



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«Σχεδιασμός αυξητικών μεγεθών σε παραμορφώσιμες  
κατασκευές με τη μέθοδο των πεπερασμένων  
στοιχείων»**



**Υπό**

**Μαργαρίτα Μούστου**

**ΑΜ: 2018010009**

**Επιβλέπων: Γεώργιος Ε. Σταυρουλάκης**

**Μέλος εξεταστικής επιτροπής: Μπακατσάκη Μαρία**

**Μέλος εξεταστικής επιτροπής: Παναγιώτης Αλευράς**

Χανιά, Οκτώβριος, 2023

Σχεδιασμός αυξητικών επιθεμάτων σε παραμορφώσιμες κατασκευές με τη μέθοδο των πεπερασμένων  
στοιχείων

Μούστου Μαργαρίτα

Ονοματεπώνυμο εισηγητή κ. Σταυρουλάκης

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 10/2/2023

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 10/10/2023

*Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία της φοιτήτριας Μαργαρίτας Μούστου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο **Πολυτεχνείο Κρήτης** άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.*

*Η παρούσα διπλωματική αφιερώνεται στην οικογένεια*  
μου που με υποστήριξε στις σπουδές μου,  
στους φίλους μου που κάνανε τα φοιτητικά χρόνια αξέχαστα,  
και στη μνήμη του σκύλου μου Άρη που ήταν  
εκεί για εμάς όλα αυτά τα χρόνια.

## Περίληψη

Όπως είναι φανερό, με την άνοδο τις τεχνολογίας αυξάνονται οι σχεδιαστικές απαιτήσεις σε συστήματα. Πλέον υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής προϊόντων με καλύτερο σχεδιασμό για να εξυπηρετούν βέλτιστα τον σκοπό τους. Ο βέλτιστος σχεδιασμός μπορεί να επιτευχθεί με την επιλογή της κατάλληλης δομής υλικού, καθώς και με τον κατάλληλο καταμερισμό μάζας. Ειδικότερα, η επιλογή της βασικής δομής αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τις ιδιότητες ενός προϊόντος. Έχοντας τη καταλληλότερη επιλογή μπορεί να αυξηθεί η απόδοση της απορρόφησης κραδασμών σε δομικές κατασκευές (π.χ. δοκό ή πλάκα). Έτσι γίνεται η καταστολή των ταλαντώσεων, οι οποίες προκλήθηκαν από εξωτερικά αίτια όπως δονήσεις.

Επίσης, είναι καίριας σημασίας πέρα από την επιλογή της δομής να γίνει και τοπική βελτιστοποίηση του σώματος. Με την απαραίτητη μελέτη της κατανομής των δυνάμεων που ασκούνται στα δομικά υλικά μπορούμε να χωρίσουμε το σώμα σε διακριτά σημεία και να ερευνήσουμε τι παραμορφώσεις τους ασκούνται. Οπότε έχουμε την δυνατότητα να ενισχύσουμε σημεία που υπόκεινται σε μεγάλες τάσεις καθώς και να αφαιρέσουμε υλικό από όπου είναι περιττό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μια πιο ελαφριά κατασκευή, με πιο γρήγορο ρυθμό παραγωγής, χρησιμοποιώντας λιγότερη πρώτη ύλη.

Στην παρούσα διπλωματική θα γίνει μελέτη αυτών των δυνατοτήτων. Θα αναλυθούν τα οφέλη της χρήσης αυξητικών μικροδομών καθώς και διάφορες εφαρμογές τους. Έπειτα θα μοντελοποιηθούν στον δισδιάστατο και τον τρισδιάστατο χώρο με τη χρήση του προγράμματος Inventor, ώστε να γίνει κατανοητή η δομή των αυξητικών επιθεμάτων. Στη συνέχεια, θα εφαρμοστεί τοπολογική βελτιστοποίηση των τεμαχίων για την αυξομείωση της κατανομής μάζας μέσω του προγράμματος nTopology. Τέλος στην δομή που μελετήσαμε και επεξεργαστήκαμε, θα προστεθεί για να πραγματοποιηθεί στατική ανάλυση σε δοκό, εφαρμόζοντας εμπορικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.

Αφότου ολοκληρωθούν τα στάδια της επεξεργασίας των δομών, θα εξάγουμε συμπέρασμα για την βελτίωση των τρόπων παραγωγής δομικών υλικών. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η κατανόηση του τρόπου επίδρασης των τάσεων καθώς και η συμπερίληψη τους στον σχεδιασμό, έτσι ώστε να παράγουμε μία δομή με επαυξημένες ιδιότητες.

# «Design of auxetic materials in deformable structures using the finite element method»

«Moustou Margarita»

## **Abstract**

As is evident, with the rise of technology, the design requirements for systems increase. Now there is the possibility of producing products with a better design to optimally serve their purpose. Optimal design can be achieved by choosing the appropriate material structure, as well as the appropriate mass distribution. In particular, the choice of basic structure is an important factor for the properties of a product. Having the most appropriate choice can increase the performance of shock absorption in structural structures (eg beam or slab). This is how the oscillations, which were caused by external causes such as vibrations, are suppressed.

Also, it is crucial beyond the choice of the structure to do local optimization of the body. With the necessary study of the distribution of the forces exerted on the structural materials, we can divide the body into discrete points and investigate what deformations are exerted on them. So we have the ability to reinforce points subject to high stresses as well as remove material from where it is unnecessary. This results in a lighter construction, with a faster production rate, using less raw material.

In this thesis, these possibilities will be studied. The benefits of using incremental microstructures as well as their various applications will be analyzed. They will then be modeled in 2D and 3D space using the Inventor program to understand the structure of the growth patches. Next, topological optimization of the blocks will be applied to adjust the mass distribution through the nTopology program. Finally, the structure we studied and processed will be added to perform static analysis on a beam, applying a commercial finite element program.

After the stages of processing the structures are completed, we will draw a conclusion for the improvement of the ways of production of building materials. The aim of this work is to understand the effect of the stresses as well as their inclusion in the design, so as to produce a structure with enhanced properties.

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω πολλά άτομα που συνέβαλλαν στην πραγματοποίηση αυτής της διπλωματικής. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μας κύριο Σταυρουλάκη που αρχικά μου ενέπνευσε το θέμα της διπλωματικής χάρις στα σεμινάρια που διοργάνωνε πάνω στο ntopology. Επίσης θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την καθοδήγηση τους και την συνεχή βοήθεια του.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την Μαρία Στέλλα Δαράκη, που η βοήθεια της υπήρξε καταλυτικό κομμάτι για την ολοκλήρωση της εργασίας. Με τη συνεχή της ενασχόληση και την υποστήριξη της σε όλα τα στάδια κατέστησε την βοήθεια της πάρα πολύ σημαντική, προσφέροντας καθοδήγηση, γνώσεις και απόψεις πάνω στα θέματα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω το Πολυτεχνείο Κρήτης για την εκπαίδευση που έλαβα, η οποία βοήθησε στην διαμόρφωση προς έναν πιο επιστημονικό και μεθοδικό τρόπο σκέψης. Χάρης την σχολή κατάφερα να αποκτήσω γνώσεις πάνω σε θέματα που με ενδιαφέρουν, να γνωρίσω άτομα του κλάδου μου και επίσης να ταξιδέψω στο εξωτερικό μέσω του προγράμματος Erasmus+.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους που έκανα στα Χανιά που με βοήθησαν τόσο ακαδημαϊκά όσο και ψυχικά σε αυτά τα χρόνια, Στέλιο, Στέργιο, Νίκο, Ανδρέα και Εμμανουέλα. Η παρέα τους στην ζωή μου ήταν μια απίστευτη συμβολή που συνέβαλλε σημαντικά στην διαμόρφωση της ζωής μου στα Χανιά.

Τέλος θέλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς τους γονείς μου που ήταν εκεί για να με υποστηρίξουν σε όλα τα στάδια της ζωής μου. Βοήθησαν και σαν γονείς στο να προσφέρουν ότι μπορούσαν αλλά και σας άνθρωποι που ήταν εκεί για να με ακούσουν και να μου συμπαρασταθούν.

# Περιεχόμενα

Περίληψη.....	iv
Abstract .....	v
Ευχαριστίες .....	vi
Περιεχόμενα .....	vii
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή.....	1
1.1 Μεταϋλικά.....	1
1.2 Αυξητικά υλικά .....	2
1.3 Αναλογία Poisson.....	3
1.4 Συντελεστής Young Modulus .....	4
1.5 Μέτρο διάτμησης (Shear modulus).....	5
Κεφάλαιο 2ο: Εφαρμογές αυξητικών υλικών.....	1
2.1 Αυξητικά υλικά στην βιοϊατρική.....	1
2.1.1 Εμφυτεύματα.....	1
2.1.2 Τεχνητά μέλη.....	2
2.2 Αυξητικά υλικά στον ρουχισμό.....	3
Κεφάλαιο 3ο: Χρήση προγραμμάτων προσομοίωσης.....	5
3.1 Εισαγωγή.....	5
3.2 Παραγωγή πρόσθετων ( additive manufacturing) .....	5
3.2.1 Τοπολογική βελτιστοποίηση .....	6
3.2.2 Εφαρμογή προσομοίωσης nTopology.....	7
Κεφάλαιο 4ο: Κατασκευή αυξητικής δομής .....	9
4.1 Επιλογή υλικού κατασκευής .....	9
4.2 Χρήση της εφαρμογής προσομοίωσης Inventor.....	10
4.3 Εισαγωγή και επεξεργασία υλικών στην εφαρμογή προσομοίωσης nTopology .....	11
Κεφάλαιο 5ο: Δυναμική μελέτη, ιδιοτιμές και ιδιομορφές .....	20
5.1 Παρουσίαση και επεξήγηση σχήματος που επιλέχθηκε για ανάλυση.....	20
5.2 Παρουσίαση περιβάλλοντος προγράμματος .....	21
5.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων .....	23
5.4 Παρατηρήσεις.....	26
Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα.....	27

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	28
-------------------	----



## Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

Ο πολιτισμός μας προκειμένου να αναπτυχθεί βασίζεται σε πολύ μεγάλο βαθμό στον υλικό πλούτο που διαθέτει. Το πόσο καλά μπορεί να αξιοποιηθεί ένα αντικείμενο εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως το υλικό του, την διαμόρφωση του, το βάρος του, το μέγεθος του, το χρώμα του, την ικανότητα του να απορροφάει κραδασμούς, την ανθεκτικότητα του κλπ. Για αυτό καλείται ο επιστημονικός κλάδος να αναπτύξει μελέτες για την βελτιστοποίηση των εργαλείων, ανάλογες κάθε φορά με την εφαρμογή τους. Έτσι μπορεί να δημιουργήσει υλικά που με μικρότερο όγκο, βάρος και κόστος παραγωγής, όπου πετυχαίνουν τα ίδια αποτελέσματα, αν όχι και καλύτερα. Στη μαζική παραγωγή αυτό μπορεί να μειώσει σημαντικά την απαραίτητη πρώτη ύλη, τον χρόνο παραγωγής και το κόστος.

### 1.1 Μεταϋλικά

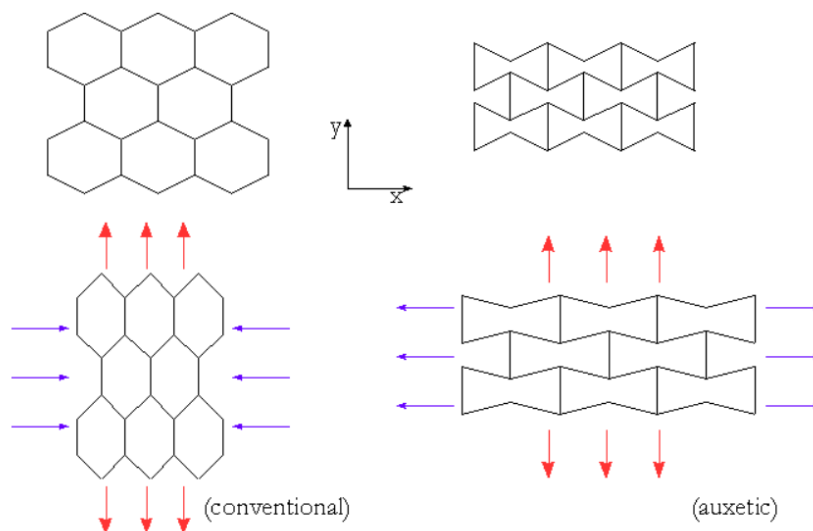
Με την άνοδο της τεχνολογίας ο άνθρωπος κατάφερε να δημιουργήσει σύνθετα υλικά όπου επιτυγχάνουν ιδιότητες που δε συναντιούνται στη φύση. Αυτό το διευρυμένο φάσμα πήρε την ονομασία μεταϋλικά. Πιο συγκεκριμένα η αρχή αυτής της ιδέας πηγαίνει πίσω στον 4<sup>ο</sup> αιώνα. Όμως αυτές οι βάσεις των μεταϋλικών προέκυψαν από συνδυασμό διάφορων μελετών που μεταξύ τους δεν συνδέονταν μέχρι και τον 19<sup>ο</sup> αιώνα, όπου ξεκίνησε να δομείται μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα που βασιζόταν σε μηχανολογικές αρχές χάρις της ανάπτυξης του μηχανολογικού κλάδου. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το 1904, όπου ο Lamp διερευνούσε την ύπαρξη της αρνητικής ταχύτητας σε δονούμενες πλάκες. Έτσι έγινε μια πρώτη επιστημονική επαφή με τα μηχανικά μεταυλικά. Πλέον είναι γνωστό ότι ένα τέτοιο φαινόμενο οφείλεται σε αρνητικούς δείκτες διάθλασης στα μέσα διάδοσης, με απλά λόγια ένα υλικό που τα χαρακτηριστικά του να αποτελούνται από αρνητικό συντελεστή όγκου και πυκνότητας μάζας. Στη συνέχεια πολύ κομβικό σημείο αποτέλεσε ο Victor Veselago το 1967 που μελετούσε τα αντιδιαισθητικά φυσικά χαρακτηριστικά, δηλαδή η αρνητική διάθλαση, απέδειξε ότι στην θεωρία μπορούσαν να υλοποιηθούν. Κι άλλοι επιστήμονες στην συνέχεια έκανα βήματα στην ανάπτυξη αυτού του κλάδου και στο τέλος του 20<sup>ου</sup> αιώνα και αφού διευρύνθηκε το πεδίο δώσανε και τον τίτλο μεταϋλικά. Αυτός ο τίτλος προέρχεται από το ελληνικό πρόθεμα «μετά», όπου δείχνει ότι οι ιδιότητες τους, μηχανικές, θερμικές ή ηλεκτρομαγνητικές, ξεπερνάνε αυτές των υλικών που μέχρι τότε ήταν διαθέσιμες στον άνθρωπο.

Όπως και αρκετές επιστήμες δεν έχει καθοριστεί ένας συγκεκριμένος παγκόσμιος αναγνωρισμένος ορισμός για να περιγράψει το τι σημαίνει μεταϋλικά, όμως είναι ευρεία αναγνωρίσιμο πως όσα υλικά ανήκουν σε αυτή την κατηγορία έχουν κάποια κοινά γνωρίσματα όπως ότι ιδιότητες που τα αναγνωρίζουν μπορούν να καλύψουν ανάγκες πέρα από αυτές των χαρακτηριστικών της πρώτης ύλης τους, καθώς το τελικό αποτέλεσμα περιλαμβάνει αρνητικές τιμές, σύμφωνα και με τον Kadlic et al.. Πλέον είναι εφικτό να δημιουργηθούν μηχανικά υλικά με ιδιαίτερες τιμές στους λόγους ανθεκτικότητας/ πυκνότητας, η αρνητική με την μεταβλητή ακαμψία, η αρνητική συμπίεστικότητα, ακαμψία υπό ογκομετρική συμπίεση αλλά απορροφητικότητα υπό διατμητικό φορτίο με αρνητικό ή μηδενικό λόγο Poisson (αυξητικό) ή δυναμικές, εξαρτώμενες από τη συχνότητα μηχανικές ιδιότητες.

Οι τελευταίοι χρησιμοποιούν μηχανισμούς συντονισμού για να λάβουν, για παράδειγμα, συνδυασμούς αρνητικής και ανισότροπης πυκνότητας μάζας, αρνητικής ακαμψίας και περιστροφικής αδράνειας ή ροπής αδράνεια σε ελαστικά μεταϋλικά, και αρνητικούς συντελεστές όγκου και πυκνότητας σε ακουστικά μεταϋλικά. [1].

## 1.2 Αυξητικά υλικά

Όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο ένας από τα βασικά χαρακτηριστικά των μεταϋλικών είναι ο λόγος αύξησης μεταξύ μήκους και πλάτος σε ένα υλικό που υπόκειται σε εφελκυσμό. Αυτό είναι γνωστό και ως αρνητικός λόγος Poisson. Η ιδιότητα που του δίνει την θέση του σε αυτή την κατηγορία είναι επειδή τα φυσικά υλικά όταν τους ασκούνται δύναμη έχουν την τάση να επιμηκύνονται στην μία κατεύθυνση και να σμικρύνονται στην/ στις άλλες. Αυτές οι ιδιότητες σχηματίζονται χάρις την δομή των υλικών, όπου τους δόθηκαν στην κατασκευή του και όχι εκ φύσεως. Για να γίνει καλύτερα αντιληπτό παραθέτουμε μερικά εικονικά παραδείγματα στη συνέχεια.



Εικόνα 1.1 Απεικόνιση υλικών με θετική και αρνητική κατανομή Poisson [13]

Η αναγνώριση αυτών των υλικών με τον αρνητικό δείκτη Poisson έγινε πρώτη φορά από τον επιστήμονα Evans το 1991. Παρότι στα έγγραφα έγινε πρώτη φορά επισημοποίηση τότε, υπάρχουν και παλιότερες μελέτες που αναφέρονται οπότε δε μπορεί να τοποθετηθεί η ανακάλυψη τους σε συγκεκριμένη ημερομηνία. Το άρθρο του κ. Lakes μελετάει τον αφρό πολυουρεθάνης το οποίο κατέχει τέτοιες ιδιότητες το οποίο δημοσιεύτηκε το 1987. Έχουν δημιουργηθεί ποικίλα αυξητικά υλικά από πολυμερή, σύνθετα υλικά, μέταλλα και κεραμικά με διαφορετικές συνθέσεις και γεωμετρίες ύστερα την συνειδητοποίηση του Lake για το πως επιδρά ο αρνητικός δείκτης Poisson στον τεχνητό αφρό πολυουρεθάνης. Οπότε δημιουργείται η παρατήρηση ότι αυτό το αντικείμενο μελέτης έχει απασχολήσει μεγάλο τμήμα της επιστημονικής κοινότητας για επιστήμες όπως η

αρχιτεκτονική, η βιοϊατρική, η βαλλιστική, ο αθλητικός εξοπλισμός, η ρομποτική και πολλοί άλλοι τομείς .

Τα υλικά όπου κατέχουν αυξητικές ιδιότητες έχουν το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό ότι μπορούν να προσαρμοστούν σε ποικίλες εφαρμογές καθώς έχουν ιδιότητες που υπερτερούν των απλών υλικών. Ένα από τα πιο αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά του που το κατέστησε απαραίτητο στις νέες τεχνολογίες είναι η ικανότητα του να προσαρμόζει το εμβαδόν του σε καμπύλες επιφάνειες καθώς μπορεί να επεκταθεί και στις δύο διαστάσεις στον δισδιάστατο χώρο. Αυτό αποτελεί σημαντικό επίτευγμα καθώς με τη χρήση αυτής της ιδιότητας μπορούν να δημιουργηθούν κατασκευές που κατά την κάμψη τους μειώνονται οι στατικές δυνάμεις και δε προκαλούνται αστοχίες στα τοιχώματα. Επίσης η ικανότητα να προσαρμόζεται τόσο καλά αυξάνει αξιοσημείωτα την δυνατότητα απορρόφησης της ενέργειας, δηλαδή των ταλαντώσεων που μπορεί να δημιουργηθούν. Τέλος, το γεγονός ότι απορροφούν κραδασμούς μπορεί να εφαρμοστεί και στην απορρόφηση ακουστικών κυμάτων οπότε να συμβάλλουν και στην ηχομόνωση. Οπότε συμπεραίνουμε ότι οι αυξητικές δομές βρίσκουν πολλές εφαρμογές στην καθημερινότητα, αποτελούν έναν τομέα που χρήζει περισσότερης μελέτης ώστε να αξιοποιήσουμε στο μέγιστο τις δυνατότητες τους. [2]

### 1.3 Αναλογία Poisson

Για να μετρήσουμε την παραμόρφωση των υλικών όταν υπόκεινται σε εφελκυσμό ή συμπίεση έχει δημιουργηθεί η κατανομή Poisson. Αυτή η αναλογία εισάχθηκε πρώτη φορά από τον Γάλλο μαθηματικό Siméon Denis Poisson το 1811, όπου και ονομάστηκε προς τιμήν του.

Ο δείκτης μετράει την παραμόρφωση των υλικών και συγκρίνει την αξονική παραμόρφωση με την εγκάρσια. Οπότε υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\nu = -\varepsilon_{xx}/\varepsilon_{yy}$$

$$\text{Όπου } \varepsilon_{xx} = du_x/dx$$

$$\varepsilon_{yy} = du_y/dy$$

Τα περισσότερα εάν όχι όλα τα φυσικά υλικά ακολουθούν τον κανόνα Poisson, οπότε όταν τους ασκείται εγκάρσια δύναμη υπόκεινται σε διαστολή στον εγκάρσιο άξονα και αντίστροφα συστολή στον οριζόντιο άξονα, οπότε τα μεγέθη  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  είναι ετερόσημα. Για να διασφαλιστεί ότι ο λόγος θα είναι θετικός προστίθεται στον τύπο το αρνητικό πρόσημο όπως παρατηρείται στον τύπο του  $\nu$ . Αυτό το κλάσμα αποτελεί ένα αδιάστατο μέγεθος και συνήθως οι τιμές του κυμαίνονται μεταξύ 0,2 και 0,3 ενώ η μέγιστη τιμή που μπορεί να φτάσει είναι στο 0,5, την οποία κατέχουν τα ελαστικά υλικά καθώς μπορεί να φτάσουν μεγάλες τιμές εφελκυσμού. Στη συνέχεια παραθέτουμε κάποιες ενδεικτικές τιμές του δείκτη Poisson για κάποια ευρεία γνωστά υλικά [8].

Υλικό	Λόγος Poisson
Κράμα αλουμινίου	0.32

Χρυσός	0.42-0.44
Τιτάνιο	0.265-0.34
Σκυρόδεμα	0.1-0.2
Ανοξείδωτος χάλυβας	0.30-0.31
Χαλκός	0.33

Πίνακας 1.1 με ενδεικτικές τιμές Poisson

Στη συνέχεια θα κάνουμε μερικές επεξηγήσεις για κομβικές τιμές του λόγου Poisson.

Στην περίπτωση όπου το κλάσμα ισούται με 0 σημαίνει ότι το υλικό δεν υπέστη καμία αλλαγή στις πλευρικές διαστάσεις του ύστερα της εφαρμογής εφελκυστικών δυνάμεων πάνω του.

Ο λόγος Poisson 0,5 (επίσης γνωστός ως ασυμπίεστος ή διατηρούμενος όγκος) σημαίνει ότι η μείωση του όγκου του στον οριζόντιο άξονα είναι αντιστρόφως ανάλογη με την αύξηση του στον εγκάρσιο άξονα.

Ενώ αντίθετα, άμα ο λόγος Poisson είναι αρνητικός, δηλαδή  $\nu < 0$ , δείχνει ότι η συμπεριφορά του υλικού είναι ασυνήθιστη καθώς διαστέλλεται και στις δύο κατευθύνσεις.

Καθώς μπορούμε να καταλάβουμε αυτή η αναλογία αποτελεί πολύ σημαντικός δείκτης στην μηχανολογικές μελέτες και στην επιστήμη των υλικών γιατί βοηθάει στην πρόβλεψη για το πως θα συμπεριφερθούν τα υλικά κατά την χρήση τους. Η μηχανική συμπεριφορά σε δυνάμεις τάσης, φόρτωσης, συμπίεσης και κάμψης αποτελεί σημαντικό παράγοντα κατά την επιλογή υλικών για μια εφαρμογή.

#### 1.4 Συντελεστής Young Modulus

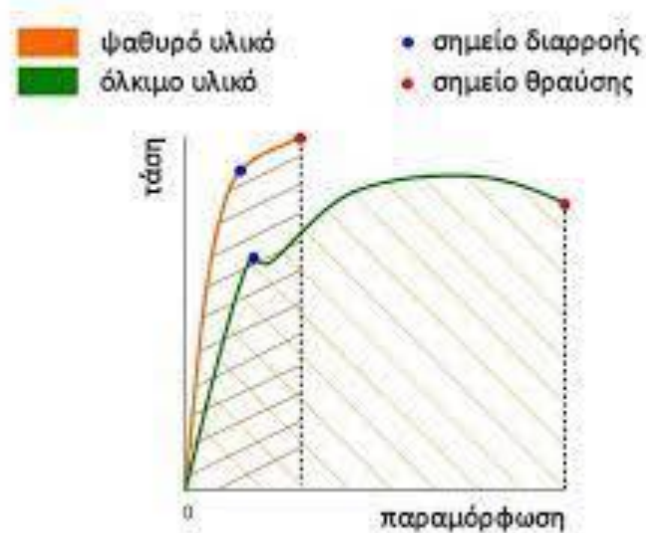
Ο Thomas Young ήταν γνωστός γιατρός και φυσικός με αγγλική προέλευση όπου έζησε τον 18ο αιώνα. Μία από τις μεγάλες συνεισφορές του στην επιστήμη ήταν η καθιέρωση του ομώνυμου δείκτη, συντελεστή Young  $\nu$  όπου δείχνει τις ελαστικές ιδιότητες ενός στερεού υλικού όπου υπόκειται σε τάσεις ή συμπίεση προς μία ορισμένη κατεύθυνση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η μεταλλική ράβδους όπου υπόκειται σε εφελκυσμό ή συμπίεση στον έναν άξονα σε βαθμό όπου στη συνέχεια μπορεί να επανέλθει στο φυσικό του μέγεθος χωρίς εξωτερική δύναμη. Ο συντελεστής αυτός δείχνει την ικανότητα ενός σώματος να απορροφήσει αλλαγές από το εξωτερικό του περιβάλλον, δηλαδή διαμήκη τάση ή συμπίεση.

Επίσης μπορεί να βρεθεί στην βιβλιογραφία να αναφέρεται ως δείκτης ελαστικής ικανότητας των υλικών, και υπολογίζεται ως τη διαμήκη τάση διαιρούμενη από την παραμόρφωση. Η τάση και η καταπόνηση μπορούν να περιγράφουν ως εξής στην περίπτωση μιας μεταλλικής ράβδου υπό τάση.

Στο παράδειγμα όπου έχουμε μια μεταλλική ράβδο με εμβαδόν διατομής ίσο με  $A$  όπου του ασκείται μια δύναμη  $F$  στα δύο άκρα, η ράβδος θα επεκταθεί και από εκεί που είχε ένα αρχικό μήκος  $L_0$  θα προσαρμοστεί σε ένα καινούριο  $L_n$ , ενώ η διατομή θα γίνει  $A_n$  (όπου  $A > A_n$ ). Ο συντελεστής ισούται

με το πηλίκο της δύναμης εφελκυσμού που ασκήθηκε για το εμβαδόν της αρχικής διατομής, δηλαδή  $F/A$ . Επίσης σημαντικό μέγεθος είναι και ο λόγος παραμόρφωσης που έχει η ράβδος που υπολογίζεται με την διαφορά αρχικού και τελικού  $L$ , δια το αρχικό μήκος  $(L_n - L_0/L_0)$ . Καθώς το κλάσμα αποτελείται από μέτρηση απόστασης προς μέτρηση απόστασης, ο συντελεστής είναι αδιάστατος. Ο συντελεστής Young μπορεί να γραφτεί μαθηματικά ως

$$\text{Συντελεστής Young} = \text{τάση/παραμόρφωση} = (FL_0)/A(L_n - L_0). [3]$$



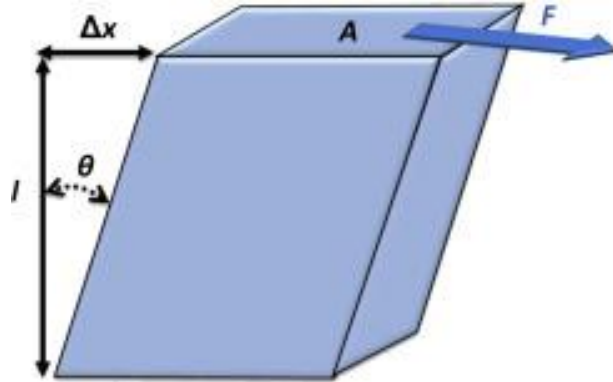
Εικόνα 1.2 Απεικόνιση τάσης παραμόρφωσης για ψαθυρά και όλκιμα υλικά, [14]

Ο δείκτης Young όπως και ο δείκτης Poisson αποτελούν απαραίτητα εργαλεία για την μελέτη σχεδιασμού υλικών και στην κατανόηση της συμπεριφοράς τους σε ενδεχόμενες εφαρμογές. Το πως ανταποκρίνονται στις μηχανικές τάσεις και καταπονήσεις που θα τους ασκούνται δείχνει άμα είναι κατάλληλα υλικά για την εφαρμογή που θέλουμε για τις δομές και τα εξαρτήματα, καθώς και το πότε χρειάζεται να γίνει αντικατάσταση ενός τμήματος. Οπότε συμπεραίνουμε ότι η συμβολή του Young ήταν μεγάλη στον κλάδο της μηχανικής επιστήμης.

## 1.5 Μέτρο διάτμησης (Shear modulus)

Ένα τρίτο σημαντικό μέγεθος που θα μελετήσουμε είναι η αριθμητική σταθερά Shear Modulus, ή αλλιώς γνωστή ως μέτρο διάτμησης, όπου μελετάει τις ελαστικές ιδιότητες ενός στερεού σώματος όταν εφαρμόζονται εγκάρσιες εσωτερικές δυνάμεις. Αυτές οι δυνάμεις μπορεί να προκληθούν από συνθήκες όπως η στρέψη, για παράδειγμα όταν ένας μεταλλικός σωλήνας συστρέφεται γύρω από το κέντρο συμμετρίας του. Σε μια τέτοια εφαρμογή τα στοιχεία της ράβδου μετακινούνται και παραμορφώνονται ελαφριά προκειμένου να ακολουθήσουν την φορά της δύναμης χωρίς να σχηματιστούν ρωγμές στο εσωτερικό μέρος του τμήματος. Το μέτρο διάτμησης δείχνει την ικανότητα

ενός υλικού να αντιστέκεται στις δυνάμεις που του ασκούνται εγκάρσια και αποτελεί δείκτη συμπεριφοράς μόνο για μικρές παραμορφώσεις, οι οποίες όμως να είναι αντιστρέψιμες και το σώμα να μπορεί να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση. Στην περίπτωση όπου οι ασκούμενες δυνάμεις είναι πολύ μεγάλες μπορεί να οδηγήσουν σε μόνιμη παραμόρφωση ή θραύση οι οποίες να είναι μη αντιστρέψιμες. Τέλος ο συντελεστής Shear Modulus μπορεί να συναντηθεί στη βιβλιογραφία και ως δείκτης ακαμψίας [18].



Εικόνα 1.3. Παράδειγμα εφαρμογής εγκάρσιων δυνάμεων σε σώμα κύβου, όπου μέτρο διάτμησης. F είναι η δύναμη, A είναι η περιοχή, Δx είναι η μετατόπιση, l είναι το αρχικό μήκος και θ είναι η γωνία μετατόπισης.

$$\mu = \frac{\text{Shear Stress}}{\text{Shear Strain}}$$

$$\mu = \frac{F}{A * \theta}$$

Ο μαθηματικός τύπος δείχνει ότι το μέτρο διάτμησης ισούται με τη διαίρεση της ασκούμενης τάσης δια τη διατμητική τάση. Η διατμητική τάση, με τη σειρά της, είναι ίση με τη δύναμη διάτμησης F διαιρούμενη με την περιοχή A παράλληλη και στην οποία εφαρμόζεται, ή F/A.

Το λεγόμενο μέγεθος διατμητική τάση, ή αλλιώς η σχετική παραμόρφωση, είναι η ποσοτικοποίηση της αλλαγής της γεωμετρίας και μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά με τριγωνομετρικούς τύπους, την εφαπτόμενη της γωνίας θ (tanθ) η οποία δηλώνει το μέγεθος της αλλαγής στις 90° ή δεξιά, γωνίες του λεπτού αντιπροσωπευτικού κυβικού όγκου του υλικού. Μαθηματικά, η διατμητική τάση εκφράζεται ως tan θ ή το ισοδύναμό της, εξ ορισμού, x/y. Ο ίδιος ο συντελεστής διάτμησης μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά ως μ.

Ο προκειμένου μαθηματικός τύπος περιγράφει μια συγκεκριμένη περίπτωση του κανόνα ελαστικότητας του Hooke. Το κλάσμα αποτελείται από τον συντελεστή (μονάδα δύναμη επί επιφάνεια) προς τον παρονομαστή (αδιάστατο μέγεθος) το τελικό κλάσμα θα έχει τις μονάδες του

συντελεστή. Στο αγγλικό σύστημα δυστυχώς δεν έχουν μάθει να χρησιμοποιούν ακόμη το διεθνές σύστημα μονάδων SI οπότε δυστυχώς εκφράζεται σε μονάδες λιβρών ανά τετραγωνική ίντσα, όπου για συντομία μπορεί να συναντηθεί και ως psi. Σε μεγάλο τμήμα του κόσμου για να υπάρχει μια κοινή αρχή για συνεννόηση χρησιμοποιούμε τα newton ανά τετραγωνικό μέτρο (N/m<sup>2</sup>). Για παράδειγμα για να έχουμε μια μονάδα σύγκρισης παραθέτουμε τις τιμές του αλουμινίου όπου ο συντελεστής διάτμησης του είναι περίπου 3,5x10<sup>6</sup> psi ή αλλιώς 2.4x10<sup>10</sup> N/m<sup>2</sup>. Σε αντίθεση ο χάλυβας αποτελεί ένα πολύ πιο άκαμπτο υλικό καθώς η διατμητική του τάση είναι τρεις φορές μεγαλύτερη από αυτή του αλουμινίου.

$$\mu = \rho * Vs^2$$

Το  $\mu$  είναι γνωστό όπως αναφέραμε και ως συντελεστής ακαμψίας. Οι μετρήσεις μπορούν να γίνουν είτε σεισμικά είτε στο εργαστήριο. Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφέρουμε τη διαφοροποίηση που μπορεί να υπάρχει καθώς οι πρώτες ενδέχεται να είναι μεγαλύτερες από ότι στο εργαστήριο. Αυτό συμβαίνει επειδή οι σεισμικές καταγραφές υλοποιούνται κάτω από ελαστικές συνθήκες χαμηλής τάσης. [17]





## Κεφάλαιο 2ο: Εφαρμογές αυξητικών υλικών

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παραθέσουμε διάφορες εφαρμογές των αυξητικών υλικών προκειμένου να σχηματίσουμε μια καλύτερη εικόνα για το ευρύ φάσμα εφαρμογών τους. Όπως αναφέραμε τα αυξητικά υλικά έχουν τις μοναδικές ιδιότητες που χαρακτηρίζονται από τους δείκτες Poisson, Shear Modulus και Young Modulus όπου τα καθιστούν άξια μελέτης. Για να επιτύχουν τις μοναδικές ιδιότητες τους δε βασίζονται τόσο στην επιλογή του υλικού κατασκευής, όσο στον προσεγμένο σχεδιασμό μικρο και μακρο δομής [10].

Χάρεις αυτών των επαυξημένων ιδιοτήτων τους μπορούν να βρουν εφαρμογή σε πολλούς αναπτυσσόμενους κλάδους. Υπάρχουν πολλές χρήσεις για αυξητικά υλικά που αναφέρονται από ερευνητικές μελέτες, όπως εμφυτεύματα οστών, παπούτσια τρεξίματος και αφροί μνήμης σχήματος, αεροδιαστημική μηχανική, λόγω της υψηλής απορρόφησης ενέργειας, της μεταβλητής διαπερατότητας και της αντοχής σε θραύση

### 2.1 Αυξητικά υλικά στην βιοϊατρική

Η βιοϊατρική είναι ένας από τους κλάδους που μπορεί να επωφεληθεί σημαντικά από την δομή των αυξητικών υλικών για πολλούς λόγους. Αρχικά τα υλικά αυτά έχουν υψηλή ανισοτροπία, δηλαδή το πως απορροφούν τις ασκούμενες δυνάμεις. Σε σύγκριση με τις συμβατές δομές, τα αυξητικά υλικά μπορούν να απορροφήσουν έως και 160% περισσότερη δύναμη, καθιστώντας τα πολύ σημαντικά για την δημιουργία ανθεκτικών εργαλείων. Από εκεί και πέρα οι υπόλοιπες θετικές τους ικανότητες μπορούν να αξιοποιηθούν διαφορετικά ανάλογα με το άμα εφαρμόζονται σε εμφυτεύματα ή σε κατασκευή πρόσθετων μελών

#### 2.1.1 Εμφυτεύματα

Όπως προ αναφέρθηκε ένας κλάδος που μπορεί να επωφεληθεί από τα αυξητικά υλικά είναι η παραγωγή εμφυτευμάτων, δηλαδή η αντικατάσταση των φθαρμένων οστών από ανθρώπινα παρασκευάσματα. Τα καινούρια μέλη θα έχουν την ικανότητα να στηρίζουν την μηχανική των ιστών, να υποστηρίζουν ευεργετικά το ανθρώπινο σύστημα χάρις της αντοχής του και της απορρόφησης των κραδασμών, αλλά και επίσης λόγω της μειωμένης επιφάνειας τους να συμβάλουν στην προσπάθεια πολλαπλασιασμού των κυττάρων του οργανισμού.

Χάρης της ικανότητας τους να προσαρμόζονται αρμονικά στο περιβάλλον τους, μπορώντας να καλύψουν καμπύλες επιφάνειες με την επέκταση και στις δύο διαστάσεις, μπορούν να μιμηθούν την μηχανική συμπεριφορά ενός ιστού ξενιστή και να βοηθήσει στον σχηματισμό του οστικού ιστού.

Τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν χρειάζεται να μην οξειδώνονται με τα εσωτερικά υγρά του οργανισμού. Μια διαδεδομένη επιλογή υλικού είναι το κράμα τιτανίου και ο ανοξείδωτος χάλυβας λόγω και της υψηλής αντοχής τους και της βιοσυμβατότητας τους. Ένα σημαντικό πρόβλημα που αντιμετωπίζουν αυτά τα υλικά είναι η μηχανική αντοχή τους, που μπορεί να προκαλέσει πρόβλημα μεταξύ στην αρμονική συνύπαρξη του ξένου σώματος στον οργανισμό, η οποία μπορεί να καταλήξει στην απορρόφηση όλης της δύναμης από τα εμφυτεύματα αντί να γίνει σωστός καταμερισμός και στο

υπόλοιπο σύστημα. Σαν αποτέλεσμα η θωράκιση της πίεσης μπορεί να προκαλέσει μείωση της οστικής απορρόφησης, άσηπτη χαλάρωση των εμφυτευμάτων και χρόνιο πόνο στους ασθενείς.

Μέσα από πολλές μελέτες γίνεται μια προσπάθεια των επιστημόνων να βρεθεί λύση σε αυτό το πρόβλημα μειώνοντας τις ασκούμενες τάσεις και πιέσεις στα εμφυτεύματα. Μία κατεύθυνση που έχουν στραφεί οι επιστήμονες για να επιλύσουν το πρόβλημα είναι η αντικατάσταση των χύδην υλικών από πορώδες ύλη, αλλά εκεί υπάρχει ο κίνδυνος για τη δημιουργία εσωτερικών ρωγμών, ή όπως αλλιώς τα ξέρουμε, κατάγματα. Μέσα από αυτή την αναφορά μπορούμε να καταλάβουμε πόσο μεγάλη θα μπορούσε να είναι η συμβολή των αυξητικών δομών στην επίλυση του προβλήματος με τα εμφυτεύματα.

Ένας από τους λόγους που δεν έχει γίνει ευρεία η εφαρμογή τους είναι πως η κατάλληλη κατασκευή αποτελεί ακριβή επένδυση λόγω της πολύπλοκης φύσης της και πως χρειάζεται περισσότερη μελέτη. Χάρης όμως την εξέλιξης της τεχνολογίας της παραγωγής προσθέτων ο κλάδος έχει εξελιχθεί και η διαδικασία έχει γίνει πιο προσιτή. Οπότε ο κλάδος της παραγωγής προσθέτων έχει ενταχθεί στον κλάδο της βιοϊατρικής κατασκευάζοντας πορώδη οστικά εμφυτεύματα, όπως εμφυτεύματα μηριαίου οστού και βίδες οστού.

Λόγω της σημασίας του θέματος, αρκετοί ερευνητές προσπάθησαν να επανεξετάσουν την εφαρμογή μεταλλικών και αυξητικών δομών για διάφορους στόχους.

### 2.1.2 Τεχνητά μέλη

Η δεύτερη κατηγορία της βιοϊατρικής που θα μελετήσουμε έχει να κάνει με την εφαρμογή των αυξητικών υλικών για την Παρασκευή τεχνητών μελών. Αντίστοιχα και σε αυτό τον κλάδο η άνοδος της τεχνολογίας έκανε δυνατό την παρασκευή βοηθητικών εξωτερικών μελών για τους ανθρώπους προκειμένου να προσφέρουν λειτουργικότητα και άνεση με την χρήση μεταλλικών. Όπως είδαμε αυτά τα υλικά κατέχουν την ικανότητα του αρνητικού δείκτη Poisson. Αυτό μπορεί να ωφελήσει και στην απορρόφηση των κραδασμών, αλλά και πολύ σημαντικό στην καλύτερη εφαρμογή του μέλους πάνω στο σώμα του ασθενή και να έχουν μια φυσική αίσθηση.

Σαν προσθετό μέλος ονομάζουμε την παρασκευή βοηθητικών άκρων για άτομα, ή ακόμη και για ζώα, όπου έχουν υποστεί ακρωτηριασμό μέσω ατυχήματος ή ιατρικού προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα μπορεί να προκληθεί από ασθένειες όπως στο κυκλοφοριακό σύστημα, λοιμώξεις, ατυχήματα όπως οι πτώσεις, οι συντριβές και οι ανατινάξεις μπορεί να οδηγήσουν σε αναγκαστική επέμβαση και απομάκρυνση άκρων. Παρότι αυτή η λύση αποτελεί την τελευταία επιλογή των γιατρών, δε παύει να αποτελεί κάτι που μπορεί να συμβεί και να επηρεάσει δραστικά την ζωή ενός ατόμου. Ανάλογα με τη φύση του προβλήματος απαιτείται και διαφορετική προσέγγιση για τον τρόπο σχεδιασμού του τεχνητού μέλους, κάθε οργανισμός έχει τις δικές του γεωμετρίες οι οποίες βέβαια μπορεί να αλλάξουν με την πάροδο του χρόνου.

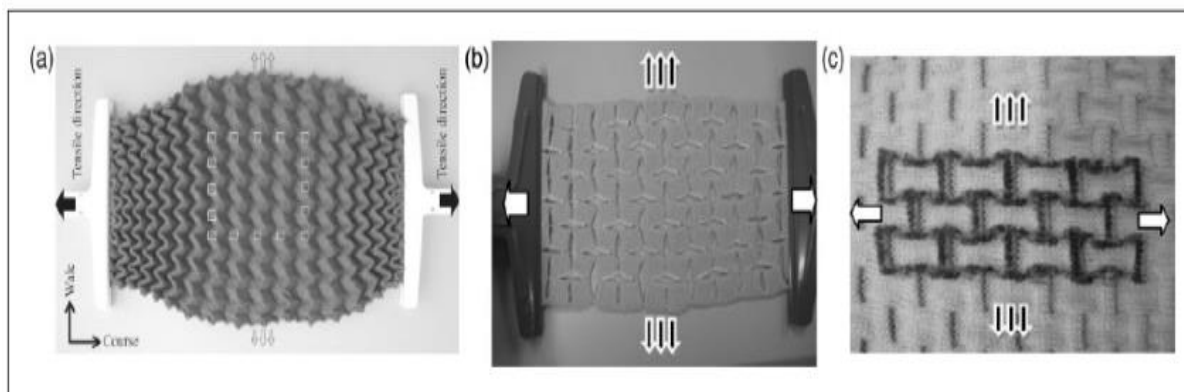
Για την καλύτερη συνεννόηση, τα πρόσθετα μέλη έχουν χωριστεί όμως σε δύο μεγάλες ομάδες που περιλαμβάνουν τα άνω και τα κάτω άκρα. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει την προσθήκη των τμημάτων από το ισχίο και πάνω όπως τον αγκώνα, ενώ αντίθετα τα κάτω άκρα περιλαμβάνουν τα μέλη κάτω από το ισχίο όπως διακνημιαία και τα διαμηριαία. Οι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψιν κατά την δημιουργία ενός τμήματος είναι τόσο οι λειτουργικοί, όσο και οι αισθητικοί και η προσθετική ανάπτυξη. Για αυτό έχουν γίνει πολλές έρευνες πάνω στο αντικείμενο για να βρεθούν περισσότερες λύσεις. Το τελικό αποτέλεσμα προσπαθούμε να ικανοποιεί τις πρωταρχικές ανάγκες λειτουργίας του ασθενή, αλλά και να επαναφέρουν όσο το δυνατόν γίνεται τον παλιό τρόπο ζωής. [11]



Εικόνα 2.1 Απεικόνιση τεχνητού μέλους κάτω άκρου, [15]

## 2.2 Αυξητικά υλικά στον ρουχισμό

Ένας τομέας που μπορεί να αποτελέσει πιο πιθανό να συναντήσει ο μέσος άνθρωπος στην καθημερινότητα του είναι το κομμάτι του ρουχισμού. Τα αυξητικά υλικά θα μπορούσαν να βρουν εφαρμογή στα ρούχα για παιδιά καθώς μπορούν να αυξήσουν την επιφάνεια τους ανάλογα με τις απαιτήσεις που υπάρχουν στον χώρο τους. Όμως ένα ακόμη πιο ενδιαφέρον κομμάτι θα μπορούσε να είναι η εφαρμογή των αυξητικών σε τομείς προστασίας, όπως ο εξοπλισμός στις μοτοσυκλέτες. Έχουν δημιουργηθεί ρούχα από πολυουρεθάνη όπου κατέχουν τις ιδιότητες της διάχυσης της ενέργειας με σκοπό την εξασθένηση των εξωτερικών δυνάμεων. Έχουν πραγματοποιηθεί πειράματα με σκοπό την απόδειξη των αυξητικών υλικών σε αυτό τον τομέα. Συγκεκριμένα είχε εφαρμοστεί εφαρμόζοντας αυξητικούς και συμβατούς αφρούς σε μία καμπύσιμη επιφάνεια σε κεκλιμένο σχήμα. Στις εικόνες μπορούμε να παρατηρήσουμε την συμπεριφορά των δύο υλικών και το πως η αυξητική μορφή αντέδρασε καλύτερα στην εφαρμογή τάσης.[12]

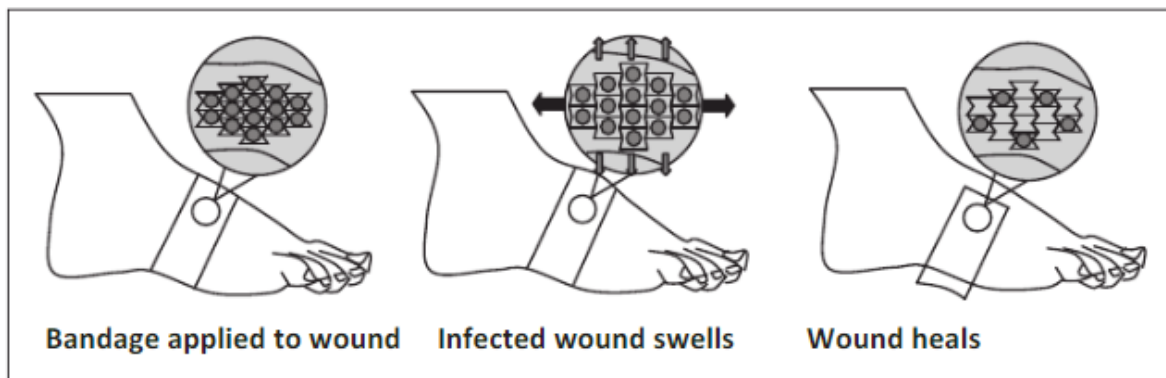


Εικόνα 2.2. Αυξητικά πλεκτά υφάσματα που αναπτύχθηκαν με βάση διαφορετικές γεωμετρικές διατάξεις: (α) Μοτίβο Miura-ori. (β) περιστρεφόμενα τετράγωνα. (γ) επανεισερχόμενα εξάγωνα [16]

Οι πιθανές εφαρμογές αυτή της τεχνολογίας είναι πολλές και η κάθε μία έχει κάτι ξεχωριστό να προσφέρει, έτσι ώστε να αποδείξει ότι έχει χρησιμότητα η μελέτη της. Θα μπορούσαν να δημιουργηθούν ίνες ή νήματα με μικροδομή αυξητικού υλικού όπου θα είχαν την ζητούμενη ελαστικότητα ενώ παράλληλα θα ήταν πολύ ανθεκτικά. Η εφαρμογή τους θα μπορούσε να περιλαμβάνει την σταθεροποίηση των υφασμάτων στην προκαθορισμένη θέση τους έτσι ώστε να γίνουν πιο ανθεκτικά σε σχέση με τα απλά συνθετικά υφάσματα.

Ο προστατευτικός τους ρόλος θα μπορούσε να βρει χρήση και σε αρκετά αθλήματα ή εφαρμογές που περιλαμβάνουν πιθανό κίνδυνο. Αθλήματα όπως η ιπασία, οι αγώνες και το πατινάζ χρειάζεται να εφαρμόζεται προστατευτικά μέσα στους αγωνιζόμενους χωρίς όμως να αυξάνεται δραστικά ο όγκος του εξοπλισμού και να μειώνει τις κινήσεις των αθλητών.

Οπότε προστατευτικά για τις αρθρώσεις του σώματος όπως οι αγκώνες και τα γόνατα θα μπορούσαν να καλυφτούν με προστατευτικά επιθέματα. Μέχρι στιγμής το υλικό που χρησιμοποιείται είναι κατασκευασμένο από αφρό που έχουν όμως χαμηλή διαπερατότητα αέρα, ενώ παράλληλα είναι ογκώδες. Με την τεχνολογία των αυξητικών υλικών θα μπορούσε να σχεδιαστεί μια πιο έξυπνη και μοντέρνα λύση με τα ίδια και καλύτερα αποτελέσματα.



Εικόνα 2.3 Έξυπνος επίδεσμος (Alderson)

Η χρήση αυξητικού υφάσματος για την κατασκευή παιδικών ρούχων μπορεί να είναι μια άλλη εφαρμογή. Οι γονείς μπορεί να γνωρίζουν πόσο γρήγορα μεγαλώνουν τα παιδιά τους. Τα ρούχα που μόλις αγοράστηκαν πριν από αρκετούς μήνες μπορεί να είναι πολύ στενά και να μην ταιριάζουν στα παιδιά τους. Πολλοί γονείς μπορεί να αγοράσουν πιο φαρδιά ρούχα για τα παιδιά τους για να τα αφήσουν να μεγαλώσουν. Ωστόσο, τα πιο φαρδιά ρούχα μπορεί να προκαλέσουν πτώσεις ή τραυματισμό όταν παίζουν τα παιδιά. Τα ρουχαλάκια για παιδιά μπορούν να επιλύσουν αποτελεσματικά αυτό το πρόβλημα. Τα αυξητικά υφάσματα από αναδιπλούμενη δομή διαστέλλονται εύκολα και προς τις κατευθύνσεις μήκους και πλάτους, γεγονός που κάνει τα ρούχα να εφαρμόζουν καλά για τα παιδιά για μεγάλο χρονικό διάστημα, έτσι ώστε οι γονείς να μην χρειάζεται να αγοράζουν συχνά ρούχα για τα παιδιά τους και να εξοικονομούν πολλά χρήματα. Είναι πιο σημαντικό ότι η καλή εφαρμογή μπορεί να επιτευχθεί με ακουστική φθορά, έτσι ώστε τα παιδιά να μην χρειάζεται πλέον να φορούν ρούχα με κακή εφαρμογή.

## Κεφάλαιο 3ο: Χρήση προγραμμάτων προσομοίωσης

### 3.1 Εισαγωγή

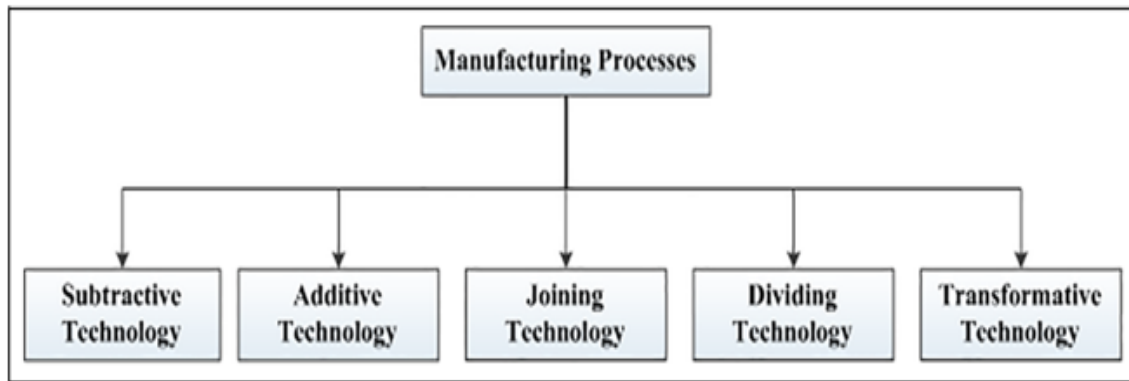
Για να μελετήσουμε την αυξητική δομή σε πιο πρακτικό επίπεδο θα χρησιμοποιήσουμε προγράμματα προσομοιώσεις. Τα προγράμματα προσομοίωσης είναι εφαρμογές όπου σχεδιάστηκαν για να κάνουν μια ψηφιακή εκτίμηση του πως θα αντιδρούσαν και θα σχεδιάζονταν αντικείμενα στον πραγματικό χώρο πριν αυτά όμως δημιουργηθούν. Έτσι μας δίνουν την δυνατότητα να μελετήσουμε τις ιδιότητες τους, να δούμε πως αλληλεπιδρούν, να τα επεξεργαστούμε καλύτερα και να κάνουμε τις κατάλληλες αλλαγές χωρίς να χρειάζεται να διακινδυνεύουμε το κόστος μιας αρχικής μη λειτουργικής έκδοσης.

Αυτές οι προσομοιώσεις έχουν εφαρμογές σε πολλούς τομείς και βιομηχανίες. Στον ιατρικό τομέα, για παράδειγμα, οι γιατροί μπορούν να κάνουν εξάσκηση σε εικονικές επεμβάσεις πριν προχωρήσουν στα χειρουργεία. Οι αρχιτέκτονες μπορεί να χρησιμοποιήσουν προσομοιώσεις για να μοντελοποιήσουν και να οπτικοποιήσουν βελτιωμένα σχέδια εγκαταστάσεων. Καθώς και τα άτομα όπου θα πιλοτάρουν αεροπλάνα μπορούν να χρησιμοποιούν προσομοιωτές για να εκπαιδευτούν. Όλα αυτά αποτελούν λίγα από τα παραδείγματα των χρήσεων των προγραμμάτων προσομοίωσης, οι δυνατότητες είναι απεριόριστες και όλες τους μπορούν να προσφέρουν αξιοσημείωτα στην πρόοδο της τεχνολογίας και στη βελτίωση της καθημερινής ζωής.

### 3.2 Παραγωγή πρόσθετων ( additive manufacturing)

Η κατασκευή προσθέτων, γνωστή και ως additive manufacturing έχει αναπτυχθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια με την άνοδο της τεχνολογίας και την αύξηση της εξοικείωσής των ανθρώπων με τα ψηφιακά προγράμματα. Στην ουσία αποτελεί τον σχεδιασμό ενός αντικειμένου σε πρόγραμμα του υπολογιστή και την εκτύπωση του μέσω τρισδιάστατου εκτυπωτή. Η εκτύπωση γίνεται με το να περνάει ο εκτυπωτής από συγκεκριμένες διαδρομές και να αφήνει στρώσεις υλικού.

Το πως θα εξελιχθεί η τεχνολογία παραγωγής του μέλλοντος εξαρτάται άμεσα από την εξέλιξη που θα έχουμε στον κλάδο της παρασκευής προσθέτων από τρισδιάστατους εκτυπωτές, την γνώση πάνω σε κατάλληλα υλικά και τις αναπτυγμένες δομές που μελετιούνται. Πλέον η αξία του προϊόντος δεν εκτιμάται μόνο από την τιμή, αλλά και από άλλους παράγοντες όπως ο χρόνος ζωής, τον έξυπνο σχεδιασμό, την συμβατότητα των προϊόντων με το περιβάλλον τους, την ταχύτητα κατασκευής, τον χρόνο παράδοσης και άλλα. Πλέον με την αύξηση της πρόσβασης στις τεχνολογίες και την ανάγκη του καταναλωτισμού, έχει αυξηθεί πολύ ο ανταγωνισμός, κάνοντας την κάθε εξέλιξη και διαφοροποίηση σημαντική. Για να γίνει πιο σύντομος ο χρόνος παραγωγής και παράδοσης έχει αναπτυχθεί η νοοτροπία του να γίνονται οι περισσότερες δουλειές από ρομπότ και αυτοματοποιημένα συστήματα. Για να γίνει καλύτερη κατανόηση των απαιτούμενων εργασιών έχει γίνει ένας διαχωρισμός σε πέντε βασικές κατηγορίες, δηλαδή αφαίρεση, πρόσθεση, συναρμολόγηση, διαίρεση και μετασχηματισμό, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1. [5]



Σχήμα 2.1. Διάγραμμα κατηγοριοποίησης εργασιών παραγωγής

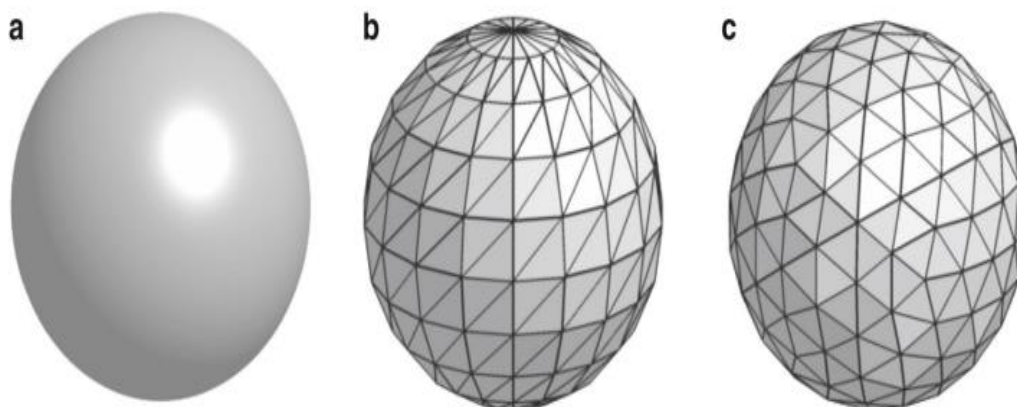
Παρότι η διαδικασία παραγωγής αποτελεί ένα πολύ ενδιαφέρον τομέα, σε αυτή την διπλωματική θα ασχοληθούμε περισσότερο με την παραγωγή προσθέτων και την βελτιστοποίηση τους. Έτσι θα έχουμε την ευκαιρία να μελετήσουμε σε μεγαλύτερο βάθος της εφαρμογές και τα προτερήματα των καινούριων τεχνολογιών

### 3.2.1 Τοπολογική βελτιστοποίηση

Ο τομέας της τοπολογικής βελτιστοποίησης, γνωστός και ως topology optimization, μελετάει το πως ένας χώρος ή κάποια αντικείμενα θα μπορούσαν να βελτιστοποιηθούν και αυτό το καταφέρνει με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Είναι μια μέθοδος που αναπτύσσεται εδώ και πάνω από 50 χρόνια. Παρότι έχουμε κάνει βήματα στον τομέα του σχεδιασμού, υστερούμε ακόμη στο κομμάτι της παραγωγής.

Η νέα πρόοδος που θα βοηθήσει στο γεφύρωμα αυτού του χάσματος της τοπολογικής βελτιστοποίησης, είναι η τρισδιάστατη εκτύπωση. Χάρης αυτή την τεχνολογία μπορούμε να έχουμε πρόσβαση σε τεχνικές που μέχρι τώρα ήταν αδιανόητες από τους συμβατούς τρόπους παρασκευής προϊόντων. Όπως είναι όμως αναμενόμενο, οι καινούριες τεχνολογίες έρχονται με μεγάλο κόστος. Αυτός ήταν ένας βασικός λόγος που καθυστέρησε η εξέλιξη αυτού του τομέα. Πλέον όμως έχει κυριαρχήσει σαν μέθοδος και έχει αρχίσει η μόδα για Παρασκευή μικρών εκτυπωτών οι οποίοι είναι και πιο προσιτή στον απλό πολίτη. Οπότε οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές έχουν ανοίξει τον δρόμο τους στην μικρή βιομηχανία. Όσοι περισσότεροι κόσμος ασχολείται με μια τεχνολογία αυξάνεται και η προσήλωση που δίνεται για την εξέλιξη της, έτσι έγιναν και περιμένουμε να γίνουν ακόμη μεγαλύτερες εξελίξεις στον τομέα. [6]

Η τοπολογική βελτιστοποίηση χρησιμοποιεί την μέθοδο κατασκευής εδάφους που προσεγγίζει αριθμητικά την βέλτιστη δομή τύπου ζευκτών χρησιμοποιώντας πεπερασμένο αριθμό μελών. Αρχικά διαχωρίζει το αρχικό σώμα σε επιμέρους κομμάτια και στη συνέχεια η μέθοδος αφαιρεί τα περιττά μέλη, ενώ ταυτόχρονα διατηρεί σταθερές τις κομβικές θέσεις.



Εικόνα 3.2 Σφαιρική αναπαράσταση (a) αρχικό σώμα (b) διαχωρισμός σφαίρας σε 320 τρίγωνα (c) επαναδιαχωρισμός σφαίρας για βελτιστοποίηση τελικού αποτελέσματος. [6]

Η βελτιστοποίηση μίας μάζας υπό μία μόνο φόρτιση, υπό ελαστικές ή γραμμικές συνθήκες, που υπόκειται σε περιορισμούς τάσης μπορεί να διατυπωθεί ως πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού, το οποίο μπορεί να επιλυθεί χρησιμοποιώντας το  $n$  αλγόριθμο εσωτερικού σημείου .

### 3.2.2 Εφαρμογή προσομοίωσης nTopology

Για να εφαρμόσουμε τοπολογική βελτιστοποίηση στην παρούσα εργασία θα γίνει χρήση του προγράμματος nTopology. Η συγκεκριμένη εφαρμογή ιδρύθηκε το 2015 για να βοηθήσει τους μηχανικούς να επεξεργαστούν περίπλοκες γεωμετρίες ώστε να καταφέρουν να την μελετήσουν, να την βελτιστοποιήσουν και να αυξήσουν την απόδοση της. Το λογισμικό έχει σαν κύριο αντικείμενο την έρευνα νέων σχεδίων προϊόντων και για τη δημιουργία καινοτόμων μεθόδων, ώστε τα σχεδιαζόμενα προϊόντα να έχουν καλύτερες ιδιότητες. Αυτές οι ιδιότητες μπορούν να περιλαμβάνουν την μείωση όγκου, βάρους, καλύτερης αεροδυναμικής, αύξηση ελαστικότητας και άλλα. Αυτές οι δυνατότητες βρίσκουν εφαρμογή σε κλάδους όπως η βιομηχανία αυτοκινήτων, την βιοϊατρική και την καταναλωτική βιομηχανία. Δίνει τα εργαλεία στους μηχανικούς να βελτιστοποιήσουν τις ήδη υπάρχουσες κατασκευές με ευκολία και με πολύ φιλικό προς τον χρήστη περιβάλλον, ενώ ταυτόχρονα με πολύ επιτηδευμένα αποτελέσματα, λαμβάνοντας υπόψιν το υλικό κατασκευής, το ποσοστό μείωσης του υλικού, την επιφάνεια του τελικού αποτελέσματος, την εφαρμογή δυνάμεων και τα σταθερά σημεία.

Το περιβάλλον του nTopology αποτελεί ένα πρωτοποριακό πρόγραμμα, διαχειρίσιμο με ψευδογλώσσα για να είναι φιλικό προς τον χρήστη, ενώ παράλληλα υπάρχει μεγάλη γκάμα από βίντεο και σεμιναρίων με σκοπό την υποστήριξη των ανθρώπων. Καταφέρνει να συνδιάσει σύνθετες γεωμετρίες και με κατάλληλους αλγόριθμους, λαμβάνει υπόψιν τους περιορισμούς που έχει ορίσει ο χρήστης με σκοπό την βελτιστοποίηση του τελικού προϊόντος. Έτσι το τελικό προϊόν έχει πιο όμορφη γεωμετρία, ελαφριά που σημαίνει ότι χρειάζεται λιγότερο υλικό και λιγότερος χρόνος κατασκευής, ενώ ταυτόχρονα μπορεί να υποστηρίξει της αναμενόμενες δυνάμεις που θα του ασκούνται.

Το "nTopology" προέρχεται επίσης από τη σύγκριση της τεχνολογίας μοντελοποίησης με τα παραδοσιακά μοντέλα CAD: Ένα παραδοσιακό μοντέλο CAD περιλαμβάνει στοιχεία "τοπολογίας" όπως ακμές και κορυφές. Όμως σε αυτό το πρόγραμμα γίνεται χρήση υπογεγραμμένων πεδίων απόστασης κυρίως αντί για ακμές και κορυφές, επομένως το "nTopology" σημαίνει επίσης "χωρίς τοπολογία". [7]



## Κεφάλαιο 4ο: Κατασκευή αυξητικής δομής

### 4.1 Επιλογή υλικού κατασκευής

Στην προκείμενο εργασία επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε σαν υλικό κατασκευής το ανοξείδωτο ατσάλι. Το ανοξείδωτο ατσάλι είναι από τους πιο ευρέως χρησιμοποιήσιμους χάλυβες και βρίσκει πολλές εφαρμογές στην καθημερινότητα μας. Έχει εξαιρετικά χαρακτηριστικά μηχανολογικών ιδιοτήτων και είναι εύκολα επεξεργάσιμος. Στη συνέχεια παρουσιάζουμε έναν πίνακα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά και το εύρος των τιμών του [20]

Πίνακας 4.1 Σύσταση ανοξείδωτου χάλυβα

Grade		C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	N
304	min.	-	-	-	-	-	18.0	-	8.0	-
	max.	0.08	2.0	0.75	0.045	0.030	20.0	-	10.5	0.10
304L	min.	-	-	-	-	-	18.0	-	8.0	-
	max.	0.030	2.0	0.75	0.045	0.030	20.0	-	12.0	0.10
304H	min.	0.04	-	-	-0.045	-	18.0	-	8.0	-
	max.	0.10	2.0	0.75	-	0.030	20.0	-	10.5	-

Πίνακας 4.2. Μηχανικές ιδιότητες

Grade	Tensile Strength (MPa) min	Yield Strength 0.2% Proof (MPa) min	Elongation (% in 50 mm) min	Hardness Rockwell B (HR B) max	Hardness Brinell (HB) max
304	515	205	40	92	201
304L	485	170	40	92	201
304H	515	205	40	92	201

Πίνακας 4.3. Φυσικές ιδιότητες

Grade	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Elastic Modulus (GPa)	Mean Coefficient of Thermal Expansion (μm/m/°C)			Thermal Conductivity (W/m.K)		Specific Heat 0-100 °C (J/kg.K)	Electrical Resistivity (nΩ.m)
			0-100 °C	0-315 °C	0-538 °C	at 100 °C	at 500 °C		
304/L/H	8000	193	17.2	17.8	18.4	16.2	21.5	500	720

Πίνακας 4.4. Καμπτικές ιδιότητες

Property	Minimum (S.I.)	value	Maximum (S.I.)	Value	Units (S.I.)
Density	7.85		8.05		Mg/m <sup>3</sup>
Shear Modulus	74		81		GPa
Young's Modulus	190		203		GPa
Poisson's ratio	0.265		0.275		

## 4.2 Χρήση της εφαρμογής προσομοίωσης Inventor

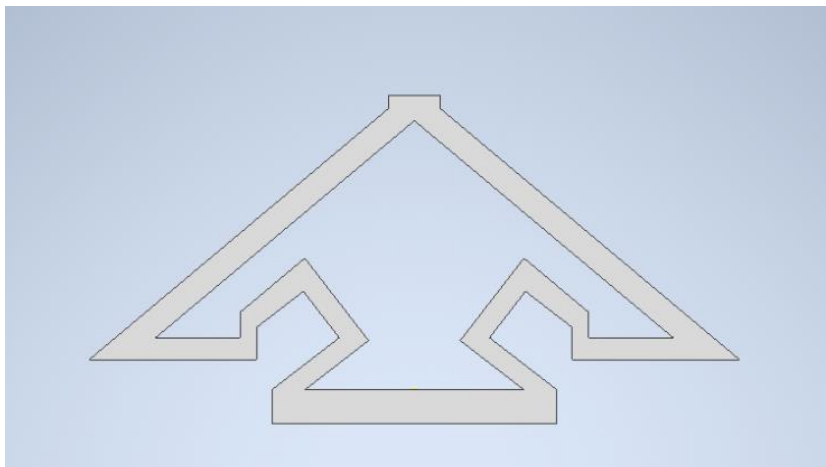
Προκειμένου να δημιουργήσουμε ένα υλικό για βελτιστοποίηση χρειάζεται πρώτα να σχεδιάσουμε ένα αρχικό σώμα/αντικείμενο όπου θα είναι σε μορφή αρχείου όπου να αναγνωρίζεται από το ntopology. Στη συνέχεια παραθέτουμε λίστα με τα είδη αρχείων που είναι κατάλληλα.

<u>File Type</u>	<u>File Extension</u>	<u>Versions</u>
ACIS	.sat and .sab	R1 - 2019 1.0
CATIA v5	.CATpart	V5 R8 - V5-6 R2019
PTC Creo	.prt	1.0 - 6.0
Autodesk Inventor	.ipt	V11 - 2019
Siemens NX	.prt	11 - NX1847
Parasolid	.x_t and .x_b	9.0 - 31.1.188
Solidworks	.sldpart	98 - 2019
STEP	.stp and .step	AP 203, AP 214, AP252

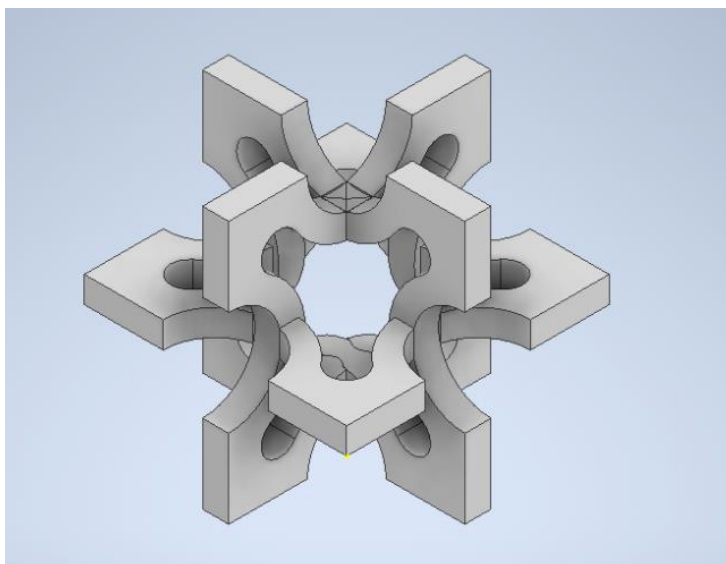
Πίνακας 4.5 Λίστα αρχείων για δημιουργία αρχικού υλικού

Στην συγκεκριμένη εργασία επιλέξαμε να εργαστούμε μέσω της εφαρμογής της Autodesk Inventor με κατάληξη αρχείου .ipt. Σχετικές χρήσιμες πληροφορίες μελετήθηκαν από τους βιβλιογραφικούς συνδέσμους [9] [10]

Με την βοήθεια αυτού του προγράμματος κατασκευάστηκαν αυξητικές δομές για εφαρμογή με επέκταση στον δισδιάστατο χώρο και στον τρισδιάστατο όπως φαίνονται στα σχήματα 4.1 και 4.2.



Σχήμα 4.1 Σχεδιασμός αυξητικού υλικού με επέκταση στον άξονα  $x$  και στον άξονα  $y$



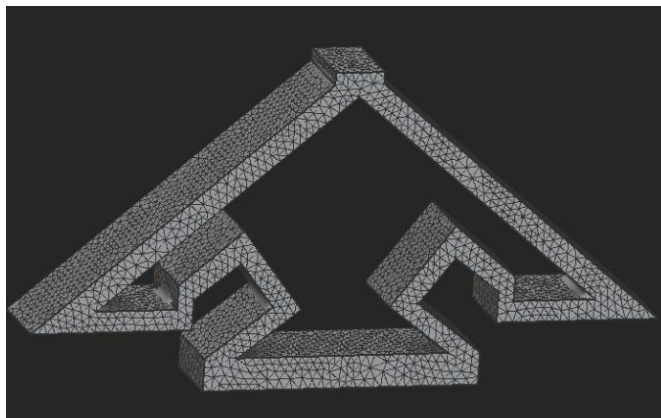
Σχήμα 4.2 Σχηματισμός αυξητικού υλικού με επέκταση στους άξονες  $x$ ,  $y$  και  $z$

#### 4.3 Εισαγωγή και επεξεργασία υλικών στην εφαρμογή προσομοίωσης nTopology

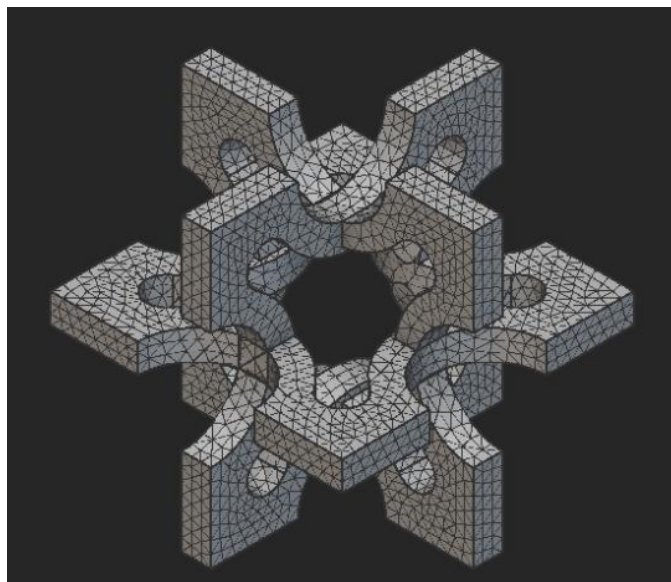
Στη συνέχεια καλούμαστε να επεξεργαστούμε τις δομές με τέτοιο τρόπο ώστε να μειωθεί η μάζα των σωμάτων στα σημεία όπου δεν ασκούνται τάσεις για να δημιουργηθεί ένα τελικό υλικό, πιο ελαφρύ αλλά με τις ίδιες ικανότητες εάν όχι και καλύτερες.

Αρχικά κάνουμε τμηματοποίηση των σωμάτων σε τριγωνικά πλέγματα προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση των δυνάμεων στα επιμέρους σημεία. Επιλέγουμε με την εντολή *mesh* να σχηματιστεί τριγωνική διάταξη με μήκος πλευρών να ανήκει σε μέγεθος τάξης μεταξύ των 0.1 με 0.3 mm. Π

περιορισμός της ελάχιστης πλευράς εισάγεται προκειμένου την πιο γρήγορη επίλυση του προβλήματος καθώς και για πιο ομαλή κατανομή των γεωμετριών.

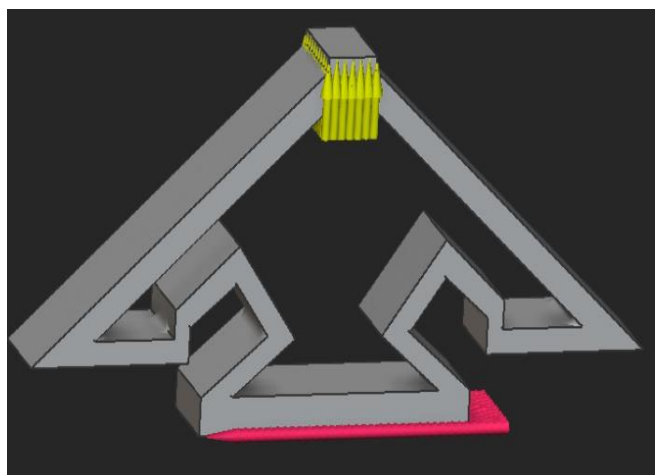


Εικόνα 4.3 Δισδιάστατο σώμα με την εντολή mesh

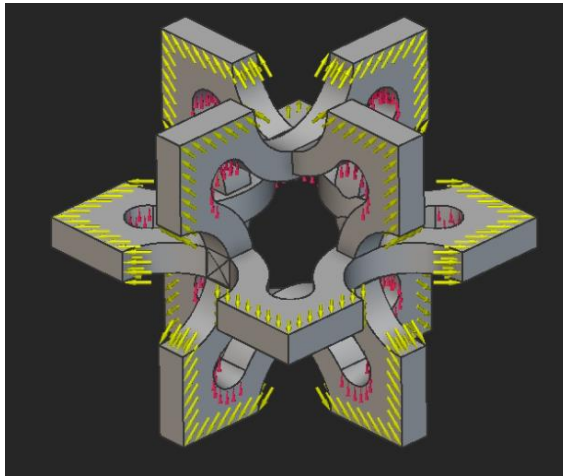


Σχήματα 4.4 Τρισδιάστατο σώμα με την εντολή mesh

Από τα σχήματα 4.3 και 4.4 μπορούμε να δούμε τον διαχωρισμό στη τμήματα που έχει πραγματοποιηθεί. Παρατηρούμε ότι το πλέγμα διακριτοποίησης είναι αρκετά πυκνό ώστε να μπορέσουν να μελετηθούν οι επιμέρους δυνάμεις σε ικανοποιητικό βαθμό.



Σχήματα 4.5 Τοποθέτηση δυνάμεων πάνω στο σώμα



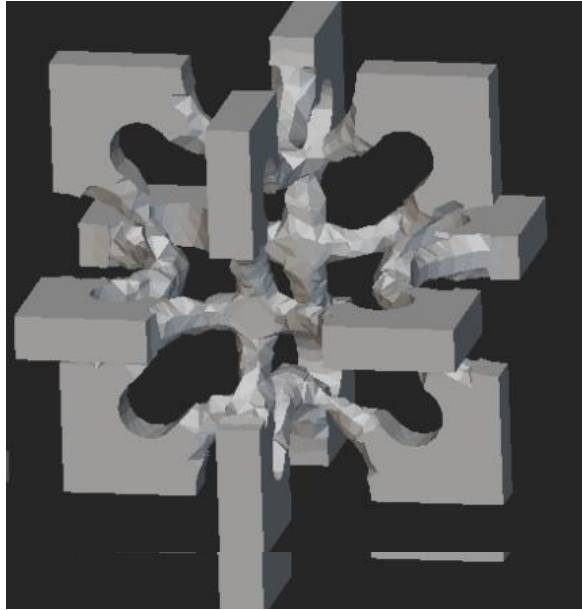
Σχήματα 4.6 Τοποθέτηση δυνάμεων πάνω στο σώμα

Έγινε χρήση και εφαρμογή των δυνάμεων τάσης σε επιλεγμένα σημεία για να δούμε την επίδραση που θα έχουν. Ενδεικτικά χρησιμοποιήσαμε για το σχήμα 4.5 δύναμη τάξης των 100 Newton ενώ για το σχήμα 4.6 δύναμη τάξης των 50 Newton σε κάθε γωνία.

Τα κίτρινα βέλη αναπαριστούν τις δυνάμεις εφελκυσμού, ενώ με κόκκινους δείκτες έχουν σημειωθεί τα σημεία όπου θεωρούμε σταθερά.



Σχήμα 4.7 Μετά από εφαρμογή του topology optimization

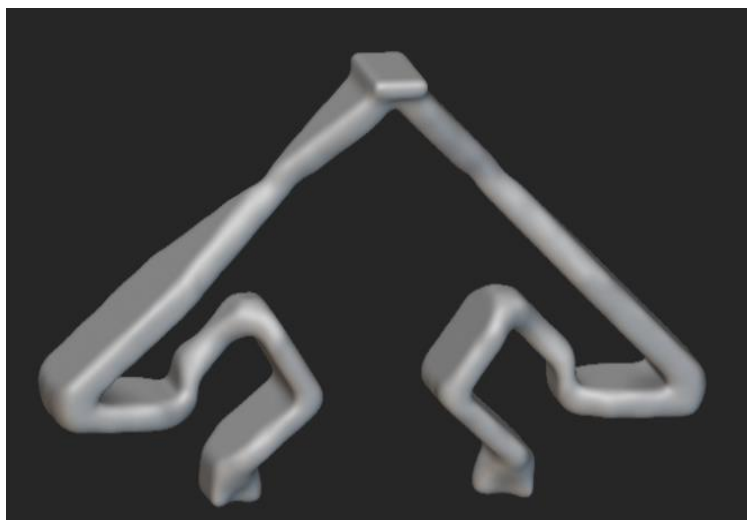


Σχήμα 4.8 Μετά από εφαρμογή του topology optimization

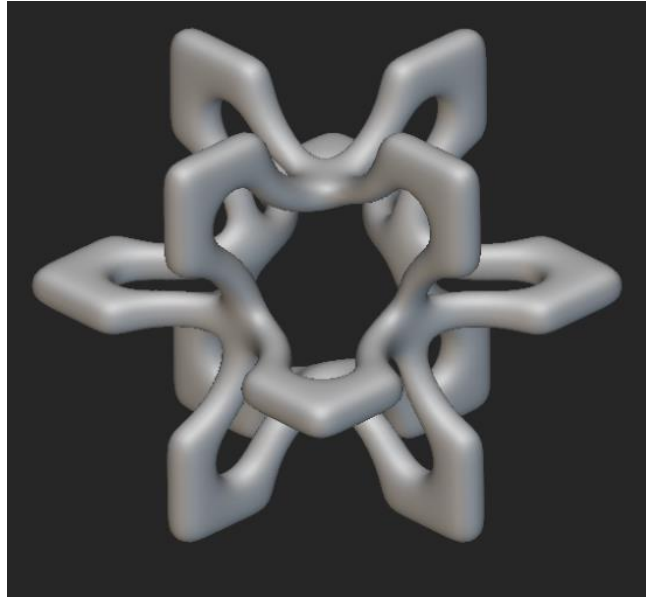
Αφότου έγινε ο διαχωρισμός σε τριγωνικά πλέγματα και η τοποθέτηση των δυνάμεων, επιλέξαμε το υλικό από το οποίο θεωρούμε ότι είναι κατασκευασμένα τα σώματα, για να καθορίσουμε τις μηχανικές τους ικανότητες. Σαν υλικό θεωρήσαμε ότι είναι από ανοξείδωτο ατσάλι (Stainless steel). Το ανοξείδωτο ατσάλι έχει δείκτη Poisson 0.30-0.31 και δείκτη Young Modulus 190-203 GPa.

Στη συνέχεια έγινε αφαίρεση του περιττού όγκου και ομαλοποίηση της επιφάνειας. Βάση των πειραματικών δεδομένων καταλήξαμε ότι το βέλτιστο υλικό όπου να διατηρεί συνέχεια των συνδέσμων έχοντας όμως τον λιγότερο όγκο είναι όταν διατηρεί 40% της μάζας για την πρώτη δομή, ενώ για την δεύτερη περίπου 50 %.

Τα αποτελέσματα μετά την ομαλοποίηση των σωμάτων παρουσιάζονται στη συνέχεια με τις εικόνες 4.9 και 4.10.



Σχήμα 4.9 Παρουσίαση των σωμάτων μετά από μείωση μάζας και ομαλοποίηση επιφάνειας.



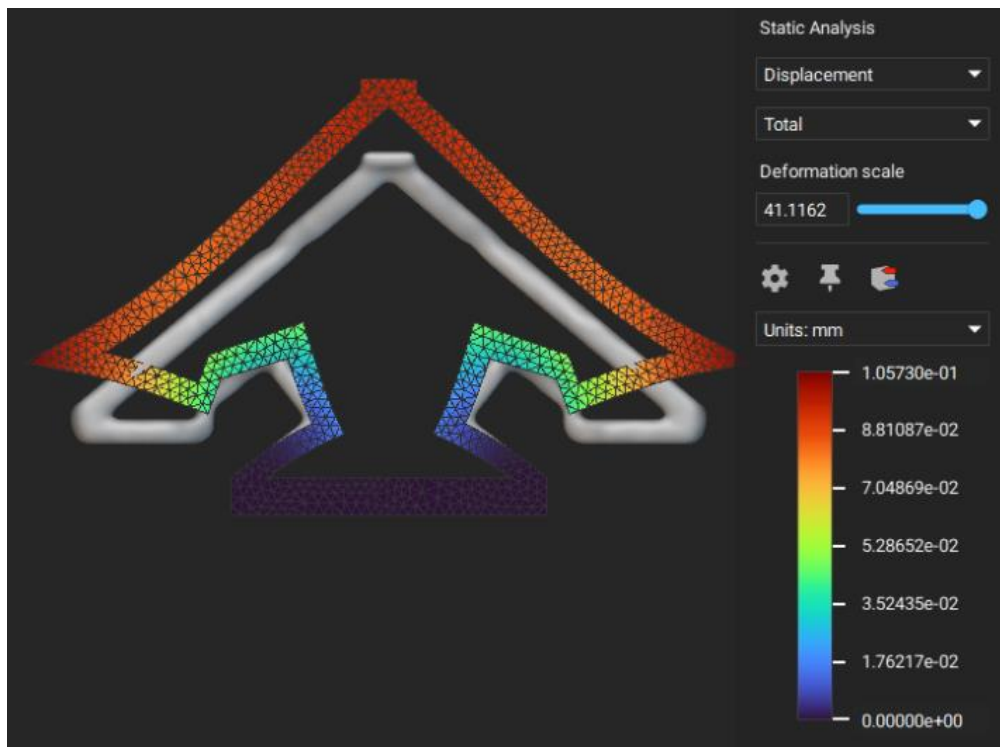
Σχήμα 4.10 Παρουσίαση των σωμάτων μετά από μείωση μάζας και ομαλοποίηση επιφάνειας

Τέλος κρίθηκε σημαντικό να γίνει μία στατική ανάλυση των αποτελεσμάτων για να δούμε πως αντιδρούν τα σώματα σε δυνάμεις εφελκισμού.

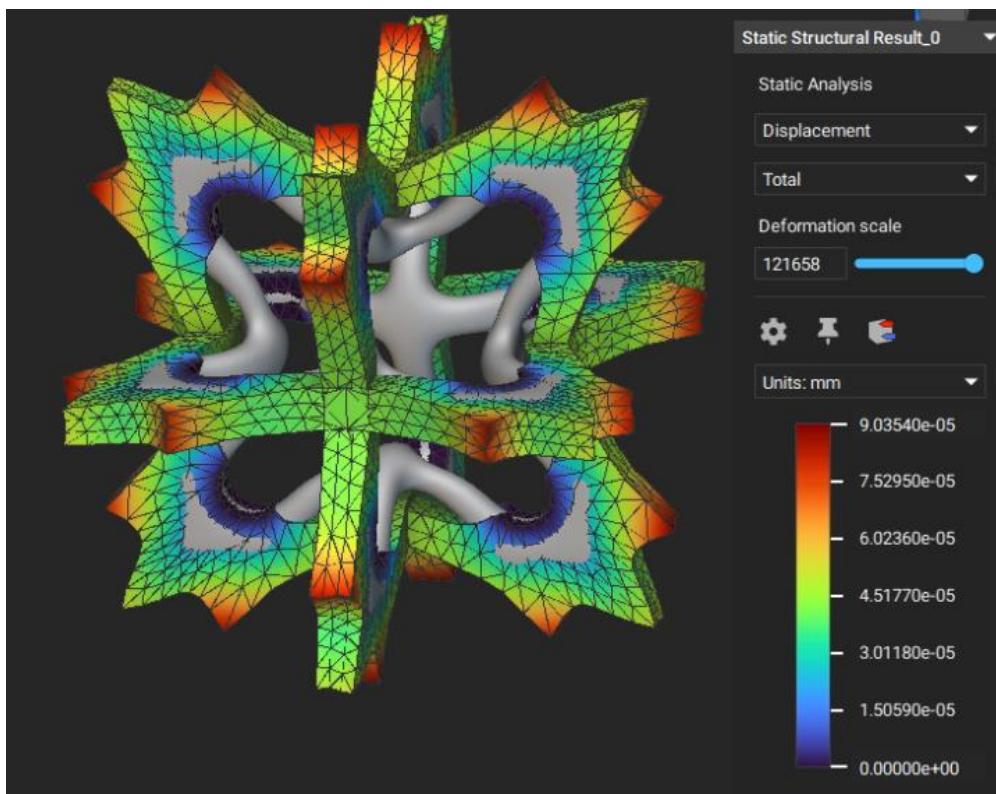
Στη μέθοδο static analysis ορίσαμε τα σώματα όπου θα μελετηθούνε και τις δυνάμεις όπου θα τους εφαρμοστούν. Μετά από την εφαρμογή του μας δίνει την δυνατότητα να δουμε την καταπόνηση που λαμβάνουν τα σώματα ως προς την μετατόπιση (displacement), την ένταση (strain), την τάση (stress) και τις δυνάμεις αντίδρασης (reaction forces). Στη συνέχεια ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της κάθε κατηγορίας.

Αρχικά για την μετατόπιση μπορούμε να δούμε εικονικά πως μετακινείται το σώμα σε σχέση με την αρχική του θέση για αύξηση της δύναμης.





Σχήμα 4.11 Ανάλυση μετατόπισης σωμάτων

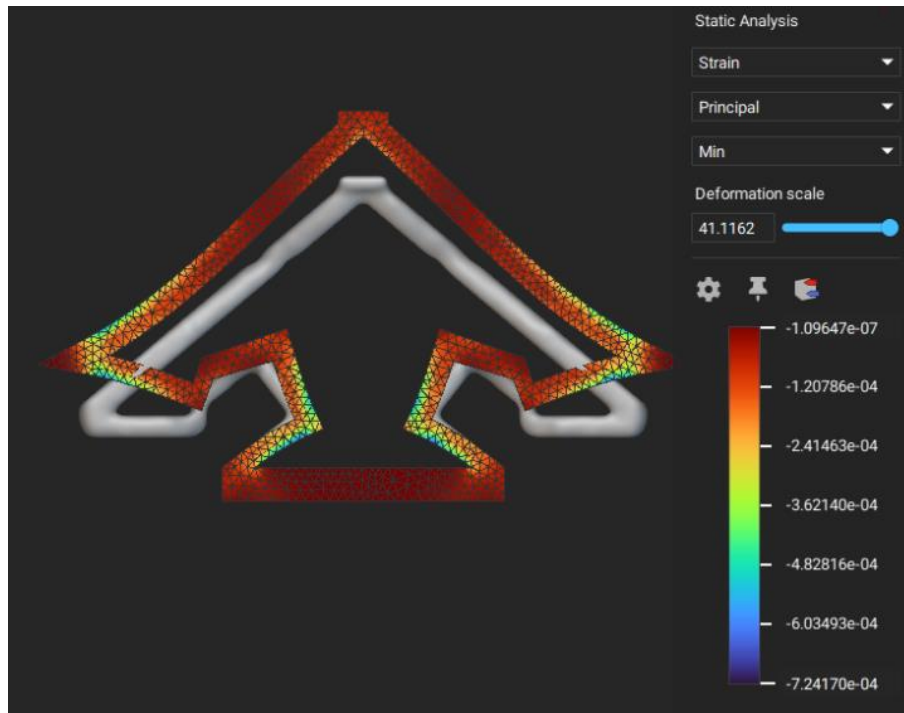


Σχήμα 4.12 Ανάλυση μετατόπισης σωμάτων

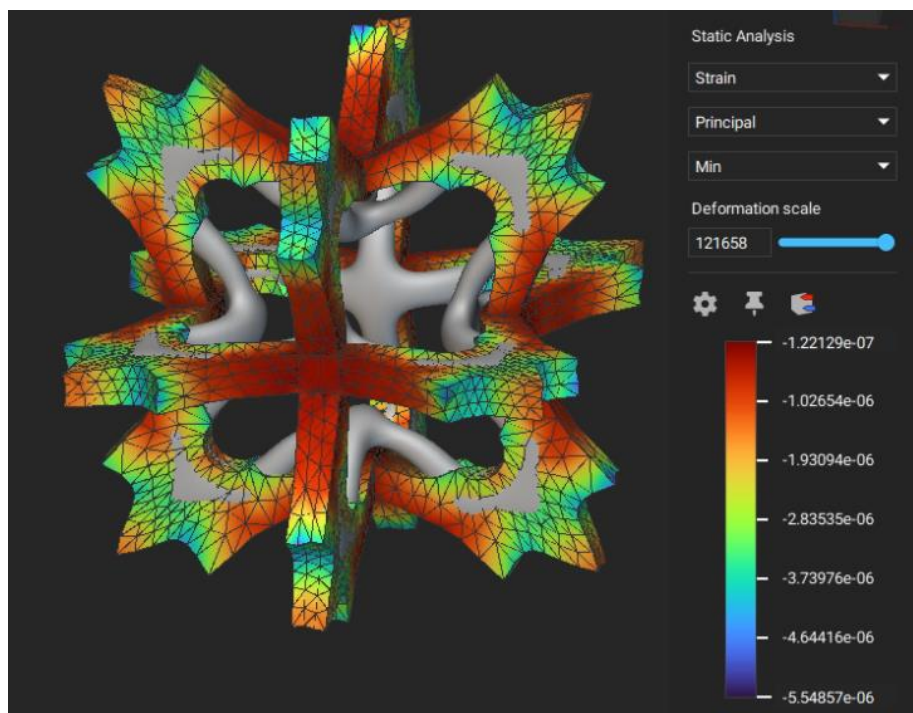
Τα χρώματα αντιπροσωπεύουν την μετατόπιση και μετριοούνται σε χιλιοστά. Παρατηρούμε ότι η μετατόπιση αυξάνεται κυρίως στα σημεία όπου ασκούνται οι δυνάμεις.



Με την ένταση (strain) μπορούμε να παρατηρήσουμε την παραμόρφωση που έχουν τα σώματα για αύξηση των δυνάμεων.



Σχήμα 4.13 Ανάλυση έντασης στο σώμα

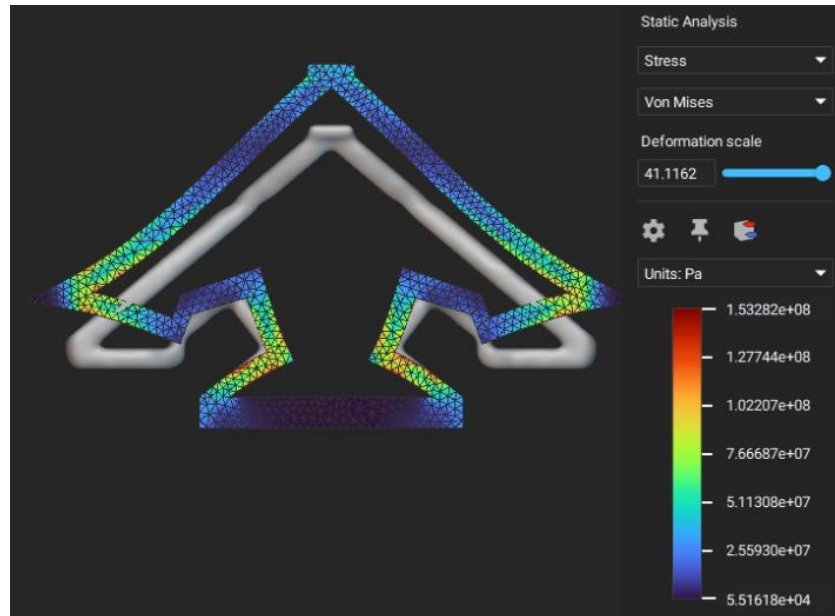


Σχήμα 4.14 Ανάλυση έντασης στο σώμα

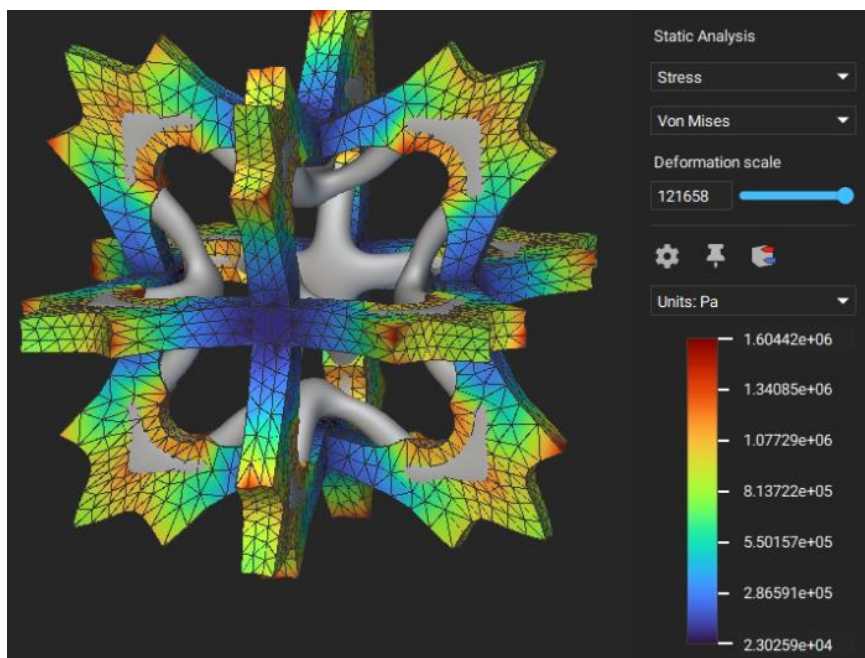
Εδώ παρατηρούμε ότι στο σχήμα 4.13 υπάρχει έντονη αύξηση των τιμών όχι μόνο στα σημεία που ασκούνται οι δυνάμεις αλλά και στις γωνίες δεξιά και αριστερά, ενώ επίσης υπάρχει επίδραση και στη βάση του σχήματος. Για το σχήμα 4.14 αντιθέτως η περισσότερη αύξηση της έντασης παρατηρείται

όχι εκεί που ασκούνται οι δυνάμεις αλλά στα σημεία καμπής όπου υπέρχονται σε παραμόρφωση όπως βλέπουμε με κόκκινο χρώμα.

Η τάση (stress) μελετάει την δύναμη που ασκείται σε ένα σημείο διαιρεμένη με την περιοχή διατομής του υλικού.



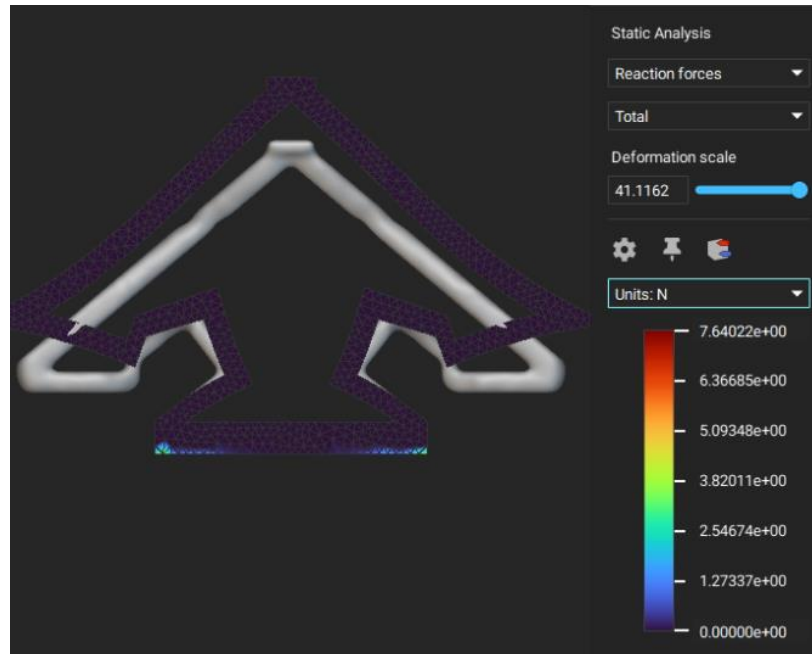
Σχήμα 4.15 Ανάλυση δυνάμεων τάσης στο σώμα



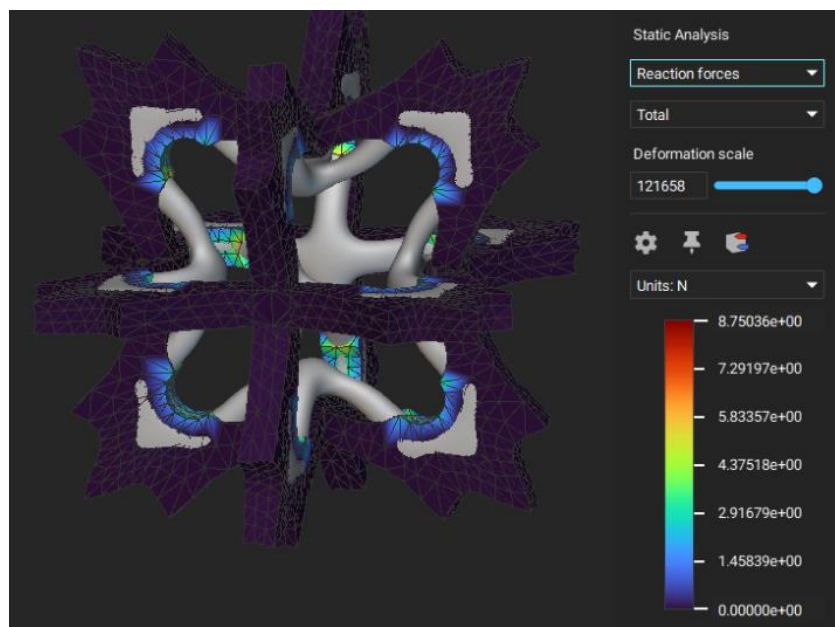
Σχήμα 4.16 Ανάλυση δυνάμεων τάσης στο σώμα

Παρατηρούμε ότι οι τάσεις είναι σχετικά χαμηλές με τη διαφορά όμως ότι αυξάνονται κυρίως στα ενδιάμεσα τμήματα αντί για τις άκρες των γεωμετριών για το σχήμα 4.15 ενώ για το δεύτερο σχήμα περισσότερο στα σημεία επιμήκυνσης.

Τέλος βλέπουμε την επίδραση που έχουν οι δυνάμεις αντίδρασης πάνω στο κομμάτι. Άμα οι δυνάμεις αντίδρασης είναι αρκετά ισχυρές αυξάνεται ο κίνδυνος για αστοχία της δομής.



Σχήμα 4.17 Ανάλυση δυνάμεων αντίδρασης στο σώμα



Σχήμα 4.17 Ανάλυση δυνάμεων αντίδρασης στο σώμα

Παρατηρούμε ότι οι εντάσεις είναι πολύ χαμηλές έως μηδενικές, με μικρή αύξηση στη βάση του σώματος για το Σχήμα 4.16, ενώ για το 4.17 είναι επίσης χαμηλές με μικρή αύξηση στο εσωτερικό των σημείων που ασκούνται οι δυνάμεις.

## Κεφάλαιο 5ο: Δυναμική μελέτη, ιδιοτιμές και ιδιομορφές

Σε αυτή την ενότητα θα μελετήσουμε πως ανταποκρίνεται η αυξητική δομή όταν μια κατασκευή υπόκειται σε ταλάντωση. Προκειμένου να διαπιστώσουμε τις ιδιότητες αυτών των δομών θα χρησιμοποιήσουμε το εμπορικό πρόγραμμα Comsol Multiphysics.

Το λογισμικό COMSOL Multiphysics είναι ένα παγκόσμια γνωστό εργαλείο όταν πρόκειται για προσομοίωση υπολογιστή και εκπαίδευση. Είναι ένα πακέτο με μεθόδους ανάλυσης και μοντελοποίησης συσκευών και διαδικασιών για πολλούς τομείς μηχανικής, αρχιτεκτονικής, εκπαίδευσης και της επιστημονικής έρευνας. Η μοντελοποίηση του επιτρέπει τον πειραματισμό και την δοκιμή των υλικών σε διάφορες συνθήκες για να μελετηθεί το πως αντιδρούν και τι αποτελέσματα να περιμένουμε άμα επιλέξουμε να εφαρμόσουμε στην πράξη τις συνθήκες όπου μελετάμε.

Συγκεκριμένα, το COMSOL Multiphysics είναι ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα που επιτρέπει τον σχεδιασμό και την μοντελοποίηση των κατασκευών, τον καθορισμό των γεωμετριών, των μεταβλητών των ιδιοτήτων όπως τον δείκτη Poisson, Shear Modulus και Young, προκειμένου να παρομοιάζει όσο πιο πιστά γίνεται τις συνθήκες του πραγματικού κόσμου. [19]

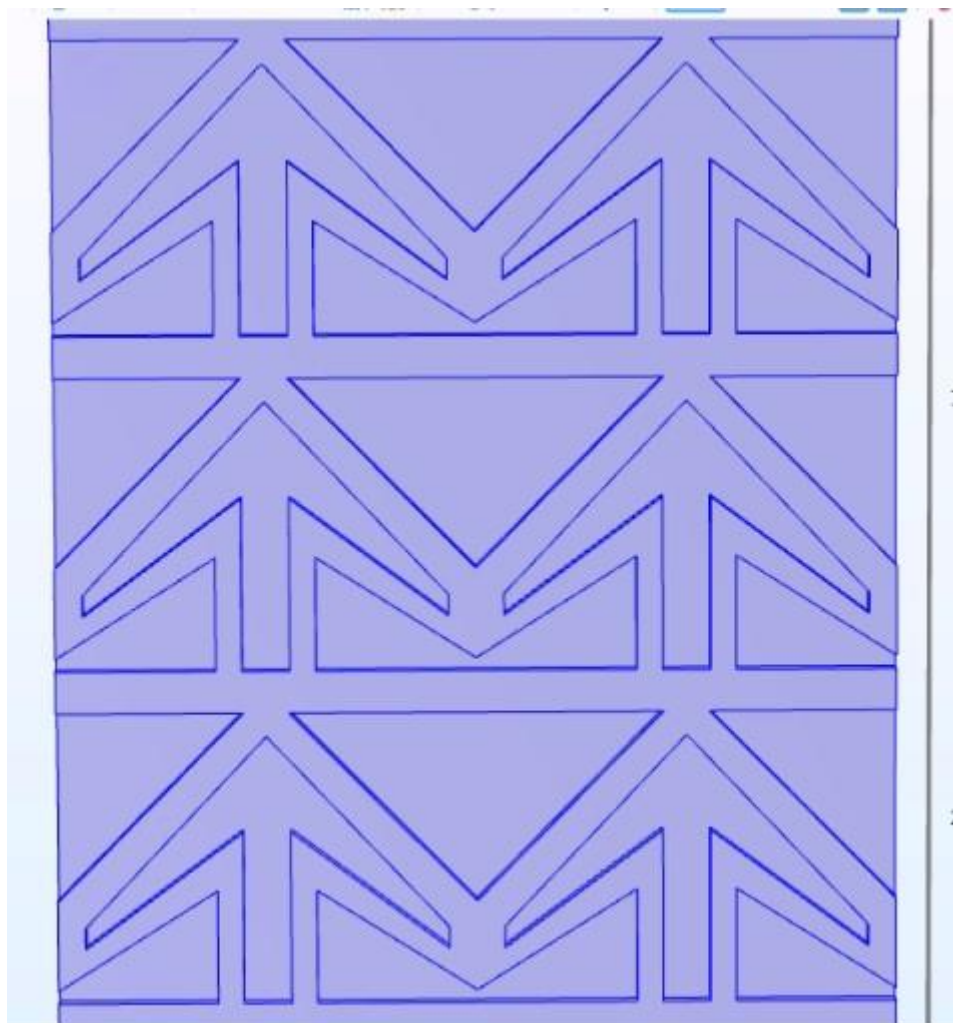
Η συγκεκριμένη μελέτη έγινε με την σημαντική βοήθεια της Μαρίας Στέλλας Δαράκη στα πλαίσιο της συγγραφής άρθρων και την συμπλήρωση της παρούσας διπλωματικής, καθώς και με την αξιοποίηση δεδομένων από δημοσιεύσεις που αναφέρονται στην βιβλιογραφία.

### 5.1 Παρουσίαση και επεξήγηση σχήματος που επιλέχθηκε για ανάλυση

Προκειμένου να μελετήσουμε την συμπεριφορά των αυξητικών δομών κατασκευάσαμε ένα επίθεμα μια δοκού διαστάσεων 25x20x0.5mm. Η συγκεκριμένη δομή αποτελείται από μια συστάδα των γεωμετριών που μελετήσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο όπου εκτείνονται στις δύο διαστάσεις, τον άξονα  $x$  και τον άξονα  $y$ .

Προκειμένου να έχουμε εμφανή επίδραση των αυξητικών ιδιοτήτων αλλά ταυτόχρονα να μη γίνει πολύ πολύπλοκη η κατασκευή επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε 6 (έξι) επαναλαμβανόμενες φορές την γεωμετρία. Στην περίπτωση όπου γινόταν περίπλοκη η δομή θα είχαμε δυσκολίες στην επεξεργασία του από το πρόγραμμα

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε μια απεικόνιση της δοκού σε πρόγραμμα προσομοίωσης.

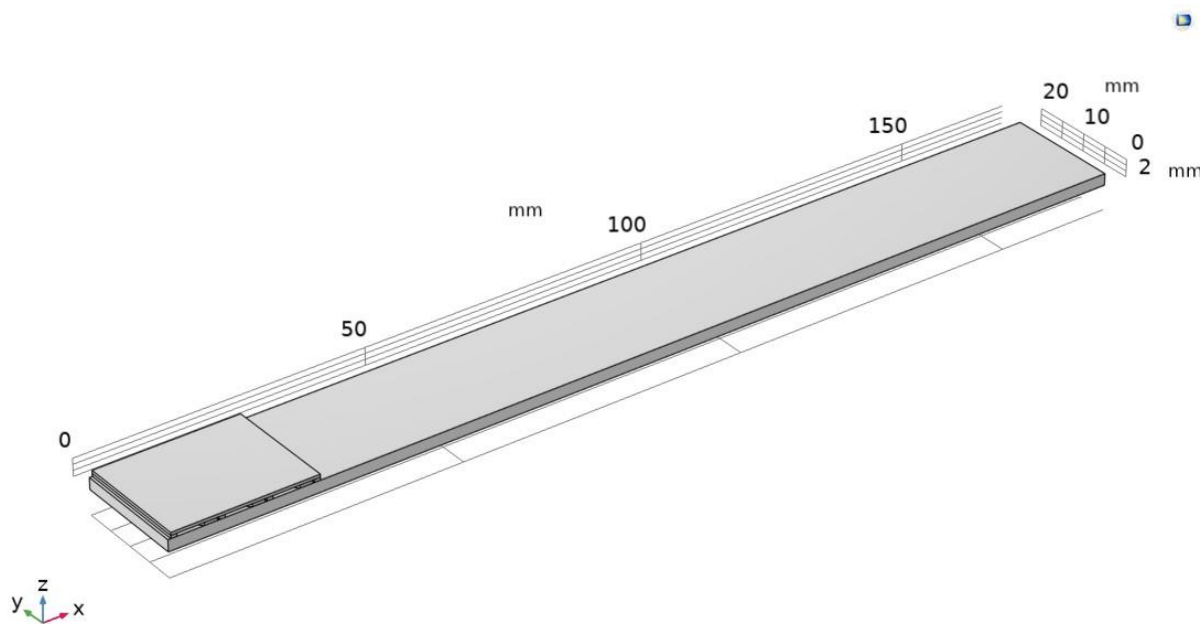


Εικόνα. 5.1 Αυξητική γεωμετρία

## 5.2 Παρουσίαση περιβάλλοντος προγράμματος

Προκειμένου να γίνει η μελέτη δημιουργήσαμε μια κατασκευή που αποτελείται από:

- 1 δοκάρι αλουμινίου, όπου αποτελεί την βάση
- 1 αυξητική δομή όπου είδαμε στην ενότητα 5.1
- 1 πιεζοηλεκτρικό στρώμα



Εικόνα 5.2 Παρουσίαση γεωμετρίας κατασκευής δοκού

Το πρόγραμμα προσομοίωσης Comsol αναπαριστά αυτή την γεωμετρία και ασκεί δύναμη στο δεξιό άκρο, προκειμένου να μελετήσει την συχνότητα (Hz) με την οποία ταλαντώνεται.

Πιο συγκεκριμένα, το πρόγραμμα δίνει αποτελέσματα 4 ιδιοσυχνοτήτων, τέσσερις καμπτικές και δύο στρωφικές.

Επίσης γίνεται ξεχωριστή μελέτη μεταξύ του στρώματος με την αυξητική δομή και της περίπτωσης όπου έχουμε ομογενοποιημένο στρώμα.

Ως ομογενοποιημένο στρώμα ονομάζουμε ένα στρώμα υλικού, στην συγκεκριμένη περίπτωση δοκό, όπου του έχουμε δώσει τις ίδιες ιδιότητες με την αυξητική δομή ( πχ αρνητικό λόγο Poisson ), ενώ όμως η γεωμετρία του είναι μίας πλάκας.

Τα νούμερα για τις τιμές Poisson ratio, Young Modulus E και την πυκνότητα τα αποκτήσαμε από το επιστημονικό άρθρο [22]. Συγκεκριμένα για την πυκνότητα θεωρήσαμε ότι το πάχος του στρώματος είναι πολύ λεπτό (0.5 mm) οπότε από τον πίνακα φαίνεται ότι το ειδικό βάρος είναι 0,188

Auxetic and Homogeneous Layer		
Young Modulus E	Poisson Ratio	Density
700MPa	-0.09	188 kg/m <sup>3</sup>

Πίνακας.5.1 Τιμές δεικτών



### 5.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στην παρούσα μελέτη θα ασχοληθούμε με την δεύτερη καμπτική ιδιοσυχνότητα, καθώς αυτή είναι η ιδιοσυχνότητα που αντιπροσωπεύει τιμές που μπορούν να βρεθούν σε αντιστάσεις και σε πηνία στην αγορά. Αυτό έχει αποδειχτεί από θεωρητικές και πειραματικές μελέτες.[21] [22]

Τα συστήματα διαχωρίζονται σε ανοιχτά κυκλώματα (open circuit) καθώς και σε παραδιακλάδωσης (shunt circuit).

Τα ανοιχτά συστήματα καλωδίωσης ορίζονται ως ένα κύκλωμα στο οποίο δεν ρέει τάση. Με άλλα λόγια μελετάμε την ταλάντωση της ράβδου όσο το κύκλωμα είναι εκτός σύνδεσης.

Τα συστήματα παραδιακλάδωσης, επίσης γνωστά ως πιεζοηλεκτρικά συστήματα παραδιακλάδωσης, είναι ηλεκτρικά κυκλώματα που συνδέονται με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία (π.χ. επιθέματα PZT, πιεζοηλεκτρικοί μορφοτροπείς (transducers) κλπ.). Αυτά τα συστήματα είναι ως επί το πλείστον παθητικά, ωστόσο πρόσφατα έχουν προταθεί επίσης ημι-παθητικά ή και ενεργά συστήματα.

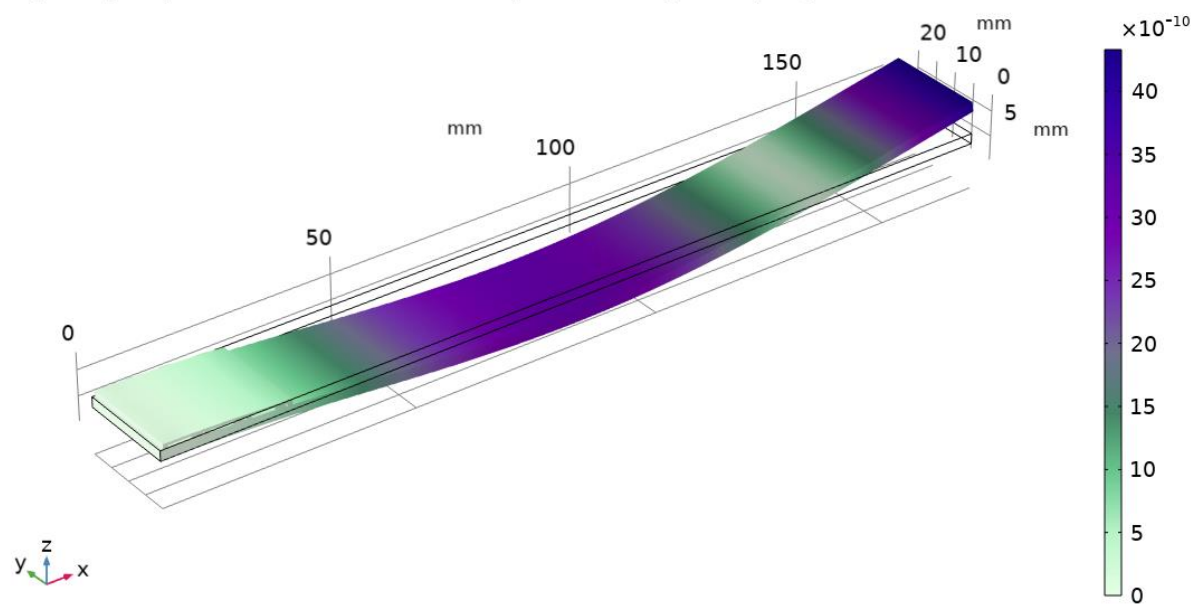
Στη συνέχεια παραθέτουμε τα διαγράμματα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για το πως αποσβένεται η ταλάντωση της κατασκευής γύρω από τη 2η ιδιοσυχνότητα.

Πίνακας.5.2 Τιμές ιδιοσυχνοτήτων (Hz) για κλειστό κύκλωμα

Τιμές ιδιοσυχνοτήτων (Hz) για κλειστό κύκλωμα	
Ιδιοσυχνότητα 1	63,012
Ιδιοσυχνότητα 2	380,02
Ιδιοσυχνότητα 3	1028,8
Ιδιοσυχνότητα 4	1956,1

Eigenfrequency=380.02 Hz

Surface: Displacement magnitude (mm)



Εικόνα 5.3 Δομή για αυξητική τοπολογικά σχεδιασμένη μικροδομή σε συνθήκες κλειστού κυκλώματος για 2 ιδιοσυχνότητα

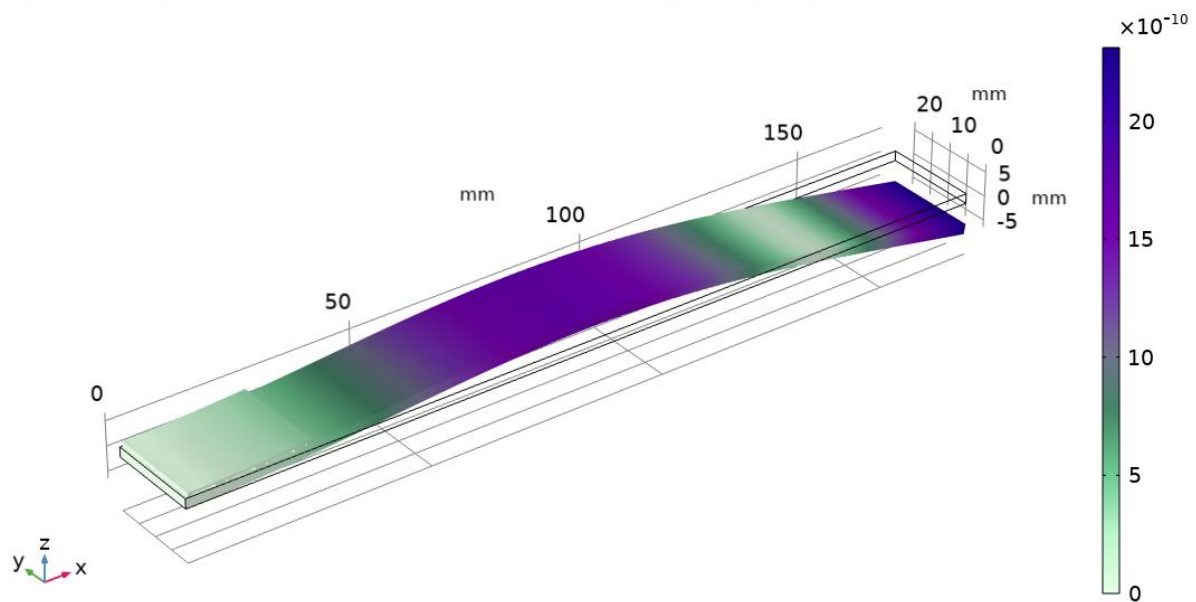
Πίνακας. 5.3 Τιμές ιδιοσυχνοτήτων (Hz) για ανοιχτό κύκλωμα

Τιμές ιδιοσυχνοτήτων (Hz) για ανοιχτό κύκλωμα	
Ιδιοσυχνότητα 1	63,144
Ιδιοσυχνότητα 2	380,63
Ιδιοσυχνότητα 3	1029,8
Ιδιοσυχνότητα 4	1956,6



Eigenfrequency=380.63 Hz

Surface: Displacement magnitude (mm)

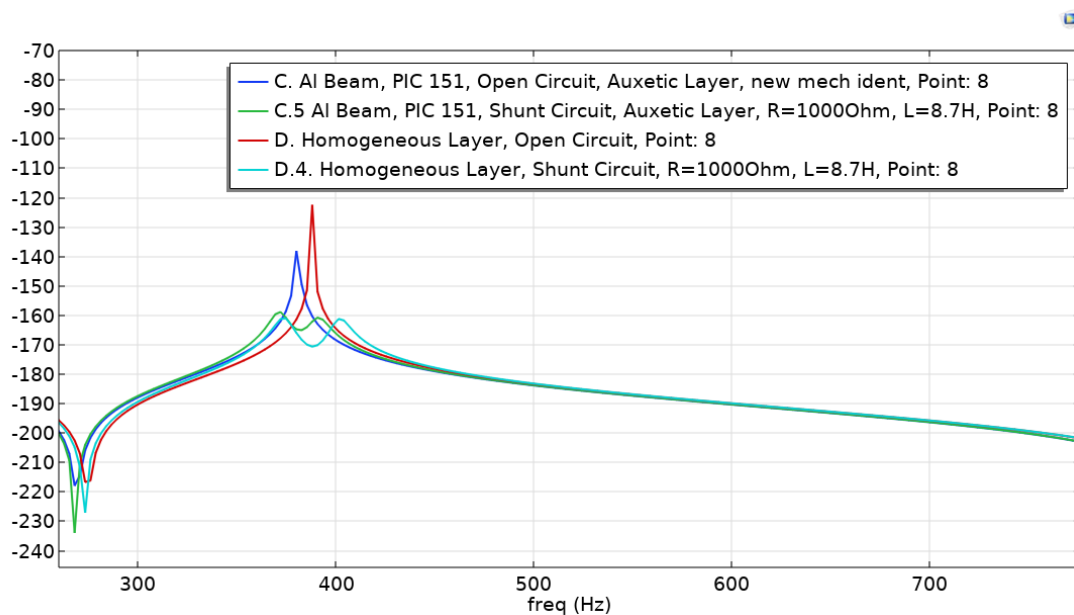


Εικόνα 5.4 2<sup>η</sup> ιδιομορφή για αυξητική τοπολογικά σχεδιασμένη μικροδομή σε συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος

Παρατηρούμε από πίνακες ιδιοσυχνοτήτων ότι οι τιμές μεταξύ του παραδιακλαδωμένου και του ανοιχτού κυκλώματος ότι είναι παρόμοιες.

Επίσης από τις ιδιομορφές για ανοιχτό και για κλειστό κύκλωμα φαίνονται με κατανομή χρώματος οι καταπονήσεις που ασκούνται στη ράβδο. Βλέπουμε πως όπως ταλαντώνεται η ράβδος η μεγαλύτερη καταπόνηση ασκείται στις κορυφές των κυμάτων. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι όπως κάμπτεται η ράβδος στη μία πλευρά ασκείται θλίψη ενώ στην άλλη εφελκυσμός, οπότε δημιουργούνται δυνάμεις τάσεως σε αυτά τα σημεία.

Στη συνέχεια επισυνάπτουμε τα αποτελέσματα από το γράφημα απόκρισης συχνότητας του σήματος εξόδου (FRF).



Εικόνα 5.5 2<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα του συστήματος

Στην εικόνα παρουσιάζεται γραφικά η ταλάντωση της κατασκευής γύρω από τη 2<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα σε συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος και παραδιακλαδωμένου. Για κάθε στρώμα αντιστοιχούν δύο καμπύλες (αυξητικό και ομογενές).

## 5.4 Παρατηρήσεις

Με βάση το παραπάνω γράφημα παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά της κατασκευής κατά την προσθήκη αυξητικής μικροδομής και αντίστοιχα ομογενούς στρώματος γύρω από την 2η κρίσιμη συχνότητα. Πιο συγκεκριμένα, αυτή η ομοιότητα σημειώνεται στο εντός των συχνοτήτων 380-390 Hz.

Εκτός από αυτό, φαίνεται ότι όταν το παραδιακλαδωμένο κύκλωμα είναι ενεργό τότε επιτυγχάνεται απόσβεση της 2ης ιδιομορφής, πράγμα που δείχνει ότι είναι σωστά ρυθμισμένες οι ηλεκτρικές παράμετροι. Μάλιστα πρόκειται για διαφορά της τάξης 20-40 dB μεταξύ ανοιχτού και ενεργού κυκλώματος. Επομένως και τα δύο στρώματα υπό εξέταση κρίνονται κατάλληλα για μελέτη και με αυτό τον τρόπο ενισχύεται η συμπεριφορά του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου, άρα πρακτικά η μείωση της ταλάντωσης.

## Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική είχαμε την ευκαιρία να μελετήσουμε τις αυξητικές δομές. Μάθαμε σε βάθος το ποια είναι τα χαρακτηριστικά που καθιστούν μια δομή αυξητική, τα οφέλη που μπορεί να έχουν και εφαρμογές τους, όπως στην βιοϊατρική, στην ένδυση και στην εφαρμογή τους για απορρόφηση κραδασμών.

Στη συνέχεια μελετήσαμε πως οι αυξητικές δομές επηρεάζονται ύστερα από τοπολογική βελτιστοποίηση. Χάρης την επεξεργασία των κατασκευών μελετήσαμε το πως μπορεί να γίνει σωστός καταμερισμός της μάζας, βάσει της εφαρμογής δυνάμεων.

Αποκτήσαμε εξοικείωση με περιβάλλοντα προσομοίωσης. Αυτή η εμπειρία βοηθάει και στην κατανόηση της λογικής αυτών των προγραμμάτων και παρόμοιων τους, αλλά μπορεί να φανεί χρήσιμο και σε μελλοντική μελέτη.

Έτσι δημιουργήθηκαν καινούριες δομές με παρόμοιες ιδιότητες, που όμως να αποτελούνται από λιγότερη μάζα, άρα να είναι πιο ελαφριά. Στα παραδείγματα που μελετήσαμε είδαμε ότι ο όγκος μπορεί να μειωθεί έως και 40%, έτσι ώστε το τελικό προϊόν να διατηρεί ακόμη τις ιδιότητες του. Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό έχει σημαντικά πλεονεκτήματα καθώς μπορεί να παραχθεί πιο εύκολα και πιο οικονομικά, είναι πιο εύκολο στην μεταφορά, καθώς και άλλα προτερήματα ανάλογα με την χρήση του.

Τέλος μελετήσαμε την εφαρμογή δύναμης σε δοκό όπου μια αυξητική πλάκα βοηθάει στην απόσβεση των ταλαντώσεων. Σε αυτό το τμήμα της εργασίας ανακαλύψαμε τις ιδιότητες που έχουν οι αυξητικές δομές σε εφαρμογή απόσβεσης ταλαντώσεων και το πως μπορεί να επηρεάζουν μια κατασκευή σε πραγματικό περιβάλλον. Με μια σύντομη ανασκόπηση της παρούσας ανάλυσης τα αποτελέσματα δείχνουν ότι μια αυξητική δομή ως επιπλέον στρώμα θα μπορούσε να ευεργετήσει και να συμβάλει περεταίρω στην εξασθένιση των ταλαντώσεων. Έτσι αποτελεί ένα καλό βήμα προς την ανάπτυξη μιας νέας τεχνολογίας μεταυλικών.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Data sheets

- [1] S. E. Rodriguez, E. P. Calius, A. Khatibi, A. Orifici, and R. Das, “Mechanical metamaterial systems as transformation mechanisms,” *Extreme Mech. Lett.*, p. 101985, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.eml.2023.101985.
- [2] D. Atilla Yolcu and B. Okutan Baba, “Measurement of Poisson’s ratio of the auxetic structure,” *Measurement*, vol. 204, p. 112040, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.measurement.2022.112040.
- [5] R. Jain and M. Meghwal, “Additive Manufacturing,” *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 10, no. 6, pp. 1138–1140, Jun. 2022, doi: 10.22214/ijraset.2022.44072.
- [6] T. Zegard and G. H. Paulino, “Bridging topology optimization and additive manufacturing,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 53, no. 1, pp. 175–192, Jan. 2016, doi: 10.1007/s00158-015-1274-4.
- [8] Z. Hu and M. M. Hassan, “Effect of Poisson’s ratio on material property characterization by nanoindentation with a cylindrical flat-tip indenter,” *Journal of Materials Research*, vol. 34, no. 14, pp. 2482–2491, Jul. 2019, doi: 10.1557/jmr.2019.160.
- [10] M. Shirzad, A. Zolfagharian, M. Bodaghi, and S. Y. Nam, “Auxetic metamaterials for bone-implanted medical devices: Recent advances and new perspectives,” *Eur. J. Mech. - ASolids*, vol. 98, p. 104905, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.euromechsol.2022.104905.
- [11] M. F. Fardan, B. W. Lenggana, U. Ubaidillah, S.-B. Choi, D. D. Susilo, and S. Z. Khan, “Revolutionizing Prosthetic Design with Auxetic Metamaterials: A Review of Mechanical Properties and Limitations,” *Engineering*, preprint, May 2023. doi: 10.20944/preprints202305.0146.v1.
- [12] C. Moroney, A. Alderson, T. Allen, M. Sanami, and P. Venkatraman, “The Application of Auxetic Material for Protective Sports Apparel,” in *The 12th Conference of the International Sports Engineering Association*, MDPI, Feb. 2018, p. 251. doi: 10.3390/proceedings2060251.
- [17] S. Rajput and N. K. Thakur, “Rock Properties,” in *Geological Controls for Gas Hydrate Formations and Unconventionals*, Elsevier, 2016, pp. 131–164. doi: 10.1016/B978-0-12-802020-3.00005-9.
- [21] Κ. Μαρακάκης and Κ. Marakakis, “Προσομοίωση και βελτιστοποίηση ευφύων κατασκευών,” Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, 2022. doi: 10.12681/eadd/52193.
- [22] Novel 2D star-shaped honeycombs with enhanced effective Young’s modulus and negative Poisson’s ratio doi: 10.1016/j.eml.2020.101164
- [23] Δαρακη Μαρια-Στυλιανη, “Simulation and parametric analysis of shunt piezoelectric systems with finite element methodΠροσομοίωση και παραμετρική ανάλυση παραδιακλαδωμένων πιεζοηλεκτρικών συστημάτων με χρήση μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων”, doi: 10.26233/HEALLINK.TUC.92858.

## Internet Site

[9] "https://en.wikipedia.org/wiki/Autodesk." [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Autodesk>

[10] "Autodesk Inventor." [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Autodesk\\_Inventor](https://en.wikipedia.org/wiki/Autodesk_Inventor)

[3] "Young's modulus", [Online]. Available: <https://www.britannica.com/science/Youngs-modulus>

[4] "Simulation programming degree overview", [Online]. Available: <https://www.careerexplorer.com/degrees/simulation-programming-degree/>

[7] "nTopology", [Online]. Available: <https://ntopology.com/press/>

## Images

[13] "What are auxetic materials", [Online]. Available: [http://staff.um.edu.mt/jgri1/auxetic/auxetic\\_f2.html](http://staff.um.edu.mt/jgri1/auxetic/auxetic_f2.html)

[14] "Στην αντοχή των υλικών", [Online]. Available: <http://www.sinter-hellas.gr/index.php/information.html>

[15] "3D printing in prosthetics", [Online]. Available: <https://www.ntop.com/resources/blog/3d-printing-in-prosthetics-a-design-guide/>

[16] Z. Wang and H. Hu, "Auxetic materials and their potential applications in textiles," *Text. Res. J.*, vol. 84, no. 15, pp. 1600–1611, Sep. 2014, doi: 10.1177/0040517512449051.

[18] "shear modulus", [Online]. Available: <https://www.britannica.com/science/shear-modulus>

[19] "COMSOL Multiphysics 5.6." [Online]. Available: <https://www.istem.gov.in/istem-comsol>

[20] "Stainless Steel - Grade 304", [Online]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=965>