



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης
Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα : Σχεδίαση και Παραγωγή Προϊόντων

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Τίτλος

Μελέτη μη-κλασικών ηχομονωτικών φρακτών

Analysis of non-classical sound insulating barriers

ΥΠΟ

Πολίτη Δήμητρα,

A.M. 2020019006

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

Σταυρουλάκης Γεώργιος

ΧΑΝΙΑ 2024

Copyright © 2024, Πολίτη Δήμητρα

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος, All rights reserved.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	5
Περίληψη.....	6
Abstract	6
Κεφάλαιο 1 - Γενικά	7
Εισαγωγή	7
Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	8
Κεφάλαιο 2 - Ηχητικοί κρύσταλλοι (sonic crystals).....	10
Γενική περιγραφή.....	10
Ηχητικοί κρύσταλλοι - Σκεδαστές	10
Χάσμα συχνοτήτων - Band gaps.....	11
Απώλεια εισαγωγής - Insertion loss.....	12
Κεφάλαιο 3 - Διάθλαση κύματος	14
Κεφάλαιο 4 - Γεωμετρία σκεδαστών.....	16
Παράμετροι που επηρεάζουν	16
Μορφή σκεδαστών	16
Διάμετρο σκεδαστών	17
Πλήθος σκεδαστών	18
Συντελεστής συμπλήρωσης - Filling factor ff.....	19
Κεφάλαιο 5 - Ανάλυση μοντέλου	20
Διάδοση του ήχου	20
IBZ (Irreducible Brillouin Zone) και περιοδικές δομές	20
Κεφάλαιο 6 - Μοντελοποίηση πειράματος	23
Προσομοίωση αρχικής δομής χωρίς και με κυκλικούς σκεδαστές	24
Κεφάλαιο 7 - Διαφορετικά σχήματα σκεδαστών.....	30
Προσομοίωση με τετραγωνικούς σκεδαστές	30
Προσομοίωση με ελλειπτικούς σκεδαστές.....	32
Οριζόντια τοποθέτηση σκεδαστών	32
Κατακόρυφη τοποθέτηση σκεδαστών	34
Κεφάλαιο 8 - Σκεδαστές με ίση απόσταση πηγή-δέκτη	37
Προσομοίωση κυκλικών σκεδαστών με ίση απόσταση από πηγή-δέκτη	37
Προσομοίωση τετραγωνικών σκεδαστών με ίση απόσταση από πηγή-δέκτη	40
Προσομοίωση ελλειπτικών σκεδαστών με ίση απόσταση από πηγή-δέκτη.....	42
Οριζόντια τοποθέτηση σκεδαστών	42
Κατακόρυφη τοποθέτηση σκεδαστών	44
Κεφάλαιο 9 - Σκεδαστές σε εξαγωνικό πλέγμα	47

Κεφάλαιο 10 - Σύνοψη αποτελεσμάτων	50
Κεφάλαιο 11 - Προκλήσεις και προοπτικές	51
Βιβλιογραφία	52

Ευχαριστίες

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του μεταπτυχιακού προγράμματος «Σχεδίαση και Παραγωγή Προϊόντων» του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέπων καθηγητή μου, κύριο Σταυρουλάκη Γεώργιο, για την επιστημονική του καθοδήγηση και όλες τις σημαντικές πληροφορίες που μου προσέφερε για την ολοκλήρωση της διατριβής μου καθώς και τις γνώσεις που μοιράστηκε μαζί μου κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους καθηγητές Αντωνιάδη Αριστομένη και Μαρινάκη Ιωάννη, για τη διδασκαλία τους και την συμμετοχή τους ως μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής.

Επιπλέον, ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στον κύριο Παπαδάκη Νικόλαο που μου προσέφερε τη βοήθειά του και τις γνώσεις του πάνω στον τομέα της ακουστικής.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου και στους φίλους μου για όλη τη στήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο τη διερεύνηση της ακουστικής συμπεριφοράς ηχοπετασμάτων της κατηγορίας ηχητικών κρυστάλλων (sonic crystals). Στα πλαίσια της διπλωματικής διερευνήθηκε η αποτελεσματικότητα συστοιχιών ακουστικών στοιχείων στην μείωση του θορύβου που δημιουργείται από ακουστική πηγή. Πιο συγκεκριμένα υπολογίστηκε η μείωση της ακουστικής πίεσης σε διαφορετικές συχνότητες από την τοποθέτηση ηχητικών κρυστάλλων (υπολογισμός δείκτη ηχομείωσης ηχοπετασμάτων-insertion loss). Ο υπολογισμός πραγματοποιήθηκε με την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων σε θεωρητικό επίπεδο. Στην παρούσα διπλωματική, διερευνήθηκαν πιθανές διαφορετικές μορφές συστοιχιών ώστε να επιτευχθεί επιθυμητό κενό ζώνης (band gap).

Abstract

This study aims to examine the acoustic behavior of sound curtains categorized as sonic crystals. As part of the research project, we will assess the effectiveness of arrays of acoustic elements in mitigating noise produced by acoustic sources. More specifically, we will calculate the reduction in acoustic pressure at various frequencies resulting from the placement of sound crystals (calculation of the reduction index of sound curtains - insertion loss). These calculations will be conducted using the finite element method at a theoretical level. In this thesis, we looked into different ways of arranging arrays to create specific band gaps.

Κεφάλαιο 1 - Γενικά

Εισαγωγή

Σε ένα διαρκώς αναπτυσσόμενο αστικοποιημένο τοπίο, η επικράτηση της ηχορύπανσης έχει γίνει σημαντική ανησυχία τόσο για τη δημόσια υγεία όσο και για την ποιότητα ζωής. Ως απάντηση σε αυτή την πρόκληση, η μελέτη που παρουσιάζεται εδώ εμβαθύνει στη σφαίρα των μη κλασικών ηχομονωτικών φραγμών, εστιάζοντας συγκεκριμένα σε ηχητικούς σκεδαστές (scatterers) που κατηγοριοποιούνται ως ηχητικοί κρύσταλλοι (sonic crystals). Οι ηχητικοί κρύσταλλοι αντιπροσωπεύουν μια απόκλιση από τα παραδοσιακά ηχομονωτικά υλικά, προσφέροντας μια πολλά υποσχόμενη οδό για πιο αποτελεσματικό μετριασμό του θορύβου.

Ο πρωταρχικός στόχος αυτής της έρευνας είναι να αναλύσει σε θεωρητικό επίπεδο την ακουστική συμπεριφορά των ηχητικών σκεδαστών, αποσαφηνίζοντας τις δυνατότητές τους. Η παρακάτω έρευνα επικεντρώνεται στην αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας συστοιχιών ακουστικών στοιχείων, παρόμοια με ηχητικούς κρυστάλλους, στην εξασθένιση του θορύβου που δημιουργείται από διάφορες ακουστικές πηγές. Η κύρια μέτρηση για αυτήν την αξιολόγηση θα είναι ο υπολογισμός του δείκτη μείωσης των ηχητικών σκεδαστών, που συνήθως αναφέρεται ως απώλεια εισαγωγής (insertion loss).

Επιπλέον, η παρακάτω έρευνα εκτείνεται πέρα από τα συμβατικά όρια της ηχομόνωσης. Σκοπεύει στην ανάλυση διαφορετικών διατάξεων και μορφών συστοιχιών, με στόχο την παρουσίαση συγκεκριμένων ιδιοτήτων κενού ζώνης που ενισχύουν τις ηχομονωτικές ικανότητες αυτών των μη κλασικών φραγμών. Στη μελέτη διερευνάται μια σειρά από διαμορφώσεις συστοιχιών, με έμφαση στη βελτιστοποίηση της διάταξης για την επίτευξη μέγιστης μείωσης θορύβου εντός στοχευμένων περιοχών συχνότητας.

Συνοπτικά, αυτή η μελέτη όχι μόνο συμβάλλει στον εξελισσόμενο τομέα της ακουστικής μηχανικής, αλλά αντιμετωπίζει επίσης την αυξανόμενη ανάγκη για καινοτόμες λύσεις για τον μετριασμό της ηχορύπανσης. Εξετάζοντας την ακουστική απόδοση των ηχητικών κρυστάλλων και τις πιθανές παραλλαγές τους, θα γίνει μια προσπάθεια για παροχή γνώσεων που θα μπορούσαν να διαμορφώσουν το μέλλον των μη κλασικών ηχομονωτικών φραγμών, ανοίγοντας το δρόμο για βιώσιμες και αποτελεσματικές στρατηγικές ελέγχου του θορύβου σε αστικά περιβάλλοντα. Οι επόμενες ενότητες αυτής της διατριβής περιγράφουν τη μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις, παρουσιάζουν τα αποτελέσματα που προέκυψαν και επεξηγούν τις επιπτώσεις και τις πιθανές μελλοντικές κατευθύνσεις αυτής της έρευνας.

Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Παρακάτω αναφέρεται περιληπτικά εργασίες που εξετάζουν τη συμπεριφορά των ηχητικών φραγμών σε διαφορετικές εφαρμογές σκοπεύοντας στη μείωση των επιπέδων ήχου σε διαφορετικές συχνότητες.

Η πρώτη εμφάνιση της δυνατότητας δημιουργίας ακουστικού φραγμού χρησιμοποιώντας συστοιχίες προήλθε από μια καλλιτεχνική εγκατάσταση στους κήπους Fundacion Juan March στη Μαδρίτη. Αυτό το γλυπτό περιλάμβανε πολλούς κάθετους μεταλλικούς σωλήνες σε ορθογώνια διάταξη. Οι Martinez-Sala R., Sancho J., Sanchez J.V., Gomez V., Llinares J., Meseguer F. (1995) πραγματοποίησαν μετρήσεις τοποθετώντας μικρόφωνα γύρω από αυτό το έργο, τα οποία αποκάλυψαν σημαντικά αποτελέσματα μείωσης του ήχου σε συγκεκριμένες περιοχές συχνοτήτων. [1], [21], [22]



Εικόνα 1. Πρώτη προσπάθεια απεικόνισης ηχητικών κρυστάλλων, γλυπτό "Órgano" του Eusebio Sempere, πηγή [1]

Μετάπειτα, έγιναν προσπάθειες διερεύνησης διαφορετικών πτυχών της συμπεριφοράς των ηχητικών κρυστάλλων, κάποιες σε θεωρητικό επίπεδο ενώ άλλες με πιθανές πρακτικές εφαρμογές. Σε θεωρητικό επίπεδο, μελετήθηκαν από τους Wu L.-Y., Chen L.-W., Liu C.-M. (2009) τα αποτελέσματα των σημειακών ελαττωμάτων (point defects), ενώ από τους Vasseur J.O., Deymier P.A, Djafari-Rouhani B., Pennec Y., Hladky-Hennion A-C (2008) μελετήθηκε η ύπαρξη κυματοδηγών διευκολύνοντας τη διάδοση του ήχου με χαμηλή εξασθένηση. Αναφορικά με πρακτικές εφαρμογές μείωσης του ήχου, έγινε έρευνα σε φράγματα θορύβου της κυκλοφορίας από τους Sanchez-Perez J.V., Rubio C., Martinez-Sala R., Sanchez -Grandia R., Gomez V. (2002), ακολουθώντας με την πιο πρόσφατη έρευνα για ηχητικά φράγματα κρυστάλλων σύμφωνα με τα σχετικά ευρωπαϊκά πρότυπα, για το μετριασμό του θορύβου της κυκλοφορίας οι Castineira-Ibanez S., Rubio C., Romero-Garcia V., Sánchez-Pérez J.V., Garcia-Raffi L.M. (2012).

Πιο συγκεκριμένα στην τελευταία έρευνα, μελετήθηκε η αποτελεσματικότητα αυτών των δομών που πηγάζει από την ικανότητά τους να εξασθενούν συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων ήχου, ακολουθώντας τις κυρίαρχες συχνότητες του θορύβου της οδικής κυκλοφορίας.

Ωστόσο, η επίτευξη συγκρίσιμων επιπέδων εξασθένησης με τα κλασικά φράγματα θορύβου απαιτεί μια παχύτερη δομή. Ο Romero Garcia D. (2010) μελέτησε τις πιθανές λύσεις που περιλαμβάνουν το συνδυασμό διαφορετικών εφέ, όπως πολλαπλούς συντονισμούς σκέδασης ή ικανότητα απορρόφησης ήχου στον ηχητικό κρύσταλλο. Οι πειραματικές προσεγγίσεις προς αυτή την κατεύθυνση περιλαμβάνουν την εφαρμογή πορωδών επικαλύψεων σε μεμονωμένα κυλινδρικά στοιχεία ηχητικών κρυστάλλων όπως παρουσιάστηκε από τους Umnova O., Attenborough K., Linton C.M. (2006) αλλά και τη διάταξη δέντρων σε διάφορες περιοδικές γεωμετρικές διαμορφώσεις για την επίτευξη εξασθένησης του εξωτερικού θορύβου που διερευνήθηκε από τους Martinez -Sala R., Rubio C., Garcia-Raffi L.M., Sanchez-Perez J.V., Sanchez-Perez E.A., Llinares J. (2006).

Αν και έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες, το πεδίο των ηχητικών κρυστάλλων χρειάζεται συνεχή ανάπτυξη, με αρκετά ανεπίλυτα ζητήματα που δικαιολογούν περαιτέρω διερεύνηση. Σχετικά με την αριθμητική μοντελοποίηση αυτών των δομών, οι γνώσεις από άλλους τομείς της ακουστικής και της διάδοσης κυμάτων μπορούν να βοηθήσουν σε θεωρητικές και αριθμητικές μεθόδους επεξεργασίας. [21], [22]

Κεφάλαιο 2 - Ηχητικοί κρύσταλλοι (sonic crystals)

Γενική περιγραφή

Τα ηχοπετάσματα είναι διαμήκεις κατασκευές πλευρικά των οδών κυκλοφορίας, στη μία ή και στις δύο πλευρές της, με σκοπό την ελάττωση του επιπέδου του θορύβου που παράγεται από την κυκλοφορία.

Τα ηχοπετάσματα ως μέθοδοι μείωσης του θορύβου διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

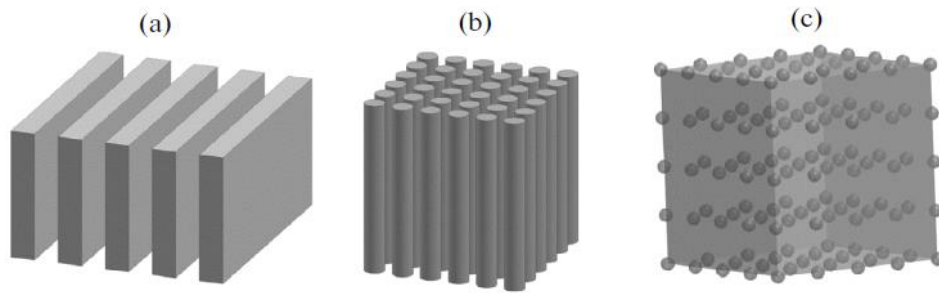
- Ηχοπετάσματα ανάκλασης: Μειώνουν τα επίπεδα θορύβου αντανακλώντας ηχητικά κύματα που προέρχονται από την πλευρά του δρόμου.
- Ηχοπετάσματα απορρόφησης: Απορροφούν τα εισερχόμενα ηχητικά κύματα με τη χρήση κατάλληλων υλικών στην κατασκευή τους.
- Ηχοπετάσματα ειδικής διαμόρφωσης κορυφής: Διαθέτουν ειδική διαμόρφωση στην κορυφή τους, όπως οριζόντια στοιχεία ή πρόσθετες όψεις, ενισχύοντας τις ικανότητές τους για μείωση του θορύβου.
- Ηχοπετάσματα διασποράς ήχου: Διαχέουν τα ηχητικά κύματα σε διάφορες κατευθύνσεις, που συχνά επιτυγχάνονται μέσω γωνιακών διαμορφώσεων.

Παρακάτω θα αναλυθεί η χρήση των ηχοπετασμάτων ανάκλασης της κατηγορίας των ηχητικών κρυστάλλων. [28]

Ηχητικοί κρύσταλλοι - Σκεδαστές

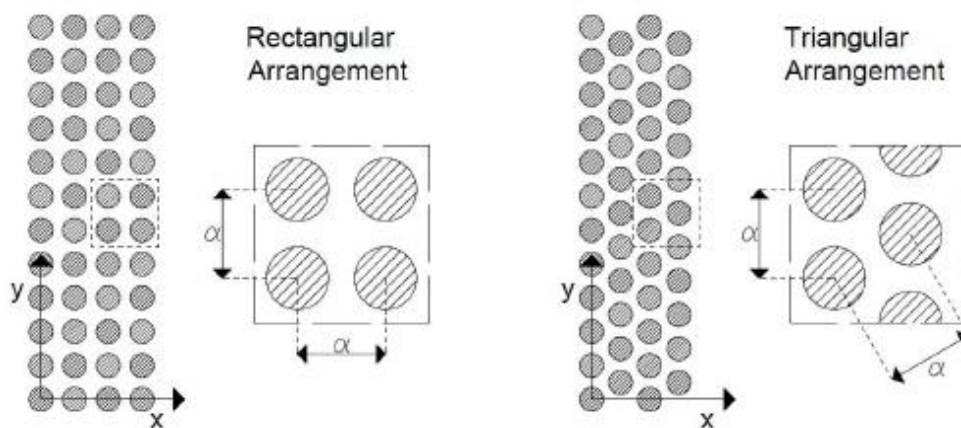
Οι ηχητικοί κρύσταλλοι (sonic crystals) είναι τεχνητές δομές που κατασκευάζονται από την περιοδική διάταξη σκεδαστών (scatterers) που διασκορπίζουν ηχητικά κύματα. Τα scatterers είναι ηχητικά σκληρά (δηλαδή έχουν υψηλή ακουστική αντίσταση) σε σχέση με το μέσο στο οποίο τοποθετούνται. Για παράδειγμα, ακρυλικοί κύλινδροι στον αέρα ή χαλύβδινες πλάκες σε νερό. Ωστόσο, δεν είναι όλοι οι scatterers ηχητικοί κρύσταλλοι, ακόμα κι αν μπορούν να λειτουργήσουν ως scatterers κάτω από συγκεκριμένες καταστάσεις.

Ένας ηχητικός κρύσταλλος με σκεδαστές ως κυλίνδρους διατεταγμένους περιοδικά ονομάζεται 2-Δ ηχητικός κρύσταλλος. Όταν οι σκεδαστές τοποθετούνται σε μια 1-Δ περιοδική διάταξη, όπως χαλύβδινες πλάκες που τοποθετούνται περιοδικά στο νερό, είναι γνωστό ως 1-Δ ηχητικός κρύσταλλος. Όταν οι σκεδαστές όπως οι σφαίρες τοποθετούνται σε μια 3-Δ περιοδική διάταξη (για παράδειγμα, απλό κυβικό), είναι γνωστό ως 3-Δ ηχητικός κρύσταλλος. [21], [22]



Εικόνα 2. Διαφορετικοί τύποι ηχητικών κρυστάλλων. (α) 1-Δ ηχητικός κρύσταλλος από πλάκες διατεταγμένες περιοδικά. (β) 2-Δ ηχητικός κρύσταλλος με κυλίνδρους διατεταγμένους σε τετράγωνο πλέγμα. (γ) 3-Δ ηχητικός κρύσταλλος με περιοδική διάταξη σφαίρας σε κυβικό πλέγμα, πηγή [21]

Οι ηχητικοί κρύσταλλοι διαθέτουν ορισμένα ακουστικά χαρακτηριστικά, τα χάσματα συχνοτήτων (band gaps) και εμφανίζονται σε τετράγωνη ή τριγωνική διαμόρφωση πλέγματος. [2], [11]



Εικόνα 3. Διαφορετικές γεωμετρικές διατάξεις ηχητικών κρυστάλλων σε επίπεδη όψη: ορθογώνια διάταξη πλέγματος (αριστερά) και τριγωνική διάταξη πλέγματος (δεξιά), πηγή [11]

Χάσμα συχνοτήτων - Band gaps

Όλες οι εφαρμογές των ηχητικών κρυστάλλων, στοχεύουν στην πρόβλεψη και βελτιστοποίηση των χασμάτων συχνοτήτων, ή αλλιώς band gaps. Η ειδική διάταξη των σκεδαστών μέσα στους ηχητικούς κρυστάλλους τους επιτρέπει να επιδεικνύουν ιδιότητες εξασθένησης του ήχου μέσα σε ένα καθορισμένο εύρος συχνοτήτων, γνωστό ως χάσμα συχνοτήτων ή διάκενο ζώνης.

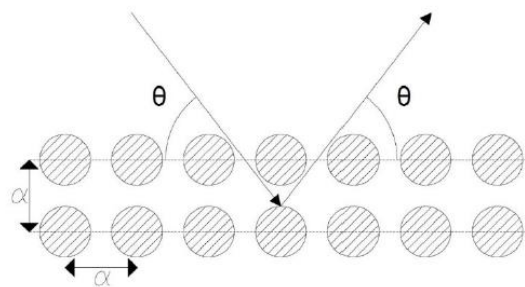
Αυτή η εξασθένηση συμβαίνει όταν παρεμβάλλονται τα ηχητικά κύματα από σκεδαστές εντός του κενού ζώνης και επίσης όταν η διάδοση των κυμάτων μειώνεται λόγω του παροδικού φαινομένου. Όταν ένα ακουστικό κύμα αλληλοεπιδρά με μια περιοδική δομή,

το φάσμα συχνοτήτων του αλλάζει, επιτρέποντας μόνο συγκεκριμένες συχνότητες του εισερχόμενου κύματος να περάσουν μέσα από τη δομή χωρίς μεγάλη εξασθένηση.

Προκειμένου οι σκεδαστές να αλληλοεπιδρούν αποτελεσματικά με ένα εισερχόμενο κύμα, είναι σημαντικό το μέγεθος και η απόστασή τους να σχετίζονται άμεσα με το μήκος του προσπίπτοντος κύματος. [9], [10]

Η εξήγηση αυτού του φαινομένου βασίζεται στο νόμο του Bragg, ο οποίος περιγράφει πώς τα κύματα τα οποία χτυπούν με μια συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης, θ , καθορίζουν το διάκενο ζώνης, f_{BG} , που επηρεάζεται από τη σταθερά πλέγματος, a που ορίζει την απόσταση μεταξύ των σκεδαστών από κέντρο σε κέντρο και την ταχύτητα διάδοσης του ήχου στο μέσο, c (στον αέρα 343 m/s): [11], [16]

$$f_{BG} = \frac{c}{2a \sin \theta} \quad (1)$$



Εικόνα 4. Σχηματική αναπαράσταση του νόμου του Bragg, πηγή [11]

Το μέγεθος του χάσματος συχνοτήτων επηρεάζεται από τις ακόλουθες παραμέτρους:

- λόγος πυκνότητας $M = \rho/\rho_0$, δηλαδή ο λόγος μεταξύ των πυκνοτήτων του υλικού των σκεδαστών, ρ , και του μέσου στο οποίο διαδίδονται, ρ_0 , πυκνότητα του αέρα
- ο συντελεστής συμπλήρωσης ff , που εκφράζει την αναλογία μεταξύ του όγκου που καταλαμβάνουν οι σκεδαστές και του συνολικού όγκου του κρυστάλλου, με εξίσωση, όπου d η διάμετρος των σκεδαστών, V_s ο όγκος των σκεδαστών και V συνολικός όγκος.

$$ff = \frac{V_s}{V} = \frac{\pi d^2}{4a^2} \quad (2)$$

- το σχέδιο του πλέγματος. [12]

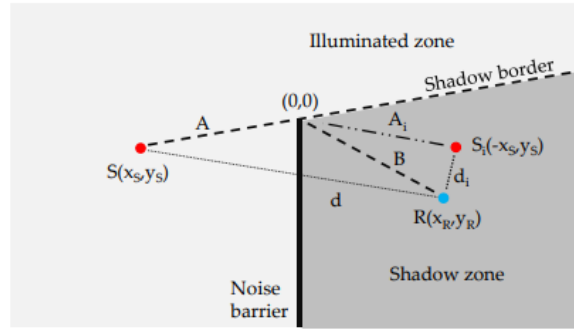
Απώλεια εισαγωγής - Insertion loss

Η ακουστική συμπεριφορά ενός ηχοπετάσματος καθορίζεται κυρίως από την περίθλαση, με την απορρόφηση και τη μετάδοση να έχουν επίσης σημαντική συμβολή. Η απόδοσή τους αξιολογείται μέσω της μείωσης θορύβου (insertion loss) που είναι η διαφορά, σε ντεσιμπέλ (dB), στα επίπεδα ηχητικής πίεσης σε ένα σημείο, με και χωρίς την παρουσία του ηχοπετάσματος, χωρίς άλλες αλλαγές στη διάδοση του ήχου. Η απώλεια εισαγωγής ακολουθεί την παρακάτω εξίσωση:

$$IL = L_b - L_a = 10 \log \left[\frac{p_b^2}{p_a^2} \right] \quad (3)$$

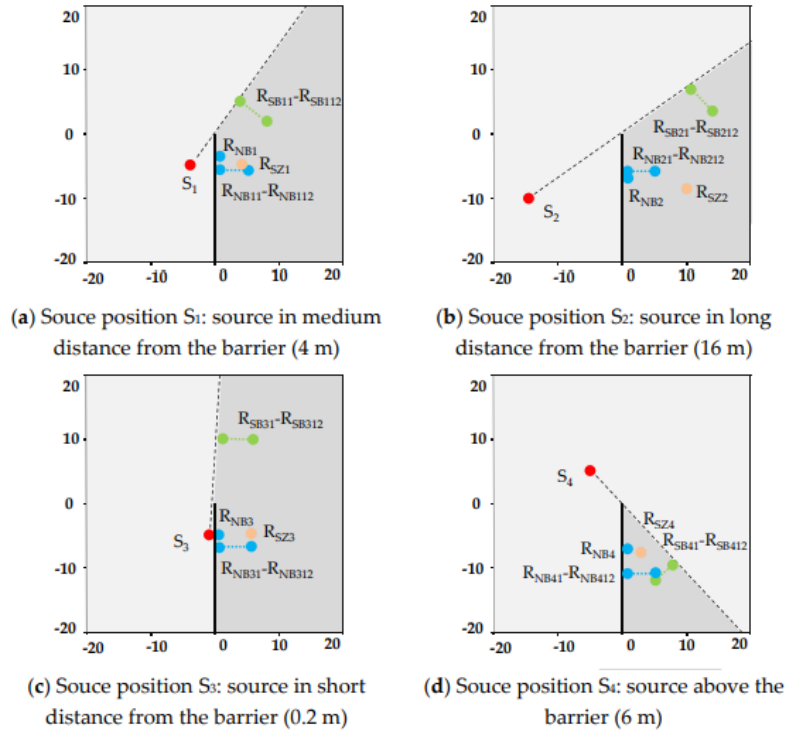
όπου L_b , p_b και L_a , p_a είναι τα επίπεδα ηχητικής πίεσης και οι ακουστικές πιέσεις που μετριούνται στην ίδια θέση πριν και μετά την τοποθέτηση ενός ηχοπετάσματος.

Οι περιοχές γύρω από ένα ηχοπέτασμα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε ζώνες. Η ζώνη σκιάς (shadow zone) είναι η περιοχή όπου το ηχοπέτασμα εμποδίζει την οπτική επαφή μεταξύ της πηγής (S) και του δέκτη (R), ενώ στη φωτισμένη ζώνη (illuminated zone) η πηγή και ο δέκτης έχουν άμεση οπτική επαφή. Το όριο σκιάς ή αλλιώς shadow border είναι η γραμμή που διαχωρίζει αυτές τις δύο ζώνες. [29]



Εικόνα 5. Στοιχεία σχετικά με τα ηχοπετάσματα και την απώλεια εισαγωγής, πηγή [29]

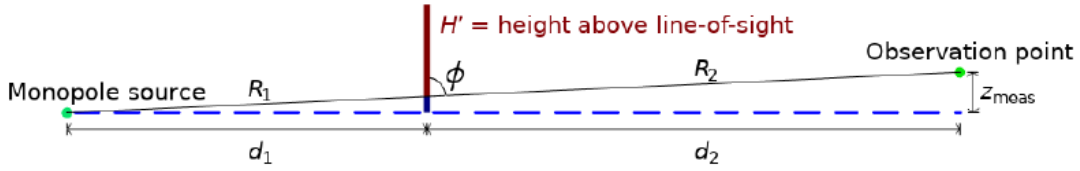
Παρακάτω απεικονίζονται οι διαφοροποιήσεις στις ζώνες για τέσσερις διαφορετικές θέσεις της πηγής.



Εικόνα 6: Θέσεις πηγής και δέκτη για τον υπολογισμό της απώλειας εισαγωγής μέσω FEM (πηγή (S): κόκκινο, δέκτης στη σκιάδη ζώνη (RSZ): πορτοκαλί, δέκτης κοντά στο σκιερό όριο (RSB): πράσινο, δέκτης κοντά στο ηχοπέτασμα (RNB): μπλε), πηγή [29]

Κεφάλαιο 3 - Διάθλαση κύματος

Ο ήχος αποτελείται από κύματα ακουστικής πίεσης που έχουν πεπερασμένο μήκος κύματος. Αυτά τα κύματα παρουσιάζουν διάθλαση στα άκρα ενός εμπόδιου με αποτέλεσμα τα απομείναντα κύματα πίεσης να διασκορπίζονται στην υπόλοιπη έκταση του εμποδίου. Αυτό μας παρουσιάζει ότι υπάρχει θόρυβος πίσω από ένα αδιαπέραστο φράγμα ήχου. [26]



Εικόνα 7. Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου, πηγή [27]

Παρακάτω θα γίνει προσπάθεια να ποσοτικοποιηθεί αυτός ο θόρυβος, αναλύοντας την θεωρία της διάθλασης βαθμωτών κυμάτων.

Θεωρώντας ότι έχουμε μια μονοπολική πηγή, έναν αποδέκτη και στην μεταξύ τους απόσταση, κάποιο εμπόδιο, τα επίπεδα θορύβου πίσω από το εμπόδιο μπορούν να περιγραφούν από τη διατύπωση Fresnel-Kirchhoff, καθώς θεωρούμε ότι η πηγή εκπέμπει ένα σφαιρικό κύμα που αποδίδεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$p_{\text{source}}(r) = p_0 \frac{r_{\text{ref}}}{r} e^{-jkr} \quad (4)$$

Αντίστοιχα, η περιοχή πίσω από το εμπόδιο λαμβάνει το πόσο της διάθλασης, χωρίς να λαμβάνουμε υπόψιν τις αντανακλάσεις του εδάφους:

$$p_{\text{diff}}(\mathbf{r}) = \left(\frac{1+j}{2} \right) p_0 \frac{r_{\text{ref}}}{R_1 + R_2} e^{-jk(R_1 + R_2)} \sqrt{\frac{2}{\pi}} F \left(H' \sin \phi \sqrt{\frac{k}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)} \right) \quad (5)$$

Έτσι, το ολοκλήρωμα $F(u)$ της διατύπωσης Fresnel διαμορφώνεται ακολούθως:

$$F(u) = \left(\sqrt{\frac{\pi}{8}} - \int_0^u \cos(x^2) dx \right) - j \left(\sqrt{\frac{\pi}{8}} - \int_0^u \sin(x^2) dx \right) \quad (6)$$

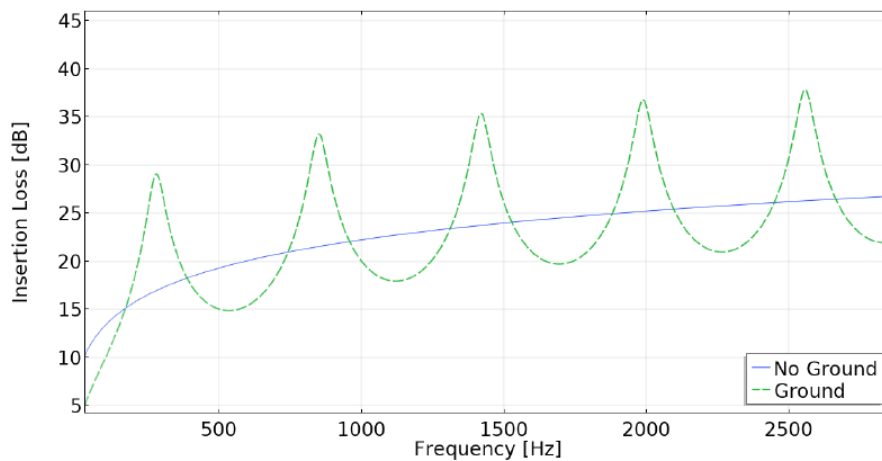
Στην περίπτωση που λάβουν υπόψιν μας τις αντανακλάσεις του εδάφους για ένα σύστημα συντεταγμένων με άξονα z κάθετο στο επίπεδο γείωσης, προκύπτει η εξίσωση:

$$p_{\text{with ground}}(x, y, z) = p_{\text{diff}}(x, y, z) + p_{\text{diff}}(x, y, -z) \quad (7)$$

Και για τις δύο περιπτώσεις, με και χωρίς ανακλάσεις εδάφους, ορίζουμε την απώλεια εισαγωγής του εμποδίου συγκρίνοντας το επίπεδο ηχητικής πίεσης πίσω από το φράγμα με το επίπεδο ηχητικής πίεσης χωρίς φραγμό. Σε μονάδες ντεσιμπέλ (dB), η απώλεια εισαγωγής διαμορφώνεται ως εξής:

$$IL(\text{dB}) = -20 \log_{10} \left(\frac{|p(\mathbf{r})|}{|p_{\text{source}}(r)|} \right) \quad (8)$$

Στην Εικόνα 8, διακρίνουμε ότι με έλλειψη των ανακλάσεων του εδάφους, η απώλεια εισαγωγής αυξάνεται σταθερά με αυξανόμενη συχνότητα. Συνεπώς, παρατηρούμε ότι η απώλεια εισαγωγής εξαρτάται κυρίως από το σημείο που λαμβάνεται η μέτρηση. [27]



Εικόνα 8. Απώλεια εισαγωγής σε ενδιάμεσο εμπόδιο. Μπλε γραμμή- απώλεια ανακλάσεων στο έδαφος. Πράσινη γραμμή – με ανακλάσεις στο έδαφος, πηγή [27]

Κεφάλαιο 4 - Γεωμετρία σκεδαστών

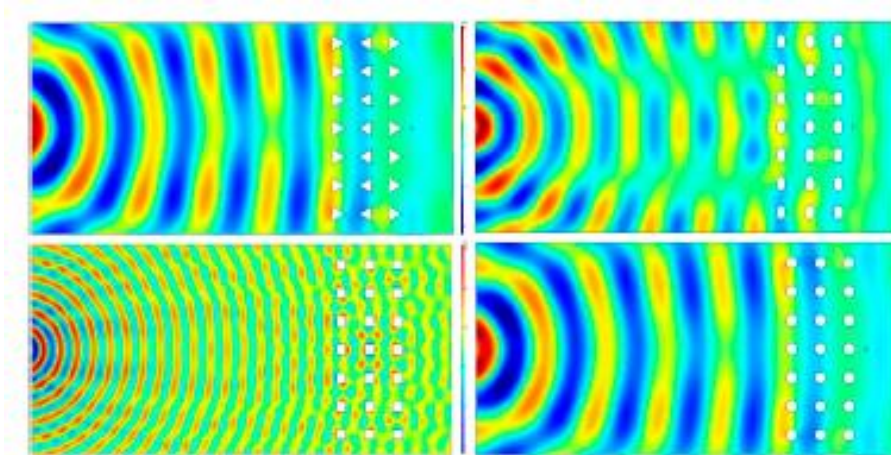
Παράμετροι που επηρεάζουν

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο πρωταρχικός στόχος τόσο των θεωρητικών όσο και των πρακτικών εφαρμογών είναι η ενίσχυση και η μείωση του ήχου που παράγεται στη συνέχεια.

Οι βασικές μεταβλητές που επηρεάζονται από διάφορες παραμέτρους που προέρχονται από το σχεδιασμό και την επιλογή των scatterers, είναι η απώλεια εισαγωγής και το χάσμα συχνότητας. Ωστόσο, η απόφαση σχετικά με αυτές τις παραμέτρους καθορίζεται τελικά από τον συγκεκριμένο σκοπό για τον οποίο προορίζονται.

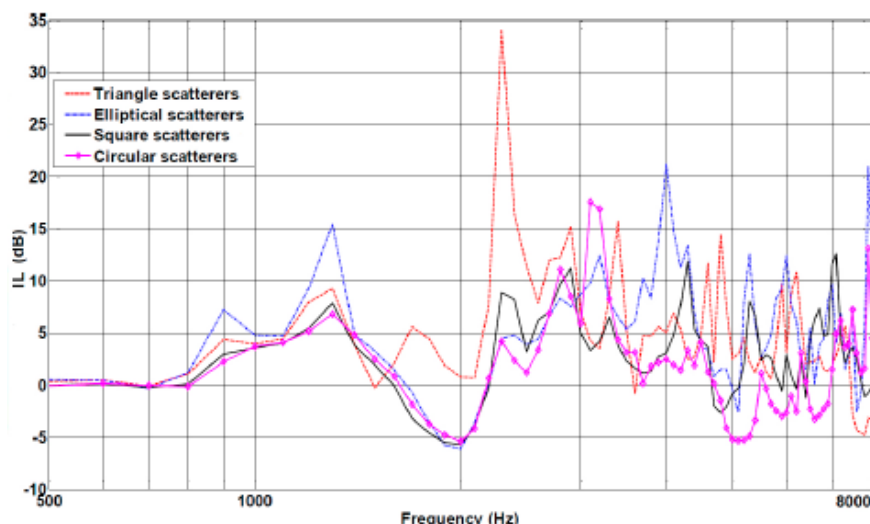
Μορφή σκεδαστών

Οι πρώτες μελέτες επικεντρώθηκαν κυρίως σε άκαμπτους κυκλικούς κυλίνδρους. Ωστόσο, η μετέπειτα έρευνα διερεύνησε διαφορετικά σχήματα σκεδαστών όπως ορθογώνια, τριγωνικά, τετράγωνα αλλά και τετράγωνα που περιστρέφονται κατά μήκος του κατακόρυφου επιπέδου με αρνητικά φαινόμενα διάθλασης. Ο Chong χρησιμοποιώντας την μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (FEM) προσπάθησε να μελετήσει την απώλεια εισαγωγής (insertion loss - IL) των ηχητικών κρυστάλλων που αποτελούνται από σκεδαστές με διαφορετικά σχήματα και προσανατολισμούς.



Εικόνα 9. Διάφορα σχήματα σκεδαστών, πηγή [17]

Στο διάγραμμα παρακάτω παρουσιάζεται το τριγωνικό σχήμα με όψεις σε διαφορετικούς προσανατολισμούς έχοντας την υψηλότερη κορυφή απορρόφησης. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι για συχνότητες άνω των 2 kHz, το κενό ζώνης που προκύπτει μπορεί να είναι αποτελεσματικό στη μείωση του θορύβου από βιομηχανικές πηγές. Όσον αφορά τον θόρυβο της οδικής κυκλοφορίας, το ελλειπτικό σχήμα διασποράς δείχνει το υψηλότερο IL. Βέβαια, το κυκλικό σχήμα εξακολουθεί να χρησιμοποιείται ευρέως έχοντας IL μικρότερο από 5 dB σε συχνότητες γύρω στο 1 Hz, σε σύγκριση με το ελλειπτικό σχήμα. [12], [17]



Εικόνα 10. Επίπεδα πίεσης ήχου (Sound Pressure Levels - SPL) και απώλεια εισαγωγής (Insertion Loss – IL) για διαφορετικά σχήματα σκεδαστών, πηγή [17]

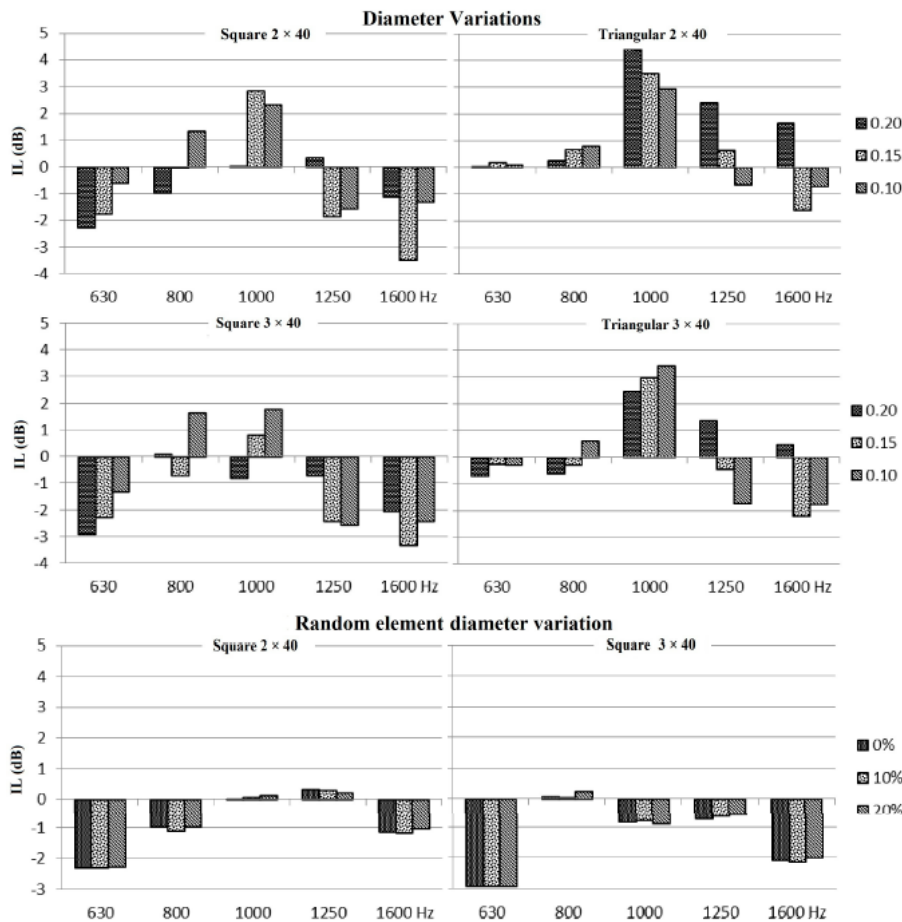
Διάμετρο σκεδαστών

Το μέγεθος των αντικειμένων που διασκορπίζουν τα ηχητικά κύματα φαίνεται να διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον τρόπο με τον οποίο εξασθενεί ο ήχος. Όταν οι σκεδαστές έχουν τριγωνική ή τετραγωνική μορφή και είναι διαμορφωμένοι σε τρεις σειρές ο ήχος εξασθενεί σε μεγαλύτερο βαθμό από ότι με δύο σειρές.

Σε ένα τετράγωνο σχήμα, μπορεί να υπάρχουν ορισμένες συχνότητες ήχου που γίνονται πιο δυνατές αντί να εξασθενούν, αλλά αυτό δεν συμβαίνει στο τριγωνικό σχήμα. Επιπλέον, σε ένα τετράγωνο σχήμα, αν ο πηγή και ο δέκτης είναι στην ίδια πλευρά, ο ήχος μπορεί απλά να διαπεράσει το πλέγμα χωρίς κάποια αλλαγή. Κάτι το οποίο δεν παρατηρείται σε τριγωνικό σχηματισμό σκεδαστών.

Έτσι, μελετήθηκε πόσο μικρές διαφορές στο μέγεθος μπορούν να κάνουν μεγάλη διαφορά στο πόσο ο ήχος μπορεί να εξασθενήσει δεδομένου ότι οι σκεδαστές μπορεί να κατασκευαστούν από τέτοια υλικά που προσθέτουν ανομοιομορφη διάμετρο.

Οι Martins, M., Godinho, L. και Picado-Santos, L. στην εργασία τους, άλλαξαν τη διάσταση των σκεδαστών διατηρώντας το πλέγμα σταθερό στο 0,40m. Σύμφωνα με την αρχή του Bragg, οι αλλαγές στις διαστάσεις των κυλίνδρων μπορούν να περιοριστούν, της τάξης των 0,05m. Βρέθηκε ότι ακόμη και όταν ορισμένοι από τους σκεδαστές είναι λίγο διαφορετικοί σε μέγεθος με αποκλίσεις 10% και 20% στην σταθερά πλέγματος, η διαφορά στην εξασθένηση είναι μικρή. Αλλά για υψηλότερες συχνότητες ήχου παραπάνω από, ένα διαφορετικό σχήμα με μια μακριά πλευρά στραμμένη προς την πηγή ήχου λειτουργεί καλύτερα. Στην πραγματικότητα, ακόμη και όταν υπάρχει μέγιστη απόκλιση 20%, οι απώλειες εισαγωγής τροποποιούνται ελάχιστα, με μέγιστες διακυμάνσεις μικρότερες από 0,5 dB σε όλες τις ζώνες συχνοτήτων. [3], [5], [6], [7], [8], [12], [16], [18]

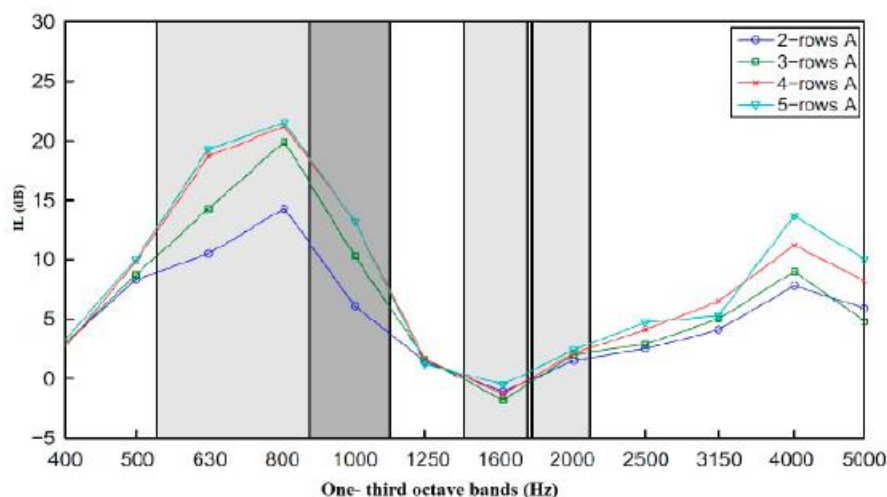
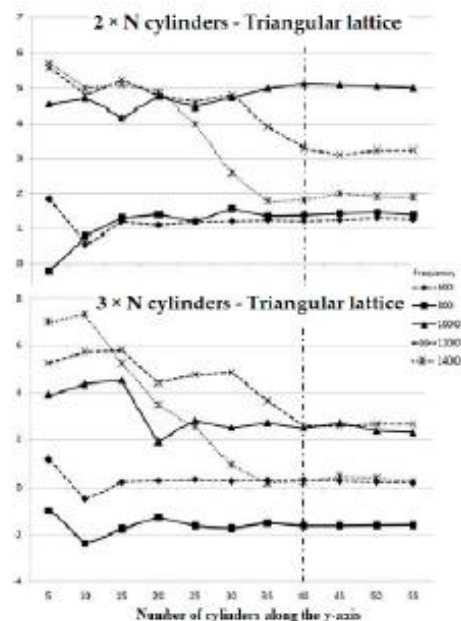


Εικόνα 11. IL για τετράγωνα και τριγωνικά πλέγματα, διπλής ή τριπλής σειράς, με διαφορετικές διαμέτρους σκεδαστών και IL για τριγωνικά πλέγματα, διπλής ή τριπλής σειράς, για διακυμάνσεις διαμέτρου σκεδαστών, πηγή [18]

Πλήθος σκεδαστών

Σχετικά με το κατάλληλο πλήθος σκεδαστών, στην εργασία τους οι Martins, M., Godinho, L. και Picado-Santos, L. χρησιμοποίησαν ξύλινους κυλινδρικούς σκεδαστές 0,2 m με σταθερά πλέγματος 0,4 m, δείχνοντας ότι δύο σειρές είναι καλύτερες από τρεις στις συχνότητες οδικής κυκλοφορίας. Βέβαια, για να είναι αποτελεσματική η μελέτη πρέπει να υπάρχουν τουλάχιστον 40 σκεδαστές, έτσι ώστε να αποφευχθεί η διάθλαση. [18]

Ωστόσο, συμπληρωματικά με την παραπάνω μελέτη παρουσιάστηκε από τους Morandi, F., Miniaci, M., Marzani, A., Barbaresi, L., Garai, M. ότι η αύξηση του αριθμού των σειρών οδηγεί σε αύξηση του δείκτη ηχομόνωσης στο εύρος συχνοτήτων μεταξύ 600 και 1000 Hz για σκεδαστές σε τετραγωνικό πλέγμα. Αν και παραπάνω από την τέταρτη σειρά δεν παρουσιάζεται σημαντική διαφορά, με το αποτέλεσμα να είναι ότι τέσσερις σειρές είναι ο μέγιστος αριθμός σκεδαστών που απαιτούνται για έναν ηχητικό κρύσταλλο. [4], [19]



Εικόνα 12. Απεικονίσεις της απορρόφησης για εύρος συχνοτήτων με διαφορετικό πλήθος σκεδαστών, πηγή [18]

Συντελεστής συμπλήρωσης - Filling factor ff

Οι διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ των σκεδαστών αποκαλύπτουν ότι μπορούν να επηρεάσουν την απώλεια εισαγωγής. Το ορθογώνιο πλέγμα, σε όλες τις περιπτώσεις, δείχνει σχεδόν σταθερό IL, αν και σε κάποιες συχνότητες αλλάζουν ορισμένες κορυφές απορρόφησης. Αντίθετα, το τριγωνικό πλέγμα, παρουσιάζει καλά αποτελέσματα μόνο σε πλήρως δομημένο πλέγμα. [20]

Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκε μελέτη της απόστασης μεταξύ των σκεδαστών με μεταβαλλόμενη τη σταθερά πλέγματος μεταξύ 0,5, 0,4 και 0,3 m. Ωστόσο στο τριγωνικό πλέγμα, δεν παρατηρήθηκαν αλλαγές με δύο σειρές, ενώ παρατηρήθηκε αλλαγή επηρεάζοντας την αποτελεσματικότητα του φραγμού για τρεις σειρές. [3], [5], [6], [7], [8], [16], [18]

Κεφάλαιο 5 - Ανάλυση μοντέλου

Διάδοση του ήχου

Η διάδοση του ήχου σε ένα δισδιάστατο χώρο, στον τομέα συχνότητας, μπορεί να αναπαρασταθεί μαθηματικά από την εξίσωση του Helmholtz.

Αυτή η εξίσωση έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (9)$$

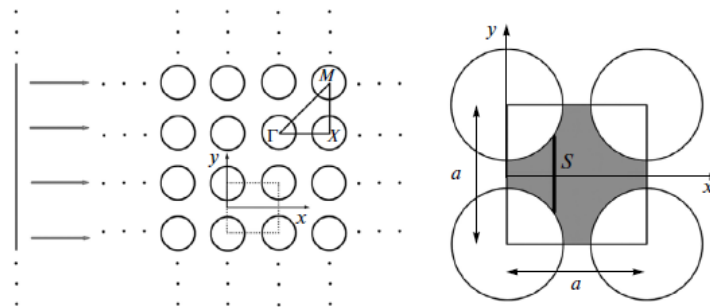
όπου, $\nabla^2 = \frac{\partial}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y^2}$, p είναι η πίεση του ήχου, $k = \omega/c$, ο αριθμός κύματος, $\omega = 2\pi f$, η γωνιακή συχνότητα, f , η συχνότητα και c , η ταχύτητα

διάδοσης του ήχου στο μέσο. [18]

IBZ (Irreducible Brillouin Zone) και περιοδικές δομές

Σε πολλές υπολογιστικές μελέτες όταν απαιτείται η μελέτη πολύ σύνθετων μοντέλων, που αυτό άμεσα συνδέεται με μεγάλο υπολογιστικό κόστος, υπάρχει ανάγκη για απλοποίηση των συνθηκών. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο, ακολουθείται η εύρεση του IBZ (Irreducible Brillouin Zone), που αποτελείται από το ελάχιστο τμήμα της δομής το οποίο όταν καθρεφτιστεί γύρω από έναν ή περισσότερους άξονες συμμετρίας, μία ή παραπάνω φορές, θα δημιουργήσει την αρχική δομή. [23]

Παρακάτω θα γίνει σύντομη αριθμητική ανάλυση της διάδοσης του ήχου σε ένα 2-Δ ηχητικό κρύσταλλο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 13, ακολουθώντας τη λογική εύρεσης του ελάχιστου τμήματος ζώνης (IBZ).



Εικόνα 13. 2-Δ δομή αποτελούμενη από κυλινδρικούς σκεδαστές οργανωμένοι σε τετραγωνικό πλέγμα, πηγή [21]

Η διάδοση του ηχητικού κύματος είναι κατά μήκος της διεύθυνσης (ΓΧ) και θεωρείται συμμετρική. Το τρίγωνο ΓΧ αντιπροσωπεύει το μεμονωμένο στοιχείο πλέγματος της ζώνης Brillouin.

Η περιοδική δομή αντιπροσωπεύεται από μια κυψελωτή μονάδα σε τετραγωνικό πλέγμα, με σταθερά πλέγματος a , που είναι η απόσταση μεταξύ των σκεδαστών από κέντρο σε κέντρο. Δεδομένου ότι είναι ένα τετράγωνο πλέγμα, η σταθερά του είναι ίδια και στις δύο κατευθύνσεις x και y .

Η μετάδοση του ήχου εντός της κυψελωτής μονάδας πραγματοποιείται μέσω του αέρα δεδομένου ότι οι σκεδαστές είναι ακουστικά άκαμπτοι. Σε συνέχεια αυτού, η διάδοση του ήχου μπορεί να μοντελοποιηθεί από την εξίσωση του Webster horn: [24], [25]

$$\frac{d^2 p(x, t)}{dt^2} = \frac{c^2}{S} \frac{d}{dx} \left(S \frac{dp(x, t)}{dx} \right) \quad (10)$$

όπου, p η πίεση, c η ταχύτητα του ήχου στον αέρα και S η μεταβλητή επιφάνεια διατομής.

Η μεταβλητή επιφάνεια διατομής S , εμφανίζεται κάθετη στην κατεύθυνση της μετάδοσης του ήχου, όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 13. Επιπλέον, στην περίπτωση που η πίεση είναι αρμονική, το σήμα μπορεί να αναπαρασταθεί ως άθροισμα αρμονικών συναρτήσεων,

$$p(x, t) = \text{Re}(P(x)e^{i\omega t}) \quad (11)$$

Σε συνέχεια η εξίσωση του Webster horn σε αρμονικότητα διαμορφώνεται ως εξής:

$$\frac{d^2 P}{dx^2} + \frac{dP}{dx} \left(\frac{S'}{S} \right) + \frac{\omega^2}{c^2} P = 0 \quad (12)$$

και εδώ το S' αντιπροσωπεύει την πρώτη παράγωγο και το ω , τη γωνιακή συχνότητα του κύματος διάδοσης.

Η διάδοση του κύματος για περιοδικό μοντέλο χρησιμοποιώντας το θεώρημα του Bloch ή του Floquet για 1-Δ δομή, περιορίζεται σε κυψελωτή μονάδα. Έτσι, η διάδοση του κύματος για περιοδικό μοντέλο δίνεται ως εξής:

$$p(x) = e^{ikx} \varphi(x) \quad (13)$$

Χρησιμοποιώντας το θεώρημα του Floquet σε συνδυασμό με την εξίσωση του Webster horn, διαμορφώνεται η εξίσωση του Helmholtz ακολούθως:

$$\left\{ \frac{d^2 \varphi}{dx^2} + \frac{d\varphi}{dx} \left(2ik + \frac{S'}{S} \right) + \varphi \left(ik \frac{S'}{S} - k^2 \right) \right\} + \frac{\omega^2}{c^2} \varphi = 0 \quad (14)$$

Η παραπάνω εξίσωση τροποποιείται ακολούθως,

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = \left(\frac{\varphi_{j+1} - 2\varphi_j + \varphi_{j-1}}{h^2} \right) + O(h^2), \quad (15)$$

$$\frac{d\varphi}{dx} = \left(\frac{\varphi_{j+1} - \varphi_{j-1}}{2h} \right) + O(h^2) \quad (16)$$

Αφού η δομή είναι περιοδική, θέτονται οριακές συνθήκες στο πρώτο και στο τελευταίο κόμβο της γεωμετρίας.

Αυτό μετασχηματίζει την εξίσωση (14) σε ένα πρόβλημα ιδιοτιμής:

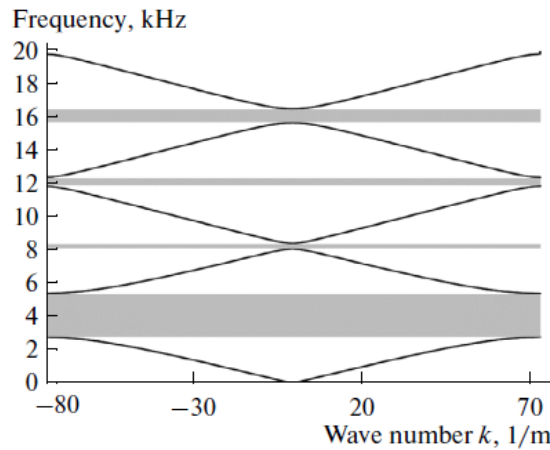
$$[A(k)]\{\varphi\} + \frac{\omega^2}{c^2}\{\varphi\} = 0 \quad (17)$$

όπου A είναι ένας πίνακας του οποίου οι συντελεστές είναι συνάρτηση του αριθμού

κύματος k που μεταβάλλεται στην πρώτη ζώνη Brillouin $\left(-\frac{\pi}{a} \leq k \leq \frac{\pi}{a}\right)$

Από τα παραπάνω προκύπτει η λύση του προβλήματος της ιδιοτιμής για την εξίσωση (17) με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται οι εφικτές τιμές των συχνοτήτων που μπορούν να διαδοθούν μέσω της δομής.

Τα αποτελέσματα απεικονίζονται σχηματικά στην Εικόνα 14 για περιοδικό μοντέλο. Παρουσιάζεται το διάκενο ζώνης το οποίο είναι ένα διάγραμμα μεταξύ της συχνότητας και του αριθμού κύματος. Τα διάκενα ζώνης αντιπροσωπεύονται από τη σκιασμένη περιοχή όπου δεν υπάρχει πραγματικό κύμα που να μπορεί να διαδοθεί μέσω της περιοδικής δομής. [22, 24]



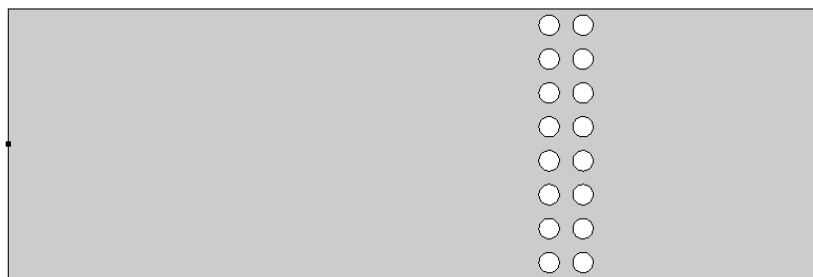
Εικόνα 14. Διάκενα ζώνης ηχητικού κρυστάλλου κατά την κατεύθυνση συμμετρίας ΓΧ, πηγή [21]

Κεφάλαιο 6 - Μοντελοποίηση πειράματος

Για τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, τα αρχικά χαρακτηριστικά της γεωμετρίας είναι τα ακόλουθα:

- Διάμετρος σκεδαστών = 0.15 m
- Απόσταση από κέντρο σε κέντρο, a (lattice constant) = 0.25 m
- Απόσταση πηγής από σκεδαστές (δεξιά) = 2 m
- Ύψος πηγής = 1 m
- Απόσταση δέκτη από σκεδαστές (αριστερά) = 4 m
- Ύψος δέκτη = 1 m
- Πλήθος σκεδαστών = 16
- Πλήθος σκεδαστών κατά x άξονα = 2
- Πλήθος σκεδαστών κατά y άξονα = 8
- Αριθμός συχνοτήτων ελέγχου = 11, (η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε για τις συχνότητες με αρχική τιμή 600 Hz και τελική 1600 Hz, με βήμα 100 Hz)

Θα ήταν χρήσιμο να αναφερθεί ότι το υλικό που ορίστηκε στο εσωτερικό της γεωμετρίας είναι ο αέρας.

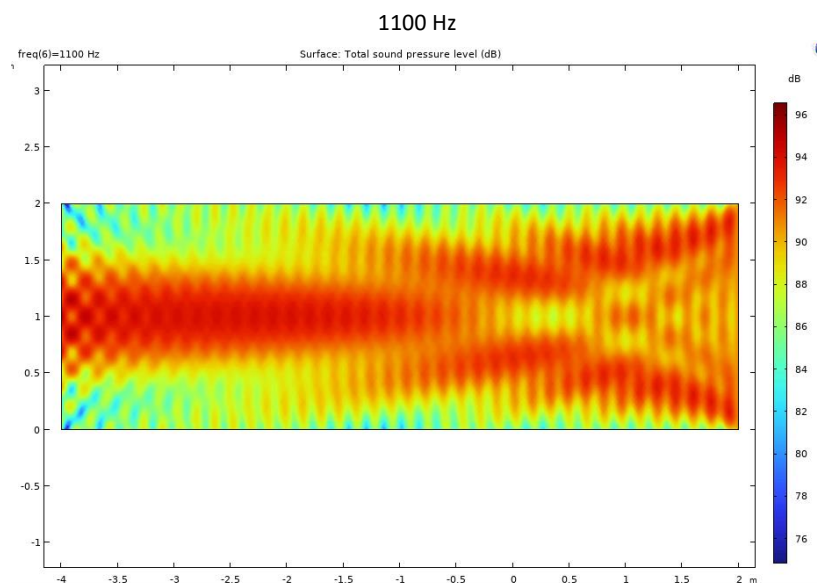
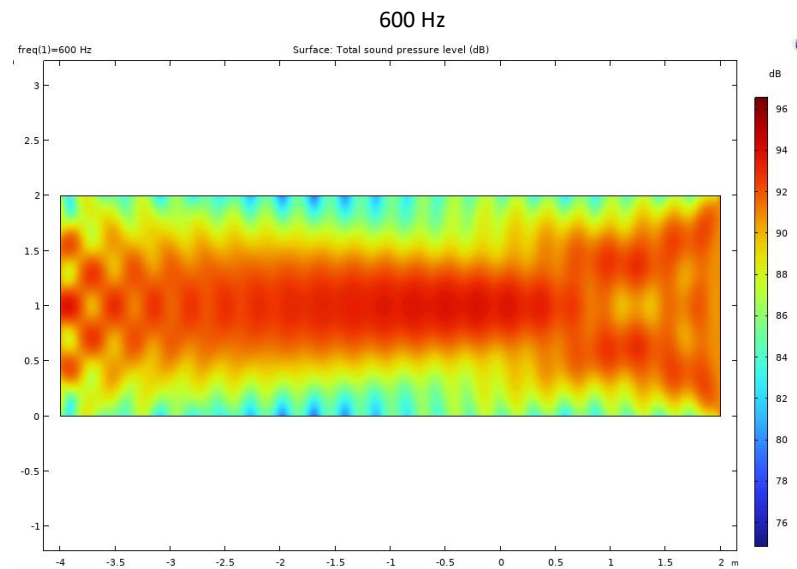


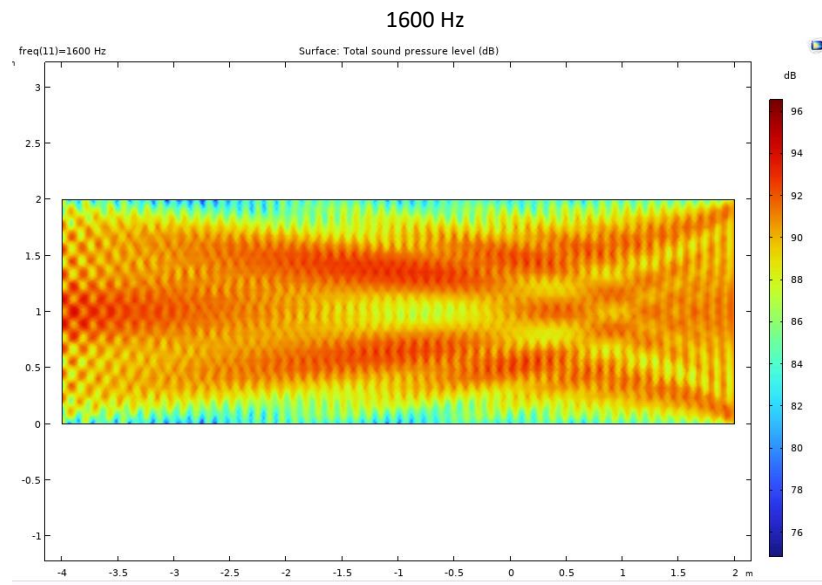
Εικόνα 15. Αρχική μορφή γεωμετρίας με κυκλικούς σκεδαστές

Οι παραλλαγές που ακολούθησαν αφορούν διαφορετικές μορφές για το σχήμα των σκεδαστών.

Προσομοίωση αρχικής δομής χωρίς και με κυκλικούς σκεδαστές

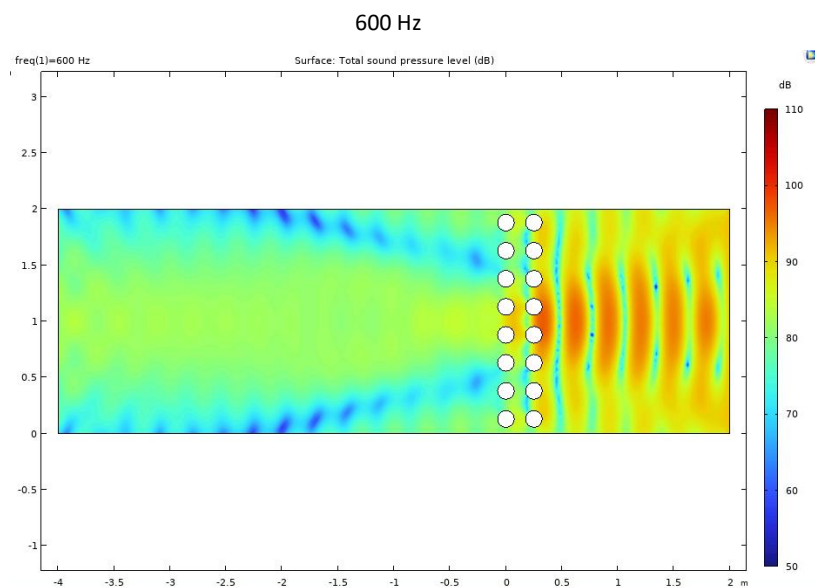
Αρχικά, πραγματοποιήθηκε μια διερεύνηση χωρίς να έχουν τοποθετηθεί οι σκεδαστές στον ορισμένο χώρο με σκοπό να παρατηρηθεί πως συμπεριφέρεται ο ήχος σε ελεύθερο χώρο.



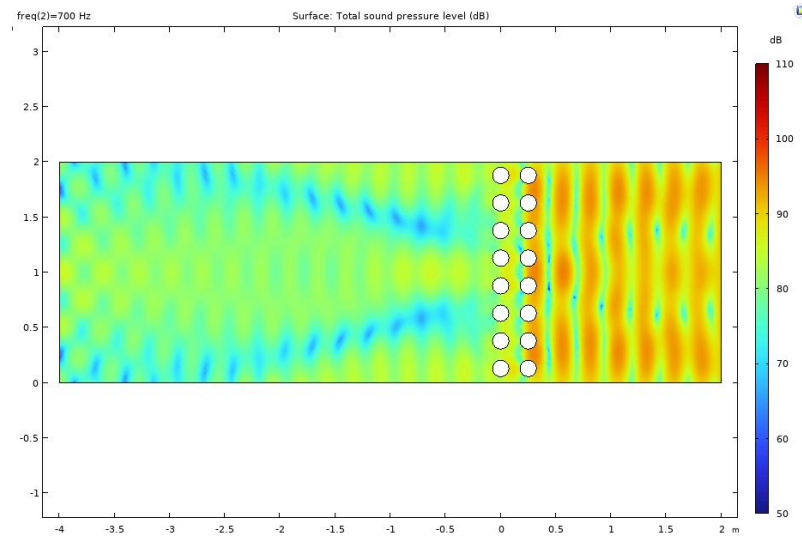


Εικόνα 16. Προσομοίωση δίχως σκεδαστές

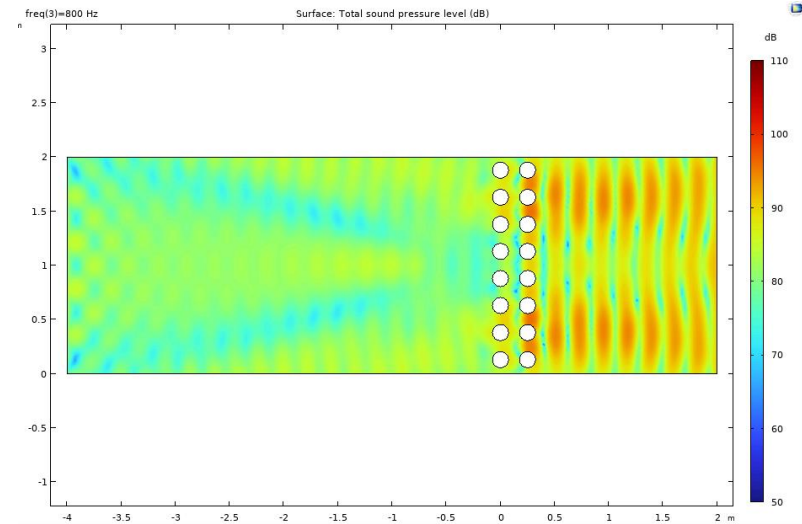
Έπειτα πραγματοποιήθηκε προσομοίωση προσθέτοντας τους κυκλικούς σκεδαστές στον ορισμένο χώρο, με σκοπό να εντοπιστούν χάσματα συχνοτήτων ή αλλιώς bandgaps.



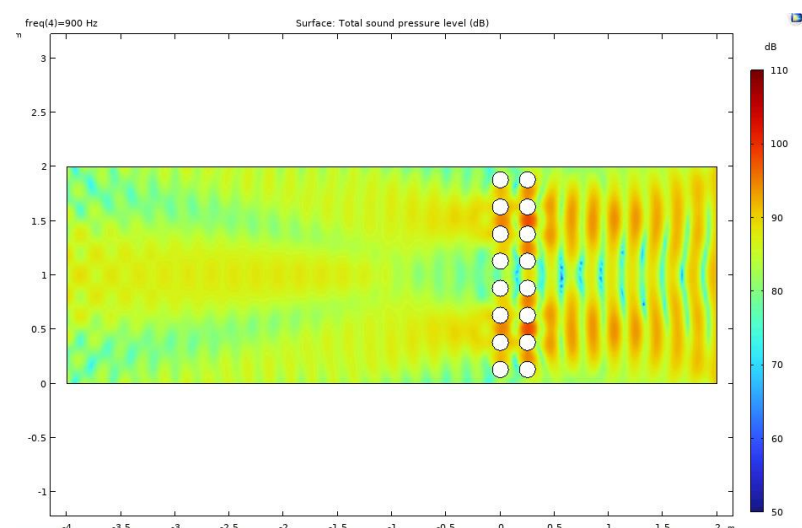
700 Hz



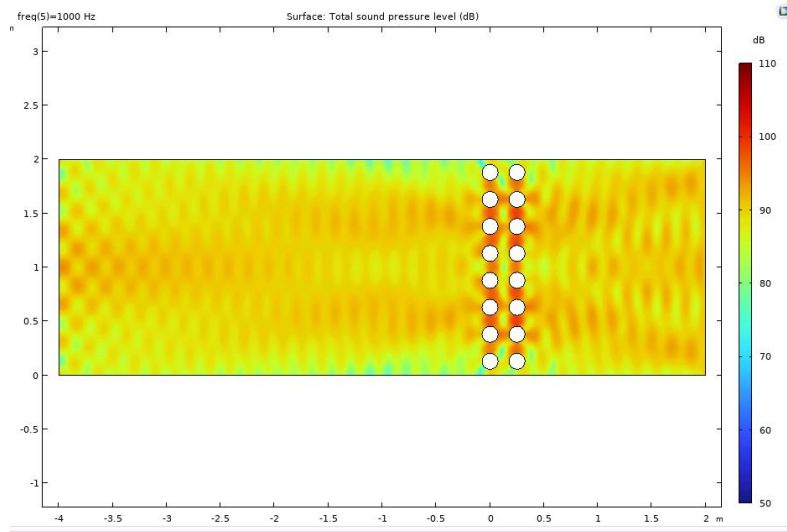
800 Hz



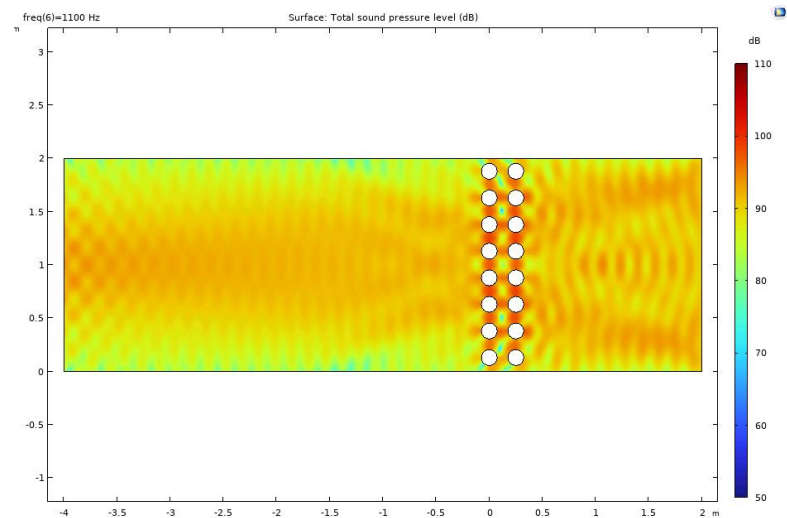
900 Hz



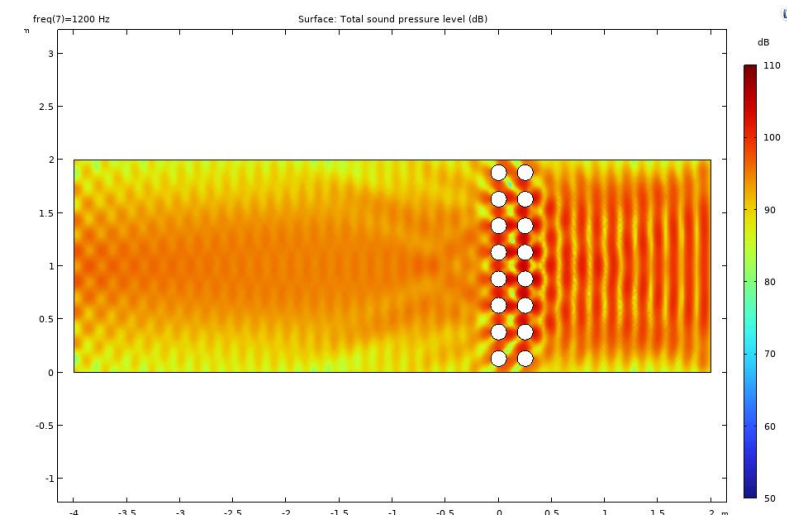
1000 Hz



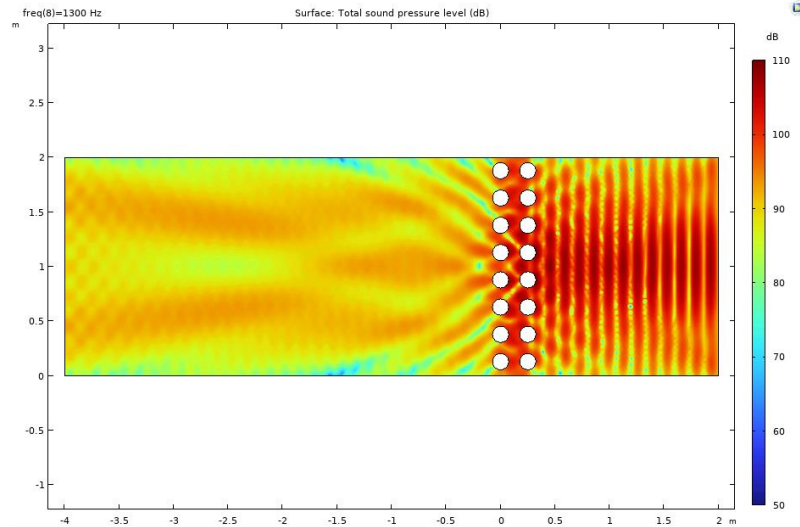
1100 Hz



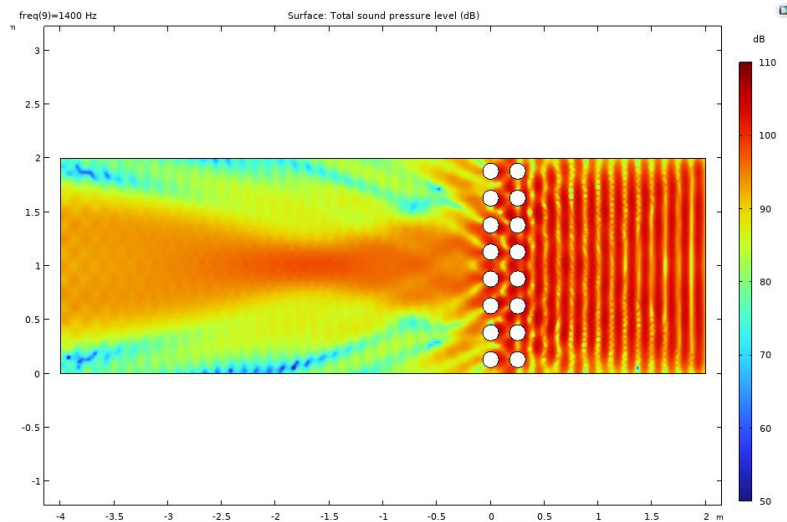
1200 Hz



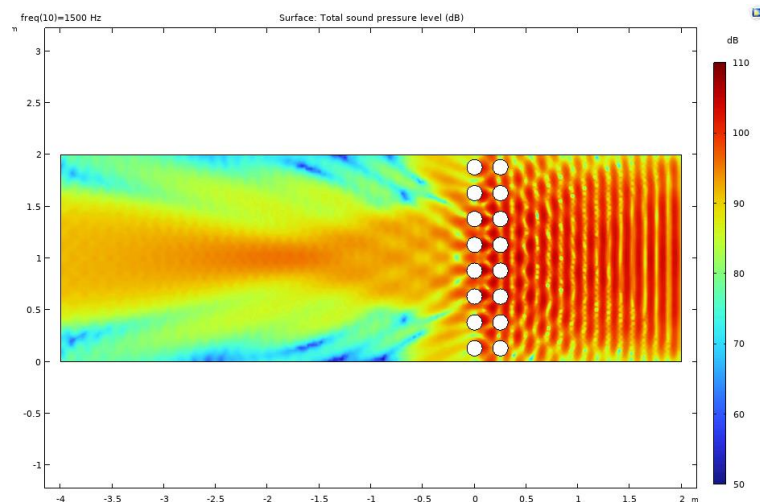
1300 Hz

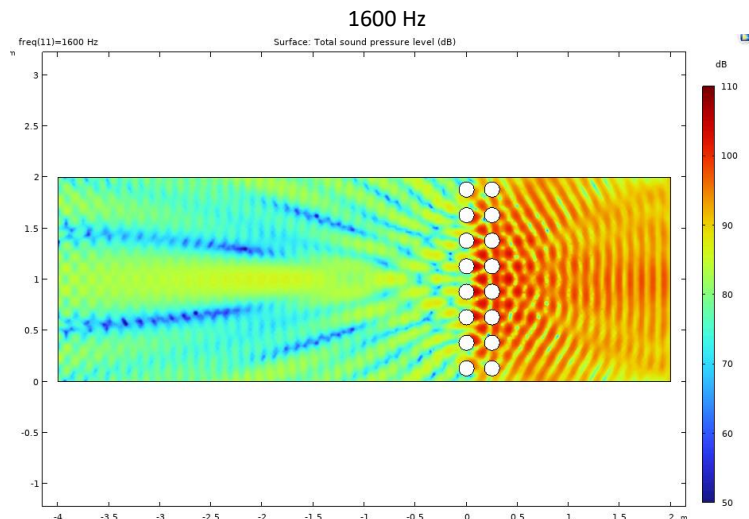


1400 Hz



1500 Hz



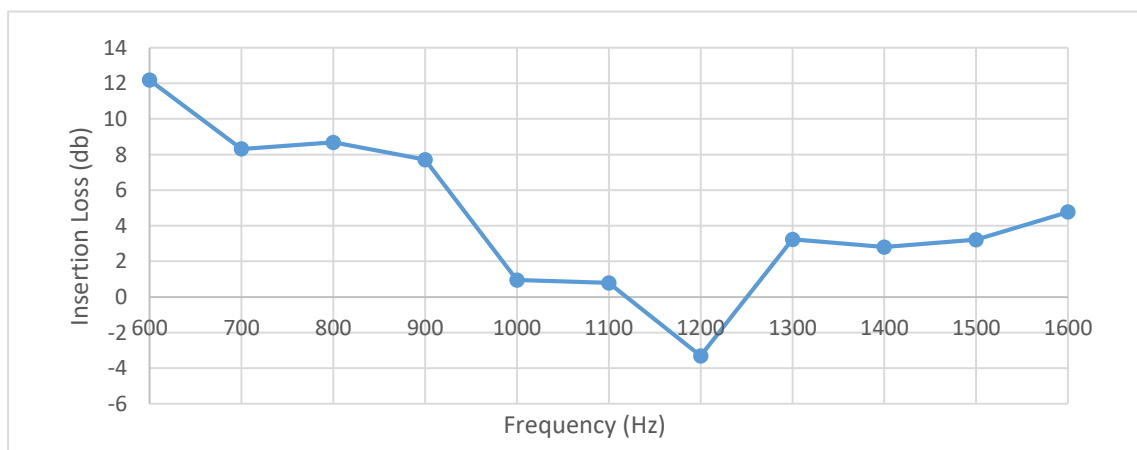


Εικόνα 17. Προσομοίωση με κυκλικούς σκεδαστές

Στη συνέχεια ακολουθεί το διάγραμμα συχνοτήτων με την απώλεια εισαγωγής. Πρέπει να αναφερθεί ότι οι συχνότητες που σημειώνουν κορυφές από το πλάτος του κύματος περιγράφουν το εύρος των χασμάτων (bandgaps).

Επιπλέον, για να δημιουργηθεί το παραπάνω διάγραμμα, χρησιμοποιήθηκε ως αναφορά η αρχική πίεση που παρατηρείται στη δομή χωρίς τους σκεδαστές.

Η αρχική γεωμετρία στον ορισμένο χώρο με κυκλικούς σκεδαστές δίνει το εξής διάγραμμα:



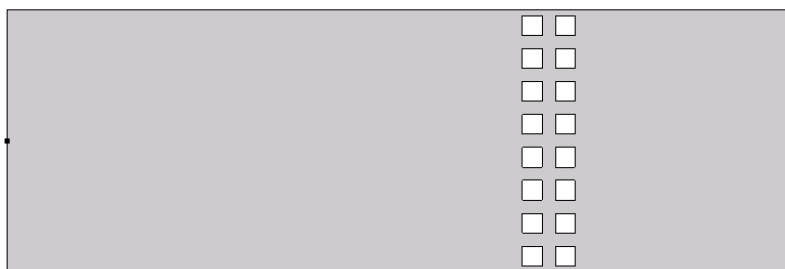
Εικόνα 18. Γράφημα αρχικής δομής με κυκλικούς σκεδαστές για διαφορετικές συχνότητες από 600 Hz σε 1600 Hz

Στο γράφημα παρατηρείται συνολικά ένα band gap. Το χάσμα συχνοτήτων βρίσκεται ανάμεσα στις συχνότητες 600 Hz και 1100 Hz, όπου η απώλεια εισαγωγής είναι σημαντική, ξεκινώντας από 12 dB και μειώνεται σταδιακά μέχρι να φτάσει κοντά στα 0 dB.

Κεφάλαιο 7 - Διαφορετικά σχήματα σκεδαστών

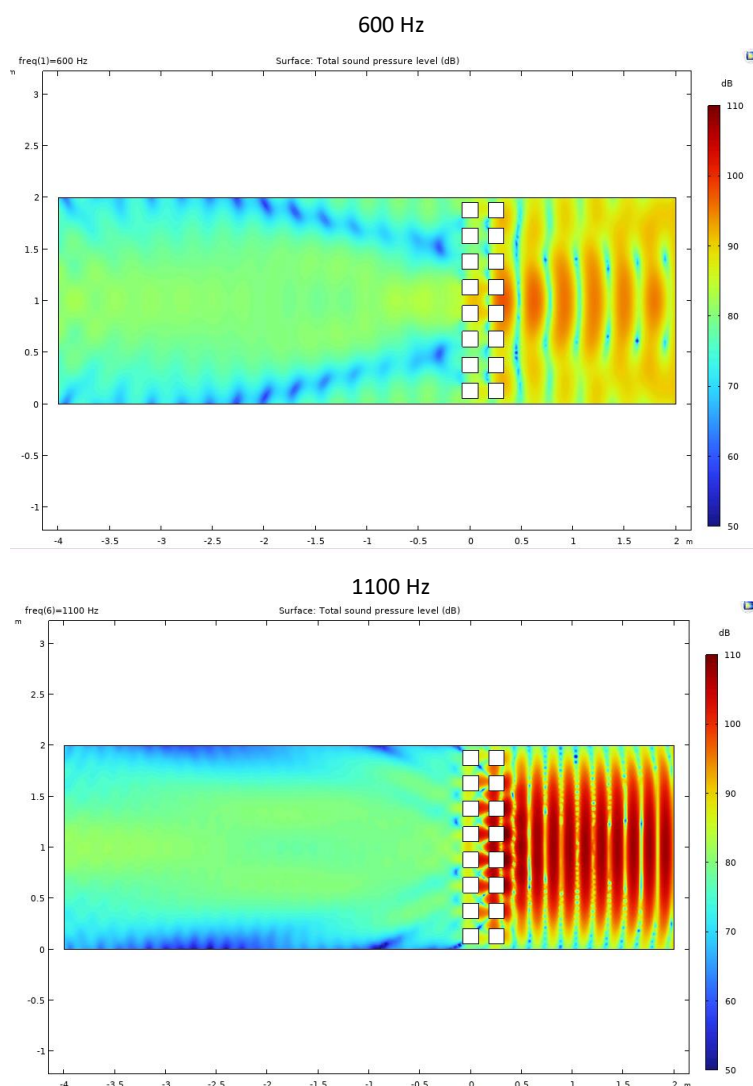
Προσομοίωση με τετραγωνικούς σκεδαστές

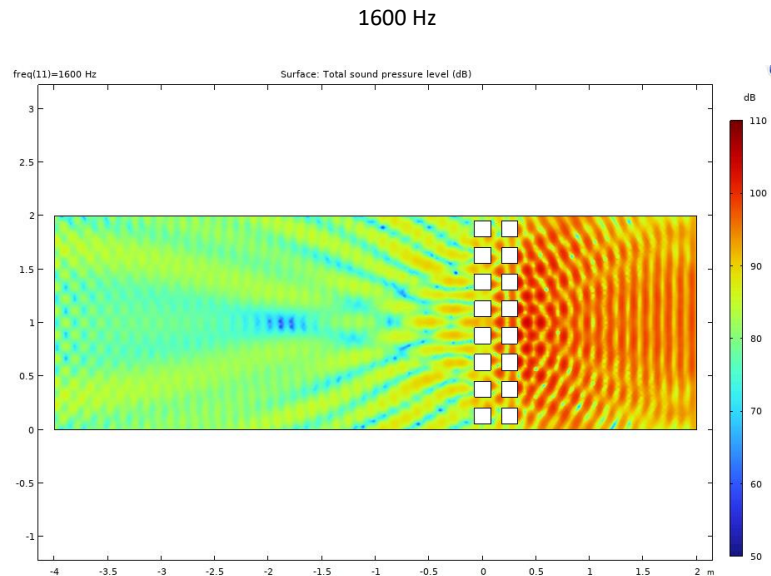
Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν τετραγωνικής μορφής σκεδαστές με μήκος και πλάτος, ίσο με a (lattice constant) = 0.25 m.



Εικόνα 19. Δομή με τετραγωνικούς σκεδαστές

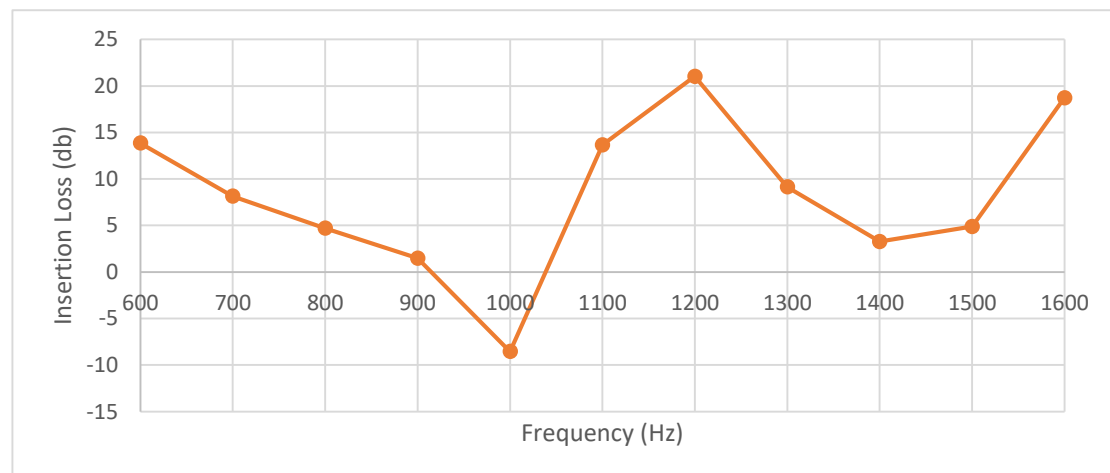
Παρακάτω παραθέτονται οι απεικονίσεις της πίεσης για τις συχνότητες 600 Hz, 1100 Hz και 1600 Hz.





Εικόνα 20. Προσομοίωση με τετραγωνικούς σκεδαστές

Από την προσομοίωση προκύπτει το παρακάτω γράφημα με τις σχετικές συχνότητες και την απώλεια εισαγωγής, από τη γεωμετρία δίχως σκεδαστές και με τετραγωνικούς σκεδαστές.



Εικόνα 21. Γράφημα δομής με τετραγωνικούς σκεδαστές για διαφορετικές συχνότητες από 600 Hz σε 1600 Hz

Στο γράφημα παρατηρούνται συνολικά δύο band gaps. Το πρώτο χάσμα συχνοτήτων βρίσκεται ανάμεσα στα 600 Hz και 1000 Hz, με υψηλή απώλεια εισαγωγής που μειώνεται σταδιακά από 15 dB στα 600 Hz μέχρι τα -10 dB στα 1000 Hz. Το δεύτερο χάσμα συχνοτήτων εντοπίζεται από τα 1200 Hz έως 1600 Hz, με μέγιστη απώλεια εισαγωγής 20 dB στα 1200 Hz και υψηλή απώλεια 15 dB στα 1600 Hz.

Προσομοίωση με ελλειπτικούς σκεδαστές

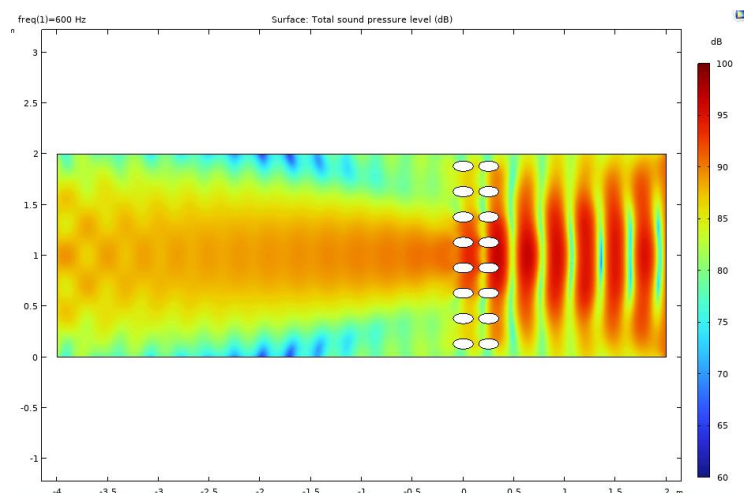
Μελετήθηκε ακόμα μια μορφή με σκεδαστές ελλειπτικής μορφής. Πραγματοποιήθηκε διερεύνηση τοποθετώντας τους σκεδαστές σε οριζόντια και κατακόρυφη κατεύθυνση.

Οριζόντια τοποθέτηση σκεδαστών

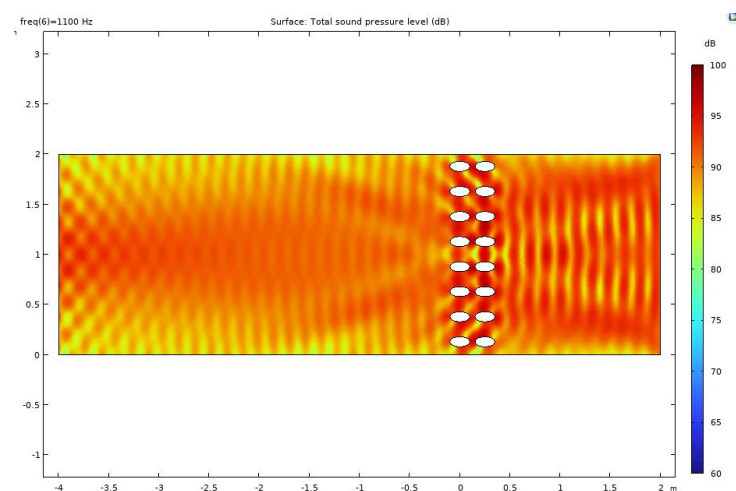


Εικόνα 22. Δομή με ελλειπτικούς οριζόντιους σκεδαστές

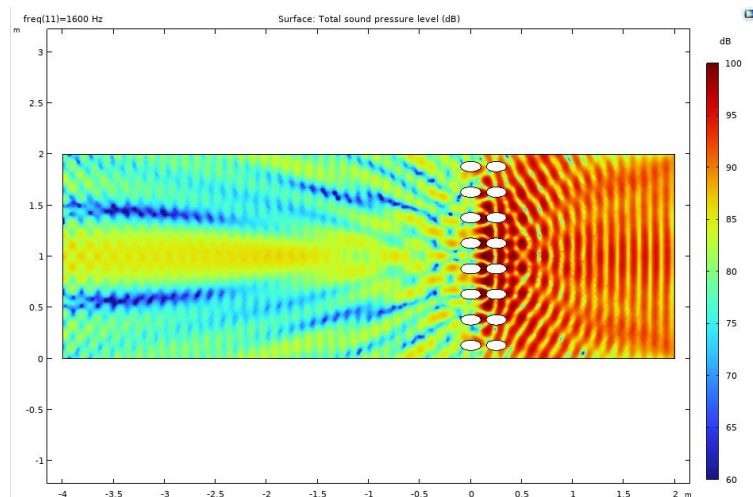
600 Hz



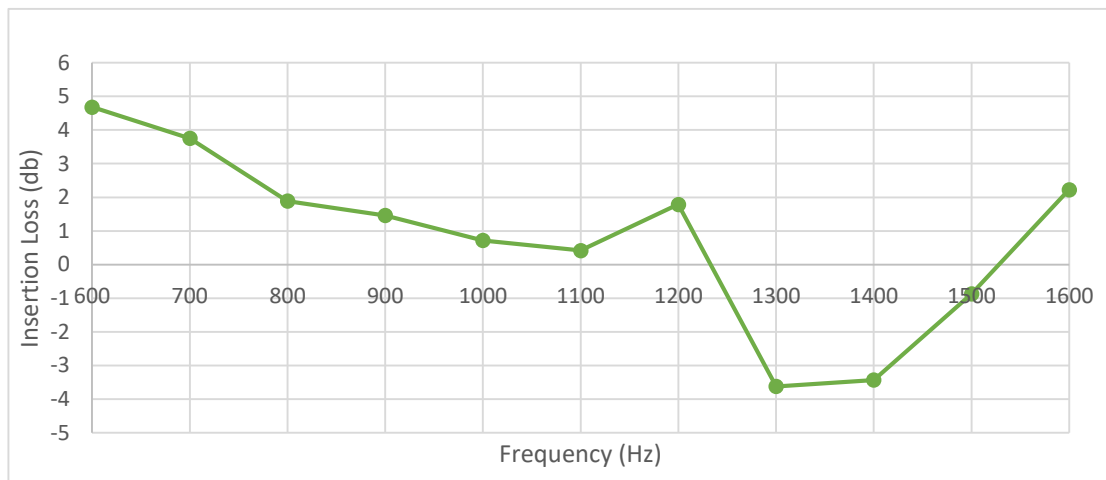
1100 Hz



1600 Hz



Εικόνα 23. Προσομοίωση με ελλειπτικούς οριζόντιους σκεδαστές

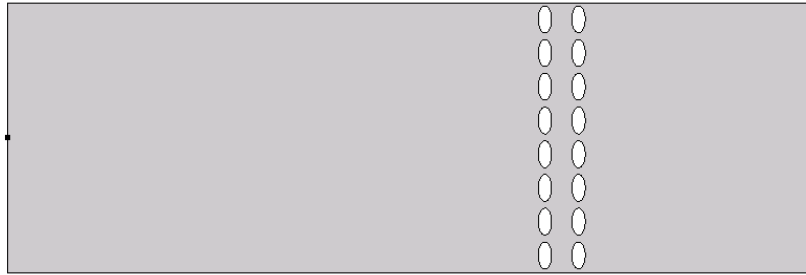


Εικόνα 24. Γράφημα δομής με ελλειπτικούς οριζόντιους σκεδαστές για διαφορετικές συχνότητες από 600 Hz σε 1600 Hz

Αν και υπάρχουν διακυμάνσεις στην απώλεια, δεν παρατηρείται σαφές band gap όπως στα προηγούμενα διαγράμματα, υποδεικνύοντας μια πιο ομαλή απόκριση του συστήματος στις διάφορες συχνότητες.

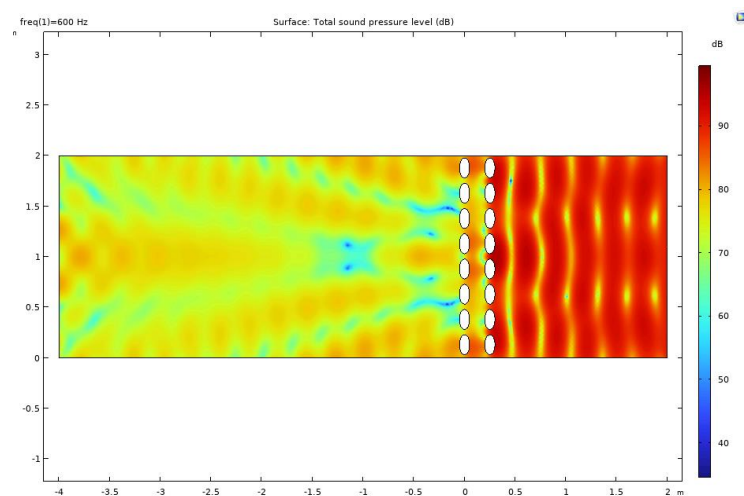
Ωστόσο, αναλύοντας το γράφημα, παρατηρούμε ότι η απώλεια εισαγωγής κυμαίνεται από -5 dB έως 5 dB. Η αρχική απώλεια στα 600 Hz είναι περίπου 4 dB και μειώνεται σταδιακά έως 2 dB στα 1000 Hz. Αυτή η περιοχή μπορεί να θεωρηθεί ως ένα πιθανό band gap. Επίσης, η περιοχή από 1000 Hz έως 1200 Hz δείχνει ελάχιστη απώλεια εισαγωγής, υποδεικνύοντας περιορισμένη αποδυνάμωση, κάτι που μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως ένα πιθανό band gap.

Κατακόρυφη τοποθέτηση σκεδάστων

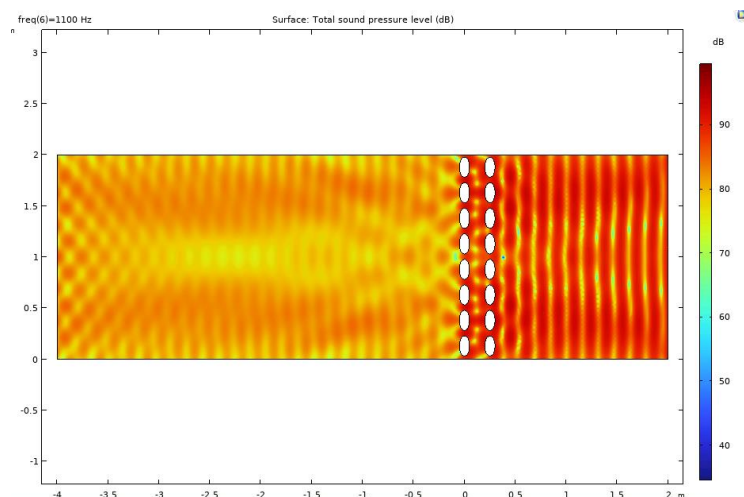


Εικόνα 25. Δομή με ελλειπτικούς κατακόρυφους σκεδάστες

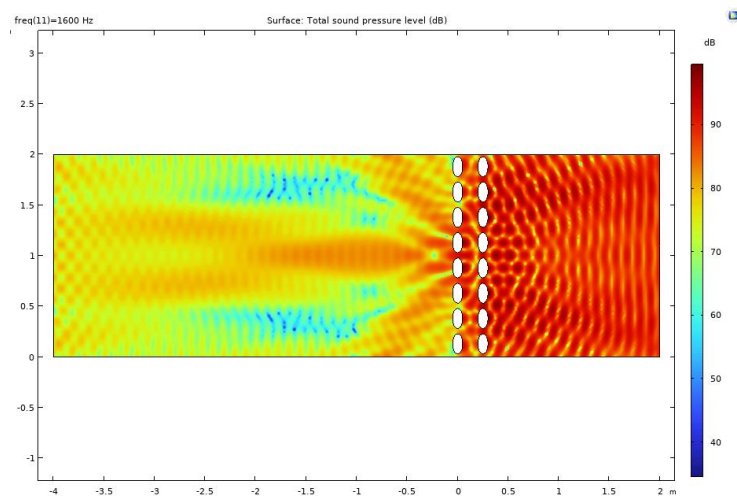
600 Hz



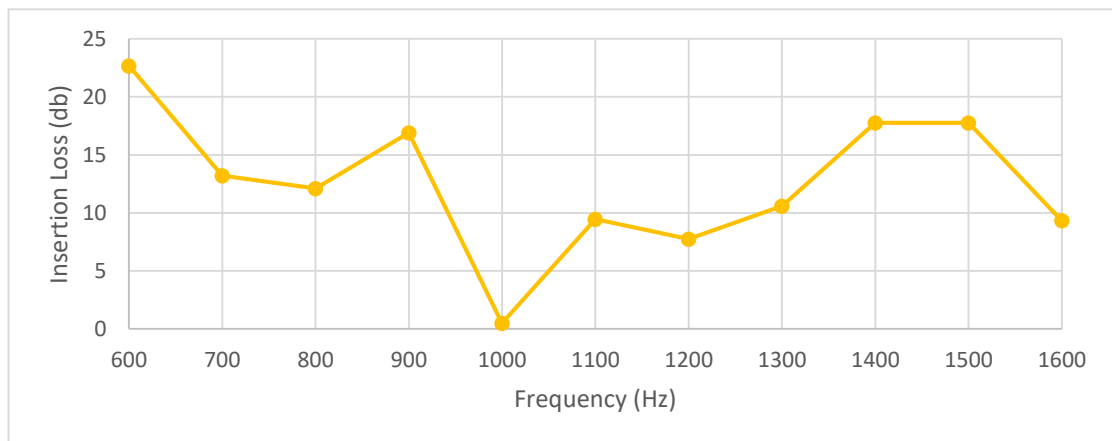
1100 Hz



1600 Hz



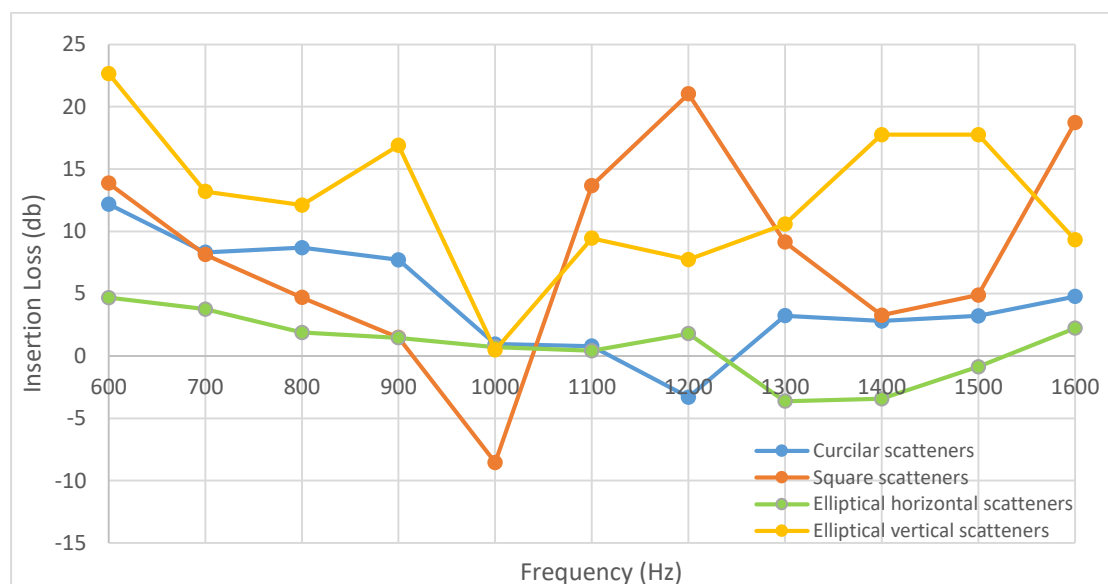
Εικόνα 26. Προσομοίωση με ελλειπτικούς κατακόρυφους σκεδαστές



Εικόνα 27. Γράφημα δομής με ελλειπτικούς κατακόρυφους σκεδαστές για διαφορετικές συχνότητες από 600 Hz σε 1600 Hz

Στο γράφημα παρατηρούνται συνολικά δύο band gaps. Το πρώτο χάσμα συχνοτήτων βρίσκεται ανάμεσα στα 600 Hz και 1000 Hz, με υψηλή απώλεια εισαγωγής που ξεκινά από 25 dB στα 600 Hz και μειώνεται σταδιακά μέχρι περίπου 0 dB στα 1000 Hz. Το δεύτερο χάσμα συχνοτήτων εντοπίζεται από τα 1300 Hz έως 1500 Hz, με μέγιστη απώλεια εισαγωγής περίπου 15 dB στα 1400 Hz, και υψηλή απώλεια γύρω στα 12 dB στα 1500 Hz.

Παρακάτω παρουσιάζεται το γράφημα των τριών διαφορετικών σχημάτων σκεδαστών.



Εικόνα 28. Γράφημα των φασμάτων απώλειας εισαγωγής για κυκλικούς, τετραγωνικούς και ελλειπτικούς οριζόντιους και κατακόρυφους σκεδαστές

Από το παραπάνω γράφημα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Οι τετράγωνοι scatterers και οι ελλειπτικοί κάθετοι scatterers παρουσιάζουν τα ισχυρότερα band gaps στην περιοχή 600 Hz - 1000 Hz.
- Στην περιοχή 1200 Hz - 1600 Hz, οι τετράγωνοι scatterers και οι ελλειπτικοί κάθετοι scatterers επίσης δείχνουν την ύπαρξη ενός δεύτερου band gap με σημαντικές απώλειες.
- Οι κυκλικοί scatterers και οι ελλειπτικοί οριζόντιοι scatterers εμφανίζουν χαμηλότερες απώλειες εισαγωγής, υποδηλώνοντας ελαφρύτερα band gaps ή την απουσία τους.

Συγκριτικά:

- Οι ελλειπτικοί κάθετοι scatterers παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά, με υψηλές απώλειες στις δύο περιοχές, αλλά οι τετράγωνοι scatterers παρουσιάζουν ισχυρότερη απόσβεση στην περιοχή των χαμηλότερων συχνοτήτων.
- Οι κυκλικοί scatterers και οι ελλειπτικοί οριζόντιοι scatterers έχουν χαμηλότερες απώλειες εισαγωγής, κάτι που δείχνει λιγότερο αποτελεσματικά band gaps.

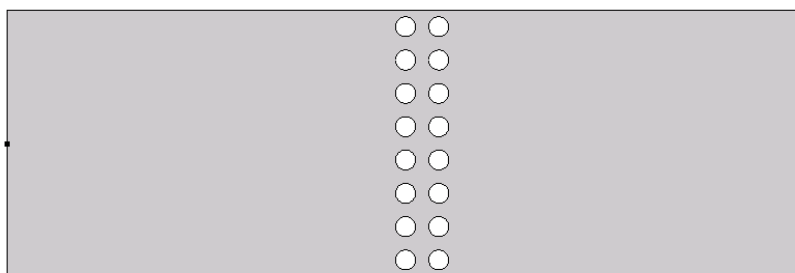
Συμπερασματικά, οι τετράγωνοι scatterers φαίνεται να έχουν την καλύτερη παρουσίαση για την απομόνωση συχνοτήτων, με δύο ξεκάθαρα band gaps, από 600-1000 Hz και 1200-1600 Hz, και τις υψηλότερες απώλειες εισαγωγής.

Κεφάλαιο 8 - Σκεδαστές με ίση απόσταση πηγή-δέκτη

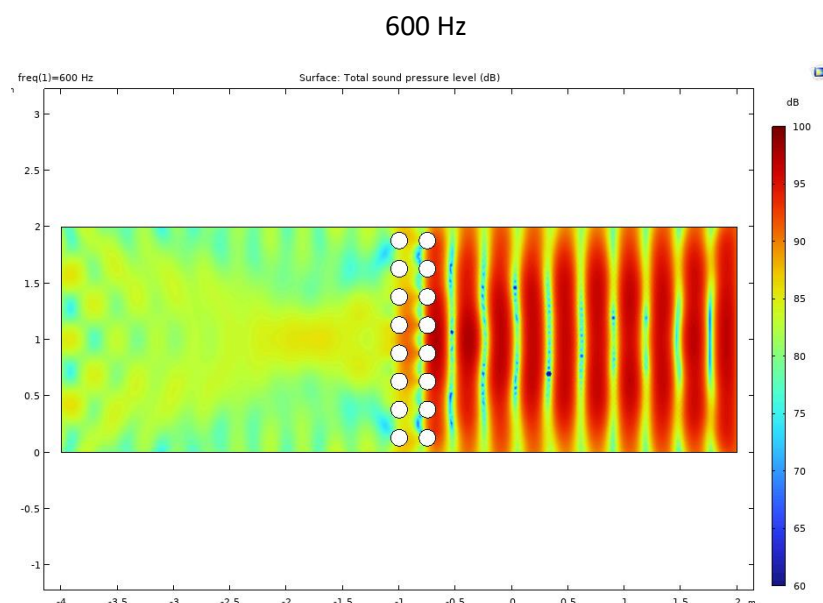
Αφού δημιουργήθηκαν οι προσομοιώσεις για διαφορετικά σχήματα σκεδαστών, θεωρείτε δόκιμο να διερευνηθούν και τα πιθανά χάσματα συχνοτήτων (band gaps) για ίση απόσταση σκεδαστών ανάμεσα σε πηγή-δέκτη.

Προσομοίωση κυκλικών σκεδαστών με ίση απόσταση από πηγή-δέκτη

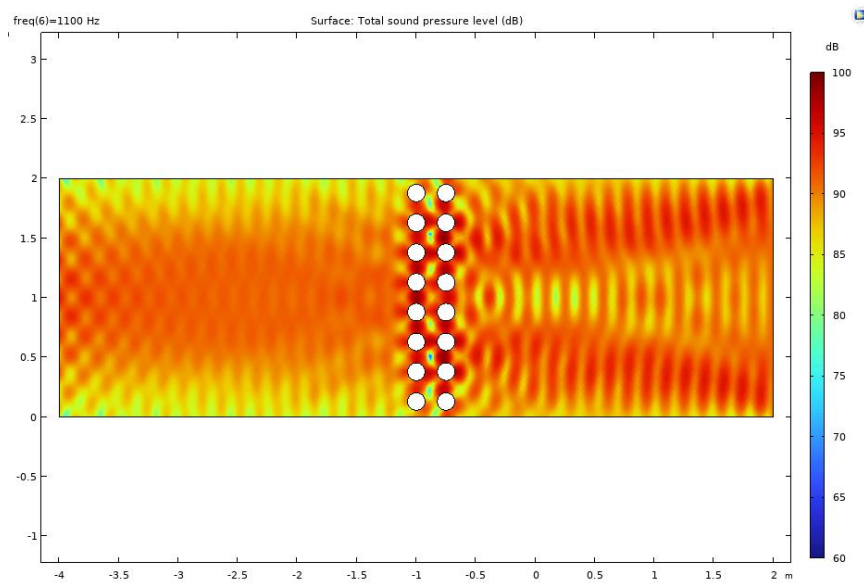
Για την προσομοίωση που οι σκεδαστές τοποθετούνται σε ίδια απόσταση από την πηγή και το δέκτη, παρουσιάζονται τα παρακάτω αποτελέσματα.



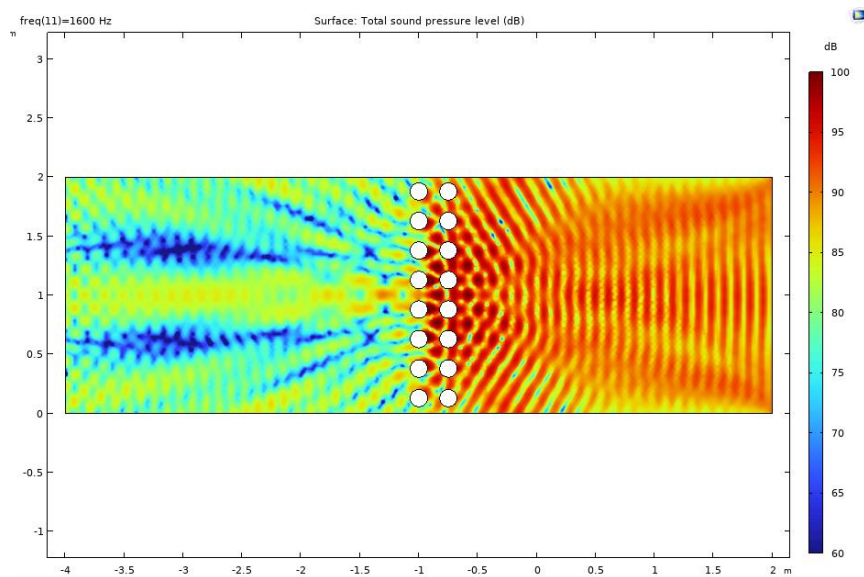
Εικόνα 29. Δομή κυκλικών σκεδαστών με ίση απόσταση από πηγή-δέκτη



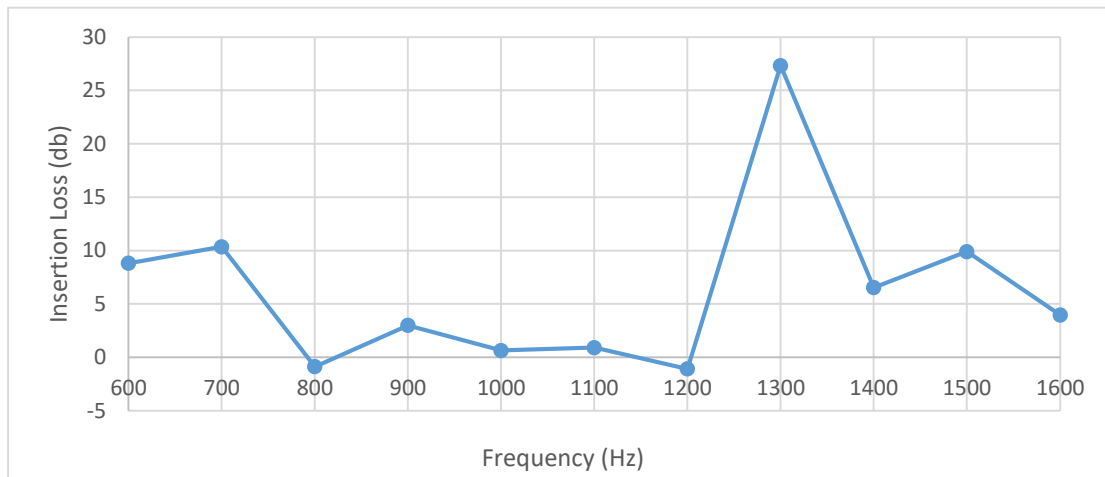
1100 Hz



1600 Hz



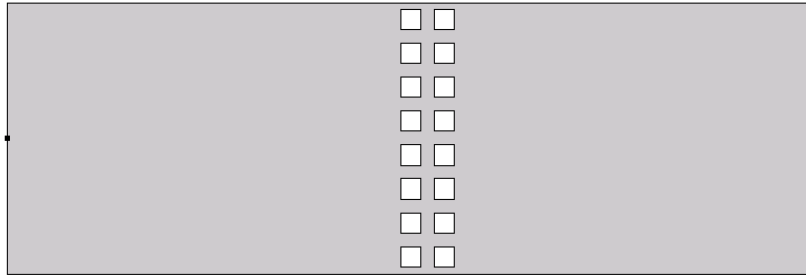
Εικόνα 30. Προσομοίωση κυκλικών σκεδαστών με ίση απόσταση από πηγή-δέκτη



Εικόνα 31. Γράφημα δομής με κυκλικούς σκεδαστές με ίση απόσταση από πηγή-δέκτη

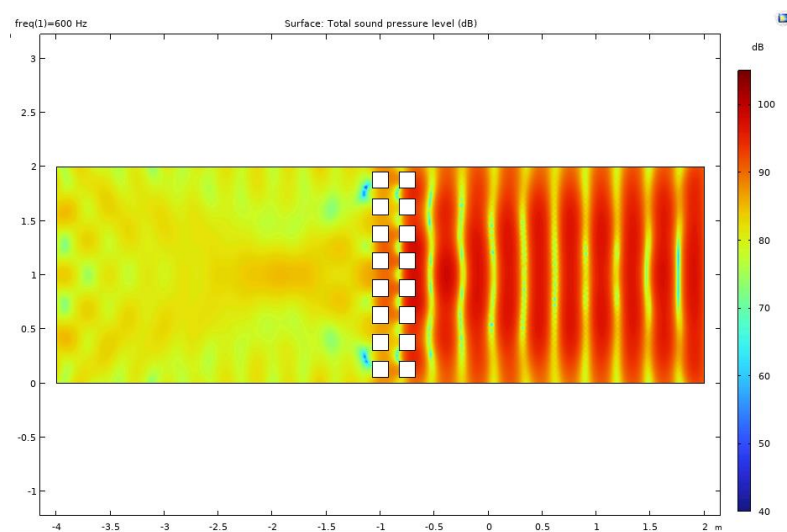
Στο γράφημα παρατηρούνται συνολικά δύο band gaps. Το πρώτο χάσμα συχνοτήτων βρίσκεται ανάμεσα στα 600 Hz και 800 Hz, με μέτρια απώλεια εισαγωγής που ξεκινά από 10 dB στα 600 Hz και μειώνεται σταδιακά μέχρι περίπου 0 dB στα 800 Hz. Το δεύτερο χάσμα συχνοτήτων εντοπίζεται από τα 1200 Hz έως 1400 Hz, με μέγιστη απώλεια εισαγωγής 25 dB στα 1300 Hz. Στην περιοχή αυτή παρατηρείται η πιο έντονη απορρόφηση, υποδεικνύοντας ένα ισχυρό band gap.

Προσομοίωση τετραγωνικών σκεδαστών με ίση απόσταση από πηγή-δέκτη

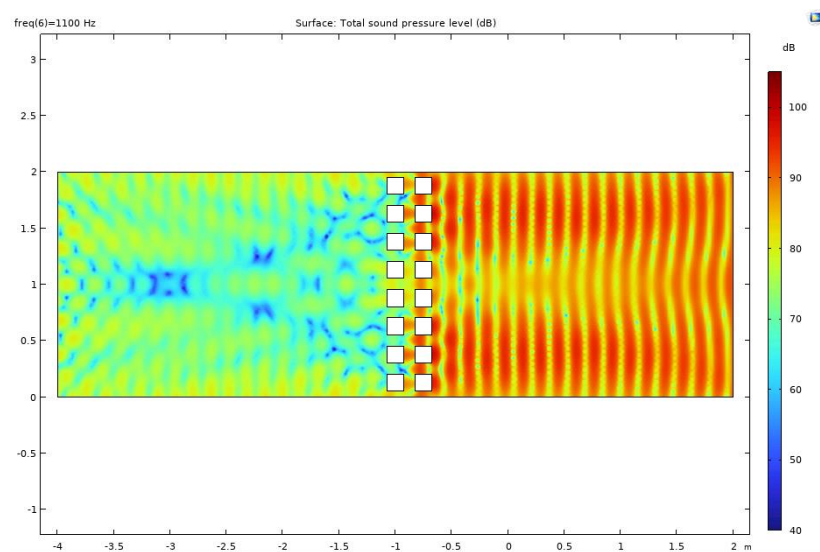


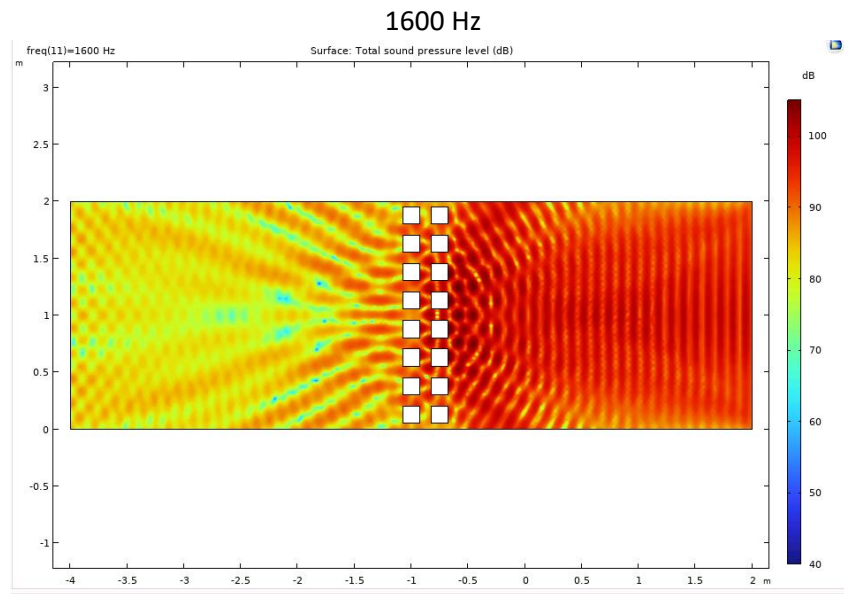
Εικόνα 32. Δομή τετραγωνικών σκεδαστών με ίση απόσταση από πηγή-δέκτη

600 Hz

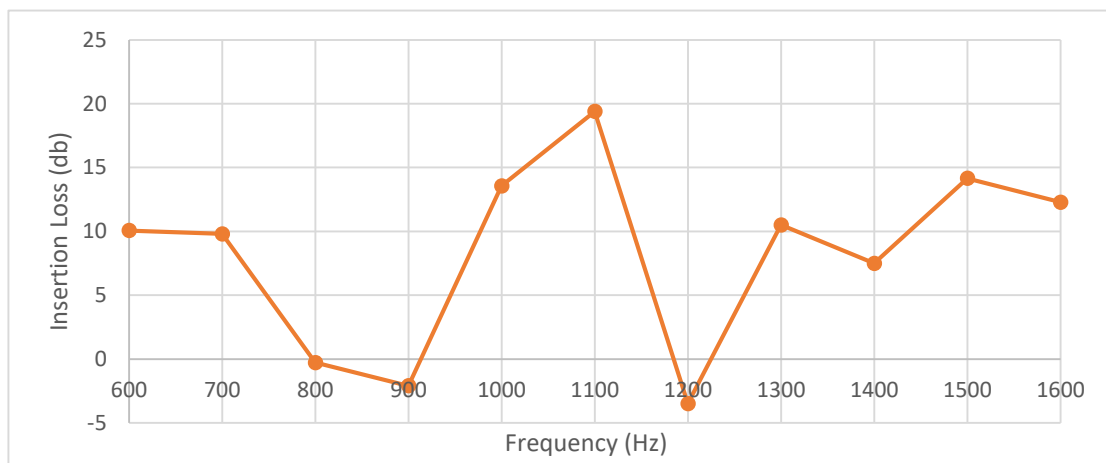


1100 Hz





Εικόνα 33. Προσομοίωση τετραγωνικών σκεδαστών με ίση απόσταση από πηγή-δέκτη

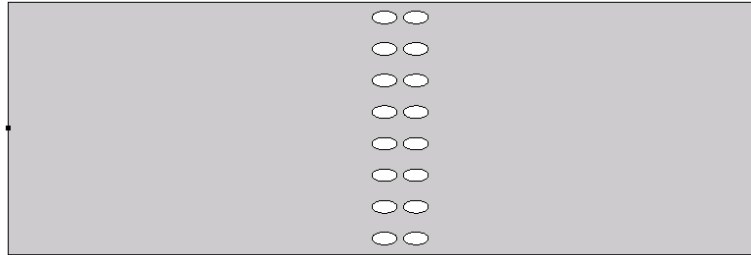


Εικόνα 34. Γράφημα δομής με τετραγωνικούς σκεδαστές με ίση απόσταση από πηγή-δέκτη

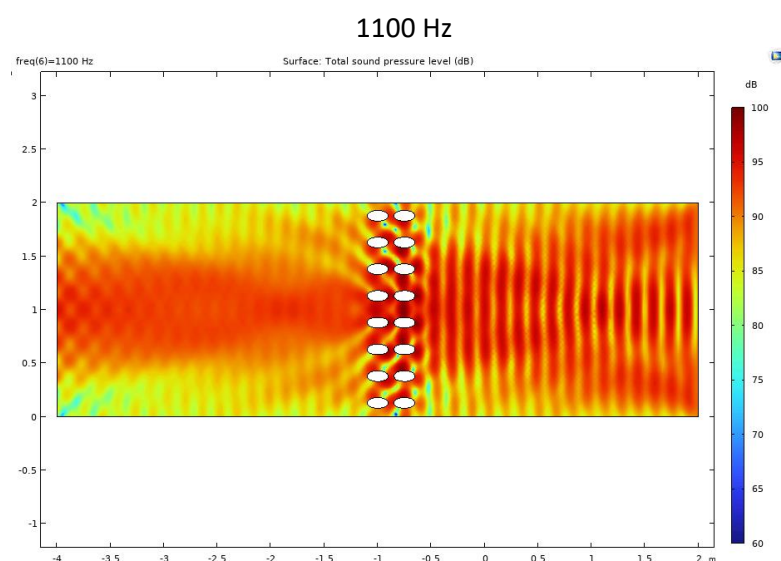
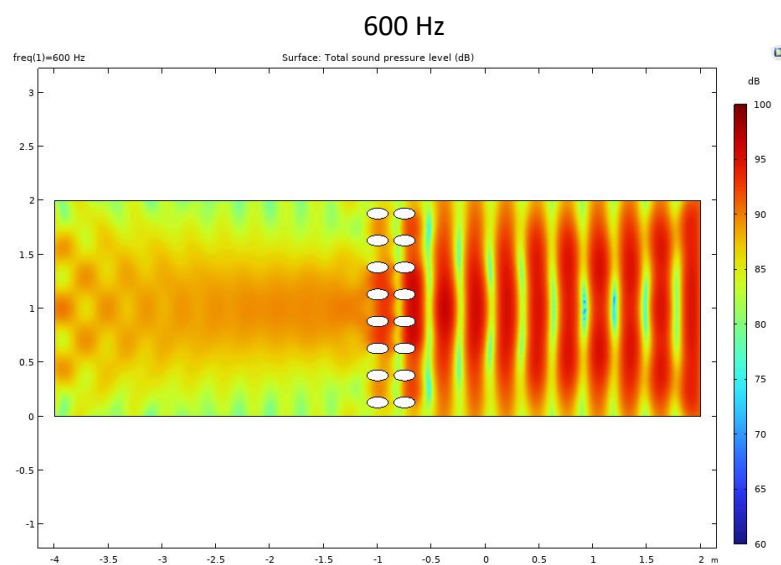
Τα band gaps που εντοπίζονται σε αυτήν την περίπτωση είναι δύο. Το πρώτο και πιο έντονο band gap εντοπίζεται στην περιοχή 900 Hz έως 1200 Hz, όπου η αποδυνάμωση φτάνει το μέγιστο των 20 dB. Ένα δεύτερο, πιο ήπιο band gap φαίνεται στην περιοχή 1200 Hz έως 1400 Hz, όπου η απώλεια αυξάνεται σταθερά γύρω στα 10 dB. Τέλος, στην περιοχή 1400 Hz έως 1600 Hz, παρατηρείται σταθερή αποδυνάμωση, που μπορεί να υποδηλώνει μια συνεχιζόμενη αλλά ηπιότερη αποκοπή σημάτων σε υψηλότερες συχνότητες.

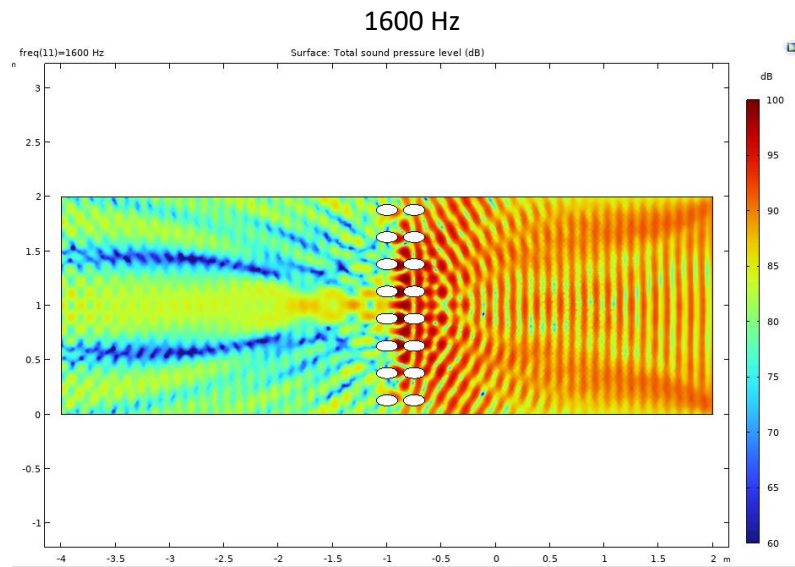
Προσομοίωση ελλειπτικών σκεδαστών με ίση απόσταση από πηγή-δέκτη

Οριζόντια τοποθέτηση σκεδαστών

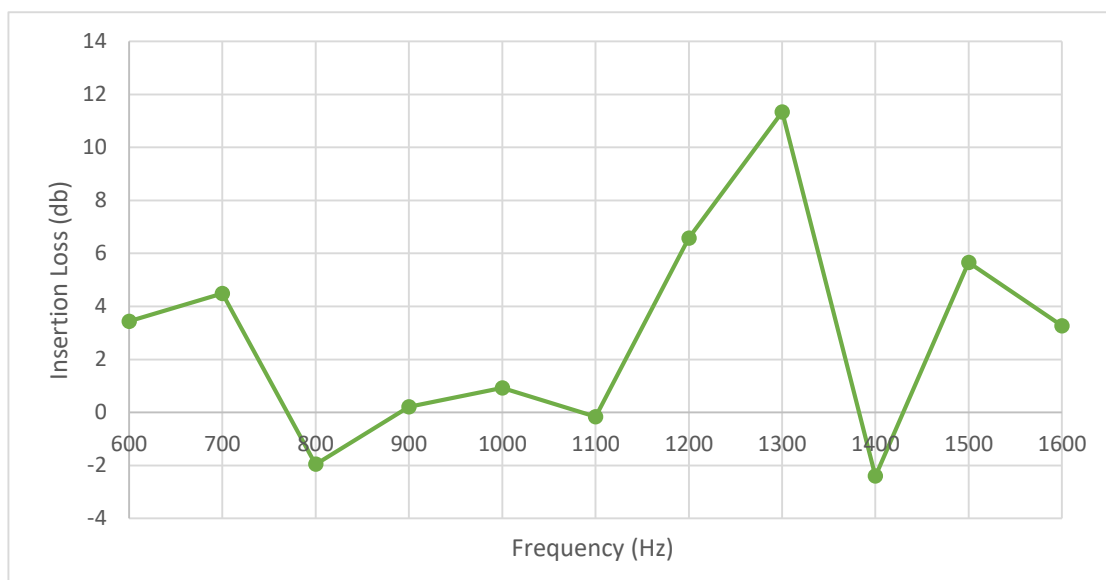


Εικόνα 35. Δομή ελλειπτικών οριζόντιων σκεδαστών με ίση απόσταση από πηγή-δέκτη





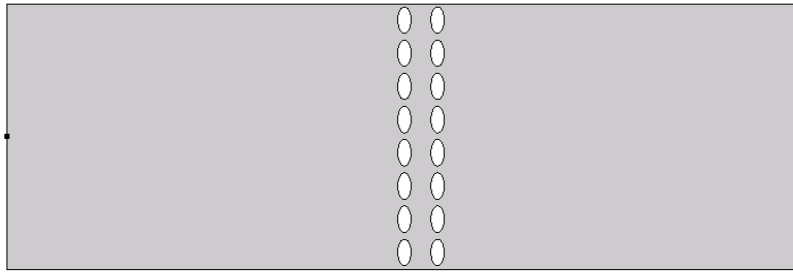
Εικόνα 36. Προσομοίωση ελλειπτικών οριζόντιων σκεδαστών με ίση απόσταση από πηγή-δέκτη



Εικόνα 37. Γράφημα δομής με ελλειπτικούς οριζόντιους σκεδαστές με ίση απόσταση από πηγή-δέκτη

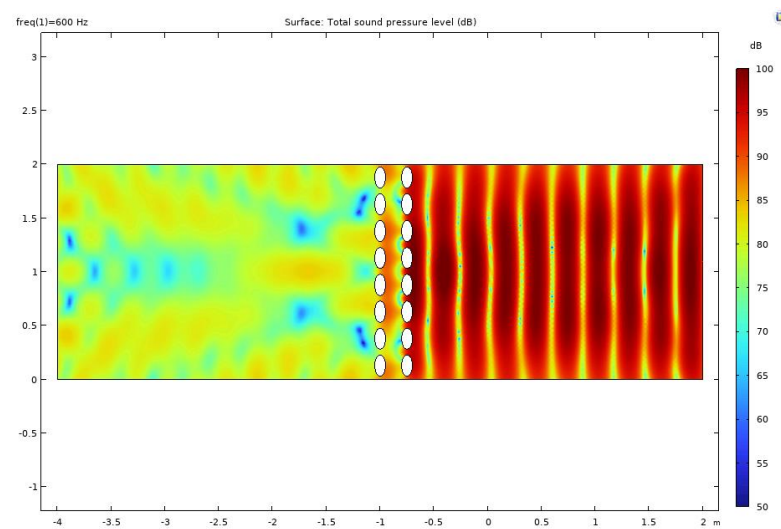
Το διάγραμμα δείχνει δύο βασικά band gaps. Το πρώτο, πιο έντονο band gap, εντοπίζεται στην περιοχή 1100 Hz έως 1300 Hz, όπου η απώλεια εισαγωγής φτάνει έως και τα 12 dB. Αυτό το band gap φαίνεται να αποτρέπει σημαντικά τη διάδοση του σήματος. Ένα δεύτερο, πιο ήπιο band gap, εμφανίζεται στην περιοχή 1400 Hz έως 1600 Hz, όπου η απώλεια κυμαίνεται μεταξύ 4 και 6 dB. Αν και δεν είναι τόσο έντονο όσο το προηγούμενο, δείχνει μια συνεχιζόμενη αποδυνάμωση του σήματος.

Κατακόρυφη τοποθέτηση σκεδαστών

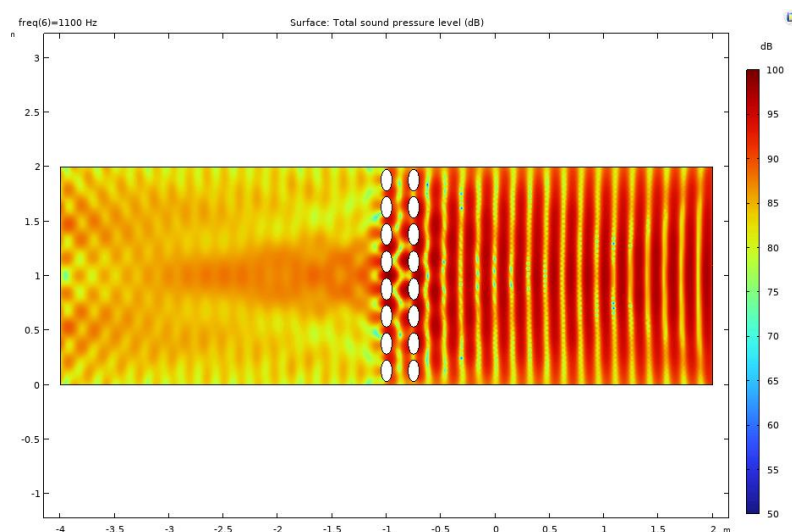


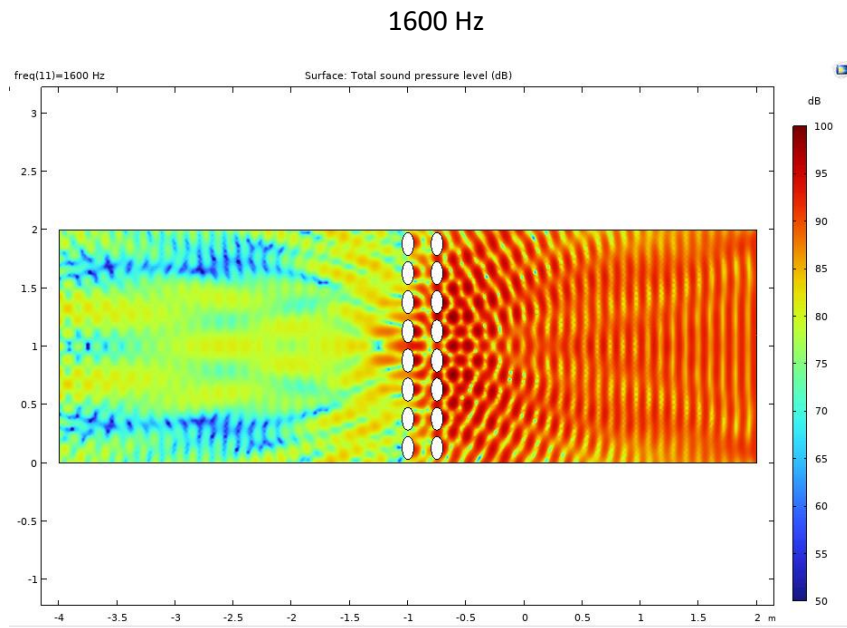
Εικόνα 38. Δομή ελλειπτικών κατακόρυφων σκεδαστών με ίση απόσταση από πηγή-δέκτη

600 Hz

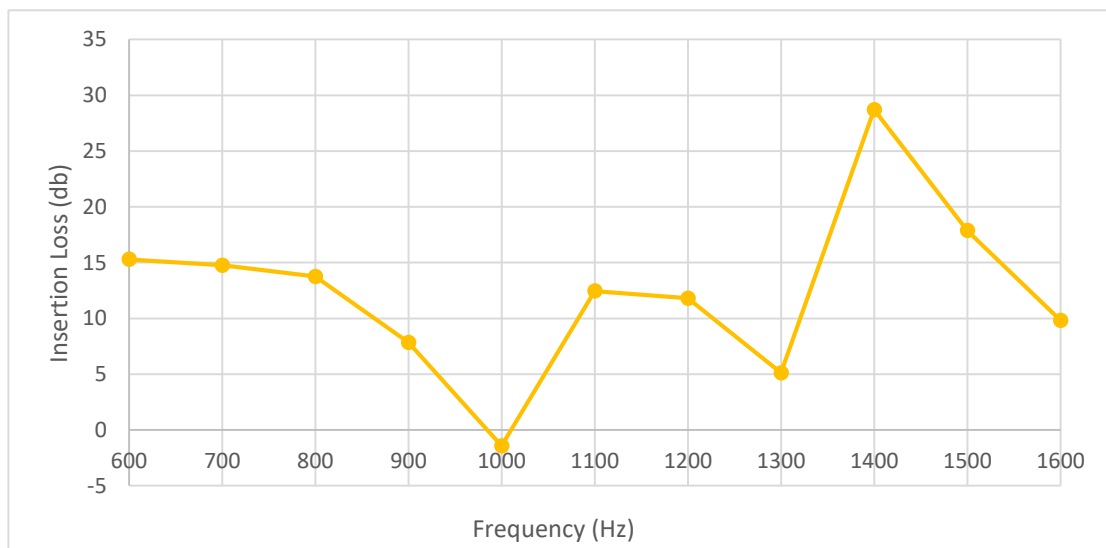


1100 Hz





Εικόνα 39. Προσομοίωση ελλειπτικών κατακόρυφων σκεδαστών με ίση απόσταση από πηγή-δέκτη

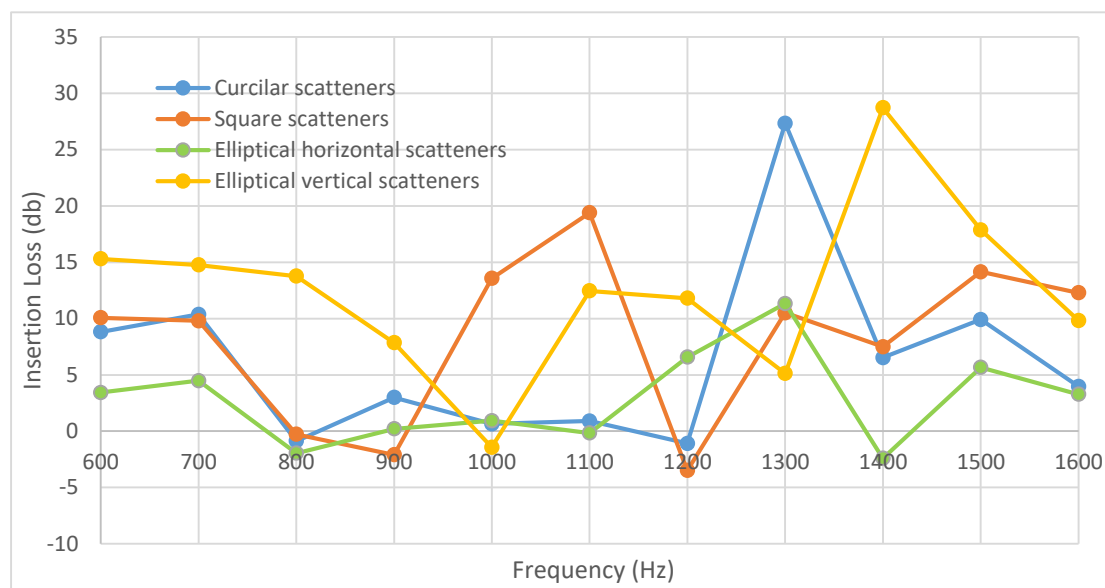


Εικόνα 40. Γράφημα δομής με ελλειπτικούς κατακόρυφους σκεδαστές με ίση απόσταση από πηγή-δέκτη

Το διάγραμμα δείχνει την ύπαρξη ενός κύριου band gap. Το κύριο κενό ζώνης παρουσιάζεται μεταξύ 1300 Hz και 1400 Hz, όπου η απώλεια εισαγωγής φτάνει το μέγιστο των 30 dB. Αυτό δείχνει ότι το σήμα περιορίζεται δραστικά σε αυτή την περιοχή.

Η περιοχή γύρω στις 1000 Hz παρουσιάζει σχεδόν 0 dB απώλεια, υποδεικνύοντας ότι το σύστημα επιτρέπει τη σχεδόν πλήρη διάδοση του σήματος σε αυτό το εύρος.

Παρακάτω παρουσιάζεται το γράφημα των τριών διαφορετικών σχημάτων σκεδαστών για την περίπτωση ίσης απόστασης από πηγή-δέκτη.



Εικόνα 41. Γράφημα των φασμάτων απώλειας εισαγωγής για κυκλικούς, τετραγωνικούς και ελλειπτικούς οριζόντιους και κατακόρυφους σκεδαστές, με ίση απόσταση από πηγή-δέκτη

Οι κυκλικοί και τετραγωνικοί σκεδαστές εμφανίζουν μεγάλες διακυμάνσεις και σημαντικές κορυφώσεις στην απώλεια εισαγωγής, ιδιαίτερα στα 1300 Hz και 1100 Hz αντίστοιχα, γεγονός που δείχνει μειωμένη αποδοτικότητα σε αυτές τις συχνότητες.

Οι ελλειπτικοί οριζόντιοι σκεδαστές είναι οι πιο αποδοτικοί, με τη χαμηλότερη απώλεια εισαγωγής σε όλες σχεδόν τις συχνότητες. Είναι ιδανικοί για περιοχές συχνοτήτων όπου απαιτείται χαμηλή εξασθένιση του σήματος.

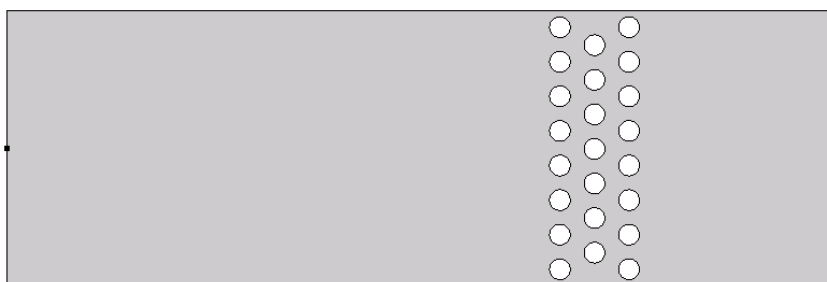
Οι ελλειπτικοί κάθετοι σκεδαστές εμφανίζουν επίσης μεγάλες διακυμάνσεις με κορυφώσεις στην απώλεια κοντά στα 30 db σε πολλές συχνότητες (900 Hz και 1300 Hz), γεγονός που τους καθιστά λιγότερο αποδοτικούς από τους ελλειπτικούς οριζόντιους.

Συμπερασματικά, οι ελλειπτικοί κατακόρυφοι σκεδαστές είναι η καλύτερη επιλογή αφού παρουσιάζουν υψηλότερη και πιο σταθερή απώλεια εισαγωγής σε περισσότερες συχνότητες.

Κεφάλαιο 9 - Σκεδαστές σε εξαγωνικό πλέγμα

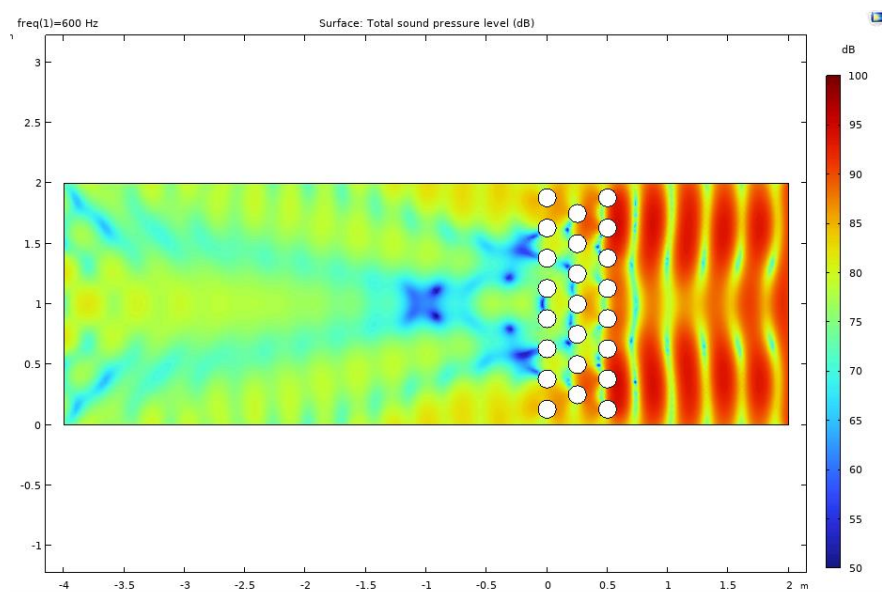
Έπειτα από τις παραπάνω προσομοιώσεις θα γίνει μια επιπλέον διερεύνηση για μελέτη των κυκλικών σκεδαστών στην αρχική απόσταση από την πηγή-δέκτη αλλά σε διαφορετική μορφή πλέγματος. Σε αυτή τη διερεύνηση θα αυξηθεί το πλήθος των σκεδαστών, δημιουργώντας 3 γραμμές και θα τοποθετηθούν σε εξαγωνική συστοιχία.

Η πρώτη και η τρίτη γραμμή έχει 8 σκεδαστές και η δεύτερη 7 σκεδαστές. Στη δεύτερη γραμμή οι σκεδαστές είναι τοποθετημένοι σε απόσταση, a (lattice constant) = 0.25 m προς τον x και το y άξονα. Η μορφή των συστοιχιών απεικονίζεται παρακάτω.

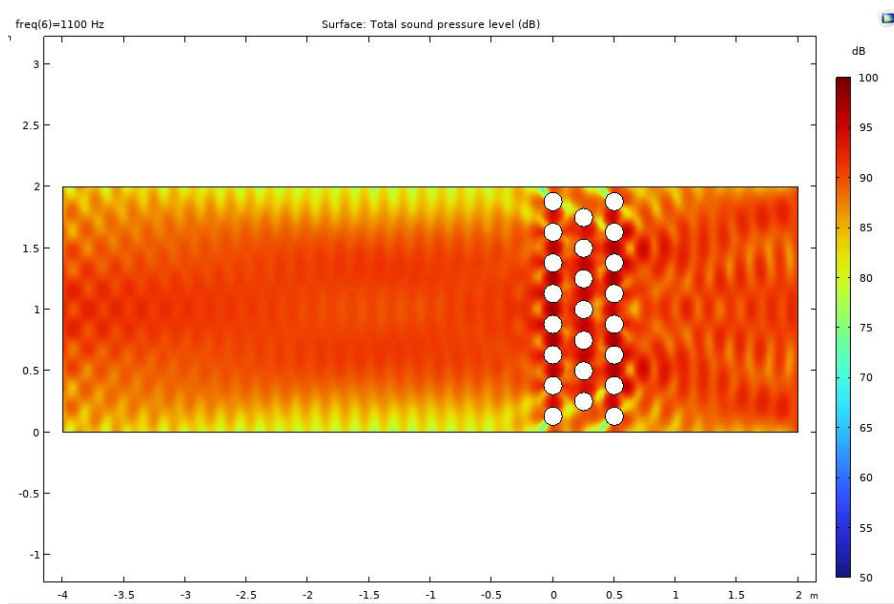


Εικόνα 42. Αρχική δομή κυκλικών σκεδαστών σε εξαγωνικό πλέγμα

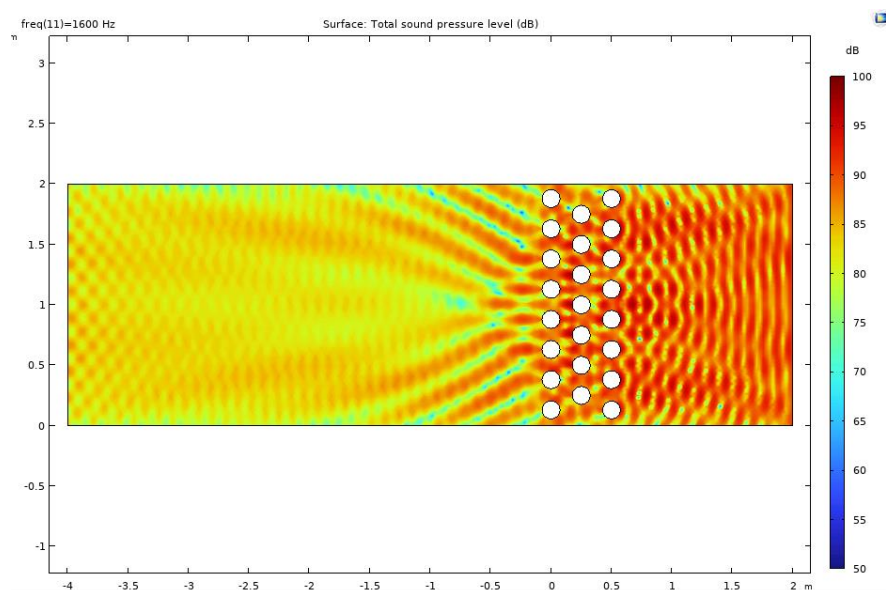
600 Hz



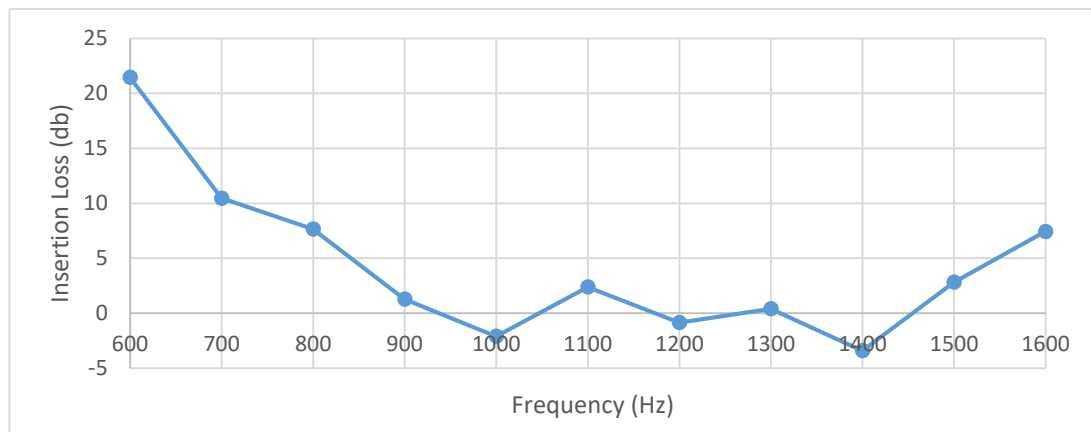
1100 Hz



1600 Hz



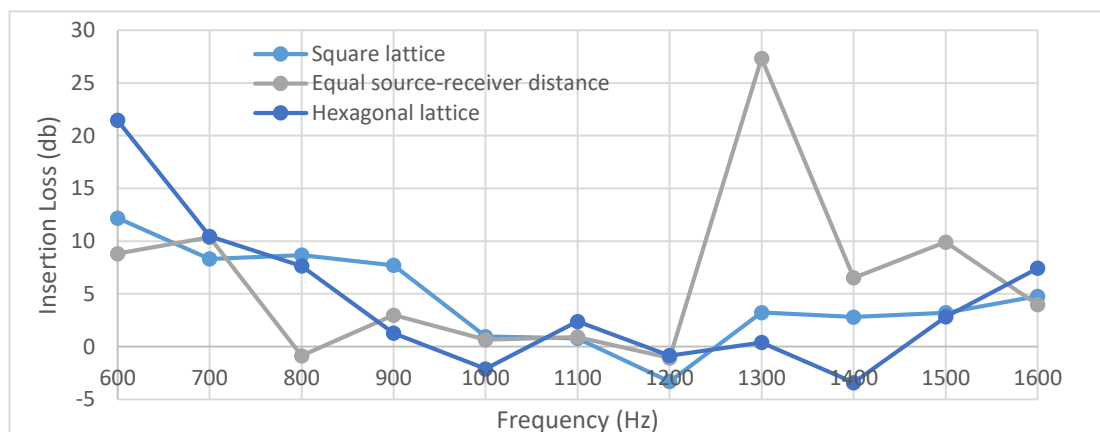
Εικόνα 43. Προσομοίωση με κυκλικούς σκεδαστές σε εξαγωνικό πλέγμα



Εικόνα 44. Γράφημα με κυκλικούς σκεδαστές σε εξαγωνικό πλέγμα

Το γράφημα μας αποκαλύπτει δύο βασικά band gaps στις συχνότητες 600-800 Hz και 1300-1500 Hz, όπου το σύστημα εμφανίζει μεγαλύτερη απώλεια.

Έπειτα απεικονίζεται το γράφημα με όλες τις περιπτώσεις που αναφέρθηκαν με κυκλικούς σκεδαστές, σε τετραγωνικό πλέγμα, με αλλαγή στη θέση τοποθετώντας τους σε ίση απόσταση από πηγή-δέκτη και σε εξαγωνικό πλέγμα.



Εικόνα 45. Γράφημα των φασμάτων απώλειας εισαγωγής για κυκλικούς σκεδαστές σε τετραγωνικό πλέγμα, με ίση απόσταση από πηγή-δέκτη και σε εξαγωνικό πλέγμα

Το τετράγωνο πλέγμα και το εξαγωνικό πλέγμα εμφανίζουν σχετικά παρόμοιες συμπεριφορές. Και τα δύο ξεκινούν με υψηλότερη απώλεια εισαγωγής στις χαμηλές συχνότητες (600 Hz), αλλά μειώνουν σημαντικά την απώλεια καθώς αυξάνεται η συχνότητα, διατηρώντας τη χαμηλή σε μεγάλο μέρος του φάσματος, ιδιαίτερα γύρω από τις μεσαίες συχνότητες.

Το ισαπέχον σχήμα πηγής-δέκτη έχει τη χαμηλότερη απώλεια εισαγωγής στις χαμηλότερες συχνότητες (600-900 Hz), καθιστώντας το αποδοτικό σε αυτό το εύρος.

Συμπερασματικά, στο τελικό γράφημα για κυκλικούς σκεδαστές η προσομοίωση με τετραγωνικό πλέγμα μειώνει το φαινόμενο εστίασης (αρνητικό IL) σε ικανοποιητικό βαθμό έχοντας μόνο μια συχνότητα με αρνητικό IL. Ωστόσο, στη συστοιχία με ίση απόσταση των σκεδαστών από πηγή-δέκτη παρατηρούμε το πρώτο κενό ζώνης (band gap) υψηλότερου πλάτους στη συχνότητα 1300 Hz.

Κεφάλαιο 10 - Σύνοψη αποτελεσμάτων

Τετραγωνικό Πλέγμα	Κυκλικοί σκεδαστές	Τετραγωνικοί σκεδαστές	Ελλειπτικοί οριζόντιοι σκεδαστές	Ελλειπτικοί κατακόρυφοι σκεδαστές
1° band gap	600 Hz -1100 Hz	600 Hz -1000 Hz	600 Hz -1000 Hz (πιθανό)	600 Hz -1000 Hz
2° band gap	-	1200 Hz -1600 Hz	1000 Hz -1200 Hz (πιθανό)	1300 Hz-1500 Hz

Ίση απόσταση πηγή-δέκτη	Κυκλικοί σκεδαστές	Τετραγωνικοί σκεδαστές	Ελλειπτικοί οριζόντιοι σκεδαστές	Ελλειπτικοί κατακόρυφοι σκεδαστές
1° band gap	600 Hz - 800 Hz	900 Hz -1200 Hz	1100 Hz -1300 Hz	1300 Hz -1400 Hz
2° band gap	1200 Hz -1400 Hz	1200 Hz -1400 Hz	1400 Hz -1600 Hz	-

Εξαγωνικό Πλέγμα	Κυκλικοί σκεδαστές
1° band gap	600 Hz -800 Hz
2° band gap	1300 Hz-1400 Hz

Στους παραπάνω πίνακες συνοψίζονται τα αποτελέσματα για τα διαφορετικά φάσματα συχνοτήτων, όπου παρατηρείται συνέπεια στην ύπαρξη κάποιου band gap.

Εξετάζοντας τη συνδυαστική απόδοση των στοιχείων που αναλύθηκαν μεμονωμένα, και δημιουργώντας διάφορες εκδοχές μοντέλων, διαπιστώνεται ότι το εύρος συχνοτήτων όπου σταματά η διάδοση του κύματος εντοπίζεται μεταξύ 1100 Hz και 1400 Hz.

Κεφάλαιο 11 - Προκλήσεις και προοπτικές

Κατά τη μελέτη της βιβλιογραφίας, διαπιστώθηκε ότι οι έρευνες για τους ηχητικούς σκεδαστές είναι αρκετές εκτενείς με ποικίλες διαμορφώσεις και γεωμετρίες.

Ωστόσο, ένας από τους κύριους παράγοντες που απαιτούν προσοχή είναι το οικονομικό κόστος. Επειδή η κατασκευή τέτοιων δομών δεν μπορεί να γίνει με συμβατικές μεθόδους, είναι απαραίτητο να υπολογιστεί το συνολικό κόστος παραγωγής, ώστε να εξασφαλιστεί ότι το τελικό προϊόν θα είναι βιώσιμο και εφαρμόσιμο στην πράξη.

Στα αποτελέσματα που προέκυψαν, διαπιστώθηκε ότι οι τετραγωνικοί σκεδαστές στην αρχική γεωμετρία αποδίδουν καλύτερα αποτελέσματα. Ωστόσο, αρκετές από τις περιπτώσεις που αναφέρθηκαν και μελετήθηκαν θα μπορούσαν να αποτελούν αντικείμενο περαιτέρω διερεύνησης.

Προτείνεται να πραγματοποιηθούν περαιτέρω βελτιστοποιήσεις, με αυξημένη παραμετροποίηση στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και το φάσμα συχνοτήτων. Αυτό θα επιτρέψει την προσθήκη νέων δεδομένων στη βιβλιογραφία, ενισχύοντας την κατανόηση και τη δυνατότητα αξιοποίησης των ηχοπετασμάτων, τα οποία θα μπορούν να προσφέρουν αποτελεσματικές λύσεις σε πρακτικές εφαρμογές.

Βιβλιογραφία

- [1] Martinez-Sala R., Sancho J., Sanchez J.V., Gomez V., Llinares J., Meseguer F., Sound attenuation by sculpture, *Nature*, 378, 241, (1995).
- [2] Wu L.-Y., Chen L.-W., Liu C.-M., Acoustic pressure in cavity of variously sized two-dimensional sonic crystal with various filling fraction, *Phys. Lett. A*, 373, 1189–1195, (2009).
- [3] Vasseur J.O., Deymier P.A., Djafari-Rouhani B., Pennec Y., Hladky-Hennion A.-C., Absolute forbidden bands and waveguiding in two-dimensional phononic crystal plates, *Phys. Rev. B*, 77, 085415, (2008).
- [4] Sanchez-Perez J.V., Rubio C., Martinez-Sala R., Sanchez -Grandia R., Gomez V., Acoustic barriers based on periodic arrays of scatterers, *Appl. Phys. Lett.*, 81, 5240, (2002).
- [5] Castineira-Ibanez S., Rubio C., Romero-Garcia V., Sánchez-Pérez J.V., Garcia-Raffi L.M., Design, Manufacture and Characterization of an Acoustic Barrier Made of Multi-Phenomena Cylindrical Scatterers Arranged in a Fractal-Based Geometry, *Archives of Acoustics*, 37, 4, 455–462, (2012).
- [6] Romero Garcia D., On the control of propagating acoustic waves in sonic crystals: analytical, numerical and optimization techniques, *Doctoral Thesis*, (2010).
- [7] Umnova O., Attenborough K., Linton C.M., Effects of porous covering on sound attenuation by periodic arrays of cylinders, *J. Acoust. Soc. Am.*, 119, 1, (2006).
- [8] Martinez -Sala R., Rubio C., Garcia-Raffi L.M., Sanchez-Perez J.V., Sanchez-Perez E.A., Llinares J., Control of noise by trees arranged like sonic crystals, *Jour. Sound Vib.*, 291, 100, (2006).
- [9] Maldovan M., Sound and heat revolutions in phononics (2013). *Nature*, 503, 209.
- [10] Xue-Feng Li, Xu Ni, Liang Feng, Ming-Hui Lu, Cheng He, and Yan-Feng Chen Li, Tunable unidirectional sound propagation through a sonic-crystal-based acoustic diode. *Phys. Rev. Lett.*, 106, 084301, (2011).
- [11] Tommaso D’Orazio, Francesco Asdrubali, Luis Godinho, Matheus Veloso and Paulo Amado-Mendes, Experimental and Numerical Analysis of Wooden Sonic Crystals Applied as Noise Barriers, (2023).
- [12] Fredianelli, L., Del Pizzo, A., Licitra, G., Recent Developments in Sonic Crystals as Barriers for Road Traffic Noise Mitigation, *Environments*, 6, 14, (2019).
- [13] Alves C.J.S., Valtchev S.S., Numerical comparison of two meshfree methods for acoustic wave scattering, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 29, 4, 371–382, (2005).
- [14] Godinho L., Tadeu A., Amado Mendes P., Wave propagation around thin structures using the MFS, *Computers Materials, Continua (CMC)*, 5, 2, 117–127, (2007).
- [15] Godinho L., Amado Mendes P., Tadeu A., Cadena-Isaza A., Smerzini C., Sánchez Sesma F., Madec R., Komatitsch D., Numerical Simulation of Ground Rotations along 2D Topographical Profiles under the Incidence of Elastic Plane Waves, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99, 2B, 1147–1161, (2009).

- [16] Hirsekorn, M., Delsanto, P.P., Batra, N.K., Matic, P., Modelling and simulation of acoustic wave propagation in locally resonant sonic materials. *Ultrasonics*, 42, 231–235, (2004).
- [17] Chong, Y., Sonic Crystal Noise Barriers. Ph.D. Thesis, The Open University, Milton Keynes, UK, (2012).
- [18] Martins, M., Godinho, L., Picado-Santos, L., Numerical evaluation of sound attenuation provided by periodic structures. *Arch. Acoust.*, 38, 503–516, (2013).
- [19] Morandi, F., Miniaci, M., Marzani, A., Barbaresi, L., Garai, M., Standardised acoustic characterisation of sonic crystals noise barriers: Sound insulation and reflection properties. *Appl. Acoust.*, 114, 294–306, (2016).
- [20] Santos, P., Carbajo, J., Rui, D., Godinho, L., Mendes, P.A., Soriano, J.R., Insertion loss provided by sonic crystal type barrier—Experimental and numerical evaluation on a reduced scale model, (2014).
- [21] Gupta A., A Review on Sonic Crystal, Its Applications and Numerical Analysis Techniques, Article in Acoustical Physics, India, (2014).
- [22] Gupta A., Numerical modeling and experiments on sound propagation through the sonic crystal and design of radial sonic crystal, PhD Thesis, Scholarbank NUS, (2012).
- [23] Gupta A., Chew C. and Lim K., in Proc. 4th Int. Conf. on Experimental Mechanics. Singapore, (Int. Soc. Optics Photonics), (2009).
- [24] Webster A. G., Proc. Natl. Acad. Sci. USA 5, 275, (1919).
- [25] Kinsler L. E., Frey A. R., et al. Fundamental of Acoustics, 3rd ed., California, (1982).
- [26] Durgin G. D., The Practical Behavior of Various Edge-Diffraction Formulas, *IEEE Antennas and Propagation Magazine* 51, 24-35, (2009).
- [27] Grahn P. and Herring Jensen M., Optimizing Noise Barriers with Comsol Multiphysics, (2019).
- [28] Τσανακτσίδης Δ. και Τσίτσουλας Δ., Σύγχρονα Συστήματα Εξοπλισμού των Οδών, (2003).
- [29] Papadakis N. and Stavroulakis G., Finite Element Method for the Estimation of Insertion Loss of Noise Barriers: Comparison with Various Formulae (2D), (2020)