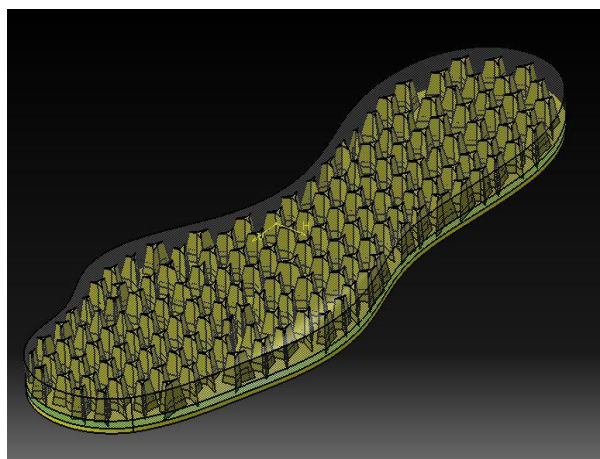




**Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης
Τομέας: Επιχειρησιακή Έρευνα**



Μεταπτυχιακή Διατριβή με θέμα:
Μελέτη αυξητικών στοιχείων σε πέλμα αθλητικού
παπουτσιού.

Όνομα: Μπούρα Παρασκευή
Α.Μ.: 2014019054

Επιβλέπων καθηγητής: Σταυρουλάκης Γεώργιος

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον κ. Σταυρουλάκη, τον επιβλέποντα καθηγητή μου, για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε για την εκπόνηση της μεταπτυχιακής μου διατριβής. Το υλικό που μου παρείχε και η μακροχρόνια εμπειρία του, μου έδωσε αρκετές γνώσεις για την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων αλλά και των αυξητικών υλικών.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τον άντρα μου, τους γονείς μου και τους φίλους μου, για την καθοδήγηση, την υποστήριξη και την ενθάρρυνση που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και κυρίως κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου διατριβής.

Πίνακας περιεχομένων

ΣΕΛ.

Περίληψη	7
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	8
Κεφάλαιο 2: Τα αυξητικά υλικά	10
2.1: Ο λόγος του Poisson	10
2.2: Υλικά με αρνητικό λόγο Poisson (Αυξητικά Υλικά)	11
2.3: Ισότροπα υλικά και αρνητικός λόγος Poisson	12
Κεφάλαιο 3: Ιδιότητες Αυξητικών υλικών	14
3.1: Αντίσταση στη διείσδυση (indentation behaviour)	14
3.2: Συμπεριφορά και αντοχή στη ρωγμή (crack resistance)	15
3.2.1: Συμπεριφορά στη ρωγμή	15
3.2.2: Αντοχή στη ρωγμή	16
3.3: Απόσβεση ταλαντώσεων και απορρόφηση ενέργειας	17
3.4: Μεταβλητή διαπερατότητα (variable permeability)	17
3.5: Συγκλαστική καμπυλότητα (synclastic curvature)	18
Κεφάλαιο 4: Δομή σόλας αθλητικού παπουτσιού	19
4.1: Εισαγωγή	19
4.2: Διάφορες δομές σόλας	19
Κεφάλαιο 5: Μοντελοποίηση κατασκευής	22
5.1: Σχεδίαση και διακριτοποίηση	22
5.2: Ανάλυση ιδιομορφών για τις 4 πρώτες ιδιοσυχνότητες	25
5.2.1: Ανάλυση ιδιομορφών απλής κατασκευής	25
5.2.2: Ανάλυση ιδιομορφών κατασκευής με αυξητική δομή και σύγκριση με την απλή	27
5.3: Ανάλυση ιδιομορφών και σύγκριση για ίδιες ιδιοσυχνότητες	29
5.4: Αποτελέσματα για τις 50 πρώτες ιδιοσυχνότητες	33
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα	37
Βιβλιογραφία	38

Ευρετήριο εικόνων

ΣΕΛ.

Εικόνα 2.1.1: Ο λόγος Poisson σε συμβατικά υλικά	10
Εικόνα 2.1.2: Συνηθισμένη διάταξη μικροδομής υλικού	11
Εικόνα 2.2.1: Υλικά με θετικό και αρνητικό λόγο Poisson	11
Εικόνα 2.2.2: Αυξητική συμπεριφορά	12
Εικόνα 2.3.1: αυξητική μικροδομή - σχήμα αστεριού	14
Εικόνα 3.1.1.1: Συμπεριφορά στην διείσδυση κατά την κρουστική αξονική θλίψη, ενός συμβατικού και ενός αυξητικού υλικού	15
Εικόνα 3.2.1.1: Επέκταση της ρωγμής σ' ένα στερεό κελί	16
Εικόνα 3.2.2.1: Μικρογραφίες των αυξητικών αφρών πολυουρεθάνης παρουσιάζοντας τις ελαστικές παραμορφώσεις υπό διαφορετικούς τύπους φορτίσεων	16
Εικόνα 3.5.1: Η καμπυλότητα σε συμβατικά υλικά (αντικλαστική) και η καμπυλότητα σε αυξητικά υλικά (συνκλαστική)	18
Εικόνα 5.1.1: Σόλα αθλητικού παπουτσιού με αυξητική δομή (τρία στρώματα)	22
Εικόνα 5.1.2.: Διακριτοποίηση σόλας με αυξητικές ιδιότητες	23
Εικόνα 5.1.3: Διακριτοποίηση σόλας χωρίς αυξητικές ιδιότητες	24
Εικόνα 5.2.1.1: 1η ιδιομορφή για την απλή σόλα	25
Εικόνα 5.2.1.2: 2η ιδιομορφή για την απλή σόλα	26
Εικόνα 2.2.1.3: 3η ιδιομορφή για την απλή σόλα	26
Εικόνα 5.2.1.4: 4η ιδιομορφή για την απλή σόλα	27
Εικόνα: 5.2.2.1: 1η ιδιομορφή με αυξητική σχεδίαση	27
Εικόνα: 5.2.2.2: 2η ιδιομορφή με αυξητική σχεδίαση	28
Εικόνα: 5.2.2.3: 3η ιδιομορφή με αυξητική σχεδίαση	28

Εικόνα: 5.2.2.4: 4η ιδιομορφή με αυξητική σχεδίαση	29
Εικόνα 5.3.1: Μετατοπίσεις σε απλή κατασκευή σόλας για ιδιοσυχνότητα <u>0.001143 Hz</u>	30
Εικόνα 5.3.2: Μετατοπίσεις σε κατασκευή σόλας με αυξητική δομή για ιδιοσυχνότητα <u>κοντά στα 0.001143 Hz</u>	30
Εικόνα 5.3.3: Μετατοπίσεις σε απλή κατασκευή σόλας για ιδιοσυχνότητα <u>κοντά στα 370 Hz</u>	31
Εικόνα 5.3.4: Μετατοπίσεις σε κατασκευή σόλας με αυξητική δομή για ιδιοσυχνότητα <u>κοντά στα 370 Hz</u>	31
Εικόνα 5.3.5: Μετατοπίσεις σε απλή κατασκευή σόλας για ιδιοσυχνότητα <u>κοντά στα 615 Hz</u>	32
Εικόνα 5.3.6: Μετατοπίσεις σε κατασκευή σόλας με αυξητική δομή για ιδιοσυχνότητα <u>κοντά στα 615 Hz</u>	32
Εικόνα 5.3.7: Μετατοπίσεις σε απλή κατασκευή σόλας για ιδιοσυχνότητα <u>κοντά στα 990 Hz</u>	33
Εικόνα 5.3.8: Μετατοπίσεις σε κατασκευή σόλας με αυξητική δομή για ιδιοσυχνότητα <u>κοντά στα 990 Hz</u>	33

Ευρετήριο σχεδιαγραμμάτων/γραφημάτων και πινάκων

Σχεδιάγραμμα 3.3.1: Συντελεστής απόσβεσης - συχνότητα ηχητικού κύματος	17
Πίνακας 5.1.1: Ιδιότητες σόλας	23
Πίνακας 5.4.1: Αποτελέσματα των δύο κατασκευών (απλής σόλας και με αυξητική δομή) για τις 50 πρώτες ιδιοσυχνότητες.	34
Γράφημα 5.4.1: Μετατοπίσεις σε παπούτσι με αυξητικό υλικό στη σόλα, ανάλογα την ιδιοσυχνότητα που εφαρμόζεται	35
Γράφημα 5.4.2: Μετατοπίσεις σε παπούτσι χωρίς αυξητικό υλικό στη σόλα, ανάλογα την ιδιοσυχνότητα που εφαρμόζεται	35

Περίληψη

Στον τομέα της σχεδίασης ενός παπουτσιού, ένα από τα βασικότερα πράγματα που θα πρέπει να εξεταστούν είναι το υλικό το οποίο θα χρησιμοποιηθεί. Η σημαντικότητα της επιλογής του υλικού έγκειται στο γεγονός ότι το υλικό θα καθορίσει το σχήμα του παπουτσιού, το μέγεθος του καθώς και τις μηχανικές ιδιότητες οι οποίες έχουν πολύ σημαντικό ρόλο ώστε το παπούτσι να προσφέρει άνεση, αλλά να διασφαλίζει και την σωστή εργονομική συμπεριφορά του ποδιού. Για το λόγο αυτό, η βιομηχανία παπουτσιών προσανατολίζεται σε σόλες με αυξητικές ιδιότητες (αρνητικό λόγο poison).

Η βασική ιδιότητα των υλικών αυτών είναι να διογκώνονται όταν υπόκεινται σε εφελκυστικές τάσεις. Επιπλέον, μπορεί να επιτευχθεί αυξημένη δυσκαμψία, αυξημένη αντοχή σε θραύση και ελαστικότητα. Στόχος της παρούσας διατριβής είναι αρχικά η σχεδίαση μίας σόλας παπουτσιού της οποίας η μορφή θα δίνει αυξητικές ιδιότητες στο υλικό και στη συνέχεια μία μελέτη στο πεδίο των συχνοτήτων ώστε να παρατηρήσουμε σε ποιες συχνότητες θα συντονίσει η κατασκευή, και που διαφοροποιείται σε σχέση με μία απλή σόλα. Η μελέτη έγινε με το μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και μελετήθηκε με το λογισμικό COMSOL 4.4.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Τα αυξητικά υλικά μελετώνται εδώ και αρκετά χρόνια λόγω των ιδιοτήτων τους που τα καθιστούν κατάλληλα για μια σειρά καινοτόμων εφαρμογών, όπως οι ηλεκτρονικές μικροεπαφές, τα ιατρικά όργανα, οι ενεργές αντιβαλλιστικές θωρακίσεις, τα αυξητικά νήματα και τα βλήματα. Οι έρευνες πραγματοποιούνται τόσο στα εργαστήρια της NASA όσο και σε ορισμένα πανεπιστημιακά ιδρύματα (π.χ. University of Iowa, University of Wisconsin- Madison, Technical University of Denmark, Harvard University κ.α.) αλλά και σε τμήματα ερευνών μεγάλων εταιρειών [1]. Πρόκειται για υλικά τα οποία παρουσιάζουν αντοχή στη θραύση, δεν παραμορφώνονται εύκολα και απορροφούν τους κραδασμούς.

Σημαντικό χαρακτηριστικό των αυξητικών υλικών είναι ο αρνητικός λόγος Poisson, ο οποίος προκύπτει από την μικροδομή των υλικών. Μετά από έρευνες έχουν προταθεί αυξητικές μικροδομές όπως είναι οι γωνίες επανεισόδου, οι μη κυρτές μικροδομές κ.α. Επίσης, μέσω τεχνικών τοπικής βελτιστοποίησης αλλά και ευέλικτων μηχανισμών, έχει προταθεί η αυτόματη σχεδίαση των αυξητικών μικροδομών που δεν ανήκουν στις συνηθισμένες. Παρόλα αυτά, λόγω του μειονεκτήματος της τοπικής βελτιστοποίησης να επιτευχθούν όλοι οι στόχοι σχεδιασμού, όπως η δυναμική συμπεριφορά και τα όρια αντοχής, το αποτέλεσμα θα εξακολουθεί να απαιτεί τροποποίηση. Στο σημείο αυτό μπορεί να γίνει χρήση κλασσικών τεχνικών βελτιστοποίησης σχεδιασμού.

Για την περιγραφή των μικροδομών, στο πλαίσιο απλών μικροσκοπικών σχεδίων και καταστατικών νόμων, έχουν προταθεί αρκετές μαθηματικές μέθοδοι οι οποίες μπορεί να είναι πιο ακριβείς από τις αριθμητικές. Από την άλλη πλευρά όμως, οι αριθμητικές μέθοδοι είναι κατάλληλες για την προσομοίωση σύνθετων μικροσκοπικών γεωμετριών, μέχρι εκεί που κάποιος μπορεί να επιλύσει μια στατιστικά καθορισμένη αντιπροσωπευτική ποσότητα υλικού, τον επονομαζόμενο Αντιπροσωπευτικό Όγκο Αναφοράς (RVE).

Σύμφωνα με την αριθμητική ομογενοποίηση, ένα μοτίβο από την μικροδομή του υλικού, απομονώνεται, λύνεται ανεξάρτητα και στη συνέχεια τα αποτελέσματα που προκύπτουν χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των παραμέτρων που διέπουν μακροσκοπικά το υλικό αυτό. Από μια άλλη διαφορετική γωνία, η αριθμητική ομογενοποίηση ενσωματώνει την ταυτόχρονη μακροσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση μιας δομής. Με αυτήν την μέθοδο, προσδιορίζεται η μακροσκοπική απόκριση, κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, μετά από επίλυση του μικροσκοπικού προβλήματος και μεταφέροντας μόνο τις αναγκαίες πληροφορίες στην μακροσκοπική κλίμακα. [2]

Τα αυξητικά υλικά είναι γνωστά εδώ και αρκετά χρόνια, όμως δεν δόθηκε από την αρχή αρκετή προσοχή σε αυτά αλλά και σε εφαρμογές που θα μπορούσαν να έχουν. Αυτός ο τύπος των υλικών μπορεί να βρεθεί στην φύση σε μερικά είδη πετρωμάτων και ορυκτά καθώς και σε ζώα (δέρμα που καλύπτει την θηλή των αγελάδων). Μέχρι σήμερα, μεγάλη ποικιλία αυξητικών υλικών έχει κατασκευαστεί, όπως είναι οι πολυμερείς και οι μεταλλικοί αφροί, τα μικροπορώδη πολυμερή, τα ελάσματα ανθρακονημάτων και οι δομές κυψελών. Ένα παράδειγμα είναι το γνωστό τεφλόν (συνθετικό πολυμερές- πολυτετραφθοροαιθυλενίου PTFE).

Στην συγκεκριμένη διατριβή, όπως αναφέραμε και στην περίληψη, στόχος της εργασίας ήταν να σχεδιάσουμε αρχικά την σόλα ενός αθλητικού παπουτσιού με αυξητική δομή και στη συνέχεια να την μελετήσουμε στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων COMSOL, στο πεδίο των συχνοτήτων, συγκρίνοντας την με την ίδια σόλα αλλά χωρίς αυξητικό υλικό και να εξάγουμε τα ανάλογα συμπεράσματα.

Στα αρχικά κεφάλαια, και συγκεκριμένα στο δεύτερο και στο τρίτο γίνεται μια θεωρητική προσέγγιση για τα αυξητικά υλικά και τις ιδιότητές τους. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η δομή της σόλας του αθλητικού παπουτσιού, βλέποντας έτσι και που στηρίχτηκε η σχεδίαση, καθώς επίσης και άλλες δομές που μπορεί να έχει η σόλα. Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που εξάγαμε από το πρόγραμμα που έγινε η ανάλυση (πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων COMSOL), χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ιδιοσυχνοτήτων και τέλος στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξάγαμε από την ανάλυση και τη σύγκριση των δύο κατασκευών (απλή σόλα και σόλα με αυξητική δομή).

Κεφάλαιο 2: Τα αυξητικά υλικά

2.1: Ο λόγος του Poisson

Ο λόγος του Poisson εκφράζει την αναλογία της εγκάρσιας συστολής σε σχέση με την διαμήκη διαστολή στην κατεύθυνση της εφελκυστικής δύναμης. Η εφελκυστική παραμόρφωση θεωρείται με θετικό πρόσημο και η θλιπτική με αρνητικό. Ο ορισμός του λόγου Poisson έγινε με αρνητικό πρόσημο έτσι ώστε η πληθώρα των υλικών (σχεδόν όλα που συναντιούνται στη φύση) να έχουν θετικό πρόσημο ($0 < \nu < 0.5$)

Ο λόγος του Poisson ορίζεται ως:

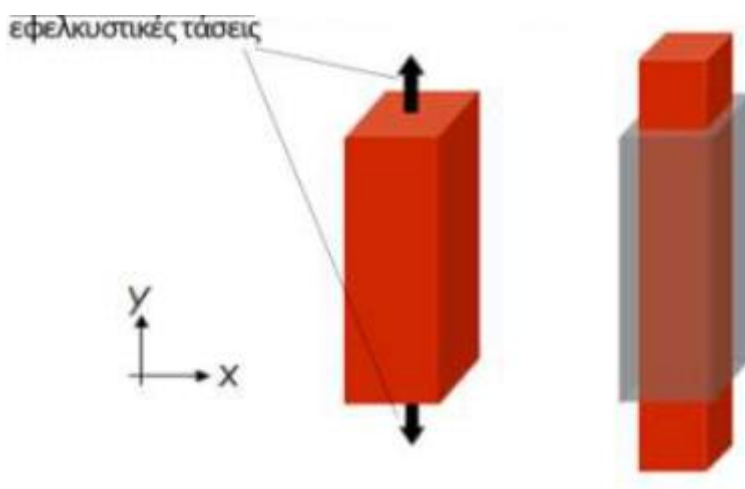
$$\nu = -\varepsilon_{\text{εγκάρσια}} / \varepsilon_{\text{διαμήκη}}$$

όπου " ε " είναι η παραμόρφωση, οποία ορίζεται ως:

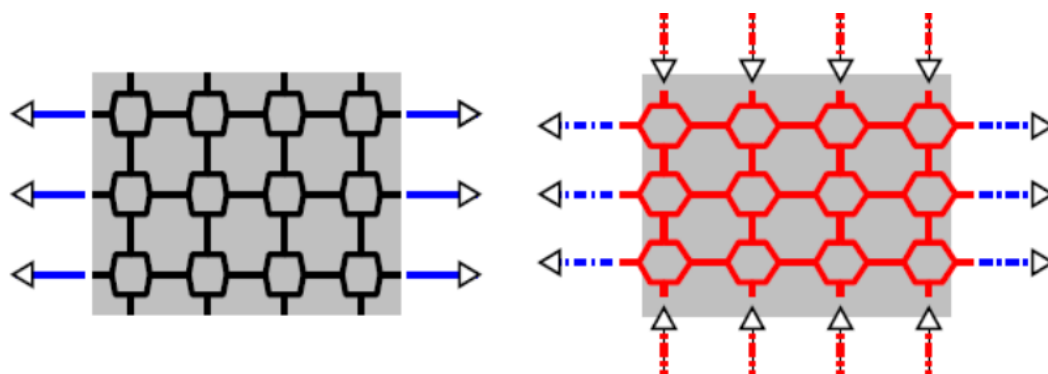
$$\varepsilon = \Delta L / L$$

όπου ΔL η μεταβολή στο μήκος και L το μήκος.

Ο λόγος που η πληθώρα των υλικών έχουν θετικό λόγο Poisson, δηλαδή λεπταίνουν στην διατομή τους καθώς εφελκύνονται, είναι ότι είναι ευκολότερο να αλλάξουν σχήμα απ' ότι να αλλάξουν όγκο.



Εικόνα 2.1.1: Ο λόγος Poisson σε συμβατικά υλικά [3]

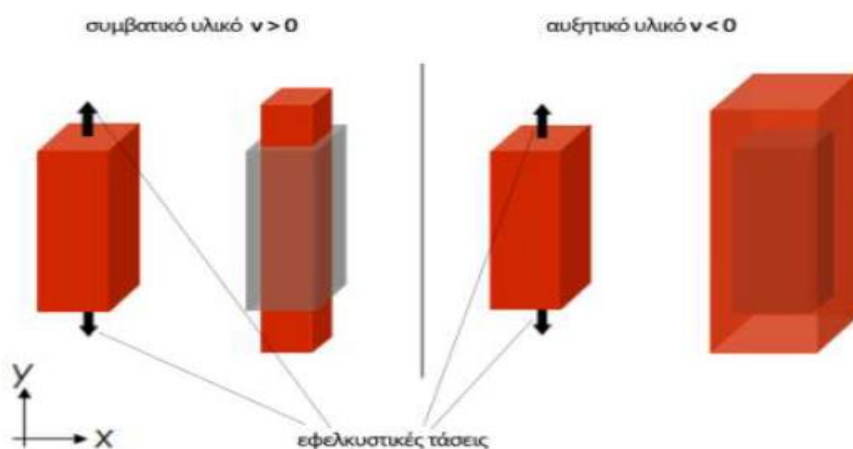


Εικόνα 2.1.2: Συνηθισμένη διάταξη μικροδομής υλικού. Όταν εφελκυστικές δυνάμεις εφαρμόζονται (μπλε βέλη), η δομή συρρικνώνεται κάθετα στην διεύθυνσή τους (κόκκινα βέλη) [2]

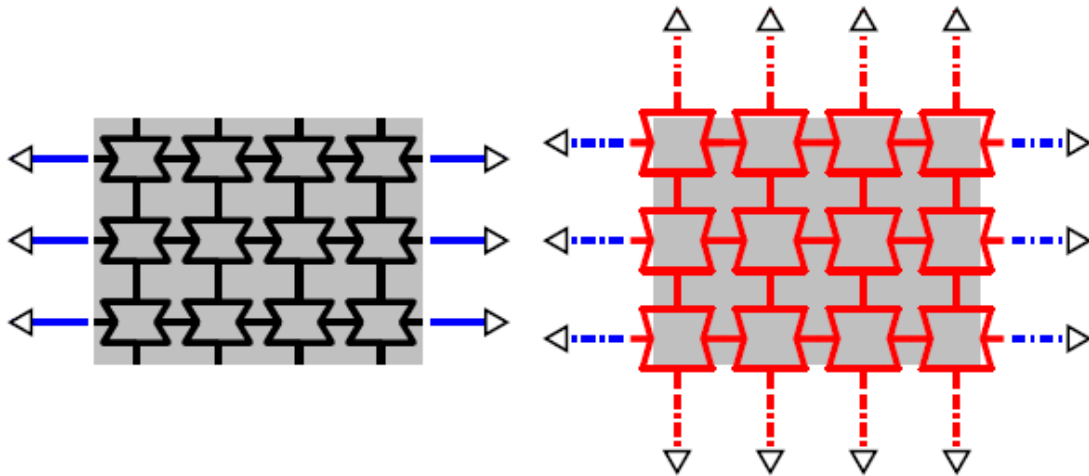
2.2: Υλικά με αρνητικό λόγο Poisson (Αυξητικά Υλικά)

Τα υλικά τα οποία όταν υπόκεινται σε εφελκυσμό αντί να συρρικνώνονται, επιμηκύνονται κάθετα στην κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου φορτίου, έχουν αρνητικό λόγο Poisson και ονομάζονται αυξητικά υλικά. Αυτό οφείλεται στους τεχνητούς συνδέσμους που εμφανίζονται στο εσωτερικό της μικροδομής και βοηθάνε στο λύγισμα [2]. Επιπλέον, ο λόγος του Poisson είναι ανεξάρτητος από την κλίμακα, δηλαδή, οι αυξητικές ιδιότητες μπορούν να οφείλονται είτε στις μικροσκοπικές δομές του υλικού είτε στις μακροσκοπικές.

Υλικά, με αρνητικό λόγο του Poisson, δεν έχουν βρεθεί (ακόμα) στην φύση, πρόσφατα όμως στο εργαστήριο, έχουν παραχθεί τέτοια υλικά



Εικόνα 2.2.1: Αριστερά: Υλικά με θετικό λόγο Poisson
Δεξιά: Υλικά με αρνητικό λόγο Poisson [3]



Εικόνα 2.2.2: Αυξητική συμπεριφορά: Όταν εφελκυστικές δυνάμεις εφαρμόζονται (μπλε βέλη), η δομή επιμηκώνεται κάθετα στην διεύθυνσή τους (κόκκινα βέλη) [2].

2.3: Ισότροπα υλικά και αρνητικός λόγος Poisson

Τα ισότροπα υλικά, είναι υλικά των οποίων οι μηχανικές τους ιδιότητες δεν εξαρτώνται από την κατεύθυνση που ασκούνται οι εξωτερικές δυνάμεις. Για να περιγράψουμε την γραμμική (ελαστική) συμπεριφορά ενός τέτοιου υλικού χρησιμοποιούμε τα τρία μέτρα ελαστικότητας. Τα μέτρα ελαστικότητας είναι ιδιότητες του κάθε υλικού και περιγράφουν τις σχέσεις τάσεις - παραμόρφωσης του υλικού. Αυτά τα μέτρα είναι τα ακόλουθα:

1. Το μέτρο ελαστικότητας (E): $E = \frac{9KG}{(3K+G)}$

Περιγράφει το πόσο εύκολα παραμορφώνεται ένα υλικό σ' έναν άξονα υπό την επίδραση εφελκυστικών ή διατμητικών τάσεων. Σε διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης, είναι ίσο με την κλίση της ευθείας που αναλογεί στην ελαστική συμπεριφορά.

2. Το μέτρο διάτμησης (G): $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$

Περιγράφει την ευκολία με την οποία ένα υλικό παραμορφώνεται διατμητικά ή στρεπτικά. Δηλαδή, την ευκολία με την οποία ένα υλικό αλλάζει σχήμα διατηρώντας σταθερό τον όγκο του.

3. Το μέτρο διόγκωσης (K): $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$

Περιγράφει την ευκολία με την οποία ένα υλικό αλλάζει όγκο (διαστέλλεται ή συστέλλεται ομοιογενώς) κάτω από την επίδραση αξονικών ή υδροστατικών τάσεων (θλιπτικών ή εφελκυστικών).

Επίσης ο λόγος Poisson είναι: $\nu = (3K - 2G) / (6K + 2G)$

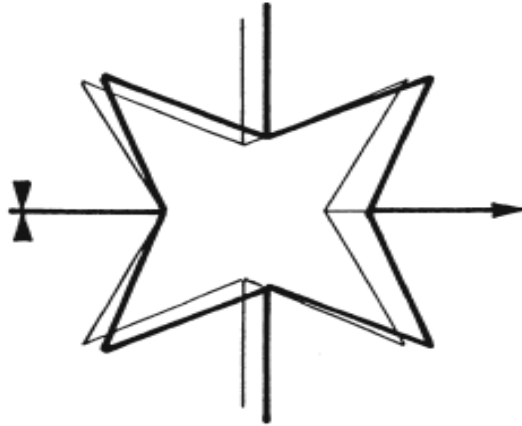
Σύμφωνα με τη θεωρία της ελαστικότητας, στα ισότροπα υλικά, ο λόγος Poisson παίρνει τιμές $[-1, 0.5]$. Αυτό συμβαίνει γιατί το μέτρο διάτμησης G και το μέτρο διόγκωσης K πρέπει να έχουν θετικές τιμές. Η τιμή της ακαμψίας C σε όλες τις κατευθύνσεις του υλικού πρέπει να είναι θετική, αν το υλικό είναι στερεό.

Όταν η τιμή του λόγου Poisson πλησιάζει στο μηδέν, τότε οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας E και του μέτρου διάτμησης G αρχίζουν να πλησιάζουν η μία την άλλη μέχρι να εξισωθούν. Μόλις συμβεί αυτό, ο λόγος Poisson παίρνει τιμή -0.5 και το υλικό γίνεται μαλακό σε εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις και σκληρό σε διατμητικές ή στρεπτικές τάσεις. Αυτό συμβαίνει διότι για $\nu = -0.5$, το μέτρο διάτμησης G είναι έξι φορές μεγαλύτερο από τον συντελεστή μεταβολής όγκου.

Όταν η τιμή του λόγου Poisson πλησιάζει το -1 , το μέτρο διάτμησης G ξεπερνά το μέτρο ελαστικότητας E και η τιμή του μέτρου διόγκωσης K γίνεται $K = E/9$. Το υλικό γίνεται έντονα αυξητικό και συγκεκριμένα όσο παραμορφώνεται το υλικό σε διαμήκη διεύθυνση, άλλο τόσο παραμορφώνεται στην εγκάρσια διεύθυνση. Το μέτρο διάτμησης G αυξάνεται έντονα και συνθέτει ένα υλικό που δεν παραμορφώνεται σε διατμητικές ή στρεπτικές δυνάμεις αλλά παραμορφώνεται εύκολα σε εφελκυστικές.

Το μέτρο ελαστικότητας E αφορά την παραμόρφωση δισδιάστατων υλικών, ενώ το μέτρο διάτμησης G και το μέτρο διόγκωσης K αφορούν την παραμόρφωση τρισδιάστατων υλικών. Με βάση λοιπόν τα ανωτέρω, ο λόγος Poisson σε 3D δομές κυμαίνεται από -1 έως 0.5 , ενώ σε 2D δομές κυμαίνεται από -1 έως 1 . [4]

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αυξητικής μικροδομής είναι το σχήμα αστεριού που παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 2.3.1: Οι λεπτές γραμμές στο παραπάνω σχήμα αντιπροσωπεύουν την μη παραμορφωμένη μορφή. [2]

Κεφάλαιο 3: Ιδιότητες αυξητικών υλικών

Τα αυξητικά υλικά παρουσιάζουν τις παρακάτω ιδιότητες:

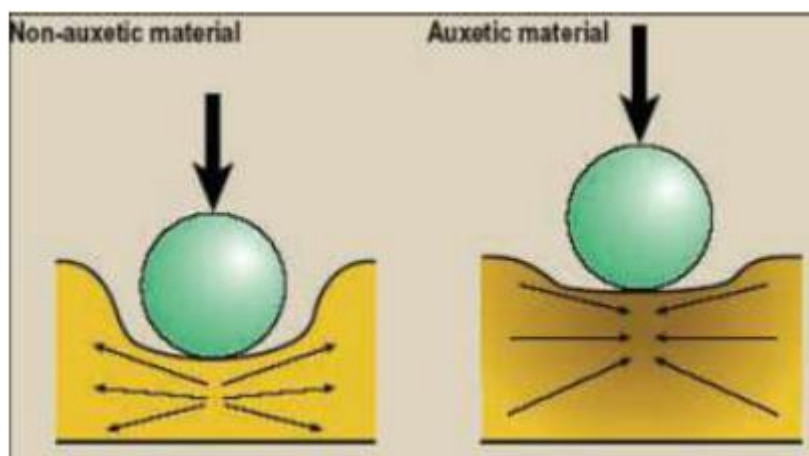
1. Αντίσταση στη διείσδυση (indentation behaviour)
2. Αντοχή στη ρωγμή (fracture behaviour)
3. Απόσβεση ταλαντώσεων και απορρόφηση ενέργειας
4. Μεταβλητή διαπερατότητα (variable permeability)
5. Συγκλαστική καμπυλότητα (synclastic curvature)

3.1. Αντίσταση στη διείσδυση (indentation behaviour)

Τα αυξητικά υλικά είναι πιο σκληρά σε σχέση με τα συμβατικά υλικά. Παρουσιάζουν, δηλαδή, μεγαλύτερη αντίσταση στην διείσδυση. Αυτό οφείλεται στην πυκνότητα του υλικού που προσδίδει ο λόγος Poisson.

Πιο συγκεκριμένα, σ' ένα συμβατικό υλικό ($0 < \nu < 0.5$), όταν υπόκειται σε κρουστική φόρτιση, οι θλιπτικές τάσεις που δημιουργούνται στο σημείο επαφής, παραμορφώνουν το υλικό καθώς το σπρώχνουν προς όλες τις κατευθύνσεις εκτός αυτής του σημείου κρούσης. Αντίθετα, σ' ένα αυξητικό υλικό (αρνητικός λόγος Poisson), η τοπική κρούση προκαλεί και τοπική αύξηση της πυκνότητας. Αυτό συμβαίνει διότι όταν

το υλικό δέχεται αξονικές θλιπτικές τάσεις, τότε υπάρχουν εισροές υλικού από τις πλάγιες περιοχές του, στο σημείο εφαρμογής των τάσεων αυτών.



Εικόνα 3.1.1.1: Συμπεριφορά στην διείσδυση κατά την κρουστική αξονική θλίψη, ενός συμβατικού (αριστερά) και ενός αυξητικού (δεξιά) υλικού. [5]

3.2. Συμπεριφορά και αντοχή στη ρωγμή (crack resistance)

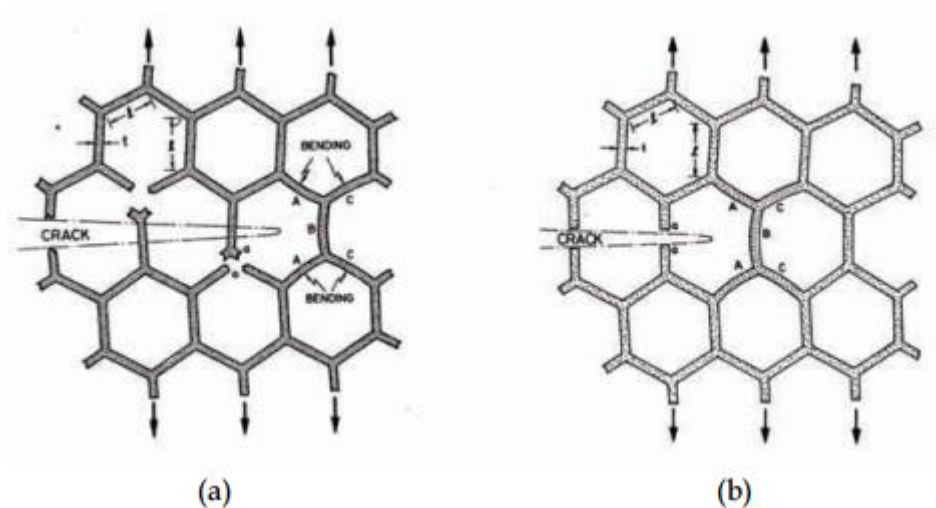
3.2.1: Συμπεριφορά στη ρωγμή

Στη δημιουργία ρωγμής, τόσο στα συμβατικά υλικά όσο και στους αυξητικούς αφρούς, η αστοχία συμβαίνει ξαφνικά, χωρίς δηλαδή τη δημιουργία "λαιμού".

Από την πλευρά της διάστασης των κελιών, μια ρωγμή εκτείνεται σταδιακά. Σε κάθε βήμα η ρωγμή αυξάνεται κατά πλάτος του κάθε κελιού. Όταν η τάση στην άκρη της ρωγμής είναι αρκετά υψηλή, στην ακμή ή στο τοίχωμα του κελιού, τότε το ράγισμα επεκτείνεται.

Παρόλα αυτά, η διάδοση της ρωγμής μπορεί να συμβεί με δύο τρόπους:

- α. Μέσω της αποτυχίας κάμψης του μη κάθετου τοιχώματος του κελιού ή της άκρης του.
- β. Από τη ρωγμή των κάθετων στοιχείων, υπό τον συνδυασμό του εφελκυσμού και της ροπής κάμψης. [5]

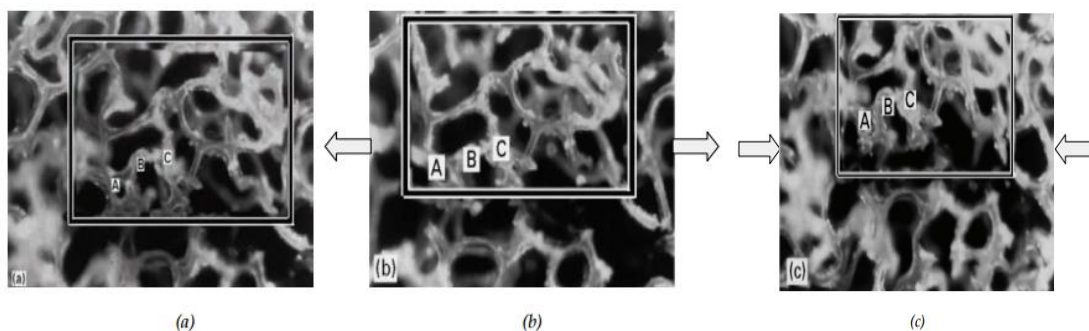


Εικόνα 3.2.1.1: Επέκταση της ρωγμής σ' ένα στερεό κελί.

- α) Μέσω της αποτυχίας κάμψης του μη κάθετου τοιχώματος του κελιού ή της άκρης του.
 β) Μέσω της ρωγμής των κάθετων στοιχείων, υπό τον συνδυασμό του εφελκυσμού και της ροπής κάμψης [5]

3.2.2: Αντοχή στη ρωγμή

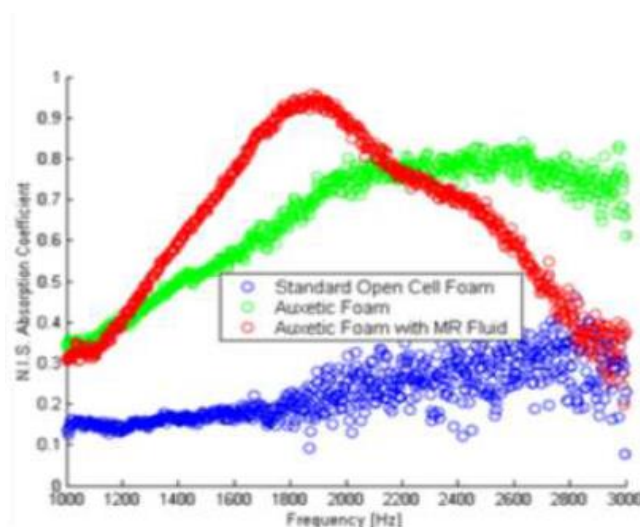
Τα αυξητικά υλικά, σε σχέση με τα μη αυξητικά, έχουν κάποιες επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες. Για παράδειγμα, εάν το υλικό έχει μια ρωγμή και έλκεται για να διαχωριστεί, αυτό διαστέλλεται και έτσι η ρωγμή κλείνει. Αυτός ο τύπος υλικού, λοιπόν, παρουσιάζει μεγαλύτερη αντίσταση στη δημιουργία ρωγμών και αντοχή στην διατμητική παραμόρφωση. [5]



Εικόνα 3.2.2.1: Μικρογραφίες των αυξητικών αφρών πολυουρεθάνης παρουσιάζοντας τις ελαστικές παραμορφώσεις υπό διαφορετικούς τύπους φορτίσεων.
 (α) Ελεύθερο (β) Υπό εφελκυσμό (γ) Υπό συμπίεση [5]

3.3. Απόσβεση ταλαντώσεων και απορρόφηση ενέργειας

Ο λόγος Poisson ενός υλικού επηρεάζει την μεταδοτικότητα και την ανακλαστικότητα των κυμάτων τάσης μέσα στο υλικό. Σύμφωνα με μελέτες, έχει αποδειχθεί ότι οι αυξητικοί αφροί έχουν μεγαλύτερη απορροφητικότητα ηχητικών κυμάτων σε σχέση με τους συμβατικούς σε όλες τις συχνότητες. Επίσης, το μέγεθος των πόρων επηρεάζει το εύρος των συχνοτήτων που απορροφούνται από τον εκάστοτε αφρό. Οι αυξητικοί αφροί με μικρούς πόρους ήταν αποτελεσματικότεροι στην απορρόφηση ηχητικών κυμάτων 630Hz και άνω, σε σχέση με τους αφρούς με μεγαλύτερους πόρους. [6,7,8]



Σχεδιάγραμμα 3.3.1: Συντελεστής απόσβεσης - συχνότητα ηχητικού κύματος [8]

Ακόμη, στους αυξητικούς αφρούς, τα αποτελέσματα των δοκιμών από δυναμική σύνθλιψη είναι καλύτερα σε σχέση με αυτά των συμβατικών. Σύμφωνα με μελέτη, όπου εξετάστηκε η αντοχή σε σύγκρουση αφρού πολυουρεθάνης ανοιχτών κελιών και του αντίστοιχου αυξητικού του, η αξιοπιστία του αυξητικού αφρού στην αντοχή στην σύγκρουση είναι πολύ ανώτερη σε σχέση με αυτή του συμβατικού. [9]

3.4. Μεταβλητή διαπερατότητα (variable permeability)

Τα αυξητικά υλικά αυξάνουν το μέγεθος των πόρων τους όταν τεντώνονται και έτσι είναι χρήσιμα σε εφαρμογές που περιέχουν κάποιο είδους φίλτρο. Το μέγεθος των πόρων του υλικού διαμορφώνεται

ανάλογα με την παραμόρφωση που υφίσταται και οι ουσίες που απελευθερώνονται από κάποιο αυξητικό αποθηκευτικό υλικό, γίνεται αυτόματα. [10]

3.5. Συγκλαστική καμπυλότητα (synclastic curvature)

Όταν ένα συμβατικό επιφανειακό υλικό λυγιστεί εκτός επιπέδου, τότε η εξωτερική του επιφάνεια ως προς την καμπύλη τεντώνεται με αποτέλεσμα να προκαλεί συρρίκνωση στην κάθετη επιφάνεια. Αυτή η συμπεριφορά ονομάζεται αντικλαστική ιδιότητα και εμφανίζεται σε υλικά με θετικό λόγο Poisson.

Αντίθετα σε υλικά με αρνητικό λόγο Poisson (αυξητικά), παρατηρείται το φαινόμενο της συγκλαστικής καμπυλότητας, δηλαδή η επιφανειακή αυξητική δομή τείνει να καμπυλώσει με τον ίδιο τρόπο σε όλες τις ευθείες που περνάνε από την κορυφή της καμπύλης. Να σχηματίσουν, δηλαδή, ένα τρούλο. Αυτό το είδος της καμπυλότητας, είναι εξαιρετικά χρήσιμο σε κατασκευές που απαιτούν εξαρτήματα με το συγκεκριμένο σχήμα, όπως συμβαίνει στην αυτοκίνηση και στα αεροσκάφη. Η συγκλαστική καμπυλότητα, μπορεί να επιτευχθεί και σε μη-αυξητικά υλικά. Σε αυτήν την περίπτωση όμως, υπάρχει ο κίνδυνος ζημιάς ή πρόχειρης κατασκευής και το κόστος είναι πολύ μεγάλο. Το πλεονέκτημα των αυξητικών υλικών, έγκειται στο γεγονός ότι μπορούν να διαμορφώσουν αυτό το σχήμα με ευκολία και αμεσότητα. [10]



Εικόνα 3.5.1: Η καμπυλότητα σε συμβατικά υλικά (αντικλαστική) και η καμπυλότητα σε αυξητικά υλικά (συνκλαστική) [10]

Κεφάλαιο 4: Δομή σόλας αθλητικού παπουτσιού

4.1. Εισαγωγή

Τα περισσότερα παπούτσια, αλλά κυρίως τα αθλητικά, αποτελούνται από δύο κύρια μέρη. Το άνω μέρος που αποτελεί το περίβλημα για την υποδοχή του ποδιού και μια σόλα, η οποία στερεώνεται στο άνω μέρος, και είναι αυτή η οποία έρχεται σε κύρια επαφή με το έδαφος. Επίσης, στα παπούτσια μπορεί να χρησιμοποιηθεί και κάποιο είδος στερέωσης, όπως τα κορδόνια, προκειμένου να εξασφαλιστεί η καλύτερη στερέωση του ποδιού.

Η σόλα μπορεί να περιλαμβάνει τρία στρώματα. Ένα εσωτερικό, ένα ενδιάμεσο και ένα εξωτερικό. Η εξωτερική σόλα είναι αυτή η οποία έρχεται σε κύρια επαφή με το έδαφος. Γενικά φέρει κάποιου είδους μοτίβα ή/και προεξοχές, οι οποίες παρέχουν στο χρήστη την κατάλληλη πρόσφυση για το συγκεκριμένο αθλητικό παπούτσι, είτε σε κάποιο χώρο εργασίας ή ψυχαγωγικής δραστηριότητας, είτε σε μια συγκεκριμένη επιφάνεια του εδάφους. [11]

4.2. Αυξητική δομή και σόλα αθλητικού παπουτσιού

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, η σόλα του παπουτσιού μπορεί να περιλαμβάνει μια εσωτερική σόλα, μια ενδιάμεση και μια εξωτερική. Τουλάχιστον ένα στρώμα της σόλας είναι κατασκευασμένο από αυξητική δομή. Αυτό το στρώμα μπορεί να αναφέρεται ως "αυξητικό στρώμα." Όταν το άτομο που φοράει το παπούτσι παίρνει μέρος σε μια δραστηριότητα, όπως το τρέξιμο, η οποία δημιουργεί μια αυξημένη διαμήκη ή εγκάρσια τάση στο αυξητικό στρώμα, τότε το αυξητικό στρώμα αυξάνει το μήκος του και το πλάτος του και έτσι παρέχει βελτιωμένη πρόσφυση, καθώς απορροφά μέρος της επίδρασης που έχει με την επιφάνεια του εδάφους. [11]

4.3. Διάφορες δομές σόλας

Μία δομή σόλας, την οποία μπορούμε να συναντήσουμε, είναι η εξωτερική σόλα να έχει μια κατεύθυνση η οποία να είναι εφαπτομενική σε μια εξωτερική επιφάνεια της εξωτερικής σόλας και μια άλλη κατεύθυνση, η οποία να είναι κάθετη στην πρώτη και η οποία επίσης να εφάπτεται με την εξωτερική επιφάνεια της εξωτερικής σόλας. Έτσι,

καθώς εφαρμόζεται τάση προς την πρώτη κατεύθυνση, η εξωτερική σόλα επεκτείνεται και προς τις δύο κατευθύνσεις.

Μία άλλη δομή σόλας είναι η εξωτερική σόλα να αποτελείται από εξάγωνα μοτίβα τα οποία ορίζουν ένα επίπεδο. Τα μοτίβα αυτά αποτελούνται από πολυγωνικά ανοίγματα τα οποία περιβάλλονται από τριγωνικά τμήματα που ενώνονται μεταξύ τους με αρθρώσεις και οι οποίες λειτουργούν ως μεντεσέδες, επιτρέποντας έτσι στα τριγωνικά τμήματα να περιστρέφονται μεταξύ τους. Όταν η εξωτερική σόλα είναι υπό τάση προς μία κατεύθυνση, τότε η σόλα διαστέλλεται και προς αυτήν την κατεύθυνση αλλά και προς μια δεύτερη που είναι κάθετη στην πρώτη και είναι στο ίδιο επίπεδο με την σόλα του παπουτσιού.

Ακόμη, μπορεί ένα είδος υποδήματος να περιλαμβάνει μία εξωτερική σόλα η οποία περιλαμβάνει ένα μοτίβο πολυγωνικών ανοιγμάτων που είναι σχηματισμένα από τριγωνικά τμήματα και τα οποία περιβάλλουν τα πολυγωνικά ανοίγματα. Τα πολυγωνικά ανοίγματα έχουν ένα κέντρο. Τα τριγωνικά τμήματα ενώνονται στις κορυφές τους, έτσι ώστε να λειτουργούν ως μεντεσέδες επιτρέποντας έτσι τα τρίγωνα να περιστρέφονται μεταξύ τους. Η εξωτερική σόλα χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι έχει μια πλευρική κατεύθυνση, μια διαμήκη και μια κάθετη. Όταν ένα τμήμα της εξωτερικής σόλας είναι υπό πλευρική τάση, τότε αυτό διαστέλλεται τόσο στην πλευρική κατεύθυνση όσο και στην διαμήκη κατεύθυνση. Επίσης, όταν ένα τμήμα της εξωτερικής σόλας είναι υπό διαμήκη τάση, τότε επεκτείνεται τόσο στην διαμήκη κατεύθυνση όσο και στην πλευρική κατεύθυνση. Τέλος, όταν ένα τμήμα της εξωτερικής σόλας είναι υπό κάθετη τάση, τότε τα τριγωνικά τμήματα μετακινούνται αναγκαστικά προς το κέντρο των πολυγωνικών ανοιγμάτων.

Μια άλλη δομή είναι η εξής: Η αυξητική δομή να περιλαμβάνει ένα μοτίβο πολυγωνικό ανοιγμάτων που χαρακτηρίζεται από το γεγονός να έχει τουλάχιστον τρεις πλευρές επανεισόδου και ένα κέντρο. Η αυξητική δομή έχει μια διαμήκη κατεύθυνση και μια πλευρική, καθώς επίσης και πάχος. Η αυξητική δομή, υπό διαμήκη τάση, επεκτείνεται τόσο στην διαμήκη διεύθυνση όσο και την πλευρική. Όσον αφορά την αυξητική δομή υπό πλευρική τάση, τότε αυτή επεκτείνεται τόσο στην πλευρική κατεύθυνση όσο και στη διαμήκη. Τέλος, υπό κάθετη συμπίεση τα πολυγωνικά ανοίγματα "καταρρέουν" προς τα κέντρα τους.

Επιπλέον, μπορεί ένα στρώμα του υλικού να έχει μια διαμήκη κατεύθυνση, μια πλευρική και μία κάθετη. Το στρώμα του υλικού περιλαμβάνει επίσης ένα μοτίβο, από εξαγωνικές δομές, με ανοίγματα που περιβάλλονται από τριγωνικά τμήματα. Κάθε τριγωνικό τμήμα ενώνεται με ένα γειτονικό με μία εύκαμπτη άρθρωση, έτσι ώστε τα τριγωνικά τμήματα να μπορούν να περιστρέφονται μεταξύ τους. Όταν το στρώμα του υλικού είναι υπό τάση, κατά τη διαμήκη κατεύθυνση, τότε επεκτείνεται τόσο στην διαμήκη κατεύθυνση όσο και στην εγκάρσια.

Τέλος, μπορεί ένα σύνθετο αυξητικό υλικό να περιλαμβάνει ένα πρώτο στρώμα από σχετικά σκληρό υλικό που περιλαμβάνει ένα μοτίβο πολυγωνικών ανοιγμάτων και το οποίο περιβάλλεται από πολυγωνικά τμήματα. Το κάθε πολυγωνικό τμήμα ενώνεται με ένα γειτονικό με μια εύκαμπτη άρθρωση, έτσι ώστε τα πολυγωνικά τμήματα να μπορούν να περιστρέφονται μεταξύ τους, όταν το πρώτο στρώμα είναι υπό τάση. Επιπλέον, το υλικό περιλαμβάνει και ένα δεύτερο στρώμα από σχετικά ελαστικό υλικό και το οποίο συνδέεται με το πρώτο στρώμα. Το δεύτερο στρώμα έχει το ίδιο σχήμα πολυγωνικών ανοιγμάτων όπως και το πρώτο στρώμα και το μοτίβο πολυγωνικών ανοιγμάτων στο δεύτερο στρώμα είναι ευθυγραμμισμένο με το μοτίβο πολυγωνικών ανοιγμάτων στο πρώτο στρώμα. Όταν το σύνθετο αυξητικό υλικό είναι υπό τάση σε μια κατεύθυνση, τότε διαστέλλεται τόσο σε αυτήν την κατεύθυνση όσο και στην κατεύθυνση η οποία είναι κάθετη ως προς την πρώτη. [11]

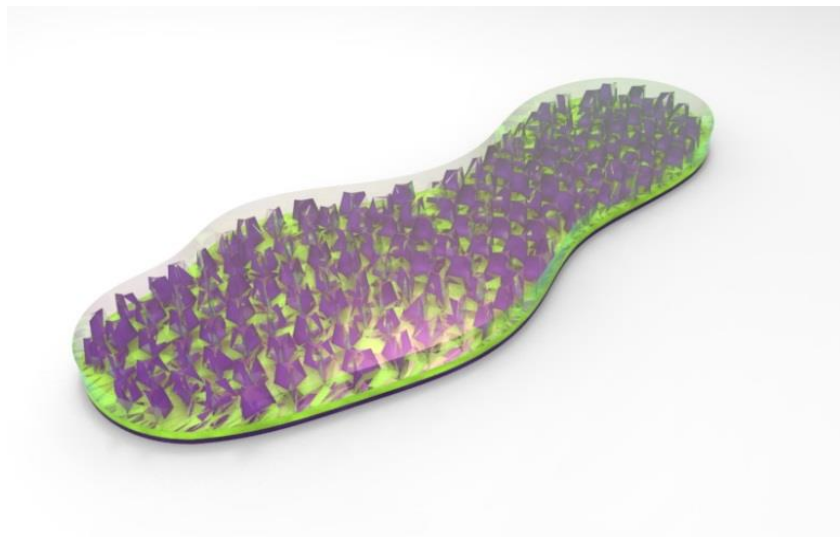
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο:

Μοντελοποίηση κατασκευής

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες ενότητες, στόχος της παρούσας διατριβής είναι η σχεδίαση αθλητικής σόλας, η οποία διαθέτει αυξητικές ιδιότητες στο υλικό και στη συνέχεια η μελέτη της και η σύγκριση της στο πεδίο των συχνοτήτων με αντίστοιχη σόλα η οποία όμως διαθέτει μία απλή σχεδίαση εσωτερικά. Η μελέτη έγινε με το μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και μελετήθηκε με το λογισμικό των πεπερασμένων στοιχείων COMSOL 4.4.

5.1 Σχεδίαση και διακριτοποίηση

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε η σχεδίαση της σόλας στο περιβάλλον σχεδίασης Catia V5. Η σχεδίαση της στηρίχτηκε με βάση όσα αναφέρονται στο 4ο κεφάλαιο. Η σόλα αποτελείται από τρία στρώματα όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα .



Εικόνα 5.1.1: Σόλα αθλητικού παπουτσιού με αυξητική δομή (τρία στρώματα)

Το κάτω στρώμα διαθέτει τις εσωτερικές "τάπες", το μεσαίο στρώμα (πράσινο μέρος της άνω εικόνας) είναι και αυτό του οποίου δίνουμε την σχεδίαση έτσι ώστε να διαθέτει τις αυξητικές ιδιότητες και το άνω στρώμα είναι πολύ λεπτό το οποίο έρχεται σε επαφή με το πέλμα. Το στρώμα το οποίο εξετάζουμε και αναλύουμε είναι το μεσαίο, το οποίο

έχει την αυξητική δομή. Όπως αναφέραμε και στο τέταρτο κεφάλαιο (ενότητα 4.2), ένα τουλάχιστον στρώμα από τη σόλα του παπουτσιού είναι κατασκευασμένο από αυξητική δομή.

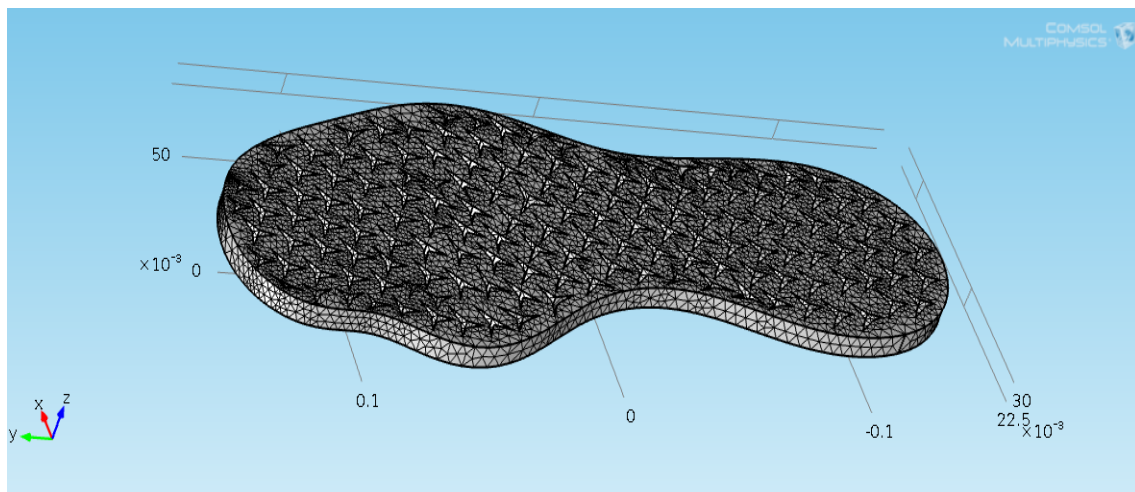
Στην συνέχεια, εισάγαμε την μεσαία σόλα, που έχει την αυξητική δομή, στο πρόγραμμα ανάλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων του COMSOL. Το πρώτο πράγμα το οποίο ορίστηκε είναι το υλικό το οποίο θα χρησιμοποιηθεί, οι πιθανές συνοριακές συνθήκες που θα έπρεπε να δοθούν, καθώς και η διακριτοποίηση της κατασκευής. Το υλικό το οποίο επιλέχθηκε ήταν PVC με ιδιότητες όπως φαίνονται στο παρακάτω πίνακα:

Διαστάσεις σόλας (m)	0.30
Πάχος σόλας (m)	0.05
Πυκνότητα [kg/m ³]	1760
Μέτρο ελαστικότητας Young [Pa]	2.9e9

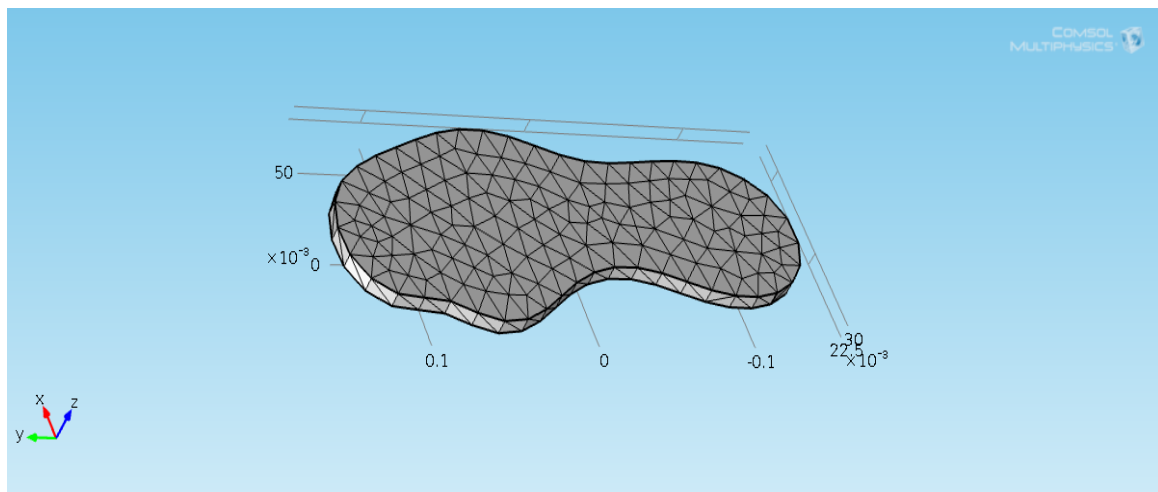
Πίνακας 5.1.1: Ιδιότητες σόλας

Δεδομένου ότι η ανάλυση που επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί ήταν ιδιοσυχνοτήτων, το υλικό πρέπει να εμπεριέχει πάνω του μόνο ελαστικές ιδιότητες. Συνοριακές συνθήκες δεν επιλέχθηκαν να εφαρμοστούν διότι θεωρούμε ότι δεν υπάρχει κάποια περιοχή η οποία θα είναι πακτωμένη δεδομένου ότι το πόδι συνεχώς κινείται.

Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκε διακριτοποίηση στο στρώμα της κατασκευής με αυξητικές ιδιότητες, αλλά και στο στρώμα της απλής κατασκευής. Τα πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι η default επιλογή που δόθηκε από το λογισμικό του COMSOL. Όπως φαίνεται η πολυπλοκότητα της γεωμετρίας ανάγκασε τη χρήση μεγαλύτερης πυκνωσης με πεπερασμένα στοιχεία σε σχέση με τη σόλα χωρίς τις αυξητικές ιδιότητες. Η διακριτοποίηση των στρωμάτων αυτών παρουσιάζεται στις δύο παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 5.3.2.: Διακριτοποίηση σόλας με αυξητικές ιδιότητες



Εικόνα 5.1.3: Διακριτοποίηση σόλας χωρίς αυξητικές ιδιότητες

Όπως παρατηρούμε, η διακριτοποίηση στην πρώτη περίπτωση είναι αρκετά πιο πυκνή σε σχέση με τη δεύτερη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο σχεδιασμός της σόλας με αυξητική δομή είναι αρκετά πιο σύνθετος και το σχέδιο είναι αρκετά πιο «βαρύ» σε σχέση με την σόλα χωρίς αυξητική δομή. Για το λόγο αυτό, τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι πολύ περισσότερα σε σχέση με την δεύτερη σόλα (απλή κατασκευή). Τα πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτά που προτείνει το λογισμικό (default).

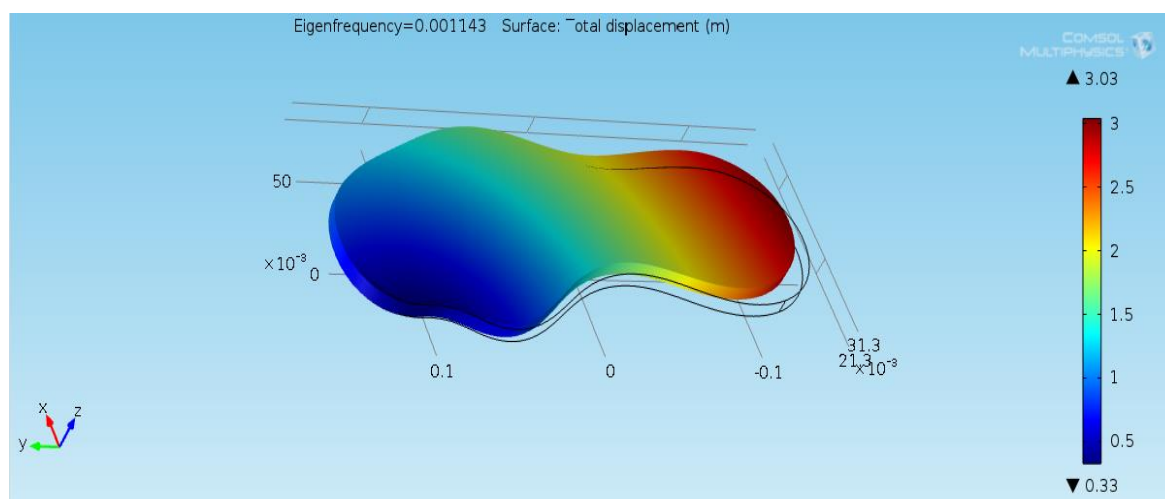
Στην ενότητα που θα ακολουθήσει παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ιδιομορφών. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι σε αυτή την ενότητα θα αναφερθούν σημεία συντονισμού της κατασκευής. Για το λόγο αυτό εμφανίζονται μετατοπίσεις πολύ μεγαλύτερες από αυτές που λογικά θα εμφανιστούν στην κατασκευή. Επιπλέον, ένας ακόμα λόγος εμφάνισης τέτοιων μετακινήσεων είναι ότι μιλάμε για μία κατασκευή με αμιγώς ελαστικές ιδιότητες.

5.2 Ανάλυση ιδιομορφών για τις 4 πρώτες ιδιοσυχνότητες

Στην ενότητα αυτή θα γίνει μία ανάλυση των ιδιομορφών των δύο παραπάνω κατασκευών στις 4 πρώτες ιδιοσυχνότητες. Όπως έχει αναφερθεί είναι δύο πανομοιότυπες σόλες, με ίδιο μέγεθος και υλικό αλλά με τη διαφορά ότι η μία περιέχει αυξητική δομή, όπως έχει παρουσιαστεί παραπάνω, ενώ η άλλη όχι. Τα αποτελέσματα, των μετατοπίσεων σε σχέση με τις ιδιοσυχνότητες, για την κάθε κατασκευή εμφανίζονται παρακάτω. Αρχικά θα παρουσιαστούν οι συχνότητες στις οποίες συντονίζει η κάθε μία κατασκευή (τέσσερις πρώτες ιδιοσυχνότητες), και στη συνέχεια θα γίνει μία σύγκριση μεταξύ τους σχετικά με το εύρος των συχνοτήτων.

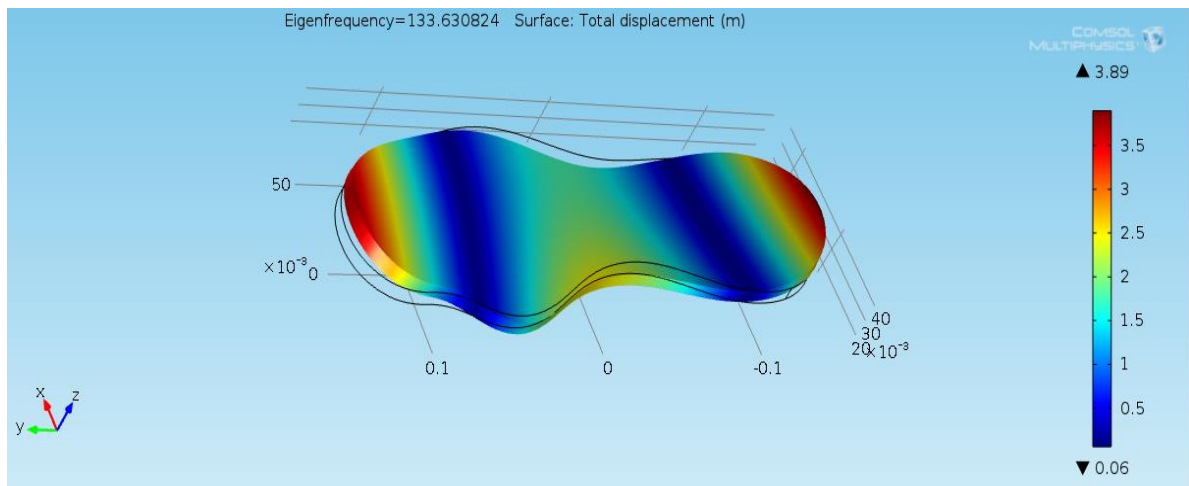
5.2.1 Ανάλυση ιδιομορφών απλής κατασκευής

Αρχικά, η πρώτη κατασκευή που θα μελετηθεί είναι η απλή. Για τον υπολογισμό των ιδιομορφών επιλέχθηκε, στο λογισμικό comsol, να υπολογιστούν οι 50 πρώτες ιδιομορφές και οι οποίες θα παρουσιαστούν στην συνέχεια. Παρακάτω φαίνονται οι τέσσερις πρώτες ιδιομορφές.



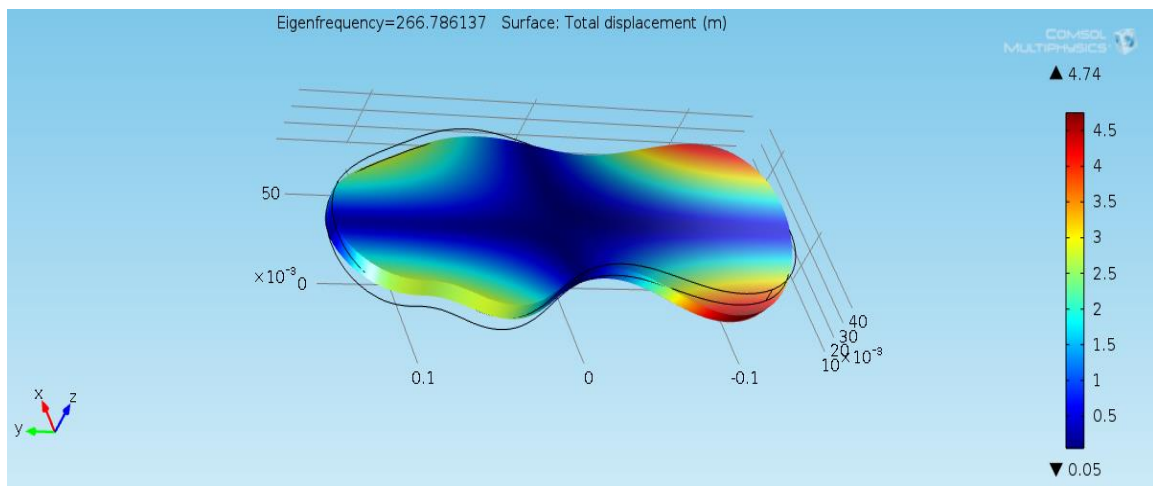
Εικόνα 5.2.1.1: 1η ιδιομορφή για την απλή σόλα

Στην πρώτη ιδιομορφή βλέπουμε μεγάλες μετατοπίσεις κυρίως στην περιοχή της φτέρνας και λιγότερο στο μπροστινό μέρος της σόλας. Αυτό μπορεί να δημιουργήσει αρκετά προβλήματα στην συγκεκριμένη περιοχή του ποδιού.



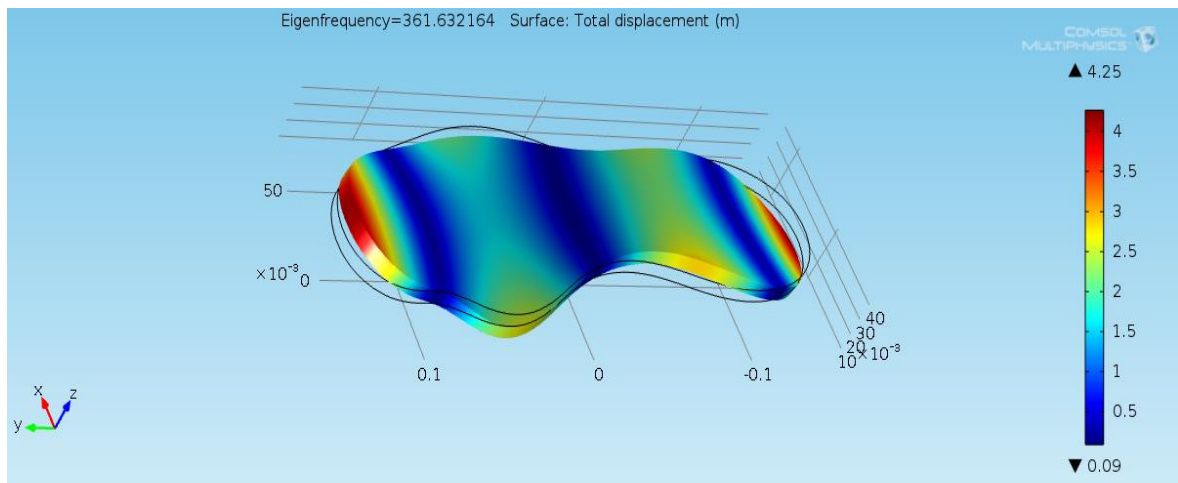
Εικόνα 5.2.1.2: 2η ιδιομορφή για την απλή σόλα

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις στην **δεύτερη ιδιομορφή** όπου βλέπουμε να αυξάνεται το εύρος των μετατοπίσεων και στο άνω και στο κάτω όριο. Επίσης, παρατηρούμε ότι οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις παρουσιάζονται στα δύο άκρα της κατασκευής. Επιπλέον εμφανίζονται και ορισμένες στο μέσον.



Εικόνα 4.2.1.3: 3η ιδιομορφή για την απλή σόλα

Στην **τρίτη ιδιομορφή** το εύρος των μετατοπίσεων μεταβάλλεται και πάλι στο άνω και στο κάτω άκρο του. Σε αυτή τη περίπτωση παρατηρείται, στο σύνολο της κατασκευής, από μικρές έως μηδενικές μετατοπίσεις, ειδικά στο μέσον της κατασκευής, χωρίς βέβαια να αποφεύγεται μία πολύ μικρή περιοχή στην περιοχή της φτέρνας.

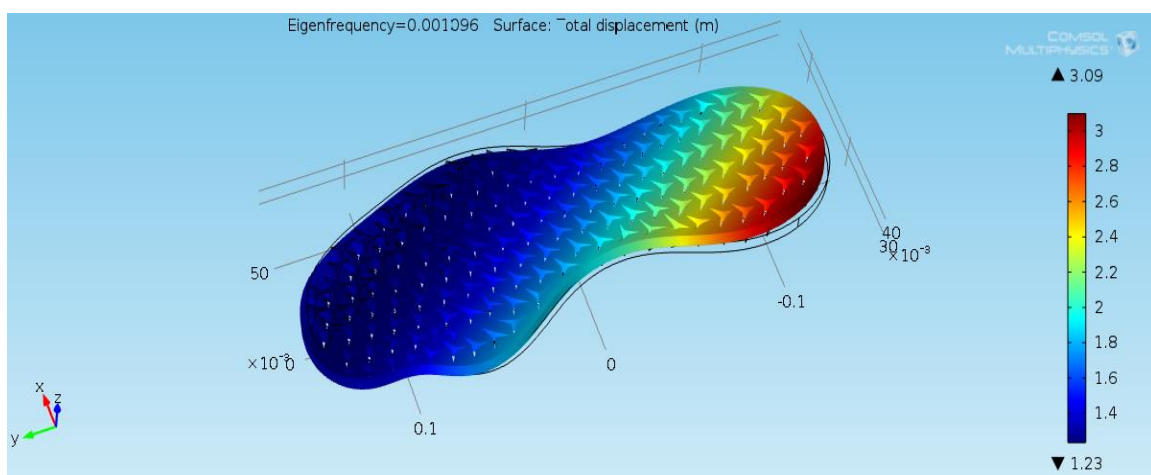


Εικόνα 5.2.1.4: 4η ιδιομορφή για την απλή σόλα

Τέλος, παρουσιάζεται η τέταρτη ιδιομορφή όπου σε αυτή την περίπτωση η κατασκευή παρουσιάζει μικρού και μεσαίου μεγέθους μετατοπίσεις, αλλά όπως και στις παραπάνω περιπτώσεις οι μεγάλες παραμορφώσεις παρουσιάζονται στα άκρα της κατασκευής.

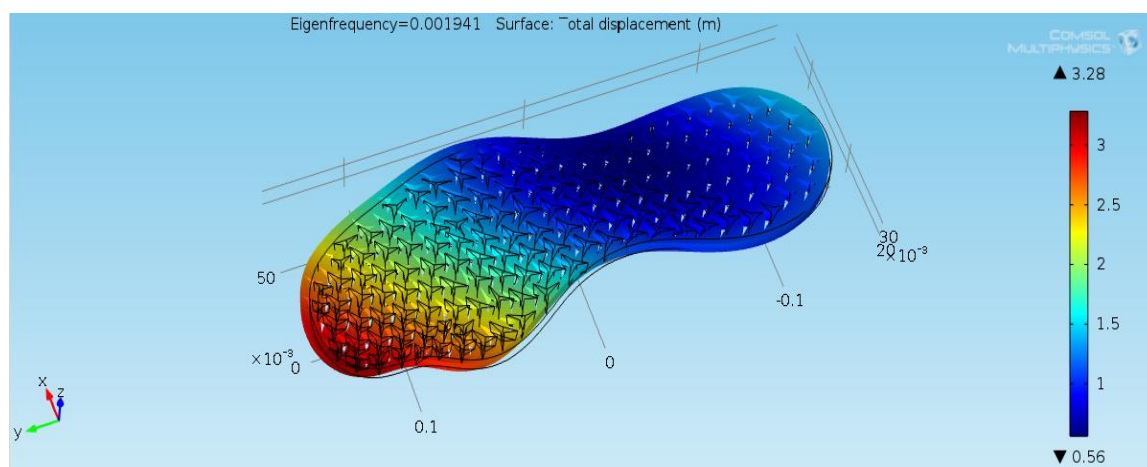
5.2.2. Ανάλυση ιδιομορφών κατασκευής με αυξητική δομή και σύγκριση με την απλή

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, έτσι και σε αυτή, θα παρουσιαστούν οι περιπτώσεις των τεσσάρων πρώτων ιδιομορφών.



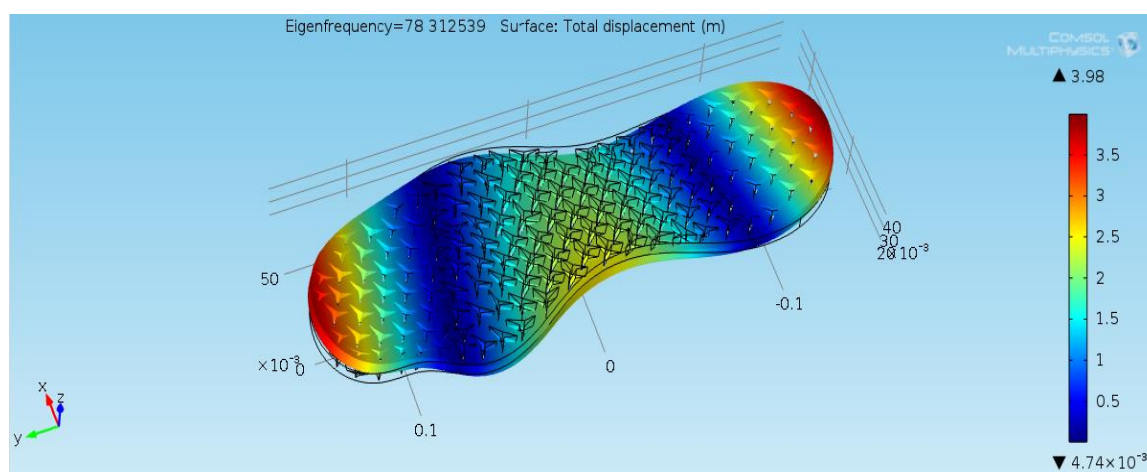
Εικόνα: 5.2.2.1: 1η ιδιομορφή με αυξητική σχεδίαση

Στην **πρώτη περίπτωση** παρατηρούμε ότι η έκταση των μεγάλων μετατοπίσεων έχει περιοριστεί σε σχέση με την πρώτη ιδιομορφή της πρώτης κατασκευής. Και σε αυτή τη περίπτωση οι μετατοπίσεις εμφανίζονται στην πίσω πλευρά του παπουτσιού.



Εικόνα: 5.2.2.2: 2η ιδιομορφή με αυξητική σχεδίαση

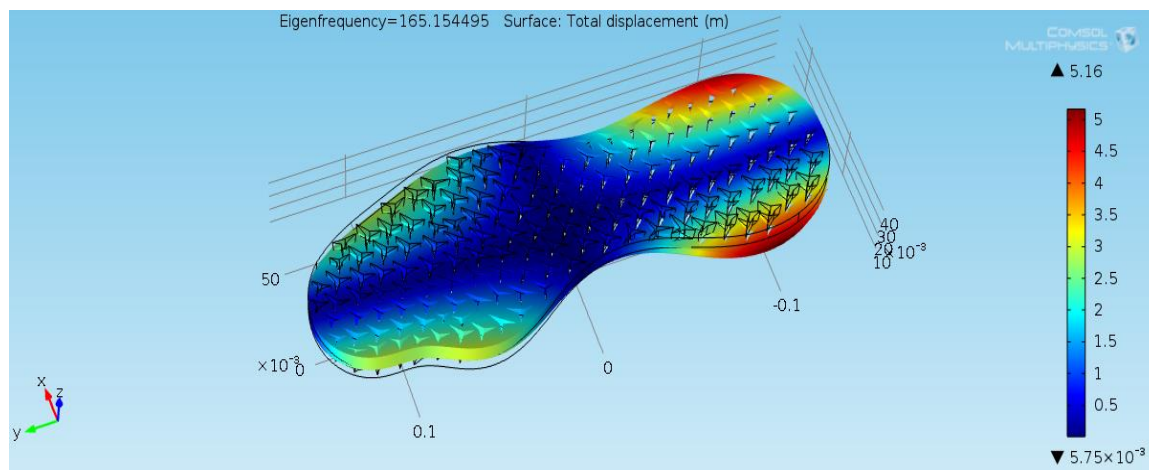
Στην **δεύτερη ιδιομορφή** παρατηρούμε ότι οι μετατοπίσεις είναι πολύ μικρές στη μεγαλύτερη έκταση της σόλας εκτός από το μπροστινό της άκρο. Εκεί εμφανίζονται οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις, σε πλάτος όμως αρκετά μικρότερο σε σχέση με την αντίστοιχη δεύτερη ιδιομορφή της σόλας χωρίς το αυξητικό. Γενικά, και εδώ βλέπουμε ότι οι μετατοπίσεις έχουν περιοριστεί σε σημαντικό βαθμό.



Εικόνα: 5.2.2.3: 3η ιδιομορφή με αυξητική σχεδίαση

Στην **τρίτη ιδιομορφή**, όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, βλέπουμε ότι υπάρχουν σχετικά έντονες διακυμάνσεις σε σχέση με τις

δύο πρώτες ιδιομορφές. Σε σχέση με την αντίστοιχη τρίτη ιδιομορφή της απλής σόλας, παρουσιάζονται περισσότερες μετατοπίσεις στο κέντρο της σόλας και κυρίως καταπονείται το μπροστινό μέρος, όπου στην απλή κατασκευή δεν παρουσιάζεται μετατόπιση. Αντιθέτως, στο πίσω άκρο μετατοπίσεις υπάρχουν και στις δύο περιπτώσεις, αλλά σε διαφορετικά σημεία.



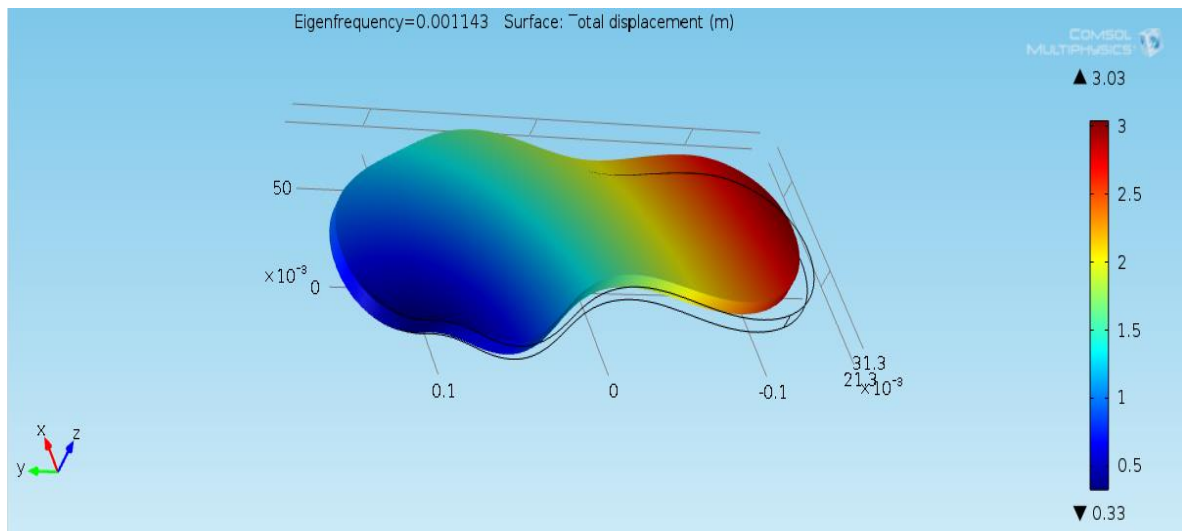
Εικόνα: 5.2.2.4: 4η ιδιομορφή με αυξητική σχεδίαση

Τέλος, στην **τέταρτη και τελευταία ιδιομορφή**, παρατηρούμε ότι η κατασκευή μας έχει πολύ μικρές μετατοπίσεις στο μεγαλύτερο μέρος της σόλας εκτός από τις δύο περιοχές στο πίσω μέρος της, ενώ στην κατασκευή της απλής σόλας, παρουσιάζεται έντονη μετατόπιση και στο μπροστινό άκρο.

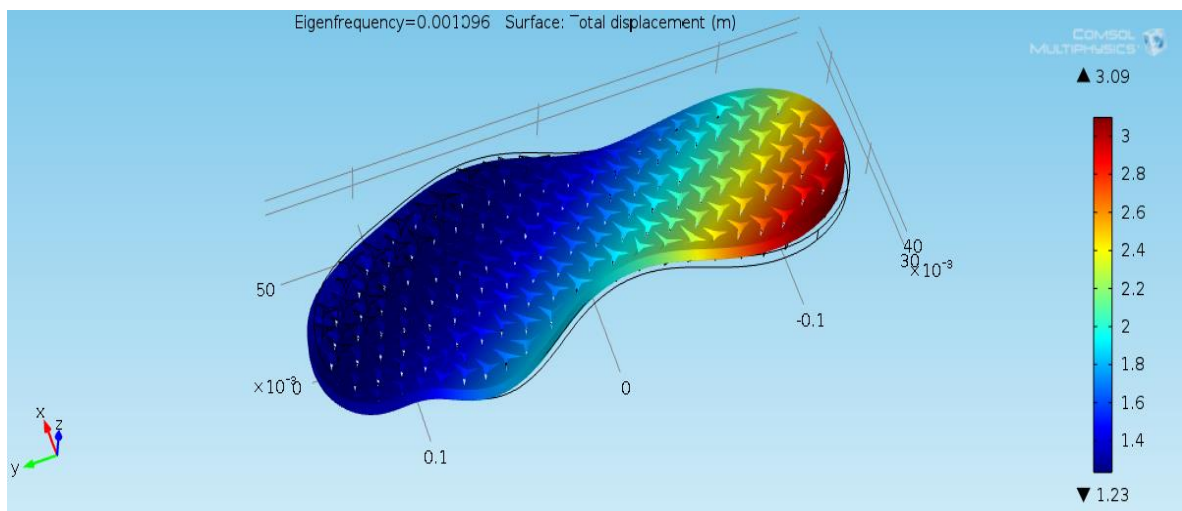
5.3. Ανάλυση ιδιομορφών και σύγκριση για ίδιες ιδιοσυχνότητες

Σε αυτήν την ενότητα γίνεται συγκριτική μελέτη των 2 ειδών σόλας **για τις ίδιες σχεδόν ιδιοσυχνότητες, με σκοπό να γίνει άμεση σύγκριση μεταξύ των δύο κατασκευών.**

Η **πρώτη ιδιοσυχνότητα** που εξετάστηκε είναι κοντά στα **0.001143 Hz**. Όπως παρατηρείται η σόλα χωρίς την αυξητική δομή δέχεται μεγάλες μετατοπίσεις στο μεγαλύτερο μέρος της έκτασης της σε αντίθεση με την άλλη σόλα όπου οι μεγάλες μετατοπίσεις περιορίζονται στο πίσω άκρο της κατασκευής.

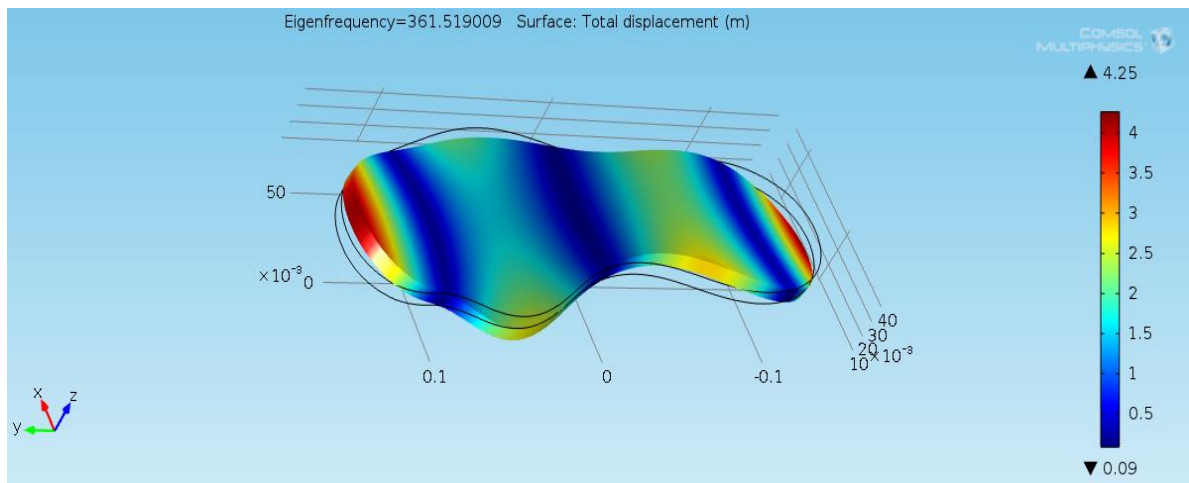


Εικόνα 5.3.1: Μετατοπίσεις σε απλή κατασκευή σόλας για ιδιοσυχνότητα 0.001143 Hz

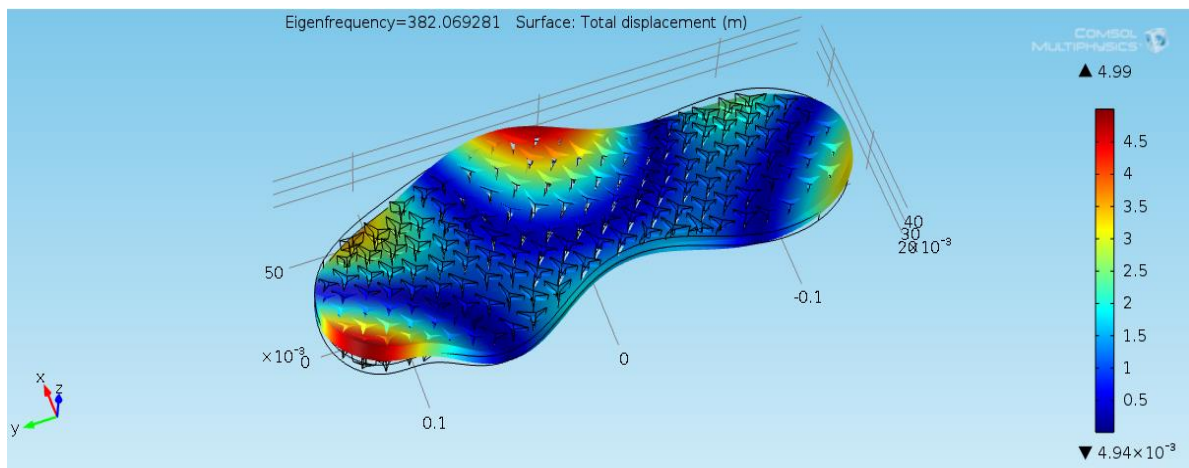


Εικόνα 5.3.2: Μετατοπίσεις σε κατασκευή σόλας με αυξητική δομή για ιδιοσυχνότητα κοντά στα 0.001143 Hz

Η **δεύτερη ιδιοσυχνότητα** που μελετήθηκε είναι κοντά στα **370 Hz**, όπου η σόλα χωρίς την αυξητική δομή παρουσιάζει κυρίως μεσαίας τάξης μετατοπίσεις, ενώ η άλλη αρκετά πιο μικρές και δέχεται μεγαλύτερη καταπόνηση στο ένα πλαϊνό μέρος.

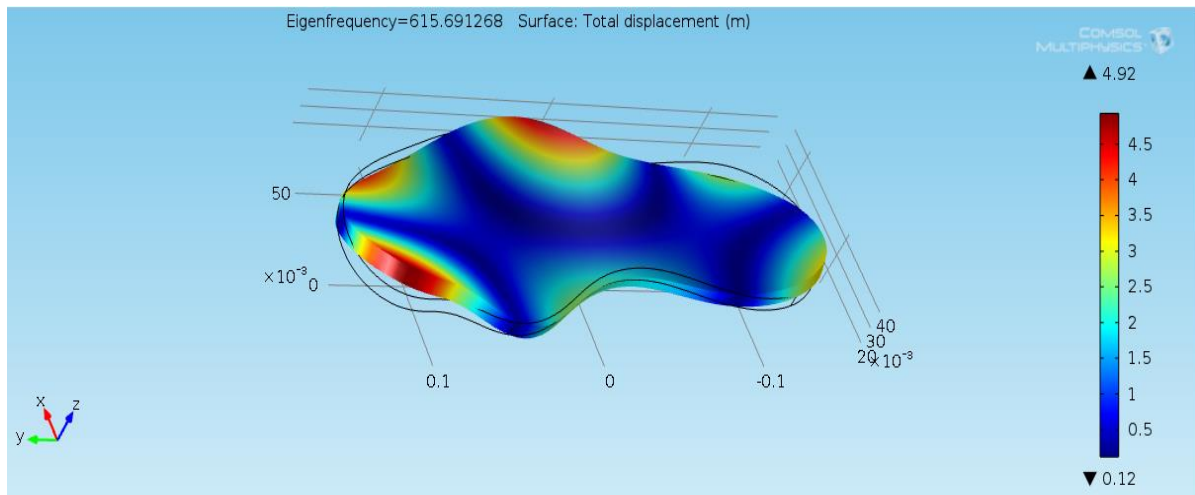


Εικόνα 5.3.3: Μετατοπίσεις σε απλή κατασκευή σόλας για ιδιοσυχνότητα κοντά στα 370 Hz.

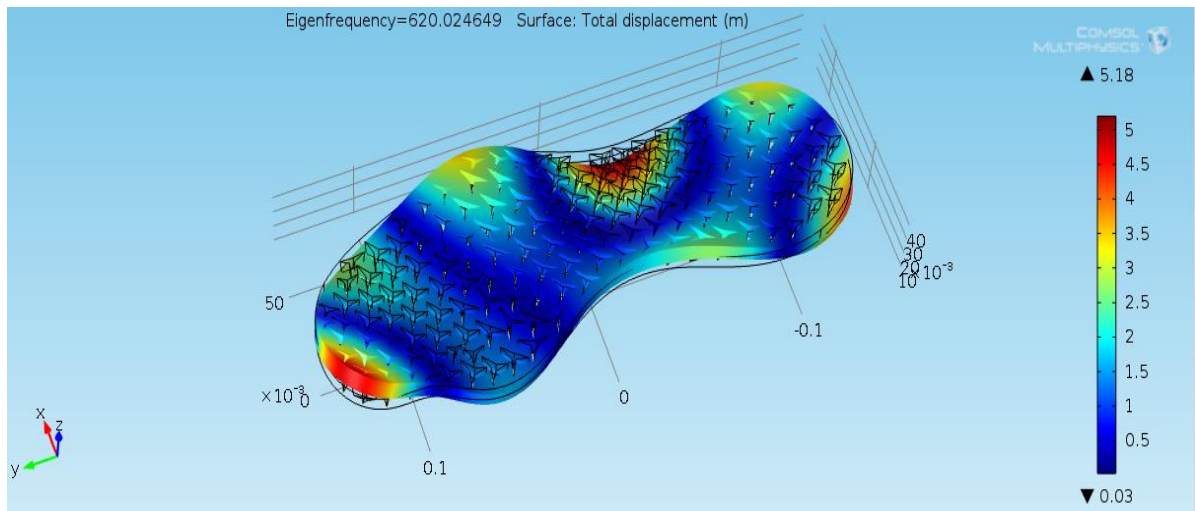


Εικόνα 5.3.4: Μετατοπίσεις σε κατασκευή σόλας με αυξητική δομή για ιδιοσυχνότητα κοντά στα 370 Hz.

Η **τρίτη περίπτωση** αφορά την ιδιοσυχνότητα **κοντά στα 615 Hz** όπου η σόλα χωρίς την αυξητική δομή εμφανίζει μεγάλες μετατοπίσεις στα 4 σημεία με έντονο κόκκινο χρώμα. Αντίστοιχα, στην άλλη κατασκευή εμφανίζονται σε παρόμοιες περιοχές μετατοπίσεις, αλλά σε αρκετά μικρότερη έκταση.

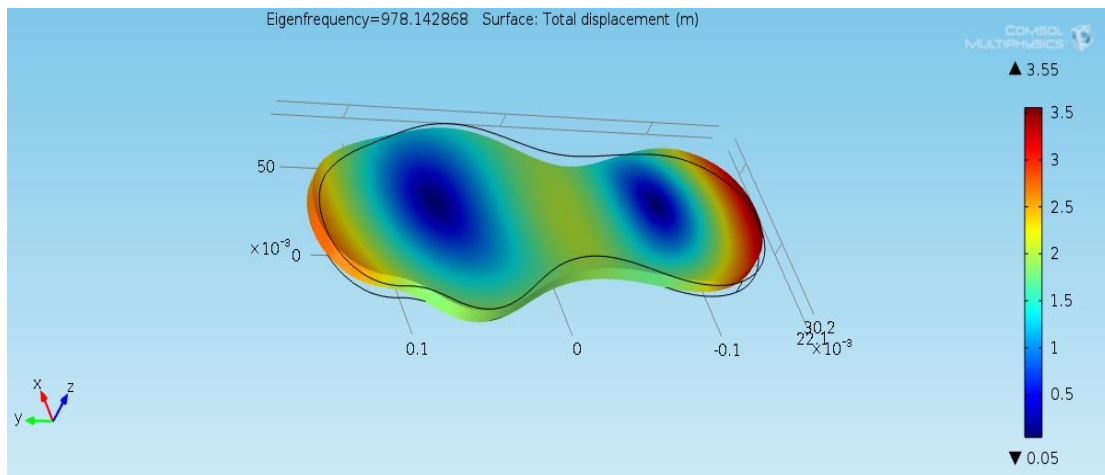


Εικόνα 5.3.5: Μετατοπίσεις σε απλή κατασκευή σόλας για ιδιοσυχνότητα κοντά στα 615 Hz.

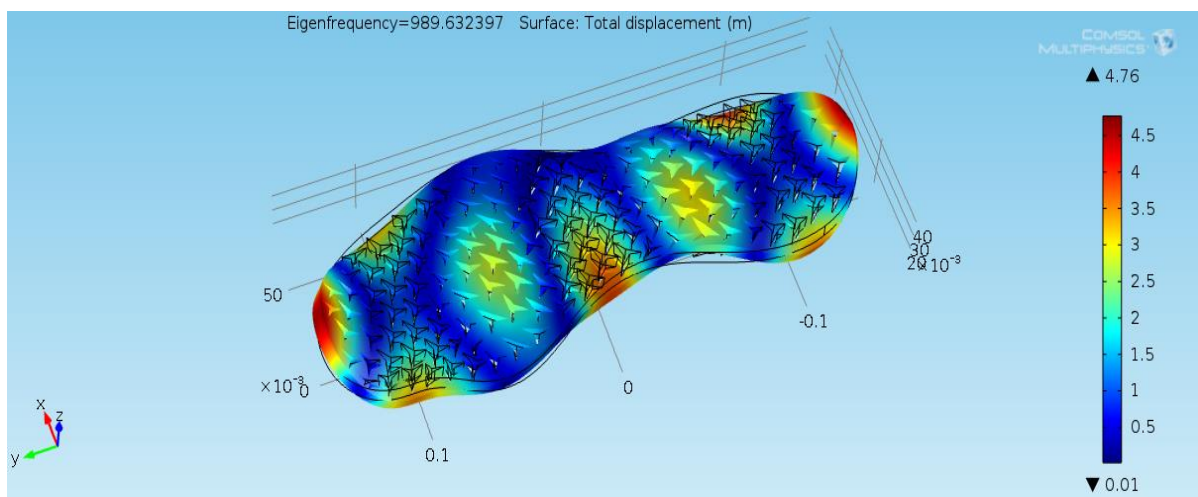


Εικόνα 5.3.6: Μετατοπίσεις σε κατασκευή σόλας με αυξητική δομή για ιδιοσυχνότητα κοντά στα 615 Hz

Η **τελευταία περίπτωση** που μελετήθηκε, είναι οι συχνότητες **κοντά στα 990 Hz**. Στην περίπτωση αυτή παρατηρούμε ότι στη σόλα με την αυξητική δομή υπάρχουν αρκετές μικρές περιοχές με μεσαίας και μεγάλης τάξης μετατοπίσεις, αλλά και σε αυτή την ιδιοσυχνότητα οι μετατοπίσεις παραμένουν αρκετά μικρές και ικανοποιητικές. Αντίθετα, στη σόλα χωρίς την αυξητική δομή, παρατηρούνται μεγάλες μετατοπίσεις σε μεγάλη έκταση.



Εικόνα 5.3.7: Μετατοπίσεις σε απλή κατασκευή σόλας για ιδιοσυχνότητα κοντά στα 990 Hz.



Εικόνα 5.3.8: Μετατοπίσεις σε κατασκευή σόλας με αυξητική δομή για ιδιοσυχνότητα κοντά στα 990 Hz

5.4. Αποτελέσματα για τις 50 πρώτες ιδιοσυχνότητες

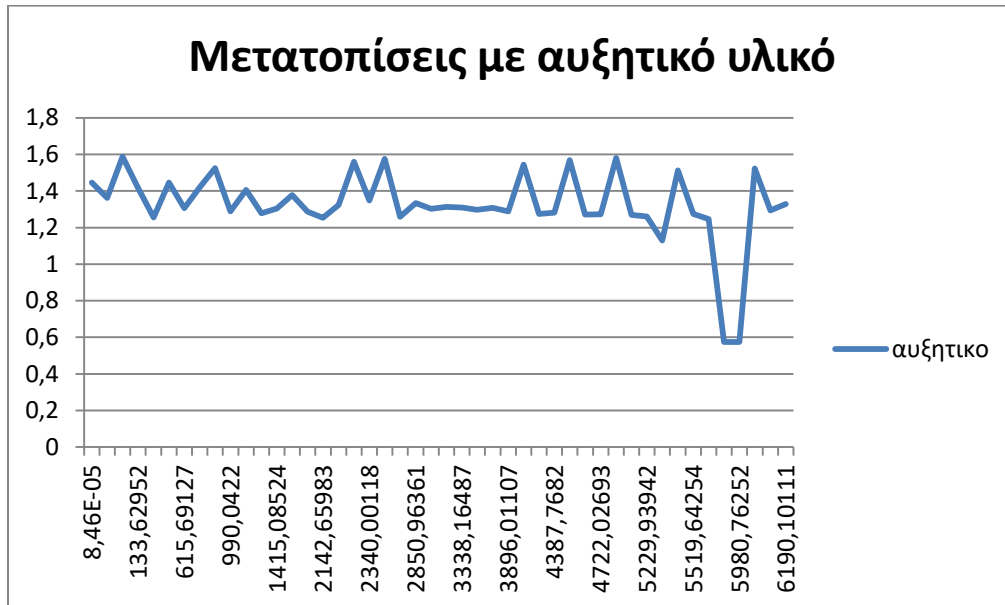
Στην ενότητα αυτή παρατίθενται δύο πίνακες των δύο κατασκευών με τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων σε ένα εύρος συχνοτήτων, όπως και τα δύο συγκριτικά διαγράμματα με τις μετατοπίσεις για τις 50 πρώτες ιδιοσυχνότητες.

Αυξητική σόλα		Απλή σόλα	
Συχνότητες	Μετατοπίσεις	Συχνότητες	Μετατοπίσεις
8.46E-05	1.44664	0.0011	1.72124
3.16E-04	1.36179	0.00194	1.46102
0.00115	1.58711	78.31254	1.47174

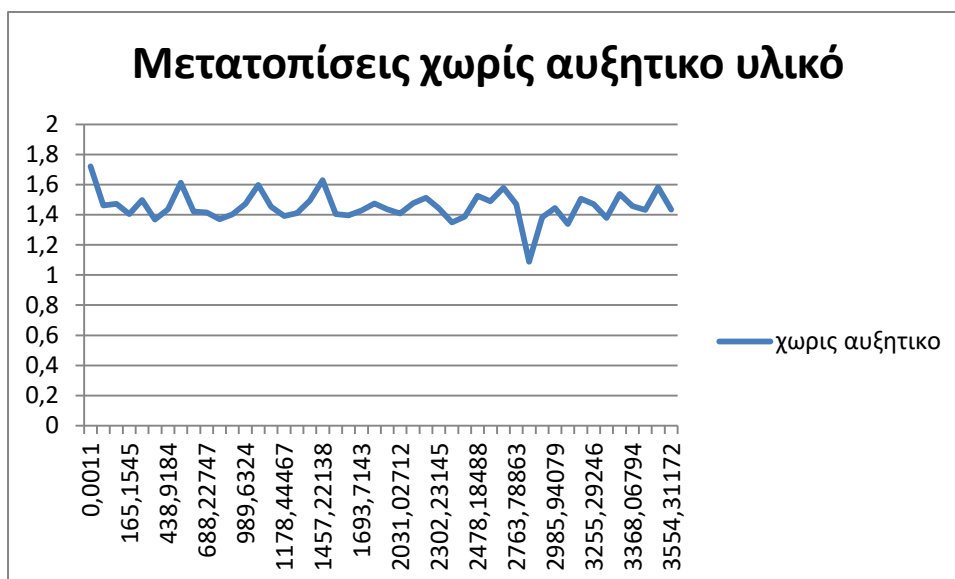
133.6295	1.41812	165.1545	1.40341
266.8452	1.25505	219.5721	1.49716
361.519	1.44665	382.0693	1.36918
615.6913	1.30653	438.9184	1.43601
706.7326	1.41933	583.8548	1.6123
978.1429	1.52416	620.0247	1.42153
990.0422	1.28908	688.2275	1.41587
1128.344	1.40484	721.1496	1.37014
1289.229	1.27816	869.4758	1.40318
1415.085	1.30336	989.6324	1.47263
1662.511	1.37745	1102.346	1.59739
1926.987	1.28712	1160.999	1.45376
2142.66	1.25357	1178.445	1.39059
2191.536	1.3243	1253.487	1.41156
2260.334	1.55882	1344.039	1.49426
2340.001	1.34764	1457.221	1.62888
2458.655	1.57514	1527.327	1.40472
2503.945	1.25867	1671.756	1.39685
2850.964	1.3342	1693.714	1.42714
3057.175	1.30171	1798.259	1.47373
3183.645	1.31292	1897.601	1.43589
3338.165	1.31004	2031.027	1.40871
3506.192	1.29741	2121.664	1.47643
3695.809	1.30702	2270.968	1.51252
3896.011	1.28812	2302.231	1.44162
3942.591	1.54352	2355.224	1.34929
4255.004	1.27479	2445.533	1.38764
4387.768	1.28113	2478.185	1.52633
4479.05	1.56841	2548.778	1.48986
4636.918	1.27164	2713.666	1.57954
4722.027	1.27197	2763.789	1.47114
4782.296	1.58084	2783.907	1.08839
5077.971	1.26907	2888.842	1.38211
5229.939	1.26062	2985.941	1.44488
5277.654	1.12911	3093.654	1.33877
5486.083	1.51238	3201.278	1.50627
5519.643	1.27393	3255.292	1.47098
5756.798	1.24596	3268.429	1.37872
5980.763	0.57437	3353.364	1.5374
5980.763	0.57437	3368.068	1.45743
6122.526	1.52311	3458.189	1.43209
6138.768	1.29308	3506.445	1.58213
6190.101	1.32945	3554.312	1.43438

Πίνακας 5.4.1: Αποτελέσματα των δύο κατασκευών (απλής σόλας και με αυξητική δομή) για τις 50 πρώτες ιδιοσυχνότητες.

Σύμφωνα με τα διαγράμματα που ακολουθούν αλλά και με τους παραπάνω πίνακες υπάρχουν κάποια αρκετά ενδιαφέροντα συμπεράσματα τα οποία μπορούν να εξαχθούν σχετικά με την συμπεριφορά της αυξητικής σόλας και τις διαφοροποιήσεις του σε σχέση με την απλή σόλα.



Γράφημα 5.4.1: Μετατοπίσεις σε παπούτσι με αυξητικό υλικό στη σόλα, ανάλογα την ιδιοσυχνότητα που εφαρμόζεται



Γράφημα 5.4.2: Μετατοπίσεις σε παπούτσι χωρίς αυξητικό υλικό στη σόλα, ανάλογα την ιδιοσυχνότητα που εφαρμόζεται

Η πρώτη παρατήρηση που μπορεί να γίνει αφορά το εύρος των ιδιοσυχνοτήτων. Βλέπουμε ότι η σόλα με τις αυξητικές ιδιότητες επεκτείνεται σε σχεδόν διπλάσιο εύρος συχνοτήτων σε σχέση με την απλή σόλα στις πρώτες 50 ιδιοσυχνότητες.

Ένα ακόμα σημαντικό στοιχείο είναι το γεγονός ότι το εύρος του πλάτους της ταλάντωσης για την περίπτωση με το αυξητικό υλικό, σε περίπτωση συντονισμού, κυμαίνεται από το 0.6-1.6 m. Αντίθετα, το πλάτος ταλάντωσης που επιτυγχάνεται σε περίπτωση συντονισμού στην απλή σόλα είναι της τάξης του 1.1-1.8 m.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο: Συμπεράσματα

Παρατηρούμε, λοιπόν, με βάση την διερεύνηση που έγινε στο 5ο κεφάλαιο, ότι στο σύνολο τους οι μετατοπίσεις στη σόλα με την αυξητική δομή είναι εμφανώς μειωμένες, και στην έκταση τους και στο πλάτος τους, σε σχέση με τη σόλα χωρίς αυξητικό υλικό. Αυτό σημαίνει ότι το παπούτσι με σόλα που έχει αυξητική δομή απορροφά περισσότερους κραδασμούς και του δίνει αποσβεστικές ιδιότητες, σε σχέση με το παπούτσι που έχει την απλή σόλα, πράγμα αρκετά σημαντικό για το ανθρώπινο πόδι.

Για τους παραπάνω λόγους, λοιπόν, πλέον εταιρείες αθλητικών παπουτσιών, όπως η adidas, έχουν καταφύγει στην σχεδίαση σόλας με την αυξητική δομή που μελετήθηκε και αναλύθηκε στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, δεδομένου ότι με την κατάλληλη σχεδίαση και χωρίς να αλλάξουν υλικό πετυχαίνουν ένα αρκετά πιο εργονομικό αλλά και ανθεκτικό παπούτσι.

Μία μελλοντική έρευνα, που θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί, είναι αρχικά να βρεθούν πιθανώς πεπερασμένα στοιχεία που να είναι πιθανόν ιδανικά για αυξητικές δομές, όπως επίσης να γίνει προσπάθεια να πραγματοποιηθεί αντίστοιχη πύκνωση και στην σόλα χωρίς την αυξητική δομή, ώστε να παρατηρηθεί η διαφοροποίηση που θα υπάρξει.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. <http://docplayer.gr/641514-Afrodi-metalla-nea-afrodi-ylika-toy-g-pehlivanogloy.html>
2. Design and verification of auxetic microstructures using topology optimization and homogenization, Nikos T. Kaminakis, Georgios A. Drosopoulos, Georgios E. Stavroulakis, 2014
3. A novel chemo-mechanical process for making auxetic foams and for their reconversion to conventional foam, Joseph N. Grima, Daphne Attard and Ruben Gatt.,2009
4. Design and Optimization of Microstructure of Auxetic Materials, Javadi, A., Faramarzi, A., Farmani, R., 2012
5. Literature review: Materials with Negative Poisson's Ratios and Potential Applications to Aerospace and Defence , Q. Liu, 2006
6. Examination of acoustic behavior of negative poisson's ratio materials, B Howell, P Prendergast, L Hansen - Applied Acoustics, 1994
7. Symplectic analysis for the wave propagation properties of conventional and auxetic cellular structures, Xiuhui Hou, Zichen Deng, Jiayi Zhou, 2011
8. Auxetics: From Foams to Composites and Beyond, Fabrizio Scarpa, 2011
9. Novel generation of auxetic open cell foams for curved and arbitrary shapes, M. Bianchi, F. Scarpa, M. Banse, C.W. Smith,2011
10. A review on auxetic structures and polymeric materials, Yanping Liu and Hong Hu, 2010
11. Auxetic Structures and Footwear with Soles Having Auxetic Structures, Tory M. Cross, Kevin W. Hoffer, David P. Jones, Patrick B. Kirschner, Elizabeth Langvin, James C. Meschter, 2015