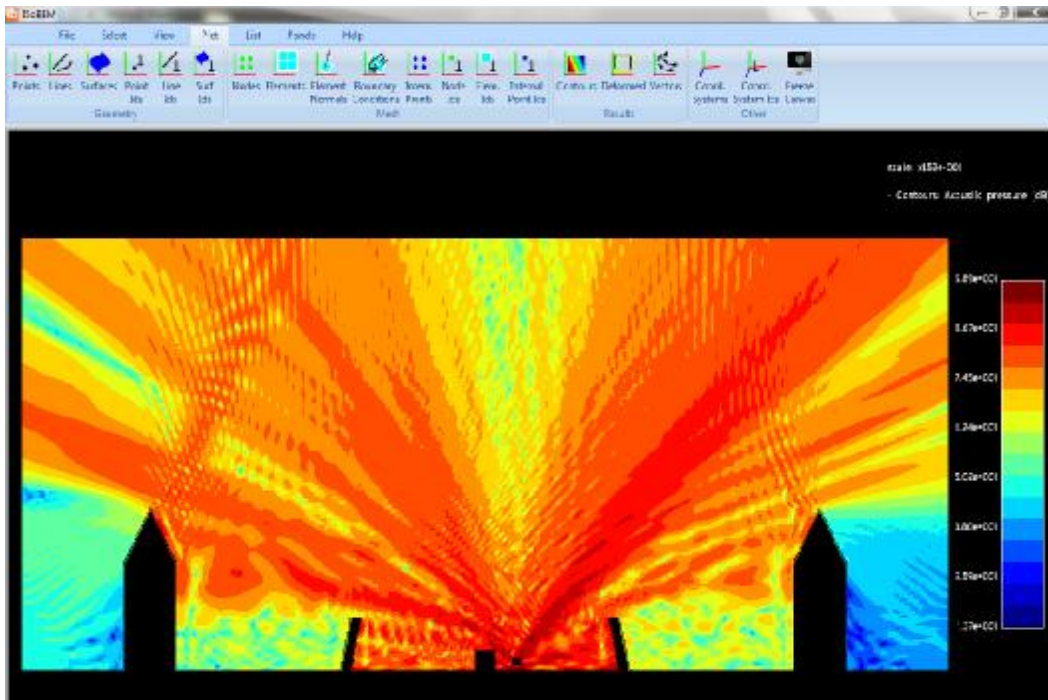
iii. Ελέγχουμε τις συνοριακές συνθήκες με την επιλογή boundary conditions



iv. Τέλος χρησιμοποιώντας την επιλογή contours, επιλέγουμε στο αναδυόμενο παράθυρο το πεδίο “acoustic pressure (db)” και το κομμάτι (part) “complex magnitude” και πατάμε apply (εφαρμογή)
 Αυτομάτως εμφανίζονται τα αποτελέσματα που έχουν υπολογιστεί από το ISoBEM, υπό την προϋπόθεση πως η σειρά από ελέγχους που κάναμε ήταν σωστοί.



Τα στοιχεία αποτυπώνουν τις διαβαθμίσεις της ακουστικής πίεσης από την πηγή του ήχου απεικονίζοντας την υψηλότερη ένταση του ήχου με έντονο κόκκινο και προς την εξασθένηση του στην μικρότερη βαθμίδα με σκούρο μπλε.



Οι εντολές του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή ενός από τα μοντέλα παρατίθενται στο Παράρτημα.

3.3.4 Αποτελέσματα-Γραφήματα

Για να υπάρχει σημείο αναφοράς για κάθε μια από τις προαναφερθείσες συχνότητες επιλύθηκε το πρόβλημα της διάδοσης του θορύβου χωρίς χρήση ηχοφράγματος. Τα μοντέλα αυτά αναφοράς, σχεδιάστηκαν έτσι ώστε να έχουν ως ανώτατο επίπεδο έντασης θορύβου τα **110dB** που είναι το μέγιστο που μπορεί να παραχθεί από τα οχήματα σε έναν αυτοκινητόδρομο.

Στα σχήματα 3.1 έως 3.90, παρουσιάζονται για κάθε περίπτωση συχνότητας και ηχοπετάσματος, οι αντίστοιχες κατανομές της ακουστικής πίεσης εκφρασμένες σε dB όπως προέκυψαν από την προσομοίωση με χρήση του λογισμικού ISOBEM.

Η πρώτη εικόνα κάθε συχνότητας αφορά τα αποτελέσματα του μοντέλου αναφοράς χωρίς τη χρήση ηχοπετασμάτων, ενώ οι υπόλοιπες εικόνες αφορούν τα αποτελέσματα για κάθε διαφορετικό τύπο ηχοπετασμάτων (άγκιστρα, κάθετα στο έδαφος, κεκλιμένα προς τις κατοικίες και κεκλιμένα προς το οδόστρωμα).

Στον πίνακα 3.1 παρατίθενται οι συντελεστές απόδοσης κάθε τύπου ηχοπετάσματος ανά συχνότητα. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν προέκυψαν από τη μέση τιμή έντασης θορύβου σε 3 διαφορετικά σημεία της επιφάνειας των κατοικιών (κάτω γωνία στα 0m, μέση στα 5m και άνω γωνία πριν την οροφή στα 10m) και παρατίθενται στον πίνακα 3.2.

συχνότητες[Hz]	τύπου άγκιστρα	κάθετα	κεκλιμένα προς τις κατοικίες	κεκλιμένα προς το οδόστρωμα
50	26	26	26	14
55	23	15	25	26
60	20	11	17	19
65	13	5	13	9
75	18	1	14	19
80	19	14	15	15
90	22	13	10	10
100	13	5	12	37
120	8	4	9	12
130	30	30	17	18
150	24	14	28	29
180	33	28	33	28
200	31	38	30	34
230	16	30	32	30
250	28	28	30	43
300	5	5	12	2
350	9	12	17	12
400	26	16	24	25

πίνακας 3.1 : Συντελεστές απόδοσης % ανά τύπο ηχοφράγματος και συχνότητων

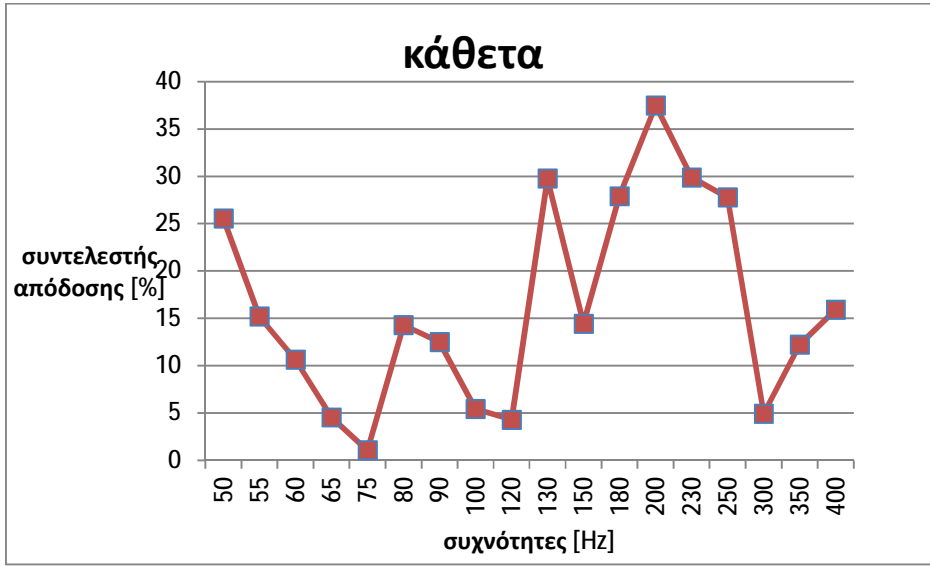
συχνότητες[Hz]	χωρίς ηχοπετάσματα	τύπου άγκιστρα	κάθετα	κεκλιμένα προς τις κατοικίες	κεκλιμένα προς το οδόστρωμα
50	90	67	67	67	77
55	92	71	78	69	68
60	94	75	84	78	76
65	88	77	84	77	80
75	93	76	92	80	75
80	98	79	84	83	83
90	88	69	77	79	79
100	92	80	87	81	58
120	93	86	89	85	82
130	94	66	66	78	77
150	90	68	77	65	64
180	86	58	72	58	62
200	88	61	55	52	58
230	87	73	61	59	61
250	90	65	65	63	51
300	81	77	77	71	79
350	90	82	79	75	79
400	88	65	74	67	66

πίνακας 3.1 : Μέση τιμή έντασης θορύβου στην επιφάνεια των κατοικιών

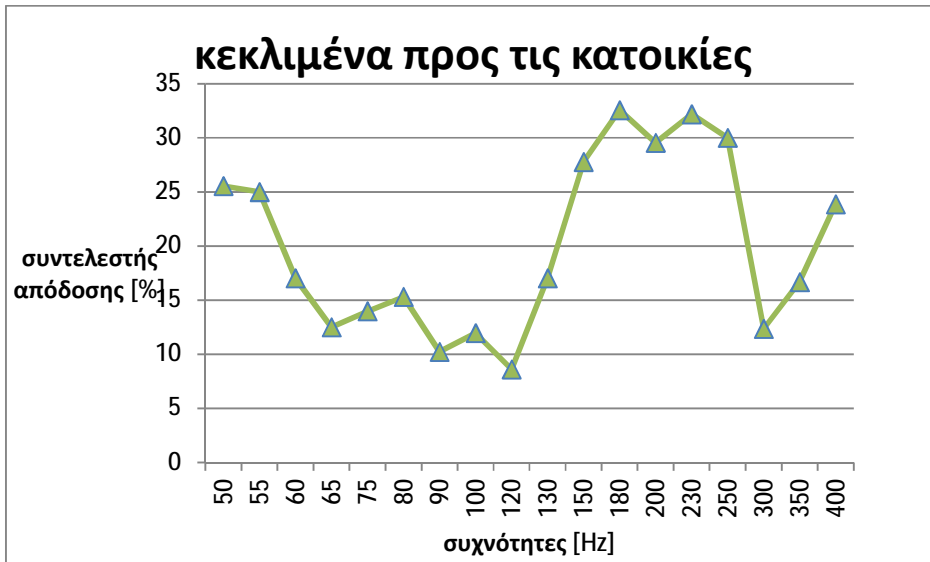
Στα παρακάτω γραφήματα 3.1, 3.2, 3.3 και 3.4 αποδίδεται οπτικά η συνάρτηση του συντελεστή απόδοσης κ της συχνότητας για κάθε τύπο ηχοπετάσματος καθώς και μία συγκριτική παρουσίαση για τους τέσσερις τύπους ηχοπετασμάτων στο γράφημα 3.5.



Γράφημα 3.1 : Συντελεστής απόδοσης για ηχοπετάσματα τύπου άγκιστρα



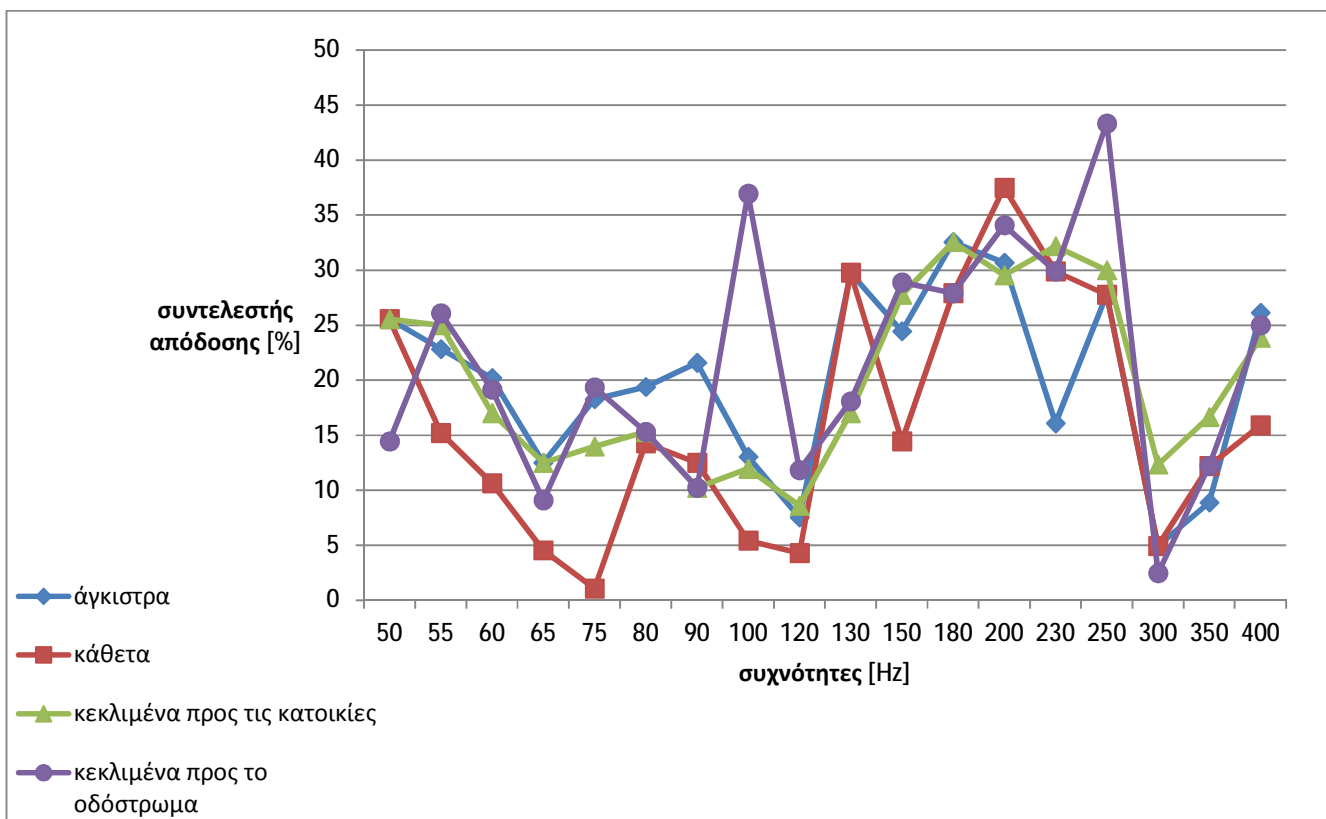
Γράφημα 3.2 : Συντελεστής απόδοσης για κάθετα ηχοπετάσματα



Γράφημα 3.3 : Συντελεστής απόδοσης για ηχοπετάσματα κεκλιμένα προς τις κατοικίες

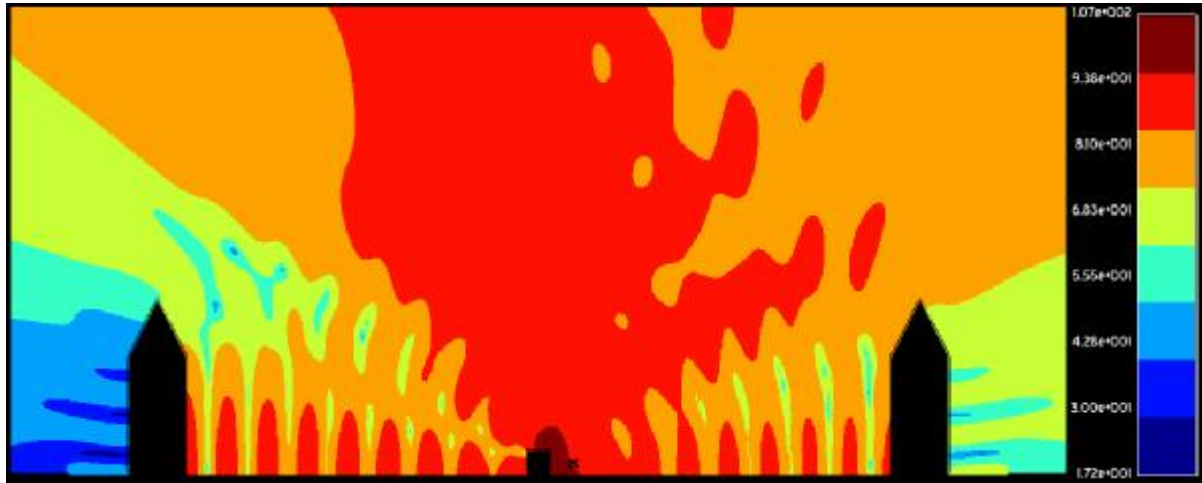


Γράφημα 3.4 : Συντελεστής απόδοσης ηχοπετασμάτων κεκλιμένων προς το οδόστρωμα

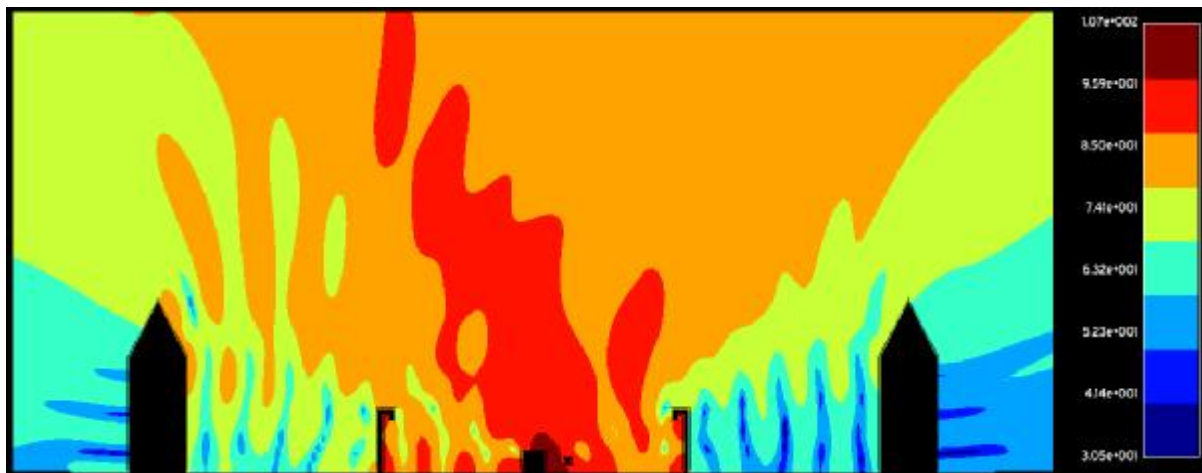


Γράφημα 3.5 : Συγκριτική παρουσίαση συντελεστών απόδοσης για όλους τους τύπους ηχοπετασμάτων

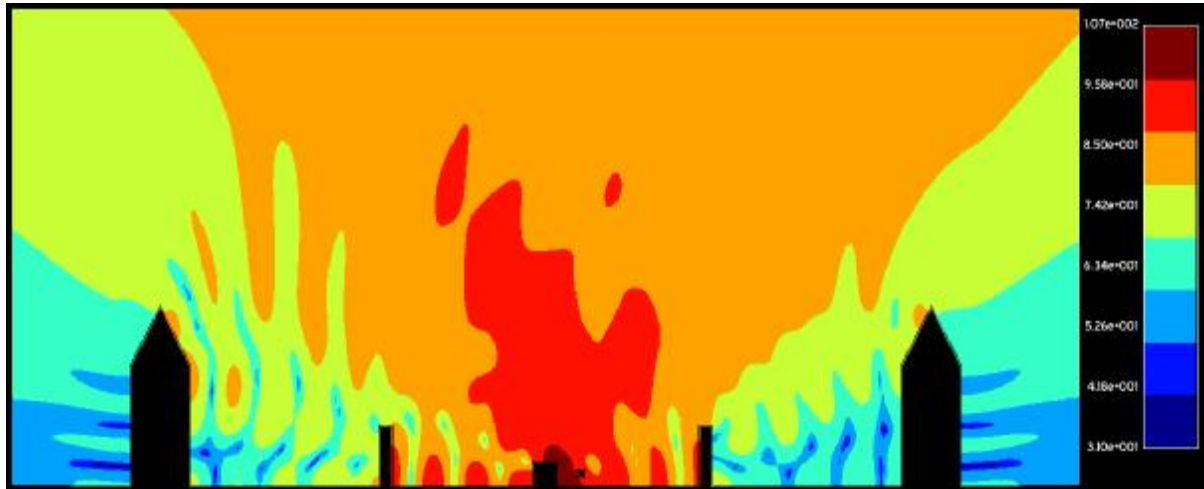
A. Συχνότητα 50 Hz



Σχήμα 3.1: Συχνότητα 50Hz: χωρίς ηχοπετάσματα



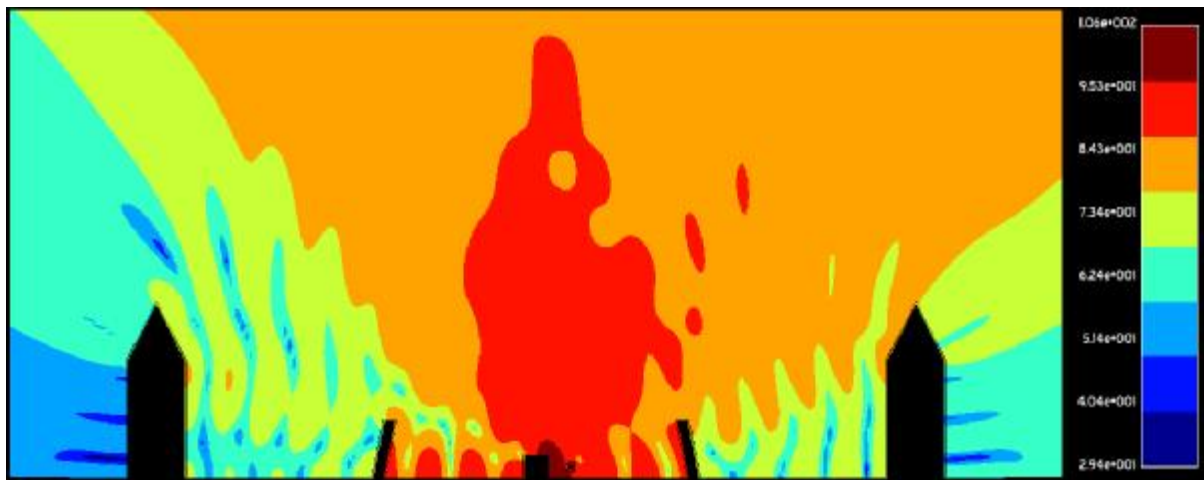
Σχήμα 3.2: Συχνότητα 50Hz: ηχοπετάσματα τύπου άγκιστρο, μείωση θορύβου κατά 26%



Σχήμα 3.3: Συχνότητα 50Hz: ηχοπετάσματα κάθετα στο έδαφος, μείωση θορύβου κατά 26%

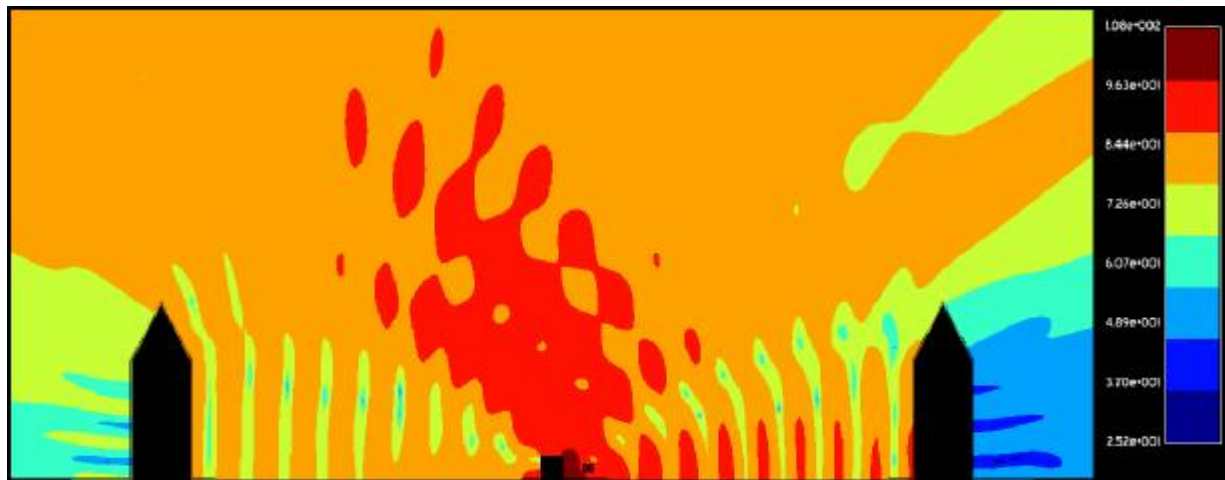


Σχήμα 3.4: Συχνότητα 50Hz: ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς τις κατοικίες, μείωση θορύβου κατά 26%

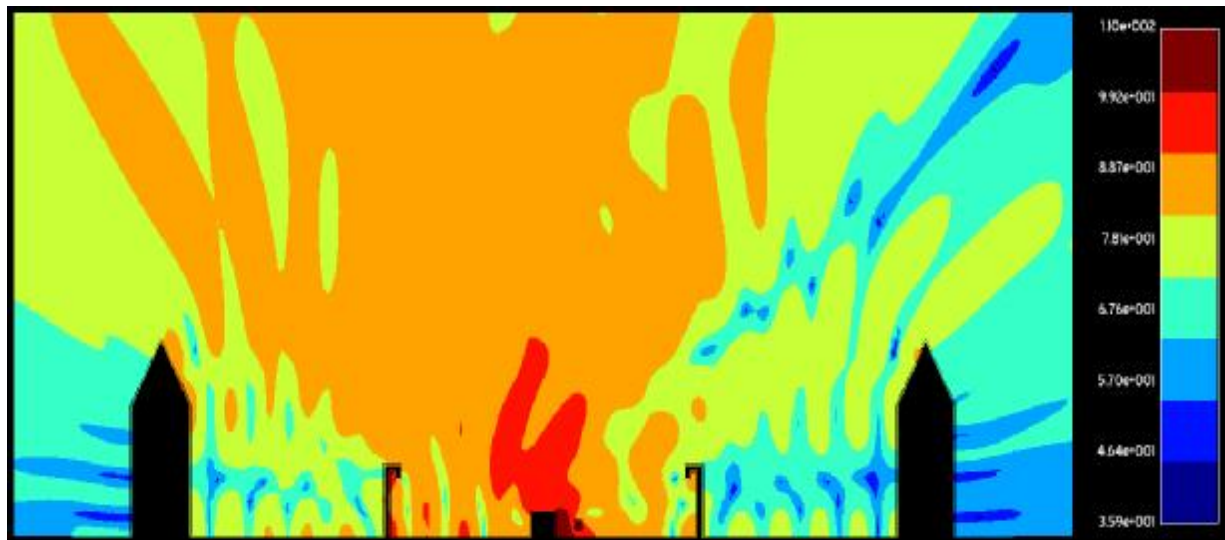


Σχήμα 3.5: Συχνότητα 50Hz: ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς το οδόστρωμα, μείωση θορύβου κατά 14%

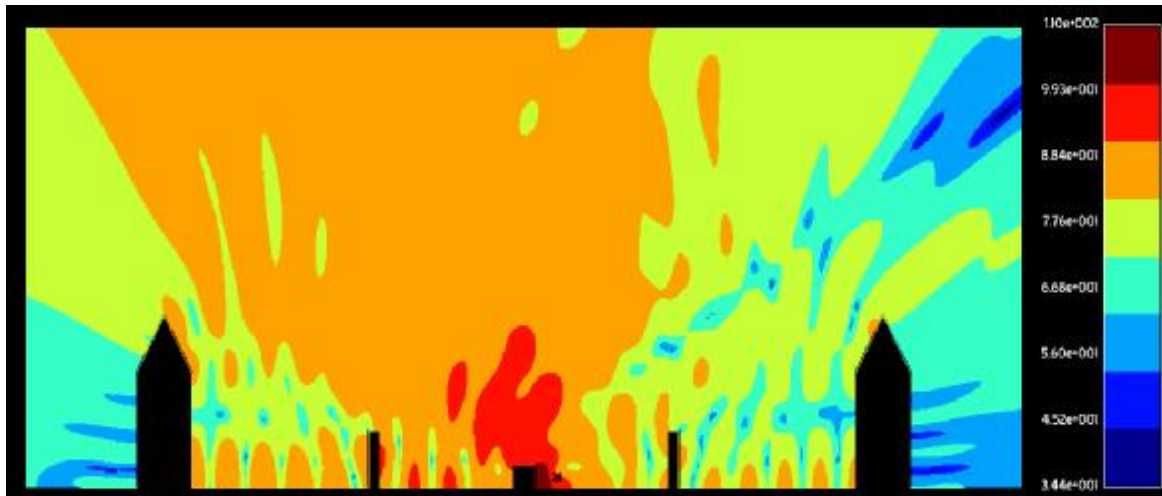
Β. Συχνότητα 55 Hz



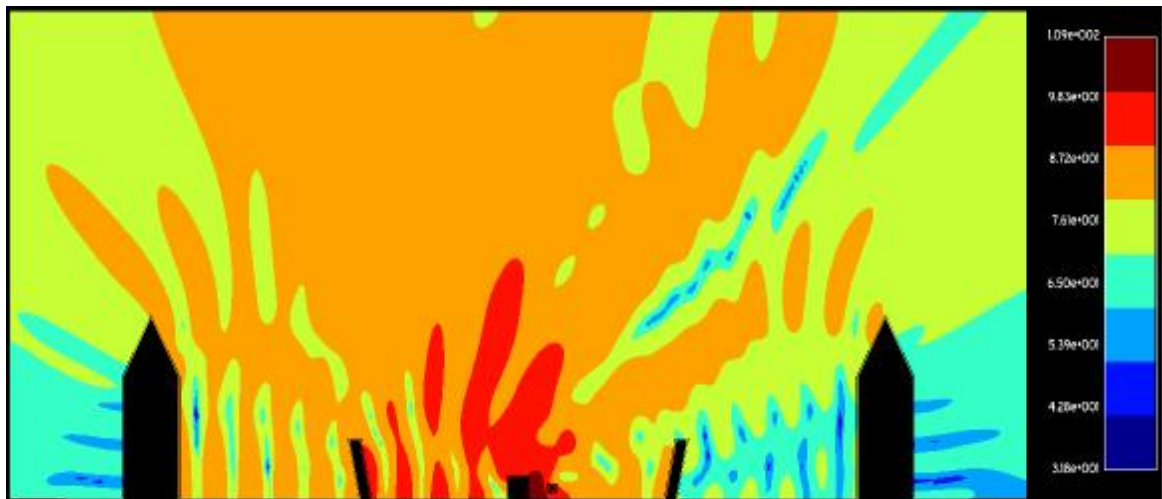
Σχήμα 3.6: Συχνότητα 55 Hz: χωρίς ηχοπετάσματα



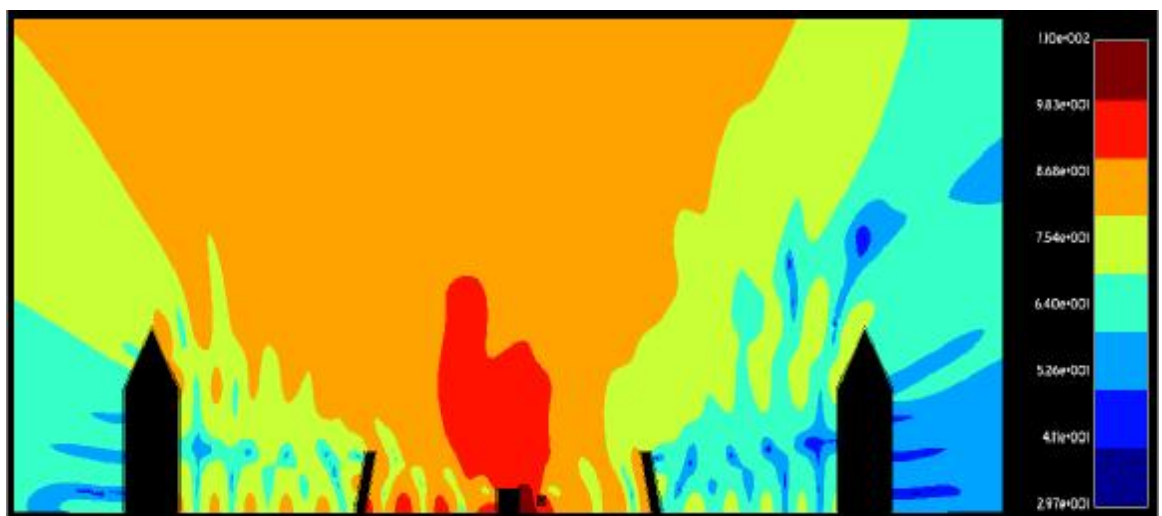
Σχήμα 3.7: Συχνότητα 55 Hz: ηχοπετάσματα τύπου άγκιστρο, μείωση θορύβου κατά 23%



Σχήμα 3.8: Συχνότητα 55 Hz: ηχοπετάσματα κάθετα στο έδαφος, μείωση θορύβου κατά 15%

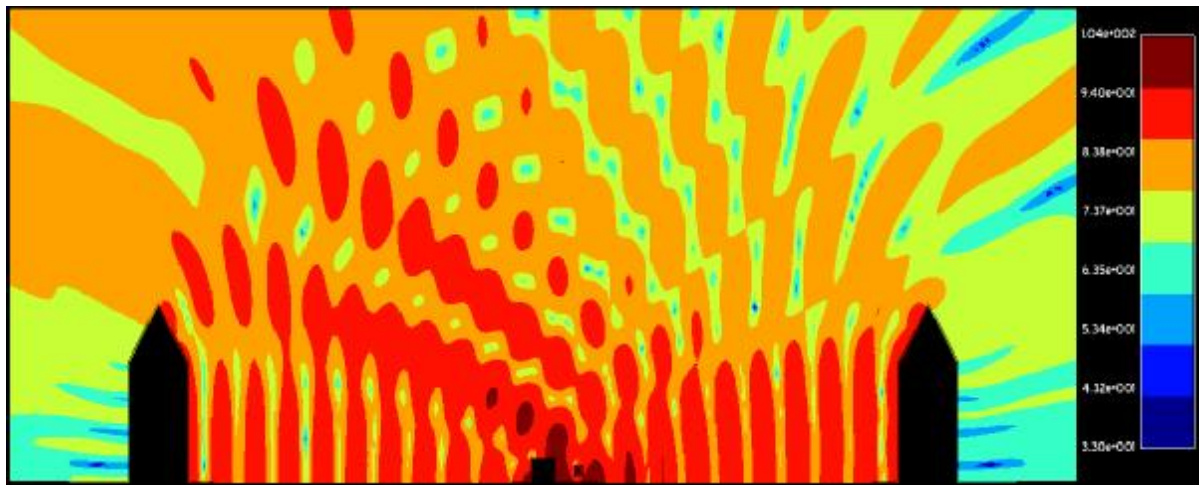


Σχήμα 3.9: Συχνότητα 55 Hz: ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς τις κατοικίες, μείωση θορύβου κατά 25%

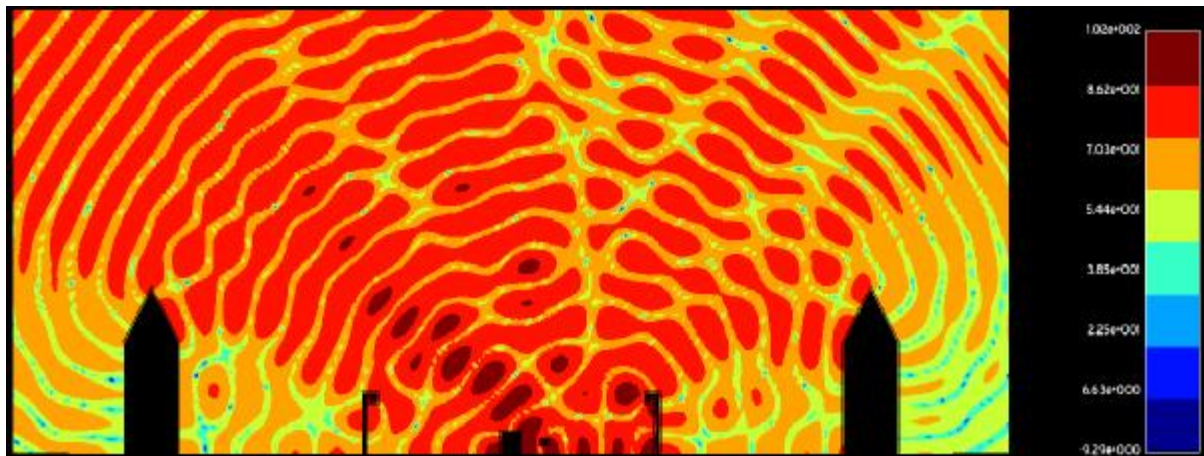


Σχήμα 3.10: Συχνότητα 55 Hz: ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς το οδόστρωμα, μείωση θορύβου κατά 26%

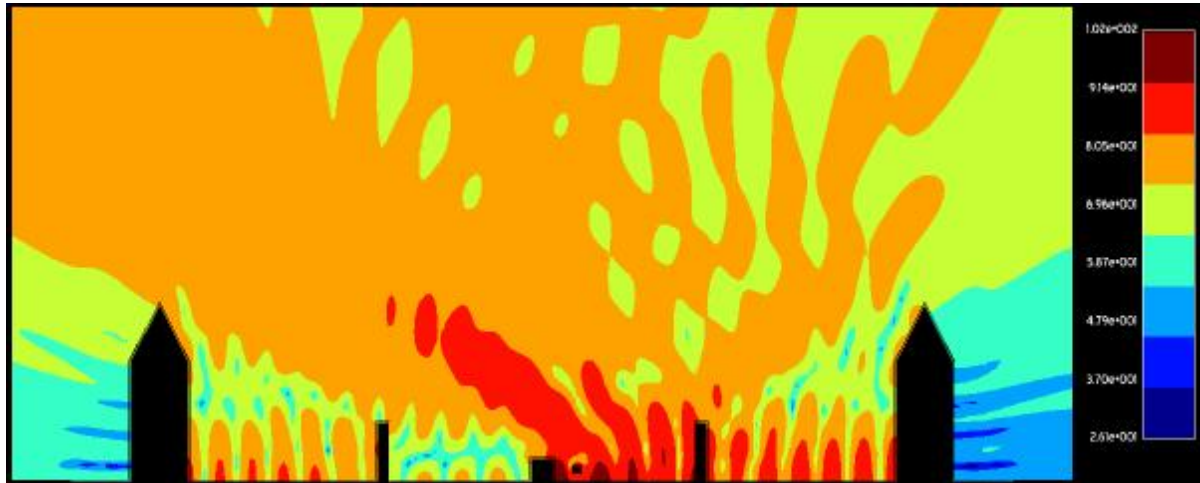
Γ. Συχνότητα 60 Hz



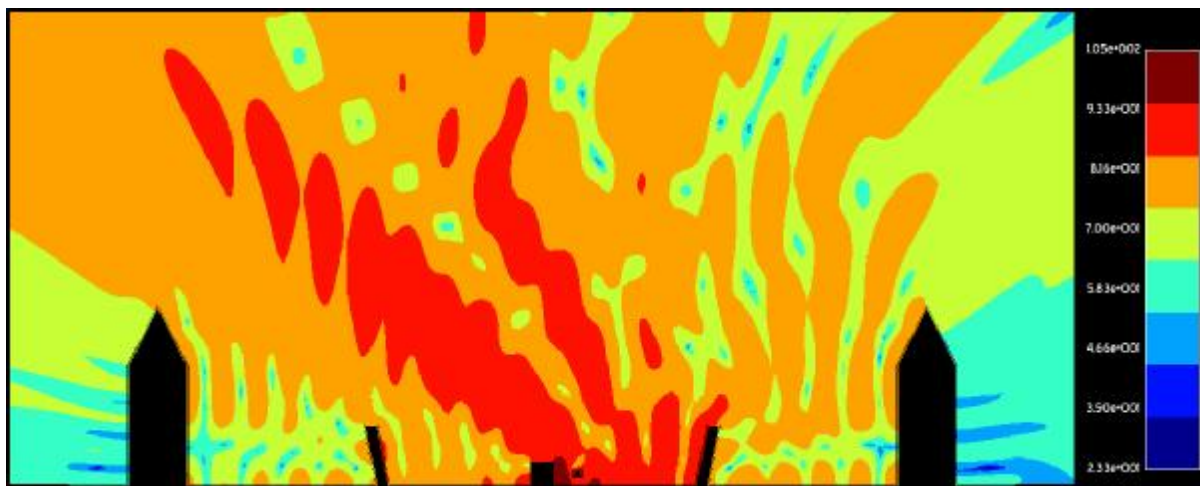
Σχήμα 3.11: Συχνότητα 60 Hz: χωρίς ηχοπετάσματα



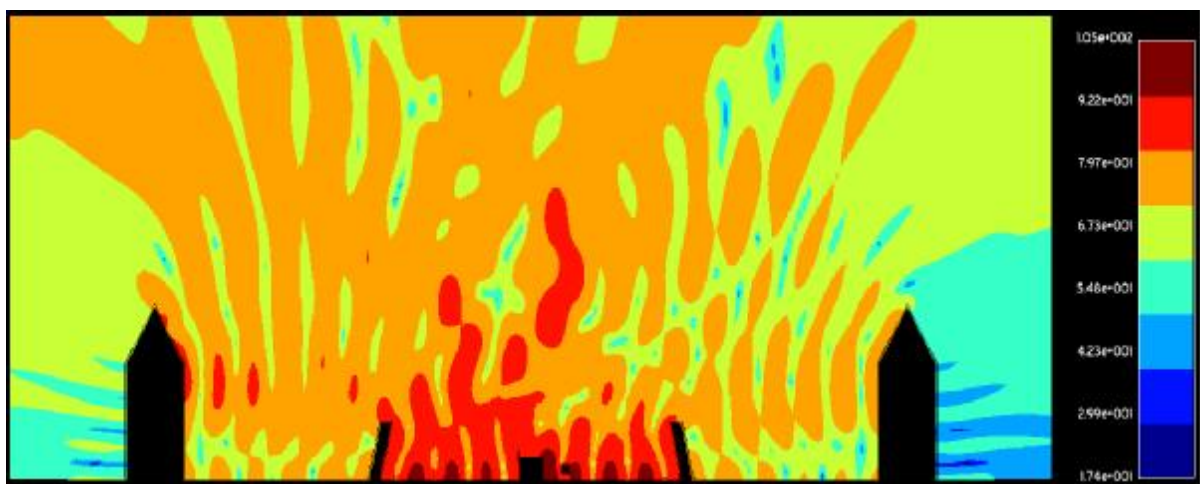
Σχήμα 3.12: Συχνότητα 60 Hz: ηχοπετάσματα τύπου άγκιστρο, μείωση θορύβου κατά 20%



Σχήμα 3.13: Συχνότητα 60 Hz: ηχοπετάσματα κάθετα στο έδαφος, μείωση θορύβου κατά 11%

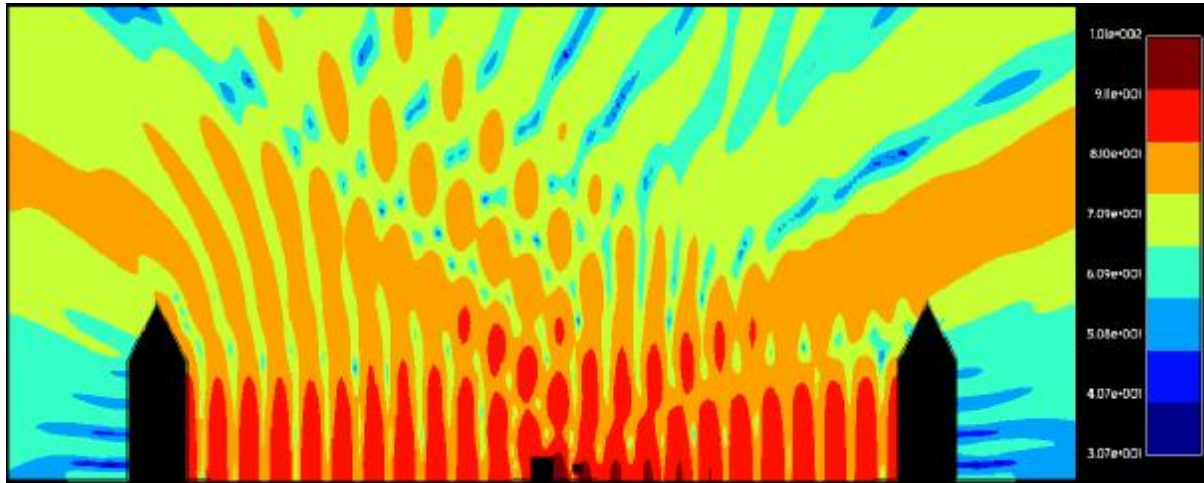


Σχήμα 3.14: Συχνότητα 60 Hz: ηχοπετάσματα κειλιμένα 11° προς τις κατοικίες , μείωση θορύβου κατά 17%

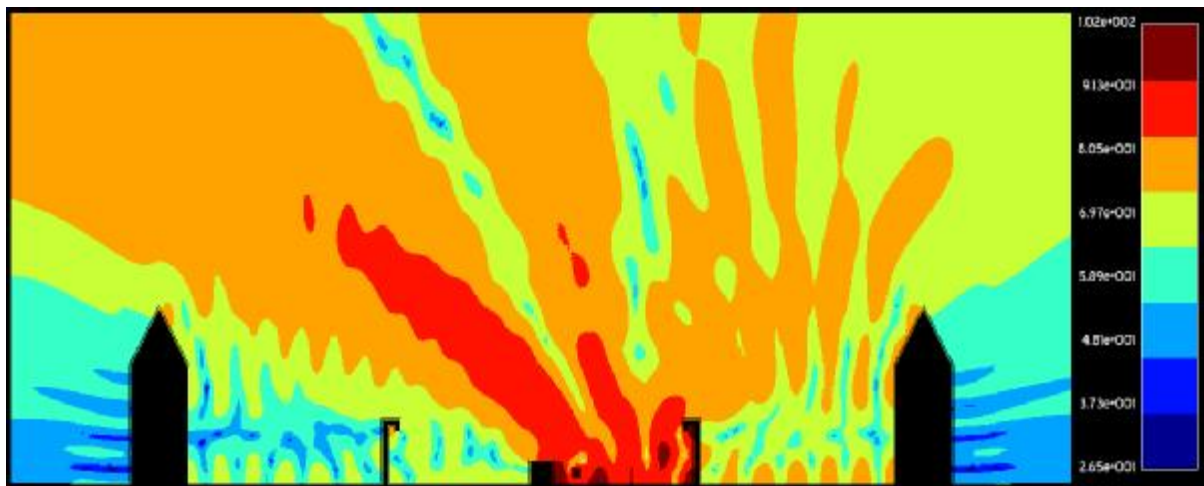


Σχήμα 3.15: Συχνότητα 60 Hz: ηχοπετάσματα κειλιμένα 11° προς το οδόστρωμα, μείωση θορύβου κατά 19%

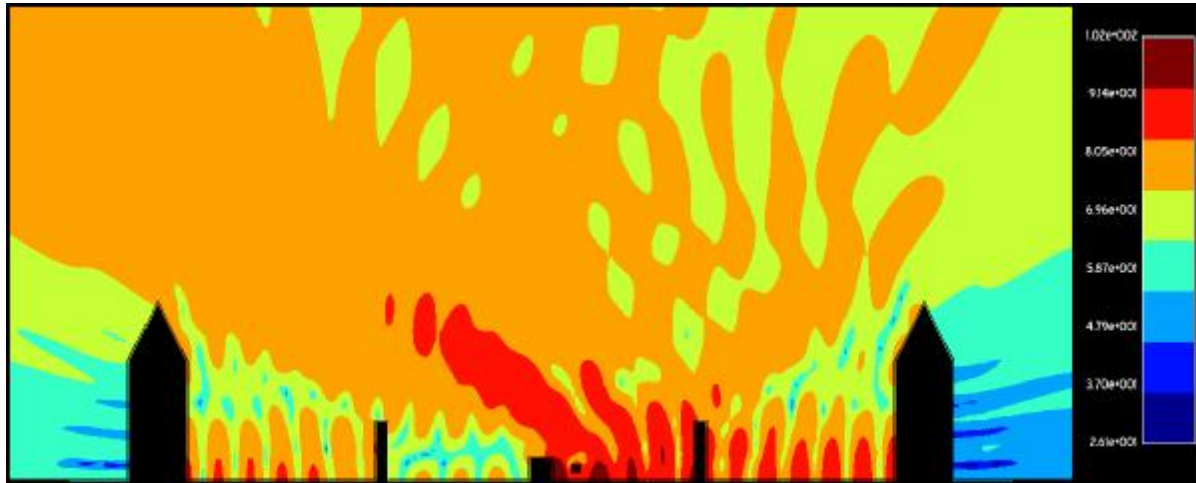
Δ. Συχνότητα 65 Hz



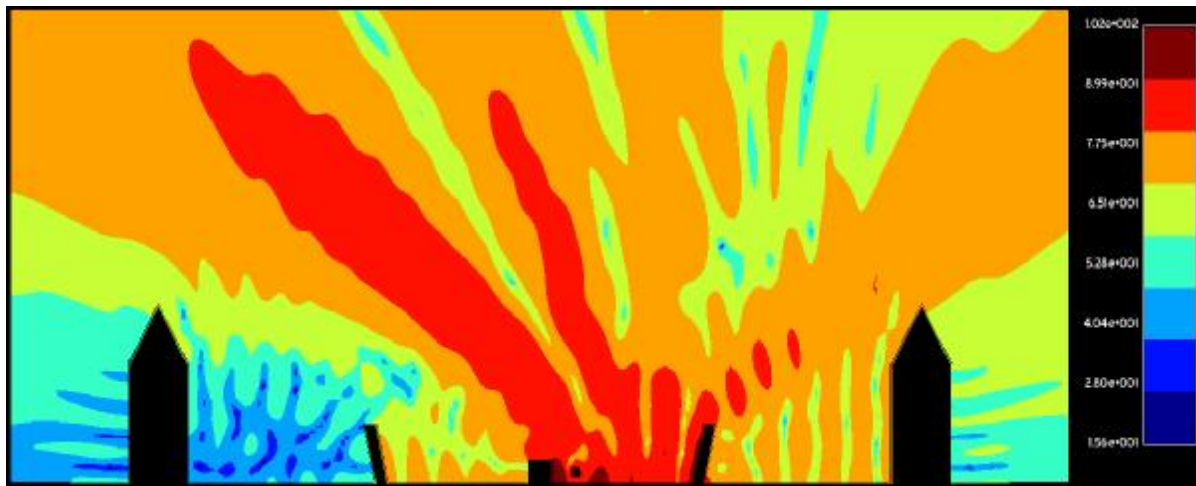
Σχήμα 3.16: Συχνότητα 65 Hz : χωρίς ηχοπετάσματα



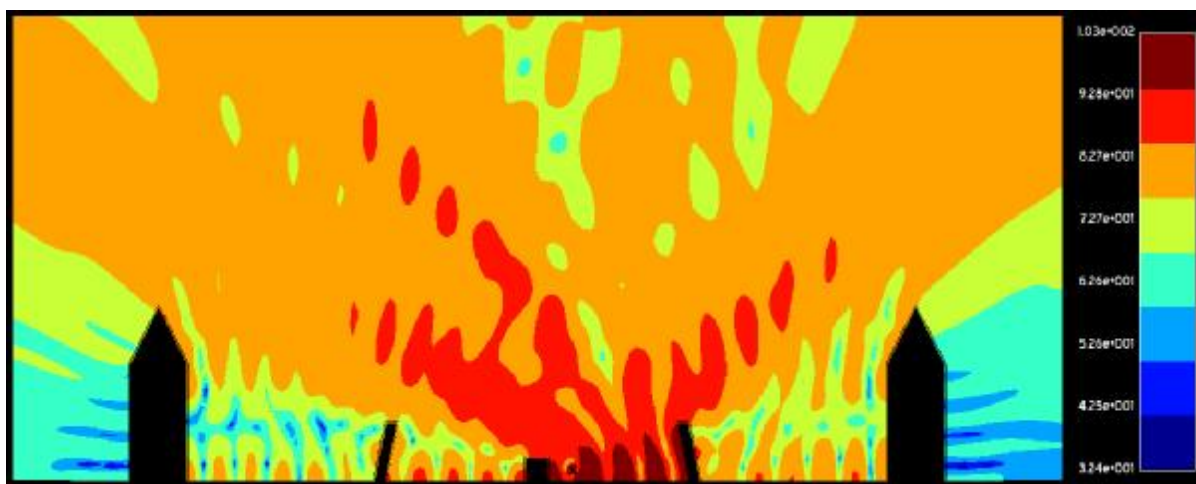
Σχήμα 3.17: Συχνότητα 65 Hz: ηχοπετάσματα τύπου άγκιστρο, μείωση θορύβου κατά 13%



Σχήμα 3.18: Συχνότητα 65 Hz: ηχοπετάσματα κάθετα στο έδαφος, μείωση θορύβου κατά 5%

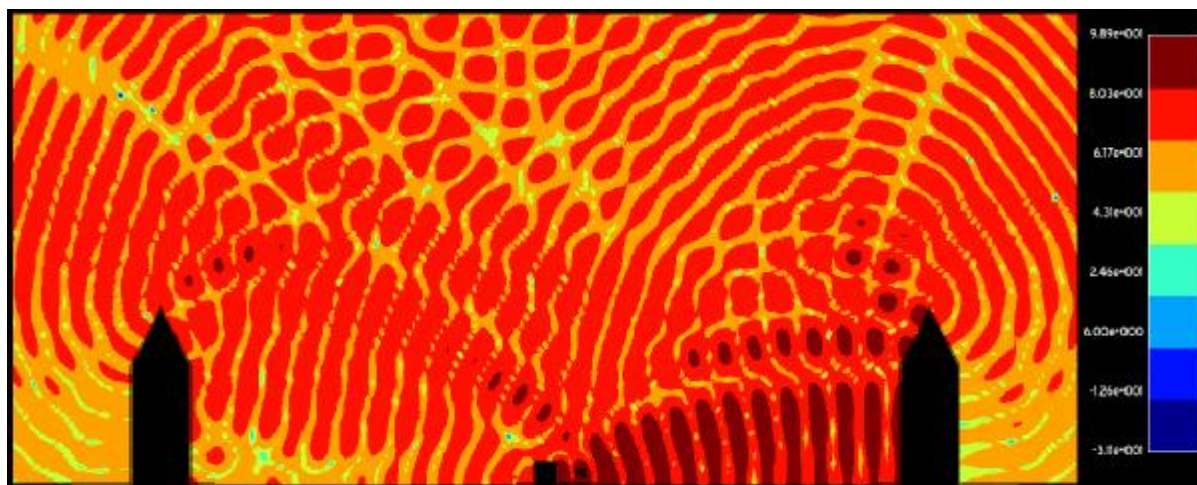


Σχήμα 3.19: Συχνότητα 65 Hz : ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς τις κατοικίες , μείωση θορύβου κατά 13%

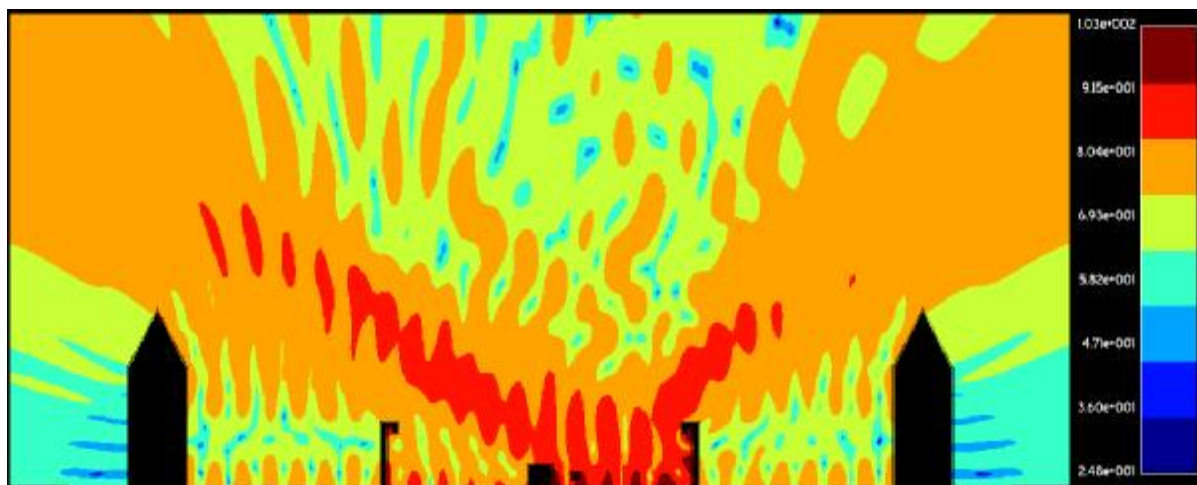


Σχήμα 3.20: Συχνότητα 65 Hz : ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς το οδόστρωμα, μείωση θορύβου κατά 9%

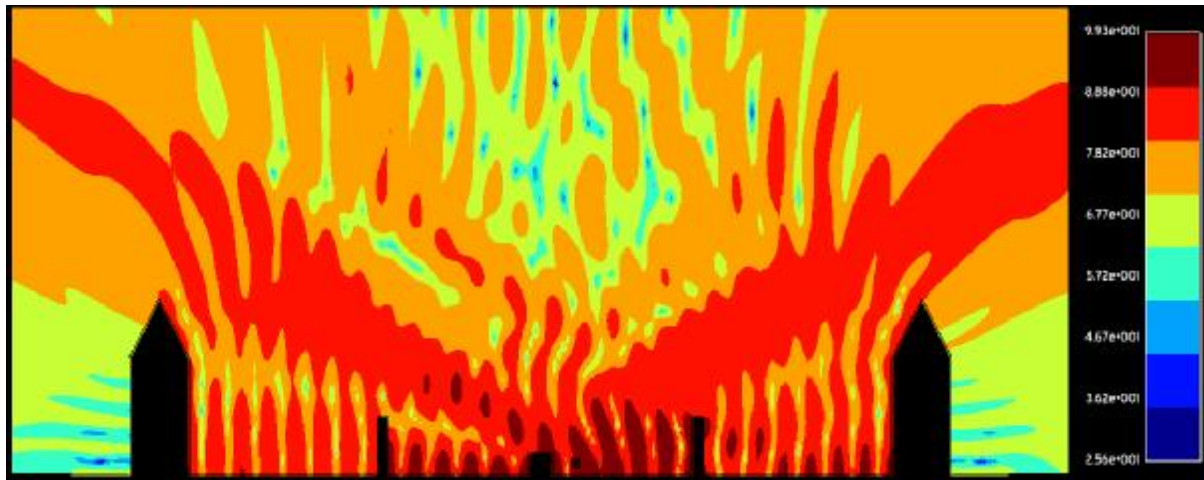
Ε. Συχνότητα 75 Hz



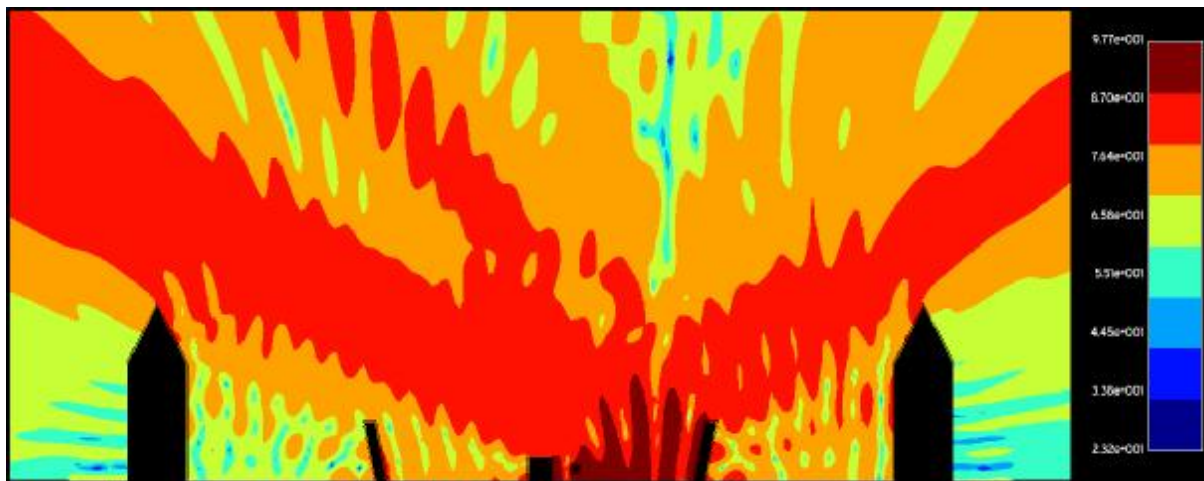
Σχήμα 3.21: Συχνότητα 75 Hz : χωρίς ηχοπετάσματα



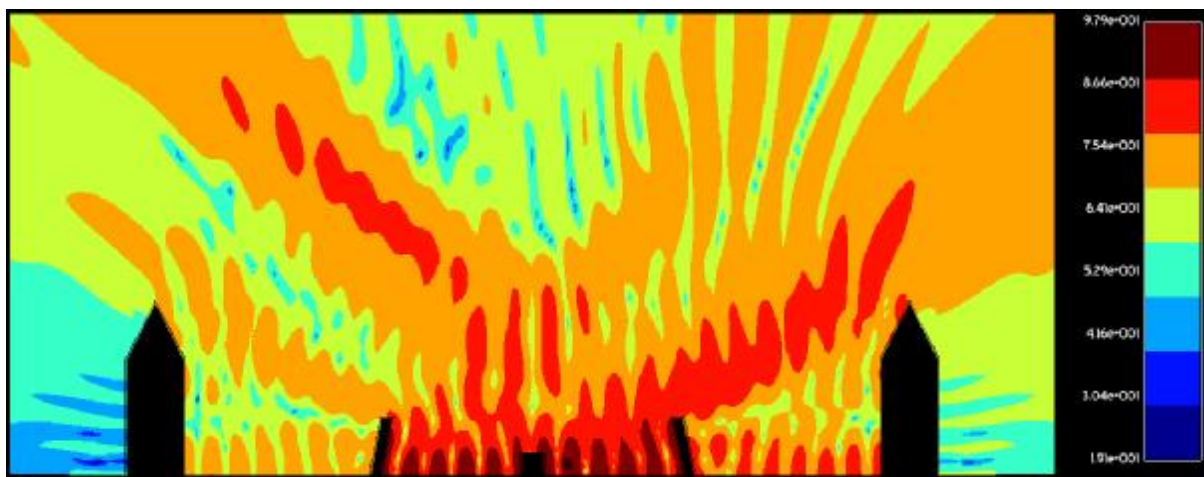
Σχήμα 3.22: Συχνότητα 75 Hz: ηχοπετάσματα τύπου άγκιστρο, μείωση θορύβου κατά 18%



Σχήμα 3.23: Συχνότητα 75 Hz: ηχοπετάσματα κάθετα στο έδαφος, μείωση θορύβου κατά 1%

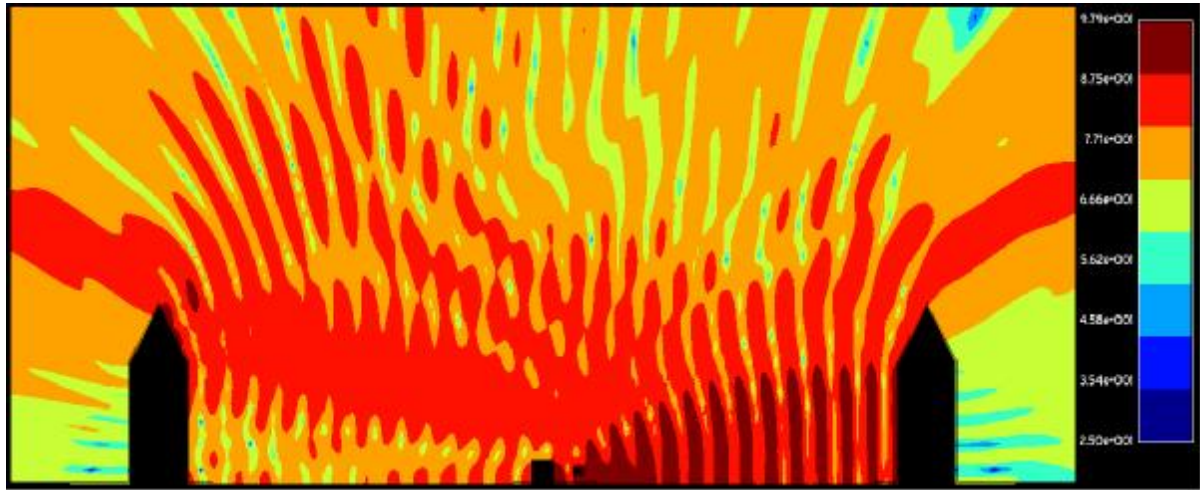


Σχήμα 3.24: Συχνότητα 75 Hz: ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς τις κατοικίες, μείωση θορύβου κατά 14%

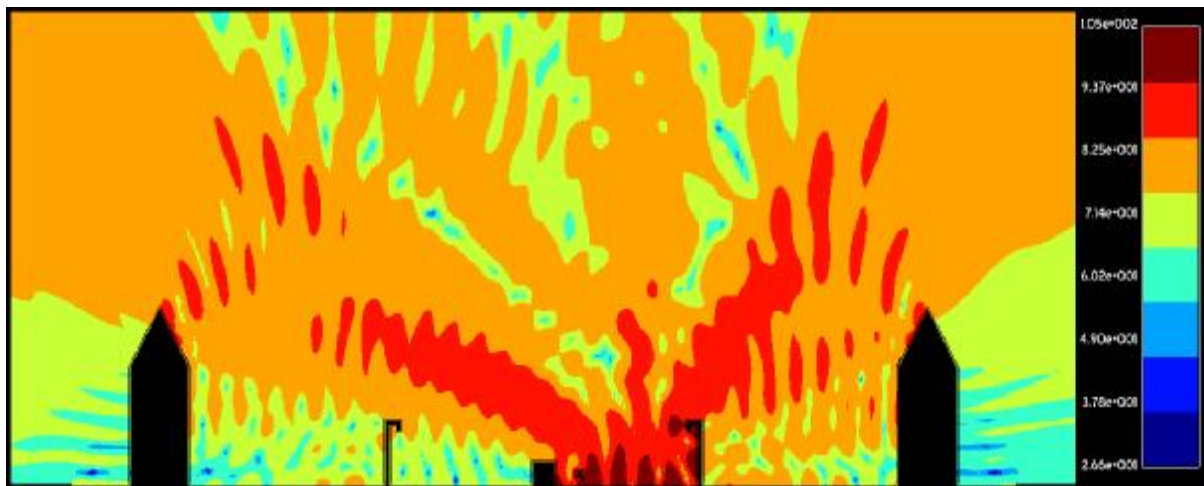


Σχήμα 3.25: Συχνότητα 75 Hz: ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς το οδόστρωμα, μείωση θορύβου κατά 19%

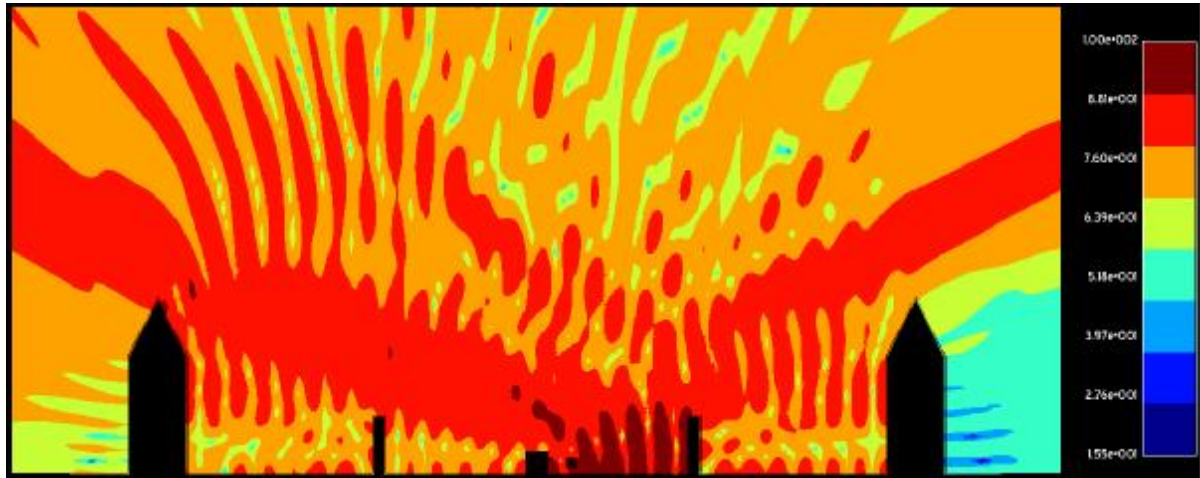
ΣΤ. Συχνότητα 80 Hz



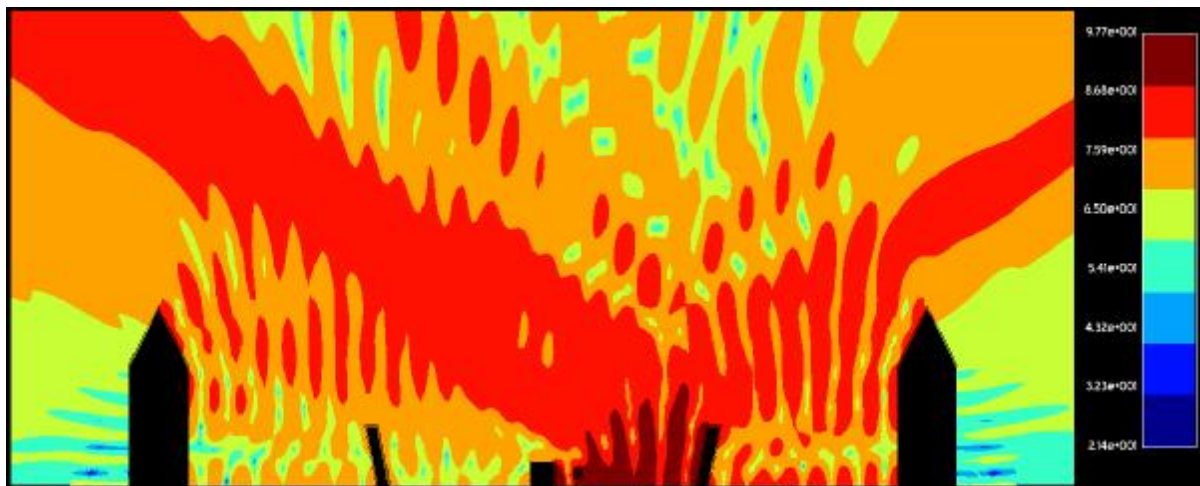
Σχήμα 3.26: Συχνότητα 80 Hz: χωρίς ηχοπετάσματα



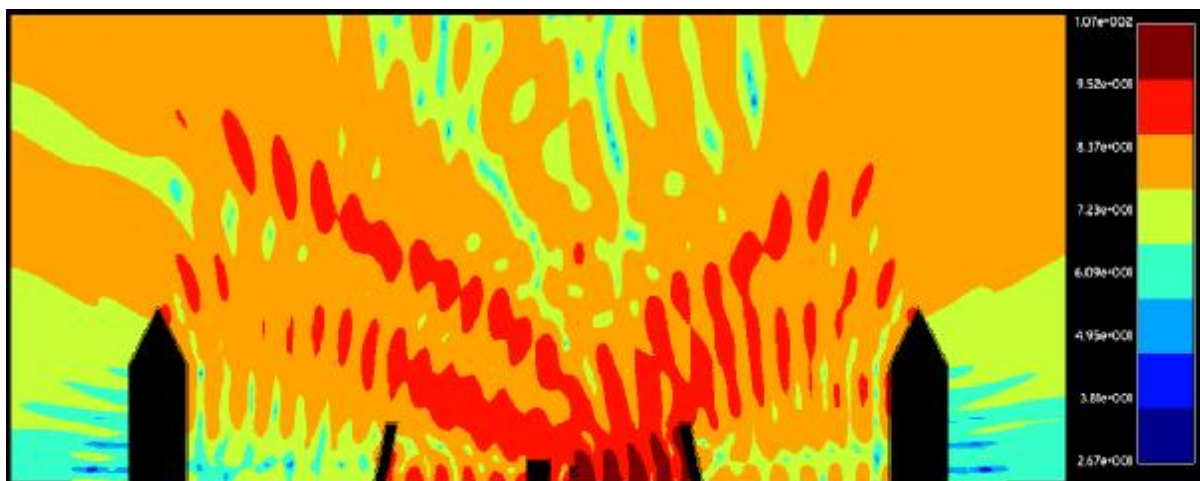
Σχήμα 3.27: Συχνότητα 80 Hz: ηχοπετάσματα τύπου άγκιστρο, μείωση θορύβου κατά 19%



Σχήμα 3.28: Συχνότητα 80 Hz: ηχοπετάσματα κάθετα στο έδαφος, μείωση θορύβου κατά 14%

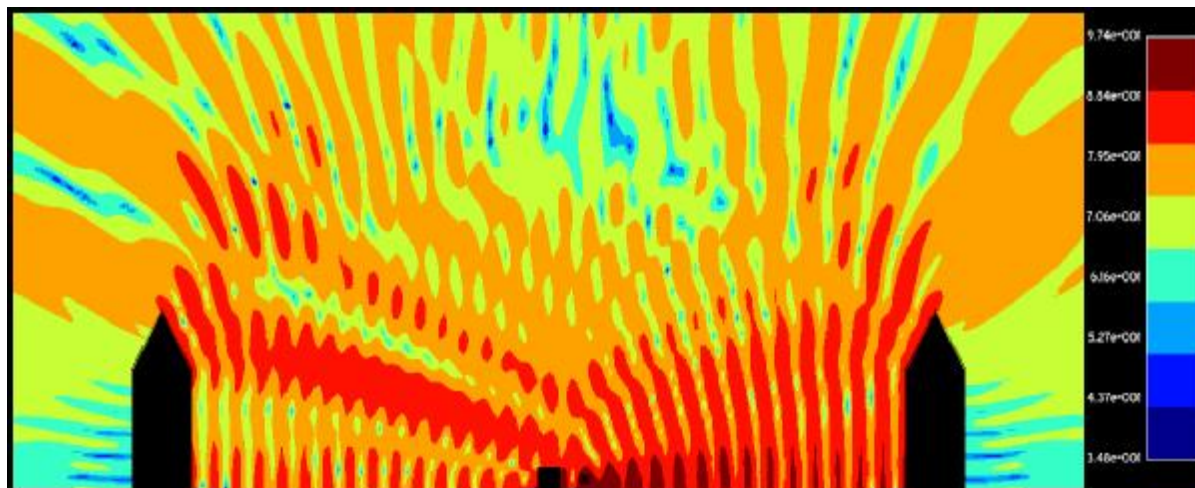


Σχήμα 3.29: Συχνότητα 80 Hz: ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς τις κατοικίες, μείωση θορύβου κατά 15%

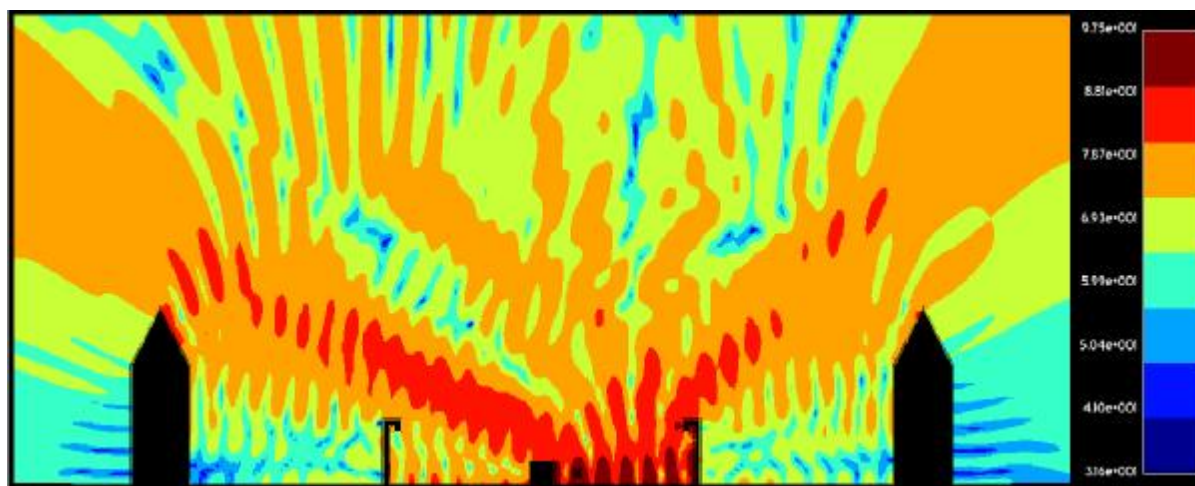


Σχήμα 3.30: Συχνότητα 80 Hz: ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς το οδόστρωμα, μείωση θορύβου κατά 15%

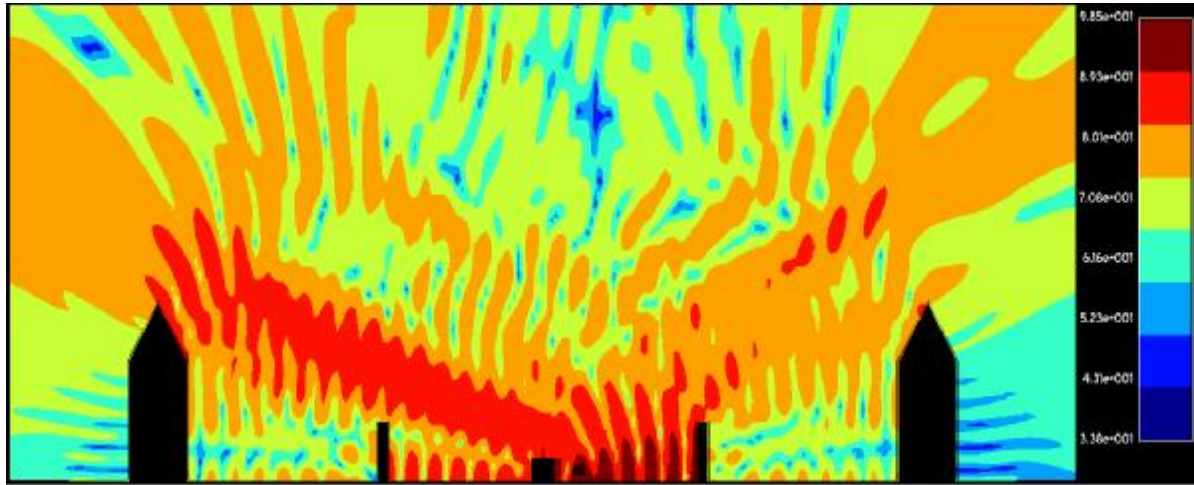
Ζ. Συχνότητα 90 Hz



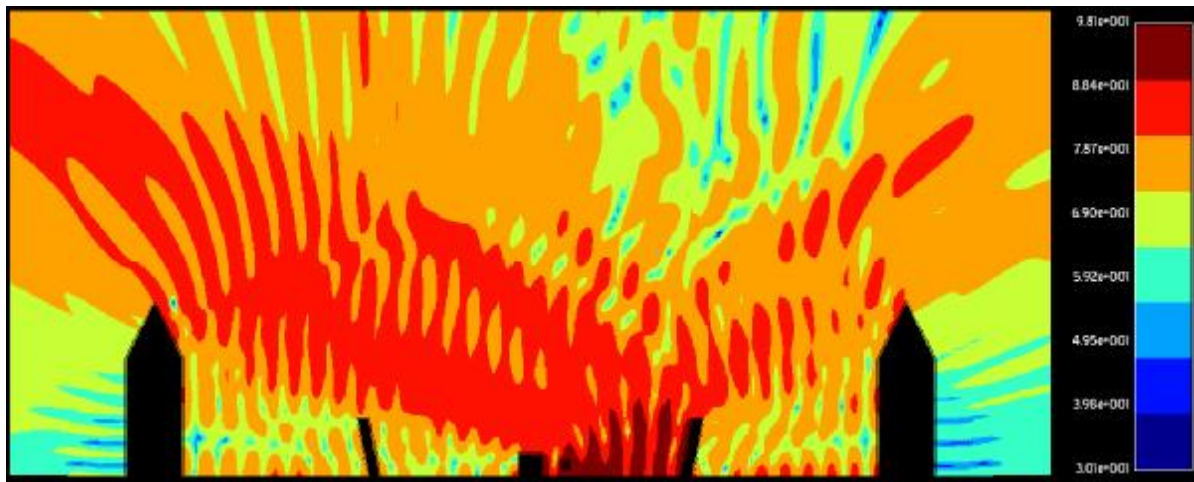
Σχήμα 3.31: Συχνότητα 90 Hz: χωρίς ηχοπετάσματα



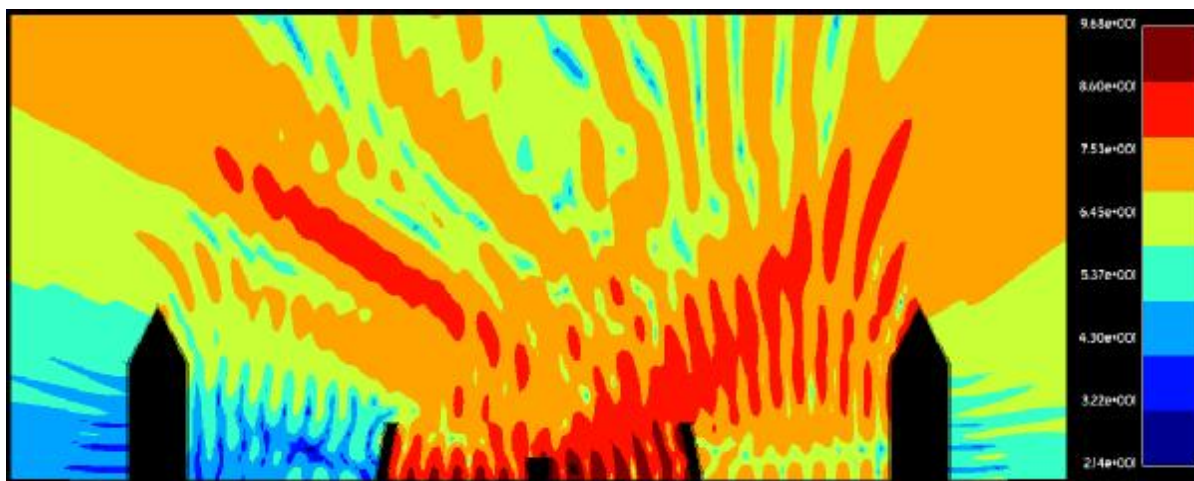
Σχήμα 3.32: Συχνότητα 90 Hz: ηχοπετάσματα τύπου άγκιστρο, μείωση θορύβου κατά 22%



Σχήμα 3.33: Συχνότητα 90 Hz: ηχοπετάσματα κάθετα στο έδαφος, μείωση θορύβου κατά 13%

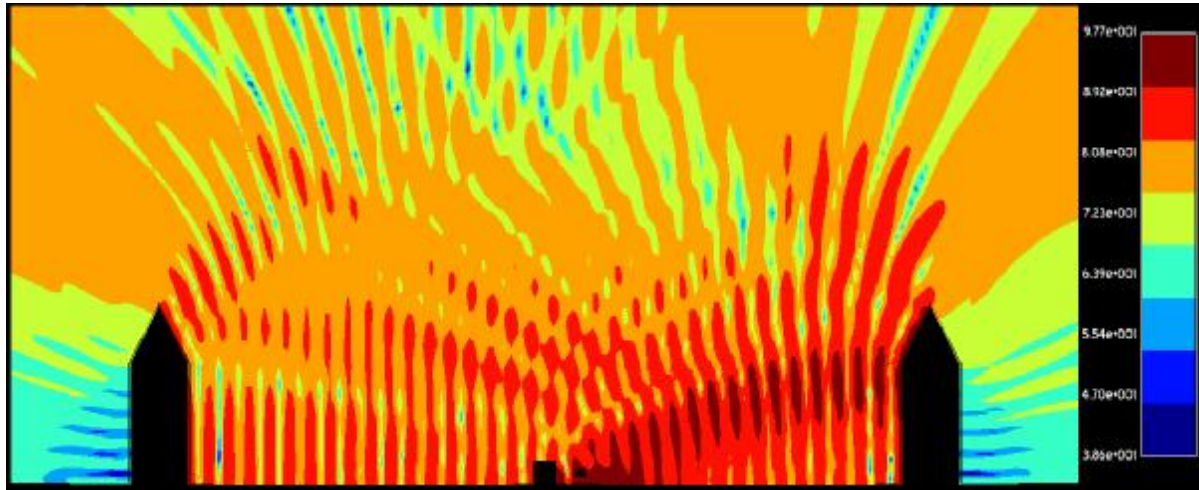


Σχήμα 3.34: Συχνότητα 90 Hz: ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς τις κατοικίες, μείωση θορύβου κατά 10%

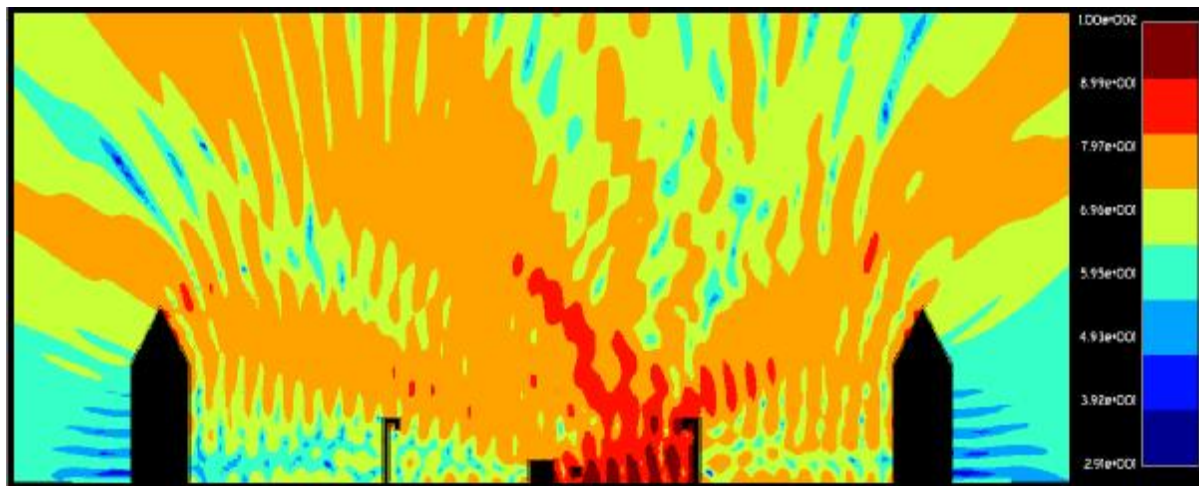


Σχήμα 3.35: Συχνότητα 90 Hz: ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς το οδόστρωμα, μείωση θορύβου κατά 10%

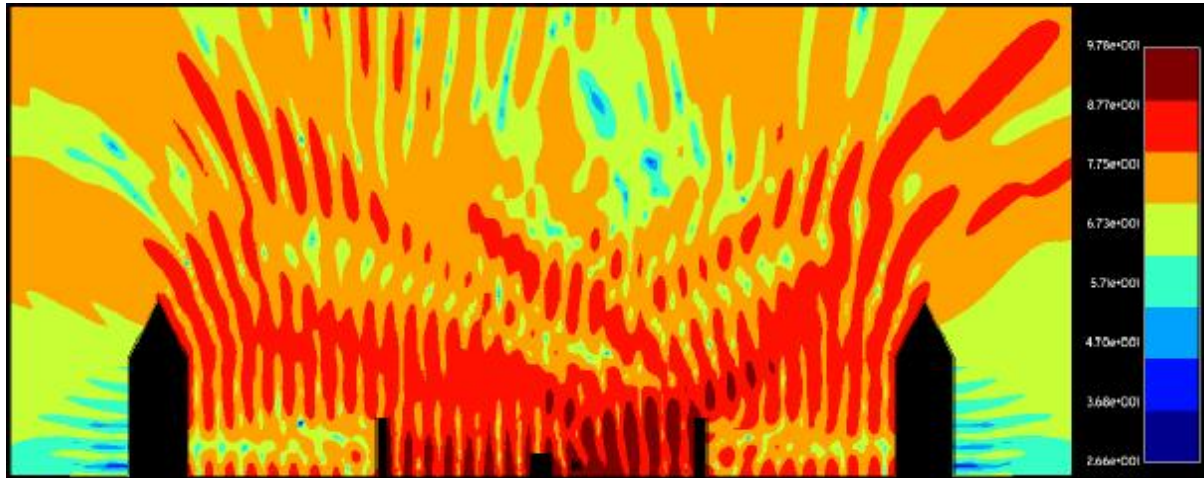
Η. Συχνότητα 100 Hz



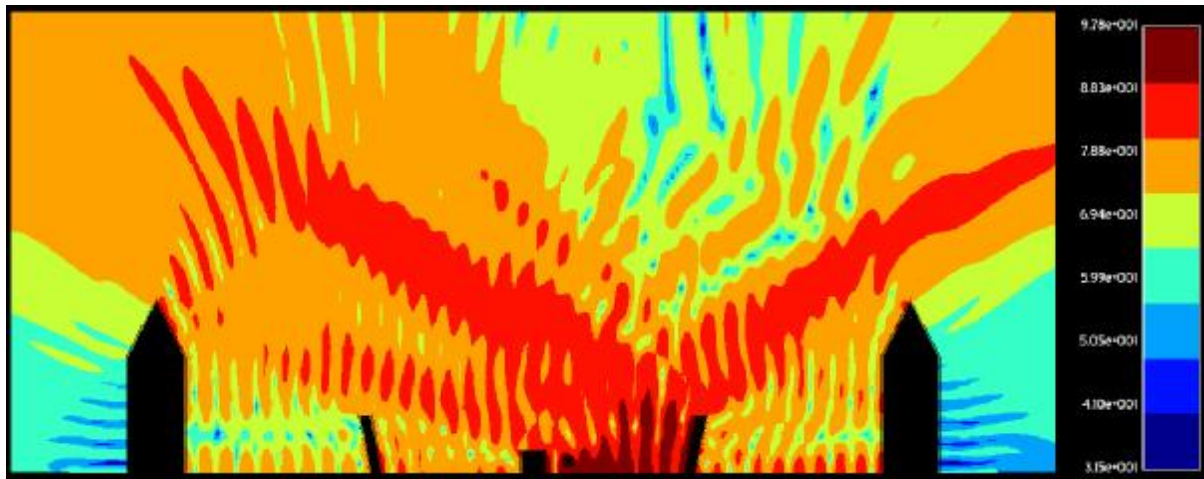
Σχήμα 3.36: Συχνότητα 100 Hz: χωρίς ηχοπετάσματα



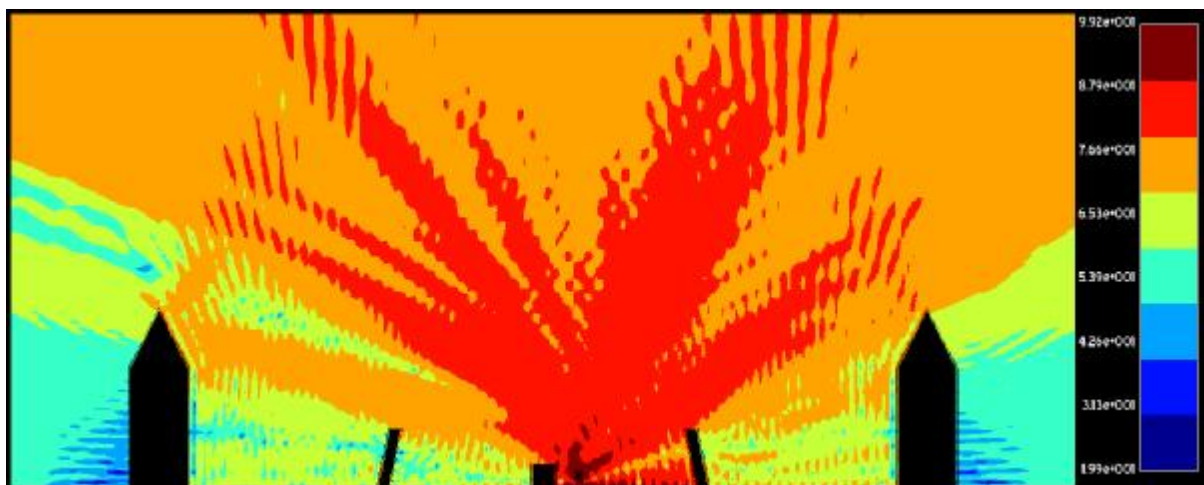
Σχήμα 3.37: Συχνότητα 100 Hz: ηχοπετάσματα τύπου άγκιστρο, μείωση θορύβου κατά 13%



Σχήμα 3.38: Συχνότητα 100 Hz: ηχοπετάσματα κάθετα στο έδαφος, μείωση θορύβου κατά 5%

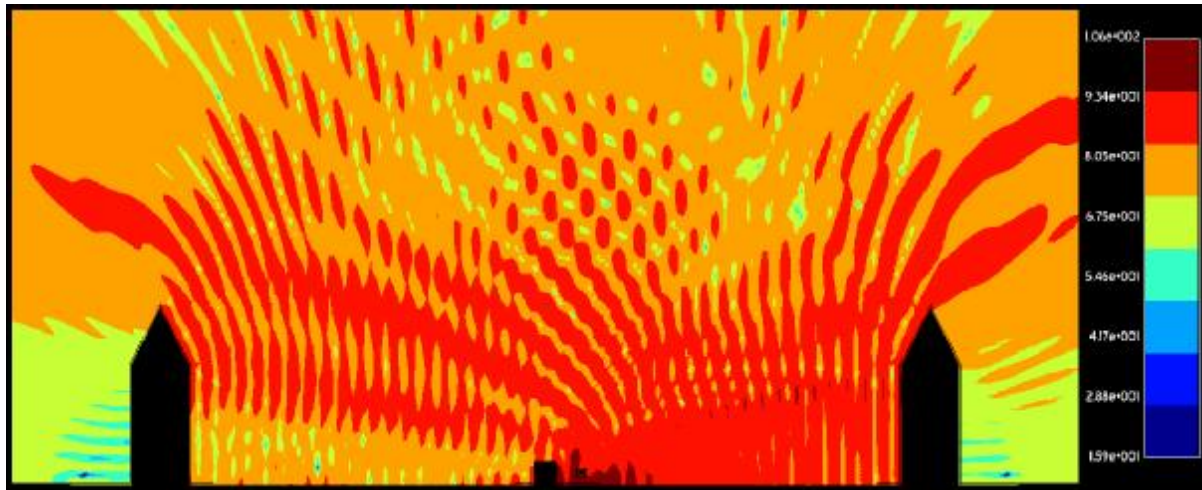


Σχήμα 3.39: Συχνότητα 100 Hz: ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς τις κατοικίες, μείωση θορύβου κατά 12%

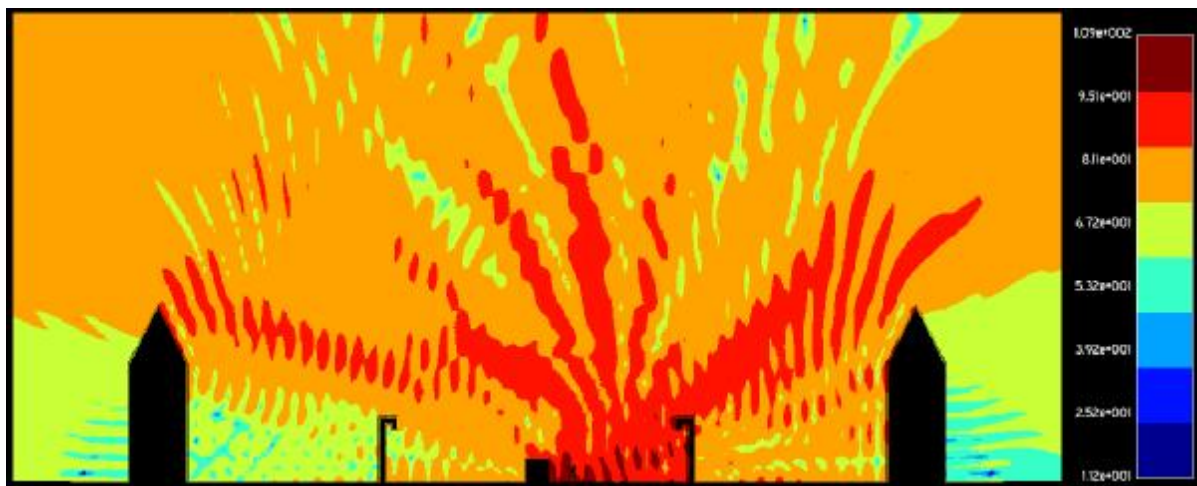


Σχήμα 3.40: Συχνότητα 100 Hz: ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς το οδόστρωμα, μείωση θορύβου κατά 37%

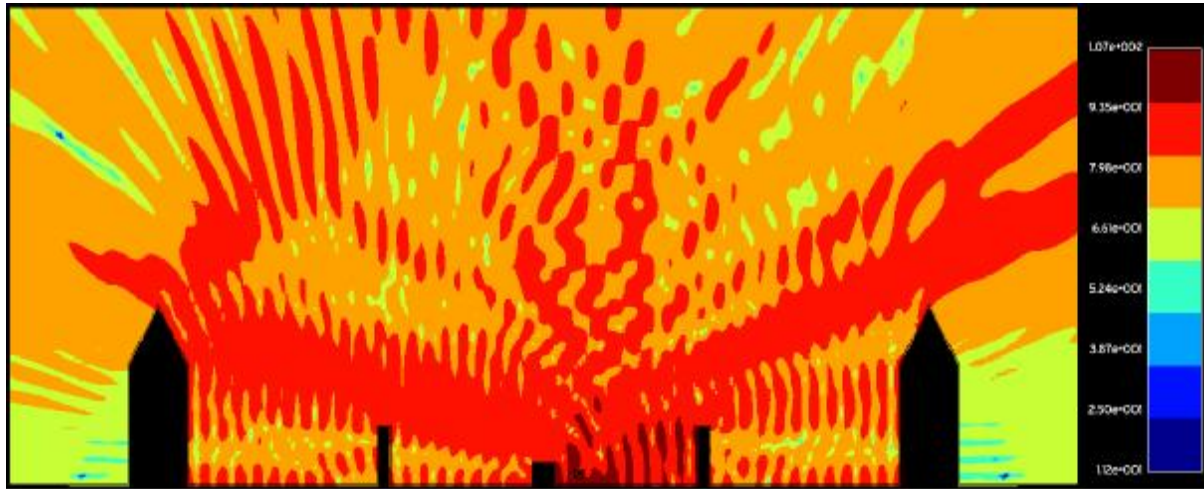
Θ. Συχνότητα 120 Hz



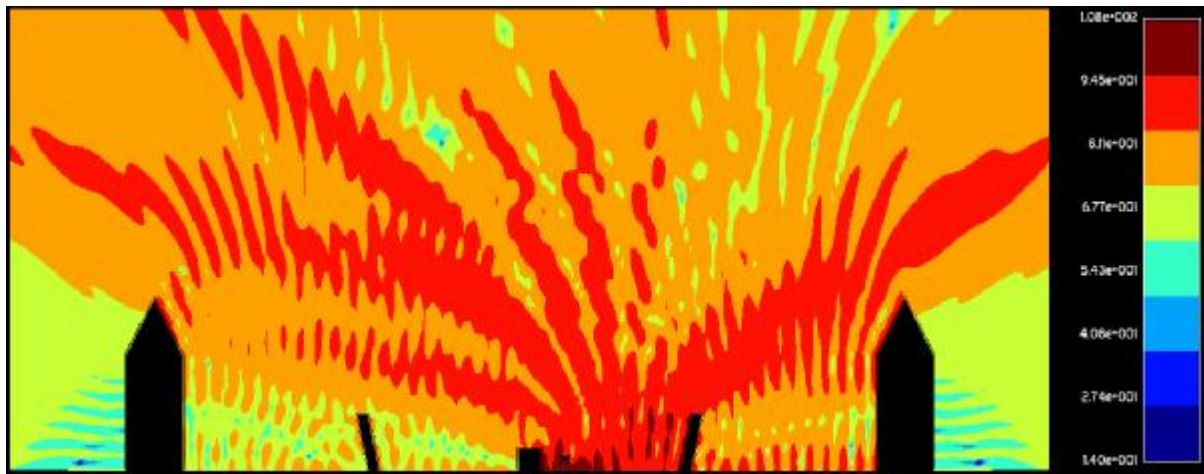
Σχήμα 3.41: Συχνότητα 120 Hz: χωρίς ηχοπετάσματα



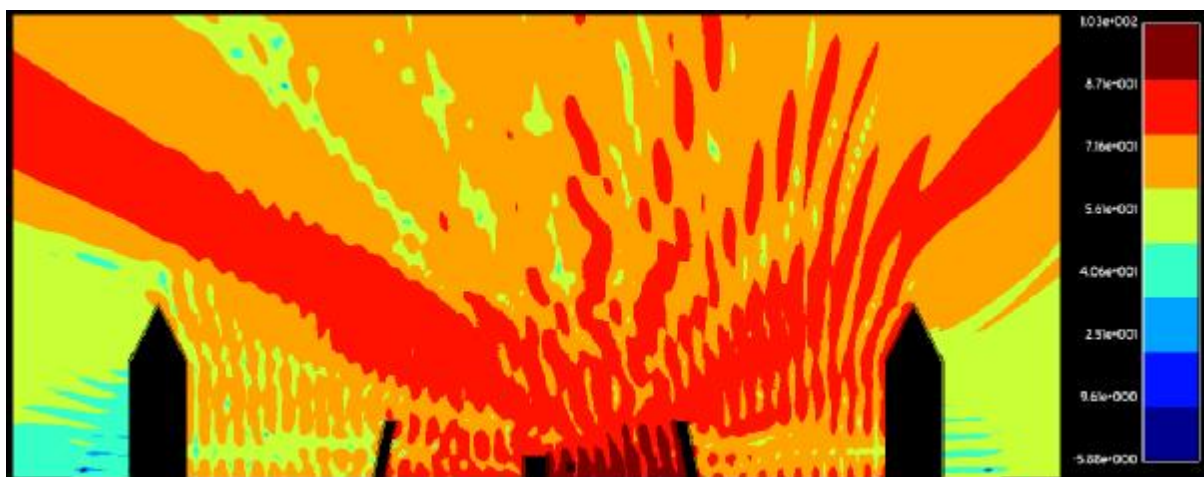
Σχήμα 3.42: Συχνότητα 120 Hz: ηχοπετάσματα τύπου άγκιστρο, μείωση θορύβου κατά 8%



Σχήμα 3.43: Συχνότητα 120 Hz: ηχοπετάσματα κάθετα στο έδαφος, μείωση θορύβου κατά 4%

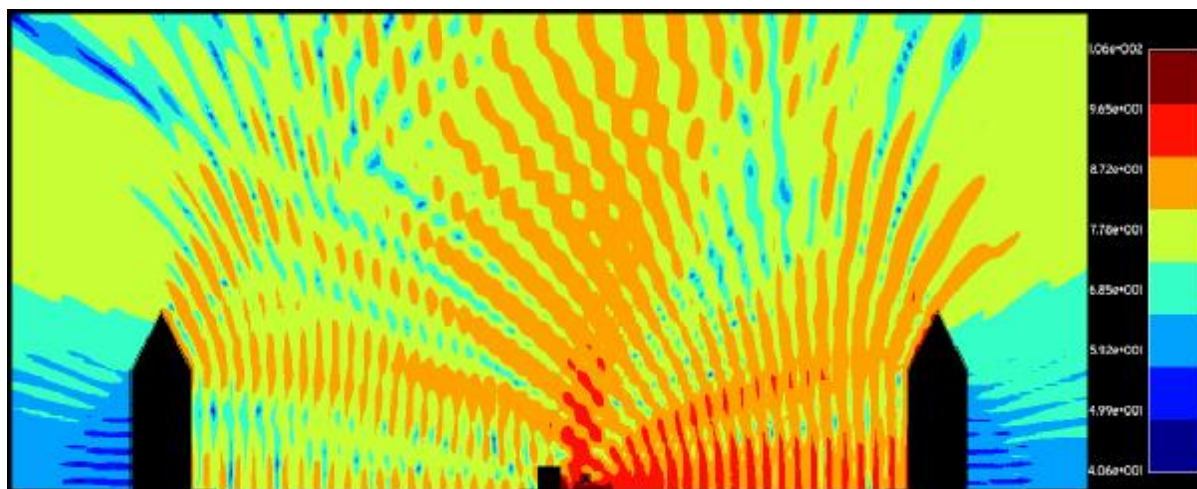


Σχήμα 3.44: Συχνότητα 120 Hz: ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς τις κατοικίες, μείωση θορύβου κατά 9%

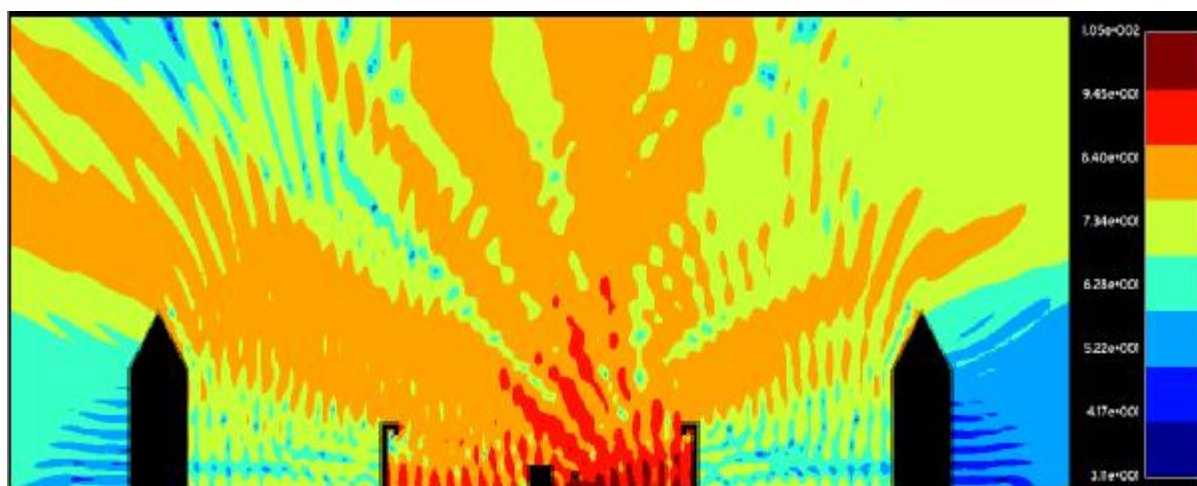


Σχήμα 3.45: Συχνότητα 120 Hz: ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς το οδόστρωμα, μείωση θορύβου κατά 12%

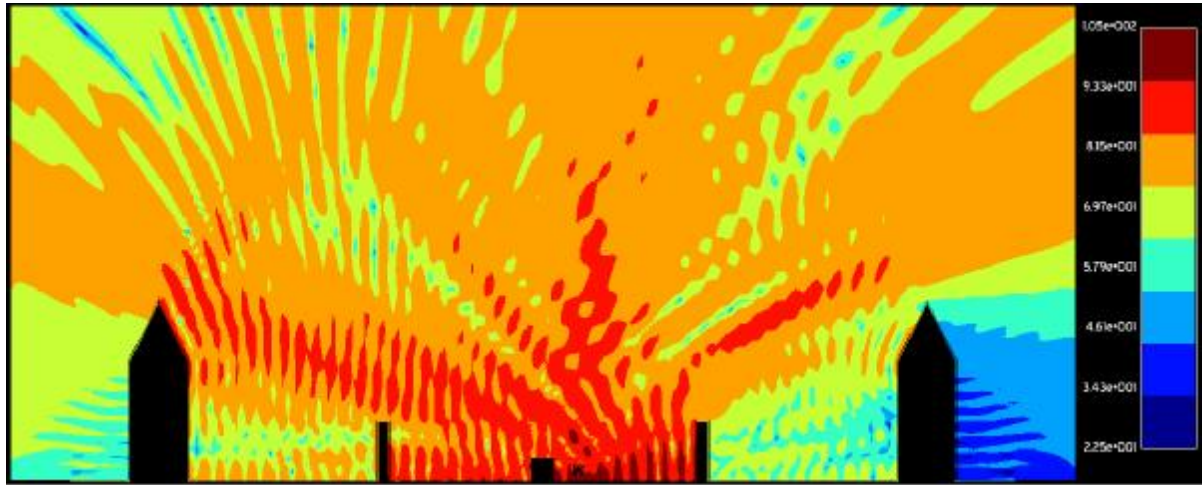
I. Συχνότητα 130 Hz



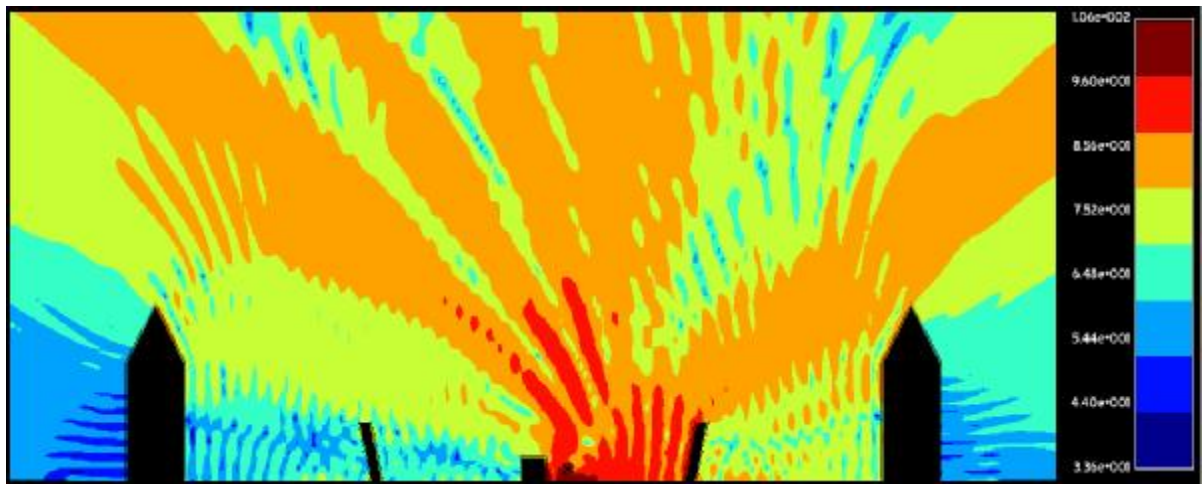
Σχήμα 3.46: Συχνότητα 130 Hz: χωρίς ηχοπετάσματα



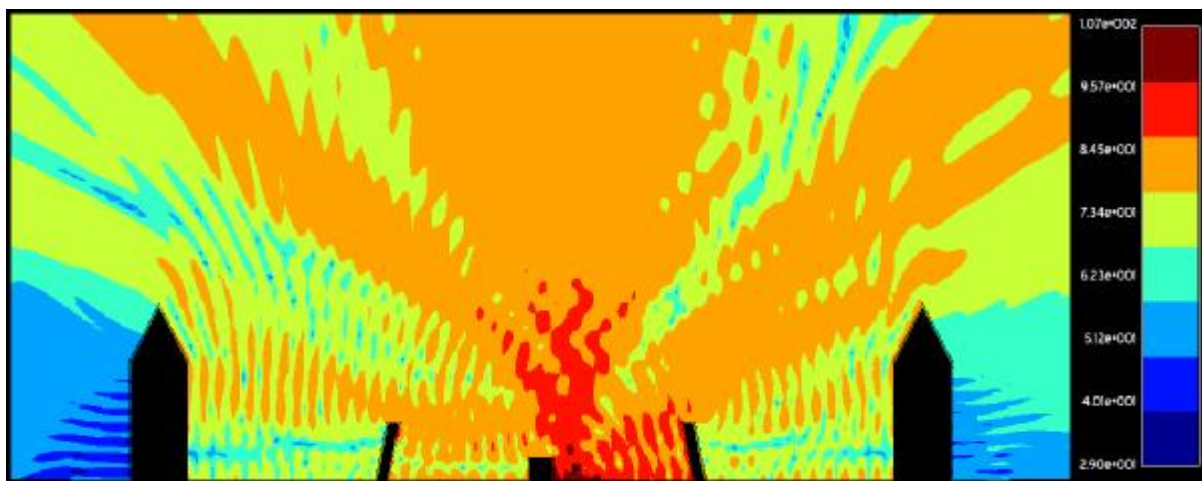
Σχήμα 3.47: Συχνότητα 130 Hz: ηχοπετάσματα τύπου άγκιστρο, μείωση θορύβου κατά 30%



Σχήμα 3.48: Συχνότητα 130 Hz: ηχοπετάσματα κάθετα στο έδαφος, μείωση θορύβου κατά 30%

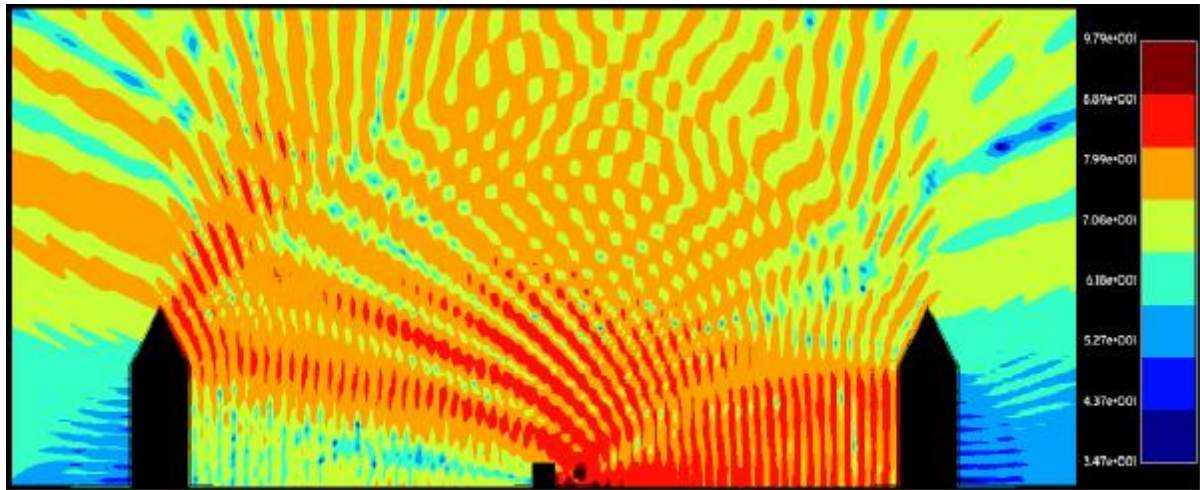


Σχήμα 3.49: Συχνότητα 130 Hz: ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς τις κατοικίες, μείωση θορύβου κατά 17%

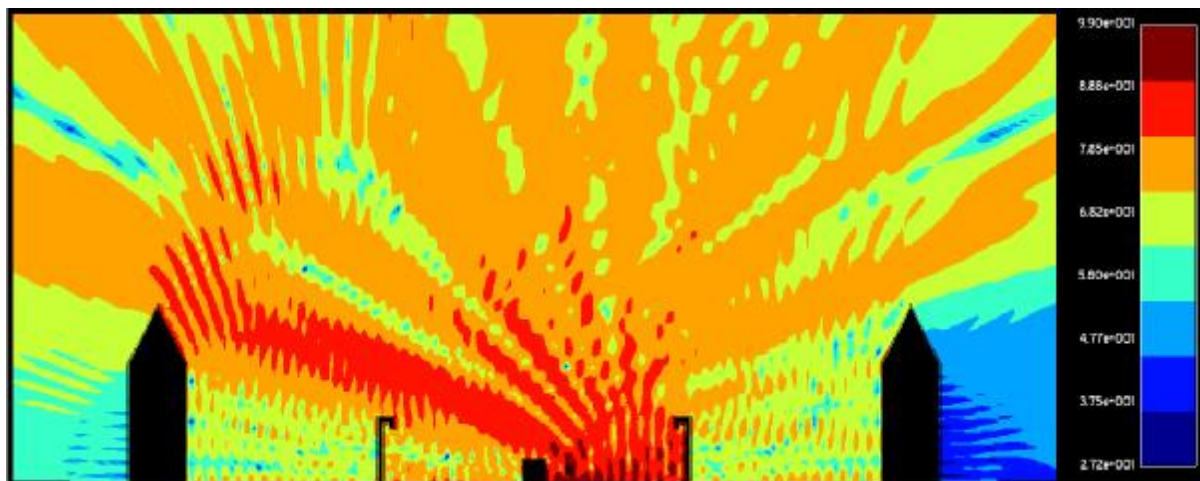


Σχήμα 3.50: Συχνότητα 130 Hz: ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς το οδόστρωμα, μείωση θορύβου κατά 18%

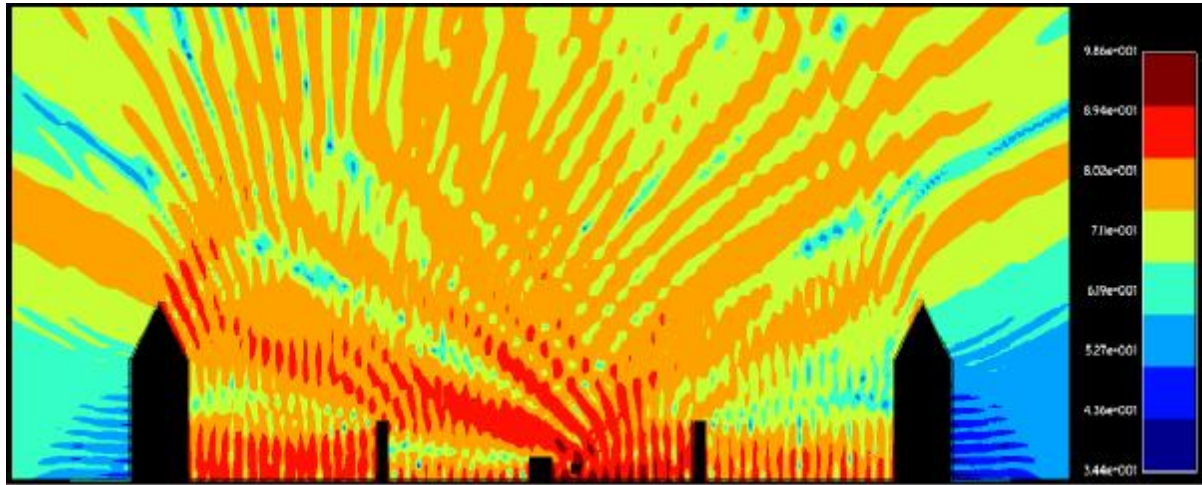
Κ. Συχνότητα 160 Hz



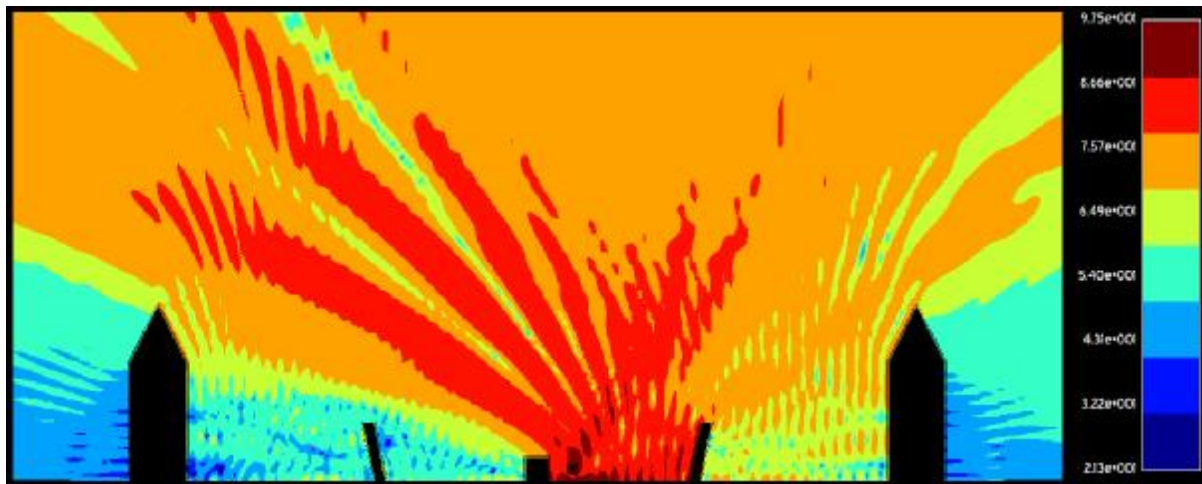
Σχήμα 3.51: Συχνότητα 160 Hz: χωρίς ηχοπετάσματα



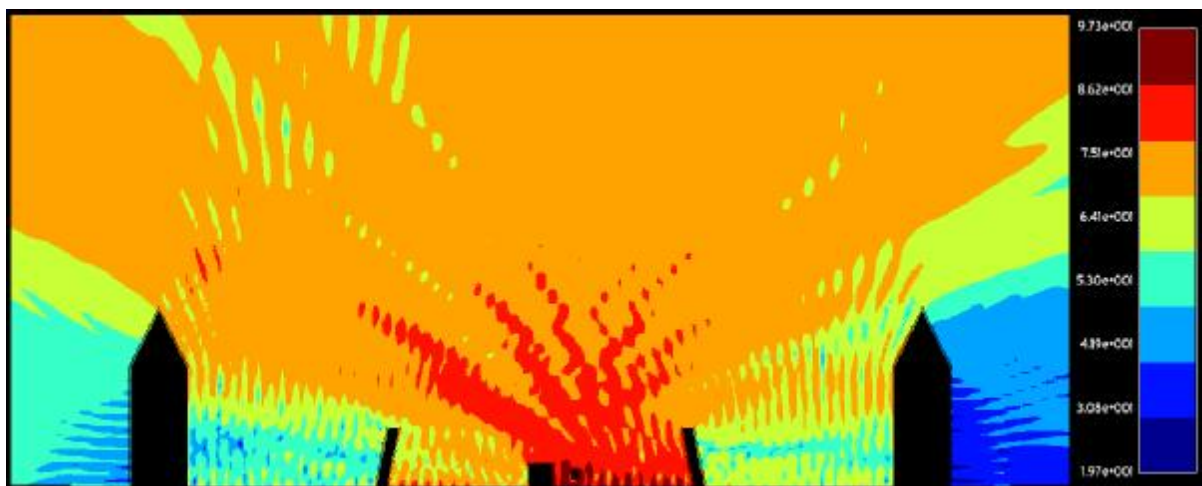
Σχήμα 3.52: Συχνότητα 160 Hz: ηχοπετάσματα τύπου άγκιστρο, μείωση θορύβου κατά 24%



Σχήμα 3.53: Συχνότητα 160 Hz: ηχοπετάσματα κάθετα στο έδαφος, μείωση θορύβου κατά 14%

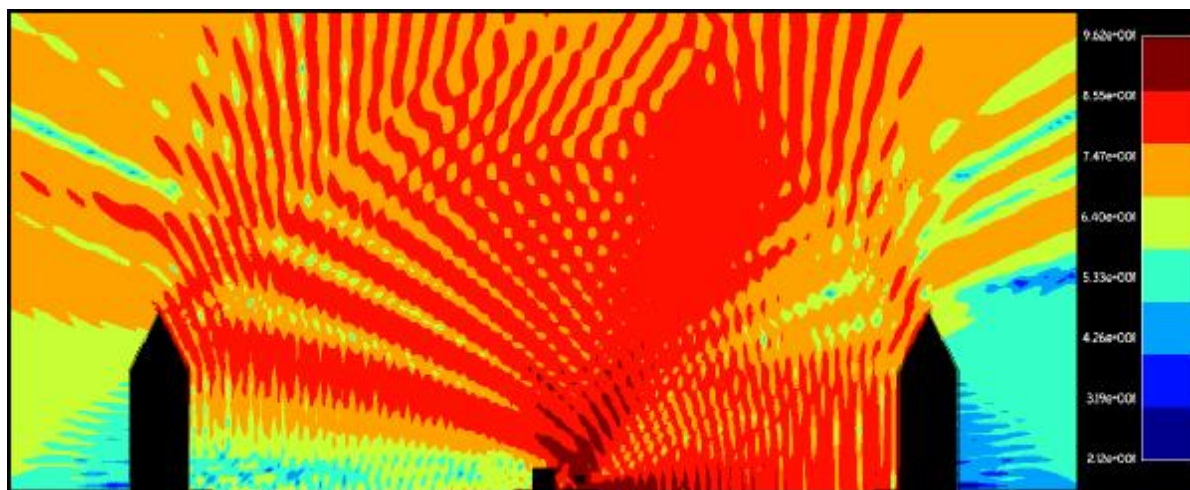


Σχήμα 3.54: Συχνότητα 160 Hz: ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς τις κατοικίες, μείωση θορύβου κατά 28%

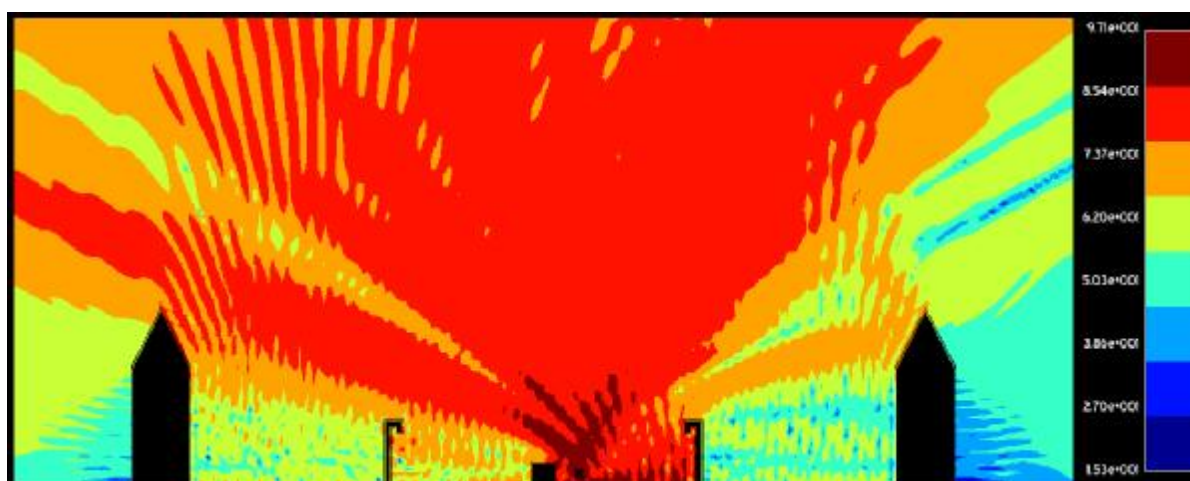


Σχήμα 3.55: Συχνότητα 160 Hz: ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς το οδόστρωμα, μείωση θορύβου κατά 29%

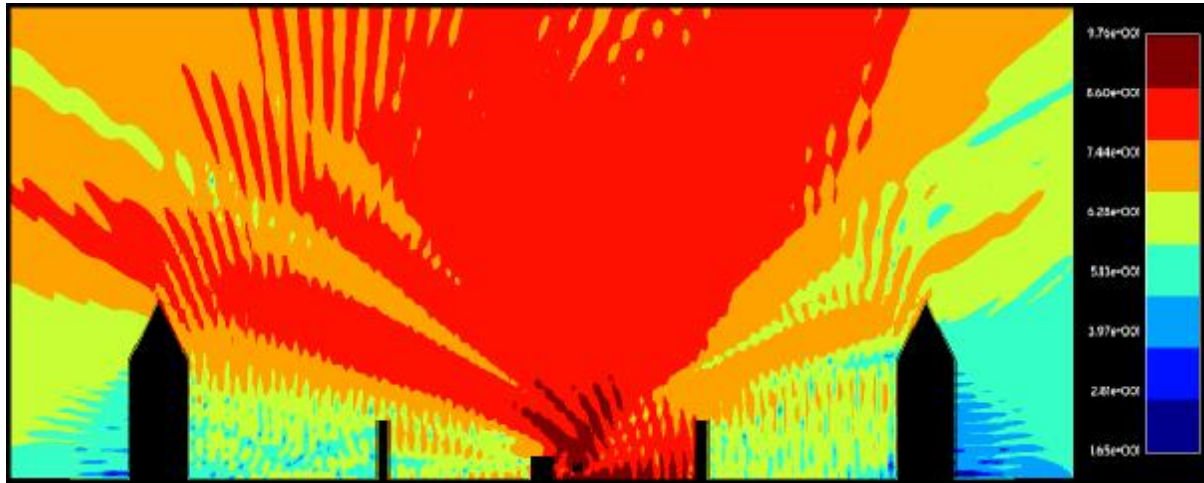
Λ. Συχνότητα 180 Hz



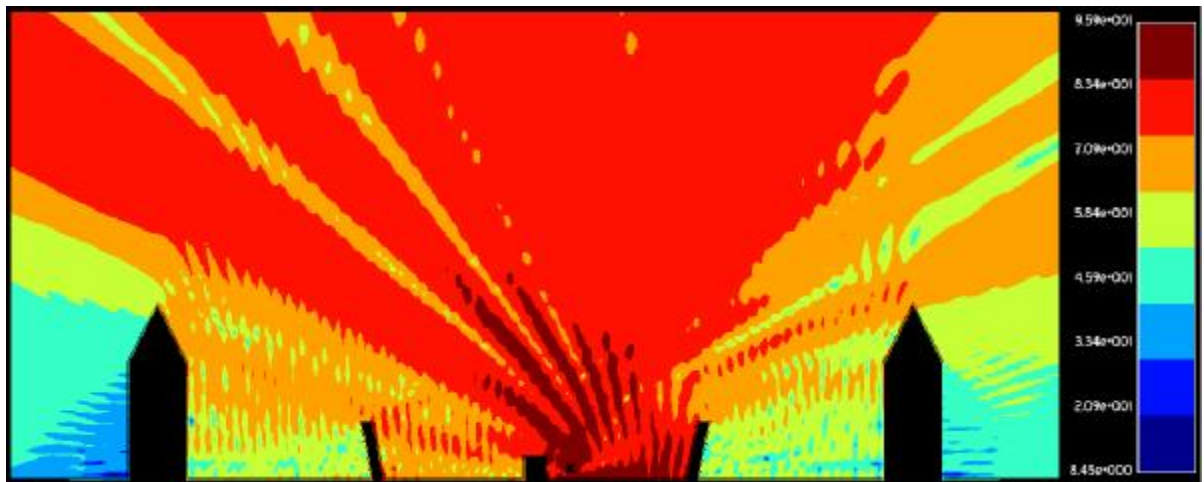
Σχήμα 3.56: Συχνότητα 180 Hz: χωρίς ηχοπετάσματα



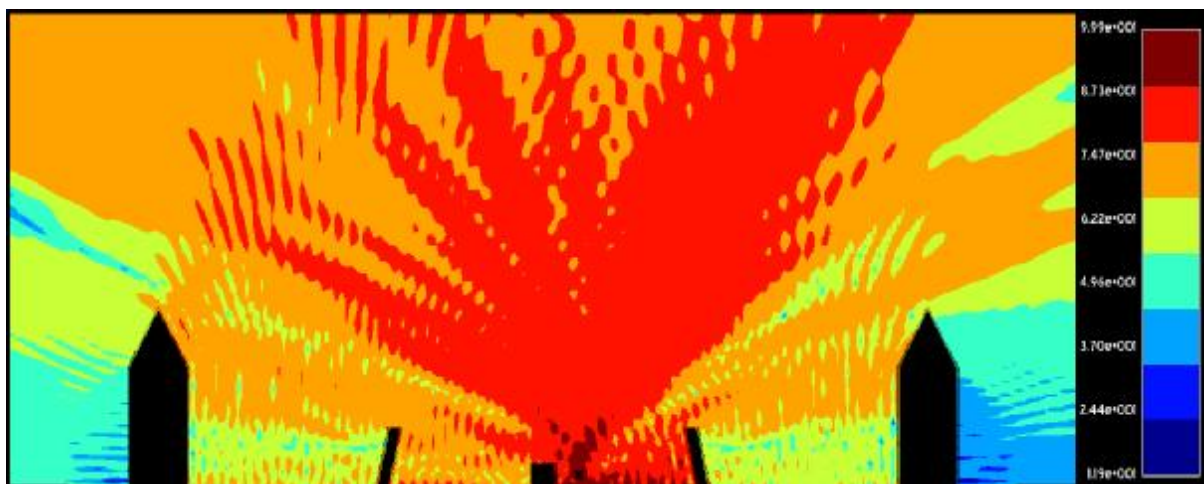
Σχήμα 3.57: Συχνότητα 180 Hz: ηχοπετάσματα τύπου άγκιστρο, μείωση θορύβου κατά 33%



Σχήμα 3.58: Συχνότητα 180 Hz: ηχοπετάσματα κάθετα στο έδαφος, μείωση θορύβου κατά 28%

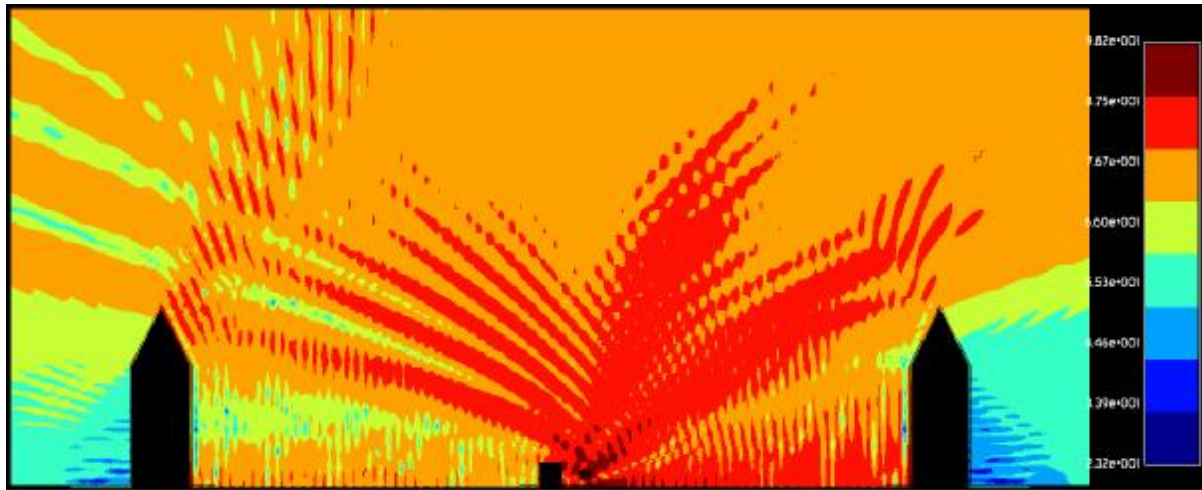


Σχήμα 3.59: Συχνότητα 180 Hz: ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς τις κατοικίες, μείωση θορύβου κατά 33%

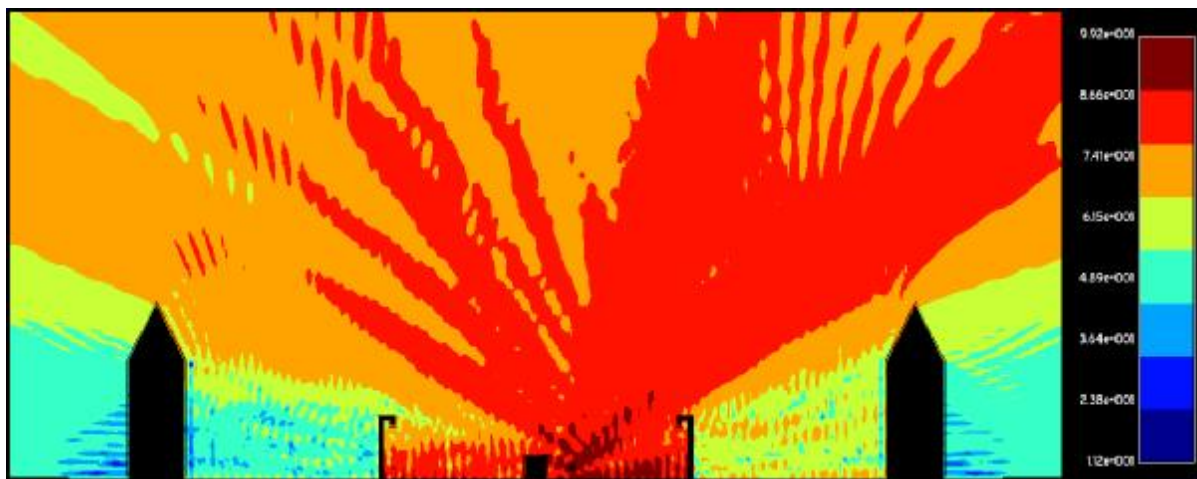


Σχήμα 3.60: Συχνότητα 180 Hz: ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς το οδόστρωμα, μείωση θορύβου κατά 28%

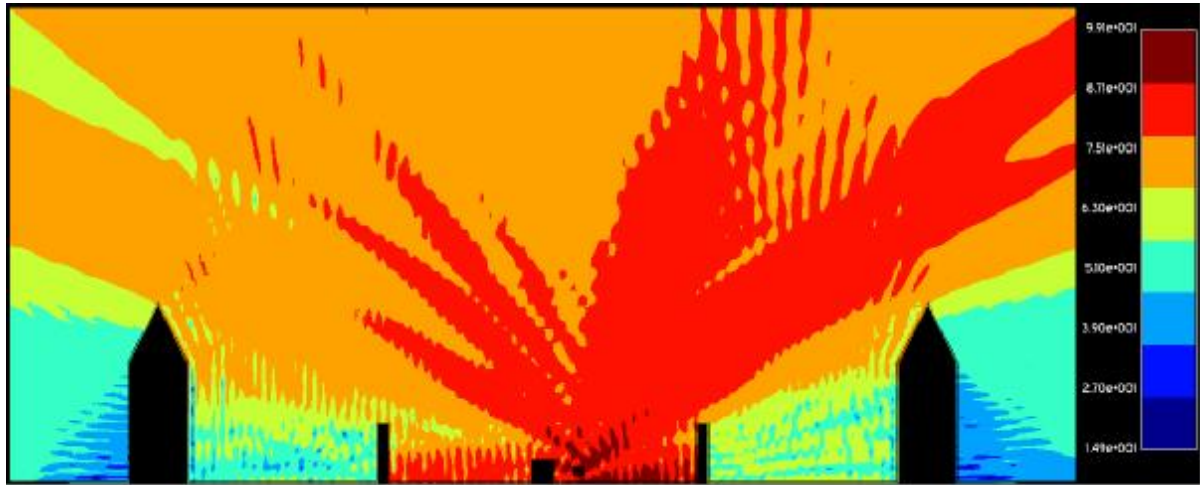
Μ. Συχνότητα 200 Hz



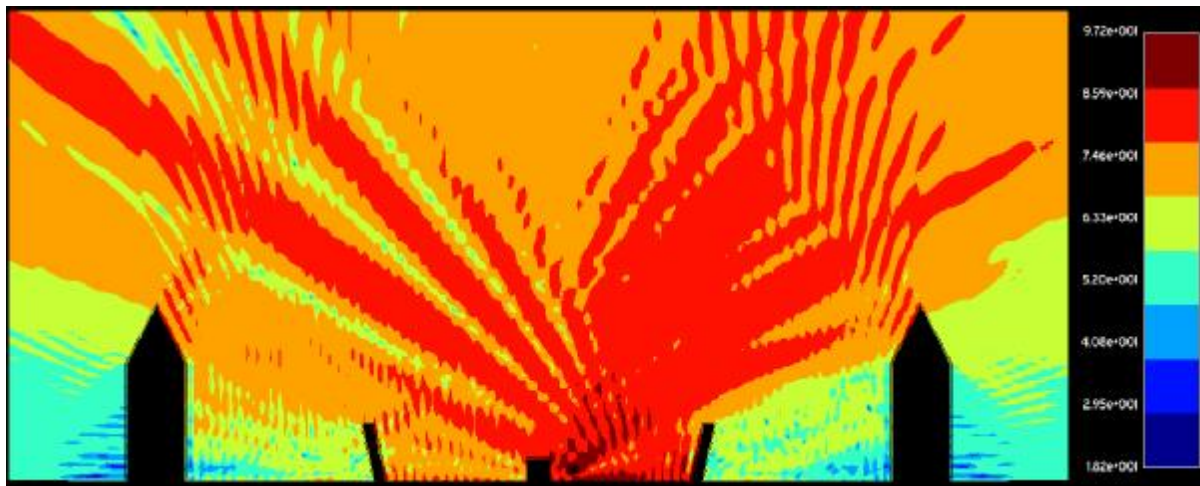
Σχήμα 3.61: Συχνότητα 200 Hz: χωρίς ηχοπετάσματα



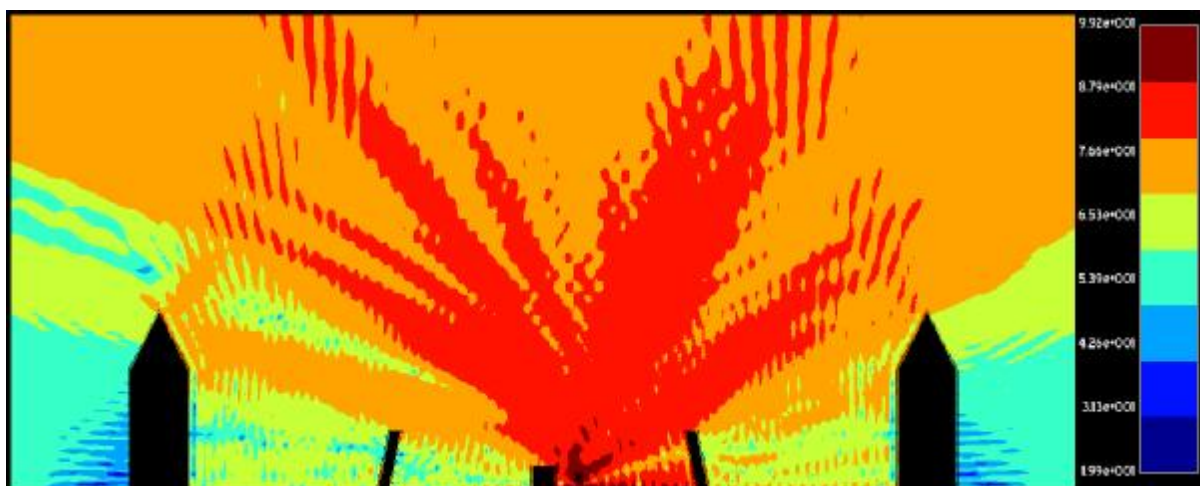
Σχήμα 3.62: Συχνότητα 200 Hz: ηχοπετάσματα τύπου άγκιστρο, μείωση θορύβου κατά 31%



Σχήμα 3.63: Συχνότητα 200 Hz: ηχοπετάσματα κάθετα στο έδαφος, μείωση θορύβου κατά 38%

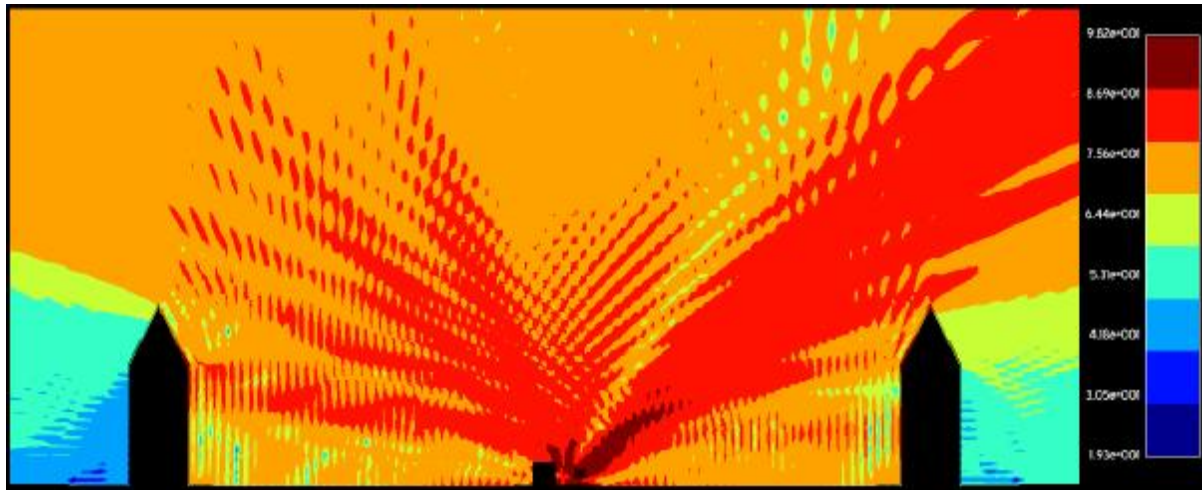


Σχήμα 3.64: Συχνότητα 200 Hz: ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς τις κατοικίες, μείωση θορύβου κατά 30%

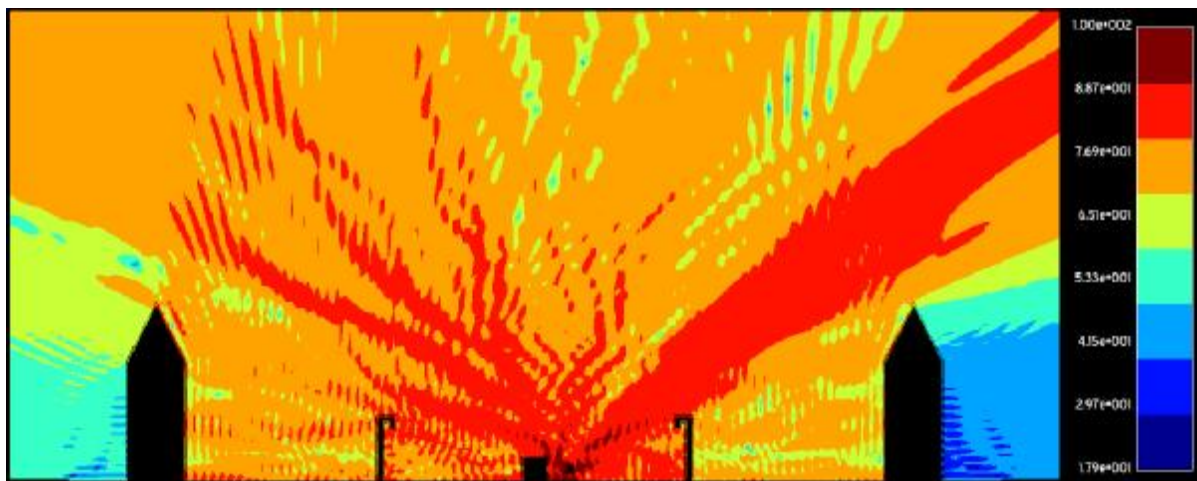


Σχήμα 3.65: Συχνότητα 200 Hz: ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς το οδόστρωμα, μείωση θορύβου κατά 34%

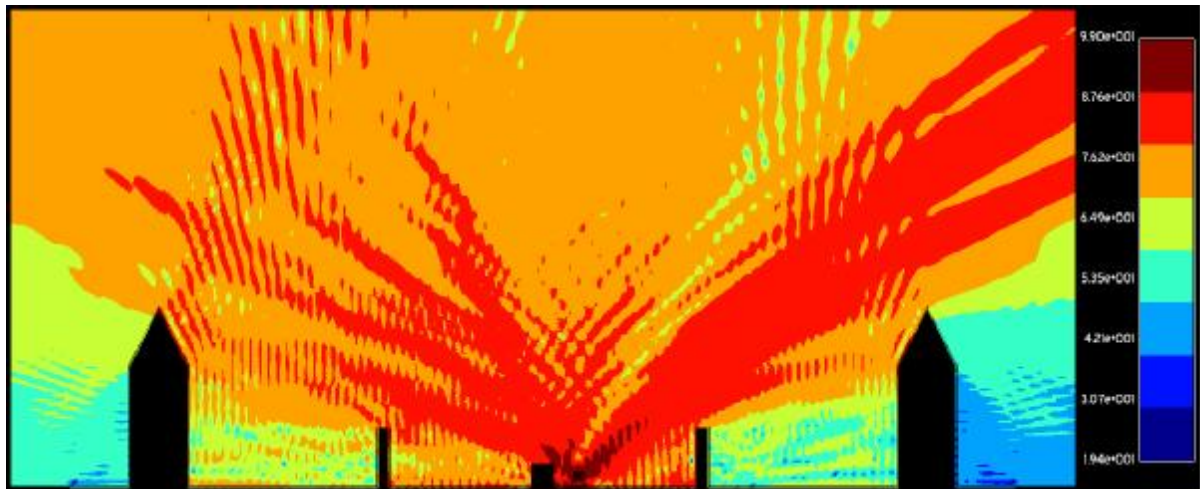
N. Συχνότητα 230 Hz



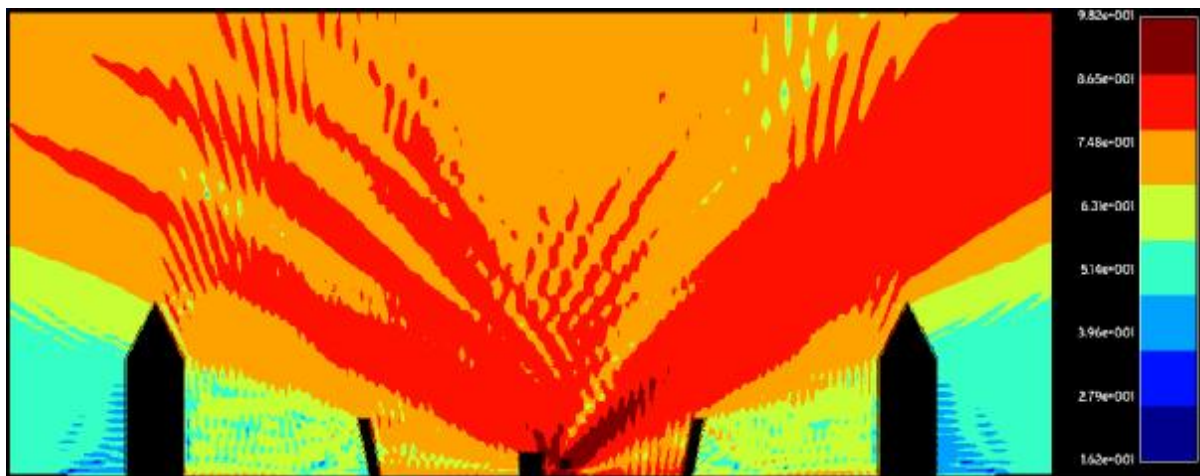
Σχήμα 3.66: Συχνότητα 230 Hz: χωρίς ηχοπετάσματα



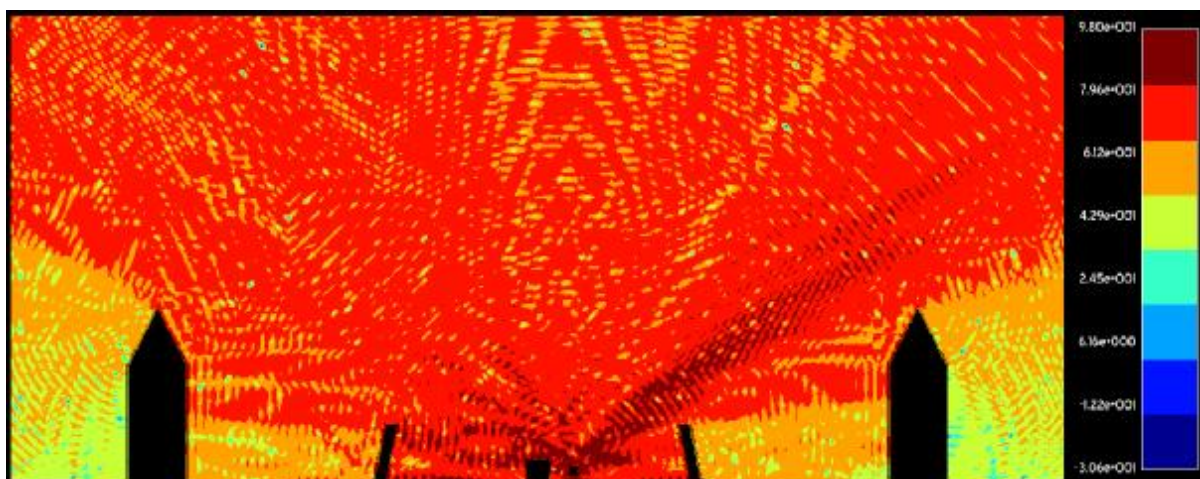
Σχήμα 3.67: Συχνότητα 230 Hz: ηχοπετάσματα τύπου άγκιστρο, μείωση θορύβου κατά 16%



Σχήμα 3.68: Συχνότητα 230 Hz: ηχοπετάσματα κάθετα στο έδαφος, μείωση θορύβου κατά 30%

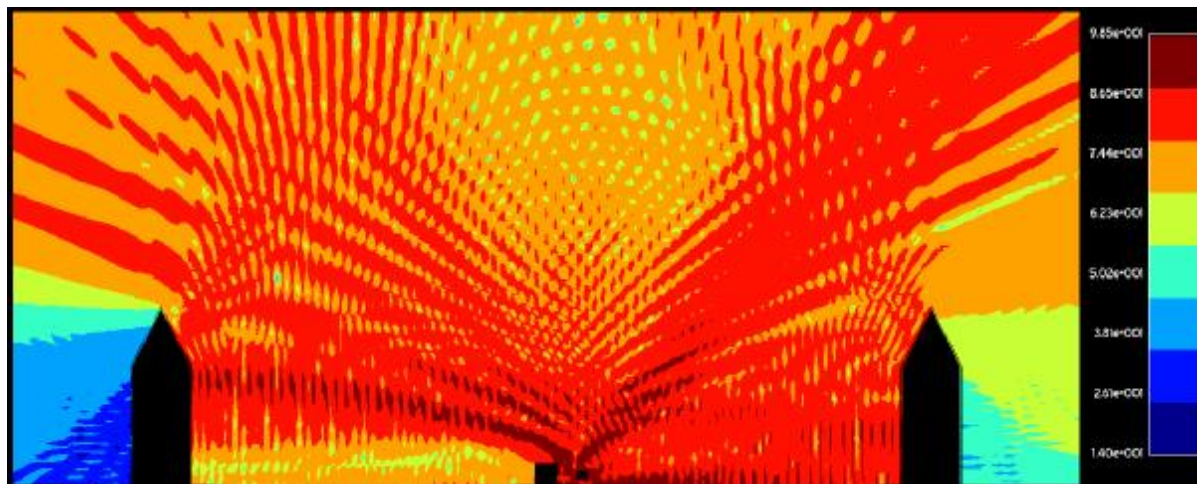


Σχήμα 3.69: Συχνότητα 230 Hz: ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς τις κατοικίες, μείωση θορύβου κατά 32%

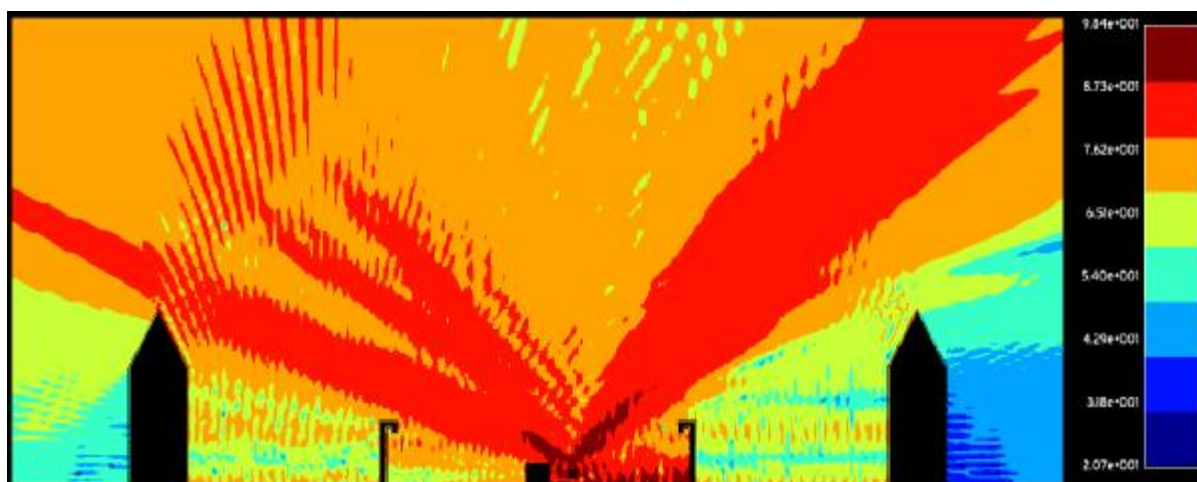


Σχήμα 3.70: Συχνότητα 230 Hz: ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς το οδόστρωμα, μείωση θορύβου κατά 30%

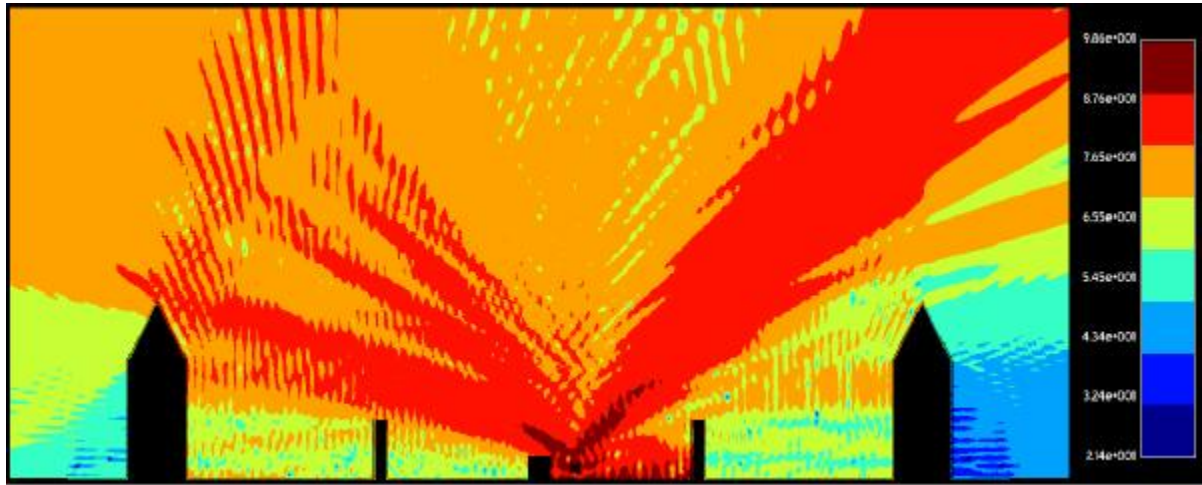
Ο. Συχνότητα 250 Hz



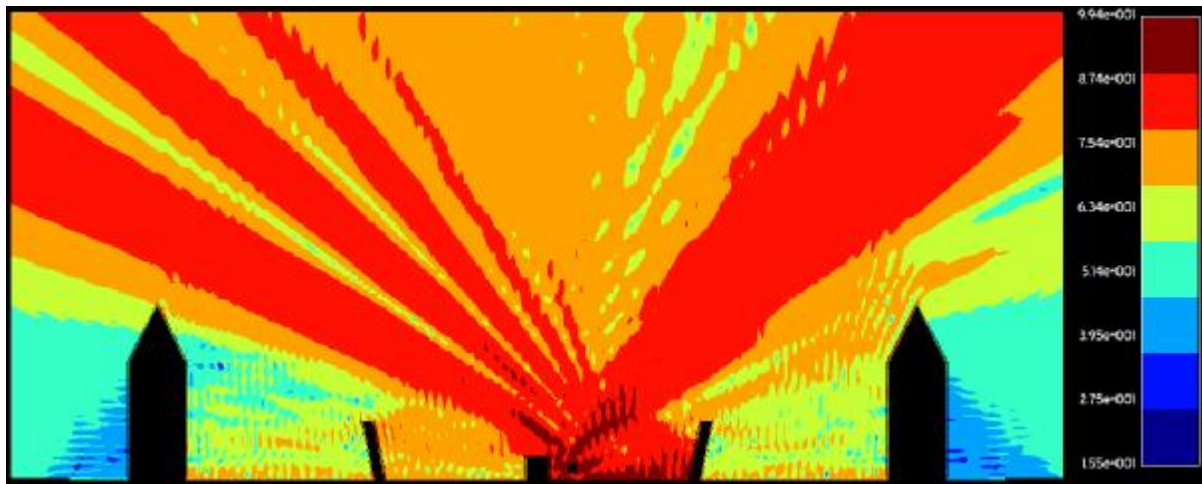
Σχήμα 3.71: Συχνότητα 250 Hz: χωρίς ηχοπετάσματα



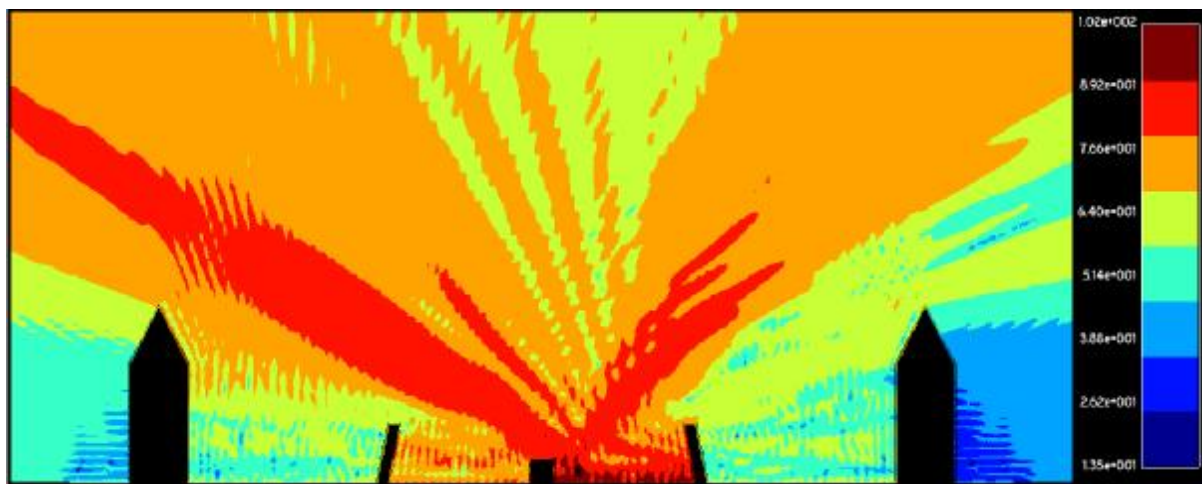
Σχήμα 3.72: Συχνότητα 250 Hz: ηχοπετάσματα τύπου άγκιστρο, μείωση θορύβου κατά 28%



Σχήμα 3.73: Συχνότητα 250 Hz: ηχοπετάσματα κάθετα στο έδαφος, μείωση θορύβου κατά 28%

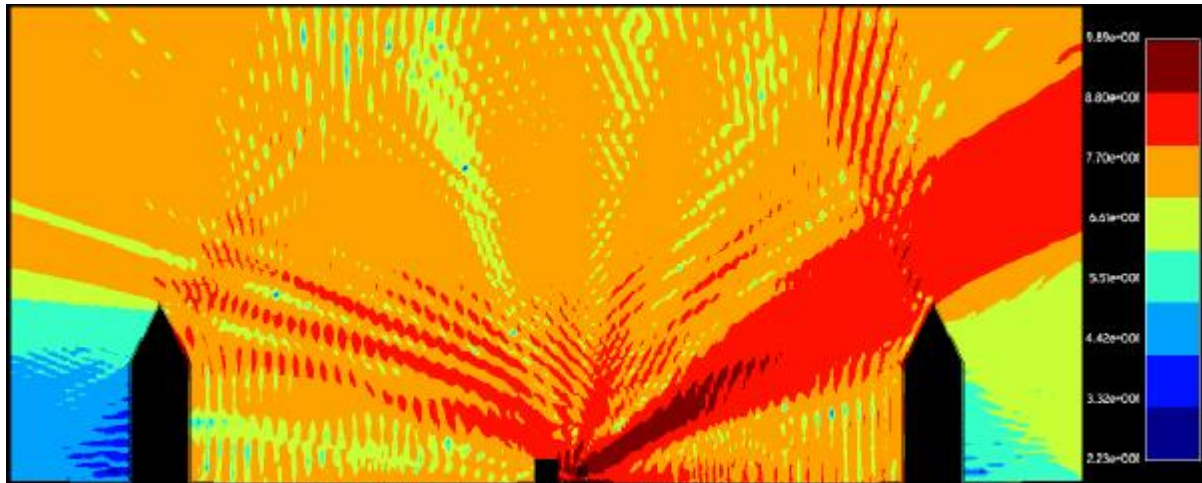


Σχήμα 3.74: Συχνότητα 250 Hz: ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς τις κατοικίες, μείωση θορύβου κατά 30%

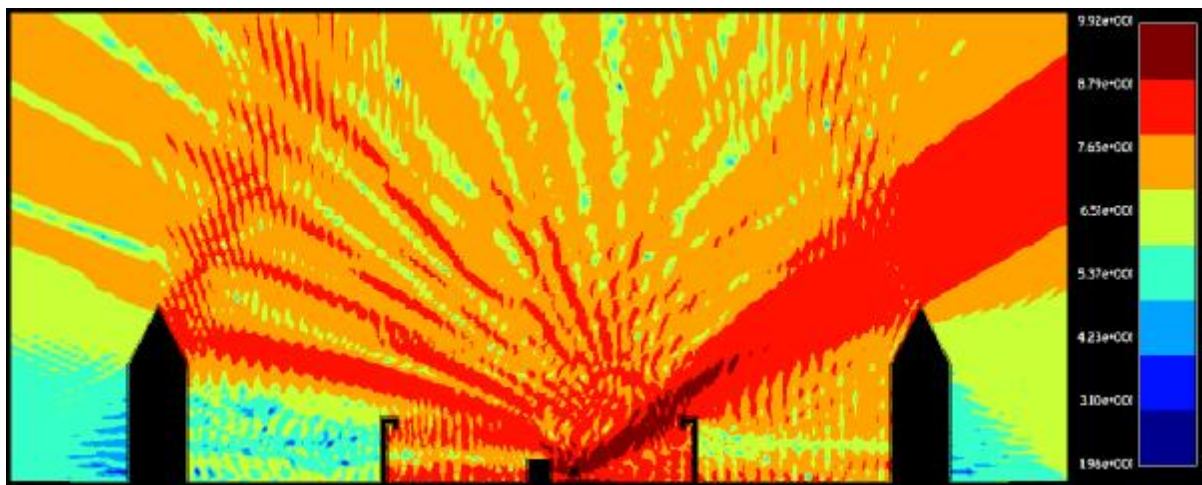


Σχήμα 3.75: Συχνότητα 250 Hz: ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς το οδόστρωμα, μείωση θορύβου κατά 43%

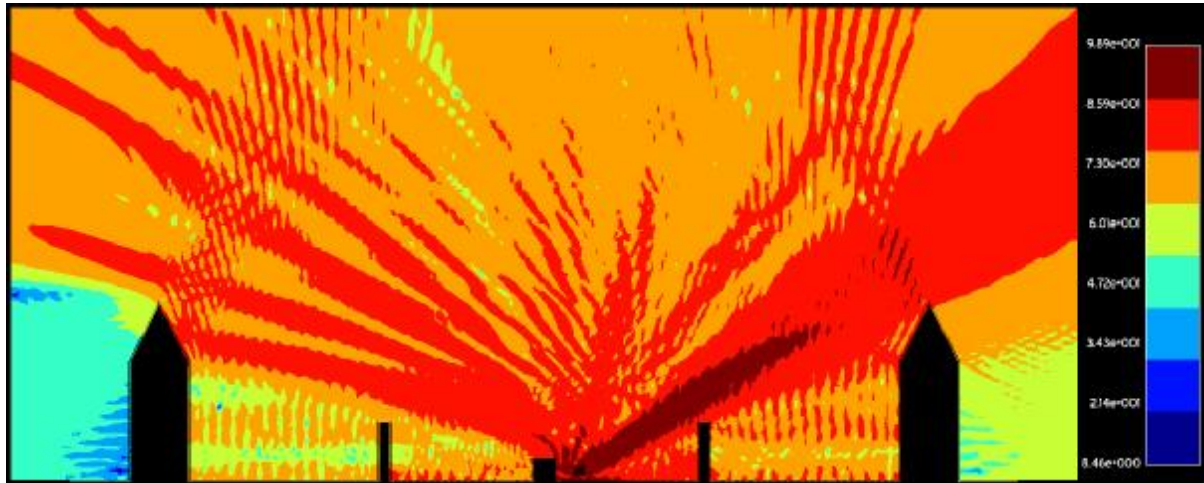
Π. Συχνότητα 300 Hz



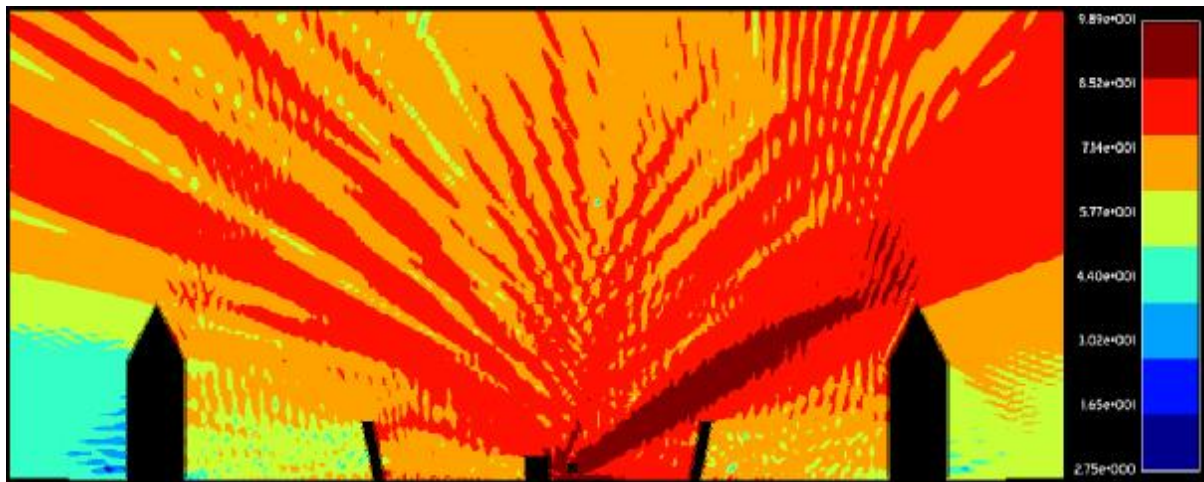
Σχήμα 3.76: Συχνότητα 300 Hz: χωρίς ηχοπετάσματα



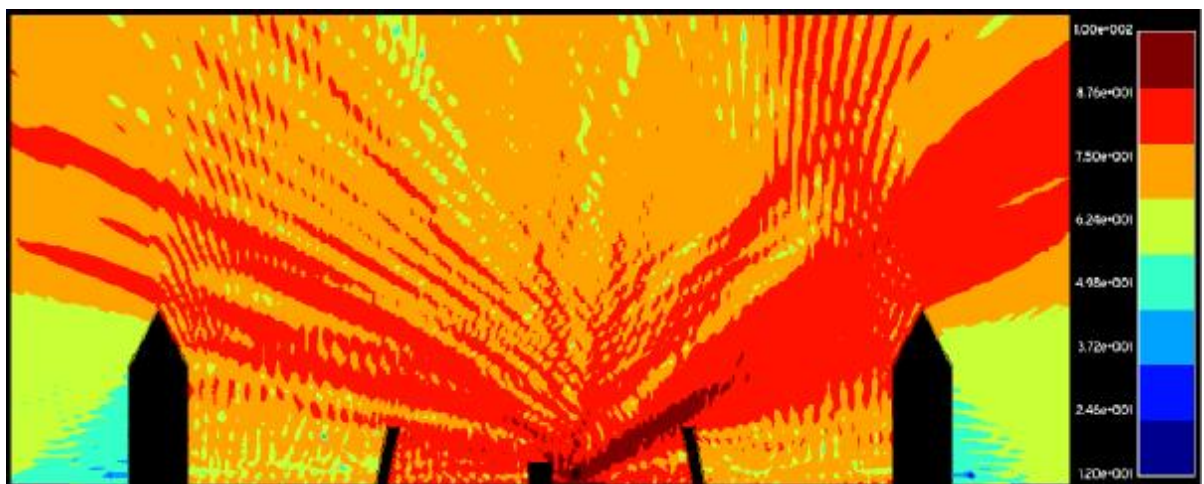
Σχήμα 3.77: Συχνότητα 300 Hz: ηχοπετάσματα τύπου άγκιστρο, μείωση θορύβου κατά 5%



Σχήμα 3.78: Συχνότητα 300 Hz: ηχοπετάσματα κάθετα στο έδαφος, μείωση θορύβου κατά 5%

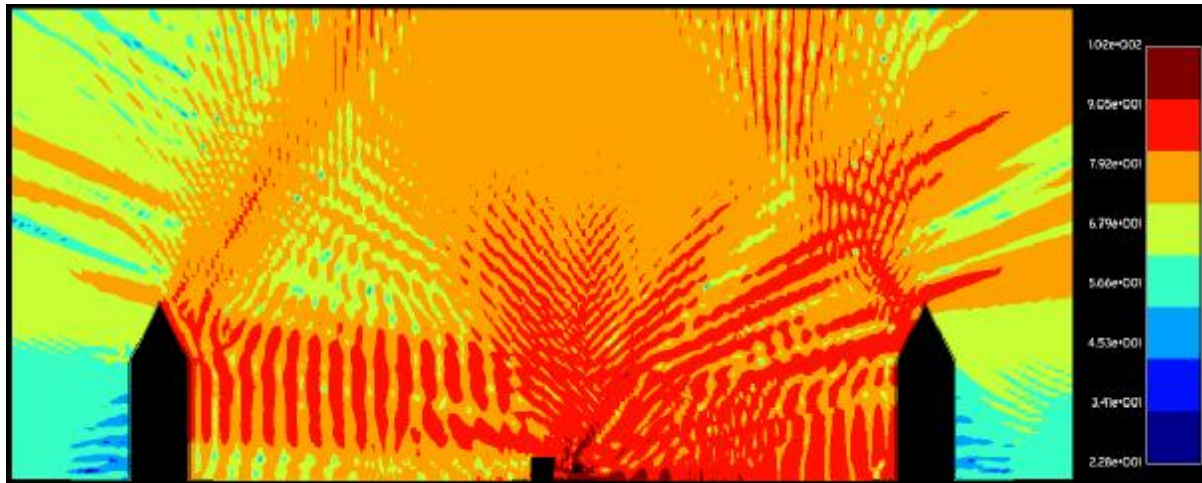


Σχήμα 3.79: Συχνότητα 300 Hz: ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς τις κατοικίες, μείωση θορύβου κατά 12%

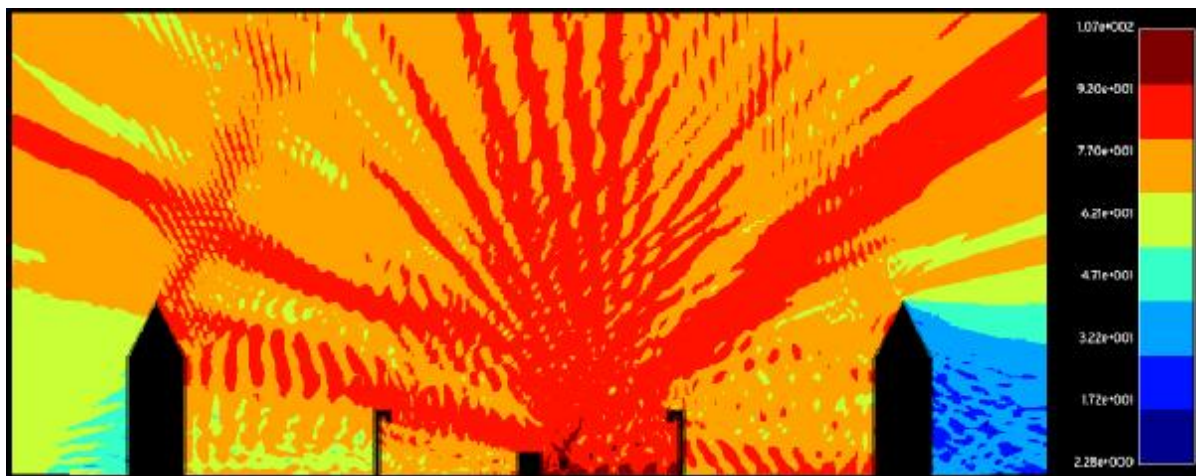


Σχήμα 3.80: Συχνότητα 300 Hz: ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς το οδόστρωμα, μείωση θορύβου κατά 2%

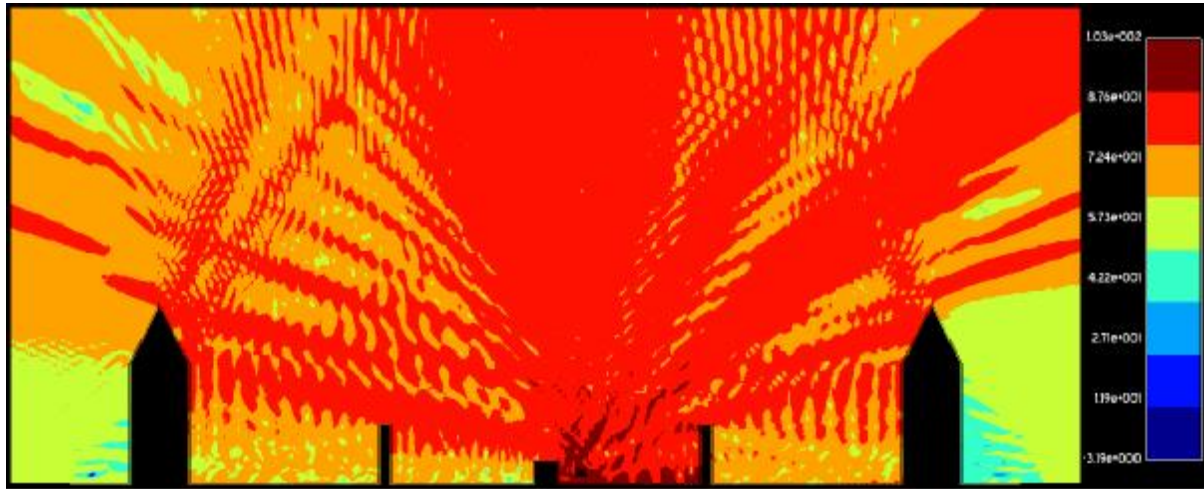
Ρ. Συχνότητα 350 Hz



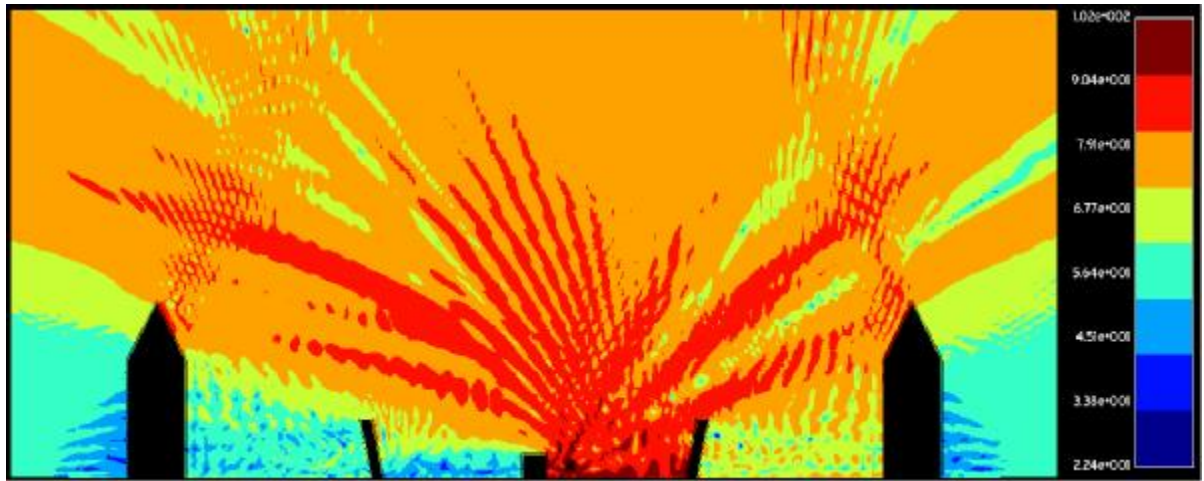
Σχήμα 3.81: Συχνότητα 350 Hz: χωρίς ηχοπετάσματα



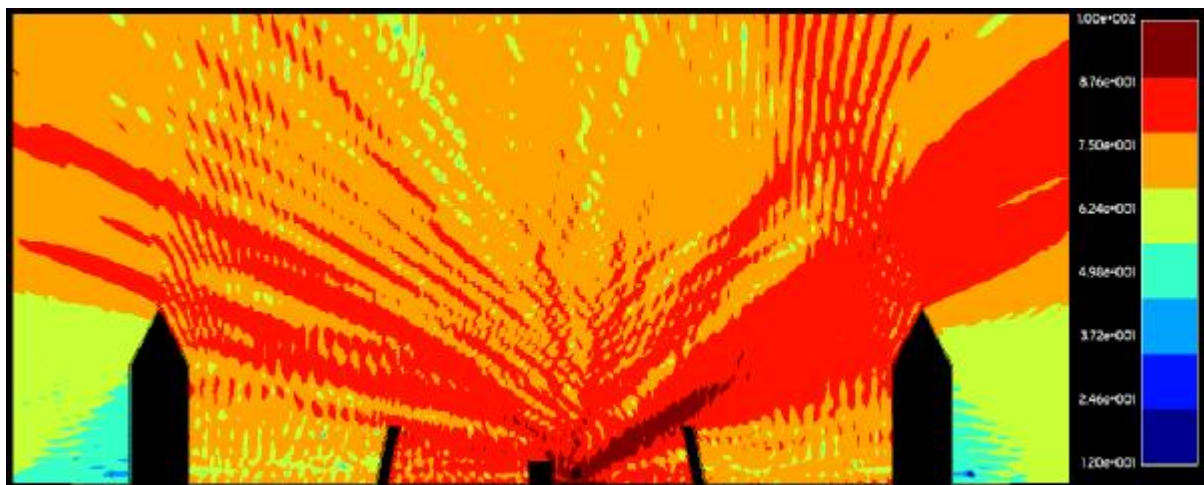
Σχήμα 3.82: Συχνότητα 350 Hz: ηχοπετάσματα τύπου άγκιστρο, μείωση θορύβου κατά 9%



Σχήμα 3.83: Συχνότητα 350 Hz: ηχοπετάσματα κάθετα στο έδαφος, μείωση θορύβου κατά 12%

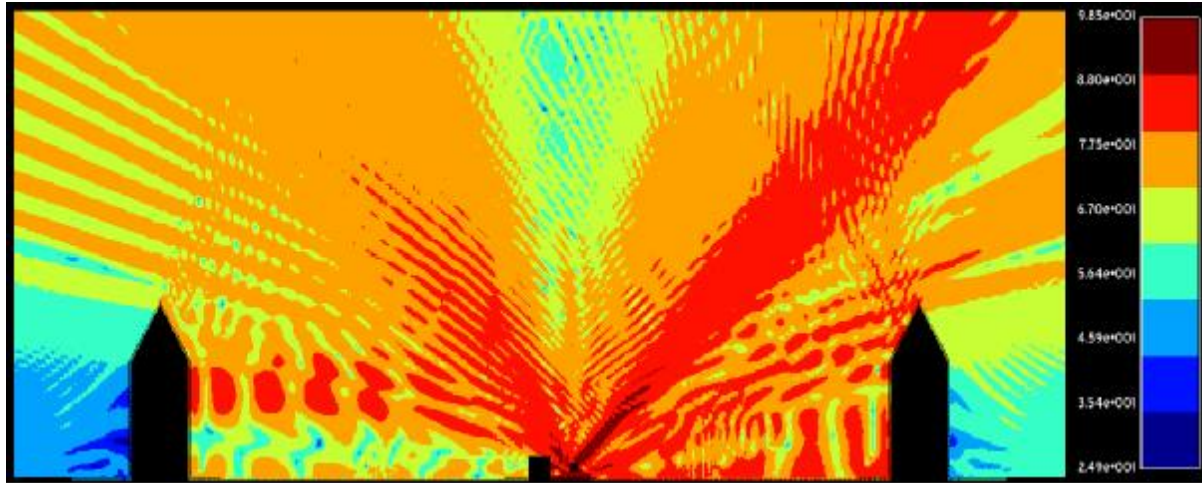


Σχήμα 3.84: Συχνότητα 350 Hz: ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς τις κατοικίες, μείωση θορύβου κατά 17%

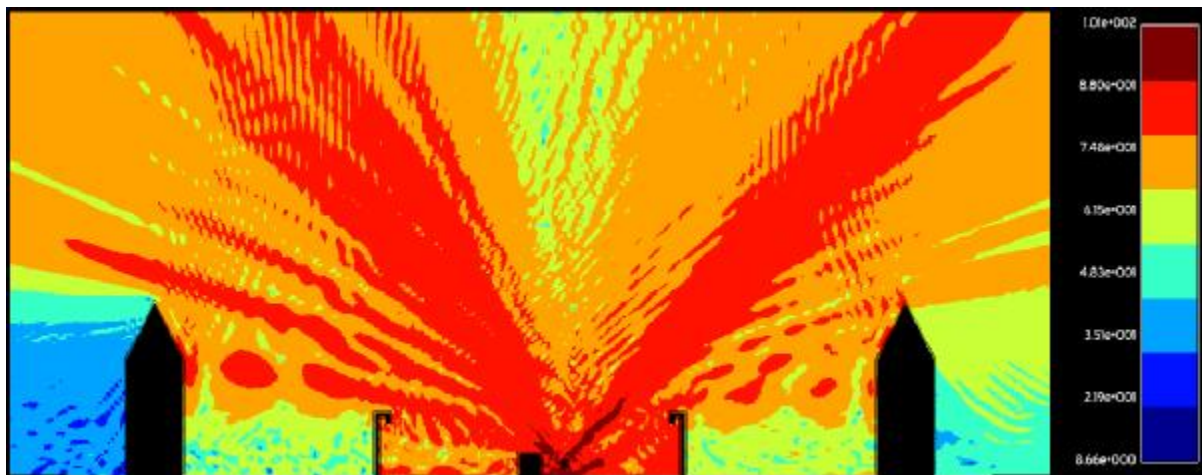


Σχήμα 3.85: Συχνότητα 350 Hz: ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς το οδόστρωμα, μείωση θορύβου κατά 12%

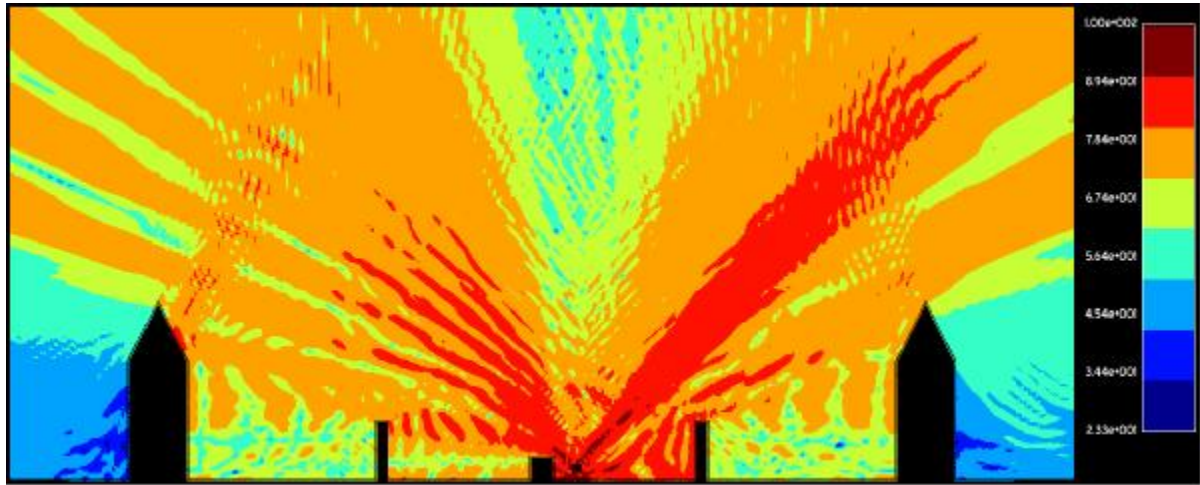
Σ. Συχνότητα 400 Hz



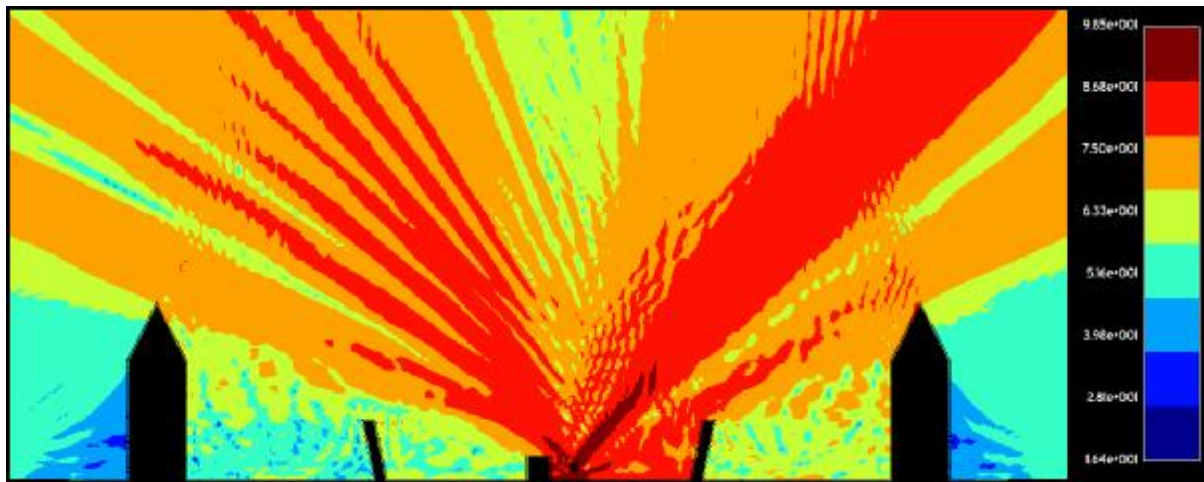
Σχήμα 3.86: Συχνότητα 400 Hz: χωρίς ηχοπετάσματα



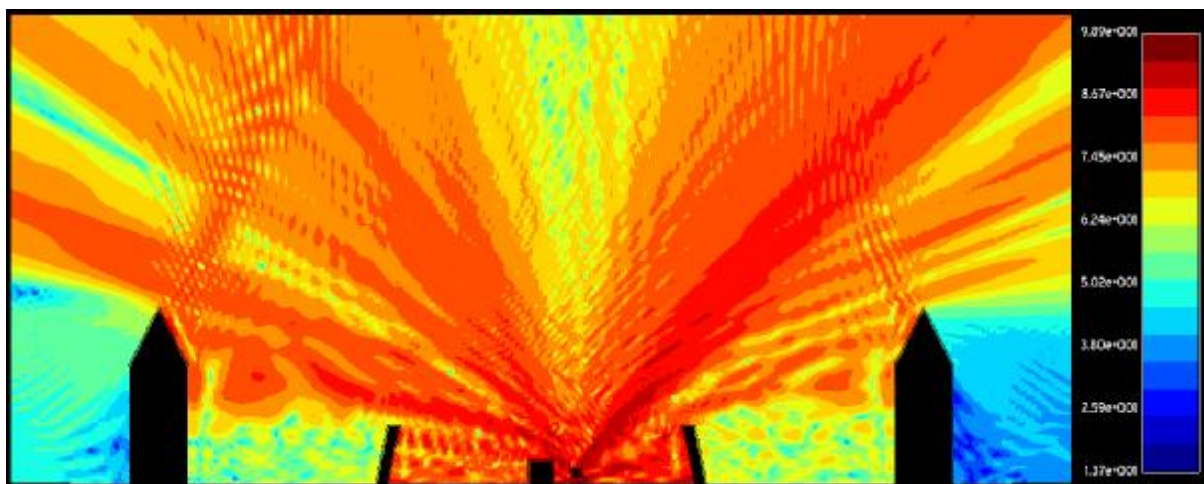
Σχήμα 3.87: Συχνότητα 400 Hz: ηχοπετάσματα τύπου άγκιστρο, μείωση θορύβου κατά 26%



Σχήμα 3.88: Συχνότητα 400 Hz: ηχοπετάσματα κάθετα στο έδαφος, μείωση θορύβου κατά 16%



Σχήμα 3.89: Συχνότητα 400 Hz: ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς τις κατοικίες, μείωση θορύβου κατά 24%



Σχήμα 3.90: Συχνότητα 400 Hz: ηχοπετάσματα κεκλιμένα 11° προς το οδόστρωμα, μείωση θορύβου κατά 25%

3.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τους πίνακες και τα γραφήματα έχουν αρκετό ενδιαφέρον καθώς όχι μόνο καθιστούν σαφές ότι η χρήση ηχοπετασμάτων σε αυτοκινητόδρομους συμβάλλει αποτελεσματικά στη μείωση της ηχορύπανσης σε κατοικημένες περιοχές, ειδικά για τις μεσαίες συχνότητες αλλά υποδεικνύουν και τον κατάλληλο τύπο ηχοπετάσματος για κάθε ομάδα συχνοτήτων. Οι συχνότητες έχουν χωριστεί σε 3 κλάσεις, χαμηλές (από 50Hz - 120Hz), μεσαίες (από 130 Hz -250 Hz) και υψηλές (από 300 Hz - 400 Hz). Για τα συμπεράσματα χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος των ποσοστών μείωσης έντασης θορύβου για κάθε τύπο ηχοπετάσματος ξεχωριστά σε καθεμία από τις κλάσεις συχνοτήτων.

Παρατηρούμε ότι η ένταση του θορύβου μειώνεται δραστικά με τη χρήση ηχοπετασμάτων και αυτό φαίνεται αν συγκρίνουμε την πρώτη εικόνα κάθε συχνότητας, που μας δείχνει το πειραματικό μοντέλο χωρίς τη χρήση ηχοπετασμάτων, με τις υπόλοιπες της ίδιας συχνότητας. Από την σύγκριση αυτή προέκυψε ο πίνακας 3.1 από τον οποίο είναι φανερό ότι η μείωση της έντασης του θορύβου μπορεί να αγγίξει ακόμα και το **43%** ποσοστό που αντιστοιχεί σε 4 επίπεδα της δεδομένης χρωματικής κλίμακας.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πειραματικού μοντέλου, που αναπαρίστανται στο γράφημα 3.6, έχουμε:

- **Για τις χαμηλές συχνότητες (50Hz – 120Hz)**

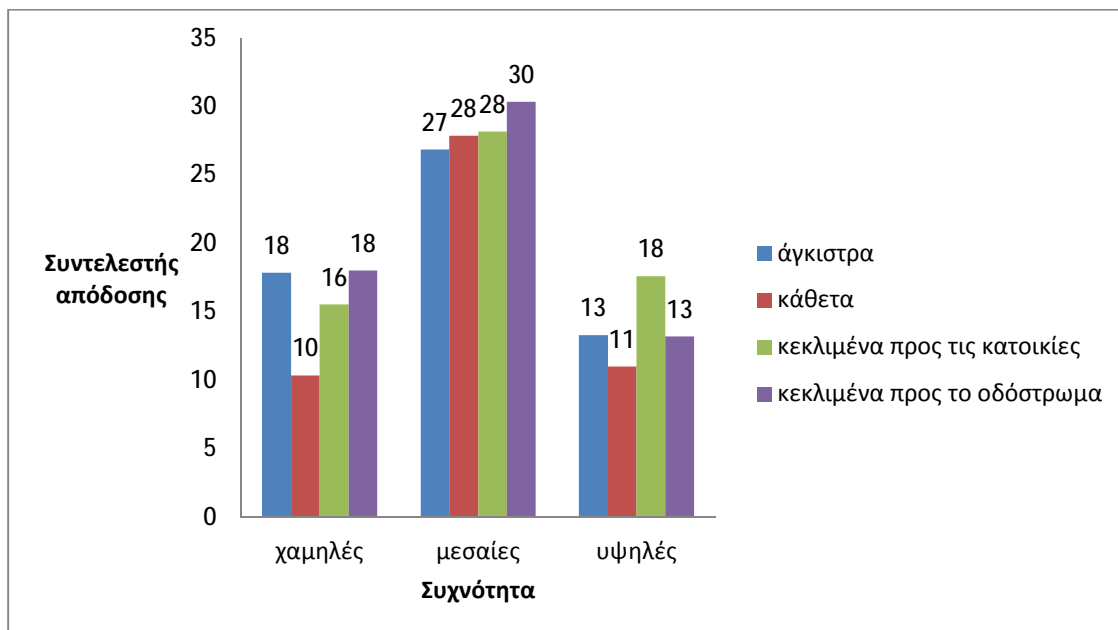
Σε αυτήν την κλάση συχνοτήτων τόσο τα τύπου άγκιστρο όσο και τα κεκλιμένα προς το οδόστρωμα ηχοπετάσματα είναι εξίσου αποτελεσματικά με ποσοστό 18%. Για τα κάθετα ηχοπετάσματα το αντίστοιχο ποσοστό είναι 10% και για τα κεκλιμένα προς τις κατοικίες είναι 16%.

- **Για τις μεσαίες συχνότητες (130Hz – 250Hz)**

Αποτελεσματικότερα αποδεικνύονται τα κεκλιμένα προς το οδόστρωμα ηχοπετάσματα. Πιο συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι το ποσοστό μείωσης του θορύβου είναι 30% ενώ με τη χρήση καθέτων και κεκλιμένων προς τις κατοικίες είναι 28% και για ηχοπετάσματα τύπου άγκιστρα 27%.

- **Για τις ψηλές συχνότητες (300Hz – 400Hz)**

Πιο αποδοτικά είναι τα ηχοπετάσματα που είναι κεκλιμένα προς τις κατοικίες. Η μείωση του θορύβου σε αυτή την περίπτωση αγγίζει το 18%. Για τα κεκλιμένα προς το οδόστρωμα ηχοπετάσματα είναι 13%, για τα τύπου άγκιστρα είναι 13% και για τα κάθετα στο έδαφος 11%.



Γράφημα 3.6 : Μέσος όρος αποδόσεων για κάθε κλάση συχνοτήτων

Γενικά οι τάσεις του συντελεστή απόδοσης για το διάστημα συχνοτήτων που χρησιμοποιήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία συγκλίνουν για όλους τους τύπους ηχοπετασμάτων. Πιο συγκεκριμένα από τα γραφήματα παρατηρούμε ότι οι μέγιστες τιμές απόδοσης των ηχοπετασμάτων επιτυγχάνονται στις μεσαίες συχνότητες. Στις χαμηλές συχνότητες υπάρχει πτωτική τάση της απόδοσης καθώς αυξάνεται η συχνότητα. Τέλος στις υψηλές συχνότητες σημειώνεται μία σχεδόν κατακόρυφη μείωση της απόδοσης στα 300 Hz με ανοδική πορεία στη συνέχεια.

Η ηχορύπανση αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες ποιότητας διαβίωσης σε κατοικημένες περιοχές, καθώς η ύπαρξη έντονης ηχορύπανσης έχει συνδεθεί με καταστάσεις άγχους, κεφαλαλγιών, κ.α. καταστάσεις που δυσχεραίνουν την καθημερινή ζωή των κατοίκων μιας περιοχής. Αυτό το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα έντονο όταν μια κατοικημένη περιοχή βρίσκεται κοντά σε οδικές αρτηρίες υψηλής κυκλοφορίας. Το συμπέρασμα που συνάγεται είναι ότι η χρήση του κατάλληλου τύπου ηχοπετάσματος, μπορεί να συμβάλλει αποφασιστικά στη μείωση της ηχορύπανσης και αντίστροφα ότι για κάθε ομάδα συχνοτήτων υπάρχει ο κατάλληλος τύπος ηχοπετάσματος που θα συμβάλλει αποφασιστικά στη μείωση της ηχορύπανσης προσφέροντας έτσι τη δυνατότητα για μια ποιοτικότερη καθημερινή διαβίωση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Σκαρλάτος Δημήτρης, *Εφαρμοσμένη Ακουστική*, Εκδόσεις GOTSIS, Πάτρα, 2008.
2. Παναγιώτης Δρακάτος, *Τεχνική Διαγνωστική-Προγνωστική (Τόμος 3: Ακουστική Μηχανών – Ηχορρύπανση)*, Πάτρα, 1992
3. Έκθεση του ΕΚΠΑΑ: «Ελλάδα- Η κατάσταση του Περιβάλλοντος για το 2008»
4. Δ.Τσανακτσίδης, Δ.Τσίτσουλας, Διπλωματική Εργασία, *Σύγχρονα Συστήματα Εξοπλισμού των Οδών*, Α.Π.Θ., Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Θεσσαλονίκη, 2002-2003
5. Βασίλειος Βακαλόπουλος, Διπλωματική Εργασία, *Επίλυση Τρισδιάστατων Ακουστικών Προβλημάτων με τη βοήθεια της Δυναμικής Μεθόδου Συνοριακών Στοιχείων*, Ε.Μ.Π., Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Αθήνα, 2008
6. Κουκιάς Σταμάτιος, Διπλωματική Εργασία, *Έλεγχος θορύβου σε εξωτερικούς χώρους με την χρήση ηχοπετασμάτων και σε εσωτερικούς χώρους με την χρήση διαχωριστικών επιφανειών. Ανάλυση και μελέτη με τη βοήθεια αναλυτικών, αριθμητικών και πειραματικών μεθόδων*, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πάτρα, 2007
7. Τσινόπουλος Στέφανος, Διδακτορική Διατριβή, *Μέθοδος συνοριακών στοιχείων σε προβλήματα σκέδασης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας*, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, 1999
8. Αγγαντιάρης Π.Ιωάννης, Διδακτορική διατριβή, *Επίλυση προβλημάτων αλληλεπίδρασης ακουστικού-ελαστικού μέσου με την μέθοδο των συνοριακών στοιχείων*, Ιούλιος 2000
9. Σκαρλάτος Δημήτρης, *Δραστηριότητες του ΕΛΙΝΑ στην πρόβλεψη και αντιμετώπιση του κυκλοφοριακού θορύβου*, Ημερίδα ΤΕΕ: Οι επιπτώσεις της ηχορύπανσης στα αστικά κέντρα – Αναγκαία μέτρα και παρεμβάσεις, Αθήνα, 14 Ιανουαρίου, 2008
10. Ιωάννης Ν. Μουρτζόπουλος, *Σημειώσεις Ηλεκτροακουστικής 1*, Πάτρα, 2008
11. Εβελύν Βαφείδου, Τρύφων Γκινάλας, Σπύρος Δρίβας, *Ο θόρυβος στην εργασία, Ελληνικό Ινστιτούτο Υγιεινής και Ασφάλειας της Εργασίας*, Αθήνα, 2005
12. Agnantiaris JP, Polyzos D, Beskos DE, *Some studies in on DR-BEM for elastodynamic analysis. Computational Mechanics*, 17, pp. 270-277 , 1996
13. Brebbia CA, *Boundary Elements Method for Engineers*, Pentech Press , 1984
14. Rossing Thomas D. (Ed.), *Springer Handbook of Acoustics*, Springer, 2007

15. F.Alton Everest, *The master handbook of acoustics*, McGraw-Hill/TAB Electronics, 2001
16. Defrance J., Gabillet Y., *A new analytical method for the calculation of outdoor noise propagation*, Applied Acoustics 57, pp.109-127, 1999

17. Sound pressure, άρθρο στην Wikipedia,
http://en.wikipedia.org/wiki/Sound_pressure
18. Ιστοσελίδα <http://www.ixoripansi.gr/>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Παραθέτουμε τον κώδικα σε γλώσσα Python, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την προσομείωση του συστήματός μας.

Περίπτωση 1^η: Ηχοπετάσματα με άγκυστρα (συχνότητα 50Hz)

```
#-----  
# modell  
#-----  
  
# Problem Parameters  
x1 = 1.0  
x2 = 3.0  
x3 = 13.0  
x4 = 13.5  
x5 = 12.0  
x11 = 12.5  
x6 = 30.0  
x7 = 32.0  
x8 = 32.5  
x9 = 35.0  
x10 = 40.0  
y1 = 2.0  
y2 = 1.0  
y3 = 3.0  
y4 = 5.0  
y5 = 5.5  
y6 = 4.5  
y7 = 9.0  
y8 = 10.0  
y9 = 15.0  
rad = 0.3  
freq = 50.  
omega = 2.0 * 3.1415 * freq  
ndivperwavelength = 4  
velocity = 340  
density = 1.0  
damping = 0.0  
  
divlen = 0.3  
divLen_int = 0.4
```

```

load = 1.0
#
elem_type = EL3QL # or EL2LL

#
lnid = 0
ipid = 0
#-----
# set 2d plane
modelSet2dInplane()

# create points
pt1=ptCreateCoord(0, x1, 0, 0)
pt2=ptCreateCoord(0, x1, y1, 0)
pt3=ptCreateCoord(0, x3, 0, 0)
pt4=ptCreateCoord(0, x3, y4, 0)
pt5=ptCreateCoord(0, x11, y4, 0)
pt6=ptCreateCoord(0, x11, y6, 0)
pt7=ptCreateCoord(0, x5, y6, 0)
pt8=ptCreateCoord(0, x5, y5, 0)
pt9=ptCreateCoord(0, x4, y5, 0)
pt10=ptCreateCoord(0, x4, 0, 0)
##### gia to spiti
pt11=ptCreateCoord(0, x6, 0, 0)
pt12=ptCreateCoord(0, x6, y8, 0)
pt13=ptCreateCoord(0, x8, y9, 0)
pt14=ptCreateCoord(0, x9, y8, 0)
pt15=ptCreateCoord(0, x9, 0, 0)

pt23=ptCreateCoord(0, x10, 0, 0)
pt24=ptCreateCoord(0, 0, y1, 0)

# create lines
ln1=strlnCreatePt(0, pt1, pt2)
ln2=strlnCreatePt(0, pt2, pt24)
ln3=strlnCreatePt(0, pt1, pt3)
ln4=strlnCreatePt(0, pt3, pt4)
ln5=strlnCreatePt(0, pt4, pt5)
ln6=strlnCreatePt(0, pt5, pt6)
ln7=strlnCreatePt(0, pt6, pt7)
ln8=strlnCreatePt(0, pt7, pt8)
ln9=strlnCreatePt(0, pt8, pt9)
ln10=strlnCreatePt(0, pt9, pt10)
ln11=strlnCreatePt(0, pt10, pt11)
ln11=strlnCreatePt(0, pt11, pt12)
ln11=strlnCreatePt(0, pt12, pt13)
ln11=strlnCreatePt(0, pt13, pt14)
ln11=strlnCreatePt(0, pt14, pt15)
ln12=strlnCreatePt(0, pt15, pt23)

lines = getSelected(LINES)

lnReflect(lines, 1, 0, 0, True)

```

```

# Create the circle
pt25=ptCreateCoord(0, x2, y2, 0) # centre of the circle
pt26=ptCreateCoord(0, x2+rad, y2, 0)
pt27=ptCreateCoord(0, x2, y2+rad, 0)

circCreatePtByCenter(pt25, pt26, pt27)

## internal surfaces
# surface 1
# points for the internal surface
pt28=ptCreateCoord(0, 3.4, 0.1, 0)
pt29=ptCreateCoord(0, 3.4, 40.0, 0)
pt30=ptCreateCoord(0, 45.0, 40.0, 0)
pt31=ptCreateCoord(0, 45.0, 0.1, 0)
pt32=ptCreateCoord(0, 35.1, 0.1, 0)
pt33=ptCreateCoord(0, 35.1, 10.1, 0)
pt34=ptCreateCoord(0, 32.5, 15.2, 0)
pt35=ptCreateCoord(0, 29.9, 10.1, 0)
pt36=ptCreateCoord(0, 29.9, 0.1, 0)
pt37=ptCreateCoord(0, 13.6, 0.1, 0)
pt38=ptCreateCoord(0, 13.6, 5.6, 0)
pt39=ptCreateCoord(0, 11.9, 5.6, 0)
pt40=ptCreateCoord(0, 11.9, 4.4, 0)
pt41=ptCreateCoord(0, 12.6, 4.4, 0)
pt42=ptCreateCoord(0, 12.6, 4.9, 0)
pt43=ptCreateCoord(0, 12.9, 4.9, 0)
pt44=ptCreateCoord(0, 12.9, 0.1, 0)

# lines for the internal surface

ln23 = strlnCreatePt(0, pt28, pt29)
ln24 = strlnCreatePt(0, pt29, pt30)
ln25 = strlnCreatePt(0, pt30, pt31)
ln26 = strlnCreatePt(0, pt31, pt32)
ln27 = strlnCreatePt(0, pt32, pt33)
ln28 = strlnCreatePt(0, pt33, pt34)
ln29 = strlnCreatePt(0, pt34, pt35)
ln30 = strlnCreatePt(0, pt35, pt36)
ln31 = strlnCreatePt(0, pt36, pt37)
ln32 = strlnCreatePt(0, pt37, pt38)
ln33 = strlnCreatePt(0, pt38, pt39)
ln34 = strlnCreatePt(0, pt39, pt40)
ln35 = strlnCreatePt(0, pt40, pt41)
ln36 = strlnCreatePt(0, pt41, pt42)
ln37 = strlnCreatePt(0, pt42, pt43)
ln38 = strlnCreatePt(0, pt43, pt44)
ln39 = strlnCreatePt(0, pt44, pt28)

srfid1 = plnSrfCreateLn(0, (ln23, ln24, ln25, ln26, ln27, ln28, ln29, ln30,
ln31, ln32, ln33, ln34, ln35, ln36, ln37, ln38, ln39))

ipCreateAutoOnSurface (srfid1, divLen_int)

# surface 2

```

```

pt35=ptCreateCoord(0, -45.0, 0.1, 0)
pt36=ptCreateCoord(0, -45.0, 40.0, 0)
pt37=ptCreateCoord(0, 3.4, 40.0, 0)
pt38=ptCreateCoord(0, 3.4, 1.4, 0)
pt39=ptCreateCoord(0, 2.6, 1.4, 0)
pt40=ptCreateCoord(0, 2.6, 0.1, 0)
pt41=ptCreateCoord(0, 1.1, 0.1, 0)
pt42=ptCreateCoord(0, 1.1, 2.1, 0)
pt43=ptCreateCoord(0, -1.1, 2.1, 0)
pt44=ptCreateCoord(0, -1.1, 0.1, 0)
pt45=ptCreateCoord(0, -12.9, 0.1, 0)
pt46=ptCreateCoord(0, -12.9, 4.9, 0)
pt47=ptCreateCoord(0, -12.6, 4.9, 0)
pt48=ptCreateCoord(0, -12.6, 4.4, 0)
pt49=ptCreateCoord(0, -11.9, 4.4, 0)
pt50=ptCreateCoord(0, -11.9, 5.6, 0)
pt51=ptCreateCoord(0, -13.6, 5.6, 0)
pt52=ptCreateCoord(0, -13.6, 0.1, 0)
pt53=ptCreateCoord(0, -29.9, 0.1, 0)
pt54=ptCreateCoord(0, -29.9, 10.1, 0)
pt55=ptCreateCoord(0, -32.5, 15.2, 0)
pt56=ptCreateCoord(0, -35.1, 10.1, 0)
pt57=ptCreateCoord(0, -35.1, 0.1, 0)

# lines for the internal surface 2

#####
ln40 = strlnCreatePt(0, pt35, pt36)
ln41 = strlnCreatePt(0, pt36, pt37)
ln42 = strlnCreatePt(0, pt37, pt38)
ln43 = strlnCreatePt(0, pt38, pt39)
ln44 = strlnCreatePt(0, pt39, pt40)
ln45 = strlnCreatePt(0, pt40, pt41)
ln46 = strlnCreatePt(0, pt41, pt42)
ln47 = strlnCreatePt(0, pt42, pt43)
ln48 = strlnCreatePt(0, pt43, pt44)
ln49 = strlnCreatePt(0, pt44, pt45)
ln50 = strlnCreatePt(0, pt45, pt46)
ln51 = strlnCreatePt(0, pt46, pt47)
ln52 = strlnCreatePt(0, pt47, pt48)
ln53 = strlnCreatePt(0, pt48, pt49)
ln54 = strlnCreatePt(0, pt49, pt50)
ln55 = strlnCreatePt(0, pt50, pt51)
ln56 = strlnCreatePt(0, pt51, pt52)
ln57 = strlnCreatePt(0, pt52, pt53)
ln58 = strlnCreatePt(0, pt53, pt54)
ln59 = strlnCreatePt(0, pt54, pt55)
ln60 = strlnCreatePt(0, pt55, pt56)
ln61 = strlnCreatePt(0, pt56, pt57)
ln62 = strlnCreatePt(0, pt57, pt35)

srfid2 = plnSrfCreateLn(0, (ln40, ln41, ln42, ln43, ln44, ln45, ln46, ln47,
ln48, ln49, ln50, ln51, ln52, ln53, ln54, ln55, ln56, ln57, ln58, ln59, ln60,
ln61, ln62))
ipCreateAutoOnSurface (srfid2, divLen_int)

```



```

# surface 3

pt58=ptCreateCoord(0, 2.6, 0.6, 0)
pt59=ptCreateCoord(0, 3.4, 0.6, 0)
pt60=ptCreateCoord(0, 3.4, 0.1, 0)
pt61=ptCreateCoord(0, 2.6, 0.1, 0)

# lines for the internal surface 3

ln63 = strlnCreatePt(0, pt58, pt59)
ln64 = strlnCreatePt(0, pt59, pt60)
ln65 = strlnCreatePt(0, pt60, pt61)
ln66 = strlnCreatePt(0, pt61, pt58)

srfid3 = plnSrfCreateLn(0, (ln63, ln64, ln65, ln66))

ipCreateAutoOnSurface (srfid3, divLen_int)

# create the material
matid = 1
matCreate(matid, "air", ACOUSTIC, (velocity, density, damping))

# create the region
regid = 1
regCreate(regid, "acoustic", matid)

# attach the lines to the region
lines = getSelected(LINES)

regAttachLine (regid, lines)

# attach the internal point surface into the region
regAttachSurface (regid, srfid1)
regAttachSurface (regid, srfid2)
regAttachSurface (regid, srfid3)

## set the mesh size to the lines
lnMeshSetSize(lines, divlen)

# mesh the lines
for lnid in lines:
    lnMesh(lnid, elem_type)

lnReverse ((1,2,33,34,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32), True)

## merge the possible double nodes

ndMerge()
## renumber nodes
ndRenumber()

#

```

```

## create a load case
loadcaseid = 1
mainLC = loadCaseCreateHarmonic(loadcaseid, "Harmonic Case", (omega, ),
(0.0, ))
loadCaseSetDefaultZeroField(loadcaseid, FIELD_T)

#
# Attach the region to the loadcase
loadCaseAttachReg(loadcaseid, regid)
#
# Set BCs
selectById(LINES, 33, 34)
selectAttachedTo(ELEMENTS, LINES)
elemlist=getSelected(ELEMENTS)

value_im = 0.0
loadCaseApplyElemBC (loadcaseid, 0, 0, elemlist, FIELD_U, 0, load, value_im)

####
selectAllEntities()
loadCaseSetActive(mainLC)
loadCaseSolveActive( False )
loadCaseReadResultsActive()

```