



Πολυτεχνείο Κρήτης

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

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Εύρεση περιοχών χάσματος συχνότητας,
σε υλικά που αποτελούνται από
συνδυασμούς αυξητικών μικροδομών, με
χρήση πεπερασμένων στοιχείων.

Band gap regions on material with combined
auxetic microstructures, using finite element
method.

Χήνης Δημήτριος Α.Μ. 202019002

Επιβλέπων καθηγητής: Σταυρουλάκης Γεώργιος
Χανιά, 2022

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	5
Περίληψη.....	6
Abstract	6
Κεφάλαιο 1 – Γενικά.....	7
Εισαγωγή.....	7
Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	8
Κεφάλαιο 2 – Αυξητικά υλικά	9
Γενική περιγραφή.....	9
Αυξητική συμπεριφορά - Λόγος Poisson.....	11
Ιδιότητες Αυξητικών Υλικών.....	12
Συγκλαστική καμπυλότητα σε λυγισμό.....	12
Μεταβλητή διαπερατότητα	13
Αντίσταση σε διάτμηση.....	13
Αντίσταση σε διείσδυση.....	14
Αντίσταση σε θραύση	15
Ακουστική απορρόφηση	15
Πεδία εφαρμογών	16
Κεφάλαιο 3 – Γεωμετρία της δομής.....	17
Κεφάλαιο 4 – Χάσματα συχνοτήτων (Band gaps)	18
Κεφάλαιο 5 – Διάδοση κύματος σε 2D περιοδικές δομές	19
Ανάλυση Θεωρήματος Μπλοχ (Bloch Theorem)	19
IBZ (Irreducible Brillouin Zone) και περιοδικά μοντέλα.....	19
Εφαρμογή θεωρίας στο μοντέλο	22
Κεφάλαιο 5 – Μοντελοποίηση πειράματος.....	24
Προσομοίωση αρχικής δομής χωρίς και με κυκλικό έγκλεισμα.....	25
Προσομοίωση με αλλαγή στο μέγεθος των εσωτερικών ελλείψεων.....	28
Εσωτερική έλλειψη 170X30, ράβδος 3mm.....	29
Εσωτερική έλλειψη 170X30, ράβδος 6mm.....	30
Εσωτερική έλλειψη 170X30, ράβδος 12mm.....	31
Εσωτερική έλλειψη 170X60, ράβδος 3mm.....	32
Εσωτερική έλλειψη 170X60, ράβδος 6mm.....	33
Εσωτερική έλλειψη 170X60, ράβδος 12mm.....	34
Εσωτερική έλλειψη 170X80, ράβδος 3mm.....	35

Εσωτερική έλλειψη 170X80, ράβδος 12mm	36
Εσωτερική έλλειψη 170X90, ράβδος 3mm	37
Εσωτερική έλλειψη 170X90, ράβδος 6mm	38
Εσωτερική έλλειψη 170X90, ράβδος 12mm	39
Κεφάλαιο 6 – Προσομοίωση φόρτισης πλέγματος 5X5	40
Κεφάλαιο 7 – Διερεύνηση της αποτελεσματικότητας του συνδυασμού δομών	45
Πλέγμα μίας διαστρωμάτωσης – Διαφορετικές διατάξεις στοιχείων	51
Κεφάλαιο 8 – Σύνοψη αποτελεσμάτων	56
Κεφάλαιο 9 – Προκλήσεις και Προοπτικές	57
Βιβλιογραφία	58

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της μεταπτυχιακής μου διατριβής κ. Σταυρουλάκη Γεώργιο, για την πολύτιμη βοήθειά του και την άψογη συνεργασία που είχαμε, καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών.

Επίσης, ευχαριστώ τους καθηγητές κ. Αντωνιάδη Αριστομένη και κ. Μπιλάλη Νικόλαο για όσα με δίδαξαν, καθώς και για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου, τους φίλους και τους συναδέλφους μου, για την αμέριστη υποστήριξη τους, ώστε να πετύχω το στόχο μου.

Περίληψη

Για την κατασκευή και την επίτευξη της αποδοτικής λειτουργίας ενός μηχανικού στοιχείου, απαιτείται προσεκτική μελέτη για την επιλογή του κατάλληλου υλικού. Οι μηχανικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος, είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με αυτές του υλικού κατασκευής. Στη βιομηχανία, συνήθης στόχος είναι η κατασκευή προϊόντων τα οποία διαθέτουν τη μέγιστη δυνατή αντοχή σε μηχανικές καταπονήσεις, ελαχιστοποιώντας παράλληλα το βάρος τους. Τα αυξητικά υλικά, διαθέτουν πολύ ικανοποιητική συμπεριφορά για την επίτευξη του στόχου αυτού, με αποτέλεσμα να πλεονεκτούν σε σχέση με τα συμβατικά υλικά. Στην παρούσα εργασία, θα εντοπιστούν και θα αναλυθούν οι περιοχές χάσματος συχνότητας που προκύπτουν κατά τη διάδοση ενός κύματος, σε κατασκευή η οποία διαθέτει συνδυασμό αυξητικής μικροδομής. Η διαδικασία θα πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας μια μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, ενώ θα δημιουργηθούν πολλαπλές παραλλαγές στη διαστρωμάτωση του υλικού, ώστε να συγκριθούν οι ζώνες χάσματος μεταξύ τους και το πώς αυτές επηρεάζονται από τη γεωμετρία της μικροδομής.

Abstract

To manufacture and achieve the optimal operational ability of a product, the appropriate material selection is mandatory. The mechanical properties of the final product are inextricably linked to those of the material that is to be used. In industry, a common goal is to manufacture products that have the maximum possible resilience to mechanical stresses, while minimizing their mass. Auxetic materials' behavior is very satisfying achieving this goal and as a result, they are preferable over conventional materials. This study focuses on the discovery and analysis of the band gaps that occur after a wave propagation in a material with combined auxetic microstructure. The process will require the use of finite element analysis methodology and there will be a comparison between multiple variations in the layering of the material, to see where the band gaps are generated and how they are affected by the geometry microstructure.

Κεφάλαιο 1 – Γενικά

Εισαγωγή

Ως μεταϋλικά (metamaterials), χαρακτηρίζονται οι τεχνητές δομές - υλικά, τα οποία διαθέτουν καλύτερα χαρακτηριστικά απ' ό,τι τα φυσικά υλικά. Χάρη στην ταχεία ανάπτυξη των μεθόδων προσθετικής κατασκευής (additive manufacturing), η έννοια των μεταϋλικών έχει επεκταθεί σε μία κατηγορία υλικών, η οποία εστιάζει στην εσωτερική δομή του υλικού. Τα μεταϋλικά αυτής της κατηγορίας, παρουσιάζουν εξαιρετικές επιδόσεις σε εφαρμογές που αφορούν την ηχοαπορρόφηση, τη θερμομόνωση, σε ηλεκτρομαγνητικές εφαρμογές και ασύρματες επικοινωνίες. Σε αυτή την κατηγορία μεταϋλικών ανήκουν και τα αυξητικά υλικά. Χαρακτηριστικό γνώρισμα των αυξητικών υλικών, είναι ότι συστέλλονται ή διαστέλλονται εγκάρσια στην κατεύθυνση του φορτίου που εφαρμόζεται.

Στην παρούσα μελέτη, η οποία πραγματοποιήθηκε σε θεωρητικό επίπεδο, διερευνήθηκε η ύπαρξη περιοχών χάσματος συχνοτήτων σε μία αυξητική δομή, ώστε να εξεταστεί αν μπορεί να αξιοποιηθεί ως δομή μόνωσης. Για τη μελέτη αυτή, κατασκευάστηκε ένα πλέγμα στοιχείων, το οποίο φορτίστηκε από μία δύναμη σε ένα πλήθος διαφορετικών συχνοτήτων, ώστε να εντοπίσουμε σε ποιες από αυτές υπάρχει αδυναμία μετάδοσης του κύματος. Οι προσομοιώσεις του πειράματος και οι υπολογισμοί, πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τις εφαρμογές ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων του COMSOL Multiphysics 6.0

Αν και το μεγαλύτερο μέρος της βιβλιογραφίας αναφέρει ότι τα αυξητικά υλικά έχουν ανώτερες ιδιότητες, πολύ λίγοι τύποι αυξητικών υλικών έχουν κατασκευαστεί και εφαρμοστεί για πρακτικές εφαρμογές. Εδώ, οι προκλήσεις και οι μελλοντικές εργασίες σχετικά με το θέμα της αυξητικής παρουσιάζονται επίσης για να εμπνεύσουν το μελλοντικό ερευνητικό έργο. Σε αυτό το σημείο, η έρευνα πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας ένα μη βελτιστοποιημένο μοντέλο δισδιάστατων μικροδομών, η οποία μπορεί να εμπλουτιστεί με αλγόριθμους βελτιστοποίησης για μεγαλύτερο εύρος παραμετροποίησης και αποτελεσμάτων.

Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Παρακάτω αναφέρονται περιληπτικά εργασίες που εξετάζουν αυξητικές δομές ως προς τη συμπεριφορά τους και την απόδοσή τους σε διάφορες συνθήκες φόρτισης, οι οποίες αποτέλεσαν και την αφορμή υλοποίησης της παρούσας εργασίας.

Στην εργασία των Si-Hang Xiao, Chong Zhang, Qing-Hua Qin & Hui Wang (2021), σχεδιάστηκε ένα νέο αυξητικό υλικό αποτελούμενο από περιοδικά μοτίβα σχήματος μπισκότου «cookie-shaped pattern». Στη συνέχεια αναλύθηκαν οι αυξητικές ιδιότητες και εντοπίστηκαν οι περιοχές χάσματος συχνότητας. Παρατηρήθηκε ότι η δομή που σχεδιάστηκε προσφέρει μία μεγάλη περιοχή bandgap σε χαμηλές συχνότητες.

Οι ZiWen Zhang, RuiLan Tian, XiaoLong Zhang, FangYi Wei και XinWei Yang (2021), ανέπτυξαν ένα σχέδιο που μιμείται τη μορφή μιας πεταλούδας και τη δομή κυψέλης σε σχήμα αστεριού, κατασκευάστηκε μια νέα αυξητική κυψελοειδής δομή η οποία ονομάστηκε «butterfly shaped honeycomb» (BSH). Η ορθότητα των θεωρητικών αποτελεσμάτων επαληθεύτηκε από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και τα αποτελέσματα του πειράματος. Επιπλέον, σε σύγκριση με την παραδοσιακή δομή κυψέλης και την κυψελοειδή δομή σε σχήμα αστεριού, ο σχετικός συντελεστής ελαστικότητας και η αυξητική επίδραση της δομής BSH βελτιώθηκαν σημαντικά καθώς επίσης και η ακαμψία της δομής, ενώ παράλληλα διατηρήθηκε υψηλό αυξητικό αποτέλεσμα.

Στην εργασία των Xiang Yu Zhang, Xin Ren, Yi Zhang, Yi Min Xie (2022), προτάθηκε ένα νέο αυξητικό υλικό το οποίο χαρακτηρίζεται από την προσθήκη εσωτερικών στοιχείων που παρουσιάζουν μορφή σφήνας, στην κλασσική κυψελωτή αυξητική δομή επανεισόδου «re-entrant honeycomb structure». Το πρόσθετο αυτό τμήμα, είναι ικανό να ρυθμίσει τη δομική ακαμψία κατά τη συμπίεση, αλλά μπορεί επίσης να αυξήσει τη σταθερότητα της κατασκευής εμποδίζοντας τον πλευρικό λυγισμό της κατασκευής. Πραγματοποιήθηκε μια παραμετρική μελέτη χρησιμοποιώντας μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για να αναλυθεί η επίδραση του μεγέθους, της γωνίας και της ακαμψίας του σφηνοειδούς τμήματος. Λόγω της βελτιωμένης ακαμψίας και της δυνατότητας συντονισμού, το προτεινόμενο αυξητικό μεταυλικό έχει τεράστιες δυνατότητες οι οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν με τη μορφή δισδιάστατων, τρισδιάστατων και σωληνοειδών κατασκευών.

Στην εργασία των Krushynska, A. O., Amendola, A., Bosia, F., Daraio, C., Pugno, N. M., Fraternali, F. (2018), παρουσιάζεται μια κατηγορία ελαφρών μεταυλικών, τα οποία έχουν τη δυνατότητα να εξασθενούν ελαστικά κύματα χαμηλής συχνότητας. Οι δομές που παρουσιάζουν χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά μεγάλες περιοχές χάσματος συχνότητας, τα οποία έχουν πλεονεκτική θέση σε σχέση με υπάρχουσες δομές οι οποίες έχουν περιορισμένη απόδοση σε χαμηλές συχνότητες.

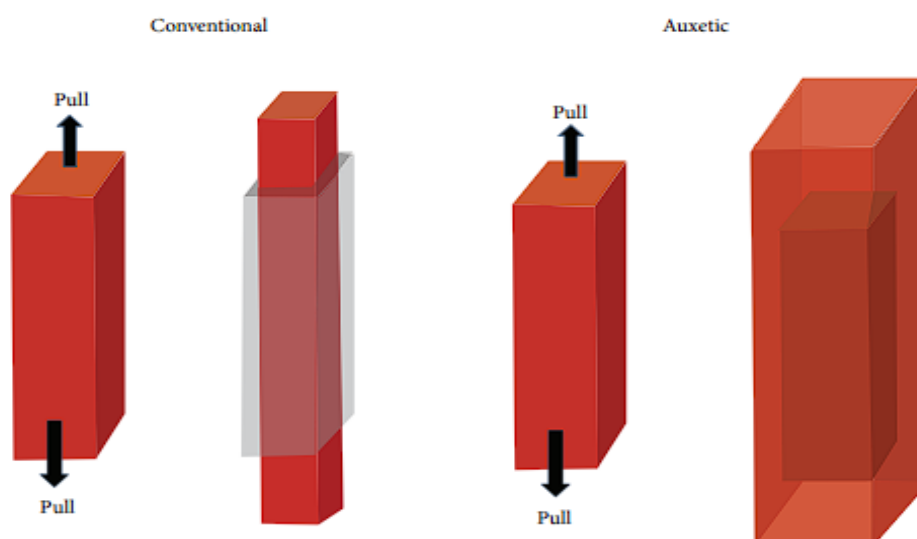
Μία ακόμη εργασία αντίστοιχου αντικειμένου είναι των Panagiotis I. Koutsianitis, Georgios K. Tairidis, Georgios A. Drosopoulos, Georgios E. Stavroulakis (2019), όπου αναζητούνται περιοχές χάσματος, εξετάζοντας διαφορετικές περιπτώσεις για το σχήμα της μοναδιαίας κυψελίδας ενός πλέγματος. Παρατηρήθηκε ότι περιοχές χάσματος μπορούν να εντοπιστούν τόσο σε συμβατικές δομές όσο και σε αυξητικές, ενώ η εμφάνιση και το μέγεθος των περιοχών αυτών, εξαρτάται από την εκάστοτε μικροδομή που εξετάζεται.

Κεφάλαιο 2 – Αυξητικά υλικά

Γενική περιγραφή

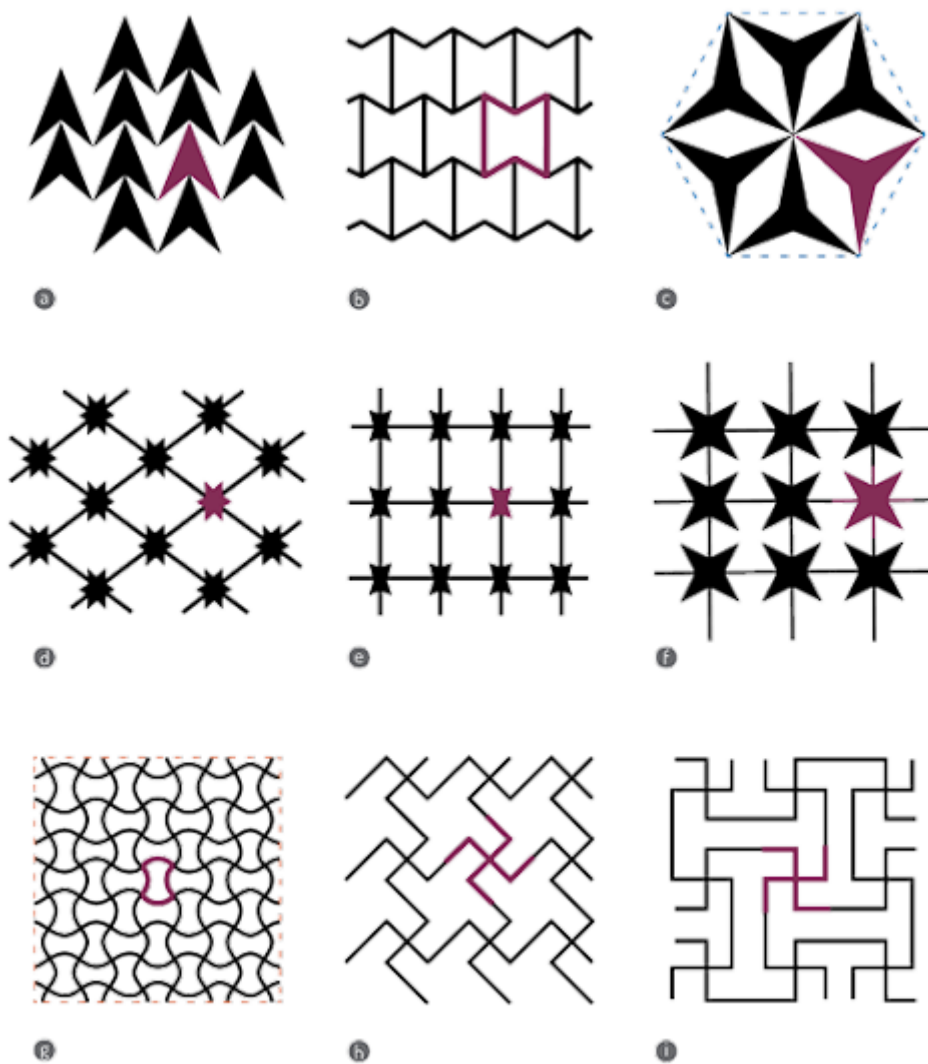
Όταν σε ένα υλικό ασκούνται εφελκυστικά φορτία, παρατηρείται επιμήκυνση κατά τη διεύθυνση του φορτίου, ενώ κάθετα σε αυτή το υλικό λεπταίνει. Ο λόγος Poisson αποτελεί θεμελιώδες χαρακτηριστικό των μηχανικών ιδιοτήτων ενός υλικού, και χρησιμοποιείται για περιγράψει τη συμπεριφορά του υλικού στον κάθετο ως προς τον εφελκυσμό άξονα.

Στα συμβατικά υλικά ο λόγος Poisson έχει θετικές τιμές. Αυτό σημαίνει ότι συστέλλονται εγκάρσια υπό μονοαξονικό εφελκυσμό και διαστέλλονται αντίστοιχα πλευρικά, σε θλιπτικά φορτία. Για ισότροπα ελαστικά υλικά, ο λόγος Poisson δε μπορεί να είναι μικρότερος του -1 και μεγαλύτερος του 0.5. Στα αυξητικά υλικά τα όρια αυτά διαφέρουν, καθώς όταν ασκούνται εφελκυστικά φορτία, παρατηρείται επιμήκυνση στον κάθετο προς της φόρτιση άξονα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ο λόγος Poisson να παίρνει αρνητικές τιμές.



Εικόνα 1 Χαρακτηριστικά συμβατικού υλικού (αριστερά) και αυξητικού υλικού (δεξιά).

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των δομών με αυξητική συμπεριφορά, είναι ότι συνήθως αποτελούνται από ένα επαναλαμβανόμενο σχέδιο όμοιων μικροδομών. Αυτές οι μικροδομές αποτελούνται από ένα στοιχείο με συγκεκριμένη γεωμετρία, το οποίο προκαλεί παραμόρφωση με συγκεκριμένο τρόπο ανάλογα με το είδος και τον τρόπο φόρτισης. Για το λόγο αυτό, τέτοιες μικροδομές μπορούν να αντιμετωπιστούν ως συμμορφούμενοι μηχανισμοί (compliant mechanisms). Στη συνέχεια, μπορούν να εφαρμοστούν τεχνικές τοπολογικής βελτιστοποίησης προκειμένου να σχεδιαστούν πιο περίπλοκες αυξητικές μικροδομές. [2],[3],[4],[31]



Εικόνα 2 Παραδείγματα αυξητικών δομών.

Αυξητική συμπεριφορά - Λόγος Poisson

Η αυξητική συμπεριφορά της αυξητικής δομής, χαρακτηρίζεται από την επίδραση του λόγου Poisson, ο οποίος περιγράφεται μαθηματικά από την παρακάτω σχέση:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} \quad (1)$$

Το ε_y περιγράφει την τάση εφελκυσμού προς την κατεύθυνση y και το ε_x , την εγκάρσια τάση στην κατεύθυνση x , λόγω της παραμόρφωσης στην y . Η ελαστική συμπεριφορά των υλικών, περιγράφεται από τα εξής χαρακτηριστικά: Συντελεστής διάτμησης (shear modulus) G , ο συντελεστής ελαστικότητας όγκου (bulk modulus) K , ο συντελεστής ελαστικότητας (Young's modulus) E και ο λόγος Poisson ν .

Τα παραπάνω συνδυάζονται με τις εξής σχέσεις:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (3)$$

$$E = \frac{9KG}{(3K+G)} \quad (4)$$

$$\nu = \frac{1}{2} \left(\frac{3K-2G}{3K+G} \right) \quad (5)$$

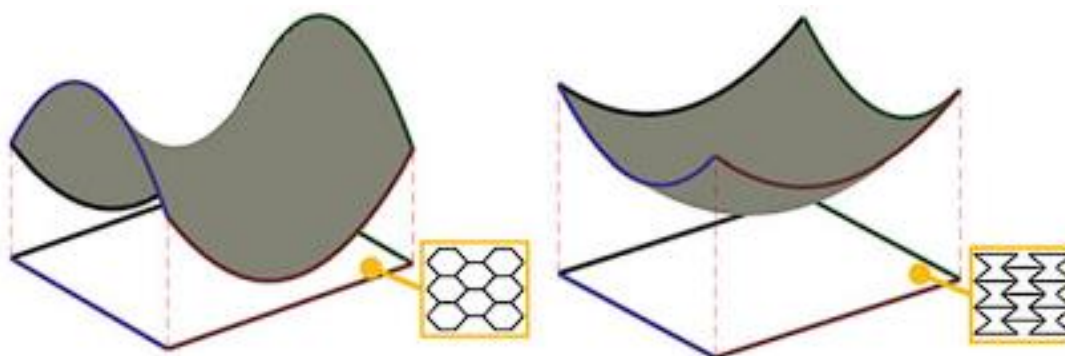
Τα περισσότερα δομικά υλικά απαιτείται να έχουν υψηλότερο G από το K . Αν μπορούσαμε με κάποιο να επέμβουμε στη μικροδομή ενός υλικού με τέτοιο τρόπο, ούτως ώστε το E να παραμένει σταθερό αλλά το ν να αλλάζει, τότε θα μπορούσαμε να αλλάξουμε και τις τιμές για τα G & K . Σύμφωνα με τις εξισώσεις (2) και (3), η αναλογία Poisson για ένα σταθερό υλικό οριοθετείται μεταξύ $-1 < \nu < 0.5$ λόγω των προαπαιτούμενων ότι τόσο ο συντελεστής διάτμησης όσο και ο συντελεστής όγκου, πρέπει να έχουν θετικές τιμές. [5],

Ιδιότητες Αυξητικών Υλικών

Λόγω της επίδρασης του αρνητικού λόγου Poisson των αυξητικών υλικών, υπάρχουν διάφορες αναμενόμενες γεωμετρικές και μηχανικές ιδιότητες που δύσκολα παρατηρούνται σε φυσικά, μη αυξητικά υλικά. Οι ιδιότητες περιλαμβάνουν, συγκλαστική συμπεριφορά στην κάμψη σε αντίθεση με την αντικλαστική που εμφανίζεται στα συμβατικά υλικά, μεταβλητή διαπερατότητα, υψηλή ακαμψία διάτμησης, ενισχυμένη αντίσταση σε διείσδυση, υψηλή αντοχή σε ρωγμές και βελτιωμένες ιδιότητες απόσβεσης και απορρόφησης ήχου. Η σωστή κατανόηση των γεωμετρικών, στατικών και δυναμικών ιδιοτήτων των αυξητικών υλικών είναι επομένως απαραίτητη για την πλήρη χρήση αυτών των εξαιρετικών ιδιοτήτων για συγκεκριμένες εφαρμογές-στόχους. Σε αυτή την ενότητα, περιγράφουμε τους θεμελιώδεις λόγους για τους οποίους τα αυξητικά υλικά αναμένεται να έχουν τέτοιες ιδιότητες, συγκρίνοντάς τα με τις ιδιότητες των συμβατικών, μη αυξητικών υλικών.

Συγκλαστική καμπυλότητα σε λυγισμό

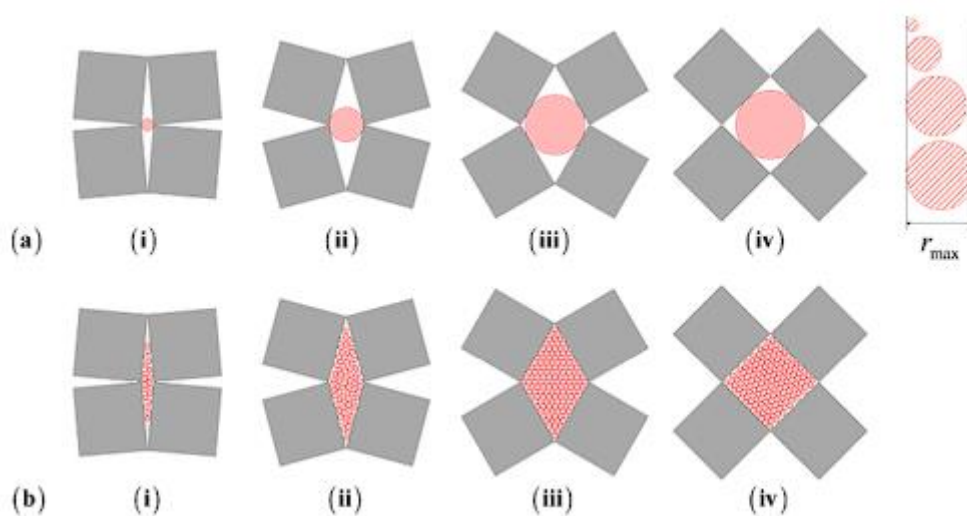
Μια επιφάνεια μη αυξητικού υλικού, κατά το φαινόμενο του λυγισμού, εμφανίζει αντικλαστική συμπεριφορά, δηλαδή το υλικό καμπυλώνεται από κάθετη θέση, αντίθετη προς την αντίθετη κατεύθυνση. Η συμπεριφορά αυτή, απαιτεί να ασκηθούν πρόσθετες δυνάμεις στο υλικό, προκειμένου να κατασκευαστούν κυρτές γεωμετρίες. Αντίθετα, λόγω της συγκλαστικής συμπεριφοράς των αυξητικών υλικών, μια επιφάνεια σε αυξητικό υλικό καμπυλώνεται προς την κατεύθυνση της παραμόρφωσης. Σχετικό παράδειγμα φαίνεται και στην Εικόνα 3. Το σχήμα θόλου που προσφέρει στην επιφάνεια η συγκλαστική συμπεριφορά των αυξητικών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή σύνθετων κατασκευών, με μικρό αριθμό μηχανικής κατεργασίας και συγκριτικά χαμηλότερο κόστος παραγωγής.



Εικόνα 3 Αριστερά παρουσιάζεται η αντικλαστική συμπεριφορά συμβατικού υλικού και δεξιά, η συγκλαστική συμπεριφορά ενός αυξητικού υλικού.

Μεταβλητή διαπερατότητα

Σε πορώδη υλικά που χρησιμοποιούνται για διήθηση, ο έλεγχος της διαπερατότητας είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες. Τα πορώδη αυξητικά υλικά είναι ένα εξαιρετικό παράδειγμα μεταβλητής διαπερατότητας, χάρη στον αρνητικό λόγο Poisson που τα χαρακτηρίζει. Αυτά τα υλικά αυξάνουν το μέγεθος των πόρων τους όταν εφαρμόζεται εφελκυστικό φορτίο προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Η δομή βελτιώνει τη διαπερατότητα της, προσαρμόζοντας το μέγεθος των πόρων της καθώς κάθε μοναδιαία κυψελίδα «ξεδιπλώνεται» προς όλες τις κατευθύνσεις. Αυτή η μεταβλητή διαπερατότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί από υλικά μακροκλίμακας έως υλικά νανοκλίμακας. [2]



Εικόνα 4 Μεταβλητή διαπερατότητα σε αυξητικό υλικό υπό εφελκυστική καταπόνηση. Το σημείο i) παρουσιάζει την δομή σε ελάχιστη τάση και το iv) στη μέγιστη τάση.

Αντίσταση σε διάτμηση

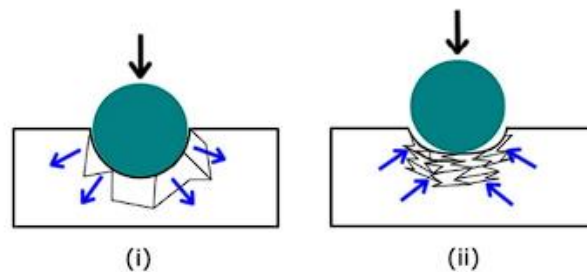
Ο συντελεστής διάτμησης (G) είναι μια ιδιότητα που μετράται για τον προσδιορισμό της παραμόρφωσης που συμβαίνει όταν ένα φορτίο ασκείται παράλληλα στη μία πλευρά ενός αντικειμένου, ενώ η άλλη πλευρά παραμένει σταθερή. Εάν η τιμή του συντελεστή διάτμησης είναι μεγάλη, το υλικό είναι άκαμπτο και έχει υψηλή αντοχή στη διάτμηση. Έτσι, ο συντελεστής διάτμησης είναι ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να επιλέγεται κατά το σχεδιασμό οποιασδήποτε κατασκευής. Στα ισοτροπικά αυξητικά υλικά, η αντίσταση στη διάτμηση αναμένεται να είναι πιο ωφέλιμη από ότι στα μη αυξητικά υλικά.

Όπως είδαμε και από τις εξισώσεις (2) & (3), αν ο λόγος Poisson πλησιάζει το 0,5, η τιμή του συντελεστή διάτμησης μειώνεται αλλά ο συντελεστής όγκου αυξάνεται σημαντικά. Αυτό σημαίνει ότι το υλικό υφίσταται εύκολα παραμόρφωση διάτμησης, αλλά το σχήμα του υλικού δεν αλλάζει πολύ. Ωστόσο, όταν ο λόγος του Poisson είναι κοντά στο -0,5, ο συντελεστής διάτμησης (G) και ο συντελεστής ελαστικότητας (E) έχουν σχεδόν την ίδια τιμή και μεγαλύτερη από το μέτρο όγκου (K). Συνεπώς, είναι εύκολο να συμπιεστεί το υλικό αλλά δύσκολο να αποσχιστεί. Εν συνεχεία, καθώς η αναλογία του Poisson (ν) πλησιάζει το -1, ο συντελεστής διάτμησης (G) τείνει προς το άπειρο και η αντίσταση διάτμησης γίνεται

σημαντικά μεγαλύτερη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το υλικό να είναι δύσκολο να διατμηθεί αλλά εύκολο να υποστεί ογκομετρική παραμόρφωση. Επομένως, προσαρμόζοντας την αναλογία Poisson (ν) είναι δυνατός ο σχεδιασμός μιας δομής αποτελεσματικής, ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής.

Αντίσταση σε διείσδυση

Όταν εφαρμόζεται ένα φορτίο σε μία συγκεκριμένη περιοχή, το οποίο συμπιέζει μια αυξητική δομή, το υλικό μετακινείται προς την περιοχή αυτή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντίστασης σε διείσδυση, καθώς παρουσιάζεται τοπική αύξηση στην πυκνότητα του υλικού. Στην Εικόνα 5i, παρουσιάζεται η συμπεριφορά ενός συμβατικού υλικού, το οποίο φορτίζεται τοπικά, στο οποίο βλέπουμε ότι το υλικό απομακρύνεται από την περιοχή φόρτισης, στην Εικόνα 5ii βλέπουμε πώς τα αυξητικά υλικά συγκεντρώνονται στην περιοχή φόρτισης. [2]



Εικόνα 5 Συμπεριφορά σε διείσδυση ενός συμβατικού υλικού (i) και ενός αυξητικού υλικού (ii).

Αυτό το φαινόμενο μπορεί επίσης να επιβεβαιωθεί από τη σχέση μεταξύ του λόγου Poisson (ν), του συντελεστή Young (E) και του συντελεστή σκληρότητας υλικού (H) που σχετίζεται με την αντίσταση διείσδυσης. Η μαθηματική περιγραφή μεταξύ της σκληρότητας του υλικού, του συντελεστή Young και του λόγου Poisson δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$H \propto \left[\frac{E}{1-\nu^2} \right]^\gamma \quad (6),$$

όπου το γ παίρνει τιμές 1 ή 2/3, για ομοιόμορφη κατανομή πίεσης ή Ερτζιανής διείσδυσης αντίστοιχα.

Αντίσταση σε θραύση

Έχει διατυπωθεί η θεωρία ότι η αντοχή στη θραύση των αυξητικών υλικών οφείλεται στον αρνητικό λόγο Poisson. Όταν τίθενται υπό τάση, τα στοιχεία μια αυξητικής δομής διαστέλλονται, με αποτέλεσμα να προλαβαίνουν τη διάδοση μιας ρωγμής που σχηματίζεται. Αυτό το αποτέλεσμα ενδέχεται να παρουσιάζει εξάρτηση στην κλίμακα και ποικίλλει ανάλογα με το μέγεθος της κυψελίδας. Για την επαλήθευση ωστόσο των παραπάνω, απαιτείται πρόσθετος πειραματισμός και συλλογή δεδομένων.

Σε έρευνα σχετικά με την ανάπτυξη ρωγμών, παρουσιάστηκε ότι ο συντελεστής έντασης τάσης (K_{IC}^*) για συμβατικούς αφρούς, είναι ανάλογος της κανονικοποιημένης πυκνότητας και περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\frac{K_{IC}^*}{\sigma_f \sqrt{\pi l}} = 0.19 \left(\frac{\rho_*}{\rho_s} \right) \quad (7),$$

Όπου σ_f , η τάση θραύσης, l το μήκος της νεύρωσης της κυψελίδας, ρ_* η πυκνότητα του αφρού και ρ_s η πυκνότητα του αφρώδους υλικού.

Αργότερα, σε ότι αφορά τους αφρούς επανεισόδου (reentrant foams), η Εξ. (7) δε μπορούσε να εφαρμοστεί, επομένως ο συντελεστής έντασης τάσης για τα αυτά τα υλικά, (K_{IC}^r), περιεγράφηκε από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{K_{IC}^r}{\sigma_f \sqrt{\pi l}} = 0.1 \frac{\sqrt{1 + \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)}}{\sqrt{1 + \cos(2\varphi)}} \frac{\rho_*}{\rho_s} \quad (8),$$

Με φ περιγράφεται η γωνία της νεύρωσης της κυψελίδας επανεισόδου.

Η μαθηματική περιγραφή της σχέσης των δύο συντελεστών έντασης τάσης παρουσιάζεται στην Εξ. (9):

$$\frac{K_{IC}^r}{K_{IC}^*} = 0.53 \frac{\sqrt{1 + \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)}}{1 + \cos(2\varphi)} \quad (9).$$

Τα αποτελέσματα από διάφορα πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί, έχουν δείξει ότι για υψηλότερες τιμές ογκομετρικής συμπίεσης, οι αφροί επανεισόδου είχαν αυξημένη αντοχή σε θραύση. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι όταν αυτά τα υλικά υποβάλλονται σε εφελκυστικά φορτία, αυξάνουν τις διαστάσεις τους.

Ακουστική απορρόφηση

Οι αυξητικοί αφροί είναι ικανότεροι ως προς την ακουστική απορρόφηση, σε σχέση με τους παραδοσιακούς αφρούς. Η γεωμετρία της αυξητικής δομής παίζει καθοριστικό ρόλο στην εξασθένηση των ακουστικών κραδασμών, ενώ έχει παρατηρηθεί σε πειραματικές μελέτες ότι η απόδοσή τους εστιάζεται σε συχνότητες χαμηλότερες των 1500 Hz.

Πεδία εφαρμογών

Οι εξαιρετικές μηχανικές επιδόσεις των αυξητικών υλικών, τους χάρισαν μια θέση σε ένα πλήθος από διάφορα πεδία εφαρμογής.

Στη βιομηχανία οχημάτων, υπάρχουν αρκετές εφαρμογές στη θωράκιση του αμαξώματος, όπου χρησιμοποιούνται σε δομές «σάντουιτς» συνδυαστικά με άλλα ινώδη υλικά. [7],[8]

Χρησιμοποιούνται επίσης, για την κατασκευή βελτιωμένων πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων, στην κατασκευή κοχλιών οι οποίοι συστέλλονται εγκάρσια όταν πιέζονται σε μία υποδοχή και διαστέλλονται κατά την προσπάθεια αφαίρεσης τους. [9]

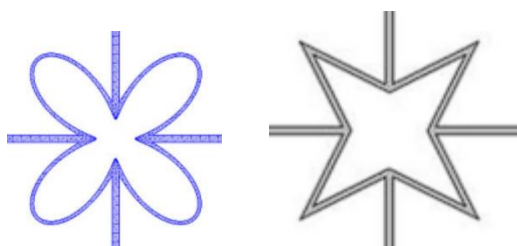
Άλλη μία σημαντική εφαρμογή των αυξητικών υλικών είναι σε εύκαμπτες επιφάνειες, για την απορρόφηση φορτίων πρόσκρουσης, όπως για παράδειγμα σε προστατευτικά για αθλητικές δραστηριότητες. [10]

Τα αυξητικά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως ιατρικά υφάσματα. Ένα παράδειγμα είναι ο «έξυπνος» επίδεσμος. Ο επίδεσμος που κατασκευάζεται από αυξητικά νήματα μπορεί να φέρει κάποιο παράγοντα επούλωσης πληγών. Όταν ο επίδεσμος εφαρμόζεται σε μία τραυματισμένη περιοχή που λόγω κάποια φλεγμονής έχει διογκωθεί, θα ανοίξει και θα απελευθερώσει τον παράγοντα. Όταν η πληγή επουλωθεί και το πρήξιμο υποχωρήσει, ο επίδεσμος θα κλείσει και θα σταματήσει να απελευθερώνει τον παράγοντα επούλωσης. [11]

Η εφαρμογή ωστόσο που θα μας απασχολήσει περισσότερο στην παρούσα έρευνα, αφορά την αξιοποίηση των αυξητικών υλικών ως ηχοαπορροφητικό στοιχείο σε κατασκευές, καθώς επίσης και ως μέσο απόσβεσης ταλαντώσεων. [12]

Κεφάλαιο 3 – Γεωμετρία της δομής

Η γεωμετρία που χρησιμοποιήσαμε στην παρούσα μελέτη, αναφέρεται σε ένα νέο υλικό αυξητικού φωνονικού κρυστάλλου, σε δύο διαστάσεις, το οποίο χαρακτηρίζεται ως γεωμετρία δομής μπισκότου. Η γεωμετρία αποτελείται από τέσσερις ελλείψεις και έναν σταυρό και ουσιαστικά αντικαθιστά την μέχρι τώρα γνωστή αυξητική δομή άστρου. Στη συνέχεια θα εξεταστούν οι ακουστικές ιδιότητες της δομής αυτής μέσω ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Θα πραγματοποιηθεί διερεύνηση και αξιολόγηση των περιοχών χάσματος συχνότητας, σύμφωνα με το θεώρημα του Μπλοχ. Επίσης θα διερευνηθούν οι επιδράσεις των γεωμετρικών παραμέτρων και των ιδιοτήτων του βασικού υλικού στις περιοχές χάσματος συχνότητας της προτεινόμενης γεωμετρίας, για την παροχή καθοδήγησης στη σχεδίαση αυξητικών φωνονικών κρυστάλλων.



Εικόνα 6 Αριστερά παρουσιάζεται η δομή μπισκότου και δεξιά η αστεροειδής δομή

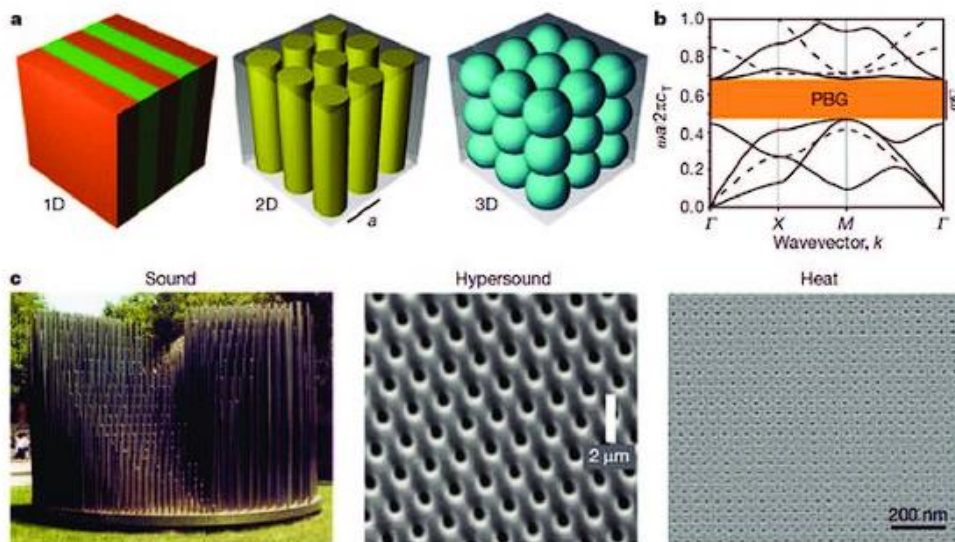
Η παραπάνω δομή βασίζεται σε έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τους Si-Hang Xiao, Chong Zhang, Qing-Hua Qin & Hui Wang (2021), οι οποίοι δημιούργησαν και μελέτησαν τη νέα αυτή μορφή, ως προς τις αυξητικές της ιδιότητες καθώς και ως προς την πιθανότητα ύπαρξης χάσμάτων συχνότητας. [13]

Κεφάλαιο 4 – Χάσματα συχνοτήτων (Band gaps)

Μία κατηγορία υλικών με περιοδική δομή, τα οποία ονομάζονται φωνονικοί κρύσταλλοι, χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και το χειρισμό της διάδοσης ακουστικών κυμάτων. Η περιοδική τους φύση, τους προσφέρει νέες ιδιότητες οι οποίες δε συναντώνται στα συμβατικά υλικά. Ένα από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι τα χάσματα συχνοτήτων (band gaps), τα οποία είναι εύρη συχνοτήτων στα οποία εμποδίζεται η διάδοση ενός ακουστικού κύματος μέσα στον κρύσταλλο.

Ο έλεγχος και ο χειρισμός ακουστικών/ελαστικών κυμάτων είναι ένα θεμελιώδες πρόβλημα με πολλές πιθανές εφαρμογές, ειδικά στον τομέα των τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών. Για παράδειγμα, τα φαινόμενα περιορισμού, καθοδήγησης και φιλτραρίσματος στην κλίμακα του μήκους κύματος είναι χρήσιμα για την επεξεργασία σήματος, προηγμένους αισθητήρες νανοκλίμακας και ακουστο-οπτικές συσκευές εγκατεστημένες σε μικροκυκλώματα. Οι φωνονικοί κρύσταλλοι, οι οποίοι είναι τεχνητά υλικά που αποτελούνται από μια περιοδική επανάληψη εγκλεισμάτων σε μια μήτρα, προτείνονται για την επίτευξη αυτών των στόχων, καθώς υπάρχει δυνατότητα τροποποίησης της φωνονικής ζώνης τους (band structure).

Οι ελαστικές ιδιότητες, το σχήμα και η διάταξη των στοιχείων της περιοδικής αυτής δομής, τροποποιεί έντονα τη διάδοση των κυμάτων στο εσωτερικό της. Η δομή της φωνονικής ζώνης και οι καμπύλες διασποράς μπορούν στη συνέχεια να προσαρμοστούν με κατάλληλες επιλογές υλικών, κρυσταλλικών πλεγμάτων και τοπολογίας εγκλεισμών, ώστε να δημιουργούνται συγκεκριμένα χάσματα συχνοτήτων για στοχευμένη μόνωση. [14]



Εικόνα 7 α) Παραδείγματα φωνονικών κρυστάλλων σε 1D, 2D & 3D, β) Παράδειγμα δομής ζώνης στον φωνονικό κρύσταλλο. Η πορτοκαλή περιοχή σηματοδοτεί την ζώνη χάσματος, γ) Παραδείγματα εφαρμογής δομής φωνονικού κρυστάλλου, το οποίο ανάλογα με το μέγεθος του πλέγματος λειτουργεί ως μόνωση για διαφορετικά φαινόμενα.

Κεφάλαιο 5 – Διάδοση κύματος σε 2Δ περιοδικές δομές

Ανάλυση Θεωρήματος Μπλοχ (Bloch Theorem)

Η αναπαράσταση κάθε πλεγματική δομής στο χώρο, μπορεί να πραγματοποιηθεί αναπαράγοντας τη μοναδιαία κυψελίδα, κατά μήκος τριών ανεξάρτητων, όχι απαραίτητα ορθογωνικών, διανυσμάτων πλέγματος a_1, a_2, a_3 . Στη συνέχεια, εφαρμόζοντας τη Λαγκρανζιανή ή τη Νευτώνεια δυναμική, οι εξισώσεις κίνησης της μοναδιαίας κυψελίδας έχουν την εξής μορφή:

$$M\ddot{q} + Kq = F \quad (10)$$

Ως M & K χαρακτηρίζονται τα μητρώα μάζας και ακαμψίας της μοναδιαίας κυψελίδας, τα q , \ddot{q} παρουσιάζουν τη μετατόπιση και επιτάχυνση των κόμβων και το F , τις δυνάμεις που ασκούνται στους κόμβους της αρχικής δομής από τα γειτονικά στοιχεία.

Η ανάλυση Bloch ξεκινάει με την αρμονική επίλυση για το q το οποίο έχει ως αποτέλεσμα το \ddot{q} να αντικατασταθεί με $-\omega^2 q$ οπότε η εξίσωση (10) θα πάρει την ακόλουθη μορφή:

$$(-\omega^2 M + K)q = F \quad (11)$$

Θέτοντας τις μετατοπίσεις της κυψελίδας $n_1 a_1 + n_2 a_2 + n_3 a_3$ με $q(n_1, n_2, n_3)$, θέλουμε να δείξουμε ότι θα υπάρχει λύση και θα έχει την ακόλουθη ιδιότητα:

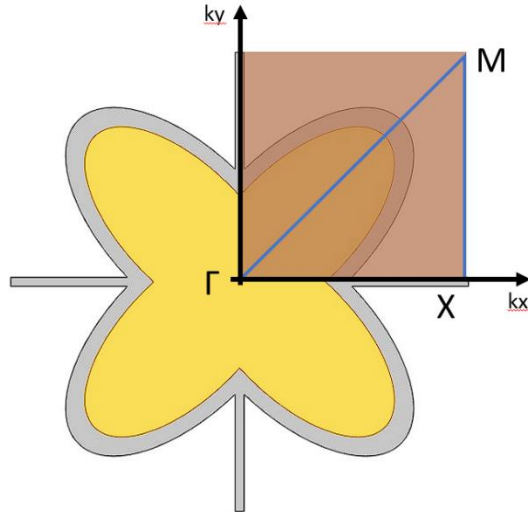
$$q(n_1, n_2, n_3) = e^{<k, n_1 a_1 + n_2 a_2 + n_3 a_3>} q(0,0,0) \quad (12)$$

Όπου $<k, n_1 a_1 + n_2 a_2 + n_3 a_3>$ η γενική μορφή της σταθεράς μετάδοσης. Οι περισσότερες έρευνες που έχουν δημοσιευθεί, χρησιμοποιούν περισσότερο την εξίσωση (11), για τη μετατροπή της εξίσωσης (10) σε πρόβλημα ιδιοτιμών. Η ιδιοτιμή ω είναι η συχνότητα μετάδοσης και είναι συνάρτηση των M, K και του διανύσματος κύματος k . [15],[16],[17],[18],[21],[22],[30]

IBZ (Irreducible Brillouin Zone) και περιοδικά μοντέλα

Στις περιπτώσεις που θέλουμε να μελετήσουμε διαφορετικές συμπεριφορές σε περιοδικά μοντέλα, για την αποφυγή υψηλού υπολογιστικού κόστους, απαιτούνται κινήσεις οι οποίες θα απλοποιήσουν το μοντέλο.

Συνεπώς, μια πολύ καλή πρακτική είναι να μελετήσουμε μόνο ένα από τα στοιχεία ενός πλέγματος αντί να γίνει διερεύνηση για όλα. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται το μεμονωμένο στοιχείο πλέγματος.



Εικόνα 10 Το σκιαγραφημένο τμήμα αποτελεί την IBZ (Γ-Χ-Μ-Γ)

Ακολουθώντας τη λογική εύρεσης της IBZ, βλέπουμε ότι το ελάχιστο τμήμα που μπορεί να καθρεφτιστεί είναι το τεταρτημόριο, αυτό ονομάζεται $p4$.

Για να σχηματιστεί η τελική δομή από την IBZ θα πρέπει να καθρεφτιστεί το σκιαγραφημένο κομμάτι ως προς τον άξονα y και στη συνέχεια, αυτό που θα δημιουργηθεί, ως προς τον άξονα x .

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται οι συντεταγμένες του κάθε σημείου της παραπάνω εικόνας, υπό την προϋπόθεση ότι το Γ βρίσκεται στην αρχή των αξόνων $[0,0]$.

	Καρτεσιανές Συντεταγμένες
Γ	$(0,0)$
X	$(L_1/2, 0)$
M	$(L_1/2, L_1/2)$

Λόγω της χρήσεως της IBZ για να διευκολυνθούμε στους υπολογισμούς, πρέπει να αναφερθεί πως στα διαγράμματα συχνотήτων που ακολουθούν στην εργασία, η μεταβλητή k παίρνει τιμές από 0 μέχρι και 3. Αυτές οι τιμές αντιστοιχούν στα σημεία Γ - X - M - Γ και σε όλα τα σημεία πάνω στις ακμές του τριγώνου που δημιουργείται. [1],[19],[24]

Εφαρμογή θεωρίας στο μοντέλο

Στην περίπτωση κύματος που διαδίδεται σε επίπεδο, η μετατόπιση $q(r_j)$ των πλεγματικών στοιχείων ορίζεται ως:

$$q(r_j) = q_j e^{(i\omega t - kr_j)} \quad (13)$$

Με q_j το πλάτος, ω την συχνότητα και k το διάνυσμα κύματος.

Σύμφωνα με το θεώρημα Bloch υπάρχουν 2 παράμετροι n_1 και n_2 , που χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση κάθε κελιού, ώστε η μετατόπιση ενός σημείου να βρίσκεται από ένα μόνο συνδυασμό των n_1 και n_2 :

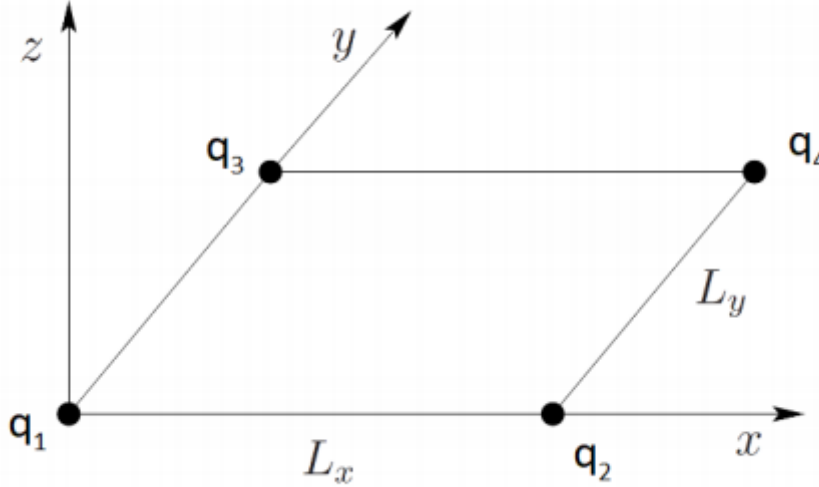
$$q = q(r_j) e^{k(r-r_j)} = q(r_j) e^{(k_1 n_1 + k_2 n_2)} \quad (14)$$

Με $k_1 = k e_1 = \delta_1 + i\varepsilon_1$, $k_2 = k e_2 = \delta_2 + i\varepsilon_2$, όπου δ_1, δ_2 η σταθερά απόσβεσης και $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ η σταθερά φάσης.

Για τους βαθμούς ελευθερίας q ενός ορθογωνίου τμήματος με ακμές L_x, L_y ισχύει:

$$q = [q_1^T q_2^T q_3^T q_4^T] \quad (15)$$

Με q_j συμβολίζονται οι κομβικοί βαθμοί ελευθερίας.



Εικόνα 11 Ορθογώνιο τμήμα με 4 κόμβους/πεπερασμένα στοιχεία

Λόγω του ότι ένα κύμα που διαδίδεται σε δισδιάστατα, μπορεί να εκφραστεί και ως κύμα Bloch, η σχέση μεταξύ των περιοδικών μετατοπίσεων q στις ακμές του περιοδικού στοιχείου είναι:

$$q_2 = \lambda_x q_1, \quad q_3 = \lambda_y q_1, \quad q_4 = \lambda_x \lambda_y q_1 \text{ με } \lambda_x = e^{-i\mu_x}, \quad \lambda_y = e^{-i\mu_y} \quad (16)$$

Οι σταθερές $\mu_x = \kappa_x L_x$, $\mu_y = \kappa_y L_y$ περιγράφουν την μετάδοση του κύματος.

Άρα, οι κομβικοί βαθμοί ελευθερίας έχουν ως εξής:

$$q = \Lambda_R q_1 \text{ με } \Lambda_R = [I \lambda_x I \lambda_y I \lambda_x \lambda_y I] \quad (17)$$

Αντικαθιστώντας το $q = \Lambda_R q_1$ στην εξίσωση κίνησης $(-\omega^2 M + i\omega C + K)q = f$ και πολλαπλασιάζοντας με $\Lambda_L = [I \lambda_x^{-1} I \lambda_x^{-1} I (\lambda_x \lambda_y)^{-1} I]$ έχουμε:

$$\left(-\omega^2 \overline{M}(\mu_x, \mu_y) + i\omega \overline{C}(\mu_x, \mu_y) + \overline{K}(\mu_x, \mu_y) \right) q = f \quad (18)$$

Με $\overline{M} = \Lambda_L M \Lambda_R$, $\overline{C} = \Lambda_L C \Lambda_R$, $\overline{K} = \Lambda_L K \Lambda_R$ οι πίνακες μάζας απόσβεσης και ακαμψίας.

Το πρόβλημα των ιδιοτιμών γίνεται:

$$\overline{D}(\omega, \lambda_x, \lambda_y) = 0$$

Με \overline{D} συμβολίζεται το απλοποιημένο μητρώο δυναμικής ακαμψίας.
[20],[23],[25],[26],[27],[28]

Κεφάλαιο 5 – Μοντελοποίηση πειράματος

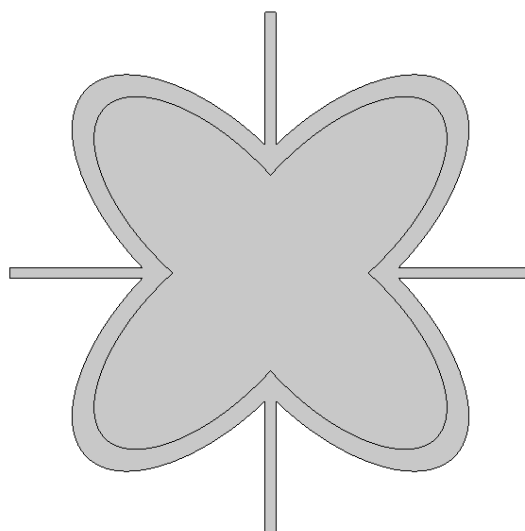
Οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Να σημειωθεί ότι, το Material1, χρησιμοποιήθηκε στο εξωτερικό τμήμα της γεωμετρίας, το οποίο αποτελείται από τέσσερις ελλείψεις και τέσσερις ράβδους οι οποίες σχηματίζουν σταυρό, ενώ το Material2, στις 4 εσωτερικές ελλείψεις.

Υλικά (Material)	Πυκνότητα (density)	Λόγος Poisson (Poisson's ratio)	Μέτρο ελαστικότητας (Young's Modulus)
Material1	8000 kg/m ³	0.34	2E11 Pa
Material2	1000 kg/m ³	0.45	2E9 Pa

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

- Διαστάσεις εξωτερικής έλλειψης : 200 X 100 (mm)
- Διαστάσεις εσωτερικής έλλειψης : 170 X 80 (mm)
- Διαστάσεις σταυρού: 300 X 300 (mm)
- Πάχος σταυρού: 6 (mm)
- Αριθμός ιδιοσυχνοτήτων ελέγχου 8
- Εύρος τιμών παραμέτρου περιοδικών συνθηκών k 0-3 με βήμα 0.08.

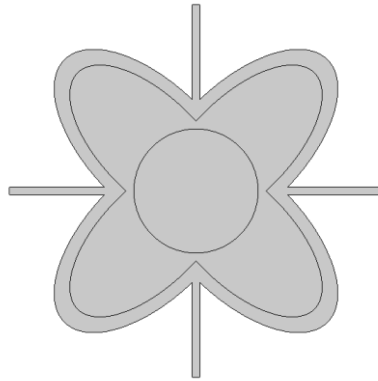


Εικόνα 12 Αρχική μορφή γεωμετρίας

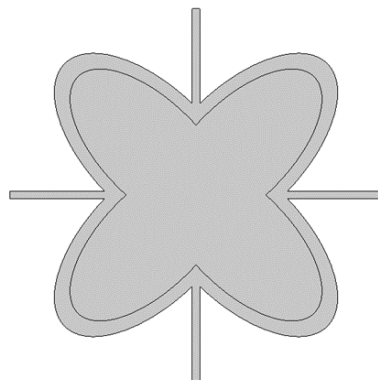
Οι παραλλαγές που ακολούθησαν αφορούν διαφορετικές τιμές για το μέγεθος της εσωτερικής έλλειψης, το πάχος του σταυρού που περιβάλλει τη γεωμετρία καθώς και την ύπαρξη ή μη εσωτερικού εγκλείσματος.

Προσομοίωση αρχικής δομής χωρίς και με κυκλικό έγκλεισμα

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε μια διερεύνηση για bandgaps στη γεωμετρία με και χωρίς κυκλικό έγκλεισμα. Ο εσωτερικός κύκλος έχει ακτίνα 50mm και αποτελείται από το ίδιο υλικό με αυτό που βρίσκεται εξωτερικά της γεωμετρίας.



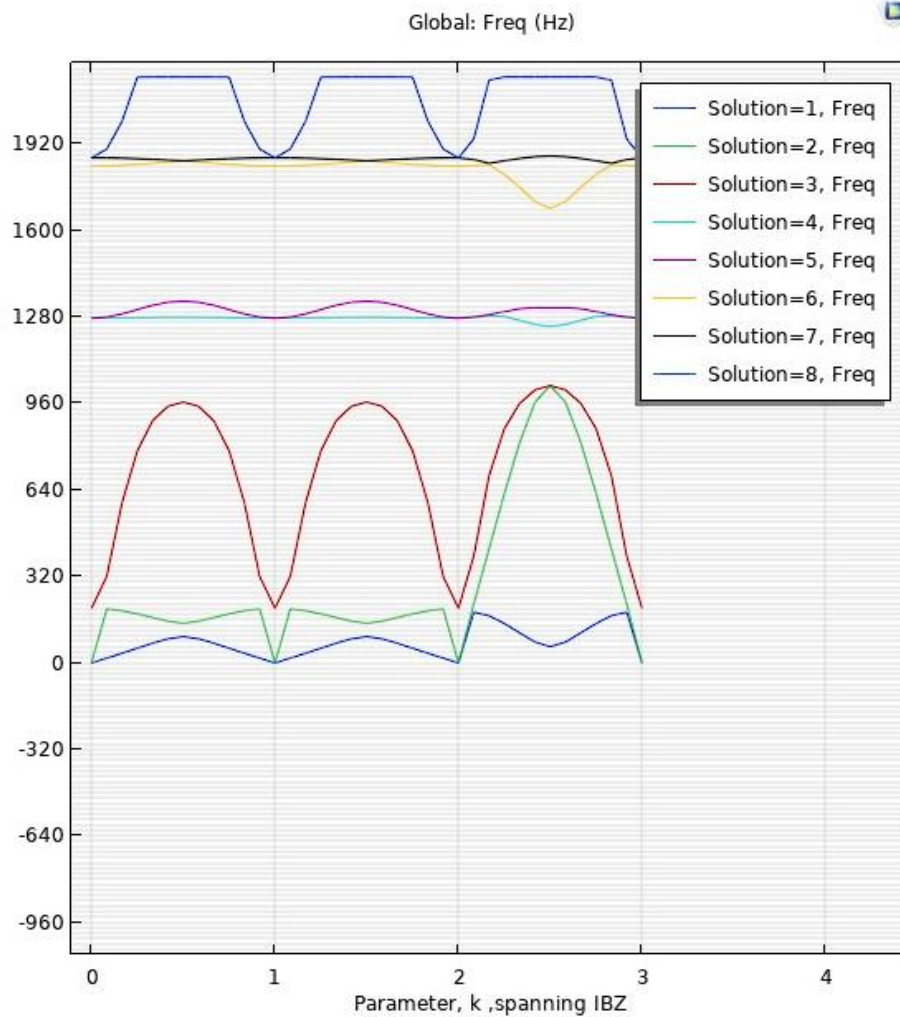
Εικόνα 13 Δομή με κυκλικό έγκλεισμα



Εικόνα 14 Δομή δίχως κυκλικό έγκλεισμα

Στη συνέχεια ακολουθούν τα διαγράμματα που προκύπτουν από την εύρεση των 8 ιδιοσυχνοτήτων, ενώ οι περιοχές που δε διακόπτονται από το πλάτος του κύματος της περιγράφουν το εύρος των bandgaps.

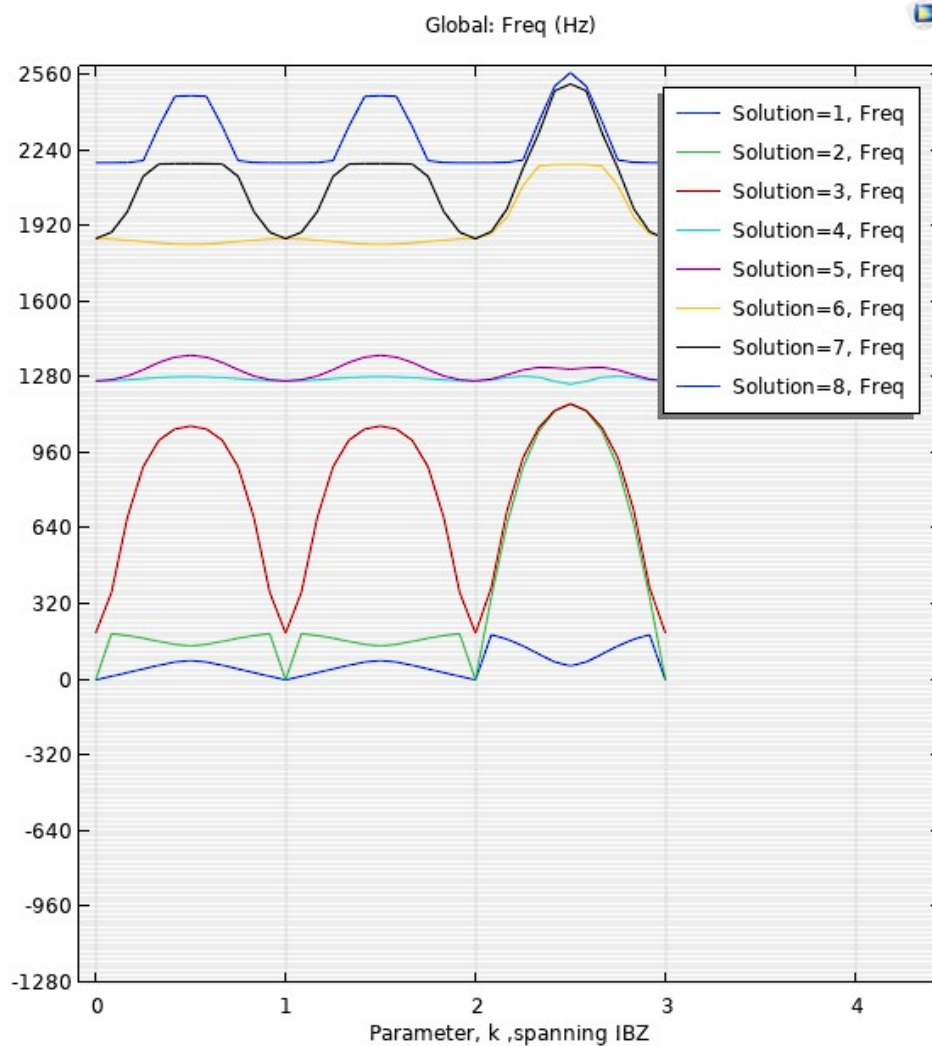
Η δομή δίχως πυρήνα δίνει το εξής διάγραμμα:



Εικόνα 15 Διάγραμμα απόκρισης δομής δίχως κυκλικό έγκλεισμα

Στο διάγραμμα εντοπίζονται συνολικά 2 band gaps, ανάμεσα σε 3^η με 4^η ιδιοσυχνότητα (1020- 1240 Hz) και σε 5^η και 6^η ιδιοσυχνότητα (1340- 1680 Hz).

Η δομή με πυρήνα δίνει το εξής διάγραμμα:



Εικόνα 16 Διάγραμμα απόκρισης με κυκλικό έγκλεισμα

Τα bandgaps που εντοπίζονται με την παρουσία εγκλείσματος είναι και πάλι δύο. Το πρώτο band gap βρίσκεται ανάμεσα σε 3^η και 4^η ιδιοσυχνότητα (1160- 1250 Hz). Το δεύτερο bandgap, βρίσκεται ανάμεσα σε 5^η και 6^η ιδιοσυχνότητα (1370- 1840 Hz).

Παρατηρούμε ότι το πλήθος των band gap παραμένει το ίδιο και στις δύο περιπτώσεις, ωστόσο παρατηρούμε ότι με την παρουσία του εγκλείσματος, το εύρος συχνοτήτων του δεύτερου bandgap είναι ελαφρώς βελτιωμένο.

Τα διαγράμματα που θα ακολουθήσουν θα αφορούν αλλαγές στο μέγεθος των εσωτερικών ελλείψεων και στο το πάχος του σταυρού που περιβάλλει τη δομή.

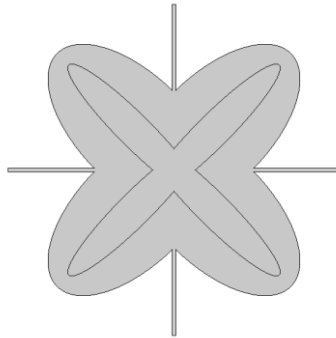
Προσομοίωση με αλλαγή στο μέγεθος των εσωτερικών ελλείψεων

Στις επόμενες μελέτες, οι διαστάσεις της εσωτερικής έλλειψης που επαναλαμβάνεται θα έχουν τις ακόλουθες τιμές:

- 170 X 30
- 170 X 60
- 170 X 80
- 170 X 90

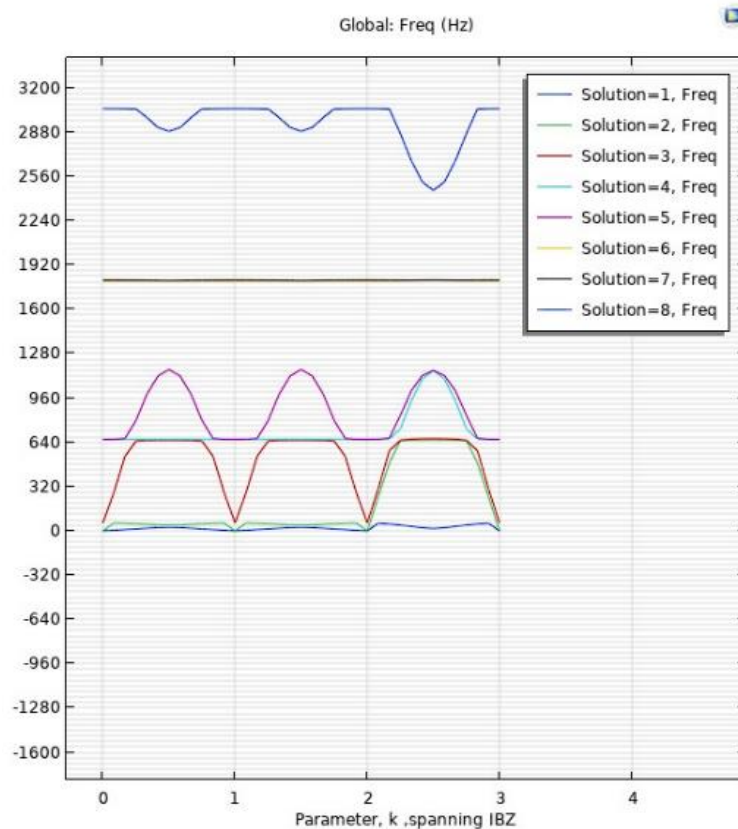
Το πάχος των ράβδων περιμετρικά θα μεταβάλλεται επίσης, και θα μελετάται η επίδρασή του για τιμές 3,6 και 12mm.

Εσωτερική έλλειψη 170X30, ράβδος 3mm



Εικόνα 17 Δομή με εσωτερική έλλειψη 170X30 και πάχος ράβδου 3mm

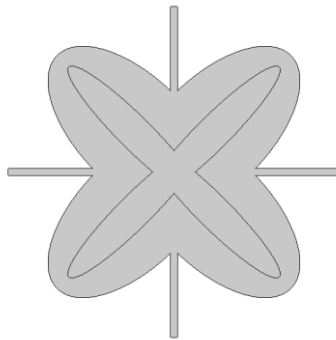
Με διάγραμμα ιδιοσυχνοτήτων:



Εικόνα 18 Διάγραμμα απόκρισης δομής με εσωτερική έλλειψη 170X30 και πάχος ράβδου 3mm

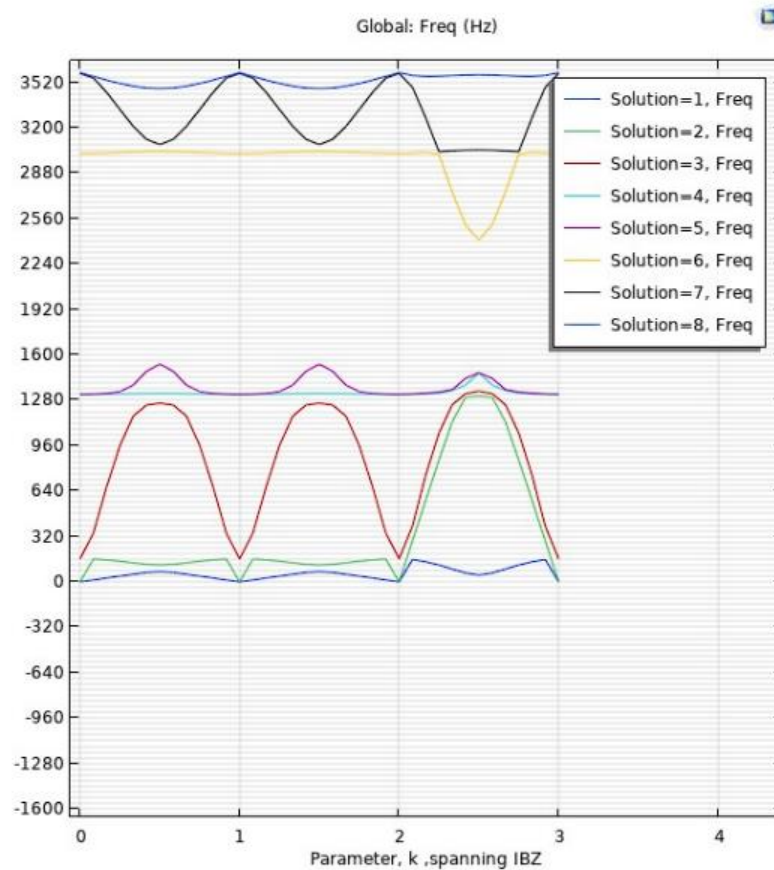
Στο διάγραμμα φαίνονται συνολικά 2 ολικά band gap. Ανάμεσα σε 5^η και 6^η ιδιοσυχνότητα (1160- 1800 Hz) και σε 7^η και 8^η ιδιοσυχνότητα (1800- 2460 Hz).

Εσωτερική έλλειψη 170X30, ράβδος 6mm



Εικόνα 19 Δομή με εσωτερική έλλειψη 170X30 και πάχος ράβδου 6mm

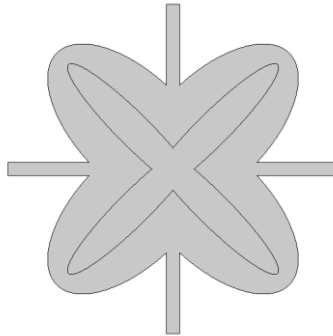
Με διάγραμμα ιδιοσυχνοτήτων:



Εικόνα 20 Διάγραμμα απόκρισης δομής με εσωτερική έλλειψη 170X30 και πάχος ράβδου 6mm

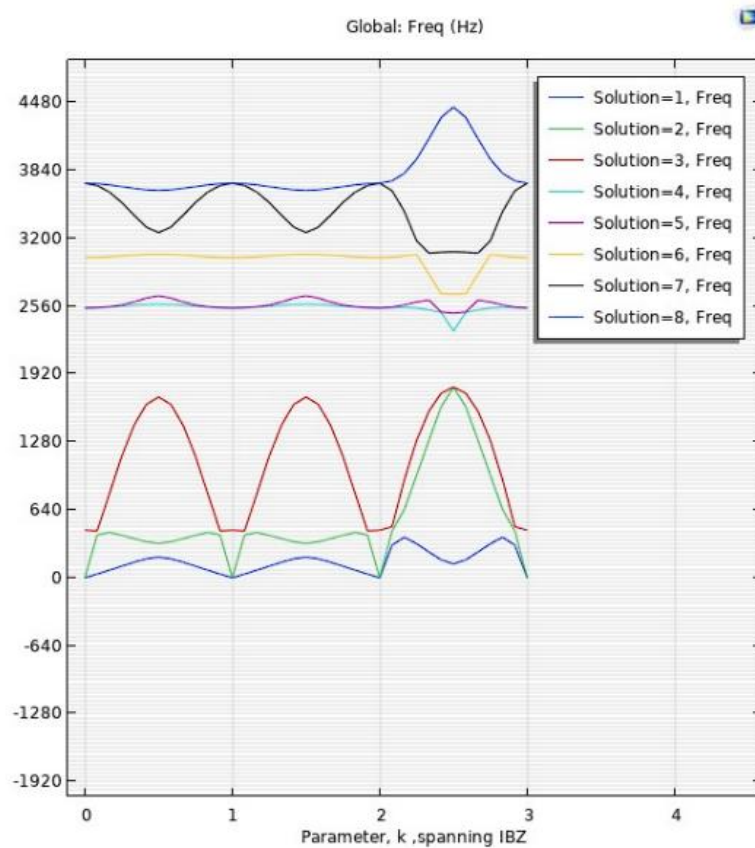
Στο διάγραμμα φαίνεται συνολικά 1 ολικό band gap. Ανάμεσα σε 5^η και 6^η ιδιοσυχνότητα (1520- 2400 Hz).

Εσωτερική έλλειψη 170X30, ράβδος 12mm



Εικόνα 21 Δομή με εσωτερική έλλειψη 170X30 και πάχος ράβδου 12mm

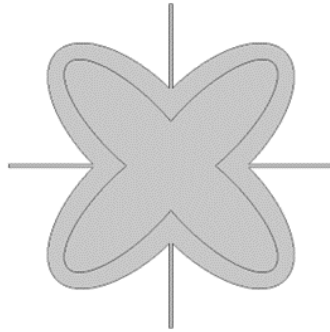
Με διάγραμμα ιδιοσυχνοτήτων:



Εικόνα 22 Διάγραμμα απόκρισης δομής με εσωτερική έλλειψη 170X30 και πάχος ράβδου 12mm

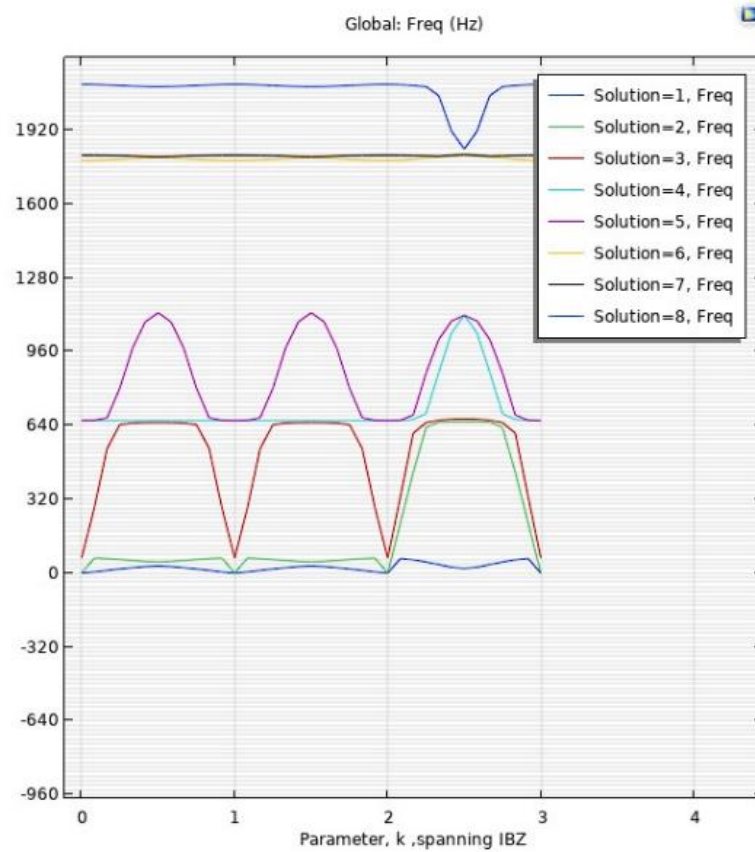
Στο διάγραμμα φαίνονται συνολικά 2 ολικά band gap. Ανάμεσα σε 3^η και 4^η ιδιοσυχνότητα (1720- 2320 Hz) και ένα οριακό bandgap, ανάμεσα 5^η και 6^η ιδιοσυχνότητα (2680- 2700 Hz).

Εσωτερική έλλειψη 170X60, ράβδος 3mm



Εικόνα 23 Δομή με εσωτερική έλλειψη 170X60 και πάχος ράβδου 3mm

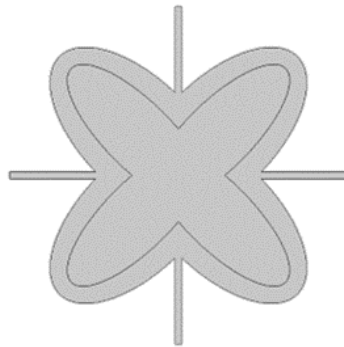
Με διάγραμμα ιδιοσυχνοτήτων:



Εικόνα 24 Διάγραμμα απόκρισης δομής με εσωτερική έλλειψη 170X60 και πάχος ράβδου 3mm

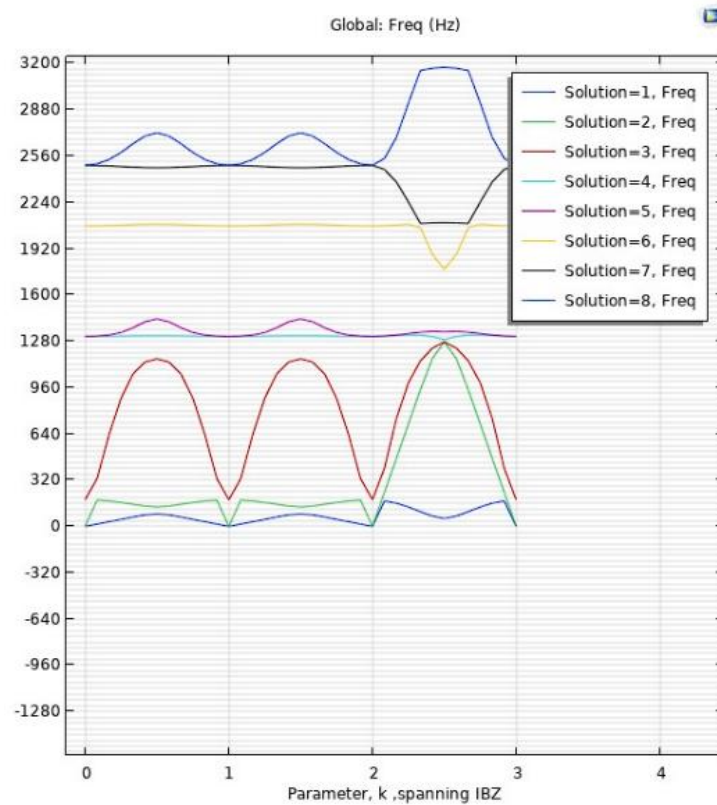
Στο διάγραμμα φαίνονται 2 ολικά Band gap. Πιο συγκεκριμένα ανάμεσα σε 5^η και 6^η ιδιοσυχνότητα (1120-1775 Hz) και ανάμεσα σε 7^η και 8^η ιδιοσυχνότητα (1805-1835 Hz).

Εσωτερική έλλειψη 170X60, ράβδος 6mm



Εικόνα 25 Δομή με εσωτερική έλλειψη 170X60 και πάχος ράβδου 6mm

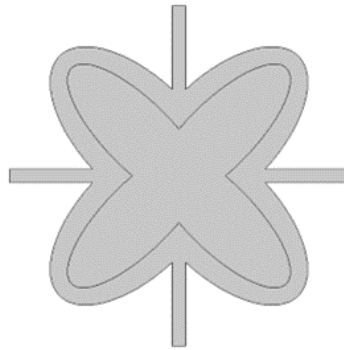
Με διάγραμμα ιδιοσυχνοτήτων:



Εικόνα 26 Διάγραμμα απόκρισης δομής με εσωτερική έλλειψη 170X60 και πάχος ράβδου 6mm

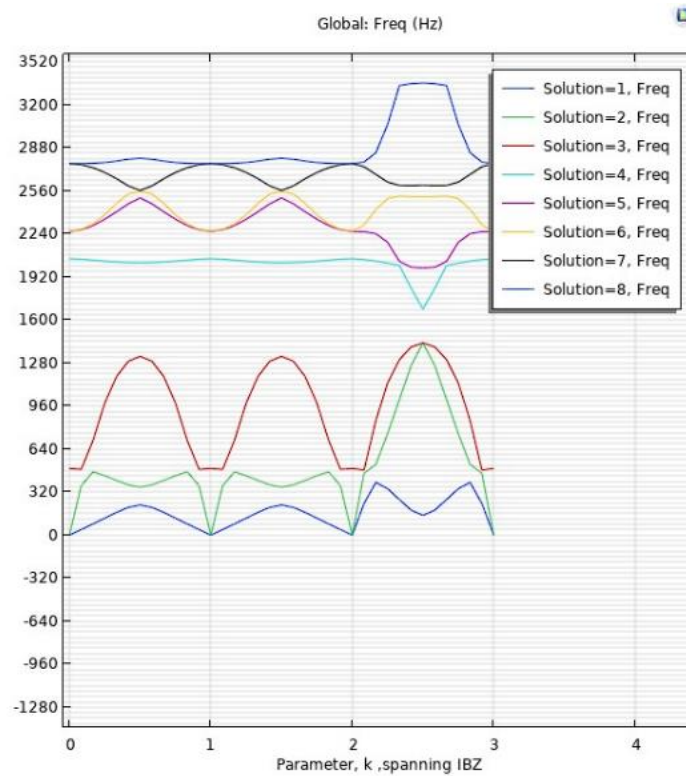
Στο διάγραμμα φαίνεται συνολικά 1 ολικό band gap. Ανάμεσα σε 5^η και 6^η ιδιοσυχνότητα (1440-1780 Hz).

Εσωτερική έλλειψη 170X60, ράβδος 12mm



Εικόνα 27 Δομή με εσωτερική έλλειψη 170X60 και πάχος ράβδου 12mm

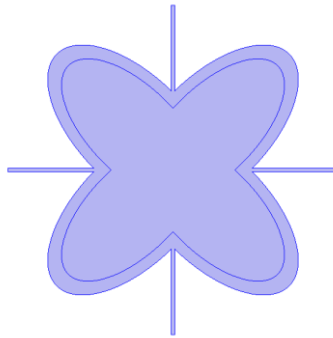
Με διάγραμμα ιδιοσυχνοτήτων:



Εικόνα 28 Διάγραμμα απόκρισης δομής με εσωτερική έλλειψη 170X60 και πάχος ράβδου 12mm

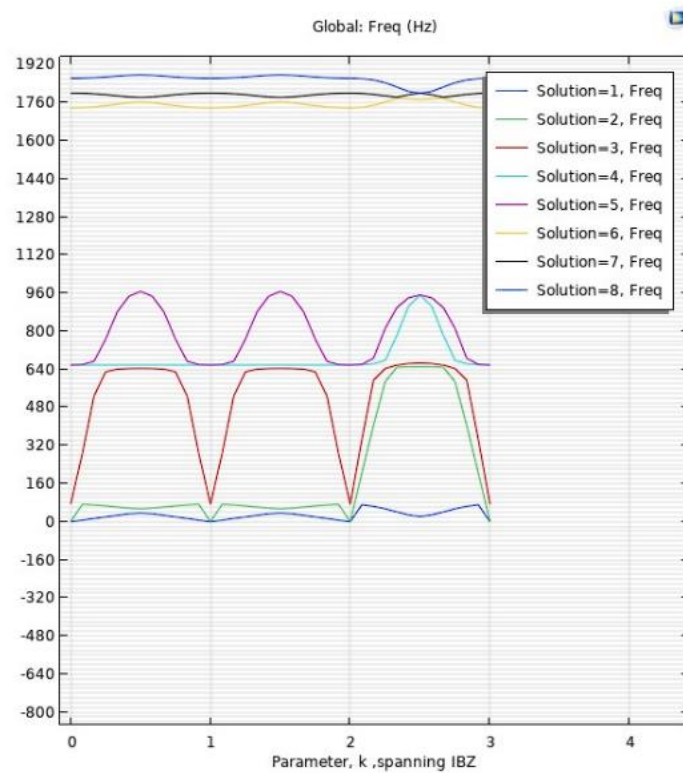
Στο διάγραμμα υπάρχει 1 ολικό band gap. Πιο συγκεκριμένα, ανάμεσα σε 3^η και 4^η ιδιοσυχνότητα (1420-1680 Hz).

Εσωτερική έλλειψη 170X80, ράβδος 3mm



Εικόνα 29 Δομή με εσωτερική έλλειψη 170X80 και πάχος ράβδου 3mm

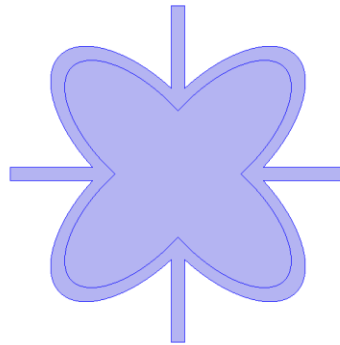
Με διάγραμμα ιδιοσυχνοτήτων:



Εικόνα 30 Διάγραμμα απόκρισης δομής με εσωτερική έλλειψη 170X80 και πάχος ράβδου 3mm

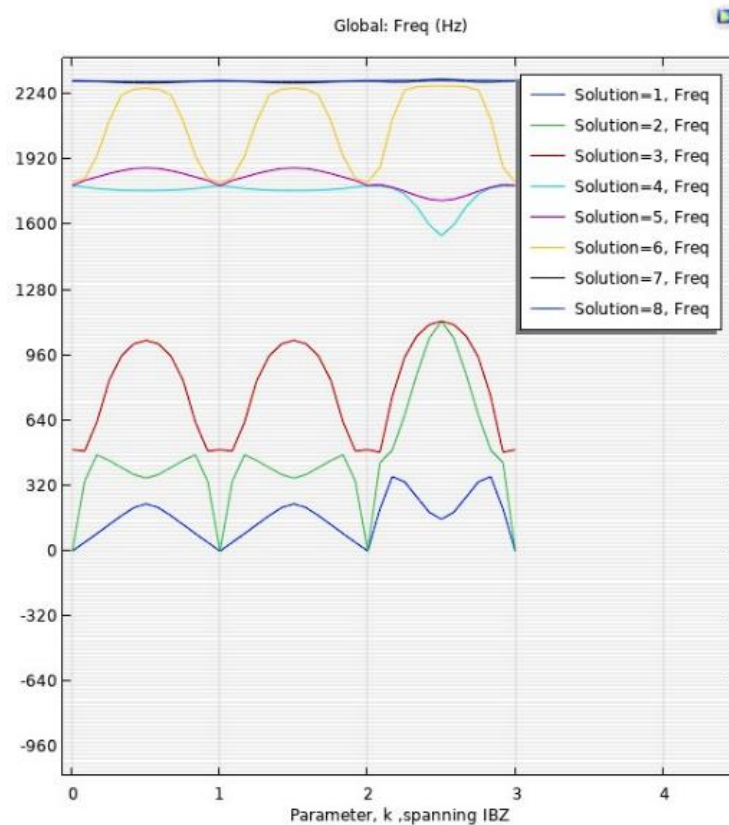
Στο διάγραμμα εντοπίζουμε 1 ολικό band gap. Ειδικότερα, ανάμεσα σε 5^η και 6^η ιδιοσυχνότητα (970-1740 Hz).

Εσωτερική έλλειψη 170X80, ράβδος 12mm



Εικόνα 31 Δομή με εσωτερική έλλειψη 170X80 και πάχος ράβδου 12mm

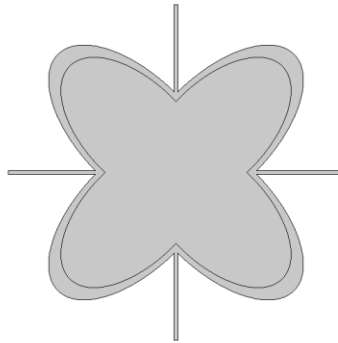
Με διάγραμμα ιδιοσυχνοτήτων:



Εικόνα 32 Διάγραμμα απόκρισης δομής με εσωτερική έλλειψη 170X80 και πάχος ράβδου 12mm

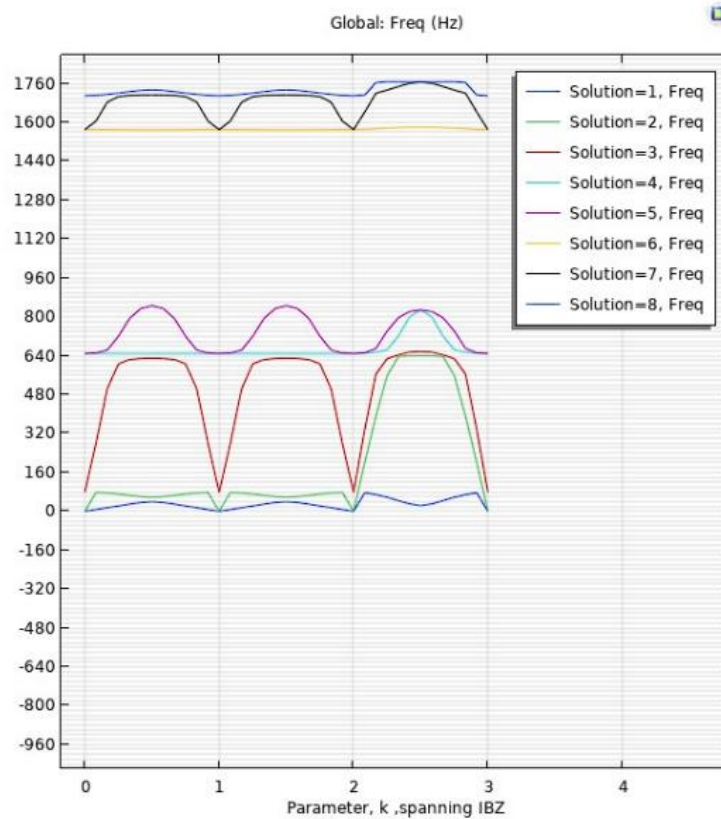
Στο διάγραμμα βρίσκουμε 1 ολικό band gap. Ανάμεσα σε 3^η και 4^η ιδιοσυχνότητα (1050-1530 Hz).

Εσωτερική έλλειψη 170X90, ράβδος 3mm



Εικόνα 33 Δομή με εσωτερική έλλειψη 170X90 και πάχος ράβδου 3mm

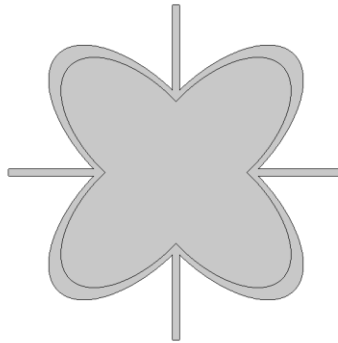
Με διάγραμμα ιδιοσυχνοτήτων:



Εικόνα 34 Διάγραμμα απόκρισης δομής με εσωτερική έλλειψη 170X90 και πάχος ράβδου 3mm

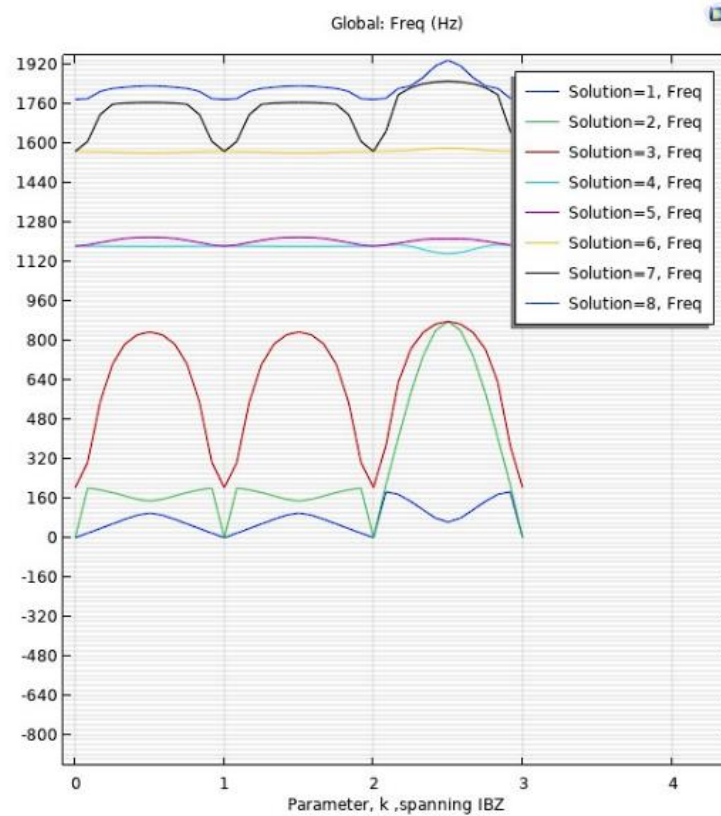
Στο διάγραμμα εντοπίζεται 1 ολικό band gap. Ανάμεσα σε 5^η και 6^η ιδιοσυχνότητα (850-1570 Hz).

Εσωτερική έλλειψη 170X90, ράβδος 6mm



Εικόνα 35 Δομή με εσωτερική έλλειψη 170X90 και πάχος ράβδου 6mm

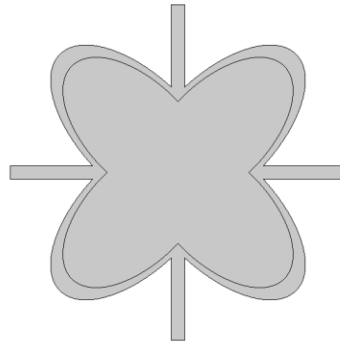
Με διάγραμμα ιδιοσυχνοτήτων:



Εικόνα 36 Διάγραμμα απόκρισης δομής με εσωτερική έλλειψη 170X90 και πάχος ράβδου 6mm

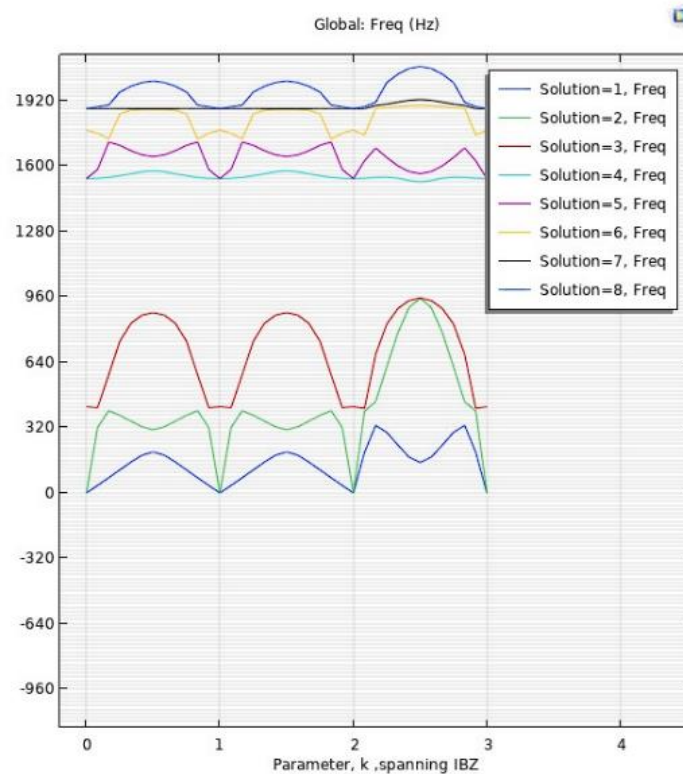
Στο διάγραμμα εντοπίζονται 2 ολικά band gaps. Πιο συγκεκριμένα, σε 3^η και 4^η ιδιοσυχνότητα (840-1160 Hz) σε 5^η και 6^η ιδιοσυχνότητα (1220-1570 Hz).

Εσωτερική έλλειψη 170X90, ράβδος 12mm



Εικόνα 37 Δομή με εσωτερική έλλειψη 170X90 και πάχος ράβδου 12mm

Με διάγραμμα ιδιοσυχνοτήτων:



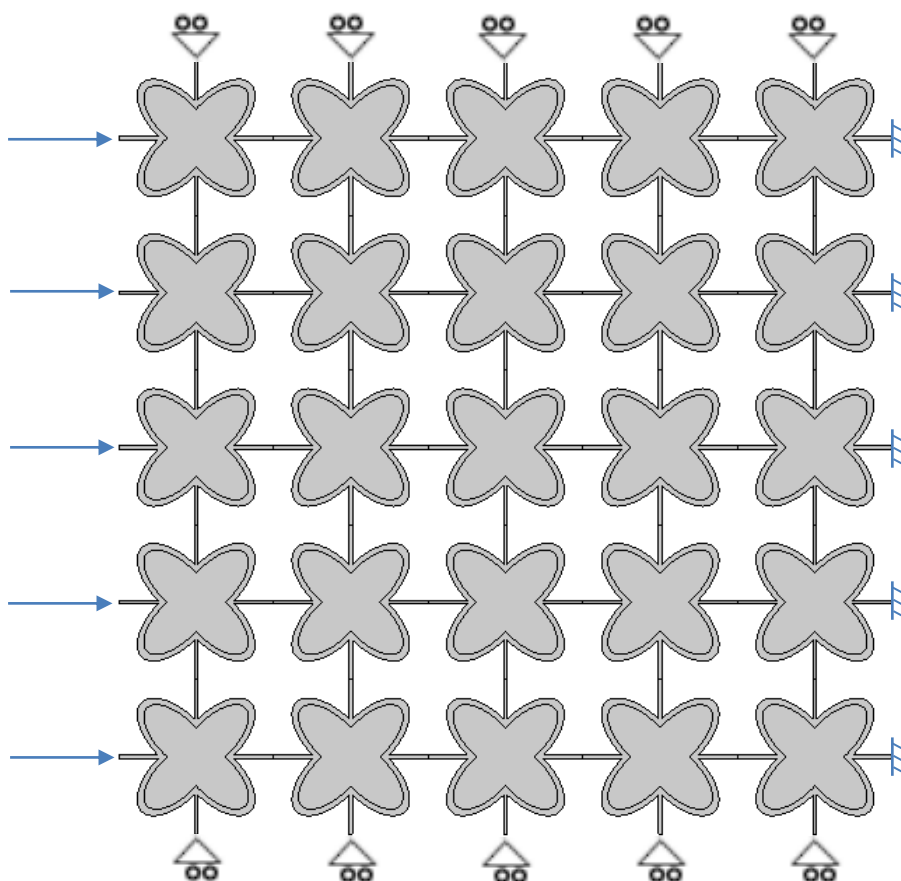
Εικόνα 38 Διάγραμμα απόκρισης δομής με εσωτερική έλλειψη 170X90 και πάχος ράβδου 12mm

Βλέπουμε 1 ολικό band gap, ανάμεσα στην 3^η και 4^η ιδιοσυχνότητα (950-1530 Hz).

Κεφάλαιο 6 – Προσομοίωση φόρτισης πλέγματος 5X5

Συνεχίζοντας τη μελέτη, προχωρήσαμε στην κατασκευή ενός πλέγματος σε δύο διαστάσεις, αποτελούμενο από 5 γραμμές και 5 στήλες στοιχείων με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Διαστάσεις εξωτερικής έλλειψης : 200 X 100 (mm)
- Διαστάσεις εσωτερικής έλλειψης : 170 X 80 (mm)
- Πάχος ράβδου: 6 (mm)



Εικόνα 39 Διάγραμμα απόκρισης δομής με εσωτερική έλλειψη 170X90 και πάχος ράβδου 12mm

Προκειμένου να μπορέσουμε να επαληθεύσουμε τα αποτελέσματα που εντοπίσαμε στο προηγούμενο στάδιο της μελέτης, χρησιμοποιήθηκε μία λειτουργία του λογισμικού COMSOL, η οποία μοντελοποιεί τη διάδοση ενός κύματος και ονομάζεται “Frequency Domain Study”

Η διάδοση των κυμάτων μοντελοποιείται με εξισώσεις από γραμμική ρευστοδυναμική (κύματα πίεσης) και δομική δυναμική (ελαστικά κύματα). Οι πλήρεις εξισώσεις εξαρτώνται από το χρόνο, αλλά σημειώνοντας ότι μια αρμονική διέγερση του πεδίου p έχει μια χρονική εξάρτηση της μορφής,

$$p(t) = pe^{i\omega t}$$

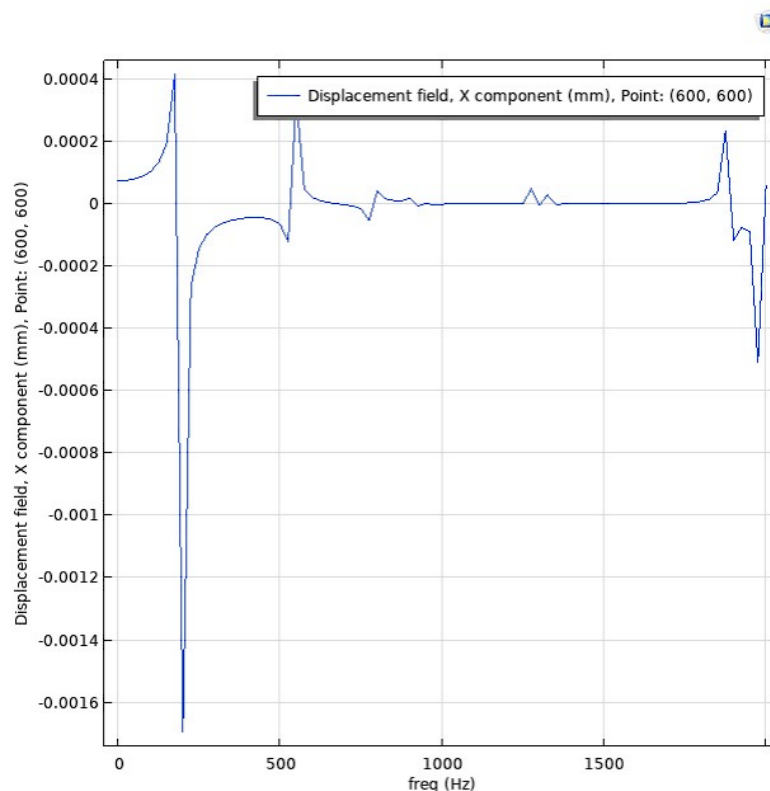
προκαλεί μια εξίσου αρμονική απόκριση με την ίδια συχνότητα. Ο χρόνος μπορεί να εξαλειφθεί εντελώς από τις εξισώσεις. Αντί αυτού η γωνιακή συχνότητα $\omega = 2\pi f$, μπαίνει ως παράμετρος όπου f είναι η συχνότητα.

Αυτή η διαδικασία αναφέρεται συχνά ως εργασία στον τομέα συχνότητας ή τομέας Fourier σε αντίθεση με τον τομέα χρόνου. Από μαθηματική άποψη, η χρονική-αρμονική εξίσωση είναι μετασχηματισμός Fourier των αρχικών χρονοεξαρτώμενων εξισώσεων και η επίλυσή της ως συνάρτηση του ω είναι ο μετασχηματισμός Fourier μιας πλήρους μεταβατικής λύσης. Είναι επομένως δυνατό να συντεθεί μια χρονικά εξαρτώμενη λύση από μια προσομοίωση τομέα συχνότητας εφαρμόζοντας έναν αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier.

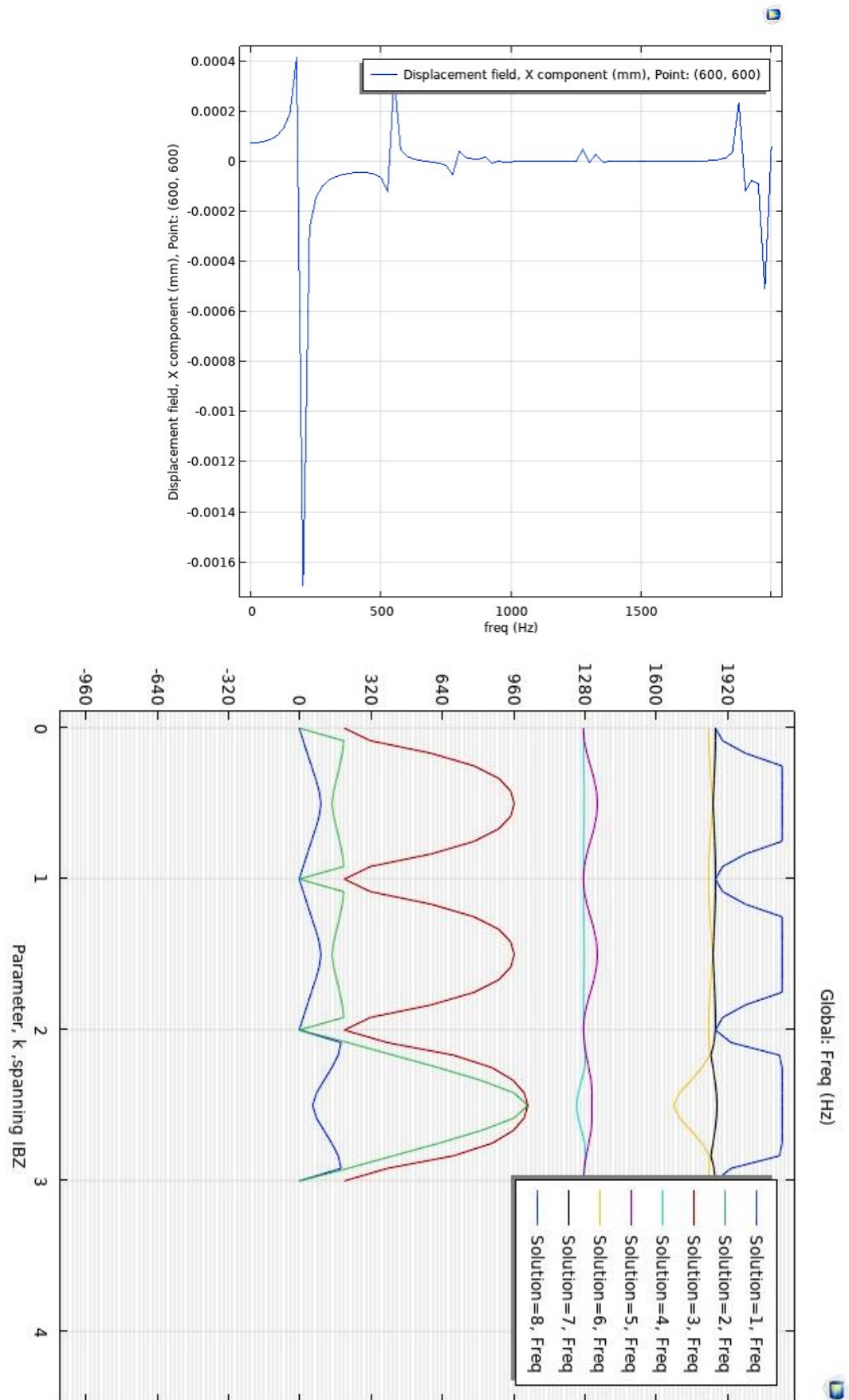
Το αποτέλεσμα μιας ανάλυσης πεδίου συχνότητας (Frequency Domain Study) είναι ένα σύνθετο χρονοεξαρτώμενο πεδίο p , το οποίο μπορεί να ερμηνευτεί ως πλάτος $p_{amp} = \text{abs}(p)$ και γωνία φάσης $p_{phase} = \text{arg}(p)$. Η πραγματική πίεση σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή είναι το πραγματικό μέρος της λύσης:

$$p(t) = p_{amp} \cos(2\pi f \cdot t + p_{phase})$$

Για τη μελέτη του πλέγματος που κατασκευάσαμε, εφαρμόσαμε ένα συνοριακό φορτίο 10MPa στις 5 πλευρές της κάθε ράβδου που προεξέχει, στο αριστερό τμήμα του πλέγματος. Ορίσαμε συνθήκες κύλισης στις 5 πάνω και κάτω πλευρές των ράβδων που προεξέχουν πάνω και κάτω αντίστοιχα και τέλος, οι 5 δεξιότερες πλευρές των ράβδων τέθηκαν σε ακινησία. Στη συνέχεια επιλέξαμε ένα σημείο στο κέντρο του πλέγματος, το οποίο θα μετακινείται εφόσον η δύναμη που ασκείται παράγει κύμα ικανό να ικανοποιήσει τη γεωμετρία του πλέγματος.



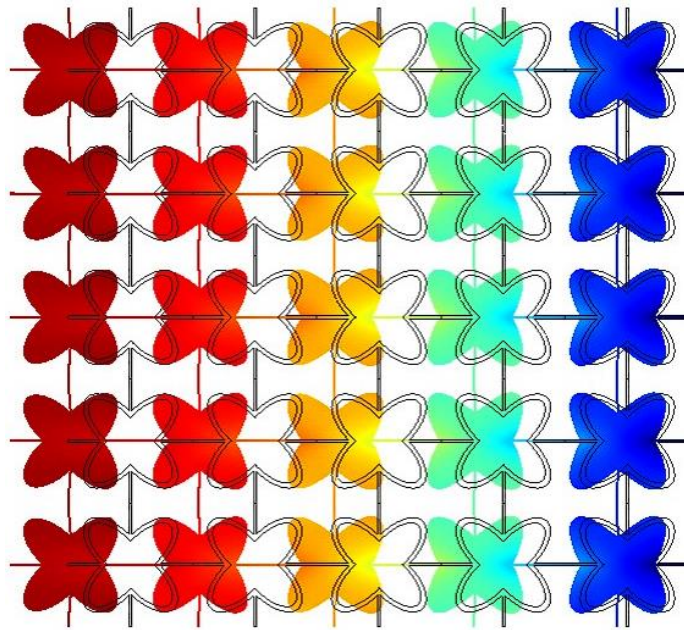
Εικόνα 40 Διάγραμμα μετατόπισης-συχνότητας του στοιχείου στο κέντρο του πλέγματος



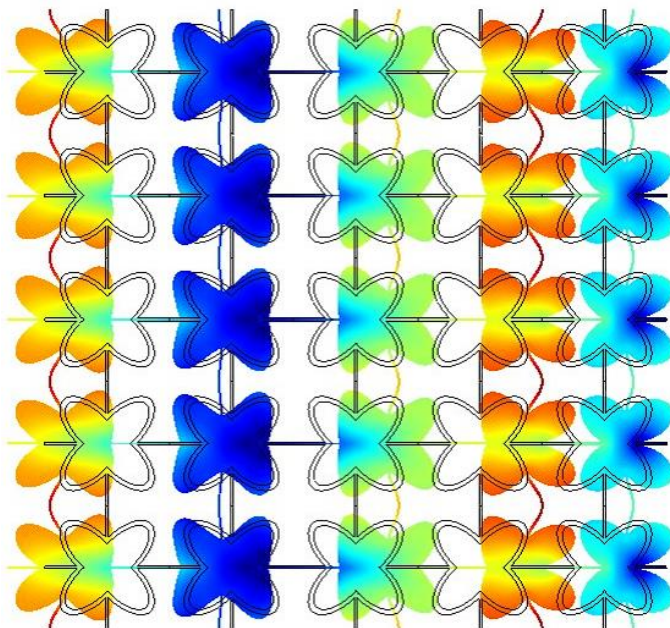
Εικόνα 41 Διαγράμμα μετατόπισης-συχνότητας του στοιχείου στο κέντρο του πλεγματός και διαγράμμα απόκρισης στοιχείου εσωτερικής έλλειψης 170X80 με ράβδο 6mm

Όπως βλέπουμε και στην Εικόνα 41, οι περιοχές των συχνοτήτων που εντοπίζονται τα bandgaps, αντιστοιχούν στις συχνότητες για τις οποίες το κύμα δε μπορεί να διαδοθεί στο εσωτερικό της γεωμετρίας, με αποτέλεσμα το στοιχείο που έχουμε επιλέξει να παραμένει ακίνητο. Συνεπώς, παρατηρούμε ότι υπάρχει συνοχή με τα αποτελέσματα και η δομή που εξετάζουμε λειτουργεί.

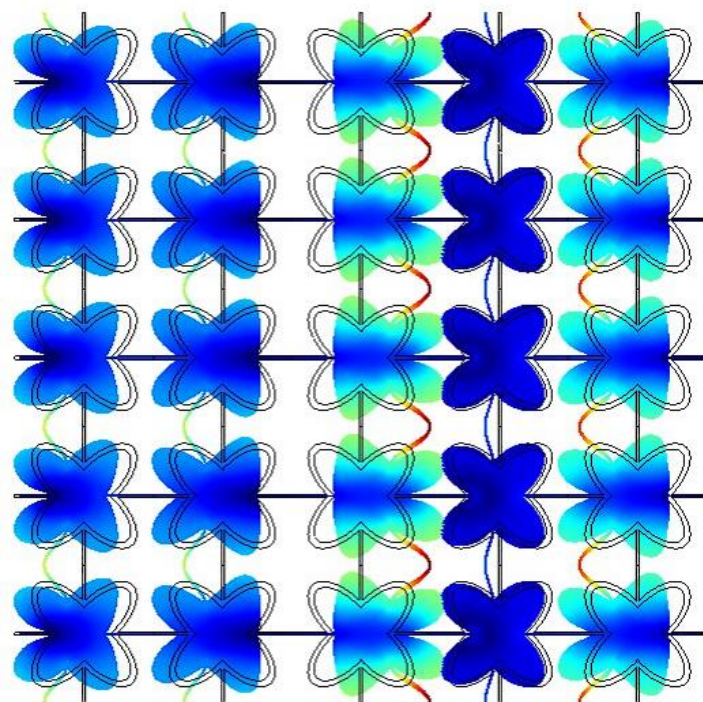
Στη συνέχεια παρουσιάζονται εικόνες που δείχνουν πως επηρεάζεται η γεωμετρία του πλέγματος για διαφορετικές συχνότητες εφαρμογής του συνοριακού φορτίου. Συνολικά το πλέγμα εξετάστηκε σε συχνότητες από 0Hz – 2000Hz, με βήμα 25.



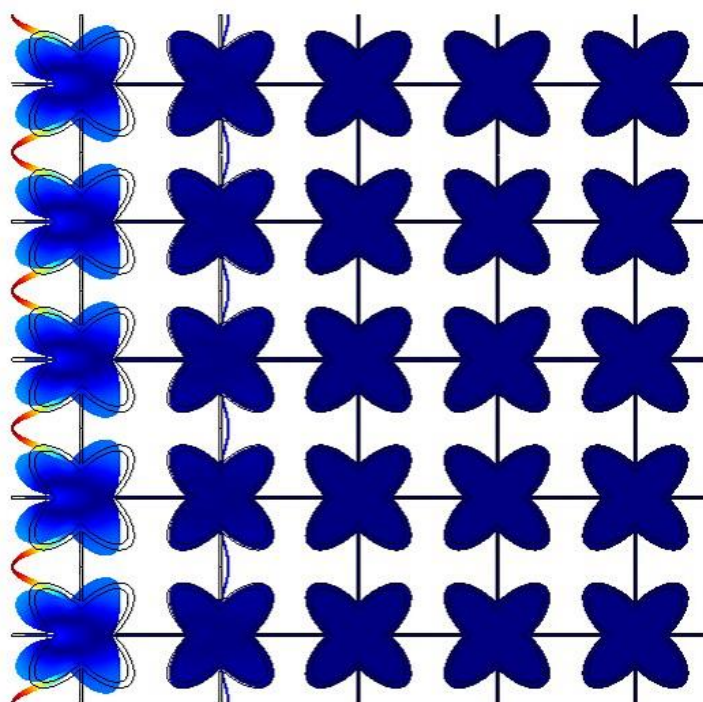
Εικόνα 42 Συμπεριφορά πλέγματος στα 200Hz



Εικόνα 43 Συμπεριφορά πλέγματος στα 550Hz



Εικόνα 44 Συμπεριφορά πλέγματος στα 875Hz



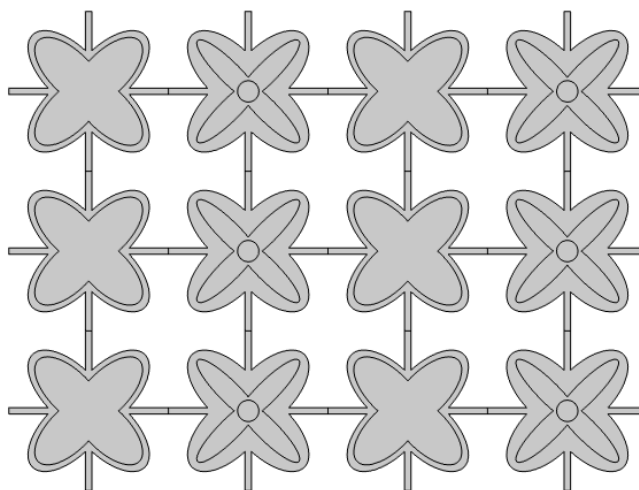
Εικόνα 45 Συμπεριφορά πλέγματος στα 1100Hz

Κεφάλαιο 7 – Διερεύνηση της αποτελεσματικότητας του συνδυασμού δομών

Έχοντας εξετάσει μεμονωμένες περιπτώσεις και επαληθεύοντας τα αποτελέσματα μέσω εφαρμογής του πειράματος σε πλέγμα στοιχείων ίδιας γεωμετρίας, συνεχίζουμε τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας της γεωμετρίας, κατασκευάζοντας πλέγματα στοιχείων διαφορετικών χαρακτηριστικών.

Με αυτόν τον τρόπο θα εξετάσουμε πως τα χαρακτηριστικά που εντοπίζουμε σε μεμονωμένες περιπτώσεις, συνεργάζονται μεταξύ τους προσφέροντας μεγαλύτερο εύρος χάσματος συχνότητας ή πολλαπλές περιοχές στις οποίες παρατηρείται κάποιο χάσμα συχνότητας, αποκόβοντας τη διάδοση ενός κύματος.

Τα χαρακτηριστικά του πλέγματος που μελετήσαμε, παρουσιάζονται στην Εικόνα 46. Συγκεκριμένα αποτελείται από στοιχεία εσωτερικής έλλειψης διαστάσεων 170X80, σε συνδυασμό ράβδου πάχους 6 και 12mm. Το δεύτερο στοιχείο αποτελείται από εσωτερική έλλειψη διαστάσεων 170X40, με κυκλικό έγκλεισμα διαμέτρου 40mm και ράβδους πάχους 12 και 15mm.



Εικόνα 46 Συμπεριφορά πλέγματος στα 1100Hz

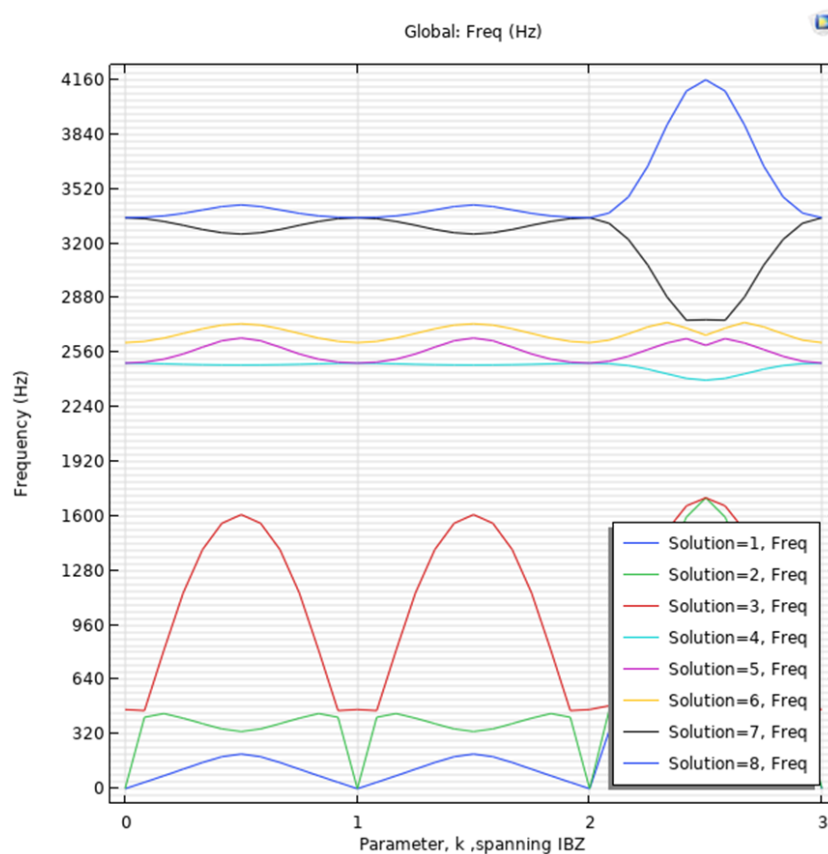
Από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε νωρίτερα, προέκυψαν τα ακόλουθα δεδομένα για το στοιχείο εσωτερικής έλλειψης 170X40:

Εσωτερική έλλειψη 170X80 (mm)	Πάχος ράβδου 6mm	Πάχος ράβδου 12mm
1 ^ο bandgap	3 ^η - 4 ^η (1020- 1240 Hz)	3 ^η - 4 ^η (1050-1530 Hz)
2 ^ο bandgap	5 ^η - 6 ^η (1340- 1680 Hz)	-

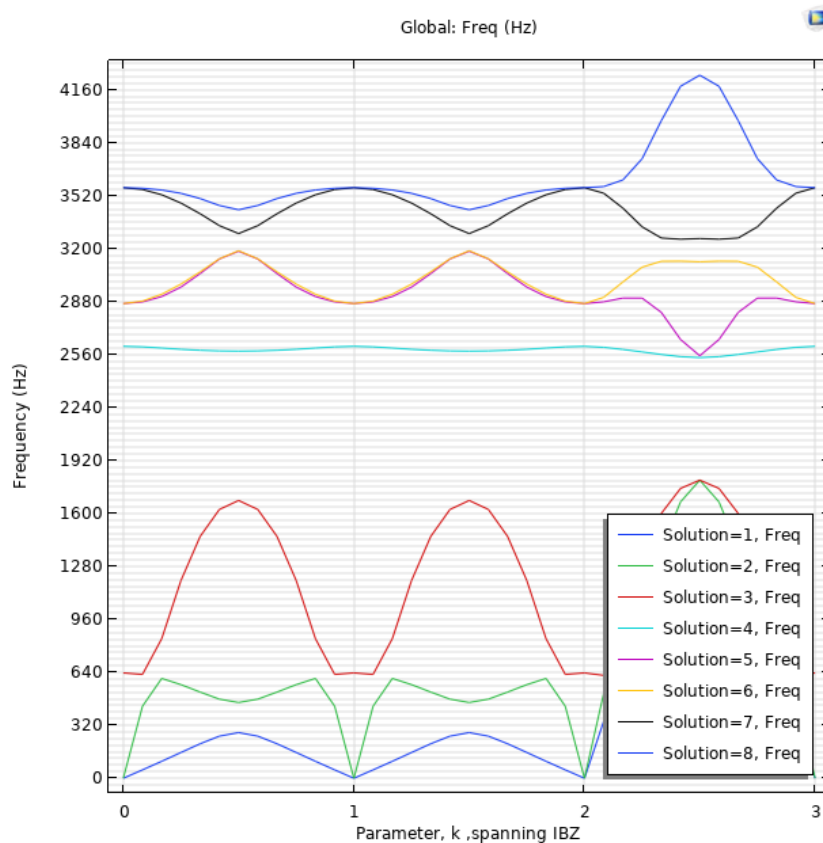
Αντίστοιχα, για το στοιχείο εσωτερικής έλλειψης 170X40 & κυκλικό έγκλεισμα $\phi 40$, τα αποτελέσματα φαίνονται συνοπτικά στον πίνακα που ακολουθεί:

Εσωτερική έλλειψη 170X40 & Έγκλεισμα	Πάχος ράβδου 12mm	Πάχος ράβδου 15mm
1 ^ο bandgap	3 ^η - 4 ^η (1710- 2395 Hz)	3 ^η - 4 ^η (1800-2540 Hz)
2 ^ο bandgap	-	6 ^η -7 ^η (3185-3255 Hz)

Τα παραπάνω αποτελέσματα εντοπίζονται στα διαγράμματα απόκρισης δομής που ακολουθούν:

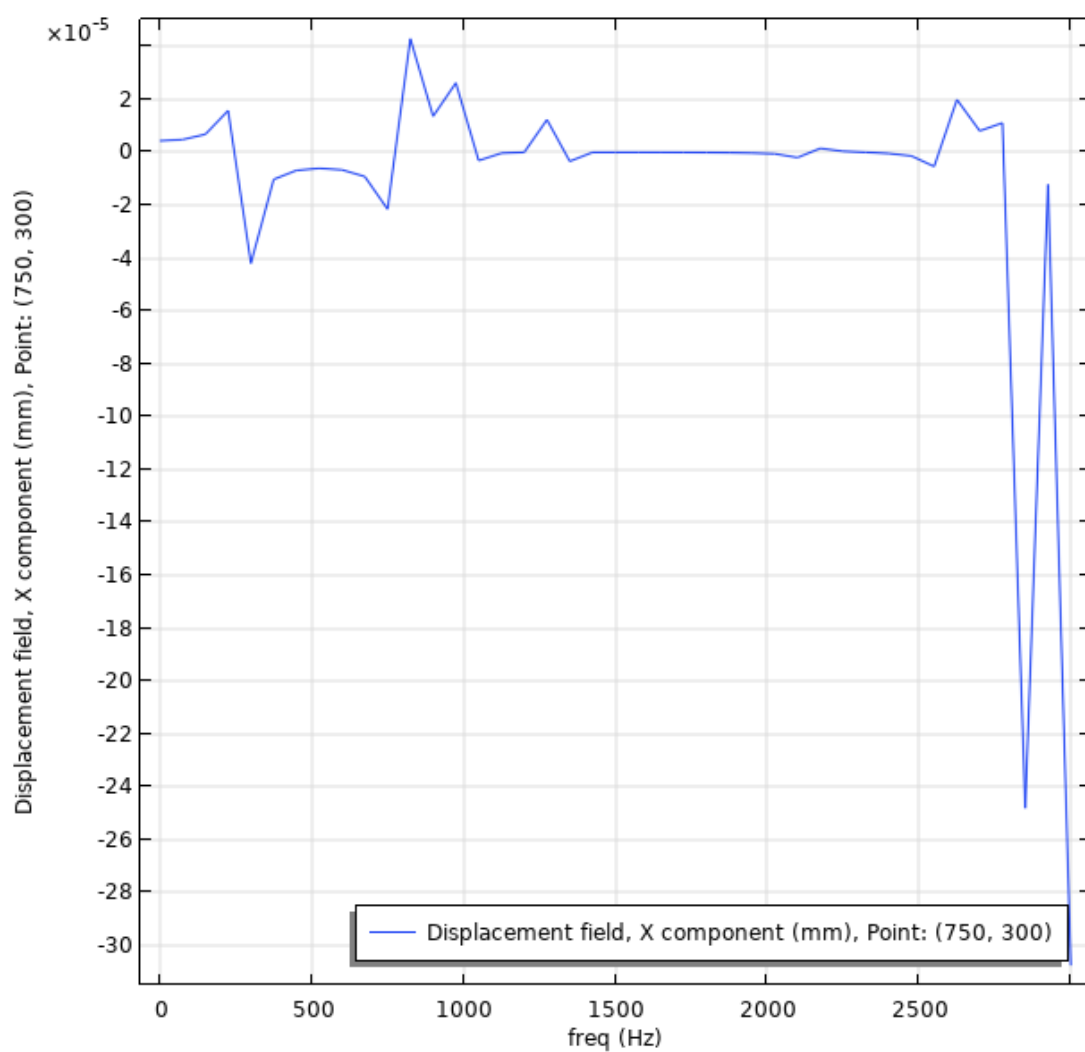


Εικόνα 47 Διάγραμμα απόκρισης δομής με εσωτερική έλλειψη 170X40, κυκλικό έγκλεισμα διαμέτρου 40mm και πάχος ράβδου 12mm

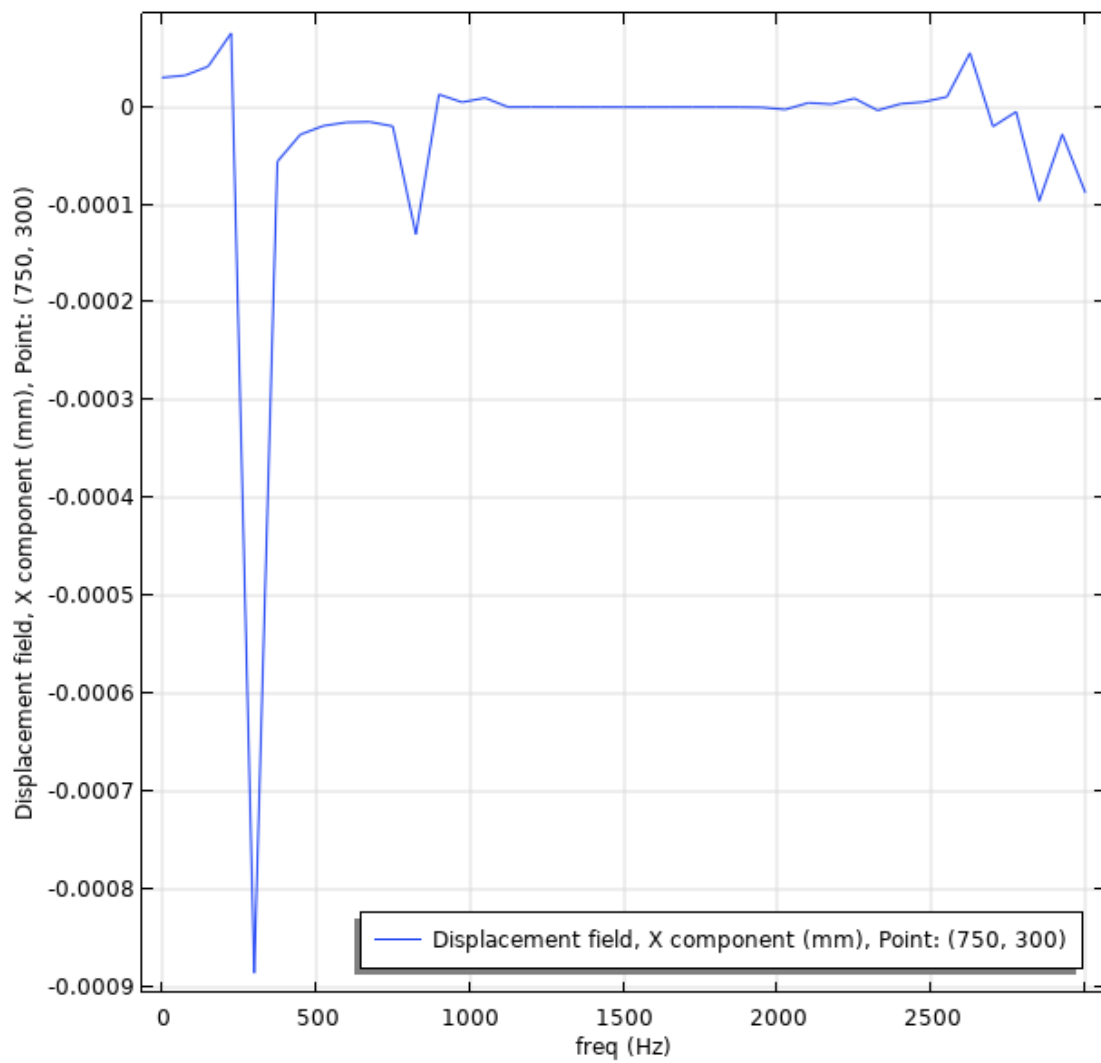


Εικόνα 48 Διάγραμμα απόκρισης δομής με εσωτερική έλλειψη 170X40, κυκλικό έγκλεισμα διαμέτρου 40mm και πάχος ράβδου 15mm

Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζονται τα διαγράμματα συχνότητας-μετατόπισης για το σημείο στο πλέγμα που έχουμε επιλέξει. Συγκεκριμένα, το σημείο που έχουμε επιλέξει για τη μελέτη της διάδοσης του κύματος στο εσωτερικό του πλέγματος, βρίσκεται στην ένωση του 3^{ου} με το 4^ο στοιχείο της 2^{ης} σειράς.



Εικόνα 49 Διάγραμμα μετατόπισης-συχνότητας πλέγματος συνδυασμού ελλείψεων 170X80 με ράβδο 6mm & έλλειψη 170X40, με κυκλικό έγκλεισμα διαμέτρου 40mm και πάχος ράβδου 15mm



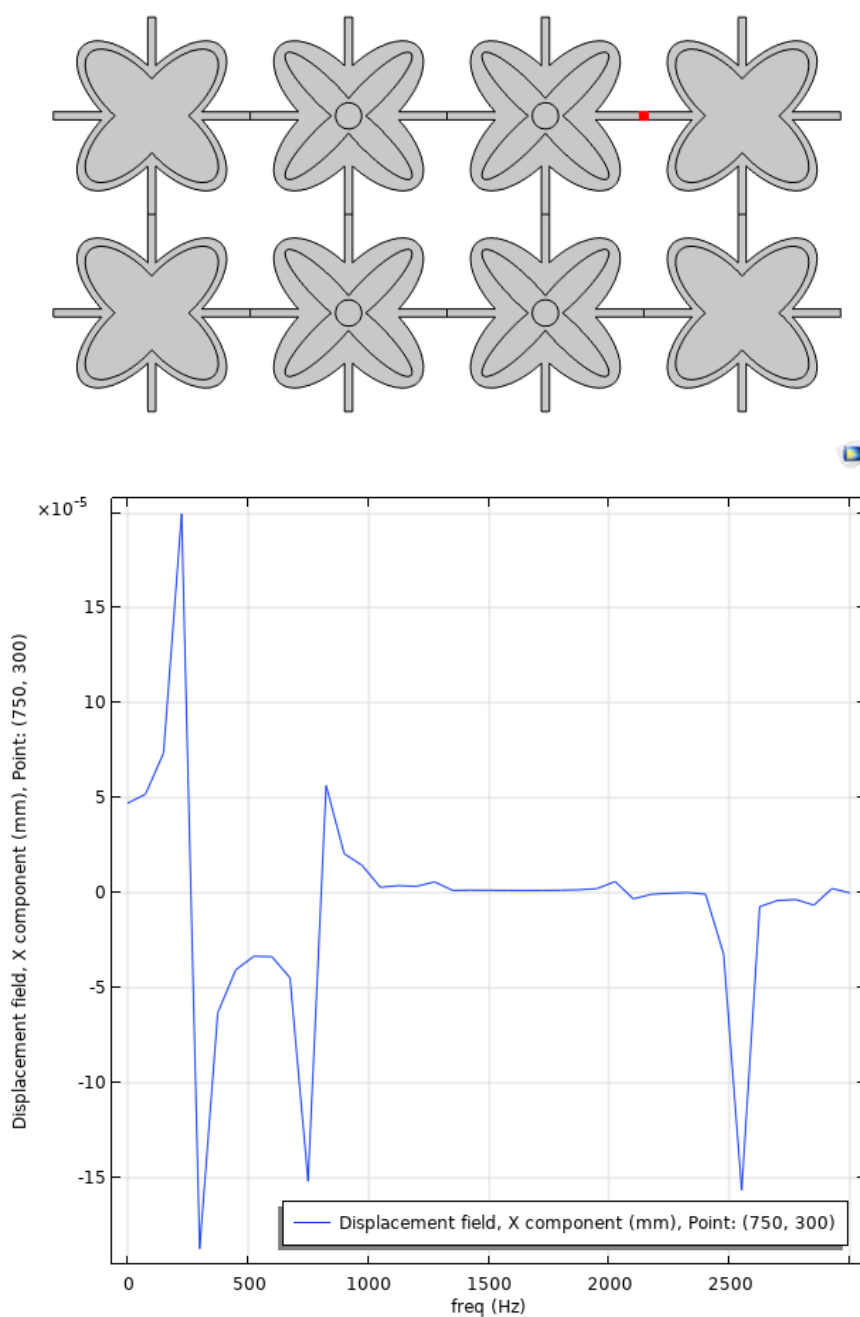
Εικόνα 50 Διάγραμμα μετατόπισης-συχνότητας πλέγματος συνδυασμού ελλείψεων 170X80 με ράβδο 12mm & έλλειψη 170X40, με κυκλικό έγκλεισμα διαμέτρου 40mm και πάχος ράβδου 15mm



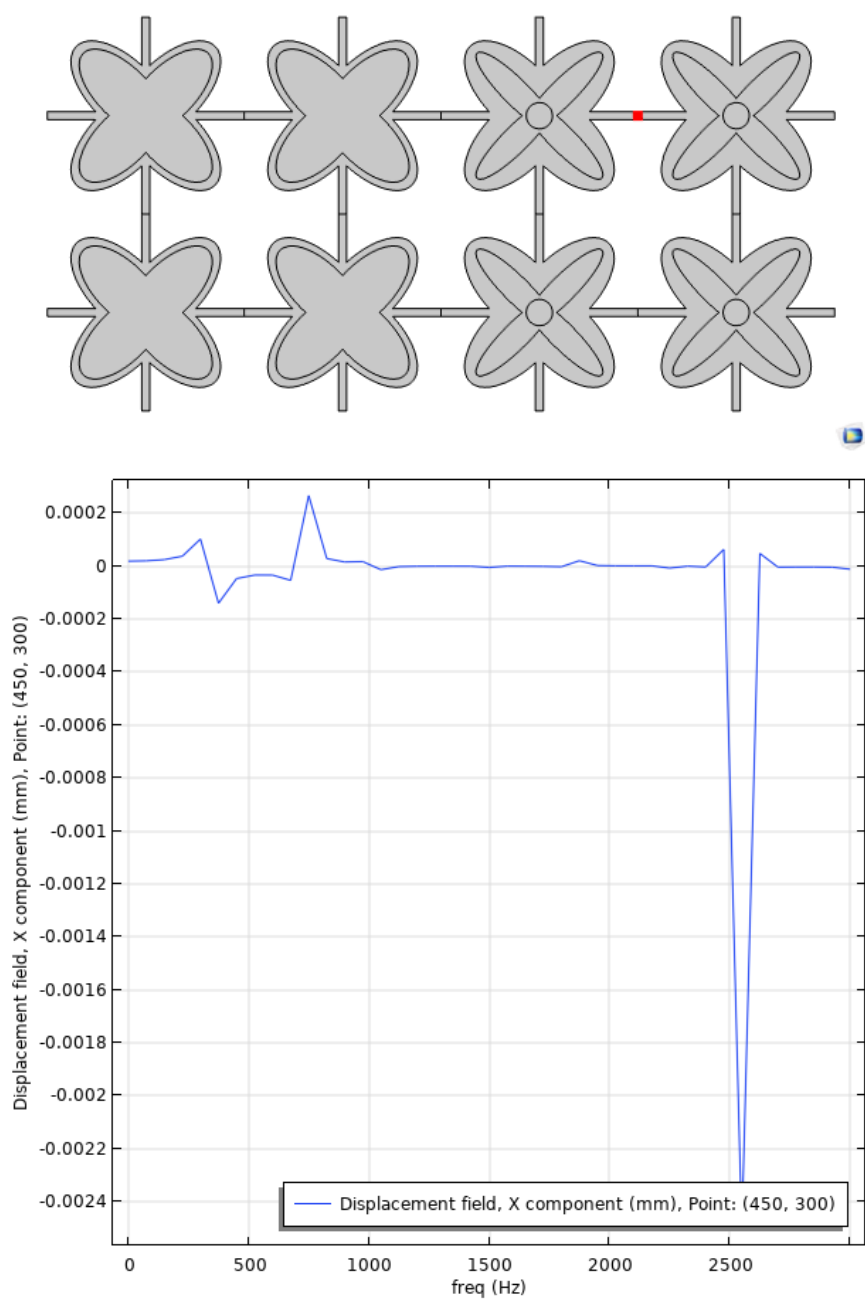
Εικόνα 51 Διάγραμμα μετατόπισης-συχνότητας πλέγματος συνδυασμού ελλείψεων 170X80 με ράβδο 12mm & έλλειψη 170X40, με κυκλικό έγκλεισμα διαμέτρου 40mm και πάχος ράβδου 12mm

Πλέγμα μίας διαστρωμάτωσης – Διαφορετικές διατάξεις στοιχείων

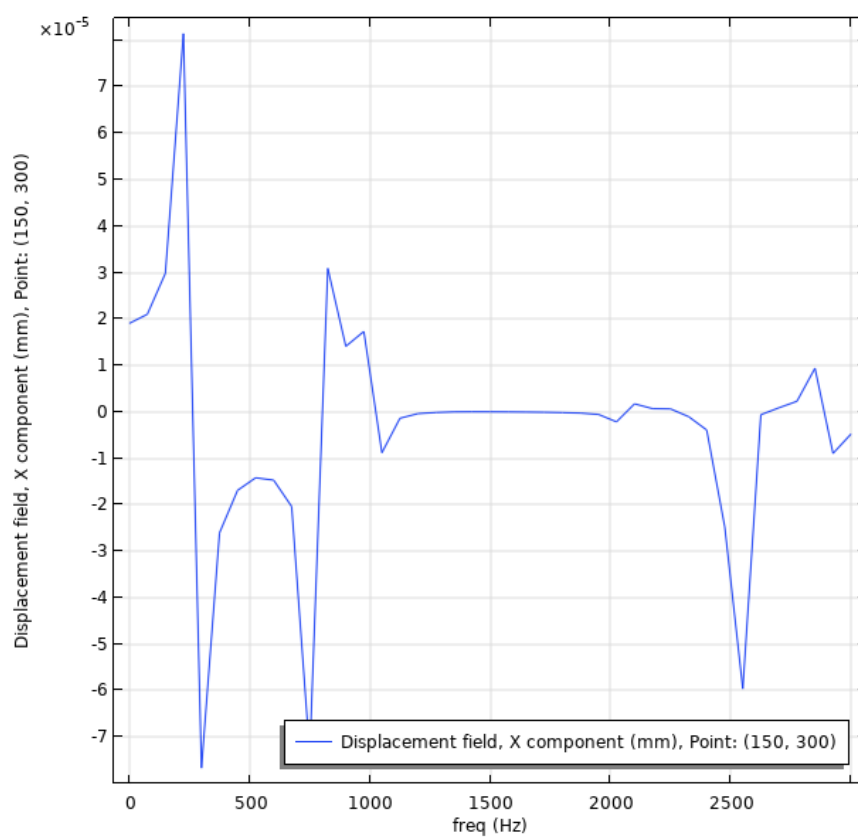
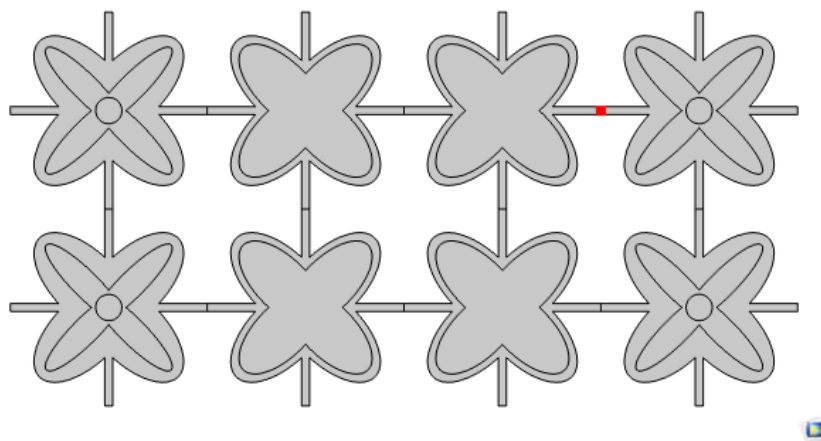
Συνεχίζοντας τη μελέτη, κατασκευάσαμε 5 παραλλαγές διαστρωμάτωσης, οι οποίες αποτελούνται από στοιχεία εσωτερικής έλλειψης 170X80, με ράβδο 12mm & έλλειψη 170X40, με κυκλικό έγκλεισμα διαμέτρου 40mm και πάχος ράβδου 12mm. Σε κάθε μία από τις πέντε περιπτώσεις, με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται το σημείο που επιλέξαμε για να εξετάσουμε τη μετατόπισή του σε περίπτωση που διαδίδεται ή όχι το κύμα στο εσωτερικό του πλέγματος.



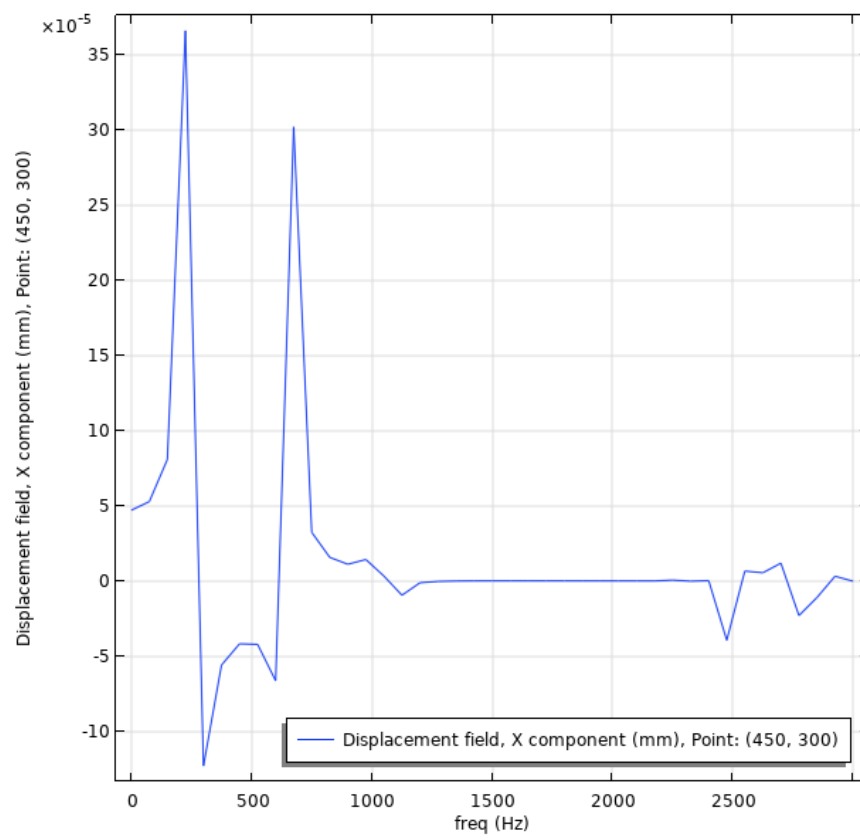
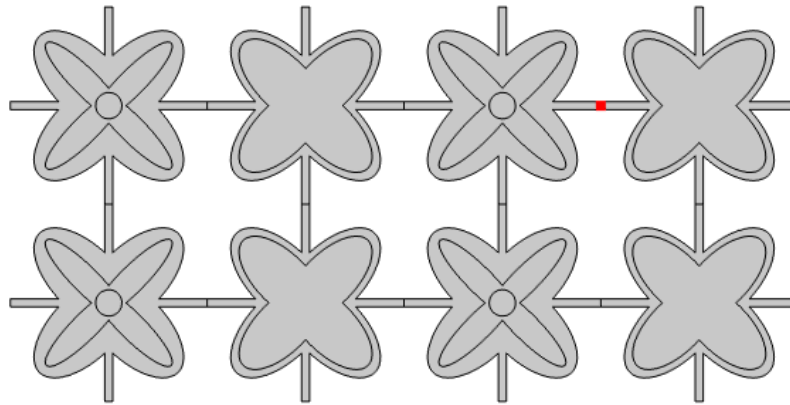
Εικόνα 52 Διάγραμμα μετατόπισης-συχνότητας πλέγματος τύπου Α



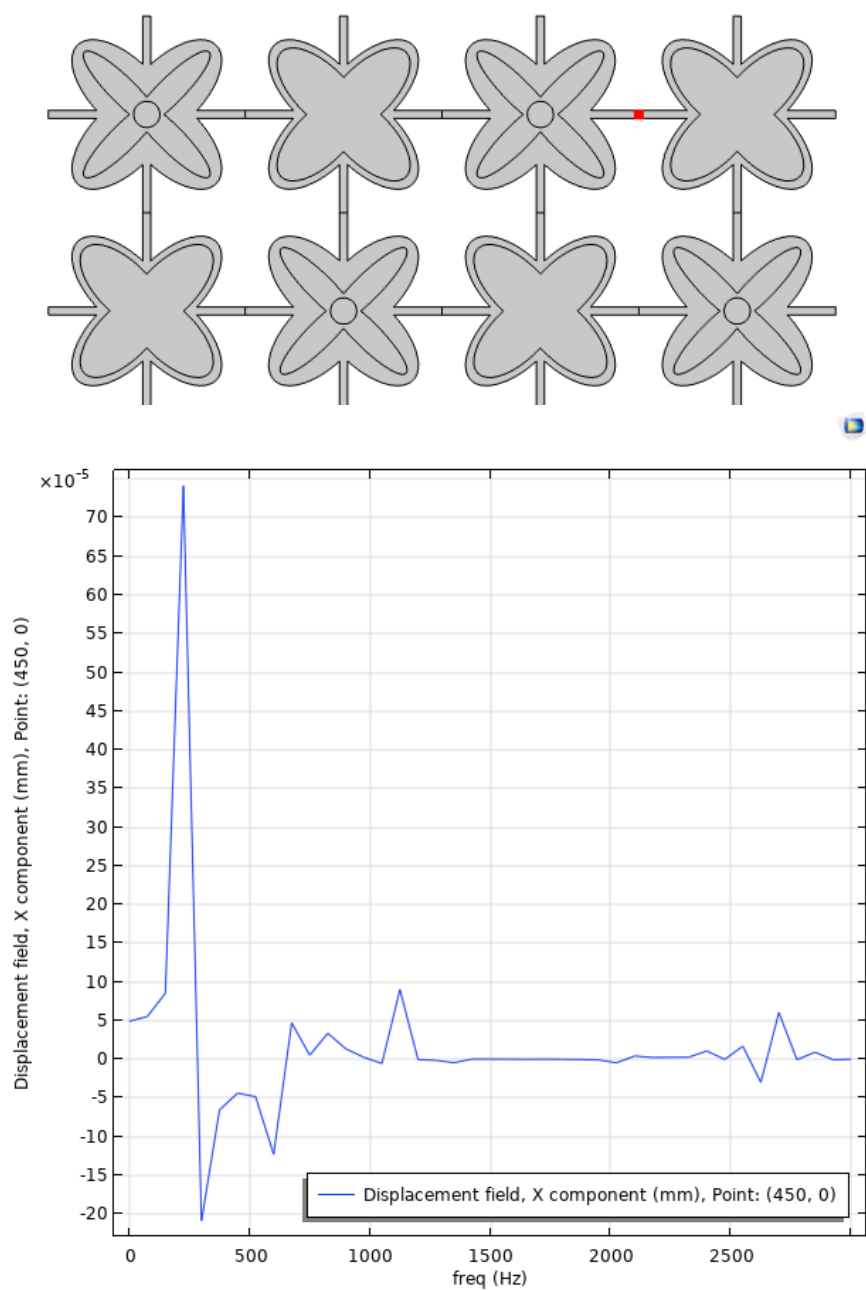
Εικόνα 53 Διάγραμμα μετατόπισης-συχνότητας πλέγματος τύπου Β



Εικόνα 54 Διάγραμμα μετατόπισης-συχνότητας πλέγματος τύπου Γ



Εικόνα 55 Διάγραμμα μετατόπισης-συχνότητας πλέγματος τύπου Δ



Εικόνα 56 Διάγραμμα μετατόπισης-συχνότητας πλέγματος τύπου E

Κεφάλαιο 8 – Σύνοψη αποτελεσμάτων

Εσωτερική έλλειψη 170X30 (mm)	Πάχος ράβδου 3mm	Πάχος ράβδου 6mm	Πάχος ράβδου 12mm
1 ^ο bandgap	5 ^η - 6 ^η (1160- 1800 Hz)	5 ^η - 6 ^η (1520- 2400 Hz)	3 ^η - 4 ^η (1720- 2320 Hz)
2 ^ο bandgap	7 ^η - 8 ^η (1800- 2460 Hz)	-	7 ^η - 8 ^η (2680- 2700 Hz)

Εσωτερική έλλειψη 170X60 (mm)	Πάχος ράβδου 3mm	Πάχος ράβδου 6mm	Πάχος ράβδου 12mm
1 ^ο bandgap	5 ^η - 6 ^η (1120-1775 Hz)	5 ^η - 6 ^η (1440-1780 Hz)	3 ^η - 4 ^η (1420-1680 Hz)
2 ^ο bandgap	7 ^η - 8 ^η (1805-1835 Hz)	-	-

Εσωτερική έλλειψη 170X80 (mm)	Πάχος ράβδου 3mm	Πάχος ράβδου 6mm	Πάχος ράβδου 12mm
1 ^ο bandgap	5 ^η - 6 ^η (970-1740 Hz)	3 ^η - 4 ^η (1020- 1240 Hz)	3 ^η - 4 ^η (1050-1530 Hz)
2 ^ο bandgap	-	5 ^η - 6 ^η (1340- 1680 Hz)	-

Εσωτερική έλλειψη 170X90 (mm)	Πάχος ράβδου 3mm	Πάχος ράβδου 6mm	Πάχος ράβδου 12mm
1 ^ο bandgap	5 ^η - 6 ^η [850-1570 Hz)	3 ^η - 4 ^η (840-1160 Hz)	3 ^η - 4 ^η (950-1530 Hz)
2 ^ο bandgap	-	5 ^η - 6 ^η (1220-1570 Hz)	-

Στους 4 πίνακες παρουσιάζονται συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα που αφορούν τα διαφορετικά εύρη συχνοτήτων, για τα οποία παρατηρούμε ότι υπάρχει μια συνέπεια ως προς την ύπαρξη κάποιου bandgap μεταξύ 5^{ης} και 6^{ης} ιδιοσυχνότητας.

Διερευνώντας στη συνέχεια τη συνδυαστική απόδοση των στοιχείων που εξετάσαμε μεμονωμένα, κατασκευάζοντας διάφορες παραλλαγές πλεγμάτων, παρατηρούμε ότι το εύρος των συχνοτήτων για τις οποίες διακόπτεται η διάδοση ενός κύματος, εντοπίζεται μεταξύ τιμών οι οποίες κυμαίνονται από 1150 – 2000Hz.

Κεφάλαιο 9 – Προκλήσεις και Προοπτικές

Παρατηρήθηκε μελετώντας τη βιβλιογραφία, ότι οι διερευνήσεις των αυξητικών δομών ως παράγωγο των αστεροειδών δομών, ήταν λιγότερες σε σχέση με άλλα είδη πιο διαδεδομένων γεωμετριών.

Συνεπώς, προτείνεται να γίνουν έλεγχοι βελτιστοποίησης με ακόμα μεγαλύτερη παραμετροποίηση στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, στην επιλογή των υλικών αλλά και στο εύρος του φάσματος συχνοτήτων, ώστε να προστεθούν νέα δεδομένα στη βιβλιογραφία, για καλύτερη κατανόηση και αξιοποίηση της δομής.

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν, παρατηρήσαμε ότι το κυκλικό έγκλεισμα που τοποθετήθηκε το κέντρο της δομής, δεν προσέφερε ουσιαστική μεταβολή στο μέγεθος του bandgap. Το σκεπτικό ωστόσο της ύπαρξης ενός εγκλείσματος αποσκοπεί σε περεταίρω διερεύνηση, κατά την οποία, θα μπορούσε να εξεταστεί η διαμόρφωση της μικροδομής που προκύπτει από την επαφή του εγκλείσματος αυτού με την περιβάλλουσα γεωμετρία. Γίνεται λόγος δηλαδή, για αλλαγή της μικροδομής μέσω προέντασης, τόσο σε εφελκυσμό, όπου για μεγάλες μετακινήσεις αλλάζει το σχήμα, όσο και σε θλίψη, όπου μέσω επαφών δημιουργούνται νέες μορφές. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται συνδυασμός μικροδομών οι οποίες ενδεχομένως να προσφέρουν πολλαπλές περιοχές bandgap, συνεπώς περισσότερες συχνότητες που μπορούν να αποκοπούν.

Σημαντικός παράγοντας, ο οποίος χαρακτηρίζεται υψηλής σημαντικότητας, είναι ο οικονομικός. Δεδομένου ότι τέτοιες δομές δεν είναι εφικτό να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας συμβατικές μεθόδους, θα πρέπει να γίνει εκτίμηση για το συνολικό κόστος παραγωγής, ώστε το τελικό προϊόν να μπορεί να αποτελεί μία βιώσιμη λύση.

Βιβλιογραφία

- [1] BRILLOUIN, Leon. *Wave propagation in periodic structures: electric filters and crystal lattices*. Dover publications, 1953.
- [2] WALLBANKS, Matthew, et al. On the design workflow of auxetic metamaterials for structural applications, 2021.
- [3] CARNEIRO, V.H., MEIRELES, J. & PUGA, H. Auxetic materials — A review. *Mater Sci-Pol* **31**, 561–571 (2013).
- [4] STAVROULAKIS, G. E. Auxetic behaviour: appearance and engineering applications. *physica status solidi (b)*, 2005, 242.3: 710-720.
- [5] YANG, Wei, et al. Review on auxetic materials. *Journal of materials science*, 2004, 39.10: 3269-3279.
- [6] CHEKKAL, I., REMILLAT, C. SCARPA, F. Acoustic properties of auxetic foams, 2012.
- [7] IMBALZANO, Gabriele, TRAN, Phuong, NGO, Tuan D., LEE, Peter V.S., A numerical study of auxetic composite panels under blast loadings, 2016, 339-352
- [8] IMBALZANO, Gabriele, TRAN, Phuong, NGO, Tuan D., LEE, Peter V.S., Three-dimensional modelling of auxetic sandwich panels for localised impact resistance, 2015
- [9] CHOI, J. B., LKES, R. S. S., "Design of a fastener based on negative Poisson's ratio foam", *Cellular Polymers*, 10, 205-212 (1991).
- [10] SANAMI, Mohammad, RAVIRALA, Naveen, ALDERSON, Kim, ALDERSON, Andrew, Auxetic Materials for Sports Applications, Vol.72, 2014, 453-458.
- [11] ALDERSON, A., ALDERSON, K., Expanding materials and applications: exploiting auxetic textiles. *Tech Text Int* 2005; 14: 29–34.
- [12] NEJC, Novak, MATEJ, Vesenjak, ZORAN, Ren, Auxetic Cellular Materials - A Review, *Journal of Mechanical Engineering*, 62(2016)9, 485-493.
- [13] XIAO, Si-Hang, ZHANG, Chong, QIN, Qing-Hua, WANG, Hui, A novel planar auxetic phononic crystal with periodic cookie-shaped cellular microstructures, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2021.
- [14] ZHENG, Li-Yang, *Granular monolayers: wave dynamics and topological properties*, 2017.
- [15] BLOCH, Felix; WALECKA, John Dirk. *Fundamentals of statistical mechanics: manuscript and notes of Felix Bloch*. World Scientific, 2000.
- [16] FARZBOD, Farhad; LEAMY, Michael J. Analysis of Bloch's method and the propagation technique in periodic structures. *Journal of vibration and acoustics*, 2011, 133.3.
- [17] GOMEZ GARCIA, Pablo; FERNÁNDEZ-ÁLVAREZ, José-Paulino. Floquet-Bloch theory and its application to the dispersion curves of nonperiodic layered systems. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015.
- [18] COLLET, Manuel, et al. Floquet–Bloch decomposition for the computation of dispersion of two-dimensional periodic, damped mechanical systems. *International Journal of Solids and*

Structures, 2011, 48.20: 2837-2848.

- [19] MAURIN, Florian, et al. Probability that a band-gap extremum is located on the irreducible Brillouin-zone contour for the 17 different plane crystallographic lattices. *International Journal of Solids and Structures*, 2018, 135: 26-36.
- [20] CHEN, Luyun; GUO, Yongjin; YI, Hong. Optimization study of bandgaps properties for two-dimensional chiral phononic crystals base on lightweight design. *Physics Letters A*, 2021, 388: 127054.
- [21] BLOCH, Felix. Über die Quantenmechanik der Elektronen in Kristallgittern. *Zeitschrift für Physik*, 1929, 52.7: 555-600.
- [22] FLOQUET, Gaston. Sur les équations différentielles linéaires à coefficients périodiques. In: *Annales scientifiques de l'École normale supérieure*. 1883. p. 47-88.
- [23] KOUTSIANITIS, Panagiotis I.; TAIRIDIS, Georgios K.; STAVROULAKIS, Georgios E. Shunted piezoelectric patches on auxetic microstructures for the enhancement of band gaps. *Archive of Applied Mechanics*, 2021, 91.2: 739-751.
- [24] KITTEL, Charles; WILEY, John. *Elementary solid state physics: a short course*. Wiley, 1962.
- [25] PHANI, A. Srikantha; WOODHOUSE, J.; FLECK, N. A. Wave propagation in two-dimensional periodic lattices. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2006, 119.4: 1995-2005.
- [26] KOUTSIANITIS, Panagiotis I., et al. Conventional and star-shaped auxetic materials for the creation of band gaps. *Archive of Applied Mechanics*, 2019, 89.12: 2545-2562.
- [27] BACIGALUPO, Andrea; DE BELLIS, Maria Laura. Auxetic anti-tetrachiral materials: equivalent elastic properties and frequency band-gaps. *Composite Structures*, 2015, 131: 530-544.
- [28] KOUTSIANITIS, Panagiotis I.; TAIRIDIS, Georgios K.; KOUKOULOS, Alexandros A.; STAVROULAKIS, Georgios E. *Effect of Chiral Materials on Presence of Band Gaps* 5th Serbian-Greek Symposium on Advanced Mechanics, 2021, 430-439
- [29] ZHANG, Xiangyu, REN, Xin, A Simple Methodology to Generate Metamaterials and Structures with Negative Poisson's Ratio, 2020
- [30] SRIKANTHA, Phani, WOODHOUSE, J., FLECK, N. A., Wave propagation in two-dimensional periodic lattices, *The Journal of the Acoustical Society of America* 119, 1995-2005, (2006).
- [31] MARIAM, Mir, MURTAZA, Najabat Ali, UMAR, Ansari, JAVARIA, Sami, *Review of Mechanics and Applications of Auxetic Structures*, 2014
- [32] ZHANG, ZiWen, TIAN, RuiLan, ZHANG, XiaoLong, WEI, FangYi, WEI, XinWei, A novel butterfly-shaped auxetic structure with negative Poisson's ratio and enhanced stiffness, 2021, 56:14139-14156
- [33] KRUSHYNSKA, A. O., AMENDOLA, A., BOSIA, F., DARAIO, C, PUGNO N. M., FRATERNALI, F., Accordion-like metamaterials with tunable ultra-wide low-frequency band gaps, 2018, 1367-2630
- [34] ZHANG, Xiang Yu, REN, Xin, ZHANG, Yi, XIE, Yi Min, A novel auxetic metamaterial with enhanced mechanical properties and tunable auxeticity, *Thin-Walled Structures*, Vol.174, 2022, 10916