

ΑΤΕΙ ΠΑΤΡΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σχεδιασμός, Προσομοίωση και Τρισδιάστατη Εκτύπωση Υπερέυκαμπτων Υλικών



Σπουδαστές: Καρβέλης Γεώργιος (Α.Μ. 6028)
Μπαζώτης Ευάγγελος (Α.Μ. 5485)

Επιβλέπων Καθηγητής : Δρ. Γιαννόπουλος Ι. Γεώργιος
Επιστημονικός Συνεργάτης

ΠΑΤΡΑ 2014

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστή: Ο κάτωθι υπογεγραμμένος σπουδαστής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο σπουδαστής
(Ονοματεπώνυμο)

.....

(Υπογραφή)

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρών τεύχος αποτελεί την πτυχιακή εργασία που εκπονήθηκε στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας. Αναφέρεται στο σχεδιασμό τρισδιάστατων δικτυωτών δομών, την ανάλυση και την προσομοίωση αυτών με πεπερασμένα στοιχεία και στη συνέχεια την Τρισδιάστατη Εκτύπωση τους με την βοήθεια της ταχείας πρωτοτυποποίησης.

Στόχος μας θα είναι η ευκαμψία της δομής αυτής σε σημείο ώστε να μπορεί να μιμηθεί την συμπεριφορά ενός ελαστομερούς υλικού ενώ θα είναι κατασκευασμένη από θερμοπλαστικό υλικό. Αφού σχεδιασθούν διάφορες τέτοιες δομές έπειτα θα υπολογισθεί η ευκαμψία τους για διάφορα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους με τη βοήθεια των Πεπερασμένων στοιχείων.

Ευχαριστούμε θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή Δρ. Γιαννόπουλο Ι. Γεώργιο, Επιστημονικός Συνεργάτης του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε., για την ευκαιρία που μας έδωσε να συνεργαστεί μαζί μας, για την πολύτιμη βοήθεια που μας προσέφερε και για την άριστη καθοδήγησή του σε όλη την διάρκεια της εκπόνησης της πτυχιακής εργασίας.

Καρβέλης Γεώργιος,
Μπαζιώτης Ευάγγελος

Πάτρα, 2014

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή θα σχεδιαστούν κάποιες τρισδιάστατες δομές στις οποίες θα μπορούμε να πετύχουμε την ευκαμπτότητά τους σε μεγάλο βαθμό, σε σημείο να μιμηθούν την συμπεριφορά ελαστομερών υλικών αν και οι δομές αυτές θα είναι κατασκευασμένες από πλαστικό υλικό και κατά προτίμηση θερμοπλαστικό. Οι δομές αυτές θα σχεδιαστούν μέσω του σχεδιαστικού πακέτου SolidWorks. Αφού σχεδιαστούν τρισδιάστατα, με την βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων μέσω του λογισμικού SolidWorks θα γίνει η προσομοίωσή τους και η μη γραμμική ανάλυση των δομών ώστε να καταλήξουμε σε κάποια συμπεράσματα λογικά για την επίτευξη του στόχου της πτυχιακής εργασίας.

Η πτυχιακή εργασία αυτή είναι χωρισμένη σε οκτώ κεφάλαια στα οποία περιγράφονται αναλυτικά τα βήματα και η μέθοδος εκπόνησης. Τα κεφάλαια της εργασίας μπορούμε να τα δούμε παρακάτω.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα πλαστικά υλικά ή αλλιώς και πολυμερή υλικά που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή μιας ευρείας ποικιλίας συνθετικών ή ημισυνθετικών οργανικών στερεών υλικών. Τα πλαστικά είναι σχεδόν αποκλειστικά πολυμερή μεγάλου μοριακού βάρους. Κύριο συστατικό παρασκευής τους είναι οι συνθετικές ρητίνες που διακρίνονται σε "εποξειδικές" και "ακρυλικές". Τα πολυμερή υλικά κατηγοριοποιούνται όπως περιγράφουμε αναλυτικά και στην εργασία σε θερμοπλαστικά, θερμοσκληρυνόμενα και ελαστομερή. Επίσης θα δούμε και τα χαρακτηριστικά των πολυμερών υλικών όπως και τις ιδιότητές τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο θα μιλήσουμε για τις τρισδιάστατες Δομές που θα χρησιμοποιηθούν, στον δομικό σχεδιασμό τους και τα χαρακτηριστικά των δομών. Οι δομές αυτές θα είναι τέσσερις, οι αυξητικές δομές με αρνητικό λόγο Poisson (επαναισερχόμενη/re-entrant και η run flat), η οκταεδρική δομή και η εξαγωνική κυψέλης που μοιάζει με την κηρήθρα μέλισσας.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην αριθμητική μοντελοποίηση. Περιγράφεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και των τάσεων ενός σώματος όπως και η διακριτοποίηση σωμάτων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο κάνουμε μία εισαγωγή για το πρόγραμμα το οποίο θα χρησιμοποιηθεί, το SolidWorks, και στη μεθοδολογία μοντελοποίησης μέσω του προγράμματος αυτού. Επίσης Στο κεφάλαιο αυτό μιλάμε για την προσομοίωση που μπορούμε να πετύχουμε μέσω του λογισμικού για την μη γραμμική ανάλυση μοντέλων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται η σχεδίαση των δομών και η αναλυτική περιγραφή βήμα – βήμα στην σχεδίαση ώστε να καταλήξουμε σχεδιαστικά στη τελική μορφή των κύβων με τις δομές και τα γεωμετρικά στοιχεία που έχουμε επιλέξει.

Στο έκτο κεφάλαιο, όπου είναι και το κυριότερο, αφού έχουν σχεδιαστεί οι δομές μας, κάνουμε την προσομοίωση. Η προσομοίωση γίνεται σύμφωνα με τις ιδιότητες του υλικού που έχουμε επιλέξει και τις κατάλληλες στηρίξεις στην μοναδιαία κυψελίδα της δομής ή και σε όλο το μοντέλο. Η ανάλυση θα γίνει με την μέθοδο της μετατόπισης, δηλαδή να μετατοπίζουμε την μία επιφάνεια της δομής και να παίρνουμε τα αποτελέσματα από την λύση. Το κύριο αποτέλεσμα της λύσης θα είναι η καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης της κάθε δομής.

Στο κεφάλαιο 7, γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την προσομοίωση των δομών. Επίσης γίνεται σχολιασμός των καμπύλων τάσης-παραμόρφωσης της κάθε δομής. Μέσω των διαγραμμάτων μπορούμε να παρατηρήσουμε τη συμπεριφορά των δομών για τις περιπτώσεις προσομοίωσης που έχουμε κάνει.

Στο κεφάλαιο 8 παρουσιάζεται μία νέα πρωτοποριακή μέθοδος στο τομέα της κατασκευής των δομών αυτή της ταχεία πρωτοτυποποίησης. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην κατασκευή αντικειμένων προσθέτοντας υλικό και όχι αφαιρώντας όπως γίνεται την σημερινή περίοδο με τις συμβατικές μεθόδους. Γίνετε ανάλυση στις τεχνολογίες της ταχείας πρωτοτυποποίησης και μία σχετική αναφορά στον εκτυπωτή που θα χρησιμοποιηθεί για την εκτύπωση των τρισδιάστατων δομών που θα σχεδιαστούν.

Τέλος, θα μιλήσουμε για τα συνολικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την προσπάθειά μας να καταφέρουμε την ευκαμπτότητα των πλαστικών υλικών με την αποτύπωση των τρισδιάστατων δομών.

Στο τέλος της εργασίας περιλαμβάνονται και οι απαραίτητες βιβλιογραφικές αναφορές που χρησιμοποιήθηκαν και οι διαδικτυακές πηγές για την επίτευξη και ανάπτυξη της όλης πτυχιακής εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|------------|
| ΠΡΟΛΟΓΟΣ | v |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | vii |
| ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ | ix |
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 1 |
| 1. ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ | 4 |
| 1.1 Όρος πλαστικό - Εισαγωγή..... | 4 |
| 1.2 Πολυμερισμός | 5 |
| 1.2.1 Κρυσταλλικότητα..... | 6 |
| 1.3 Χαρακτηριστικά των Πλαστικών..... | 8 |
| 1.4 Ταξινόμηση πολυμερών..... | 8 |
| 1.5 Ιδιότητες Πολυμερών | 11 |
| 1.5.1 Φυσικές Ιδιότητες Πολυμερών | 11 |
| 1.5.1.1 Πυκνότητα Πολυμερών | 11 |
| 1.5.1.2 Θερμικές Ιδιότητες Πολυμερών..... | 12 |
| 1.5.1.3 Ηλεκτρικές Ιδιότητες Πολυμερών | 12 |
| 1.5.1.4 Οπτικές Ιδιότητες Πολυμερών..... | 12 |
| 1.5.2 Μηχανικές Ιδιότητες Πολυμερών..... | 13 |
| 1.5.2.1 Παραμόρφωση..... | 14 |
| 1.5.2.2 Ελαστική συμπεριφορά πολυμερών | 14 |
| 1.5.2.3 Ερπυσμός (Creep)..... | 16 |
| 1.5.2.4 Λόγος Poisson | 17 |
| 2 . ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΕΣ ΔΟΜΕΣ | 20 |
| 2.1 Στοιχειώδεις Κύτταρο (unit cell)..... | 20 |
| 2.2 Δομές με Αρνητικό Λόγο Poisson | 20 |
| 2.3 Δομικός Σχεδιασμός..... | 20 |
| 2.4 Εξαγωνική Δομή Κυψέλης (Honeycomb Structure)..... | 25 |
| 3. ΑΡΙΘΜΙΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ | 27 |
| 3.1 Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων | 27 |

| | |
|---|------------|
| 3.1.1 Γενικά..... | 27 |
| 3.2 Τάσεις Και Ισορροπία..... | 28 |
| 3.3 Τάση Von Mises..... | 30 |
| Σημειώνουμε πως το κριτήριο ανάλυσης που θα χρησιμοποιηθεί στην προσομοίωση είναι Von Mises. | 30 |
| 3.4 Διακριτοποίηση | 30 |
| 4. SOLIDWORKS..... | 33 |
| 4.1 Πακέτο Solidworks | 33 |
| 4.2 Μεθοδολογία Μοντελοποίησης | 33 |
| 4.3 Προσομοίωση μέσω του σχεδιαστικού Πακέτου SolidWorks | 34 |
| 4.4 Μη-γραμμική Ανάλυση (nonlinear analysis) | 34 |
| 5. ΒΗΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΔΟΜΩΝ..... | 36 |
| 5.1 Διαστασιολόγηση Μοναδιαίας Κυψελίδας. | 36 |
| 5.2 Σχεδιασμός Της Μοναδιαίας Κυψελίδας. | 39 |
| 5.2.1 Σχεδίαση του Σκίτσου (sketch)..... | 39 |
| 5.2.2 Πάχος γραμμών | 43 |
| 5.2.3 Συνδυασμός Γραμμών | 45 |
| 5.3 Δημιουργία των Τρισδιάστατων δομών..... | 49 |
| 5.4 Σχεδιασμός Εξαγωνικής Δομής (Honeycomb Structure)..... | 56 |
| 6. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΔΟΜΩΝ | 61 |
| 6.1 Βήματα Προσομοίωσης - Ανάλυση ράβδου | 61 |
| 6.2 Προσομοίωση Δομών | 71 |
| 6.2.1 Δομή Επαναισερχόμενη (Re-entrant)..... | 71 |
| 6.2.2 Αυξητική Δομή (run flat) | 79 |
| 6.2.3. Οκταεδρική Δομή (Octet) | 84 |
| 6.2.4 Εξαγωνική Δομή Κυψέλης (Honeycomb structure)..... | 88 |
| 7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ | 96 |
| 7.1 Διαγράμματα - Σχολιασμός Διαγραμμάτων | 96 |
| 7.2 Πίνακας Αποτελεσμάτων..... | 104 |
| 8. ΤΑΧΕΙΑ ΠΡΟΤΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ | 105 |
| 8.1 Ορισμός Ταχείας Προτοτυποποίησης | 105 |

| | |
|---|------------|
| 8.1.1 Τρόπος Λειτουργίας..... | 105 |
| 8.1.2 Βασικά Στάδια Ταχείας Πρωτοτυποποίησης..... | 105 |
| 8.2 Τεχνολογίες Ταχείας Πρωτοτυποποίησης..... | 106 |
| 8.2.1 Στερεολιθογραφία- Stereolithography | 106 |
| 8.2.2 Solid Ground Curing | 108 |
| 8.2.3 Selective Laser Sintering | 110 |
| 8.2.4 Laminated Object Manufacturing - LOM..... | 111 |
| 8.2.5 Fused Deposition Modeling | 112 |
| 8.3 Τρισδιάστατη Εκτύπωση - 3d Printing..... | 113 |
| 8.4 Μεταφορά Δεδομένων Σε Συστήματα Ταχείας Πρωτοτυποποίησης | 115 |
| 8.5 Εφαρμογές της Ταχείας Πρωτοτυποποίησης - Τρισδιάστατης Εκτύπωσης..... | 116 |
| 8.6 Τρισδιάστατος Εκτυπωτής Maker Gear M2 | 118 |
| 8.6.1 Ανάλυση Βασικών Λειτουργικών Εξαρτημάτων | 118 |
| ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 125 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΠΗΓΕΣ | 126 |
| ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ..... | 127 |

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην Πτυχιακή εργασία αυτή, στόχος είναι η δημιουργία τρισδιάστατων δομών των οποίων θα είναι κατασκευασμένες από πλαστικό, ειδικότερα θερμοπλαστικό υλικό, όπου η συμπεριφορά τους θα είναι εύκαμπτη δηλαδή θα προσπαθήσουμε να καταφέρουμε τις δομές να μιμηθούν ιδιότητες ελαστομερών υλικών.

Τα πλαστικά είναι σχεδόν αποκλειστικά πολυμερή υλικά εξου και η ονομασία πολλών από αυτών φέρει το πρόθεμα *πολυ-*, και που μπορεί να περιέχουν πρόσθετα, οργανικά ή μη, για βελτίωση των ιδιοτήτων τους (μηχανική αντοχή, εμφάνιση, χρώμα κλπ). Οι τρεις μεγάλες κατηγορίες όπου διακρίνονται είναι τα θερμοπλαστικά, τα θερμοσκληρυνόμενα και τα ελαστομέρη. Το συστατικό παρασκευής τους είναι κυρίως οι συνθετικές ρητίνες που διακρίνονται σε "εποξειδικές" και "ακρυλικές". Τα πλαστικά υλικά είναι πολύ ανθεκτικά στη διάβρωση και συχνά ευρισκόμενα ανεξέλεγκτα στο φυσικό περιβάλλον, προκαλούν αντιαισθητικό και δυσάρεστο αποτέλεσμα. Πολλά είναι τα πλεονεκτήματα των πλαστικών υλικών όπως το χαμηλό τους κόστος, η αρκετά καλή θερμική και ηλεκτρική μόνωση αλλά και η εύκολη μορφοποίησή τους στη γεωμετρία μίας μήτρας όπως και πολλά άλλα. Εκτός από πλεονεκτήματα όμως έχουμε και μερικά μειονεκτήματα όπως η μικρή τους αντοχή και η ακαμψία τους, τα θερμοκρασιακά όρια επεξεργασίας τους αλλά και σημαντικότερα η πλαστική παραμόρφωση που παρουσιάζεται υπό την επίδραση της δύναμης. Αναλυτικότερα για τα πλαστικά υλικά περιγράφονται στο κεφάλαιο 1.

Λόγω των μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν ειδικότερα τα θερμοπλαστικά υλικά, θα γίνει έρευνα σε διάφορες τρισδιάστατες δομές όπου με την κατασκευή τους από θερμοπλαστικό υλικό θα καταφέρουμε να τους δώσουμε ελαστική συμπεριφορά. Οι δομές που θα εφαρμοστούν στα υλικά αυτά θα είναι αυτές που θα μπορούν να απορροφήσουν την ενέργεια από την επίδραση κάποιας δύναμης. Αυτές οι δομές θα είναι είτε αυξητικές δομές με αρνητικό λόγο Poisson είτε δομές με μεγάλο λόγο. Αναφέρουμε πως τα ελαστομερή υλικά παρουσιάζουν λόγο Poisson κοντά στο 0.5. Όσον αφορά τις αυξητικές δομές είναι δυνατόν να έχουν μηχανικές ιδιότητες όπως υψηλή απορρόφηση ενέργειας και αντοχή σε θραύση. Επίσης στις δομές που θα καταφέρουμε να απορροφήσουμε ενέργεια για να καταφέρουμε ελαστικότητα είναι και η εξαγωνική δομή που θα έχει γεωμετρία όπως η κηρήθρας της μέλισσας. Μια τέτοια κυψελοειδής δομή παρέχει σε ένα υλικό την ελάχιστη σχετική πυκνότητα και υψηλές συμπιεστικές και εφελκυστικές ιδιότητες.

Αφού ερευνηθούν οι δομές αυτές επιλέγονται για τον τελικό σχεδιασμό που θα γίνει από το σχεδιαστικό πακέτο SolidWorks. Οι δομές που επιλέγονται για σχεδίαση θα είναι η επαναεισερχόμενη αυξητική δομή (re-entrant), η αυξητική δομή αρνητικού λόγου Poisson (run flat) όπου η συγκεκριμένη δομή χρησιμοποιείται στα ελαστικά αυτοκινήτων χωρίς αέρα. Επίσης σχεδιάζεται η οκταεδρική δομή που περιλαμβάνει 8 επίπεδα και τέλος η εξαγωνική που όπως θα δούμε στο κεφάλαιο 8 αποτελείται από εξαγωνικά κελιά.

Το σχεδιαστικό κομμάτι γίνεται όπως είπαμε από το λογισμικό πακέτο SolidWorks. Το SolidWorks είναι το πλέον καταξιωμένο λογισμικό παγκοσμίως, στο χώρο του τρισδιάστατου μηχανολογικού σχεδιασμού και λειτουργεί με βάση τη στερεή

μοντελοποίηση και χρησιμοποιεί ένα παραμετρικό χαρακτηριστικό που βασίζεται κατά προσέγγιση στη δημιουργία μοντέλων και συναρμολογήσεων.

Στην αριθμητική μοντελοποίηση χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος αυτή αποτελεί ισχυρό εργαλείο στη μελέτη των κατασκευών και βρίσκει μεγάλο αριθμό εφαρμογών. Στο πεδίο της ανάλυσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο στο (συμβατικό) ελαστικό πεδίο (θεωρία μικρών μετατοπίσεων) αλλά και για μη-γραμμικά προβλήματα, λυγισμό, δυναμική συμπεριφορά κ.ά. Αυτή η μέθοδος είναι μεν προσεγγιστική, αλλά μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα. Το μειονέκτημά της είναι οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, ιδίως όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα μοντέλα. Αυτό όμως το μειονέκτημα ξεπεράστηκε τα τελευταία χρόνια χάρη στη ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστών. Το λογισμικό SolidWorks περιέχει το πακέτο που ονομάζεται SolidWorks Simulation το οποίο θα μας βοηθήσει αποτελεσματικά να κάνουμε την προσομοίωση των δομών που θα σχεδιαστούν με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων που μόλις αναφέραμε.

Όπως αναφέραμε η προσομοίωση θα γίνει από το SolidWorks Simulation. Από την προσομοίωση θα κάνουμε ανάλυση σε κάθε δομή ξεχωριστά. Στις μη συμμετρικές δομές θα γίνει ανάλυση και στις δύο διευθύνσεις των αξόνων (χ και ψ) της δομής. Η ανάλυση που θα γίνει θα είναι μη-γραμμική διότι μας ενδιαφέρει να αποτυπώσουμε την συμπεριφορά των δομών στη μη γραμμική περιοχή με εφαρμογή θερμοπλαστικού υλικού. Για να μπορέσουμε να έχουμε μία εικόνα από τα αποτελέσματα που θα προκύψουν, είναι σημαντικό να γίνει αρχικά μία προσομοίωση σε μία ράβδο μόνη της για να δούμε τη συμπεριφορά της στη πλαστική παραμόρφωση. Τα αποτελέσματα αυτά της ράβδου θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα κάθε δομής ξεχωριστά για να δούμε κατά πόσο καταφέραμε την δομή πιο εύκαμπτη από την ράβδο. Σημειώνουμε πως η προσομοίωση θα επιτευχθεί με την μέθοδο της μετατόπισης (μετατοπίζοντας την μία επιφάνεια της δομής και πακτώνοντας την άλλη).

Για να μπορέσουμε να πούμε ότι επιτύχαμε την ελαστική συμπεριφορά των τρισδιάστατων δομών που σχεδιάσαμε, κατασκευασμένα από υλικό το οποίο παρουσιάζει ακαμψία και μικρή αντοχή, θα πρέπει να δημιουργήσουμε και να μελετήσουμε τις καμπύλες Τάσης - Παραμόρφωσης της κάθε δομής. Μέσω των καμπυλών αυτών μπορούμε να δούμε τη συμπεριφορά τους σε όλη τη μη γραμμική περιοχή. Μειώνοντας το μέτρο ελαστικότητας το οποίο είναι σημαντικό για την ελαστική συμπεριφορά πετυχαίνουμε την ευκαμψία της δομής. Επίσης σημαντικό είναι να αυξήσουμε τη παραμόρφωση στο όριο θραύσης και να καθυστερήσουμε την πλαστική παραμόρφωση.

Πετυχαίνοντας την ευκαμψία των υλικών με την εφαρμογή των τρισδιάστατων δομών, οι δομές αυτές θα εκτυπωθούν τρισδιάστατα από τρισδιάστατο εκτυπωτή. Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι εφαρμογή της ταχείας πρωτοτυποποίησης που στη σημερινή περίοδο γίνεται πιο γνωστή και χρησιμοποιείται συχνά. Η Ταχεία πρωτοτυποποίηση είναι μία νέα τεχνολογία κατασκευής μοντέλων στρώμα-στρώμα (layer by layer) που μείωσε το χρόνο κατασκευής μοντέλων κάθε πολυπλοκότητας σε ώρες αντί για ημέρες, εβδομάδες ή ακόμα και μήνες.

Την περίπτωση της εύκαμπτης συμπεριφοράς υλικών με την μέθοδο που παρουσιάσαμε και εξετάσαμε θα μπορούσαν να εφαρμοστούν στην εποχή μας σε διάφερα αντικείμενα και βιομηχανικούς κλάδους. Τέτοιες εφαρμογές θα μπορούσαν να

είναι σε αντικείμενα όπως στην αρχιτεκτονική, στην μηχανολογία, στην ναυπηγική, στη αυτοκινητοβιομηχανία και σημαντικότερα στην αεροναυπηγική. Επίσης, θα μπορούσαν να εφαρμοστούν στη αεροδιαστημική μηχανική και στις ανάγκες των στρατιωτικών υπηρεσιών. Ακόμα, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν και στις ανάγκες της Ιατρικής. Τέλος, κάποιες απλές εφαρμογές που θα είχαμε τη δυνατότητα να τα συναντήσουμε είναι και στην ψυχαγωγία (όπως την δημιουργία παιχνιδιών) αλλά και στην τέχνη.

1. ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

1.1 Όρος πλαστικό - Εισαγωγή

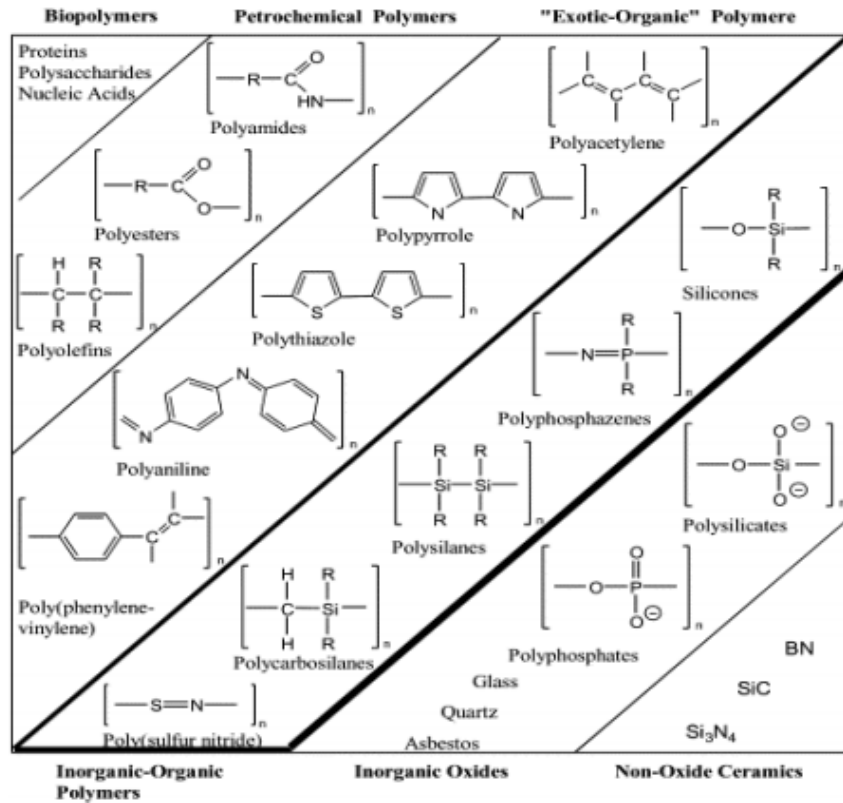
Ο όρος **πλαστικό** είναι κοινή ονομασία που χρησιμοποιείται για να περιγράψει μια ευρεία ποικιλία συνθετικών ή ημισυνθετικών οργανικών στερεών υλικών. Τα πλαστικά είναι σχεδόν αποκλειστικά πολυμερή μεγάλου μοριακού βάρους εξου και η ονομασία πολλών εξ αυτών φέρει το πρόθεμα *πολυ-*, και που μπορεί να περιέχουν πρόσθετα, οργανικά ή μη, για βελτίωση των ιδιοτήτων τους (μηχανική αντοχή, εμφάνιση, χρώμα κλπ). Κύριο συστατικό παρασκευής τους είναι οι συνθετικές ρυτίνες που διακρίνονται σε "εποξειδικές" και "ακρυλικές".

Υπάρχει ιδιαίτερα μεγάλο πλήθος εντελώς διαφορετικών μεταξύ τους πλαστικών, ωστόσο μπορούμε να τα κατατάξουμε σε δύο κατηγορίες, τα θερμοπλαστικά και τα θερμοσκληρυνόμενα. Τα *θερμοπλαστικά* είναι πολυμερή που αποκτούν μεγαλύτερη πλαστικότητα, δηλαδή ευκολία στο να παραμορφωθούν και να αποκτήσουν το σχήμα που επιθυμούμε, κάθε φορά που θερμαίνονται. Στα *θερμοσκληρυνόμενα* κατά την πρώτη θέρμανση και ανάμιξη των συστατικών τους προκαλείται πολυμερισμός και σκλήρυνση κατά τρόπο *μη αντιστρεπτό*. Δηλαδή τα θερμοσκληρυνόμενα μετά την πήξη τους δεν δύνανται να μορφοποιηθούν περαιτέρω.

Αρκετά είναι τα υλικά που ανήκουν στην κατηγορία των θερμοπλαστικών. Τα υλικά αυτά είναι το γνωστό Πολυπροπυλένιο (PP) όπου μπορούμε να το βρούμε σε συσκευασίες τροφίμων και σε πολλές οικιακές συσκευές. Είναι το Πολυαιθυλένιο (PE) όπου και αυτό μπορούμε να το συναντήσουμε στις πλαστικές σακούλες, σε πλαστικές φιάλες και σε σωλήνες. Επίσης στην κατηγορία των θερμοπλαστικών ανήκει το Χλωριούχο πολυβινύλιο ή πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) . Από το πολυβινυλοχλωρίδιο κατασκευάζονται οι μονώσεις των ηλεκτρικών καλωδίων, οι δίσκοι γραμμοφώνων και πολλά κουφώματα. Ακόμα στην κατηγορία αυτή ανήκει και το πολυαμίδες γνωστό ως Nylon και το συναντούμε σε διακόπτες πρίζες, τάπητες, μελανοταινίες, συνθετικά υφάσματα και σε πετονιές ψαρέματος.

Ενώ στα θερμοσκληρυνόμενα μπορούμε να συναντήσουμε τον Βακελίτη με καλές μηχανικές ιδιότητες. Από βακελίτη είναι κατασκευασμένοι οι προφυλακτήρες των αυτοκινήτων και τα δάπεδα. Επίσης η εποξειδική ρητίνη ανήκει στα θερμοσκληρυνόμενα υλικά όπου είναι αρκετά ακριβό υλικό και το βρίσκουμε σε διάφορες κόλλες, ανθρακονήματα και σκάφη θαλάσσης. Οι Πολυεστερικές ρητίνες (τα πολυεστερικά πλαστικά γενικά μπορεί να είναι είτε θερμοπλαστικά είτε θερμοσκληρυνόμενα, ανάλογα με τη χημική σύσταση, ενώ οι ακόρεστοι πολυεστέρες ή αλλιώς πολυεστερικές ρητίνες είναι θερμοσκληρυνόμενα). Εφαρμογές που το συναντούμε είναι παρόμοιες με την εποξειδική ρητίνη με μία διαφορά στο ότι είναι φτηνότερο. Τέλος στα θερμοσκληρυνόμενα ανήκει και ο Βινυλεστέρας όπου οι μηχανικές ιδιότητες και το κόστος είναι κάπου ανάμεσα σε πολυεστέρες και εποξειδικές ρητίνες, χρησιμοποιείται εκτεταμένα σε σύνθετα, ενισχυμένα με ίνες, πλαστικά.

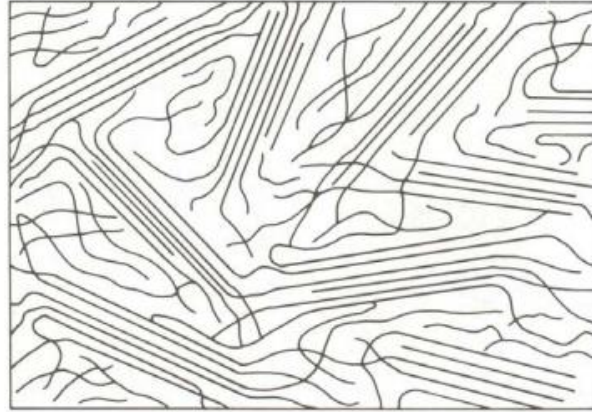
Τα πλαστικά υλικά είναι πολύ ανθεκτικά στη διάβρωση και συχνά ευρισκόμενα ανεξέλεγκτα στο φυσικό περιβάλλον προκαλούν αντιαισθητικό και δυσάρεστο αποτέλεσμα. Πολλά πλαστικά δεν είναι αποικοδομήσιμα στη Φύση, με αποτέλεσμα τη



Εικόνα 2 : Δεσμοί Πολυμερών

1.2.1 Κρυσταλλικότητα

Στο Σχήμα παρουσιάζει ένα απλό μοντέλο ημι-κρυσταλλικού πολυμερούς και τη δομή ενός άμορφου πολυμερές. Το στερεό απαρτίζεται από ένα οικείο μίγμα ιεραρχημένων κρυσταλλικών περιοχών (ordered crystals) και τυχαίως δομημένων άμορφων περιοχών (amorphous regions). Το μήκος των μορίων είναι σημαντικά πιο μεγάλο από το μήκος των κρυστάλλων. Ένα μόριο περνάει πολλές φορές δια μέσου των κρυστάλλων και των άμορφων περιοχών. Η ακεραιότητα του διφασικού στερεού διατηρείται (οφείλεται) από την παρουσία αυτών των μεγάλων μορίων.



Εικόνα 3 : Δομή ενός ημι-κρυσταλλικού πολυμερούς (*semi-crystalline*)



Εικόνα 4 : Δομή ενός άμορφου πολυμερούς

1.3 Χαρακτηριστικά των Πλαστικών.

Τα πλαστικά σαν υλικά έχουν κάποια χαρακτηριστικά που μπορούν μάλιστα να χαρακτηριστούν και ως μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα αυτών.

Τα μειονεκτήματα είναι :

- Η μικρή αντοχή τους και η ακαμψία.
- Τα θερμοκρασιακά όρια επεξεργασίας τους.
- Η πλαστική παραμόρφωση που παρουσιάζουν υπό την επίδραση δύναμης (ερπυσμός).

Ενώ τα πλεονεκτήματα είναι:

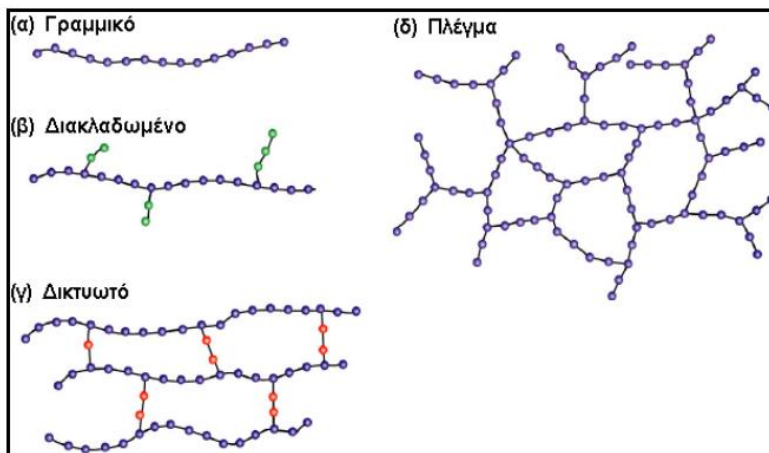
- Το χαμηλό κόστος.
- Είναι ηλεκτρικοί και θερμικό μονωτές.
- Έχουν εύκολη μορφοποίηση και μπορούν να πάρουν το σχήμα μητρών πολύπλοκης μορφής.
- Έχουν χαμηλή πυκνότητα, είναι προϊόντα χαμηλού ειδικού βάρους.
- Νέοι τύποι πολυμερών και σύνθετων υλικών ενισχυμένων με συνθετικές ίνες παρουσιάζουν υψηλή απόδοση και μακρά διάρκεια χρήσης (χρησιμοποιούνται εκτενώς στην αεροπορική και διαστημική βιομηχανία).
- Η δυνατότητα εκτύπωσης στην επιφάνειά τους.
- Η μη διαπερατότητα σε νερά και αέρια.

1.4 Ταξινόμηση πολυμερών

Τα πολυμερή ανάλογα με την αρχιτεκτονική της αλυσίδας διακρίνονται σε:
Γραμμικά, τα μόρια του έχουν τη μορφή απλής αλυσίδας και αναπτύσσονται σε μία διάσταση του χώρου όπως το πολυαιθυλένιο, το πολυστυρένιο και πολυαμίδια).

Διακλαδισμένα, τα μόρια του έχουν τη μορφή κλάδων δέντρου, αποτελούνται από μία βασική αλυσίδα από την οποία αναπτύσσονται πλευρικές διακλαδώσεις (που δεν ανήκουν στη δομή του μονομερούς) και αναπτύσσονται σε δύο διαστάσεις του χώρου (συμπολυμερές αιθυλενίου-εξενίου).

Δικτυωτά ή πλέγμα, Τα μόρια του αποτελούνται από αλυσίδες που συνδέονται μεταξύ τους με διασταυρούμενες συνδέσεις σχηματίζοντας πλέγμα (πολυεστέρες, πολυουρεθάνες, πολυεποξυδικές ενώσεις, φορμοφαινόλη). Αναπτύσσεται στις τρεις διαστάσεις του χώρου.



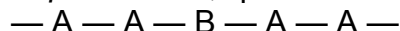
Εικόνα 5 : Ταξινόμηση πολυμερών ανάλογα με την πολυμερική αλυσίδα

Ανάλογα με το είδος των ατόμων που συμμετέχουν στη δομή της κύριας αλυσίδας διαχωρίζονται σε:

Ομοαλυσωτά, η αλυσίδα τους αποτελείται από ένα είδος ατόμων, π.χ.

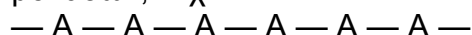


Ετεροαλυσωτά, η αλυσίδα τους αποτελείται από περισσότερα είδη ατόμων, π.χ.



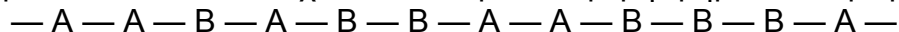
Ανάλογα με την οργάνωση της κύριας αλυσίδας χωρίζονται σε :

Ομοπολυμερή (homopolymers), τα μόρια τους αποτελούνται από ένα είδος δομικών μονάδων, π.χ.

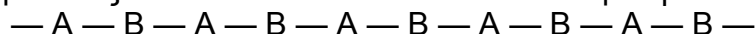


Συμπολυμερή (copolymers), τα μόρια τους αποτελούνται από δύο (συνήθως) ή περισσότερα είδη δομικών μονάδων. Αν δύο μονομερή A και B πολυμεριστούν μαζί, τότε είναι δυνατές οι ακόλουθες τέσσερις διευθετήσεις στη δομή του προκύπτοντος συμπολυμερούς:

- **Τυπικό ή τυχαίο συμπολυμερές (random copolymer):** Η διάταξη των δομικών μονάδων του είναι τυχαία και τα ομοπολυμερή τμήματα του μικρά, π.χ.



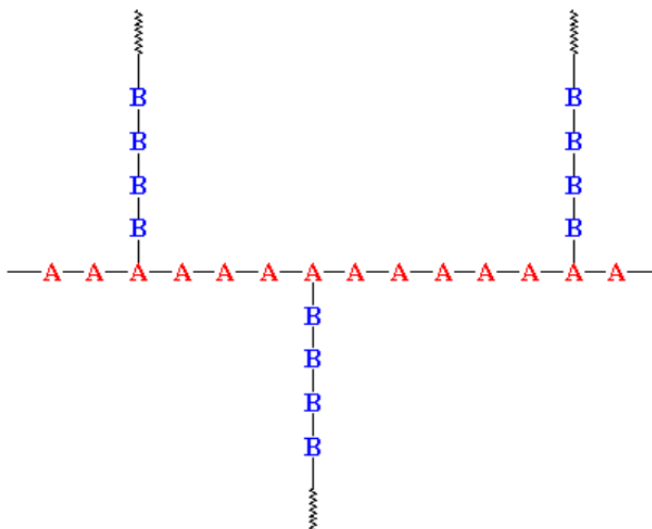
- **Εναλλασσόμενο συμπολυμερές (alternating copolymer):** Οι δύο δομικές μονάδες ακολουθούν κανονικά εναλλασσόμενη διάταξη, π.χ.



- **Αδρομερές συμπολυμερές (block copolymer):** Η διάταξη των δομικών μονάδων αποδίδει μόριο που αποτελείται από “αδρά” ομοπολυμερή τμήματα, π.χ.



• Ενοφθαλμισμένο συμπολυμερές (graft copolymer): Η διάταξη των δομικών μονάδων αποδίδει έναν ομοπολυμερή κορμό, από τον οποίο αναπτύσσονται ομοπολυμερή τμήματα από δομικές μονάδες άλλου είδους, π.χ.



Εικόνα 6 :Ενοφθαλμισμένο συμπολυμερές

Ανάλογα με την προέλευσή τους :

Φυσικά, λαμβάνονται απευθείας από τη φύση (μαλλί, μετάξι)

Ημισυνθετικά, προκύπτουν από χημικό μετασχηματισμό φυσικών προϊόντων (εβονίτης, νιτροκυτταρίνη, rayon, cellofan).

Συνθετικά, τα μονομερή που τα συνθέτουν δεν υπάρχουν στη φύση (PVC, Nylon 6 και 6.6, Teflon, κλπ.).

Ως προς τη χρήση τους τα πολυμερή διακρίνονται σε πολυμερή ευρείας χρήσης, σε τεχνικά και προηγμένα πολυμερή.

Ως προς τις ιδιότητες τους τα πολυμερή διακρίνονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες τεράστιας σημασίας για την κατασκευαστική βιομηχανία.

Θερμοπλαστικά (thermoplastics), αποτελούνται κυρίως από γραμμικά μακρομόρια, που με την θέρμανση μαλακώνουν και ρέουν, λόγω χαλάρωσης των μοριακών δεσμών, και αφού μορφοποιηθούν, αποψύχονται και στερεοποιούνται. Η διεργασία αυτή είναι αντιστρεπτή. Τα θερμοπλαστικά είναι ευαίσθητα στη θερμοκρασία και τους διαλύτες. Στα θερμοπλαστικά ευρείας και βιομηχανικής χρήσης περιλαμβάνονται το πολυαιθυλένιο (PE), το χλωριούχο πολυβινύλιο (PVC), το πολυπροπυλένιο (PP), πολυστυρένιο (PS), πολυακρυλονιτρίλιο (PAN), πολυαμίδια (Nylon), φθοροπολυμερή, κλπ.

Θερμοσκληρυνόμενα (*thermosets or thermosetting plastics*) , πρόκειται για δισδιάστατα ή τρισδιάστατα δίκτυα, αποτελούμενα από μικρά, σχετικά, μακρομόρια που προέρχονται από την επανάληψη του μονομερούς μερικές εκατοντάδες φορές. Κατά την ανάμειξη των συστατικών του πολυμερούς (ρητίνη με το αντίστοιχο σκληρυντικό), με ή χωρίς θέρμανση το πολυμερές σκληραίνει και μορφοποιείται κατά αντιστρεπτό τρόπο. Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή δεν επιδέχονται περαιτέρω κατεργασία, διότι αυξανόμενης της θερμοκρασίας διασπώνται οι δευτερεύοντες δεσμοί, αν και το πολυμερές δεν τήκεται λόγω της ιδιάζουσας δικτυωτής κατανομής των μακρομορίων του. Συνήθως είναι άμορφα. Τυπικά θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή: Φαινολικά πολυμερή (φαινολοπλάστες ή βακελίτες), ποξυδικές ρητίνες, αμινοπλάστες, πολυεστέρες, κλπ.

Ελαστομερή (*elastomers or rubbers*), Είναι συνήθως γραμμικά πολυμερή με διακλαδισμένες αλυσίδες. Εμφανίζουν την ιδιότητα της υπερελαστικότητας, δηλ. κατά τον εφελκυσμό επιδέχονται πολύ μεγάλη επιμήκυνση και κατά την αποφόρτιση ταχύτατη πλήρη επαναφορά. Σε πολλά ελαστομερή η διατήρηση της υπερελαστικής συμπεριφοράς διατηρείται σε ευρεία γκάμα αλλαγών θερμοκρασίας και συνθηκών περιβάλλοντος. Τυπικά ελαστικά: Ελαστικό κόμμι, συνθετικό και φυσικό καουτσούκ, συνθετικό πολυϊσοπρένιο, ελαστικό στυρένιο-βουταδιένιο, πολυχλωροπρένιο, σιλικόνες, κλπ.

Τα ελαστομερή είναι τα επονομαζόμενα ελαστικά ενώ τα θερμοπλαστικά και τα θερμοσκληρυνόμενα λέγονται και πλαστικά.

1.5 Ιδιότητες Πολυμερών

Οι ιδιότητες των πολυμερών εξαρτούνται από τη φύση του μονομερούς, τις συνθήκες παραγωγής του, το μήκος της μοριακής αλυσίδας και το μοριακό βάρος του πολυμερούς.

1.5.1 Φυσικές Ιδιότητες Πολυμερών

1.5.1.1 Πυκνότητα Πολυμερών

Τα Πολυμερή υλικά είναι ελαφρά, δηλαδή έχουν χαμηλή πυκνότητα, γεγονός που οφείλεται , κατά κύριο λόγο, στα μικρά ατομικά βάρη των στοιχείων H,C που συνθέτουν, κυρίως, τις μακρομοριακές αλυσίδες.

Τα κρυσταλλικά πολυμερή παρουσιάζουν μεγαλύτερη πυκνότητα από τα άμορφα λόγω κανονικότερης, άρα και πιο πυκνής, διάταξης των αλυσίδων. Η παρουσία συμμετρικών διακλαδώσεων ευνοεί την κρυστάλλωση και άρα αυξάνει την πυκνότητα. Ομοίως δρα και η προσθήκη ενισχυτικών υλικών σε πολυμερείς μήτρες, όπως π.χ. ίνες γυαλιού σε μήτρα πολυαμιδίου ή πολυανθρακική.

Τα ελαφρύτερα πολυμερή είναι τα θερμοπλαστικά και από αυτά τη μικρότερη πυκνότητα έχει το πολυπροπυλένιο ($0,85-0,92 \text{ g/cm}^3$). Την υψηλότερη πυκνότητα παρουσιάζουν τα πολυμερή στη μοριακή αλυσίδα των οποίων μετέχουν άτομα αλογόνων.

Η αντοχή σε εφελκυσμό των πολυμερών (σ_{TS}) είναι χαμηλή σε σχέση με αυτή των μεταλλικών και των κεραμικών υλικών, αλλά αυτό που κάνει ανταγωνίσιμα, με τα μέταλλα κυρίως, είναι η τιμή της ειδικής αντοχής ($\sigma_{TS}/\rho \text{ Mpa cm/g}$).

1.5.1.2 Θερμικές Ιδιότητες Πολυμερών

Θερμική αγωγιμότητα (k , thermal conductivity), των πολυμερών είναι πολύ μικρή, λόγω της απουσίας διεγερμένων ηλεκτρονίων στη δομή τους. Για το λόγω αυτό, τα πολυμερή βρίσκουν εφαρμογές και ως θερμομονωτικά υλικά, π.χ. πολυουρεθάνη, PS, PVC.

Ο συντελεστής γραμμικής θερμικής διαστολής (α_l , linear thermal expansion coefficient) αυξάνεται όταν η ένταση των δεσμών είναι χαμηλή. Η παρουσία δευτερευόντων χαλαρών δεσμών στα πολυμερή υλικά, τους προδίδει μεγάλο α_l . Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται στην περίπτωση σύνθετων υλικών μετάλλου-πολυμερούς, τα οποία μπορεί να οδηγηθούν σε αστοχία κατά τη θέρμανση-απόψυξή τους, λόγω του πολύ διαφορετικού α_l των δύο συστατικών τους.

Η ειδική θερμότητα ή θερμοχωρητικότητα (c_p , Heat capacity) των πολυμερών είναι γενικά μεγάλη, λόγω των αυξημένων δονήσεων των ατόμων που μετέχουν στην αλυσίδα των μακρομορίων.

1.5.1.3 Ηλεκτρικές Ιδιότητες Πολυμερών

Λόγω των ομοιοπολικών δεσμών, στα πολυμερή υλικά δεν υπάρχουν φορείς ηλεκτρικού φορτίου, δηλαδή ελεύθερα ηλεκτρόνια και ιόντα. Για το λόγο αυτό, τα πολυμερή εμφανίζουν μεγάλη ειδική ηλεκτρική αντίσταση, μεταξύ 10^{15} και $10^{18} \Omega \cdot \text{cm}$, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μονωτές του ηλεκτρισμού. Γι' αυτήν τους την ιδιότητα, τα πολυμερή χρησιμοποιούνται ευρύτατα στις επενδύσεις καλωδίων και συρμάτων.

1.5.1.4 Οπτικές Ιδιότητες Πολυμερών

Όταν το πάχος τους είναι της τάξης των μερικών δεκάτων του χιλιοστού, τα πολυμερή υψηλής καθαριότητας είναι άχρωμα και ο συντελεστής διαπερατότητας του φωτός παραμένει σταθερός σε όλο το φάσμα του ορατού.

Ο χρωματισμός των πολυμερών γίνεται είτε με προσθήκη ευδιάλυτων χρωμάτων (dyes), που δεν επηρεάζουν τη διαφάνειά τους, είτε με αδιάλυτες χρωστικές ουσίες (pigments), οι οποίες καθιστούν τα πολυμερή αδιαφανή. Τα άμορφα πολυμερή είναι

διαφανή, αφού δεν υπάρχουν κρύσταλλοι ώστε να προκαλείται σκέδαση του φωτός. Αντίθετα, τα κρυσταλλικά πολυμερή είναι ημιδιαφανή, αφού κάθε κρύσταλλος διαχέει το φως. Ωστόσο, κατά τα κρυσταλλικά πολυμερή εμφανίζονται διαφανή, στην περίπτωση κατά την οποία οι κρύσταλλοι είναι προσανατολισμένοι παράλληλα μεταξύ τους. Τα θερμοπλαστικά που χρησιμοποιούνται συχνότερα σε οπτικές εφαρμογές, είναι τα πολυακρυλικά και τα πολυανθρακικά πολυμερή. οι πολυμεθυλακρυλικοί εστέρες έχουν μεγάλη ικανότητα χρωματισμό, διαφάνεια και ακαμψία. Γι' αυτά τους τα χαρακτηριστικά βρίσκουν εφαρμογή στην κατασκευή υαλοπινάκων ασφαλείας (plexiglass, perspex, lucite), οπτικών οργάνων, φακών επαφής, διακοσμητικών και φωτιστικών αντικειμένων. Ωστόσο, η ευαισθησία που παρουσιάζουν σε χαράξεις έχει οδηγήσει σε αντικατάστασή τους από πολυανθρακικά πολυμερή, για εφαρμογές χαμηλότερων απαιτήσεων, όπως είναι φακοί για κιάλια, το διαφανές κάλυμμα κράνους, οι φανοί και το parebrise των αυτοκινήτων κ.λ.π..

1.5.2 Μηχανικές Ιδιότητες Πολυμερών.

Οι μηχανικές ιδιότητες των πολυμερών παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον για δύο κυρίως λόγους:

- Η κατασκευή εξαρτημάτων από πολυμερές υλικό προϋποθέτει εφαρμογή τεχνικών διαμόρφωσης, στηρίζεται, δηλαδή, στη πλαστική παραμόρφωση του πολυμερούς.
- Κατά την λειτουργία τους, τα πολυμερή υφίστανται μηχανικές καταπονήσεις που μπορούν να οδηγήσουν στην καταστροφή τους.

Η εκτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς των πολυμερών στηρίζεται στη μελέτη της **στιβαρότητας** τους (stiffness), την αντίστασή τους, δηλαδή σε ελαστικές παραμορφώσεις και στην μελέτη της **αντοχής** τους (strength) , δηλαδή, την αντίσταση τους σε θραύση μετά από πλαστική παραμόρφωση.

Κάποιες από τις πιο σημαντικές μηχανικές ιδιότητες που απαιτούνται για τη μελέτη των πολυμερών είναι:

- το μέτρο ελαστικότητας E (Young' s modulus or elastic modulus)
- το όριο διαρροής σ_y (yield strength)
- η αντοχή στον εφελκυσμό (tensile strength)
- η επιμήκυνση κατά τη θραύση Δl (elongation at break)
- Αρχικό μήκος L

Η συμπεριφορά των πολυμερών στις θερμοκρασιακές αλλαγές περιγράφεται γενικά από δύο τιμές. Τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (glass transition temperature T_g) και τη θερμοκρασία τήξης (melting temperature T_m).

1.5.2.1 Παραμόρφωση

Η **παραμόρφωση** είναι σε γενικές γραμμές η αλλαγή του σχήματος ή του μεγέθους ενός σώματος έπειτα από την άσκηση κάποιας δύναμης πάνω στο σώμα. Παραμόρφωση μπορεί να προκληθεί επίσης από μεταβολή της θερμοκρασίας του σώματος κατά τις διαδικασίες της συστολής ή διαστολής.

Η έννοια της παραμόρφωσης χρησιμοποιείται πολύ συχνά στη φυσική, στην εφαρμοσμένη μηχανική, στη δομική, την επιστήμη υλικών κ.α. Η μελέτη της ενδιαφέρει κάθε εφαρμογή όπου είναι σημαντική η στατικότητα, η στερεότητα και οι δομικές αστοχίες μιας κατασκευής ή ενός σώματος.

Αδρά μπορούν να διακριθούν δυο είδη παραμόρφωσης:

- **Ελαστική παραμόρφωση**, που δεν είναι μόνιμη, δηλαδή το σώμα επανέρχεται στο αρχικό του σχήμα όταν πάψει να ενεργεί η δύναμη που προκάλεσε την παραμόρφωση. Παράδειγμα ελαστικής παραμόρφωσης είναι αυτή ενός ελατηρίου, που επανέρχεται στο αρχικό του μήκος μόλις πάψει να του ασκείται δύναμη. Η ελαστική παραμόρφωση περιγράφεται μαθηματικά από το νόμο του Hooke.
- **Πλαστική παραμόρφωση** που είναι μόνιμη, δηλαδή το σώμα δεν επανέρχεται στο αρχικό του σχήμα. Παράδειγμα μπορεί να είναι ένα κομμάτι πλαστελίνης το οποίο χτυπάμε με το χέρι μας πάνω σε ένα τραπέζι, ή το ελατήριο του πιο πάνω παραδείγματος όταν του ασκηθεί υπερβολική δύναμη εφελκυσμού και σπάσει. Για κάθε σώμα υπάρχει μια συγκεκριμένη τιμή δύναμης που μπορεί να ασκηθεί πριν το σώμα σπάσει (όριο θραύσης).

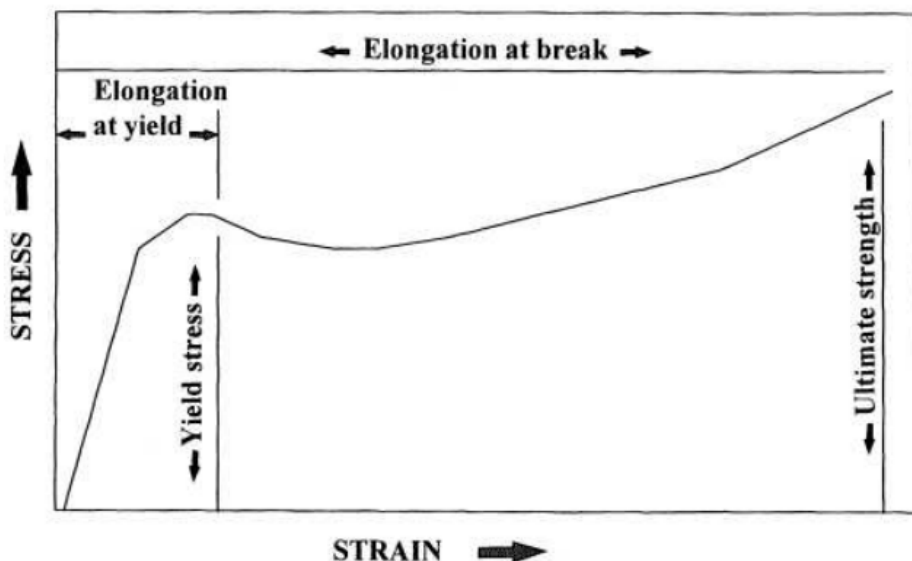
1.5.2.2 Ελαστική συμπεριφορά πολυμερών

Η ελαστική συμπεριφορά των πολυμερών οφείλεται σε δύο μηχανισμούς :

- Κατά την μηχανική φόρτιση του υλικού στην ελαστική περιοχή, οι ομοιοπολικοί δεσμοί των αλυσίδων τεντώνονται και παραμορφώνονται, δηλαδή, υφίστανται ελαστική επιμήκυνση. Μετά την απομάκρυνση του φορτίου πραγματοποιείται επαναφορά στο αρχικό μήκος. Ο υπολογισμός του σ_y (όριο διαρροής-yield strength), γίνεται όπως και στα μέταλλα, εφόσον και στην περίπτωση των πολυμερών η ελαστική συμπεριφορά διέπεται από τη γραμμική σχέση **τάσης-παραμόρφωσης** (stress-strain) (γραμμική ελαστική συμπεριφορά, Linear).
- Για τα μεγαλύτερα φορτία, τμήματα αλυσίδων του πολυμερούς μπορεί να παραμορφωθούν τόσο, ώστε μετά την απομάκρυνση του φορτίου να επανέλθουν στην αρχική τους κατάσταση μετά από κάποιο χρόνο (ώρες ή μήνες). Αυτό το είδος της ελαστικής συμπεριφοράς ονομάζεται μη γραμμική ελαστική συμπεριφορά (nonlinear).

Το **μέτρο ελαστικότητας** εκφράζει την ακαμψία του πολυμερούς, το **όριο διαρροής** εκφράζει την αντοχή του πολυμερούς μέχρι τη στιγμή που τελειώνει η

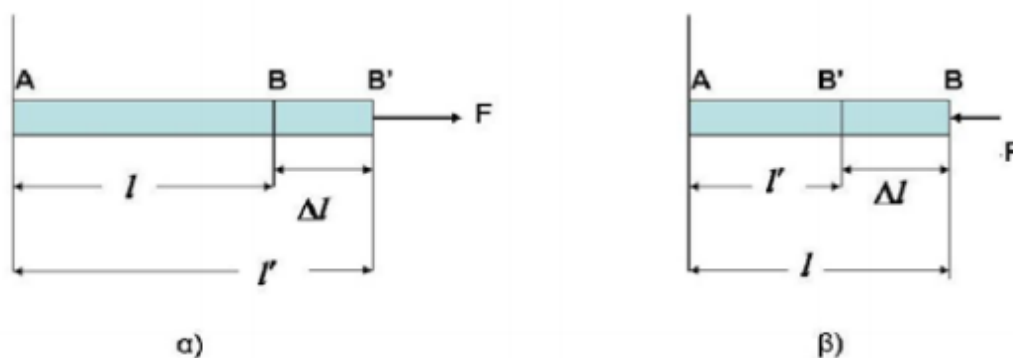
ελαστική και ξεκινάει η πλαστική παραμόρφωση και η αντοχή στον εφελκυσμό εκφράζει την αντοχή του πολυμερούς μέχρι τη θραύση. Η **επιμήκυνση** κατά τη θραύση εκφράζει το ποσοστό επιμήκυνσης του πολυμερούς μέχρι τη στιγμή της θραύσης. Η δοκιμή του εφελκυσμού χρησιμοποιείται για την εύρεση μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών όπως είναι η σχέση **τάσης (σ)- παραμόρφωσης (ε)** που θεωρούνται χρήσιμες κατά το σχεδιασμό. Η ονομαστική τάση δίνεται από τον τύπο $\sigma = F/A_0$ και μετριέται σε MPa, όπου F η δύναμη που ασκείται σε επιφάνεια A_0 . Για μικρές παραμορφώσεις κατά τον εφελκυσμό, η τάση με την παραμόρφωση συνδέονται με τη σχέση $\sigma = E \times \varepsilon$. Η σχέση αυτή είναι γνωστή ως νόμος του **Hooke** και η σταθερά αναλογίας E είναι το μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο του Young (*modulus of elasticity*) και μετριέται σε GPa ή psi (145 psi= 1 MPa). Όταν η τάση είναι ανάλογη της παραμόρφωσης, οι παραμορφώσεις είναι γραμμικά ελαστικές. Τις μηχανικές ιδιότητες επηρεάζουν διάφοροι παράγοντες όπως για παράδειγμα η φύση του φορτίου που ασκείται, η διάρκεια του φορτίου, καθώς και οι περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η θερμοκρασία. Η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί στην ελάττωση του μέτρου ελαστικότητας, στη μείωση της αντοχής εφελκυσμού και στην αύξηση της ολκιμότητας. Το μοριακό βάρος επηρεάζει την αντοχή στον εφελκυσμό. Με την αύξηση του μοριακού βάρους αυξάνεται και η αντοχή στον εφελκυσμό. Επίσης, αύξηση της κρυσταλλικότητας ενός πολυμερούς γενικά αυξάνει την αντοχή του και το υλικό τείνει να γίνει πιο ψαθυρό.



Εικόνα 7 : Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης πολυμερούς υλικού

Το σημείο το οποίο σταματάει η ελαστική και αρχίζει η πλαστική παραμόρφωση ονομάζεται όριο διαρροής (σ_y) του πολυμερούς. Το μέτρο E μπορεί να θεωρηθεί και ως η δυσκαμψία του υλικού ή η αντίστασή του σε ελαστική παραμόρφωση. Όσο μεγαλύτερο είναι το E τόσο πιο δύσκαμπτο είναι το υλικό ή αλλιώς τόσο μικρότερη είναι

η ελαστική παραμόρφωση που προκύπτει από την εφαρμογή μιας τάσης. Ως αντοχή των πλαστικών πολυμερών εκλαμβάνεται συνήθως η αντοχή στον εφελκυσμό. Στις περισσότερες εφαρμογές αυτό που μας ενδιαφέρει είναι ο σχεδιασμός να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται το γεγονός ότι θα προκύψουν μόνο ελαστικές παραμορφώσεις. Γενικά, το *μέτρο ελαστικότητας* των πολυμερών μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, εκτός από τα ελαστομερή που συμβαίνει το αντίθετο, αφού η ελαστικότητά τους είναι εντροπική. Το μέτρο ελαστικότητας E στα πολυμερή είναι αρκετά μικρότερο από αυτό των μετάλλων και αυτό οφείλεται στους δευτερεύοντες ασθενείς δεσμούς μεταξύ των αλυσίδων. Αντίθετα με τα μέταλλα και τα κεραμικά, το E στα πολυμερή εξαρτάται από το χρόνο επιβολής του φορτίου (ιξωδοελαστικότητα). Το μέτρο ελαστικότητας για τα ελαστομερή μπορεί να είναι της τάξης των 7 MPa, για τα **θερμοπλαστικά 1- 4 GPa** και για τα **θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή 1-22 GPa**. Οι μεγαλύτερες εφελκυστικές αντοχές στα 13 πολυμερή είναι της τάξης των 100 MPa και η επιμήκυνση των ελαστομερών μπορεί να φτάσει και 400-500%.



Εικόνα 8 : α) Επιμήκυνση εφελκυσόμενης ράβδου και β) επιβράχυνση θλιβόμενης ράβδου.

Επομένως η παραμόρφωση ορίζεται ως :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

Όπου $\Delta l : \Delta l = l' - l$

Το l είναι το αρχικό μήκος και l' τελικό μήκος μετά την επίδραση της δύναμης.

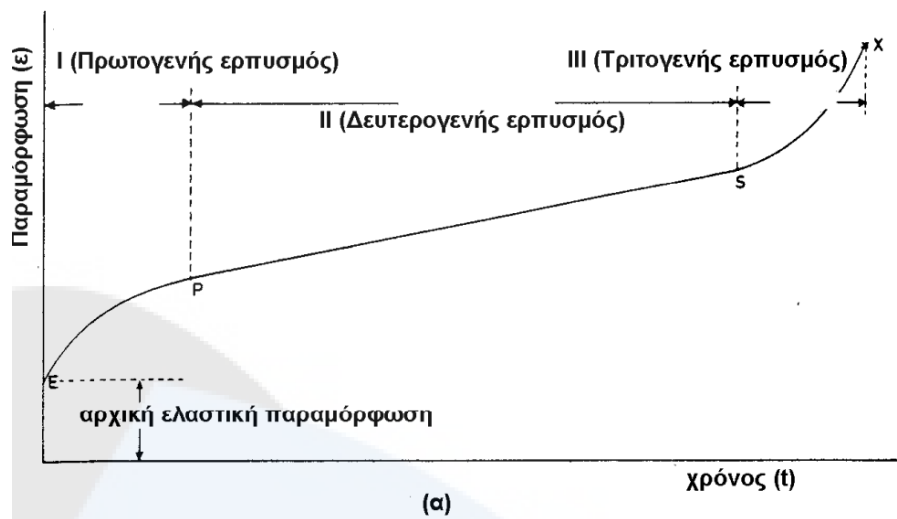
1.5.2.3 Ερπυσμός (Creep)

Ερπυσμός λέγεται το φαινόμενο κατά το οποίο σε στερεό σώμα ασκείται μια σταθερή δύναμη και εκδηλώνεται μία αργή και συνεχής **παραμόρφωση** παρότι η **τάση** η οποία το καταπονεί είναι μικρότερη από το **όριο διαρροής** του υλικού. Το

φαινόμενο εκδηλώνεται σε ψηλές θερμοκρασίες και όταν ασκούνται μηχανικές καταπονήσεις για παρατεταμένο χρόνο. Στον ερπυσμό η παραμόρφωση δίνεται σε συνάρτηση με τον **χρόνο** επιβολής της τάσης, το μέγεθος της τάσης και τη **θερμοκρασία**,

$$\varepsilon = f(t, \sigma, T)$$

Σαν προσεγγιστικός κανόνας, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μια πρώτη εκτίμηση της περιοχής ερπυσμού για πολλά υλικά, έχει παρατηρηθεί ότι ο ερπυσμός συμβαίνει σε θερμοκρασίες πάνω από περίπου το 1/3 της θερμοκρασίας τήξης του υλικού.



Εικόνα 9 : Διάγραμμα παραμόρφωσης ε συναρτήσει χρόνου t

1.5.2.4 Λόγος Poisson

Η αξονική παραμόρφωση μιας ράβδου συνοδεύεται από μια μικρή εγκάρσια (πλευρική) παραμόρφωση. Στην περίπτωση του εφελκυσμού είναι συστολή $S' < S$ ενώ στην περίπτωση της θλίψης είναι διαστολή $S' > S$. Ανεξάρτητα από το σχήμα της διατομής αν b είναι μια οποιαδήποτε αρχική εγκάρσια διάσταση (π.χ διάμετρος του κύκλου, πλευρά τετραγώνου κλπ) και b' η διάσταση μετά την παραμόρφωση, ονομάζουμε ειδική εγκάρσια διατομή το λόγο:

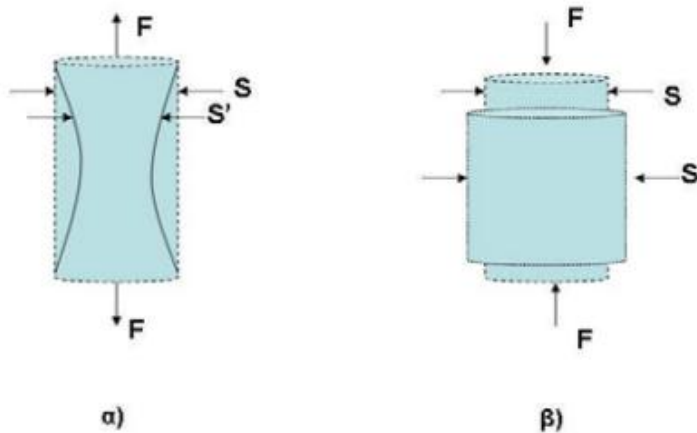
$$\varepsilon_q = \frac{b' - b}{b}$$

Ειδικότερα στον εφελκυσμό η παραπάνω ποσότητα ονομάζεται εγκάρσια συστολή και είναι αρνητική ποσότητα ($\varepsilon_q < 0$), ενώ στη σύνθλιψη λέγεται εγκάρσια διαστολή και είναι θετική ποσότητα ($\varepsilon_q > 0$).

Λόγος Poisson ορίζεται ο λόγος:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_q}{\varepsilon}$$

Το αρνητικό πρόσημο δικαιολογείται από το ότι τα μεγέθη ε_q και ε είναι πάντοτε ετερόσημα διότι όταν αυξάνεται η μία διάσταση συγχρόνως ελαττώνεται η άλλη. Ο συντελεστής ν είναι χαρακτηριστική σταθερά για κάθε υλικό εφόσον αυτό καταπονείται μέσα στα όρια της ελαστικής του συμπεριφοράς και προφανώς είναι καθαρός αριθμός. Για το λάστιχο ο λόγος ν πλησιάζει τη μέγιστη τιμή του που είναι ίση με 0.5. Υλικά με πολύ μικρό ν είναι ο φελλός που έχει πρακτικά περίπου $\nu = 0$. Για το χάλυβα συνήθως είμαι $\nu = 0.3$. Στην πλαστική περιοχή, τα υλικά διατηρούν σταθερό τον όγκο τους και έτσι ο λόγος Poisson τείνει ασυμπτωτικά στην τιμή $\nu = 0.5$.



Εικόνα 10 : α) Κατά τον εφελκυσμό, μετά το όριο θραύσης, παρατηρείται ορατή ελάττωση της διατομής μιας ράβδου κατά το μέσον της (παρουσιάζει λαιμό) β) Αντίθετα κατά τη θλίψη παρατηρείται ορατή αύξηση της διατομής μιας ράβδου

Κοινές Τιμές Λόγων Poisson

| Material | Poisson's ratio |
|-----------------------------------|------------------------|
| Rubbers | 0.5 |
| Lead | 0.45 |
| Aluminium | 0.33 |
| Common steels | 0.27 |
| Cellular solids e.g polymer foams | 0.1 - 0.4 |
| Cork | 0.0 |

2 . ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΕΣ ΔΟΜΕΣ

2.1 Στοιχειώδεις Κύτταρο (unit cell)

Τα στοιχειώδη Κύτταρα (μοναδιαία κυψελίδα) είναι ο μικρότερος όγκος στο χώρο που όταν επαναλαμβάνεται μας δίνει συνολικά ολόκληρη την Δομή που επιθυμούμε. Τα συστήματα ξεχωρίζουν μεταξύ τους από τις σταθερές του πλέγματος που είναι τα μήκη των πλευρών των μοναδιαίων κυψελίδων και οι μεταξύ τους γωνίες.

2.2 Δομές με Αρνητικό Λόγο Poisson

Έχει αποδειχθεί πως δομές με αρνητικό λόγο Poisson (auxetic structures), με προσχεδιασμένους αυξητικούς πυρήνες, θα μπορούσαν να εμφανίσουν σημαντικά βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες όπως καμπτική συμμόρφωση απορρόφηση ενέργειας, τα οποία είναι κρίσιμα για πολλές δομικές εφαρμογές.

Σε πολλές εφαρμογές οι σύνθετες δομές υπόκεινται σε αρκετές απαιτήσεις όπως σε ελάχιστο βάρος και σε ανάγκη για υψηλή ακαμψία. Οι κυτταρικές δομές δύο διαστάσεων χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σε πυρήνες για δομές τύπου σάντουιτς αλλά συχνά έχουν έλλειψη των ικανοτήτων που απαιτούνται. Ενώ οι τρισδιάστατες κυτταρικές δομές έχουν πολλά πλεονεκτήματα σε τέτοιες δομές.

Μια τέτοια δομή μπορεί να χαρακτηριστεί η αυξητική δομή (**auxetic structure**) που εμφανίζει αρνητικό λόγο poisson σε μια ή και περισσότερες κατευθύνσεις.

Λόγω της αντιφατικής συμπεριφοράς και των εξαιρετικών ιδιοτήτων που παρουσιάζουν, έχουν λάβει ιδιαίτερη προσοχή τα τελευταία χρόνια. Ο συνδυασμός της του υψηλού μέτρου διάτμησης, της μεγάλης ανθεκτικότητας, της καμπτικής συμμόρφωσης καθώς και το μέτρο ελαστικότητας και το όριο διαρροής κάνουν της αυξητικές δομές (**auxetic structure**) κατάλληλες για τρισδιάστατες σύνθετες δομές.

Οι δομές αυτές κατασκευάζονται μέσω μίας διαδικασίας πολλών σταδίων που προϋποθέτει πολλά σχέδια καλουπιών και διαδικασίες θερμικής συμπίεσης. Οι μηχανικές ιδιότητες που προκύπτουν από της δομές αυτές μέσω της διαδικασίας κατασκευής αυτής είναι σε μεγάλο βαθμό εμπειρική. Αυτήν την εποχή, όμως, εναλλακτική λύση κατασκευής αυτών των δομών είναι η ταχεία προτυποποίηση.

2.3 Δομικός Σχεδιασμός

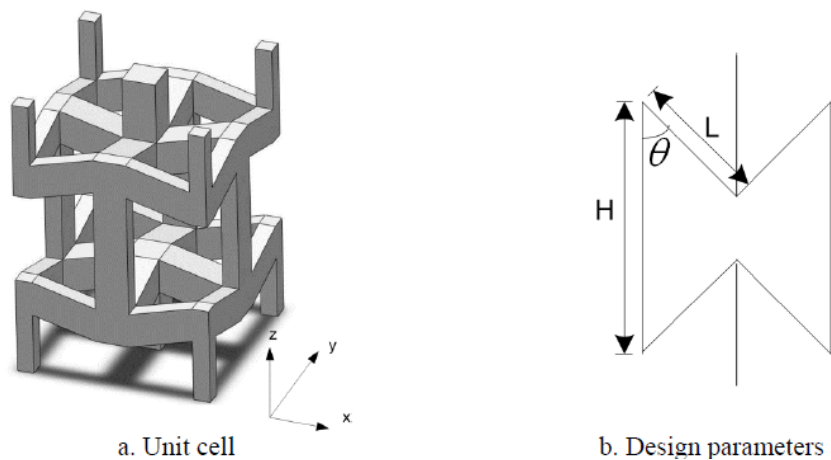
Δομή re-entrant (επαναισερχόμενη δομή)

Η δομή αυτή είναι μία ανορθότροπη δομή όπου οι χ και ψ κατευθύνσεις εμφανίζουν ταυτόσημες ιδιότητες λόγω της συμμετρίας του κυττάρου και περιγράφεται

από τους λόγους Poisson ν_{xy} και ν_{yz} και ορίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις, όπου ε_x και ε_y οι παραμορφώσεις στο οριζόντιο και κάθετο επίπεδο αντίστοιχα.

$$\nu_{xy} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = \frac{\sin^2 \theta}{(\cos \theta) \times \left(\frac{H}{L} - \cos \theta \right)}$$

$$\nu_{yz} = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_y} = \frac{(\cos \theta) \times \left(\frac{H}{L} - \cos \theta \right)}{\sin^2 \theta}$$

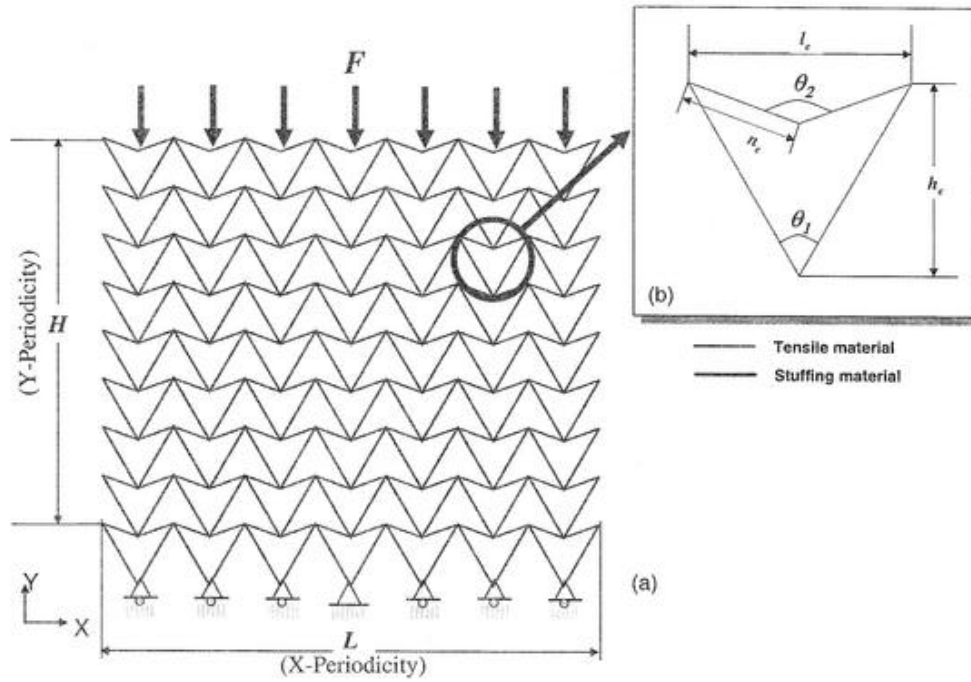


Εικόνα 11 : μοναδιαίο κύτταρο της δομής *re-entrant*

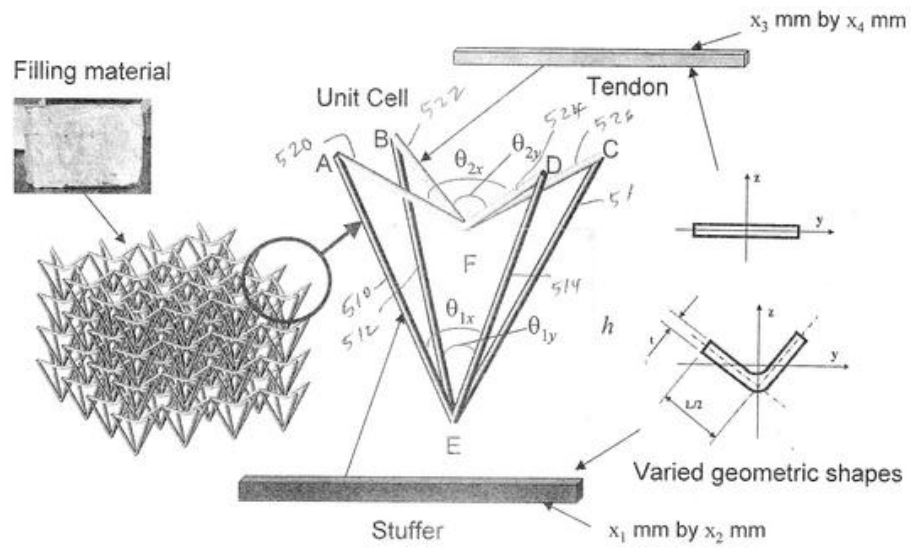
όπου H το μήκος της ράβδου, όπου L το μήκος της επαναισερχόμενης ράβδου, όπου θ η εισέχουσα γωνία και t το πάχος της ράβδου.

Δομή runflat

Ο τύπος δομής αυτός χρησιμοποιείται συνήθως σε ελαστικά τύπου runflat όπου δεν υπάρχει αέρας στο ελαστικό. Η δομή αυτή έχει ως αποτέλεσμα να είναι χαμηλότερη σε βάρος και πιο ανθεκτική και λειτουργεί για να καλύψει τις απαιτήσεις κυρίως στρατιωτικών αλλά και εμπορικών αυτοκινήτων. Περιβάλλονται από ένα πλήθος ομόκεντρων δακτυλίων των μοναδιαίων κυττάρων. Είναι και αυτή μία από της δομές που παρουσιάζουν αρνητικό λόγο Poisson.

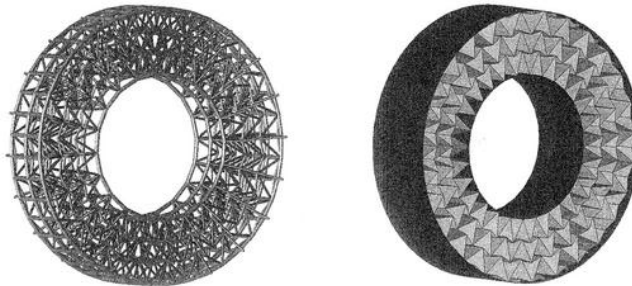


Εικόνα 12 : Πλήθος ομόκεντρων δακτυλίων της δομής runflat.



Εικόνα 13 : Χαρακτηριστικά δομής runflat

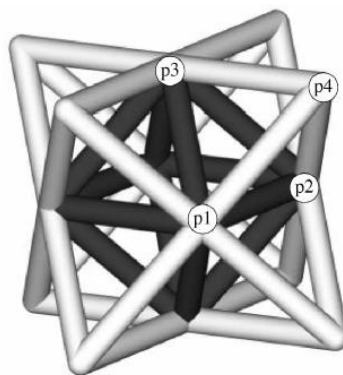
Η εφαρμογή της δομής σε ελαστικά μπορεί να φανεί και στην παρακάτω φωτογραφία.



Εικόνα 14 : Εφαρμογή της δομής σε ελαστικά αυτοκινήτων

Οκταεδρική Δομή (octet)

Τα οκταεδρικά κύτταρα συνδέονται μεταξύ τους με ράβδους έτσι ώστε να σχηματίσουν τη δομή σε οχτώ επίπεδα, όπου κάθε ράβδος μοιράζεται ανάμεσα σε δύο γειτονικά κελιά. Για καλύτερη κατανόηση της δομής υπάρχει και η παρακάτω φωτογραφία.

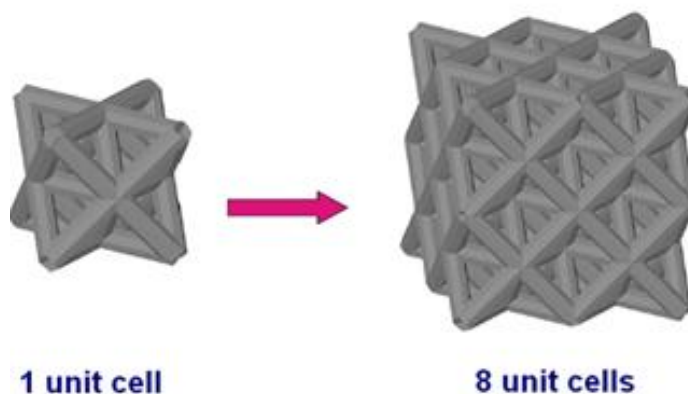


Εικόνα 15 : Δομή του οκταεδρικού κυττάρου. Η σκούρα περιοχή αντιπροσωπεύει το οκταεδρικό κελί όπως και οι κόμβοι P1,P2,P3,P4 τη μορφή τετραεδρικού κελιού.

Η οκταεδρική δομή αποτελείται από συμπαγή κυλινδρικούς ράβδους και η πυκνότητα της δομής προκύπτει από την εξής εξίσωση.

$$\rho = 6\sqrt{2} \times \pi \times \left(\frac{a}{\lambda}\right)^2$$

όπου a και λ το ράδιο και το μήκος της κάθε ράβδου αντίστοιχα.



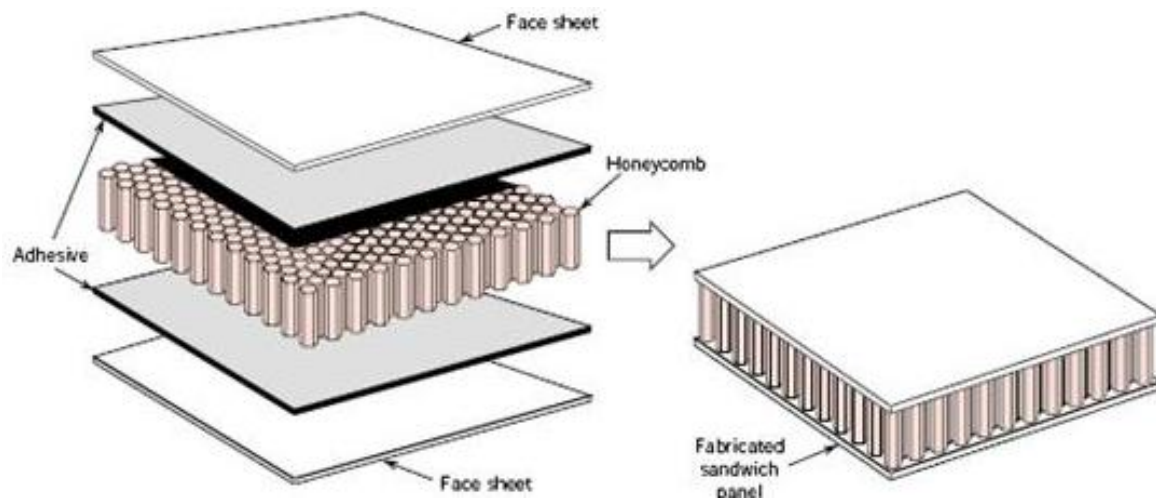
Εικόνα 16 : Μοναδιαίο κύτταρο της οκταεδρικής δομής

2.4 Εξαγωνική Δομή Κυψέλης (Honeycomb Structure)

Οι εξαγωνικές δομές είναι φυσικές ή τεχνητές δομές που έχουν την γεωμετρία μιας κηρήθρας της μέλισσας και επιτρέπουν το ελάχιστο βάρος και την ελαχιστοποίηση του ποσού του υλικού που χρησιμοποιείται για την δημιουργία του όπως και το ελάχιστο κόστους υλικών. Τα κύτταρα είναι σε στήλες και έχουν εξαγωνικό σχήμα. Μια τέτοια κυψελοειδής δομή παρέχει σε ένα υλικό την ελάχιστη σχετική πυκνότητα και υψηλές ιδιότητες συμπιεστικές και διάτμησης.

Οι τεχνητές εξαγωνικές δομές συνήθως είναι κατασκευασμένες ανάμεσα από δύο λεπτές στρώσεις διαφόρων υλικών ώστε να παρέχουν αντοχή σε εφελκυσμό. Αυτό σχηματίζει ένα συγκρότημα που μοιάζει με πλάκα. Τα υλικά με τέτοιες δομές χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές όπου οι επιφάνειες είναι επίπεδες ή ελαφρώς καμπύλες και που είναι απαραίτητη η υψηλή αναλογία αντοχής-βάρους.

Ο τεχνητές εξαγωνικές δομές κατασκευάζονται από διάφορα ποικίλα υλικά αναλόγως την εφαρμογή και τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά από χαρτί μέχρι και θερμοπλαστικά υλικά. Η εξαγωνική δομή κυψέλης είναι γνωστή στην αεροδιαστημική και αεροναυπηγική βιομηχανία και εφαρμόζεται σε αεροσκάφη και πυραύλους από τη δεκαετία του 1950. Επίσης μπορούμε να την βρούμε σε πολλά υλικά συσκευασίας και σε αθλητικά είδη όπως σε σανίδες σκι (ski, snowboard).



Εικόνα 17: Εξαγωνική Δομή κυψέλης (Honeycomb structure).

3. ΑΡΙΘΜΙΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

3.1 Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων

3.1.1 Γενικά

Η μέθοδος αυτή αποτελεί ισχυρό εργαλείο στη μελέτη των κατασκευών και βρίσκει μεγάλο αριθμό εφαρμογών. Στο πεδίο της ανάλυσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο στο (συμβατικό) ελαστικό πεδίο (θεωρία μικρών μετατοπίσεων) αλλά και για μη-γραμμικά προβλήματα, λυγισμό, δυναμική συμπεριφορά κ.ά. Η μέθοδος χρησιμοποιείται γενικότερα σε προβλήματα που επιδέχονται μεταβολική διατύπωση στην μηχανική των συνεχών μέσων. Η αρχική διατύπωση της μεθόδου έγινε με βάση την μητρική ανάλυση, αργότερα όμως δόθηκε ευρύτερη και πιο θεμελιώδης θεωρητική βάση. Αρχικά θα θεωρήσουμε την μέθοδο ως επέκταση της μητρικής ανάλυσης στην ανάλυση των συνεχών μέσων (ελάσματα, κελύφη). Το χαρακτηριστικό της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η χρήση δισδιάστατων και τρισδιάστατων στοιχείων για την προσομοίωση συνεχών μέσων. Μια από τις πρώτες δημοσιεύσεις στις οποίες παρουσιάστηκε η ιδέα αυτή είναι των Turner, Clough, Martin, και Topp (1956), ορισμένα όμως χαρακτηριστικά της είχαν ήδη περιγραφεί από τους Courant (1943), Hrenikoff (1941), McHenry (1943) και άλλους. Τα πρώτα πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν σε προβλήματα επίπεδης εντατικής κατάστασης, αργότερα όμως διατυπώθηκαν στοιχεία και για τρισδιάστατα στερεά, ελάσματα υπό κάμψη, παχιά κελύφη, και άλλες μορφές κατασκευών. Μετά την καθιέρωσή τους στη γραμμική ελαστική περιοχή εφαρμόστηκαν και σε δυσκολότερα προβλήματα όπως η δυναμική συμπεριφορά, ο λυγισμός και η μη-γραμμική απόκριση και συμπεριφορά του υλικού. Για να επιλυθούν δε προβλήματα με μη-γραμμική συμπεριφορά του υλικού απαιτείται επαναληπτική διαδικασία.

Για να εφαρμοστεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων απαιτούνται τα εξής στάδια:

- Εισάγεται η γεωμετρία της κατασκευής σε ένα πρόγραμμα CAD και δημιουργείται το τρισδιάστατο μοντέλο.
- Χωρίζεται το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία και αφού ετοιμαστεί το πλέγμα επιλέγεται το είδος της επίλυσης και εισάγονται τα επιπλέον δεδομένα που απαιτούνται. Παραδείγματος χάριν, αν επιλεγεί να λυθεί το μοντέλο σε στατική καταπόνηση θα πρέπει να δοθούν τα δεδομένα για τις δυνάμεις και τις στηρίξεις. Αυτή η διαδικασία γίνεται με προγράμματα που αποκαλούνται pre processor.
- Όταν ετοιμαστούν τα δεδομένα για επίλυση, εισάγονται σε ένα πρόγραμμα το οποίο θα κάνει την επίλυση του προβλήματος. Τέτοιου είδους προγράμματα λέγονται solver και χρησιμοποιούν για τις επιλύσεις αριθμητικές μεθόδους.
- Όταν τελειώσει η επίλυση στα αποτελέσματα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα πρόγραμμα, που αποκαλείται post processor, για να μπορέσει ο μελετητής να δει τα αποτελέσματα.

3.2 Τάσεις Και Ισορροπία

Ένα σώμα 3 διαστάσεων καταλαμβάνει όγκο V με επιφάνεια S . Τα σημεία στο σώμα προσδιορίζονται με συντεταγμένες x, y, z . Το σύνορο περιορίζεται σε κάποια περιοχή όπου ορίζεται η μετατόπιση. Σε μέρος του συνόρου εφαρμόζεται μια δύναμη η οποία κατανέμεται ανά μονάδα επιφανείας T , και η οποία καλείται εφελκυσμός. Το σώμα παραμορφώνεται κάτω από την επίδραση αυτής της δύναμης. Η παραμόρφωση του σημείου $x(=[x, y, z]^T)$ δίνεται με 3 συνιστώσες της μετατόπισης :

$$u = [u, v, w]^T$$

Η κατανεμημένη δύναμη ανά μονάδα όγκου, για παράδειγμα, το βάρος ανά μονάδα όγκου, είναι το διάνυσμα f το οποίο δίνεται από :

$$f = [f_x, f_y, f_z]^T$$

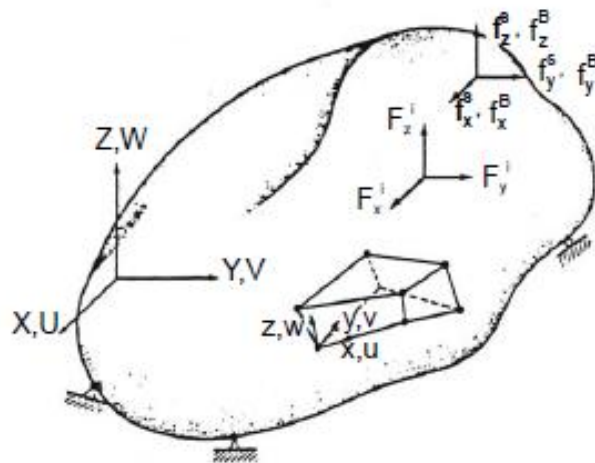
Ο επιφανειακός εφελκυσμός T μπορεί να δοθεί με τις τιμές των συνιστώσεων στα σημεία της επιφανείας :

$$T = [T_x, T_y, T_z]^T$$

Παραδείγματα εφελκυσμού είναι η κατανεμημένη δύναμη επαφής και η δράση της πίεσης. Ένα φορτίο P_i το οποίο ενεργεί στο σημείο i παριστάνεται με 3 συνιστώσες

$$P_i = [P_x, P_y, P_z]^T$$

Όταν ο όγκος dV συρρικνώνεται σε ένα σημείο ο τανυστής τάσης παριστάνεται με την τοποθέτηση των συνιστωσών σε ένα (3x3) συμμετρικό μητρώο.



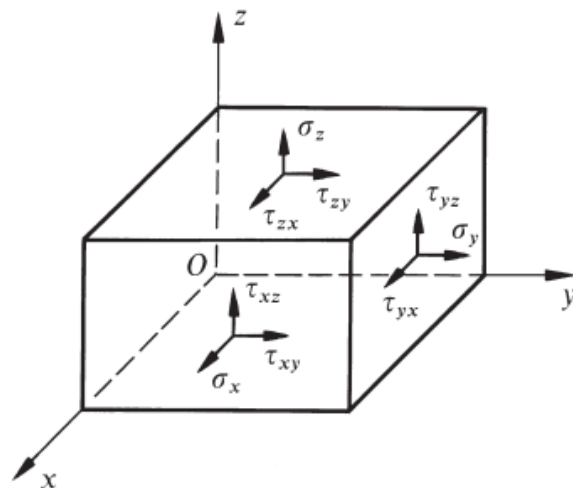
Εικόνα 18 : Σώμα 3 διαστάσεων

Όλες οι συνιστώσες της τάσης θα συμβολίζονται με το σύμβολο σ ή τ με κατάλληλους δείκτες. Ο πρώτος δείκτης θα δηλώνει την προς τα έξω κάθετη πάνω στην επιφάνεια στην οποία δρα η συνιστώσα της τάσης, ενώ ο δεύτερος δείκτης θα δηλώνει την διεύθυνση της συνιστώσας αυτής.

Η τάση, όμως, παριστάνεται με τις έξι ανεξάρτητες συνιστώσες, όπως

$$\sigma = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy}]^T$$

όπου $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$, είναι οι κάθετες τάσεις και $\tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy}$ είναι οι διαμητικές τάσεις.



(h)

Εικόνα 19 : Συμβολισμός των συνιστωσών τάσης

3.3 Τάση Von Mises

Ένας από τους κύριους λόγους για τους οποίους είναι απαραίτητοι οι υπολογισμοί, με βάση τη θεωρία Ελαστικότητας, είναι ο προσδιορισμός του πότε και που, θα αστοχήσει ένα δομικό στοιχείο. Θεωρίες αστοχίας υλικών δεν θα αναπτυχθούν εδώ, αλλά αναφέρουμε απλώς ότι, τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα κριτήρια αστοχίας είναι, για τα όλκιμα υλικά, αυτό του Von Mises, και για τα ψαθυρά υλικά, αυτό της μέγιστης εφελκυστικής τάσης. Ένα ψαθυρό υλικό αστοχεί συνήθως όταν η μέγιστη εφελκυστική τάση φτάσει μια κρίσιμη τιμή, πράγμα που σημαίνει ότι θα πρέπει να υπολογίσουμε την μέγιστη κύρια τάση σ_1 . Το κριτήριο του Von Mises λέει ότι, ένα όλκιμο υλικό αρχίζει να διαρρέει όταν, η ενέργεια παραμόρφωσης ανά μονάδα όγκου, φτάνει μια κρίσιμη τιμή. Αυτό οδηγεί στο παρακάτω κριτήριο διαρροής :

$$\sigma_E = \sqrt{I^2 - 3I_2} \leq \sigma_y$$

$$I = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$

$$I_2 = \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x - t_{yz}^2 - t_{xz}^2 - t_{xy}^2$$

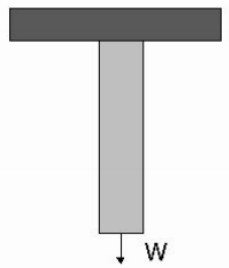
$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2 - \sigma_{xx} \sigma_{yy} - \sigma_{yy} \sigma_{zz} - \sigma_{zz} \sigma_{xx} + 3\sigma_{xy}^2 + 3\sigma_{yz}^2 + 3\sigma_{zx}^2}$$

όπου σ_y είναι η τάση διαρροής σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Η ποσότητα σ_E είναι γνωστή ως ισοδύναμη εφελκυστική τάση ή Von Mises τάση σ_{vm} .

Σημειώνουμε πως το κριτήριο ανάλυσης που θα χρησιμοποιηθεί στην προσομοίωση είναι Von Mises.

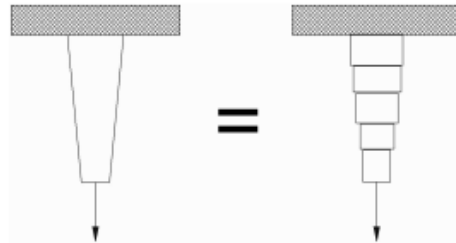
3.4 Διακριτοποίηση

Η επιμήκυνση της δομής της Εικόνας 20 υπό την επίδραση ενός φορτίου εξαρτάται από το μέγεθος της φόρτισης και από τις ιδιότητες του υλικού.



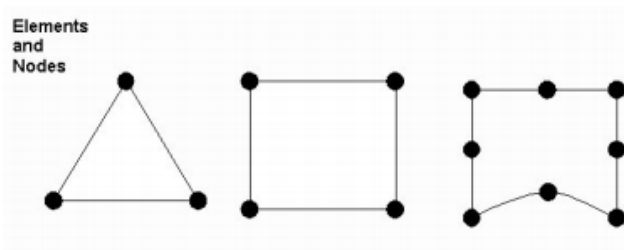
Εικόνα 20: Επίδραση φορτίου σε δομή.

Η φόρτιση που ασκείται ισούται με το γινόμενο της ακαμψίας του υλικού επί την παρεκτόπιση που προκαλεί η δράση της, σύμφωνα με το νόμο του Hooke. Εάν η κατασκευή αυτή διαιρεθεί σε περισσότερα τμήματα (στοιχεία, elements), τα οποία θα συνδέονται μεταξύ τους σε σημεία που ονομάζονται κόμβοι (nodes) [Εικόνα 2] η συνολική φόρτιση θα ισούται με το άθροισμα του γινομένου [**ακαμψία Χ παρεκτόπιση**] για κάθε τμήμα. Η διαδικασία δημιουργίας του πλέγματος (*mesh generation*) ονομάζεται **διακριτοποίηση** (discretization).



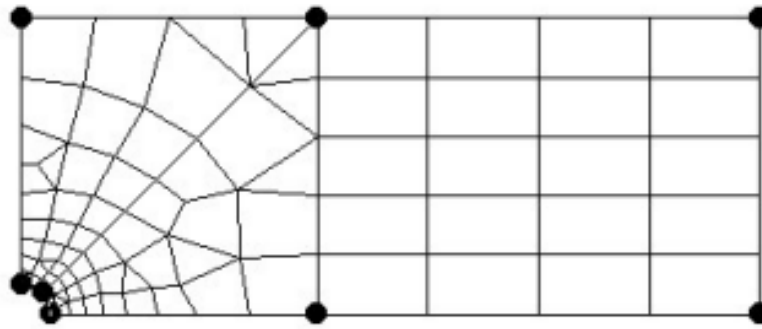
Εικόνα 21 : Διακριτοποίηση Δομής

Τα στοιχεία είναι δυνατό να λάβουν κάθε μορφή, αλλά συνήθως έχουν τη μορφή γνωστών γεωμετρικών σχημάτων, όπως είναι το τρίγωνο, το παραλληλόγραμμο, το τετράγωνο κλπ. [Εικόνα 3].



Εικόνα 22: Μορφές διακριτοποίησης

Στις τρεις διαστάσεις τα στοιχεία είναι δυνατό να είναι κύβοι, παραλληλεπίπεδα κ.λπ. Το μοντέλο των ΠΣ αποκαλείται επομένως από το στοιχεία που το αποτελούν δισδιάστατο ή τρισδιάστατο. Η ανάλυση ΠΣ χρησιμοποιεί ένα περίπλοκο σύστημα σημείων που καλούνται κόμβοι (nodes) που σχηματίζουν ένα δίκτυο που αποκαλείται **πλέγμα (mesh)**. Μία πολύπλοκη κατασκευή αναλύεται σε ένα πλέγμα πεπερασμένου αριθμού στοιχείων απλού σχήματος της εικόνας 23:



Εικόνα 23 : Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων απλού σχήματος.

Το στοιχείο είναι η βασική δομική μονάδα με προκαθορισμένο αριθμό βαθμών ελευθερίας. Το πλέγμα προσομοιάζει με ιστό αράχνης, στον οποίο από κάθε κόμβο εκτείνεται ένα στοιχείο πλέγματος σε κάθε γειτονικό κόμβο. Το πλέγμα προγραμματίζεται ώστε να περιέχει τις δομικές ιδιότητες και τις ιδιότητες υλικού που καθορίζουν με ποιό τρόπο θα συμπεριφερθεί μία κατασκευή υπό ορισμένες συνθήκες φόρτισης. Οι κόμβοι τοποθετούνται με ορισμένη πυκνότητα εντός του υλικού ανάλογα με τα επίπεδα τάσης που αναπτύσσονται σε κάθε συγκεκριμένη περιοχή. Περιοχές με μεγαλύτερη αναμενόμενη τάση θα έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα κόμβων από αυτές που η αναμενόμενη τάση είναι μικρότερη. Περιοχές που λαμβάνουν ιδιαίτερη σημασία είναι οι περιοχές στις οποίες είχε διαπιστωθεί σε πειραματικές μελέτες η παρουσία θραύσης ή γωνίες, κενά και περιοχές υψηλής τάσης. Η επιλογή της κατάλληλης πυκνότητας πεπερασμένων στοιχείων του πλέγματος (mesh density) είναι σημαντικός παράγοντας επιτυχίας του μοντέλου, προκειμένου να επιλυθεί το υπό μελέτη πρόβλημα. Εάν το πλέγμα είναι αδρό τότε είναι δυσχερής η σωστή επίλυση του προβλήματος. Αντίθετα, εάν το πλέγμα είναι ιδιαίτερα λεπτομερές και περιέχει μεγαλύτερο αριθμό στοιχείων απ'ότι είναι αναγκαίο, τότε το κόστος του υπολογιστικού χρόνου και ο αναγκαίος χρόνος για την ανάλυση είναι δυνατό να υπερβαίνουν το όφελος από την ανάλυση.

4. SOLIDWORKS

4.1 Πακέτο Solidworks

Η σχεδίαση των δομών που θα κατασκευασθούν έγινε με χρήση του σχεδιαστικού πακέτου SolidWorks. Το SolidWorks είναι το πλέον καταξιωμένο λογισμικό παγκοσμίως, στο χώρο του τρισδιάστατου μηχανολογικού σχεδιασμού, εφόσον στις αρχές του 2013 περισσότεροι των 2.080.000 σχεδιαστών προϊόντων και μηχανικών χρησιμοποιούν το SolidWorks.

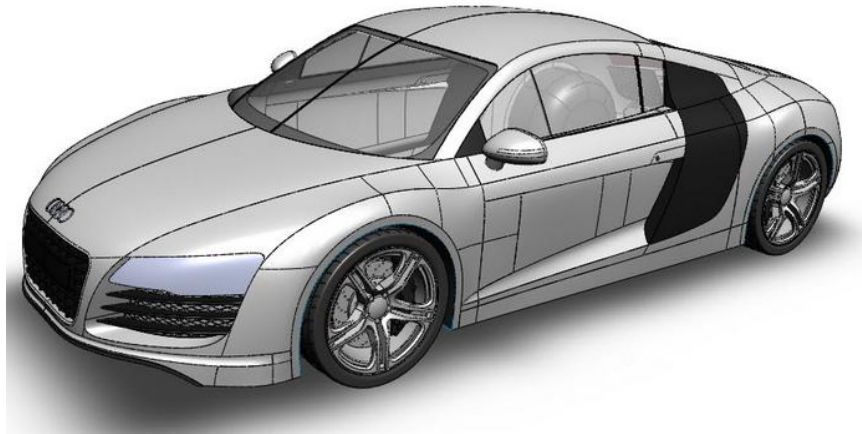
4.2 Μεθοδολογία Μοντελοποίησης

Το SolidWorks είναι ένα πρόγραμμα το οποίο λειτουργεί με βάση τη στερεή μοντελοποίηση και χρησιμοποιεί ένα παραμετρικό χαρακτηριστικό που βασίζεται κατά προσέγγιση στη δημιουργία μοντέλων και συναρμολογήσεων. Οι παράμετροι αναφέρονται σε περιορισμένες τιμές οι οποίες καθορίζουν το σχήμα και τη γεωμετρία του μοντέλου ή της συναρμολόγησης. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι είτε αριθμητικοί, όπως μήκη γραμμών ή διάμετροι κύκλων, γεωμετρικές παράμετροι, όπως εφαπτόμενες, παράλληλες κατακόρυφες ή οριζόντιες και ομόκεντρες κλπ. Οι αριθμητικοί παράμετροι, επίσης, μπορούν να συνδέονται μεταξύ τους με χρήση σχέσεων που τους επιτρέπει να καταγράψουν το σκοπό του σχεδιασμού.

Κύριος σκοπός του σχεδιασμού είναι το πώς θέλει ο δημιουργός του αντικειμένου θέλει να ανταποκρίνεται στις ενημερώσεις και στις αλλαγές.

Τα Χαρακτηριστικά αναφέρονται (features) αναφέρονται στα δομικά στοιχεία του αντικειμένου. Είναι τα σχήματα, οι γεωμετρίες και οι πράξεις που κατασκευάζουν το αντικείμενο. Τα χαρακτηριστικά βασίζονται συνήθως σε ένα 2D ή και 3D σκίτσο σχημάτων π.χ οπές. Στο σχήμα αυτό του σκίτσου έπειτα εξωθείται ή κόβεται, δηλαδή δίνετε ή αφαιρείται υλικό. Τα Operation-based features δεν βασίζονται σε σκίτσα αλλά περιλαμβάνουν χαρακτηριστικά όπως fillets, chamfers, shells εφαρμόζοντας σχέδιο στις όψεις ενός τμήματος, κ.λπ.

Η οικοδόμηση ενός μοντέλου στο SolidWorks συνήθως ξεκινάει με ένα δισδιάστατο ή τρισδιάστατο σκίτσο. Το σκίτσο αποτελείται από γεωμετρικά σχήματα, όπως σημεία, γραμμές, τόξα, καμπυλότητες (εκτός της υπερβολής). Οι διαστάσεις προστίθενται στο σκίτσο για να καθορίσει το μέγεθος και τη θέση της γεωμετρίας. Οι σχέσεις χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τα χαρακτηριστικά, όπως επαφής, παραλληλισμό, καθετότητα και ομοκεντρικότητα. Η παραμετρική φύση του SolidWorks σημαίνει ότι οι διαστάσεις και οι σχέσεις οδηγούν την γεωμετρία. Οι διαστάσεις στο σχεδιάγραμμα μπορεί να ελέγχεται ανεξάρτητα, είτε από τις σχέσεις με άλλες παραμέτρους εντός ή εκτός του σκίτσου. Το SolidWorks περιλαμβάνει ακόμα και λειτουργίες συναρμολόγησης που επιτρέπουν την συναρμολόγηση διάφορων μοντέλων που σχεδιάστηκαν. Η συναρμολόγηση επίσης βοηθάει στην κινητική αναπαράσταση των μοντέλων.



Εικόνα 24 : Μοντελοποίηση αυτοκινήτου audi R8 με Solidworks

4.3 Προσομοίωση μέσω του σχεδιαστικού Πακέτου SolidWorks

Στο πακέτο SolidWorks περιλαμβάνεται και το SolidWorks Simulation όπου παρέχει βασικά εργαλεία προσομοίωσης για τον έλεγχο σχεδίων και την βελτίωση των σχεδίων. Η πλήρης ενσωμάτωση δημιουργεί μια μικρή καμπύλη εκμάθησης και εξαλείφει τις περιττές εργασίες που απαιτούνται με τα παραδοσιακά εργαλεία ανάλυσης. Τα προϊόντα μπορούν να ελέγχονται για την αντοχή, την ασφάλεια, και την κινηματική ανάλυση πλήρως.

4.4 Μη-γραμμική Ανάλυση (nonlinear analysis)

Η Μη γραμμική ανάλυση τάσεων με SolidWorks Simulation επιτρέπει στους σχεδιαστές και τους μηχανικούς την γρήγορη και αποτελεσματική ανάλυση τάσεων και παραμορφώσεων σύμφωνα με τους γενικούς όρους, ενώ δημιουργούν το σχεδιασμό τους για να εξασφαλίσουν την υψηλή ποιότητα, τις επιδόσεις και την ασφάλεια.

Η Μη γραμμική ανάλυση τάσεων υπολογίζει τις τάσεις και παραμορφώσεις των προϊόντων κάτω από τις πιο γενικές συνθήκες φόρτωσης και υλικών για:

- Δυναμικά φορτία
- Μεγάλες παραμορφώσεις
- Μη γραμμικά υλικά, όπως ελαστικό ή μετάλλων, πέρα από το σημείο διαρροής
- Η Μη γραμμική ανάλυση είναι μια πιο σύνθετη προσέγγιση, αλλά οδηγεί σε μια πιο ακριβή λύση από γραμμική ανάλυση, αν παραβιάζονται οι βασικές αρχές μιας γραμμικής ανάλυσης. Εάν οι γραμμικές παραδοχές ανάλυση δεν παραβιάζονται, τότε τα αποτελέσματα μιας γραμμικής και μη γραμμικής ανάλυσης θα είναι η ίδια.

Το SolidWorks Simulation χρησιμοποιεί την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEA) για την ανάλυση και για να Διακριτοποίηση του σχεδιασμού σε συμπαγή στοιχεία, κελύφη, ή δοκών και χρησιμοποιεί τη μη γραμμική ανάλυση τάσεων για να προσδιοριστεί η ανταπόκριση των εξαρτημάτων, λόγω της επίδρασης της:

- Δυνάμεων
- Πιέσεων
- Επιταχύνσεων
- Θερμοκρασιών
- Επαφές μεταξύ των συνιστωσών

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η ανάλυση τάσεων, τα στοιχεία του υλικού που χρησιμοποιείται πρέπει να είναι γνωστά όπως μέτρο ελαστικότητας, λόγος Poisson κλπ.

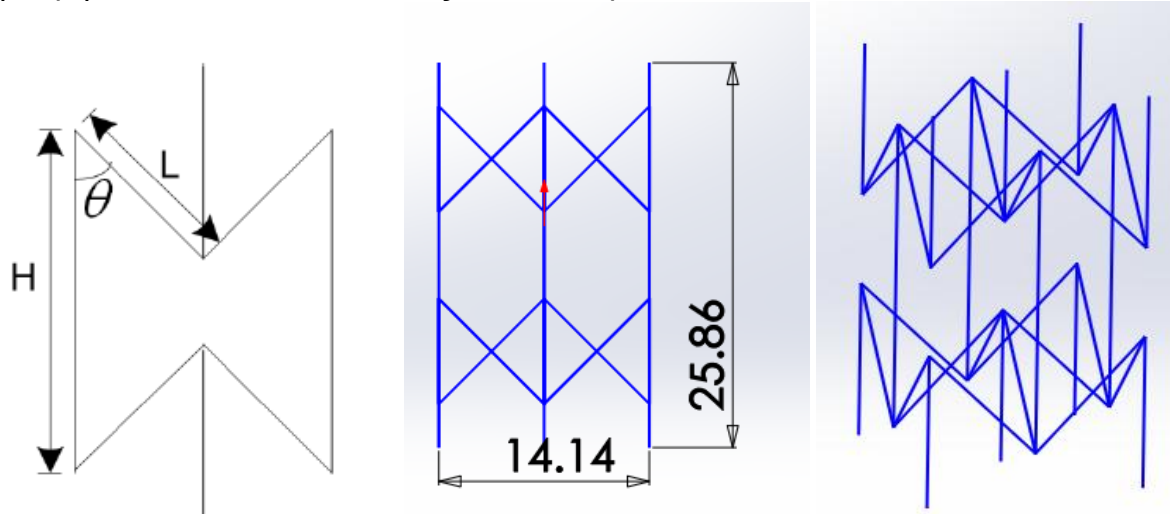
5. ΒΗΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΔΟΜΩΝ

Όπως έχουμε αναφέρει παραπάνω στο κεφάλαιο 2 με τις δομές, οι δομές που θα χρησιμοποιηθούν είναι τέσσερις. Είναι η δομή Re-entrant, αυξητική δομή, (auxetic structure), με αρνητικό λόγο Poisson, η δομή runflat εξίσου αυξητική δομή με αρνητικό λόγο Poisson και αυτή. Ακόμα θα σχεδιαστεί και η οκταεδρική δομή (octet truss) και η εξαγωνική δομή κυψέλης (Honeycomb structure). Ο σχεδιασμός γίνεται με το πρόγραμμα SolidWorks.

Αρχικά, για να γίνει η σχεδίαση των δομών σχεδιάζουμε τη μοναδιαία κυψελίδα (unit cell) σύμφωνα με διαστάσεις που έχουμε δώσει εμείς.

5.1 Διαστασιολόγηση Μοναδιαίας Κυψελίδας.

Στη Δομή **Re-entrant** οι διαστάσεις που δώσαμε θα είναι:



Εικόνα 25 : Διαστάσεις μοναδιαίας κυψελίδας re-entrant

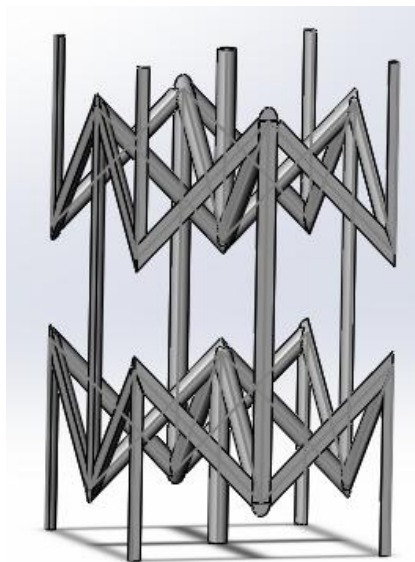
$H = 20\text{mm}$

$L = 10\text{mm}$, γωνία $\theta = 45^\circ$

Το μήκος του unit cell θα είναι 14.14 mm και το ύψος 25.86mm.

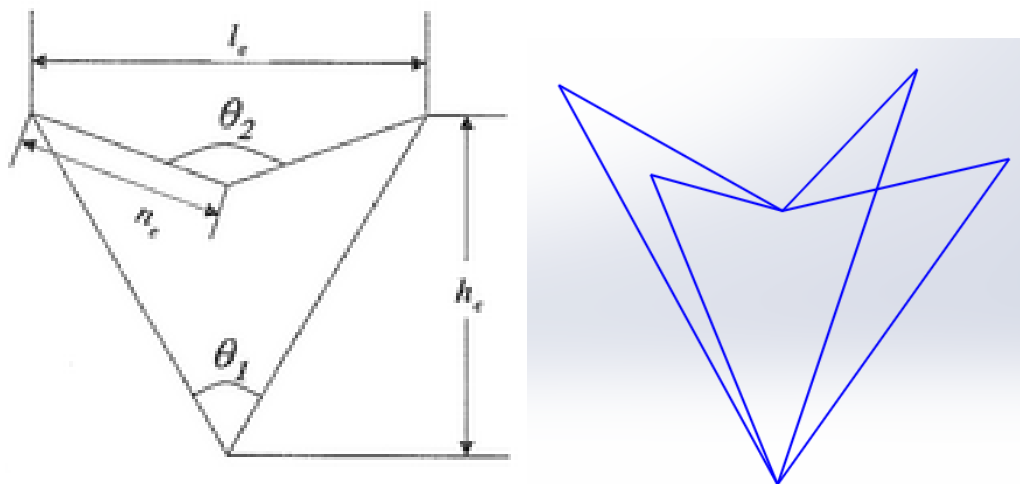
Το πάχος της των ράβδων είναι 1mm.

Η τελική μορφή του στοιχειώδη κυττάρου (unit cell) θα είναι η παρακάτω:



Εικόνα 26 : Τελική μορφή μοναδιαίας κυψελίδας της δομής re-entrant

Ενώ η δομή **Run flat** θα έχει την εξής διαστασιολόγηση:



Εικόνα 27: Διαστασιολόγηση μοναδιαίας κυψελίδας δομής runflat.

Το μήκος l_1 θα ισούται με $l_1 = 20.23$

Το μήκος n_1 θα είναι 15.27mm, ενώ το ύψος h_1 είναι 20.48 mm

Η γωνία θ_2 είναι 142° ενώ η γωνία $\theta_1 = 70.5^\circ$.

Το πάχος της κάθε ράβδου θα είναι και στην αυξητική δομή runflat 1mm.

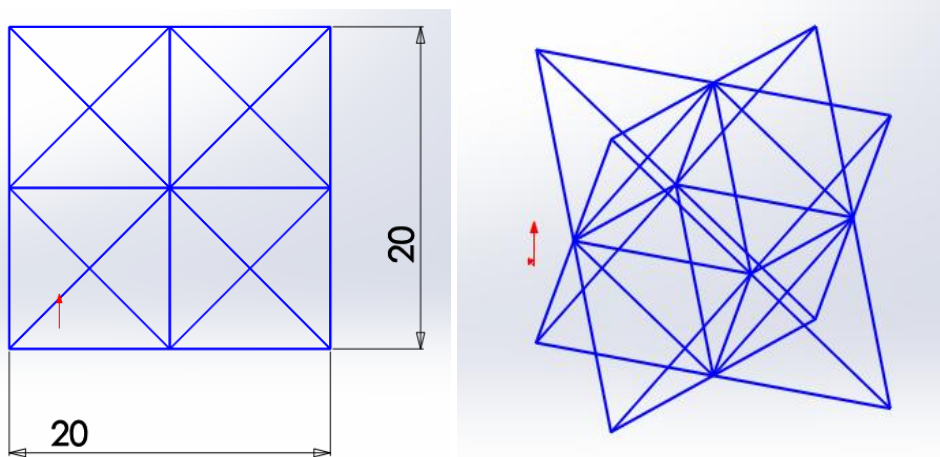
Η τελική του μορφή θα είναι η παρακάτω :



Εικόνα 28 : Τελική μορφή μοναδιαίας κυψελίδας δομής runflat

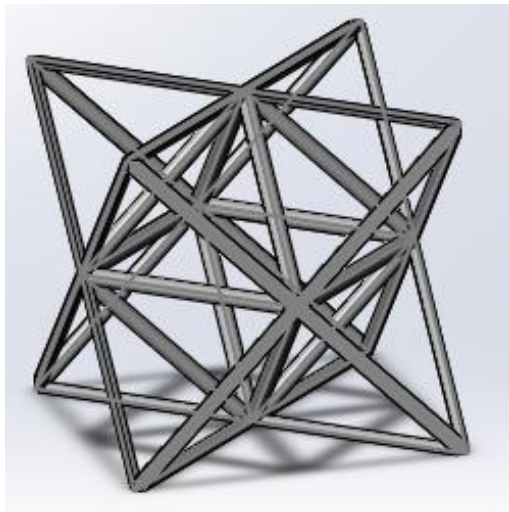
Η **οκταεδρική** δομή έχει διαστασιολογηθεί ως εξής:

Το μήκος και το ύψος της δομής θα έχουν την τιμή των 20mm. Οι υπόλοιπες γραμμές ενώνονται μεταξύ των κέντρων των διαγωνίων.



Εικόνα 29 : Διαστάσεις μοναδιαίας κυψελίδας οκταεδρικής δομής

Η τελική του μορφή είναι η παρακάτω:



Εικόνα 30 : Τελική μορφή μοναδιαίας κυψελίδας οκταεδρικής δομής

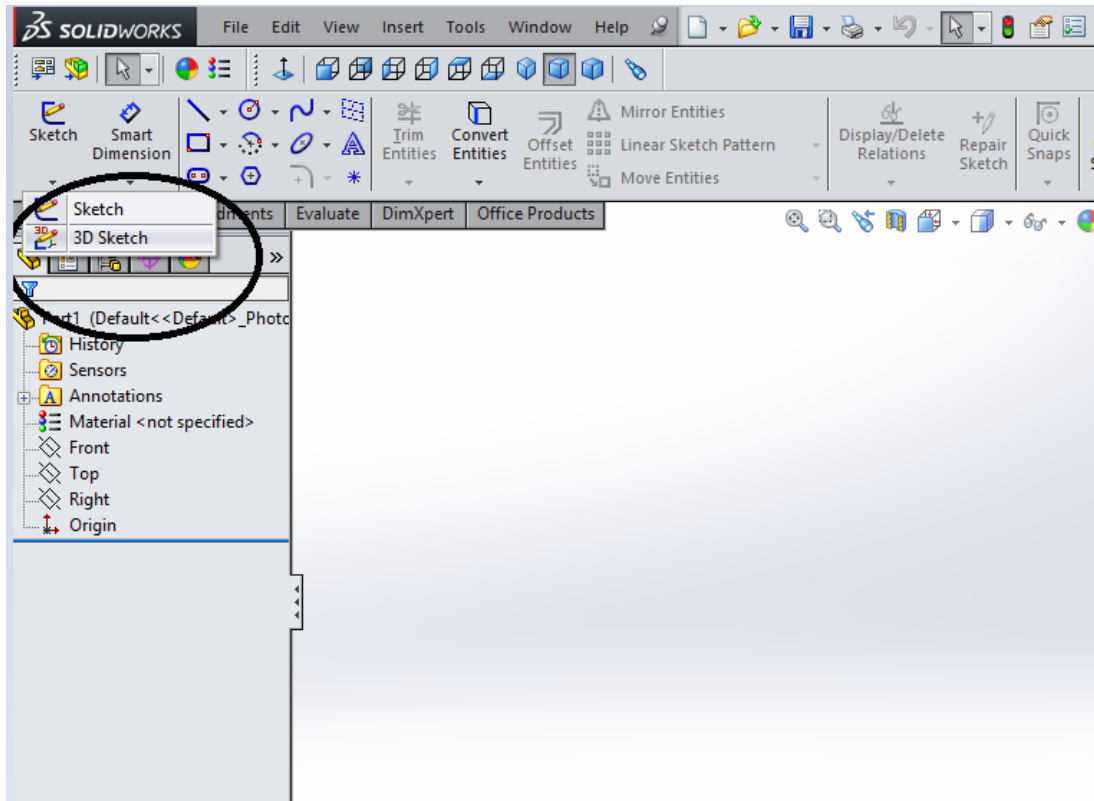
5.2 Σχεδιασμός Της Μοναδιαίας Κυψελίδας.

Σε αυτήν την ενότητα θα σχεδιαστεί η μοναδιαία κυψελίδα (unit cell) των δομών που την περιέχουν δηλαδή της επαναεισερχόμενης (re-entrant), της αυξητικής δομής run flat και της οκταεδρικής. Η εξαγωνική δομή κυψέλης επειδή διαφέρει στον σχεδιασμό, θα γίνει ξεχωριστά σε άλλη ενότητα. Ο σχεδιασμός όπως είπαμε γίνεται μέσω του σχεδιαστικού προγράμματος SolidWorks. Τα βήματα σχεδίασης είναι ίδια και για τις τρεις μοναδιαίες κυψελίδες (αυξητική re-entrant, run flat και οκταεδρική).

5.2.1 Σχεδίαση του Σκίτσου (sketch).

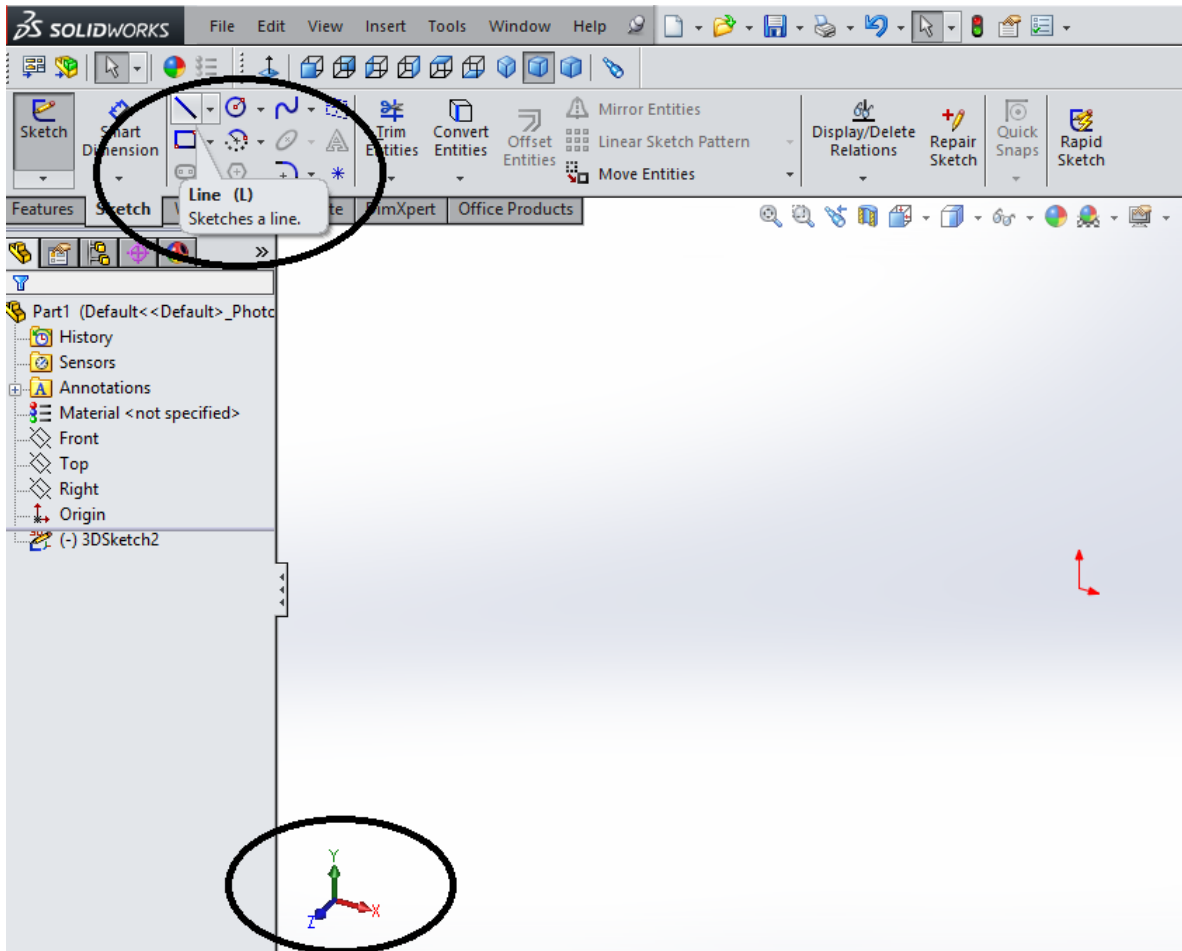
Αρχικά, ανοίγουμε το πρόγραμμά μας και επιλέγουμε στο παράθυρο που μας εμφανίζει **part** (σχεδίαση αντικειμένου) και OK. Στη συνέχεια καθώς μπαίνουμε στο παράθυρο σχεδίασης δημιουργούμε το αρχείο μας και το αποθηκεύουμε κατάλληλα με το όνομα που του επιθυμούμε να του δώσουμε. Παρακάτω βλέπουμε αναλυτικά πως γίνεται η σχεδίαση στις τρεις δομές που περιέχουν στοιχειώδης κύτταρο.

Η σχεδίαση θα γίνει σε 3d sketch διότι η δομή μας όπως γνωρίζουμε θα είναι τρισδιάστατη. Επομένως θα επιλέξουμε από τις εντολές το **3d Sketch** (τρισδιάστατο σκίτσο).



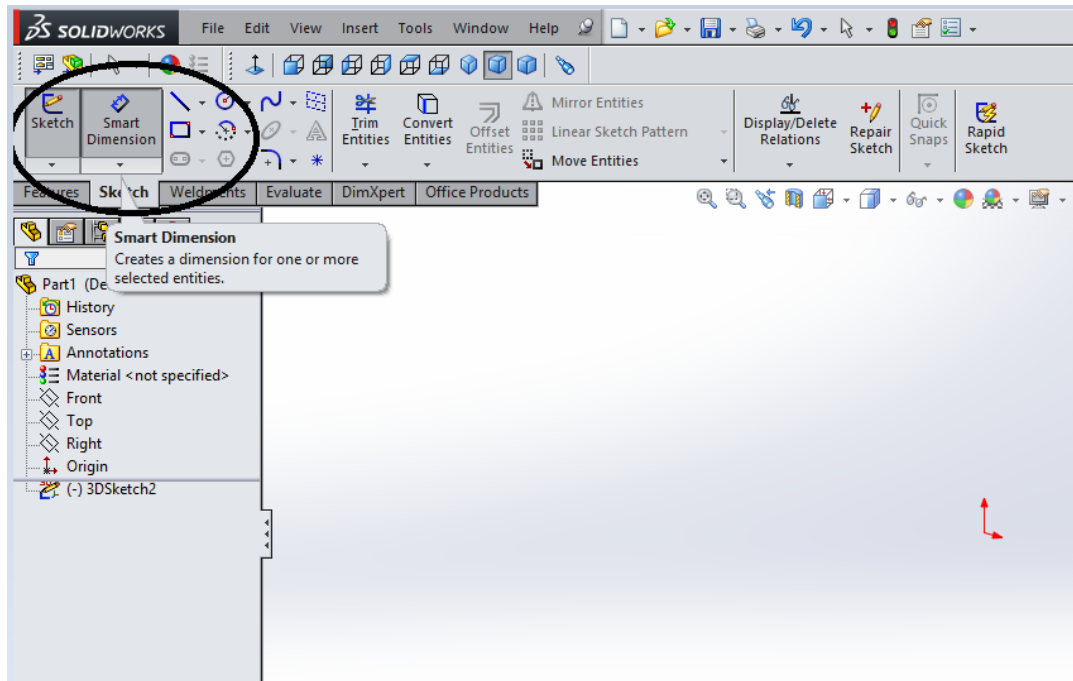
Εικόνα 31 : Πάνω αριστερά στη γραμμή εντολών υπάρχει η εντολή **sketch** στην οποία επιλέγουμε το **3d sketch** για να μπορέσουμε να σχεδιάσουμε τρισδιάστατα.

Όπως βλέπουμε στα εργαλεία υπάρχουν διάφορες εντολές που μας δίνουν την δυνατότητα επιλογής του σχεδιασμού, στην περίπτωση μας εμείς επιλέγουμε την εντολή **Line** για τη σχεδίαση γραμμών στους άξονες που επιθυμούμε. Με την εντολή **Line** και με τη βοήθεια των αξόνων τριών διαστάσεων μπορούμε και σχεδιάζουμε τη δομή μας στη μορφή που την χρειαζόμαστε.



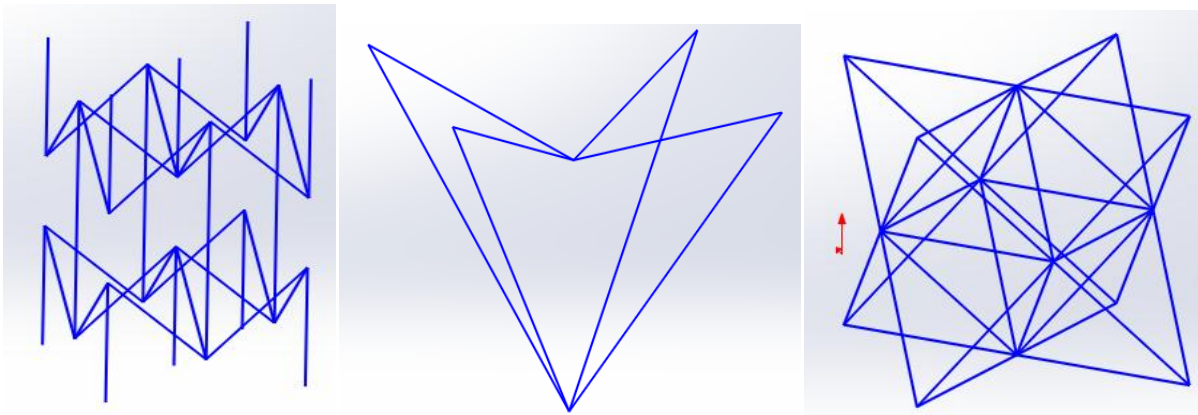
Εικόνα 32 : Τρισδιάστατος σχεδιασμός με την εντολή *Line*.

Επίσης μεγάλη βοήθεια μας δίνει η εντολή διαστασιολόγησης **smart dimension** όπου καταφέρνουμε και διαστασιολογούμε τις γραμμές μας στο τρισδιάστατο σκίτσο. Επιλέγουμε την εντολή **Smart Dimension** από την καρτέλα εντολών σχεδίασης και επιλέγοντας είτε τις γραμμές είτε τις ακμές του σκίτσου μας, πληκτρολογούμε τη διάσταση που επιθυμούμε στο παράθυρο που μας εμφανίζει για να την φέρουμε στο επιθυμητό μήκος.



Εικόνα 33 : Η εντολή *smart dimensions* δημιουργεί διαστάσεις στο σκίτσο μας.

Αφού ολοκληρώσουμε το σχεδιασμό και την διαστασιολόγηση οι μοναδιαίες κυψελίδες θα έχουν την παρακάτω μορφή:

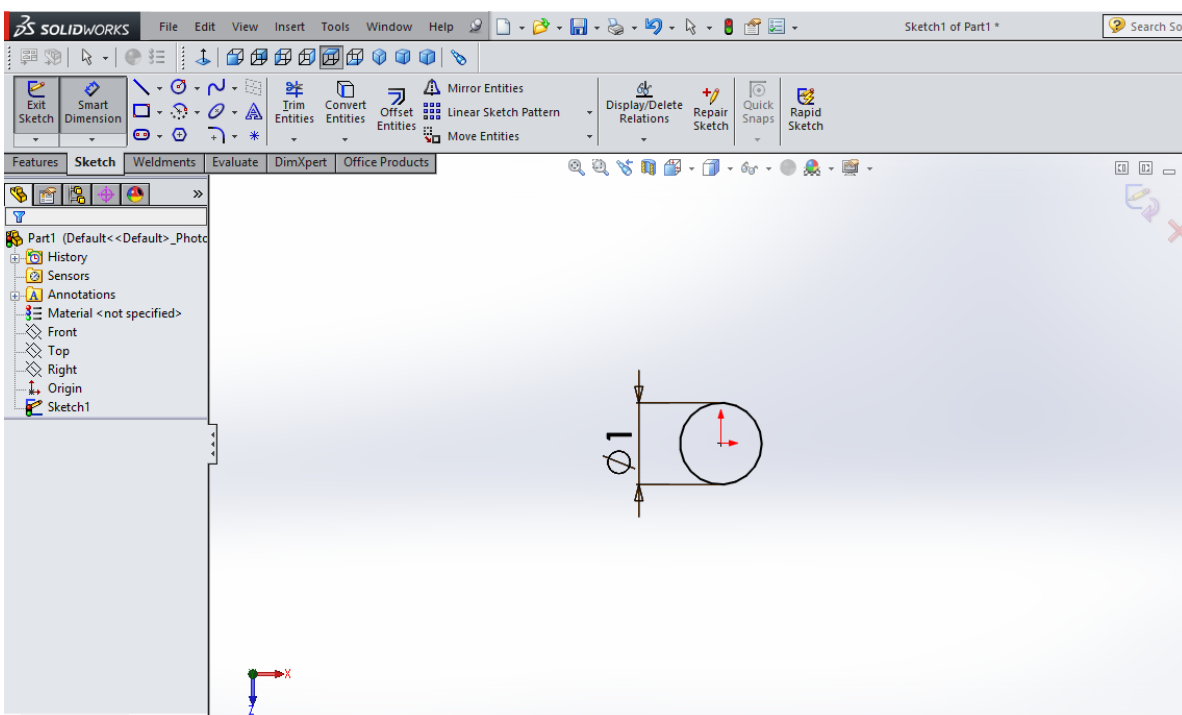


Εικόνα 34 : Όπως περιγράψαμε παραπάνω η πρώτη δομή είναι της αυξητικής *re-entrant*, η δεύτερη δομή είναι η αυξητική *run flat* και η τρίτη η **οκταεδρική**.

5.2.2 Πάχος γραμμών

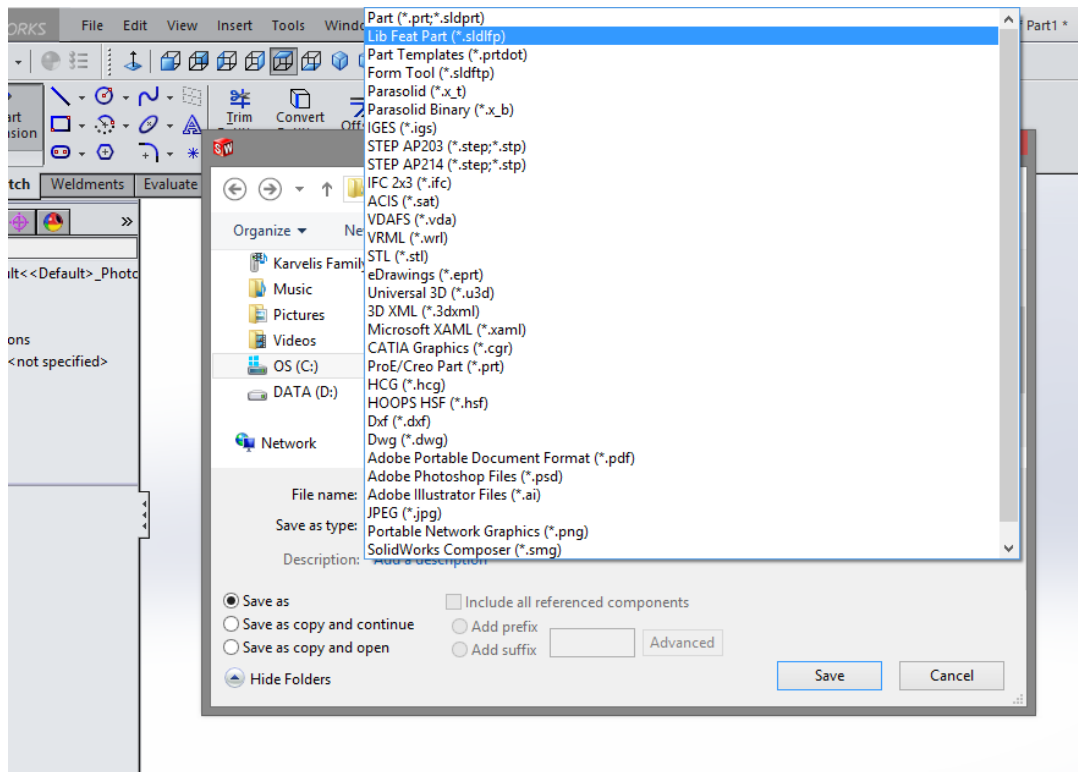
Για να ολοκληρώσουμε το σχεδιασμό των μοναδιαίων κυψελίδων θα πρέπει να δώσουμε πάχος στις γραμμές μας, στην περίπτωση μας το πάχος θα είναι 1mm. Για να δώσουμε πάχη γραμμών θα πρέπει να δημιουργήσουμε εμείς ένα προφίλ δομής δηλαδή ένα **structural member**.

Επειδή στη βιβλιοθήκη του SolidWorks δεν υπάρχει η διατομή της ράβδου που θα χρησιμοποιηθεί στα αντίστοιχα στοιχειώδη κύτταρά μας, θα πρέπει να την δημιουργήσουμε εμείς και να την αποθηκεύσουμε στο φάκελο της βιβλιοθήκης με τα προφίλ του προγράμματος. Επομένως, ανοίγουμε καινούριο παράθυρο σχεδιασμού και σε απλό σκίτσο σχεδιάζουμε έναν κύκλο (διότι οι ράβδοι των γραμμών μας θα έχουν κυκλική διατομή) ενός χιλιοστού. Σιγουρευόμαστε πως ο κύκλος σχεδιάζεται στο κέντρο των αξόνων μας και σε top plane.



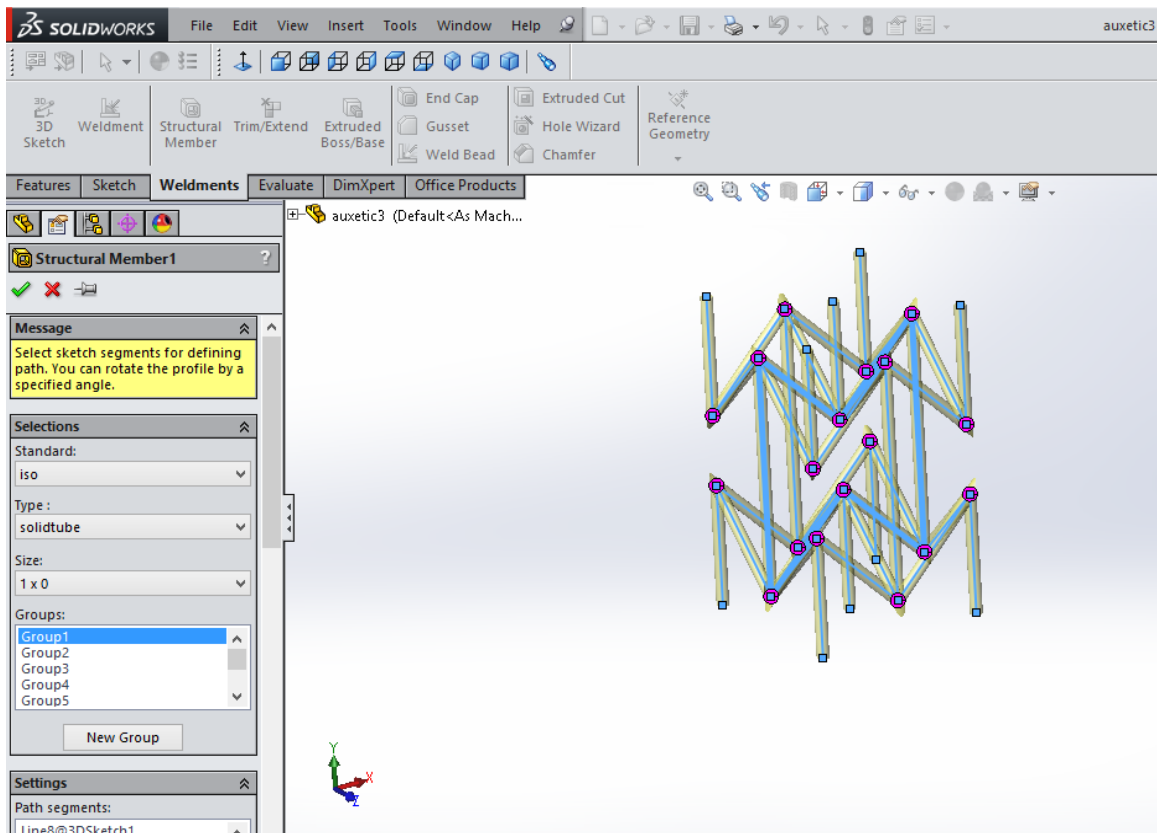
Εικόνα 35 : Σχεδιασμός - Δημιουργία της Διατομής που θα χρησιμοποιηθεί στη μοναδιαία κυψελίδα.

Αφού σχεδιάσουμε τον κύκλο, τον αποθηκεύουμε στην βιβλιοθήκη του SolidWorks. Στον φάκελο εγκατάστασης του προγράμματος βρίσκουμε τον φάκελο **language**. Μέσα σε αυτόν υπάρχει ένας άλλος φάκελος που ονομάζεται **weldment profiles**. Στον φάκελο **Weldment profiles** επιλέγουμε τον φάκελο **iso** (international standards) και μέσα σε αυτόν δημιουργούμε τον δικό μας φάκελο που θα αποθηκευτεί το δικό μας προφίλ. Η αποθήκευση θα γίνει της μορφής ".sldlfp".



Εικόνα 36 : Αποθήκευση προφίλ στη βιβλιοθήκη του Solidworks.

Αφού γίνει η παραπάνω διαδικασία, τότε πάμε πάλι στο σχέδιό μας και από τον κατάλογο **Weldments** θα επιλέξουμε την εντολή **structural member** όπου θα μας βγάλει κάποιες ρυθμίσεις να επιλέξουμε. Στις επιλογές **Standard** θα επιλέξουμε το **iso** (international standards), στο **type** τον φάκελο που δημιουργήσαμε για την αποθήκευση του προφίλ μας και στο **size** το προφίλ που δημιουργήσαμε με διατομή ένα χιλιοστό (1mm). Στα **groups** επιλέγουμε τις γραμμές που επιθυμούμε να δώσουμε πάχος.

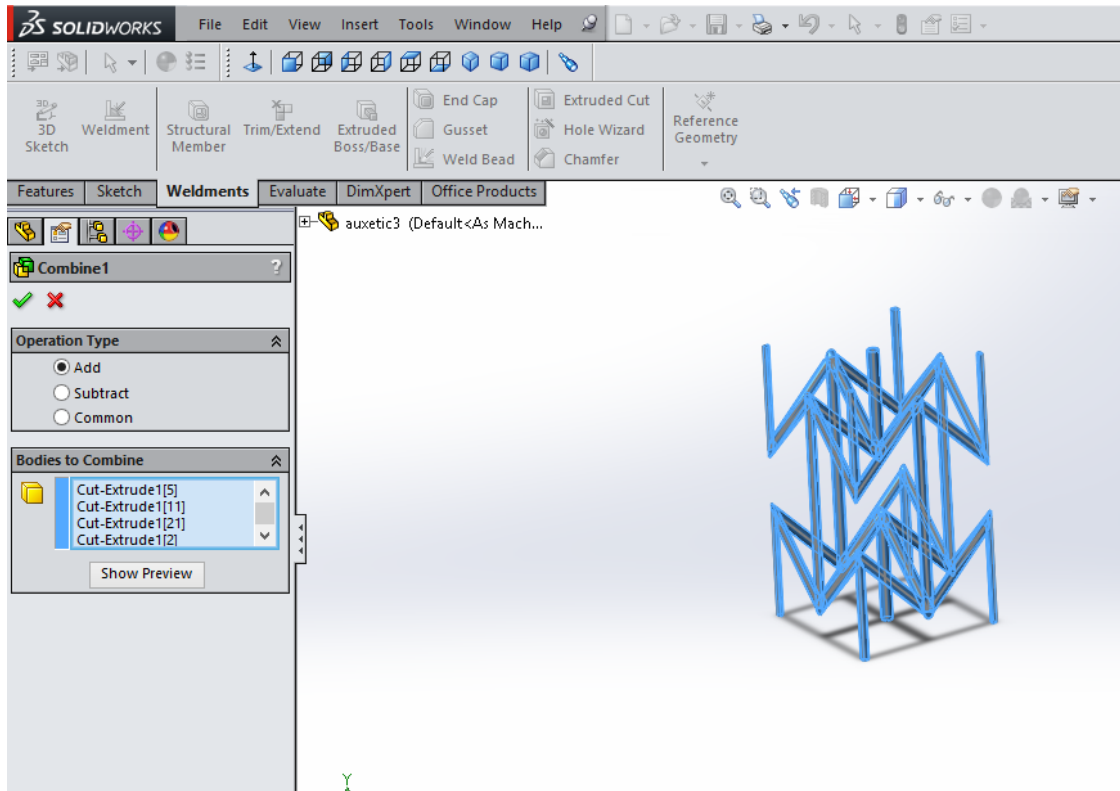


Εικόνα 37 : Επιλογή του προφίλ στη δομή μας για πάχος των γραμμών

5.2.3 Συνδυασμός Γραμμών

Τέλος, για να γίνει ενιαίο το σχέδιο που σχεδιάσαμε και να θεωρείται ένα, θα πρέπει να συνδυάσουμε την κάθε ράβδο μεταξύ τους με την εντολή **combine**.

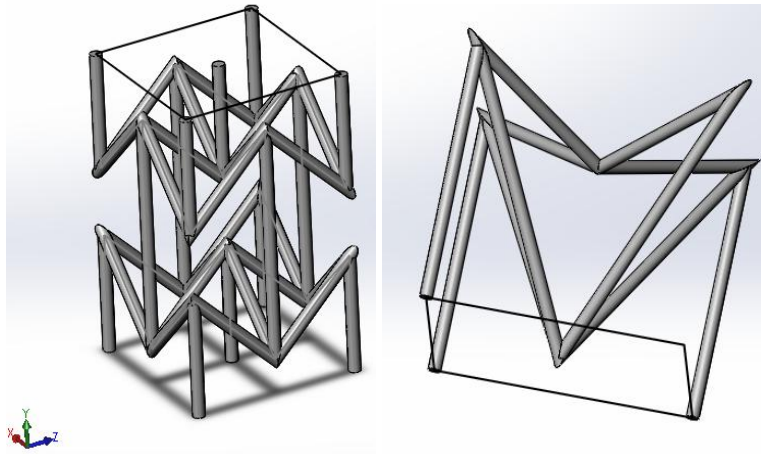
Στην κατηγορία **Insert** επιλέγουμε την υποκατηγορία **features** όπου βρίσκουμε την εντολή **combine** και την επιλέγουμε. Ύστερα μας βγάζει στο παράθυρο της εικόνας 38 και επιλέγουμε τα σώματα που χρειάζεται να συνδέσουμε στην κατηγορία **Bodies to combine** και πατάμε **OK**.



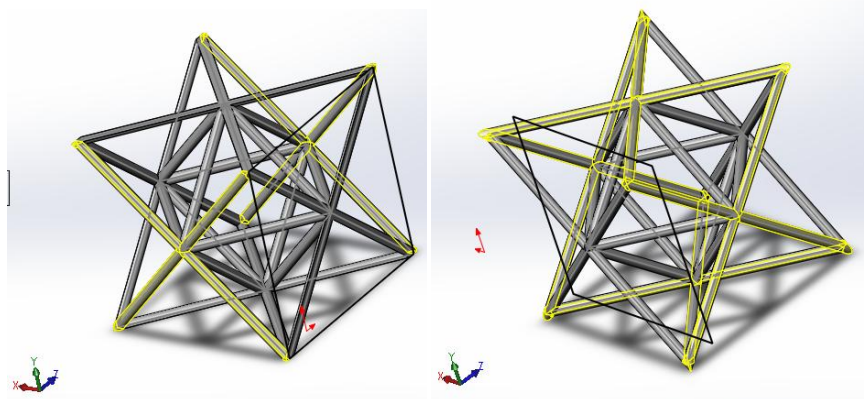
Εικόνα 38: Συνδυασμός όλων των σωμάτων.

Για να ολοκληρώσουμε τη σχεδίαση της μοναδιαίας κυψελίδας θα πρέπει να κάνουμε άλλη μια τελευταία κίνηση. Αυτό θα είναι να αφαιρέσουμε της ακμές από το σχέδιο που έχουμε φτιάξει ως τώρα για να μπορέσουμε να επιτύχουμε την επικόλληση των μοναδιαίων κυψελίδων μεταξύ τους. Η αφαίρεση των ακμών αυτών θα γίνει με την αποτύπωση γραμμών περιφερειακά στην πάνω επιφάνεια στα σημεία που επιθυμούμε, δηλαδή στα κέντρα των κάθετων περιφερειακών ράβδων.

Αρχικά σχεδιάζουμε τις γραμμές περιφερειακά στην πάνω πλευρά της μοναδιαίας κυψελίδας όπως φαίνεται στη παρακάτω εικόνα 39 και για τις τρεις δομές. Η δομή run flat χρειαζόταν κάποιες εργασίες για να καταφέρουμε την αφαίρεση των ακμών όπως να σχεδιάσουμε κάποια περεταίρω σώματα. Τα περεταίρω αυτά σώματα τα διαγράφουμε επιλέγοντάς τα από το δέντρο με δεξί κλικ και διαγραφή σωμάτων (delete bodies). Επίσης στην οκταεδρική δομή χρειάστηκε να σχεδιαστούν παραπάνω από ένα πλαίσιο για να αφαιρεθούν οι ακμές από τον άξονα x και από τον άξονα z της δομής (εικόνα 40).

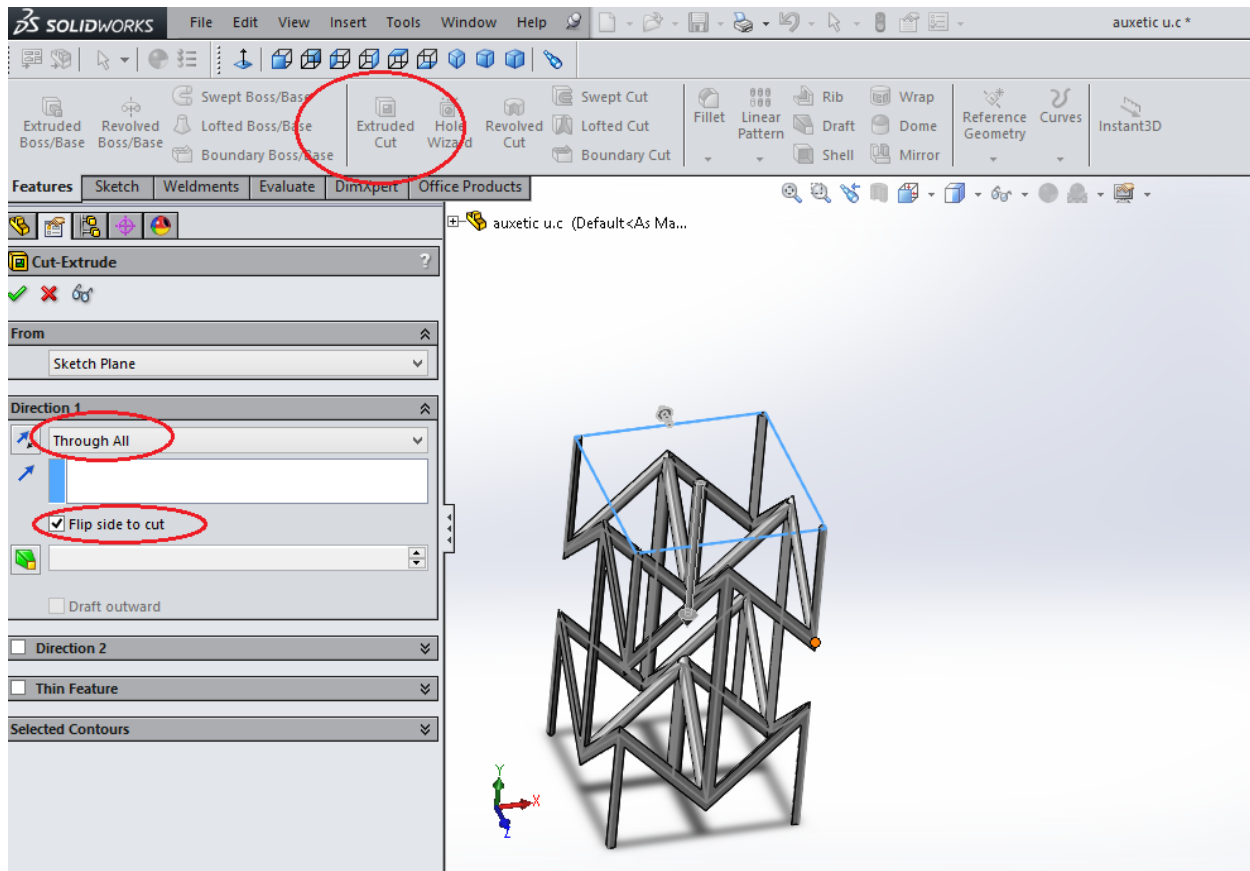


Εικόνα 39: Σχεδίαση Πλαισίων για την αφαίρεση ακμών



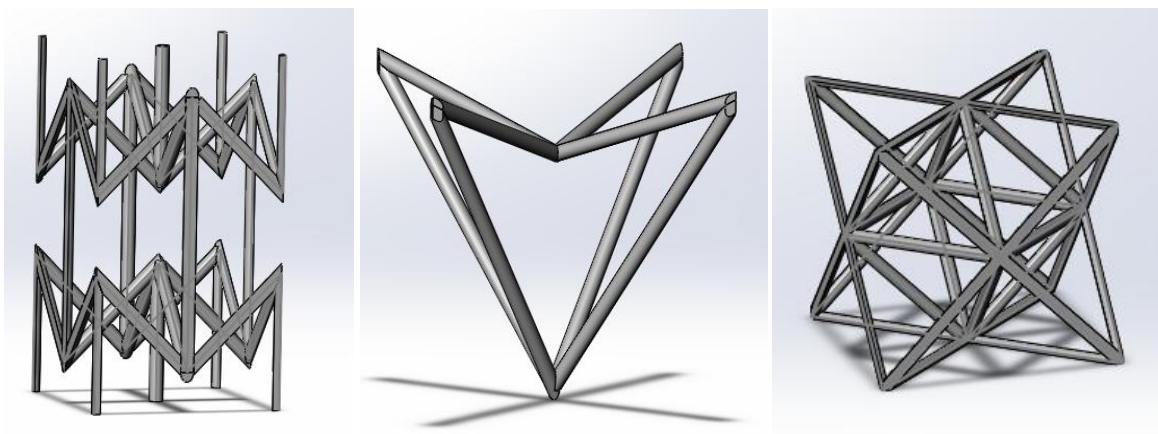
Εικόνα 40 : Σχεδίαση πλαισίων για αφαίρεση ακμών στον άξονα x και στον z για τη μοναδιαία κυψελίδα της οκταεδρικής δομής.

Αφού ολοκληρώσουμε την σχεδίαση των πλαισίων και σιγουρευόμαστε ότι τα έχουμε επιλέξει, μένει να αποκόψουμε τις ακμές. Η αποκοπή θα γίνει με την εντολή **Extruded cut** που βρίσκεται στον κατάλογο **Features**. Στις επιλογές θα επιλέξουμε την επιλογή *Through all* και *Flip side to cut* για να γίνει αφαίρεση εις πέρας όλου του μοντέλου.



Εικόνα 41: Εντολή *Extruded cut* και επιλογή ρυθμίσεων στη μοναδιαία κυψελίδα αυξητικής δομής *reentrant*.

Τέλος θα έχουμε την τελική μορφή των στοιχειώδη κυττάρων όπως τις παρουσιάσαμε και παραπάνω στην διαστασιολόγησή τους.



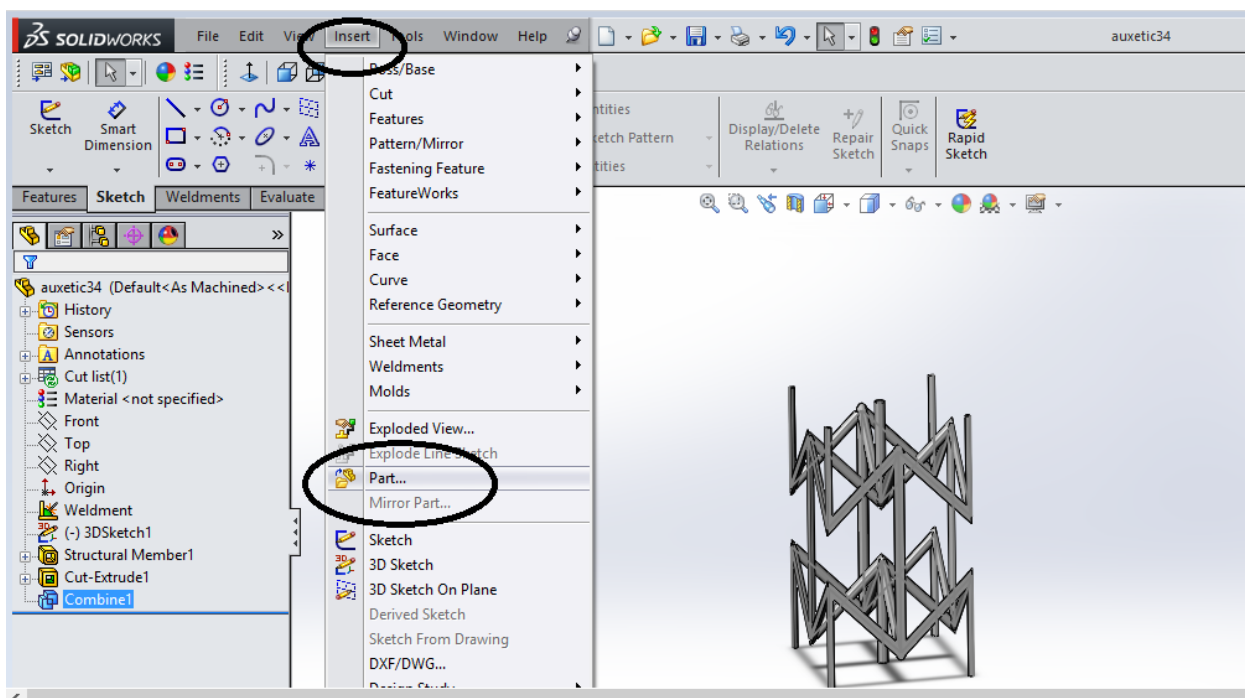
Εικόνα 42 : Τελική μορφή των *unit cell* των δομών μας. (*reentrant, runflat, octet*)

5.3 Δημιουργία των Τρισδιάστατων δομών

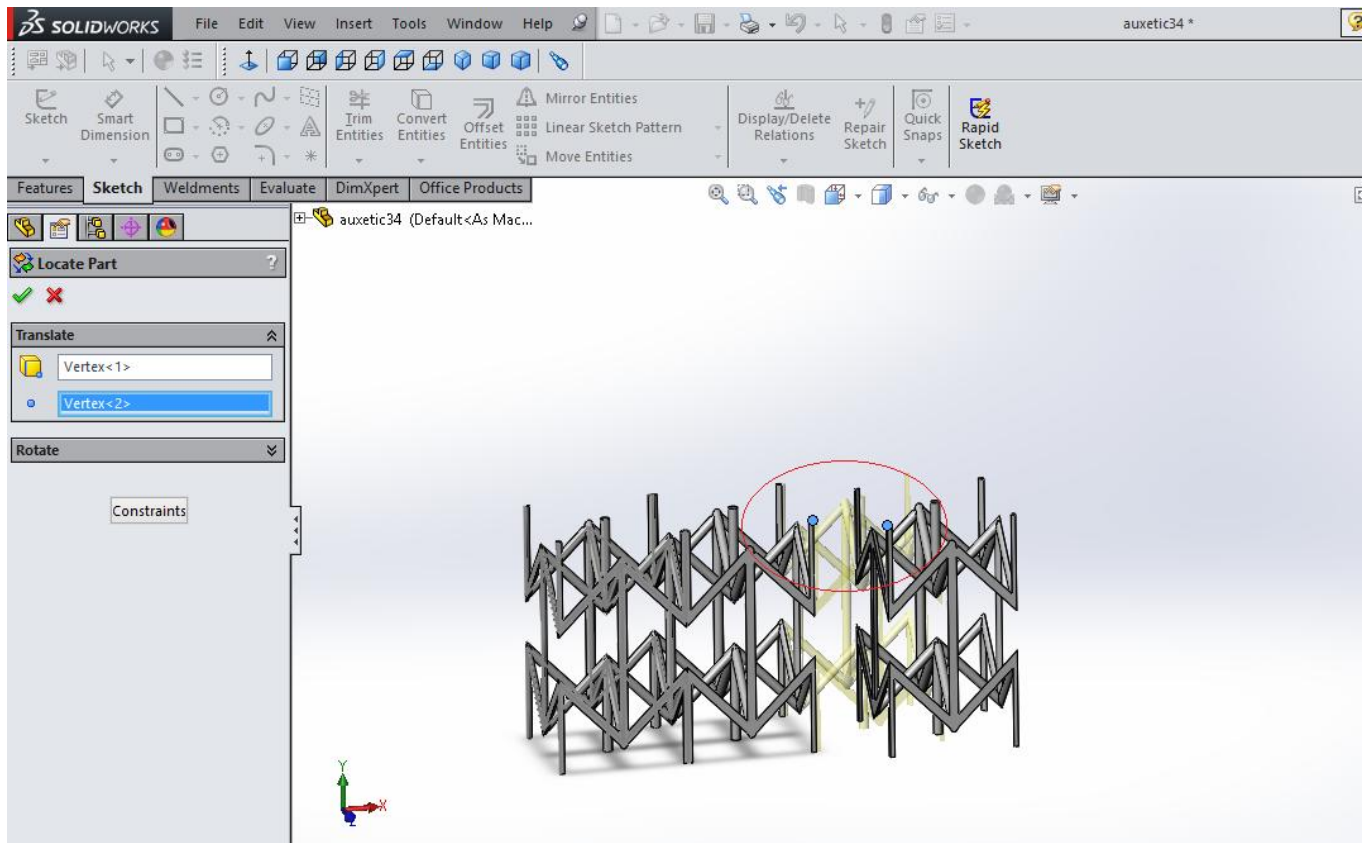
Έως τώρα έχουμε σχεδιάσει τις μοναδιαίες κυψελίδες των κάθε δομών που θα σχεδιαστούν. Οι μοναδιαίες αυτές κυψελίδες θα πολλαπλασιαστούν και θα καταλήξουν σε ένα τρισδιάστατο κύβο.

Για να φτάσουμε στο στάδιο αυτό, θα πρέπει πρώτα να ανοίξουμε το αρχείο του στοιχειώδη κυττάρου που έχουμε σχεδιάσει και να το αποθηκεύσουμε σε νέο όνομα ως νέο αρχείο, ώστε να αρχίσουμε σιγά σιγά να χτίζουμε πάνω σε καινούριο αρχείο του στοιχειώδη κυττάρου.

Έχοντας ανοιχτό το νέο μας αρχείο πάμε και επιλέγουμε την εντολή **part** που βρίσκετε στον κατάλογο **insert**. Πατώντας την εντολή **part** μας βγάζει ένα παράθυρο να επιλέξουμε πιο αντικείμενο θα θέλαμε να εισάγουμε. Στο σημείο αυτό επιλέγουμε να εισαχθεί το πρώτο μας αρχείο του στοιχειώδη κυττάρου που σχεδιάσαμε και αφού εμφανιστεί στο παράθυρό μας, επιλέγουμε τα σημεία που θέλουμε να καθίσει (στη περίπτωση μας το ένα δίπλα στο άλλο, εικόνα 44). Κάνουμε την διαδικασία αυτή μέχρι να φτάσουμε το επιθυμητό μήκος του κύβου. Στην εικόνα 43 βλέπουμε την εντολή εισαγωγής νέο αντικειμένου.

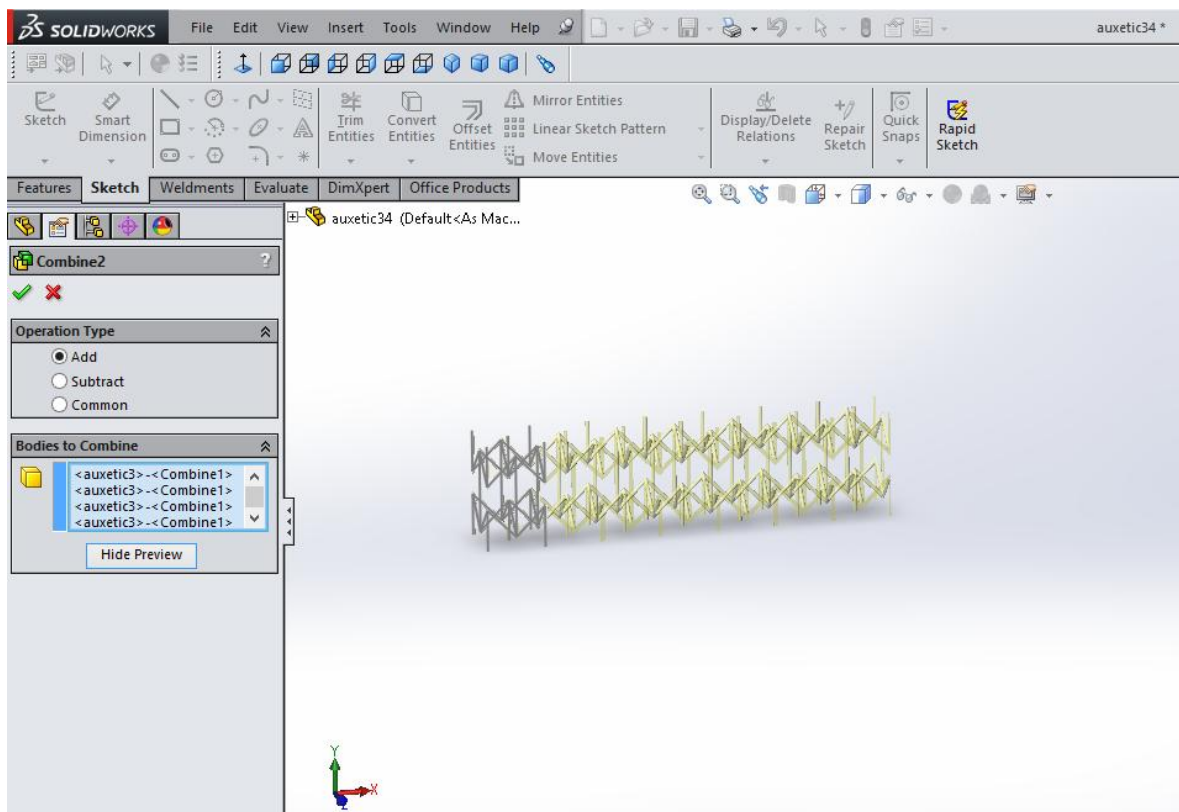


Εικόνα 43 : Εισαγωγή μοναδιαίας κυψελίδας για δημιουργία κύβου



Εικόνα 44 : Επιλογή των σημείων που θα καθίσει το αντικείμενο που εισάγουμε.

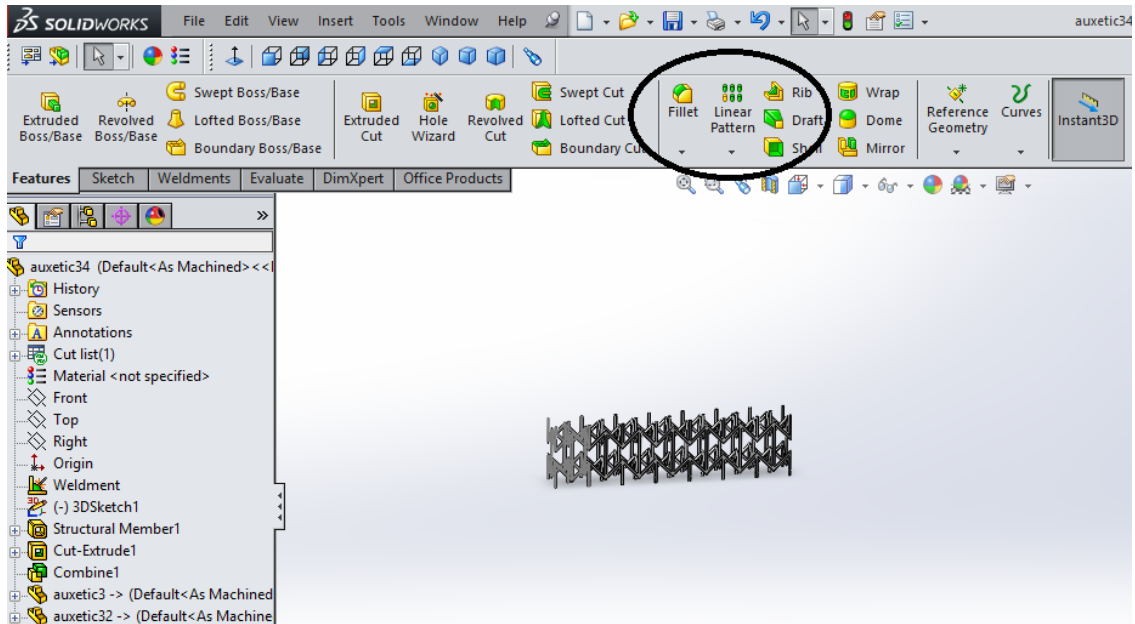
Έχοντας εισάγει τον απαραίτητο αριθμό των αντικειμένων και τα έχουμε φέρει στη κατάλληλη θέση, πρέπει να κάνουμε και συνδυασμό σωμάτων για να μπορούμε να προχωρήσουμε στο επόμενο στάδιο. Ο συνδυασμός αυτός θα γίνει μέσω την εντολή **combine** όπως εξηγήσαμε και στο σχεδιασμό των μοναδιαίων κυψελίδων.



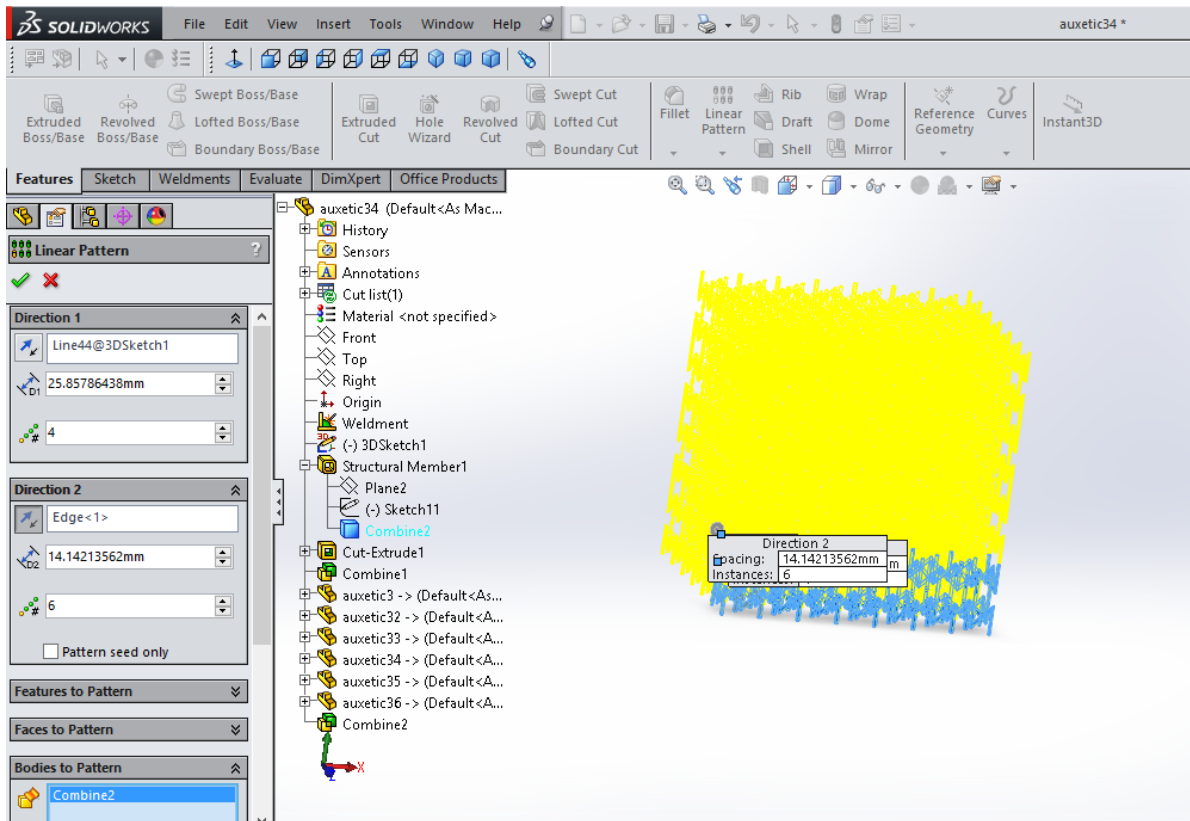
Εικόνα 45 : Με την εντολή **combine** γίνεται συνδυασμός των σωμάτων.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να δημιουργήσουμε τον κύβο μας. Ο κύβος μας μέσω την εντολή **Linear Pattern** και με τις κατάλληλες ρυθμίσεις αποστάσεων θα έρθει στην τελική του μορφή. Την εντολή **linear pattern** θα την βρούμε στο κατάλογο **Features** όπως φαίνεται στην εικόνα 46.

Έπειτα δημιουργούμε την τρισδιάστατη δομή επιλέγοντας τους κατάλληλους άξονες, τις σωστές αποστάσεις και το συνδυασμό σωμάτων από το δέντρο (εικόνα 43). Σιγουρευόμαστε ότι έχουμε επιλέξει τα σώματα που απαιτούνται στην σωστή επιλογή **Bodies to Pattern**.



Εικόνα 46 : Η εντολή Linear Pattern.

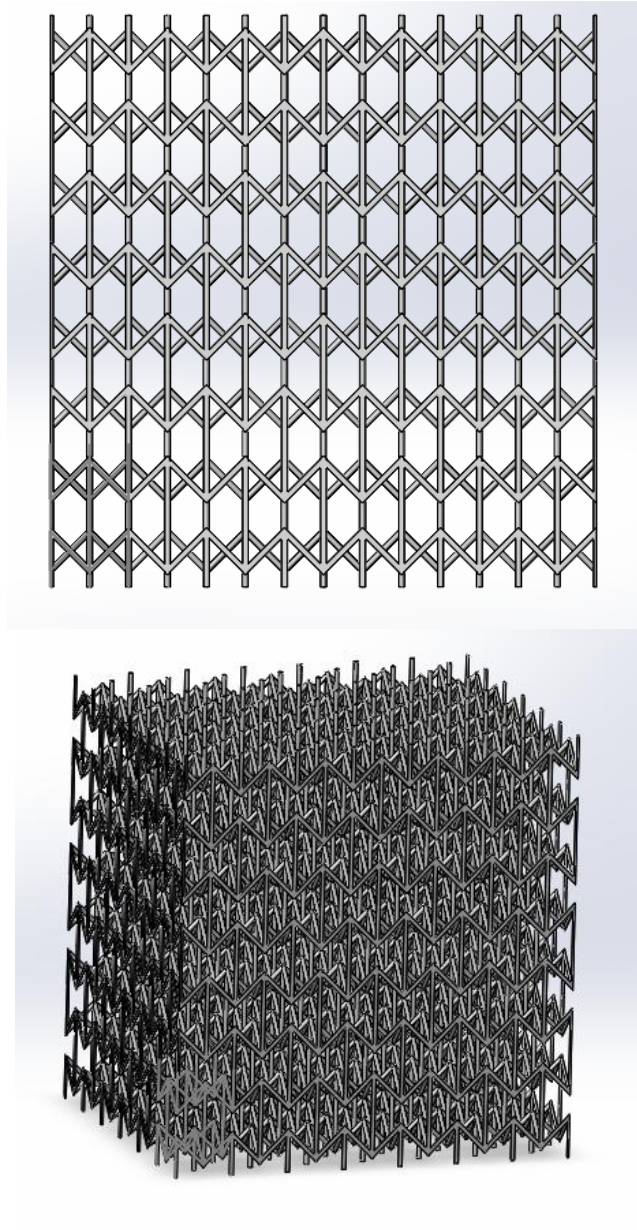


Εικόνα 47 : Δημιουργία της τρισδιάστατης δομής επιλέγοντας τους κατάλληλους άξονες, τις σωστές αποστάσεις και το συνδυασμό σωμάτων από το δέντρο.

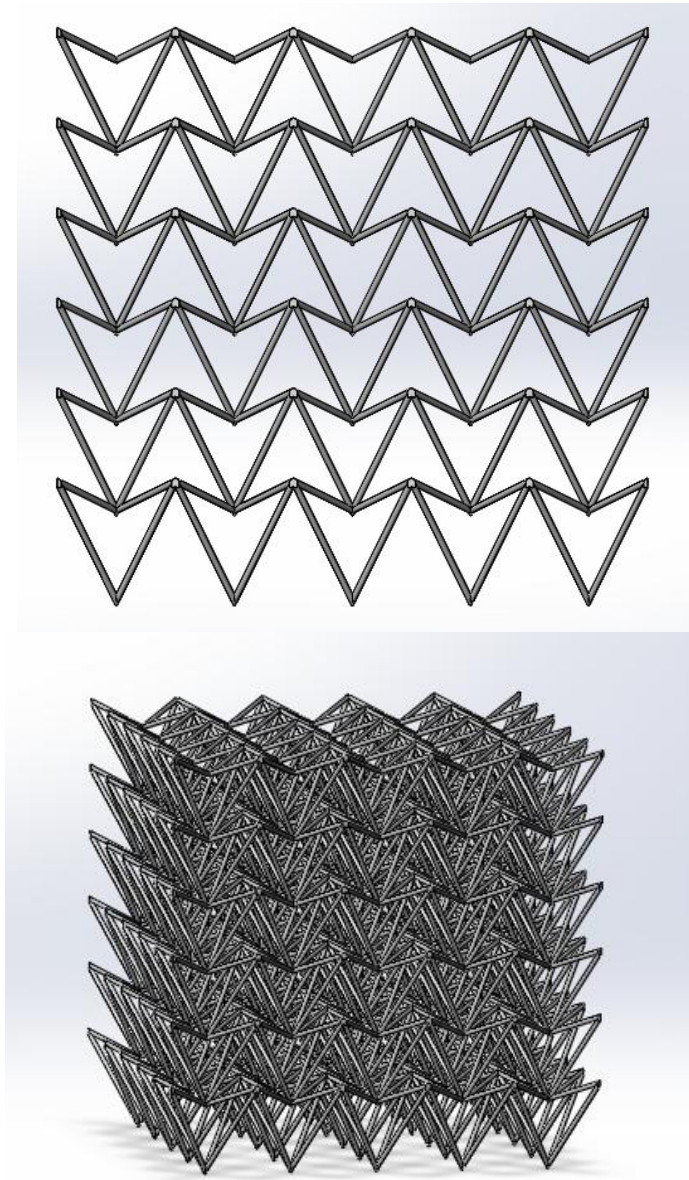
Τέλος, συνδέοντας τα σώματα που πολλαπλασιάσαμε με την εντολή **pattern** κάνουμε έναν τελευταίο συνδυασμό σωμάτων με την εντολή **combine** για να συσσωματωθούν τα σώματα και να γίνει ένας ενιαίος κύβος με τη δομή που επιλέξαμε και σχεδιάσαμε.

Με τα ίδια βήματα σχεδιασμού που περιγράψαμε αναλυτικά για την επαναισερχόμενη αυξητική δομή (re-entrant) σχεδιάστηκαν και οι υπόλοιπες 2 δομές.

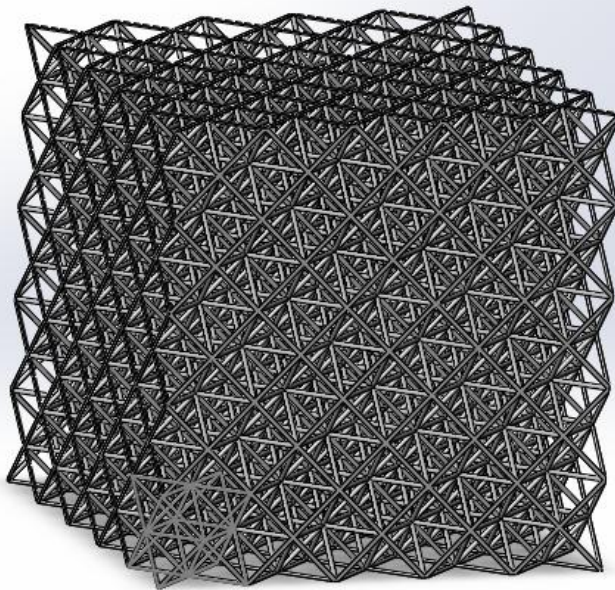
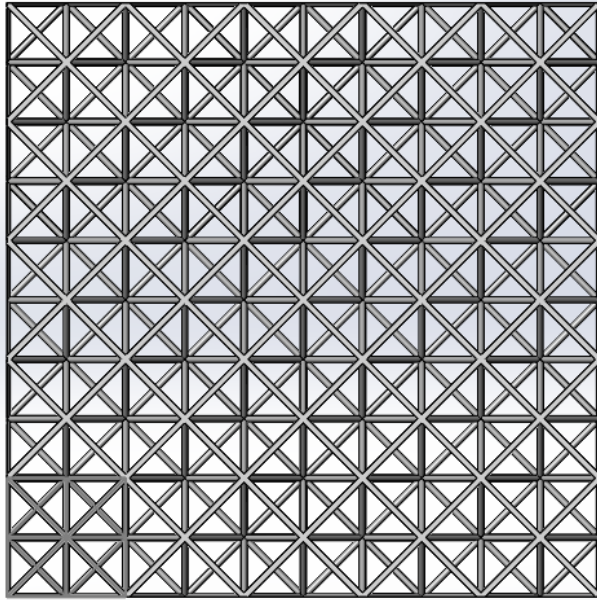
Η τελική μορφή των τρισδιάστατων δομών θα έχει ως εξής:



Εικόνα 48 : Η αυξητική δομή (auxetic structure) **re-entrant**.



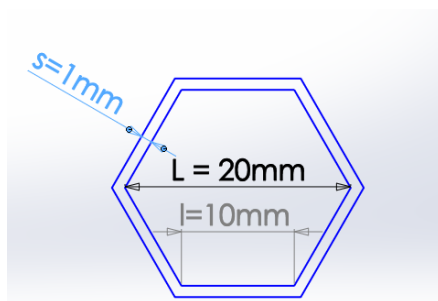
Εικόνα 49 : *Η τελική μορφή της αυξητικής δομής run flat.*



Εικόνα 50 : *Η οκταεδρική δομή.*

5.4 Σχεδιασμός Εξαγωνικής Δομής (Honeycomb Structure)

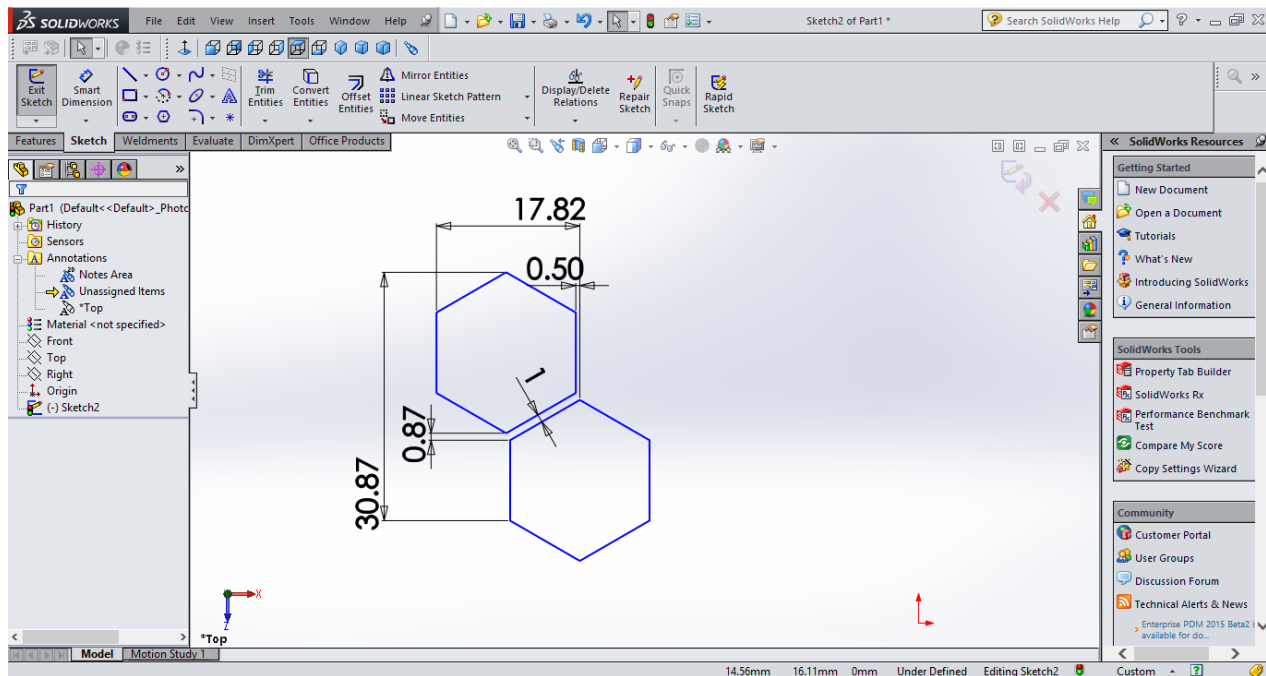
Ο σχεδιασμός της εξαγωνικής δομής κυψέλης γίνεται και αυτός στο πρόγραμμα Solidworks. Η δομή αυτή θα περιβάλετε από ένα εξάγωνο το οποίο θα έχει πάχος $s=1\text{mm}$. Το εσωτερικό μήκος L θα είναι 20mm και το μήκος κάθε εσωτερικής πλευράς θα είναι $l=10\text{mm}$. Η εξαγωνική δομή δεν θα έχει μοναδιαία κυψελίδα διότι θα αποτελείται από σειρές εξάγωνων κυψελών όπου θα έχουν την γεωμετρία που φαίνετε και στο σχήμα 51.



Εικόνα 51 : Διαστάσεις κυψέλης εξαγωνικής δομής.

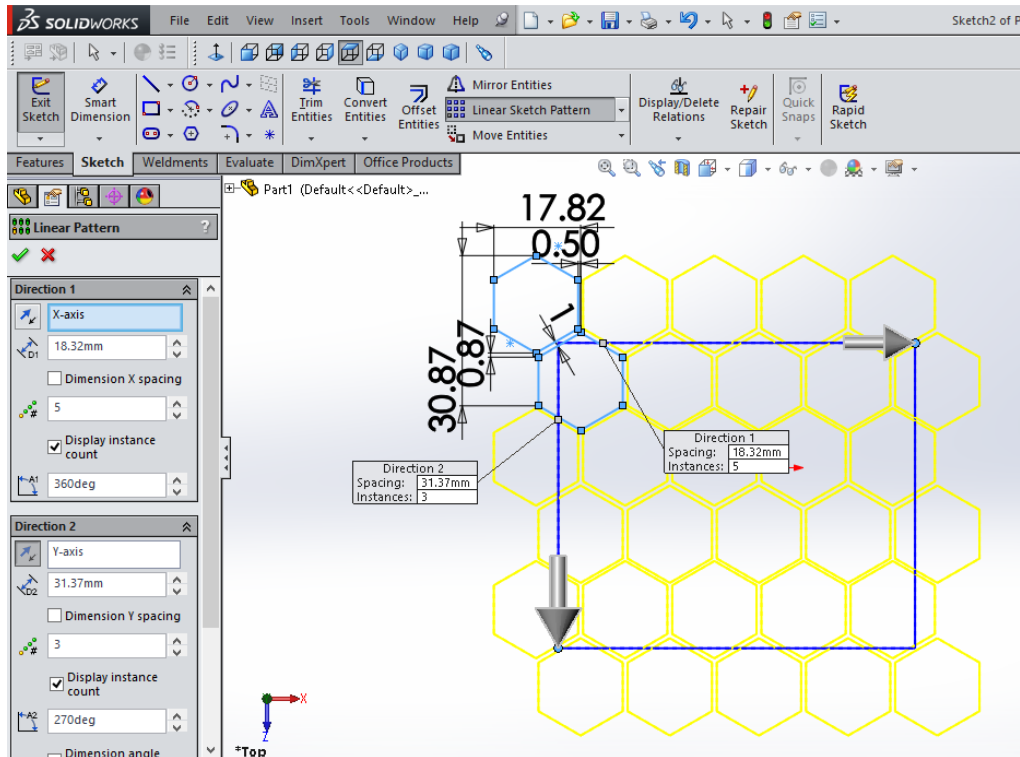
Για να δημιουργηθεί ο κύβος, αρχικά θα πρέπει να σχεδιάσουμε σε δισδιάστατο σκίτσο την σειρά από τις εξαγωνικές κυψέλες. Αυτό θα επιτευχθεί κυρίως με την εντολή **Linear Pattern**. Επομένως ανοίγουμε επιφάνεια για δισδιάστατη σχεδίαση αυτή τη φορά από την εντολή **sketch** για να αρχίσουμε την σχεδίασή μας.

Αρχικά σχεδιάζουμε δύο εξάγωνα με τις κατάλληλες διαστάσεις και τις αποστάσεις που χρειαζόμαστε για να αποκτήσουμε το πάχος του ενός χιλιοστού και να μπορέσουμε να το πολλαπλασιάσουμε στον άξονα του x και του z . Θα έχουμε την αποτύπωση όπως φαίνεται στην εικόνα 52.



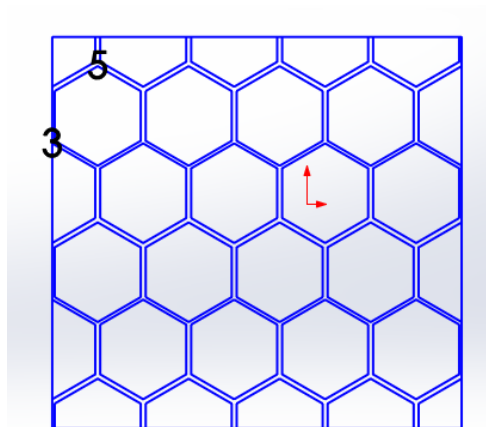
Εικόνα 52: Δημιουργία του δισδιάστατου σκίτσου με τις κατάλληλες διαστάσεις.

Ύστερα με την εντολή **Linear pattern** θα καταφέρουμε να πολλαπλασιάσουμε τα εξάγωνα πλαίσια στους άξονες x και z . Δηλώνοντας τις σωστές αποστάσεις στην εντολή όπως φαίνεται στην εικόνα 52 για να μπορέσουμε να φέρουμε το σκίτσο στη μορφή που χρειαζόμαστε πριν την εξώθηση. Οι αποστάσεις θα είναι αυτές που έχουμε δώσει ως διαστάσεις στο σκίτσο συν το μισό του πάχους για τον άξονα z και πλην το μισό του πάχους για τον άξονα x , ώστε να έρθουν τα επόμενα δύο εξάγωνα και να τοποθετηθούν στη σωστή θέση, από δίπλα και από κάτω, αφήνοντας έτσι κενό ενός χιλιοστού για να δημιουργηθεί το πάχος της δομής στην εξώθηση.



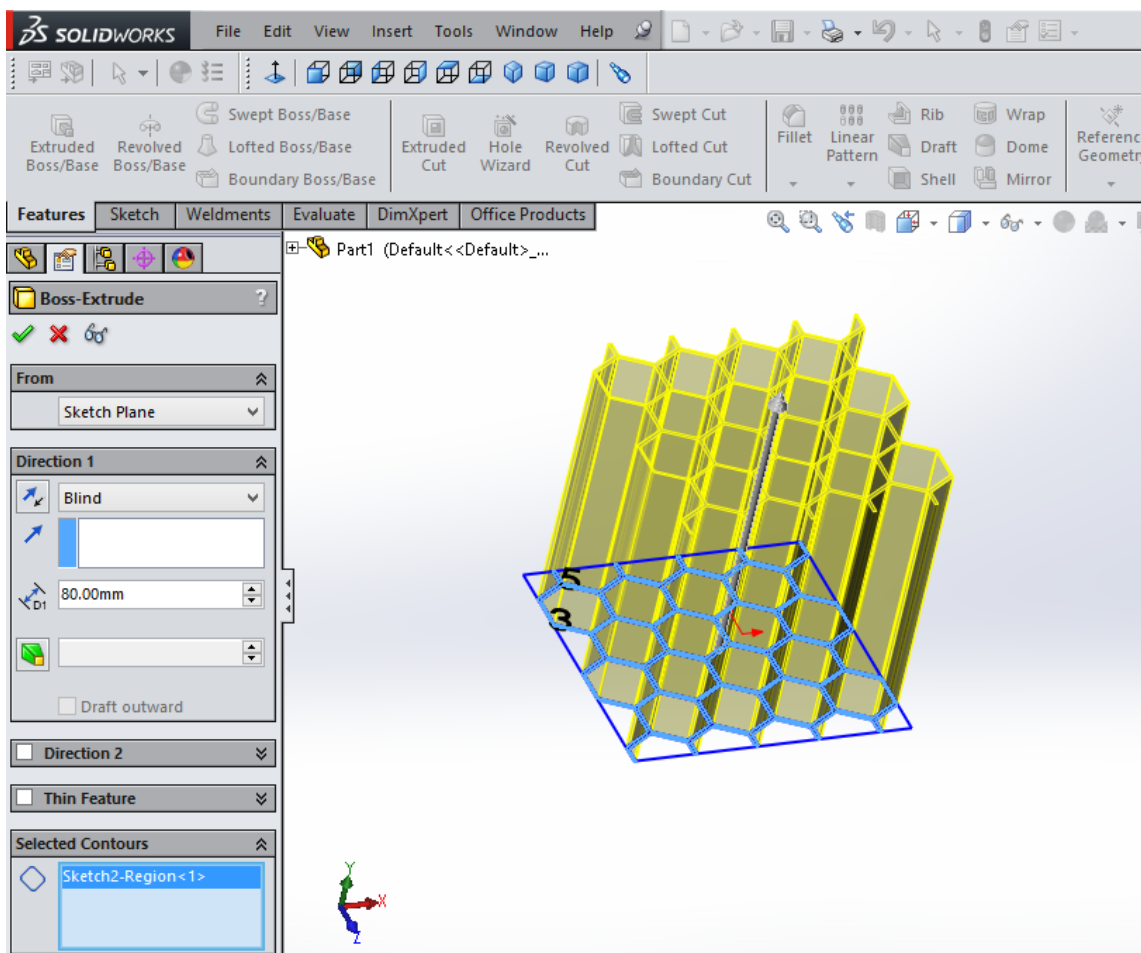
Εικόνα 53: Εντολή *Linear Pattern* και δήλωση αποστάσεων.

Έπειτα δημιουργούμε ένα τετραγωνικό πλαίσιο γύρω από τις εξαγωνικές δομές και κόβουμε τις άκρες με την εντολή **Trim Entities** για να δημιουργήσουμε το πλαίσιο του κύβου. Το αποτέλεσμα το βλέπουμε στην εικόνα 54.



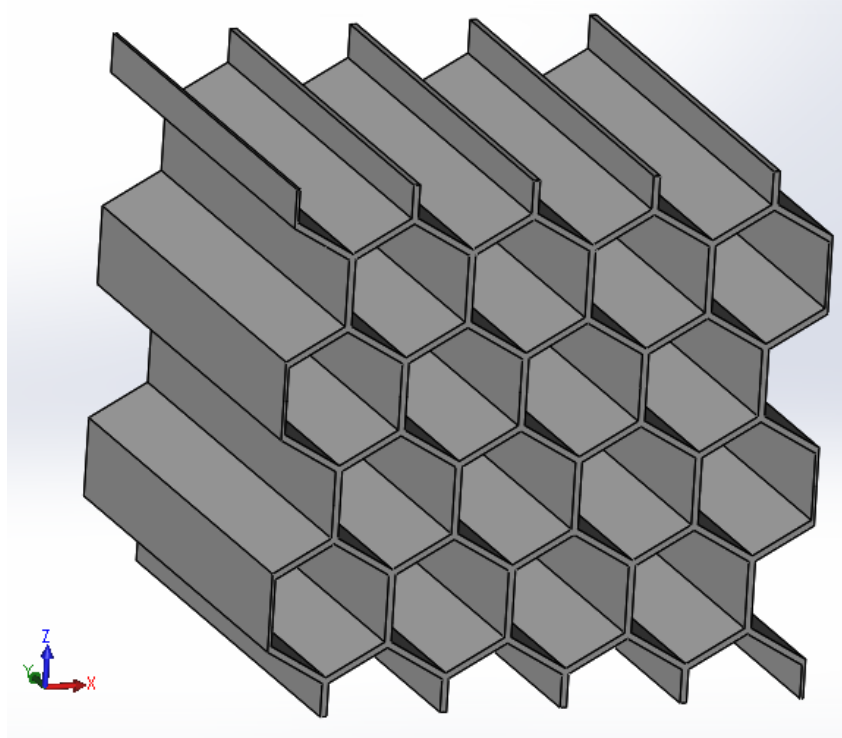
Εικόνα 54: Δημιουργία τετραγωνικού πλαισίου και αφαίρεση άκρων με εντολή *trim entities*.

Για να ολοκληρώσουμε τον σχεδιασμό του κύβου με εξαγωνική δομή μένει να δώσουμε ύψος στο πλαίσιο που έχουμε σχεδιάσει μέχρι τώρα. Με την εντολή **Extruded Boss/Bass** που βρίσκεται στο παράθυρο **Feature Manager** και πατώντας στο κενό του ενός χιλιοστού το εξωθούμε 80mm στον άξονα ψ. Η Διαδικασία φαίνεται στην εικόνα 52.



Εικόνα 55: Εξώθηση πλαισίου στον άξονα ψ με εντολή *Extruded Boss/Bass*.

Αφού έχουμε κάνει αυτή την διαδικασία, τέλος θα έχουμε δημιουργήσει τον κύβο μας με την γεωμετρία της εξαγωνικής δομής κυψέλης όπου θα έχει παρόμοια γεωμετρία με την κηρήθρα της μέλισσας. Στην εικόνα 56 βλέπουμε την τελική μορφή του κύβου μας.



Εικόνα 56: Τελική μορφή κύβου εξαγωνικής δομής (*Honeycomb structure*).

6. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΔΟΜΩΝ

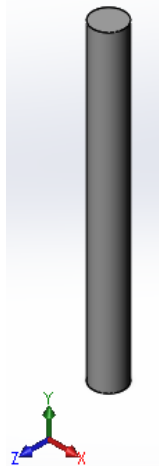
Η προσομοίωση των τρισδιάστατων δομών που έχουμε σχεδιάσει θα γίνει όπως έχουμε αναφέρει και παραπάνω από το σχεδιαστικό πακέτο του SolidWorks. Το SolidWorks Simulation χρησιμοποιεί την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Το σύνολο των απαραίτητων διαδικασιών για την ανάπτυξη ενός πλήρους μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων είναι η εισαγωγή της γεωμετρίας, η δημιουργία του πλέγματος, η επιβολή στηρίξεων και φόρτισης. Τα στοιχεία αυτά αποτελούν την μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων (fine-element modeling).

Η ανάλυση που θα πραγματοποιηθεί θα είναι μη-γραμμική ώστε να μπορέσουμε να δούμε τη συμπεριφορά κάθε δομής σε σύγκριση με μίας ράβδου. Στόχος μας είναι μέσα από το SolidWorks Simulation να βγάλουμε τη καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης κάθε δομής με την εφαρμογή του ίδιου υλικού (θερμοπλαστικού). Τα βήματα προσομοίωσης παρουσιάζονται παρακάτω αναλυτικά.

Το υλικό που θα χρησιμοποιήσουμε είναι θερμοπλαστικό και λέγεται ABS plastic (Acrylonitrile butadiene styrene). Το abs είναι ένα υλικό στην κατασκευή εξαρτημάτων από πλαστικό και χρησιμοποιείται συχνά στην εκτύπωση από τρισδιάστατο εκτυπωτή. Το ABS προέρχεται από ακρυλονιτρίλιο, βουταδιένιο και στυρένιο. Το ακρυλονιτρίλιο είναι ένα συνθετικό μονομερές που παράγεται από προπυλένιο και αμμωνία. Το βουταδιένιο είναι ένα πετρελαϊκό υδρογονάνθρακα που λαμβάνεται από το κλάσμα C4 από πυρόλυση με ατμό. Το μονομερές στυρόλιο γίνεται με αφυδρογόνωση του αιθυλοβενζολίου - υδρογονάνθρακα που λαμβάνεται από την αντίδραση του αιθυλενίου και βενζολίου.

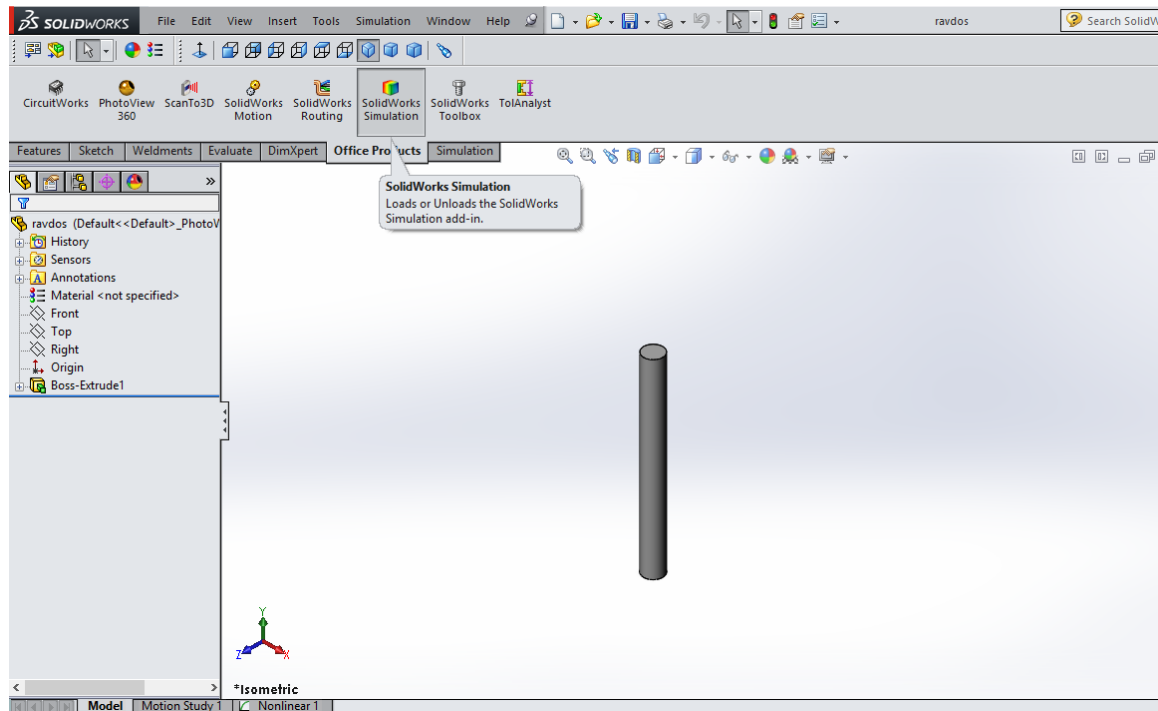
6.1 Βήματα Προσομοίωσης - Ανάλυση ράβδου

Αρχικά σχεδιάζουμε μια ράβδο με μήκος 10mm και πάχος 1mm για να δούμε την συμπεριφορά της χρησιμοποιώντας ένα θερμοπλαστικό υλικό της βιβλιοθήκης (ABS).



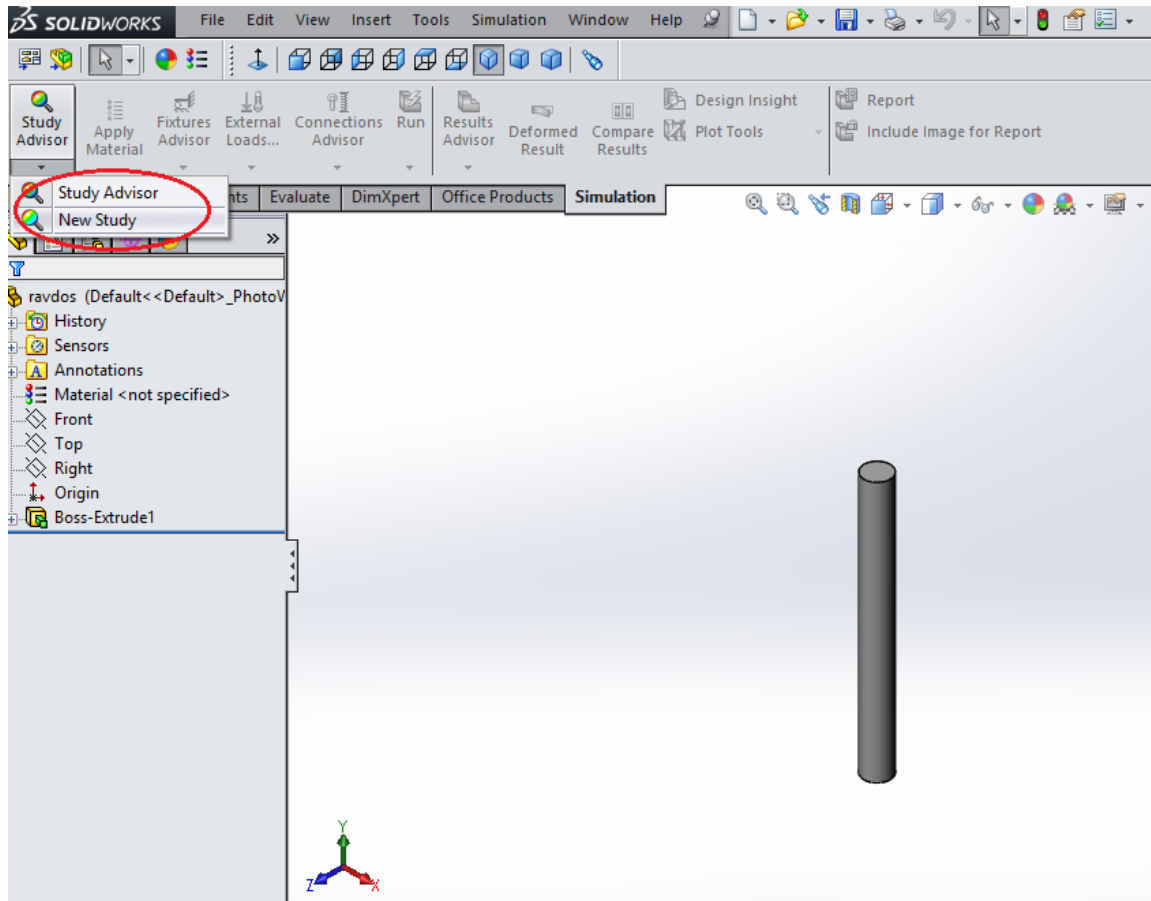
Εικόνα 57: Σχεδιασμός ράβδου

Για να ανοίξουμε την εφαρμογή της προσομοίωσης, πάμε στην καρτέλα **Office products** και επιλέγουμε την κατηγορία **SolidWorks Simulation**. Στη συνέχεια μας βγάζει μία νέα καρτέλα **Simulation** όπου είναι η καρτέλα προσομοίωσης.



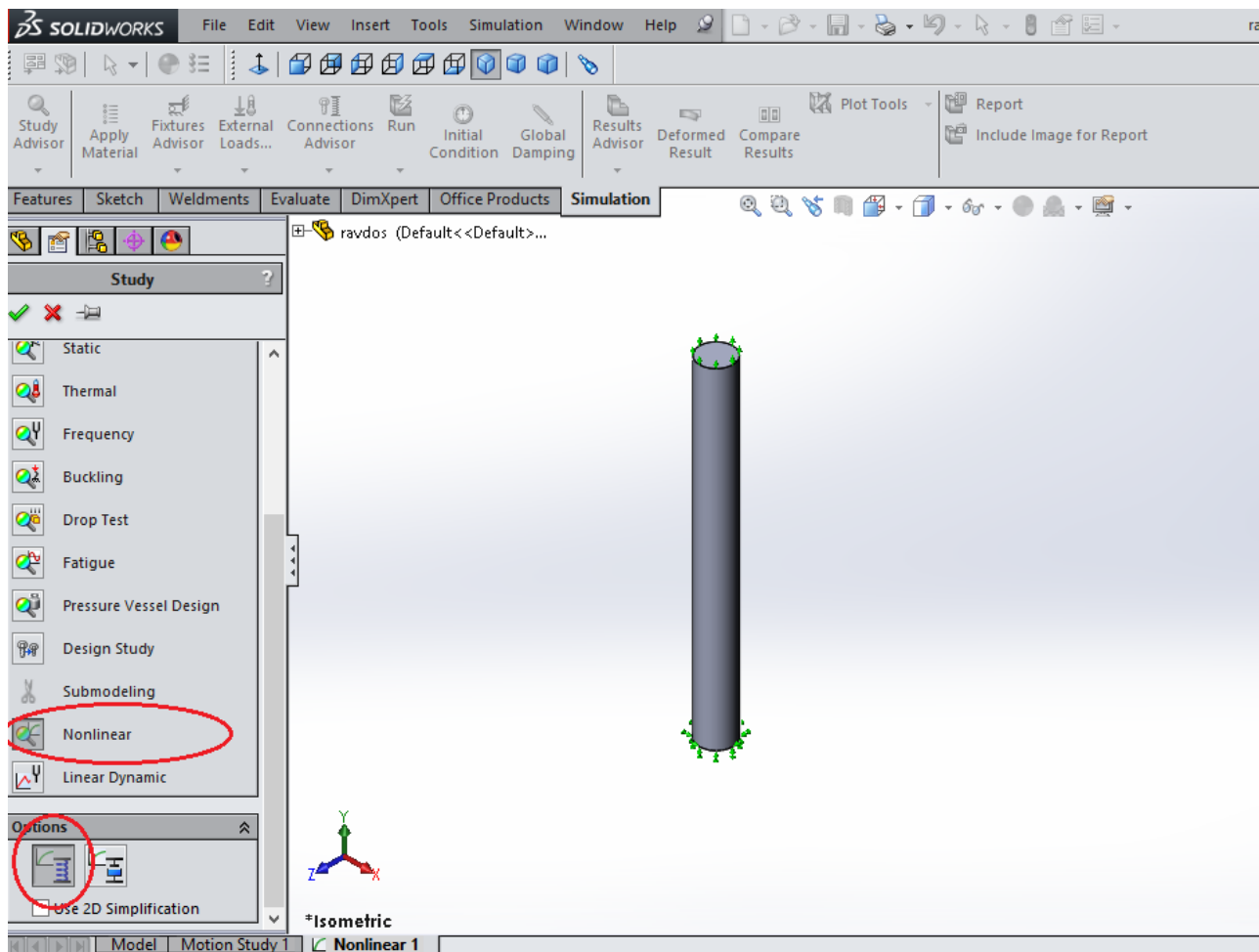
Εικόνα 58: Καρτέλα Προσομοίωσης

Ύστερα για να ξεκινήσουμε μία μη-γραμμική ανάλυση πάμε στην καρτέλα **Study Advisory** και επιλέγουμε νέα μελέτη **New Study**.



Εικόνα 59 : Δημιουργία νέας μελέτης προσομοίωσης

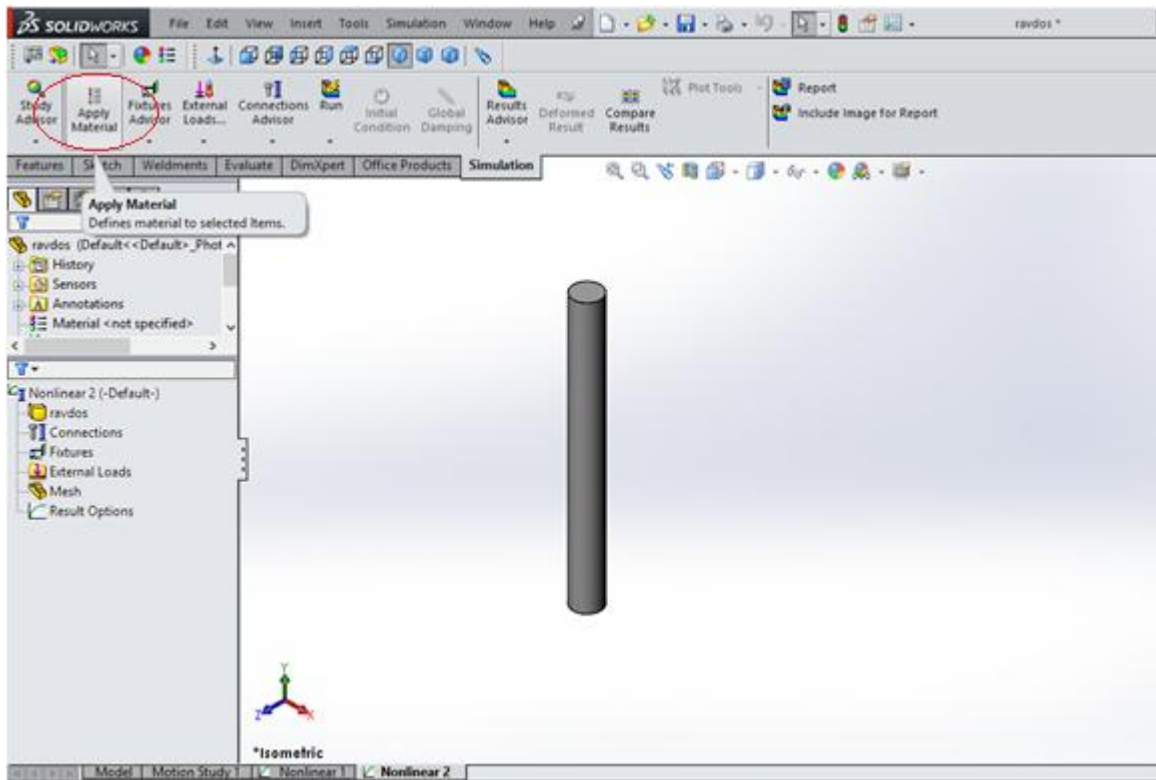
Αφού έχουμε επιλέξει την δημιουργία μίας νέας μελέτης, μας βγάζει σε μία κατηγορία να επιλέξουμε το είδος της μελέτης που θέλουμε να πραγματοποιήσουμε. Όπως έχουμε αναφέρει επανειλημμένα η ανάλυση θα είναι μη γραμμική για να μπορέσουμε να κατασκευάσουμε τις καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης και να αποτυπώσουμε τις συμπεριφορές των κάθε δομών στο υλικό που θα εφαρμόσουμε. Στο στάδιο, επομένως, αυτό επιλέγουμε τύπο **Nonlinear** για μη γραμμική ανάλυση και στις επιλογές **Static** για στατική μη γραμμική ανάλυση και όχι δυναμική.



Εικόνα 60: Επιλογή μη - γραμμικής ανάλυσης

Έχοντας δημιουργήσει τη νέα μας μελέτη για μη-γραμμική ανάλυση της ράβδου, τώρα μας μένει να επιλέξουμε τα χαρακτηριστικά της ανάλυσης. Τα χαρακτηριστικά που θα πρέπει να επιλέξουμε και να δηλώσουμε είναι το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί, οι στηρίξεις του μοντέλου μας, το πλέγμα της διακριτοποίησης και η δύναμη που θα ασκηθεί. Στην περίπτωση την δική μας δεν θα ασκούμε δύναμη αλλά θα κάνουμε την ανάλυση με την μέθοδο της μετατόπισης, δηλαδή η μία επιφάνεια θα είναι πακτωμένη και την άλλη θα την μετατοπίζουμε στον αντίστοιχο άξονα στα χιλιοστά που επιθυμούμε. Έτσι θα έχουμε την δυνατότητα να βλέπουμε την συμπεριφορά του μοντέλου στην θέση που θα το μετατοπίζουμε. Η μετατόπιση έγινε στις αποστάσεις που ήταν δυνατό να μετατοπιστεί η δομή.

Επομένως, στην καρτέλα της προσομοίωσης επιλέγουμε την εντολή **Apply Material** για να δώσουμε το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί.

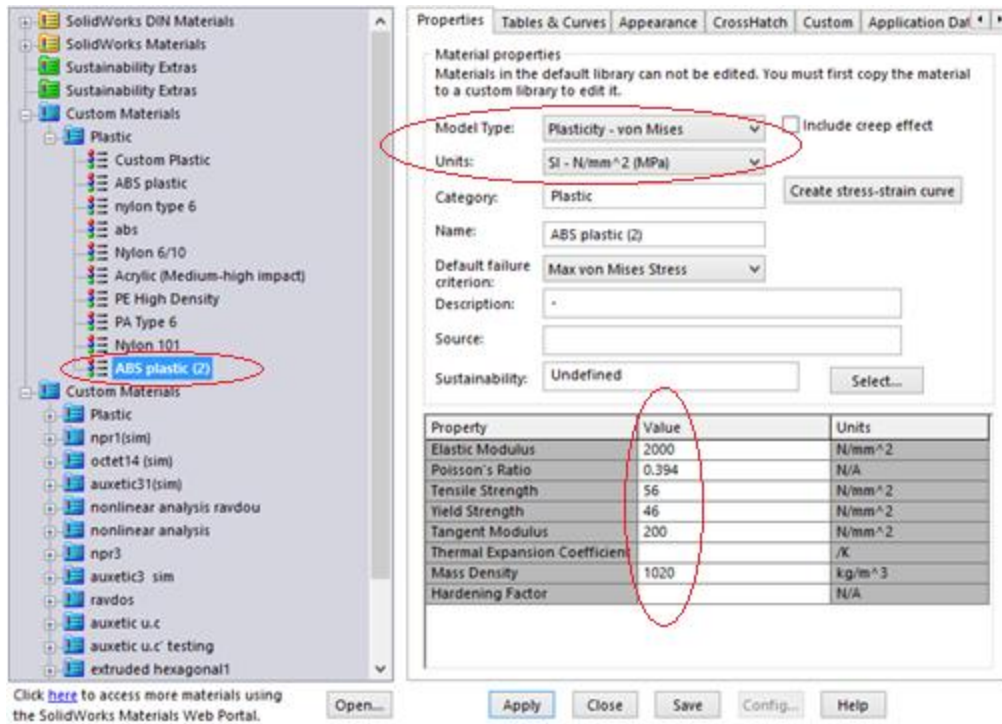


Εικόνα 61: Επιλογή υλικού από την εντολή *Apply Material*.

Στην κατηγορία **custom materials** έχουμε δημιουργήσει καρτέλα με το υλικό που θα χρησιμοποιήσουμε (ABS) και το επιλέγουμε. Την καρτέλα την δημιουργούμε εμείς για να μπορέσουμε να εισάγουμε κάποια χαρακτηριστικά του υλικού που θα χρειαστούν για την ανάλυση και δεν είναι καταχωρημένα από τη βιβλιοθήκη.

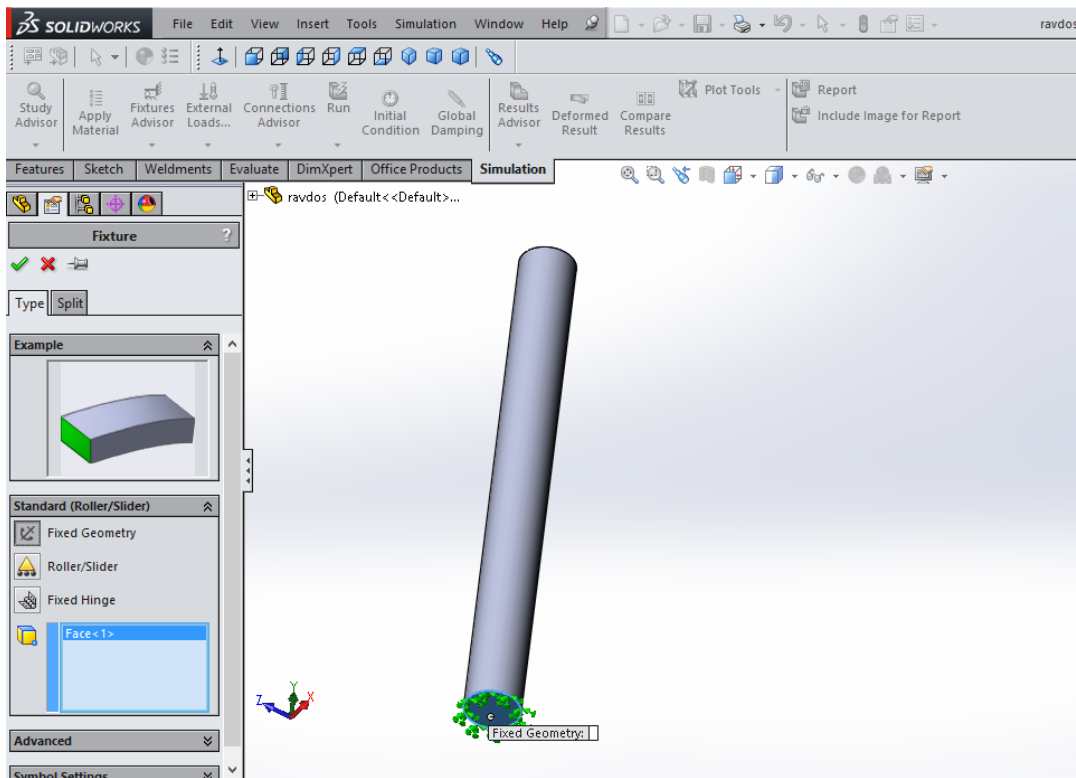
Επιλέγοντας την καρτέλα με το υλικό μας κάνουμε τις απαραίτητες ρυθμίσεις για να γίνει η ανάλυση. Στην επιλογή **Model type** επιλέγουμε να γίνει η ανάλυση με την μέθοδο **Plasticity - Von Mises** και στην κατηγορία **Units** επιλέγουμε τις μονάδες που θα χρησιμοποιηθούν **SI - N/mm² (Mpa)**.

Τα χαρακτηριστικά του υλικού επειδή δεν ήταν προεπιλεγμένα από το πρόγραμμά μας, ερευνήσαμε και ανακαλύψαμε τις μηχανικές του ιδιότητες με μέτρο ελαστικότητας 2000 N/mm², λόγο Poisson 0.394, αντοχή σε εφελκυσμό 56 N/mm², όριο διαρροής 46 N/mm² και πυκνότητα μάζας 1020 kg/m³. Το μέτρο εφαιπόμενης επειδή δεν μας δινόταν το εισάγαμε εμείς 10% της τιμής του μέτρου ελαστικότητας, 200 N/mm².



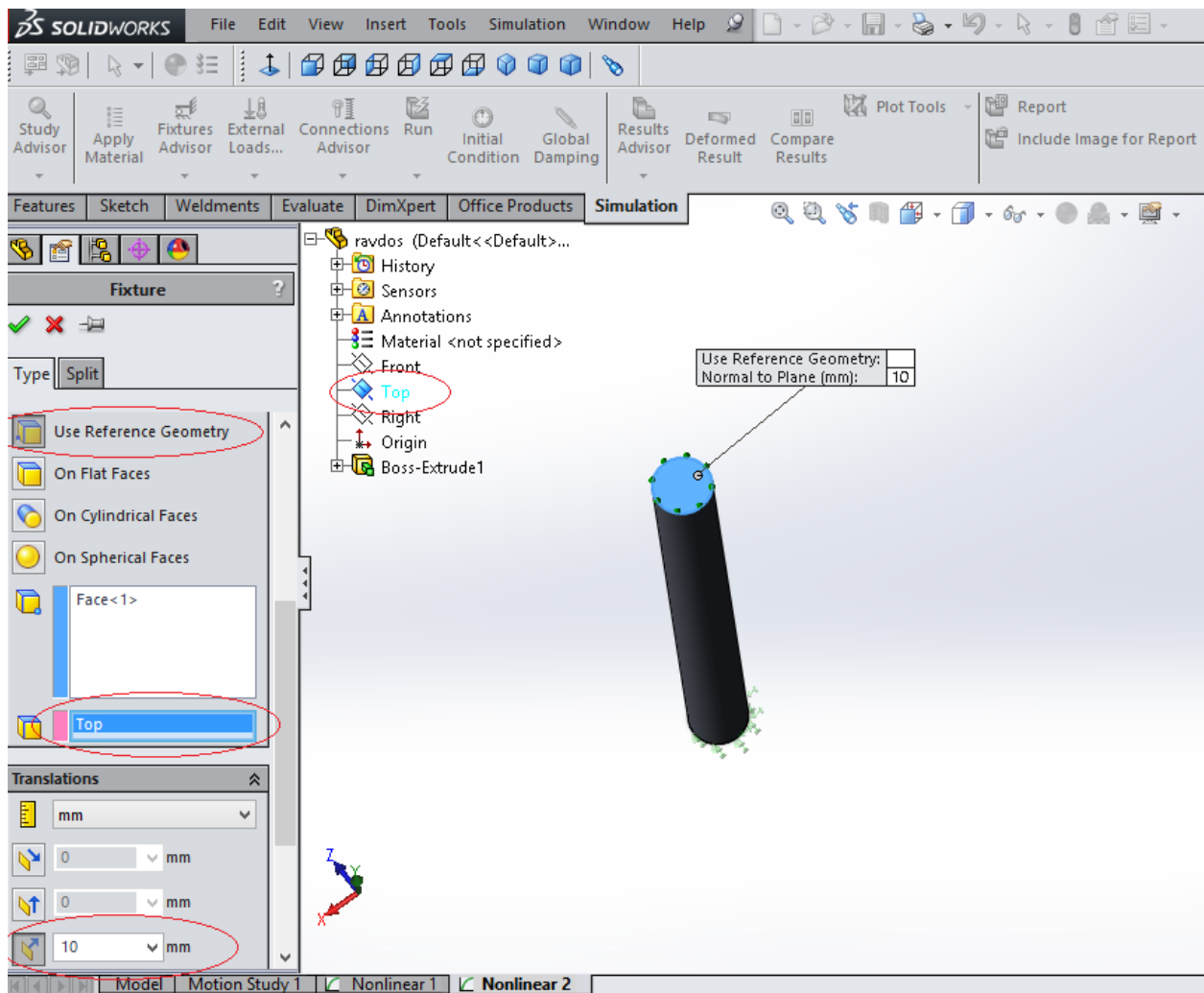
Εικόνα 62: Επιλογή χαρακτηριστικών του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση.

Στην εντολή **Fixtures Advisor** επιλέγουμε τις απαραίτητες στηρίξεις του μοντέλου μας. Στην περίπτωση της ράβδου επιλέγουμε **Fixed geometry** για να πακτωθεί η κάτω επιφάνεια του άξονα ψ και **Advanced Fixtures** για να μετατοπιστεί η πάνω επιφάνεια της ράβδου. Στις εικόνες 63 και 64 βλέπουμε πως γίνεται αναλυτικά η επιλογή των στηρίξεων.



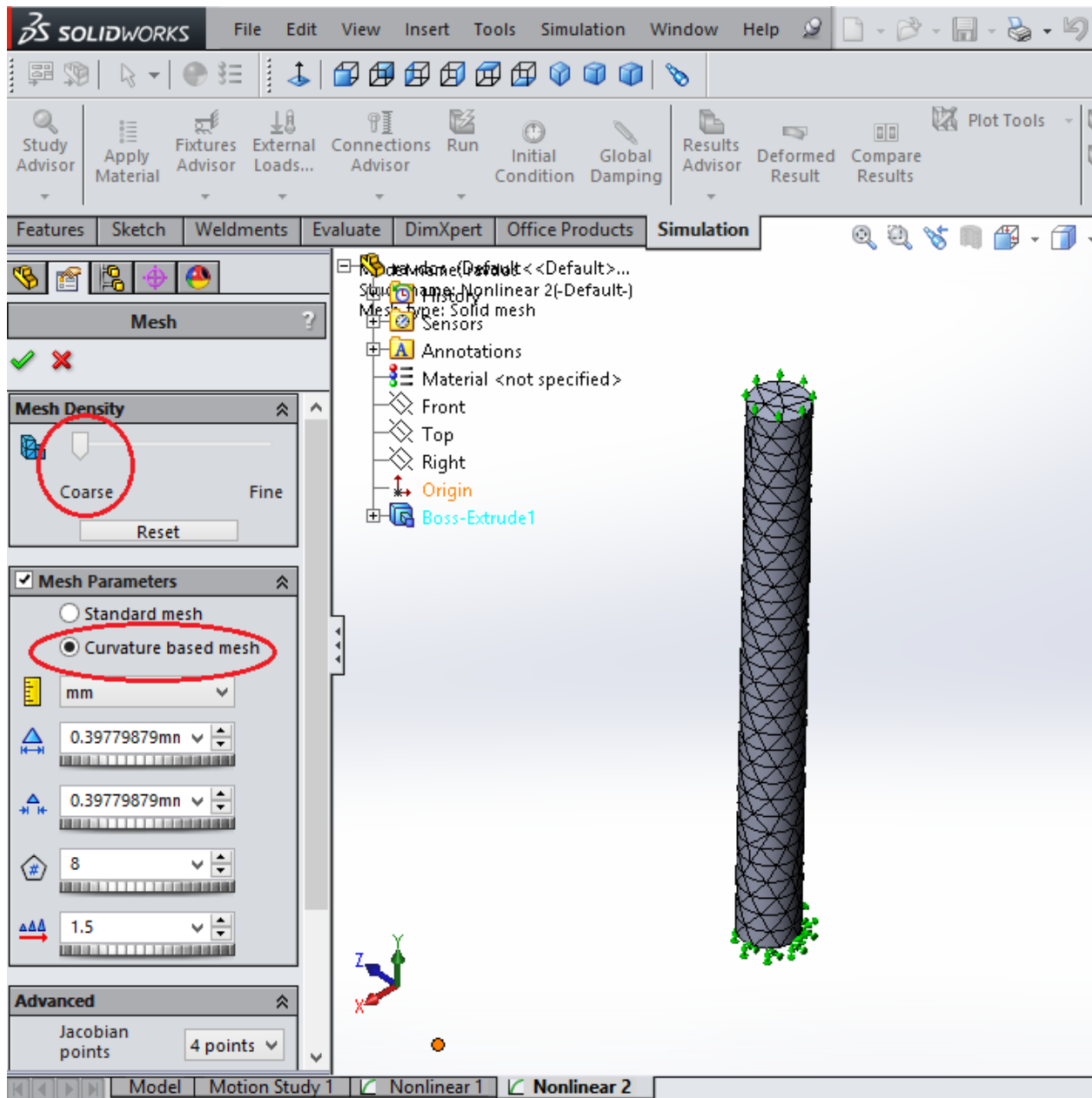
Εικόνα 63: Επιλογή στηρίξεων, πάκτωση κάτω επιφάνειας ράβδου.

Όπως είπαμε αντί να χρησιμοποιήσουμε δύναμη για την ανάλυση θα μετατοπίσουμε την μία επιφάνεια της ράβδου για να δούμε την συμπεριφορά που θα προκύψει. Για την μετατόπιση θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε γεωμετρία αναφοράς. Μέσω της εντολής **Fixtures Advisor** επιλέγουμε την κατηγορία **Advanced Fixtures**. Επιλέγουμε ως γεωμετρία αναφοράς την πάνω επιφάνεια της ράβδου και ως άξονα τον ψ (τον άξονα τον επιλέγουμε από το δέντρο ως top plane). Επιλέγουμε **normal to plane** για την μετατόπιση και εισάγουμε 8mm (για να μετατοπιστεί 8mm) (εικόνα 64).



Εικόνα 64: Επιλογή γεωμετρία αναφοράς για να μετατοπιστεί η πάνω επιφάνεια της ράβδου 8mm.

Πριν τρέξουμε την ανάλυση θα πρέπει να δημιουργήσουμε το πλέγμα διακριτοποίησης σε πεπερασμένα στοιχεία. Στην εντολή **Run** επιλέγουμε **Create Mesh**. Στις παραμέτρους της πλεγματοποίησης επιλέγουμε να γίνει καμπυλωτή πλεγματοποίηση **Curvature Based Mesh** και το ρυθμίζουμε σε αραιή διακριτοποίηση **Coarse Mesh**. Η καμπυλωτής πλεγματοποίησης δημιουργεί πλέγμα με ποικίλες διαστάσεις στοιχείων που επιτρέπει την ακριβή επίλυση μικρών εφαρμογών στις γεωμετρίες, όπως και στη περίπτωση μας. Η ποιότητα του πλέγματος θα πρέπει να είναι πάντα καλής ποιότητας.

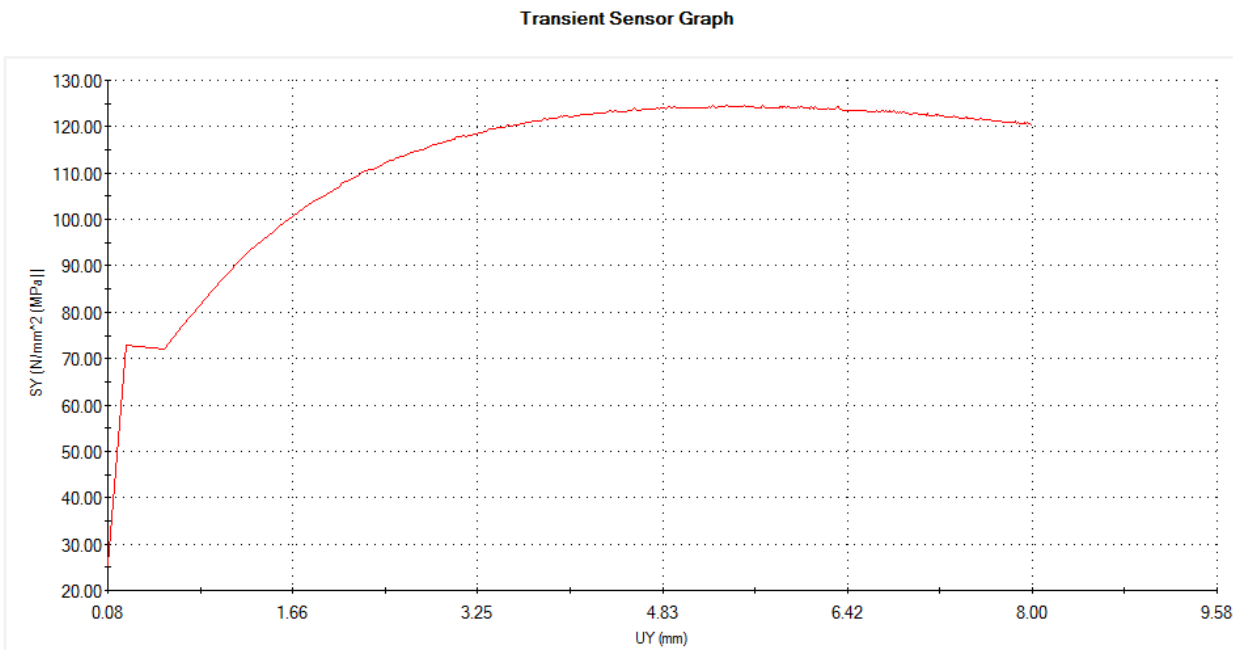


Εικόνα 65: Διακριτοποίηση ράβδου.

Στην Συνέχεια πατάμε την εντολή **Run** και αφήνουμε την προσομοίωση να τρέξει την ανάλυση η οποία παίρνει κάποιο χρονικό διάστημα ανάλογο το μοντέλο.

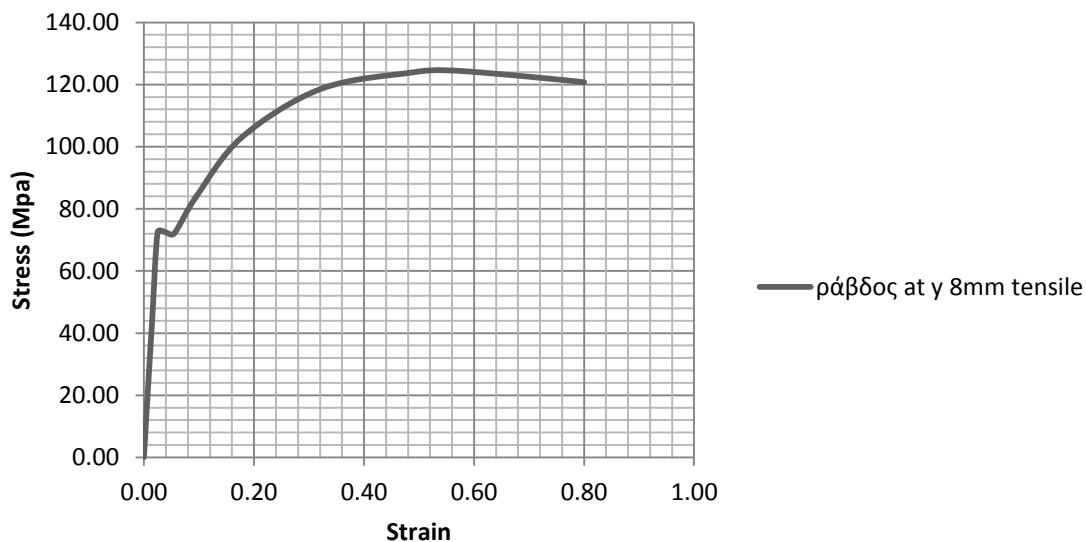
Τελειώνοντας την ανάλυση επιλέγουμε να δούμε το διάγραμμα που προέκυψε από την ανάλυση βάζοντας στον άξονα ψ τις μέγιστες τάσεις (Normal Stress) που ασκήθηκαν στον άξονα ψ της ράβδου δηλαδή SY (Mpa) και στον άξονα χ την αντίστοιχη μετατόπιση (Displacement at y, μετατόπιση στον άξονα ψ της δομής). Επειδή δεν υπάρχει επιλογή στο να δούμε την παραμόρφωση στο διάγραμμα θα διαιρέσουμε εμείς την μετατόπιση με το αρχικό μήκος της ράβδου και θα προκύψει η παραμόρφωση στον

άξονα που επιθυμούμε καταφέροντας να δημιουργήσουμε την καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης.



Σχήμα 66: Διάγραμμα τάσης - μετατόπισης για τη ράβδο μετατοπισμένη 8mm

Επιλέγοντας τιμές από το διάγραμμα για την αντίστοιχη μετατόπιση που έχουμε υπολογίζουμε την παραμόρφωση και δημιουργούμε την καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης για την συμπεριφορά της ράβδου.



Σχήμα 67: Διάγραμμα Τάσης - Παραμόρφωσης για την ράβδο σε μετατόπιση 8mm.

Παρατηρούμε από το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης της ράβδου πως το όριο διαρροής είναι στα 72 Mpa σε αρκετά μικρή παραμόρφωση (0.03 strain). Μετά τα 72 Mpa η ράβδος παρουσιάζει λαιμό και στα 120 Mpa ,στο όριο θραύσης, σπάει (Fracture). Σύμφωνα με αυτά τα αποτελέσματα τώρα θα συγκριθούν και τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από την προσομοίωση των δομών.

6.2 Προσομοίωση Δομών

Παρόμοια με της ράβδου γίνεται και η ανάλυση των δομών με την διαφορά να αλλάζουν οι στηρίξεις στην κάθε μία και η διακριτοποίηση να γίνεται πιο πυκνή εκεί που χρειάζεται. Επίσης καμιά φορά η ανάλυση μπορεί να βγάζει σφάλματα λόγω μαθηματικών δυσκολιών που αφορούν τις ιδιότητες της μελέτης. Τις ιδιότητες αυτές μπορούμε να τις διορθώσουμε, ανάλογα το σφάλμα, στην κατηγορία **Study Advisory** στις επιλογές **Study Properties** και στο παράθυρο που μας βγάζει **Advanced Options** στην υποκατηγορία **step/tolerance options**.

Στις Δομές μας εκτός από καταπόνηση σε εφελκυσμό θα κάνουμε και σε θλίψη για να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα και να δούμε αν έχουμε ίδια συμπεριφορά. Για να επιτύχουμε την θλίψη αλλάζουμε τη γεωμετρία αναφοράς στους άξονες.

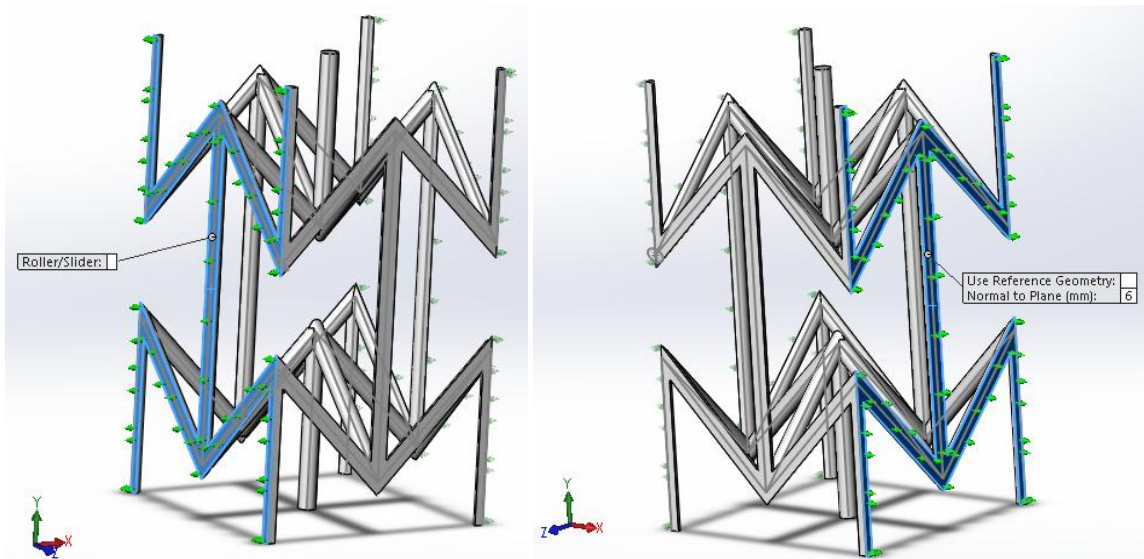
6.2.1 Δομή Επαναισερχόμενη (Re-entrant)

Στην αυξητική επαναισερχόμενη δομή (re-entrant) θα γίνει ανάλυση στη μοναδιαία κυψελίδα (Unit Cell) της δομής όπου θα εξεταστεί και στον άξονα x αλλά και στον άξονα ψ λόγω διαφορετικής συμμετρίας στους άξονες. Επίσης θα κάνουμε και μία δεύτερη ανάλυση με συμμετρικές στηρίξεις για να δούμε τη συμπεριφορά της δομής με την εφαρμογή πολλαπλών στοιχειώδη κυψελίδων.

Ξεκινώντας νέα μελέτη μη-γραμμικής ανάλυσης κάνουμε όμοιες ρυθμίσεις με την προσομοίωση της ράβδου με υλικό πάντα ABS.

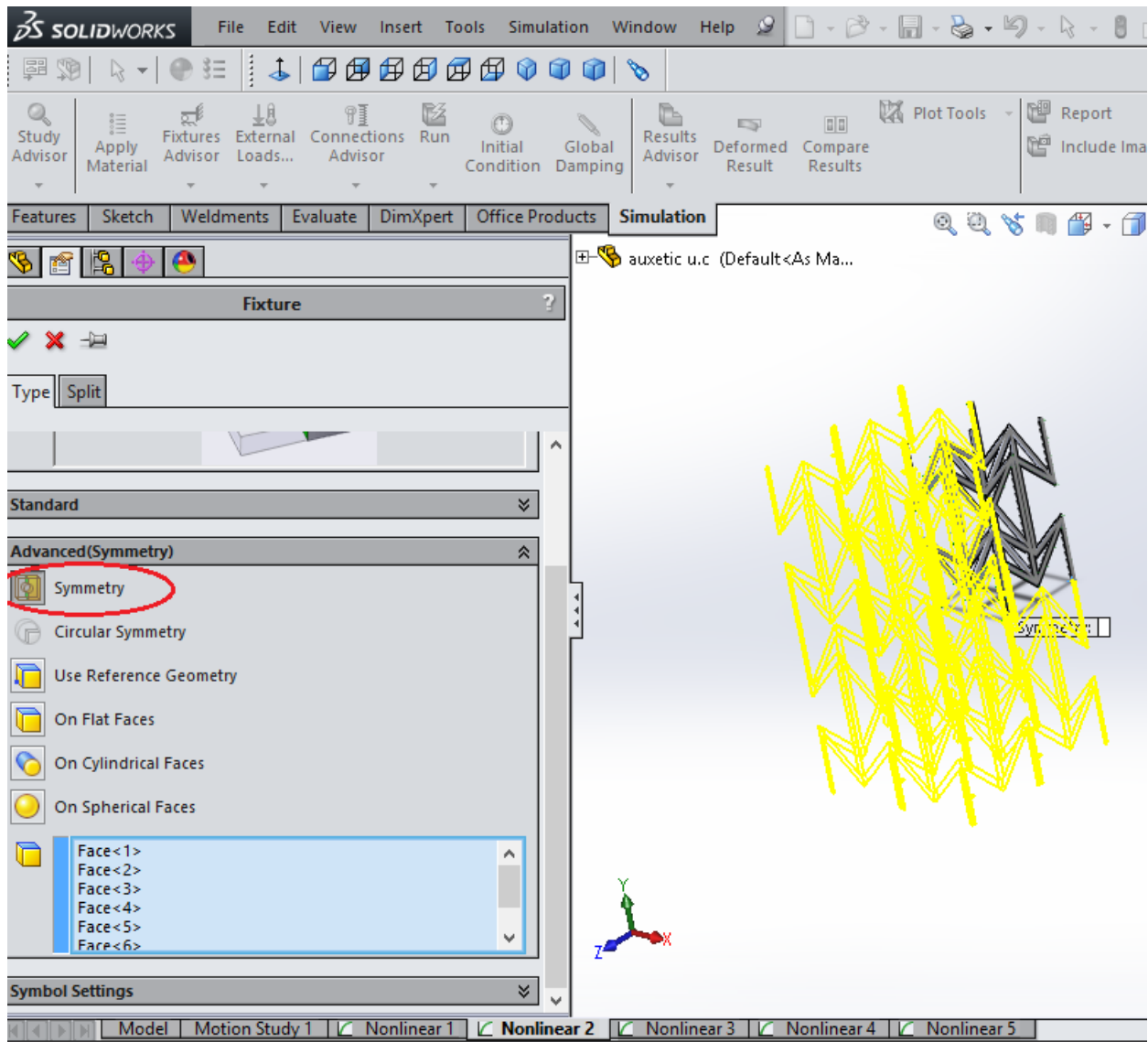
Άξονας x

Αρχικά στις στηρίξεις για τον άξονα x επιλέγουμε στη μία επιφάνεια ολίσθηση και στην άλλη, γεωμετρία αναφοράς για να γίνει η μετατόπιση που επιθυμούμε (στον άξονα x θα γίνει 6mm) . Ολίσθηση επιλέγεται για να μπορέσουμε να ελευθερώσουμε τις οριζόντιες δυνάμεις ώστε να παραμορφώνεται συμμετρικά η δομή μας.



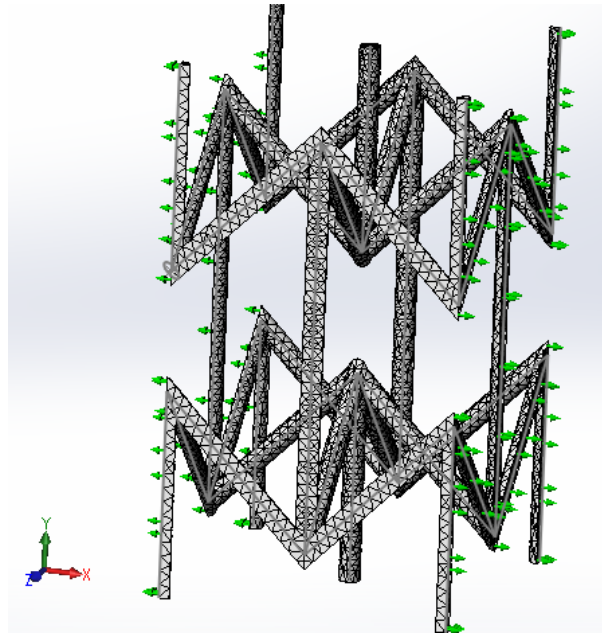
Εικόνα 68: Επιλογή στηρίξεων για την ανάλυση της δομής re-entrant.

Στην δεύτερη ανάλυση που θα κάνουμε, επιλέγουμε συμμετρικές στηρίξεις όπου μέσω της εντολής **Fixtures Advisor** επιλέγουμε στην κατηγορία **Advanced Fixtures** την επιλογή **Symmetry** και επιλέγουμε τις επιφάνειες στήριξης. Η γεωμετρία αναφοράς για την μετατόπιση στα 6mm θα είναι ίδια.



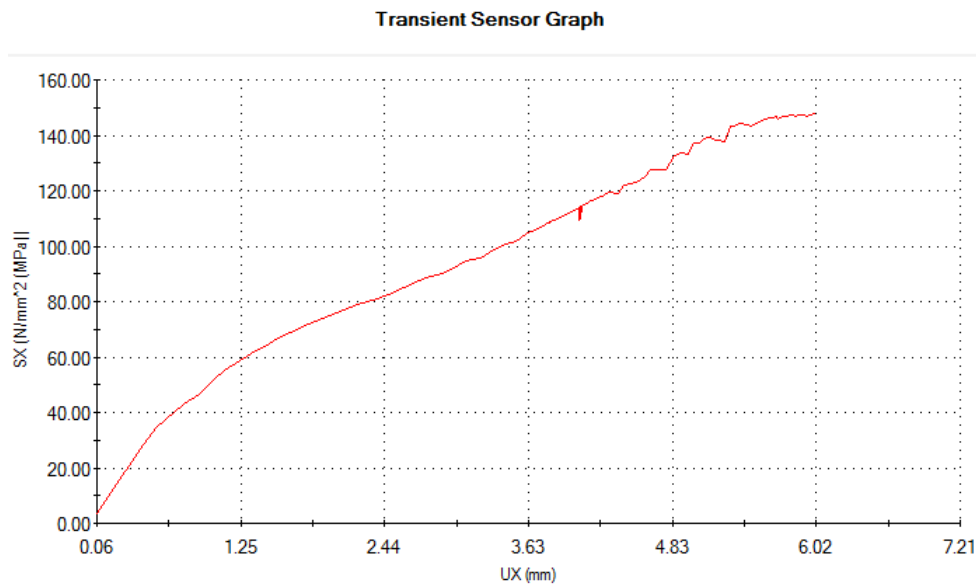
Εικόνα 69: Επιλογή Στηρίξεων με συμμετρικές στηρίξεις.

Για την διακριτοποίηση επιλέγουμε το καμπυλωτό πλέγμα και το ρυθμίζουμε και αυτό στο αραιό όπως και στην περίπτωση της ράβδου



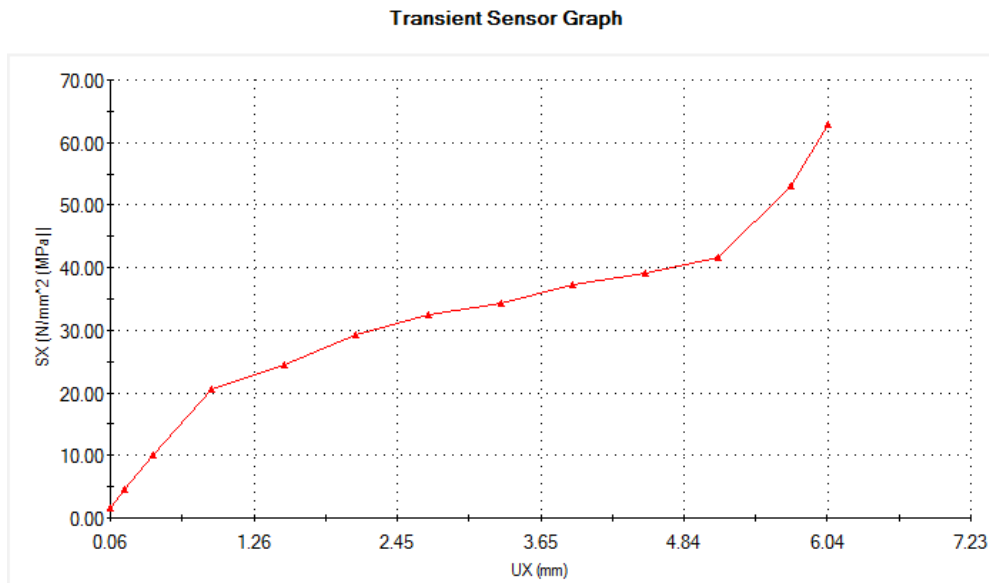
Εικόνα 70: Διακριτοποίηση Δομής re-entrant.

Ολοκληρώνοντας και τις δύο αναλύσεις με για τον άξονα x (με απλές στηρίξεις και με στηρίξεις συμμετρικές) βλέπουμε ότι προκύπτουν σχεδόν ίδια αποτελέσματα. Παρακάτω βλέπουμε το διάγραμμα Τάσης - Μετατόπισης για απλές στηρίξεις στον άξονα x με μετατόπιση 6mm για εφελκυσμό.



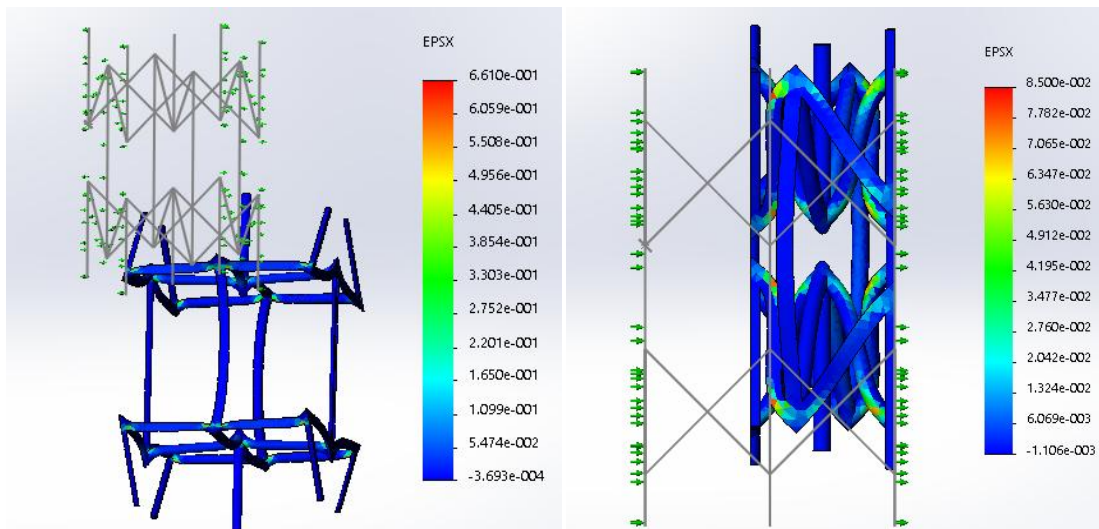
Σχήμα 71: Διάγραμμα τάσης-μετατόπισης για 6mm στον άξονα x της δομής για εφελκυσμό

Εφαρμόζοντας θλιπτικές δυνάμεις επιλέγοντας τις ίδιες στηρίξεις αλλάζοντας την γεωμετρία αναφοράς για να γίνει θλίψη και βάζοντας 6mm για να μετατοπιστεί, θα έχουμε το παρακάτω αποτέλεσμα.



Σχήμα 72: Διάγραμμα τάσης-μετατόπισης για 6mm μετατόπιση στον άξονα χ της δομής για θλίψη

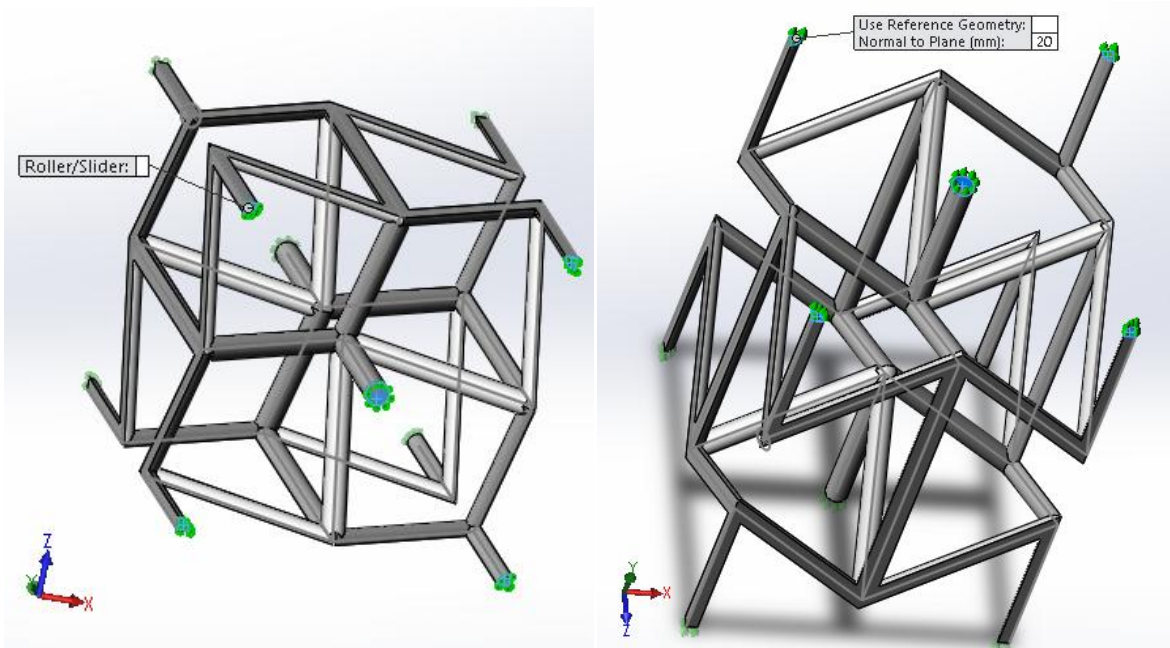
Στις παρακάτω εικόνες βλέπουμε τη συμπεριφορά της δομής στην παραμόρφωση από την ανάλυση που κάναμε.



Εικόνα 73: Παραμόρφωση δομής στον άξονα χ για εφελκυσμό και θλίψη.

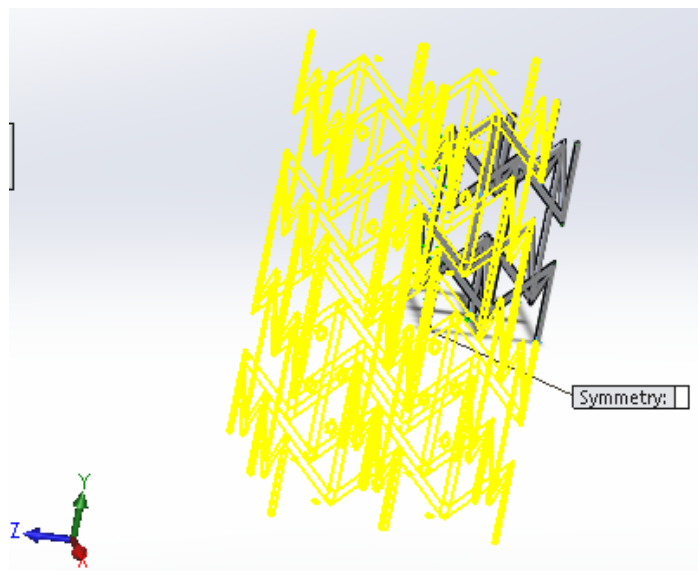
Άξονας ψ

Για τον άξονα ψ επιλέγουμε τις επιφάνειες που αντιστοιχούν στον άξονα ψ για στηρίξεις. Όπως και στον άξονα χ θα γίνουν 2 αναλύσεις όπου στην μία θα έχουμε απλές στηρίξεις με ολίσθηση στη κάτω επιφάνεια και γεωμετρία αναφοράς στην πάνω για να μετατοπισθεί στα 20mm. Στη δεύτερη ανάλυση θα έχουμε συμμετρικές στηρίξεις στις επιφάνειες που το περιβάλλουν γύρω γύρω και από κάτω ενώ στην πάνω επιφάνεια γεωμετρία αναφοράς για μετατόπιση 20mm.



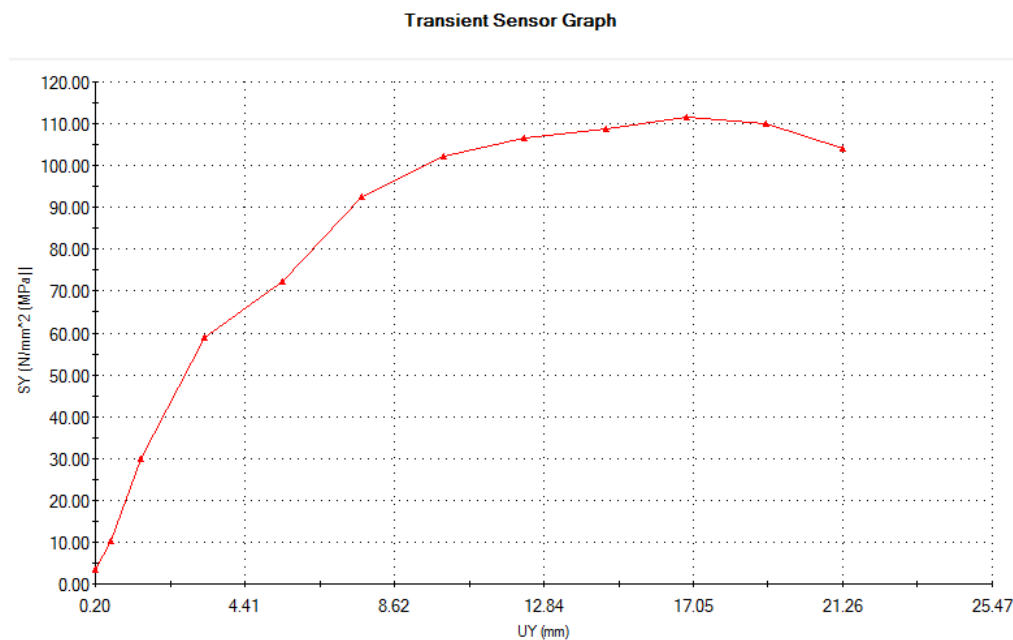
Εικόνα 74: Επιλογή στηρίξεων για ανάλυση στον άξονα ψ για τη δομή re-entrant.

Με τον ίδιο τρόπο που έγινε και για τον άξονα χ επιλέγουμε και τις συμμετρικές στηρίξεις για τον άξονα ψ .

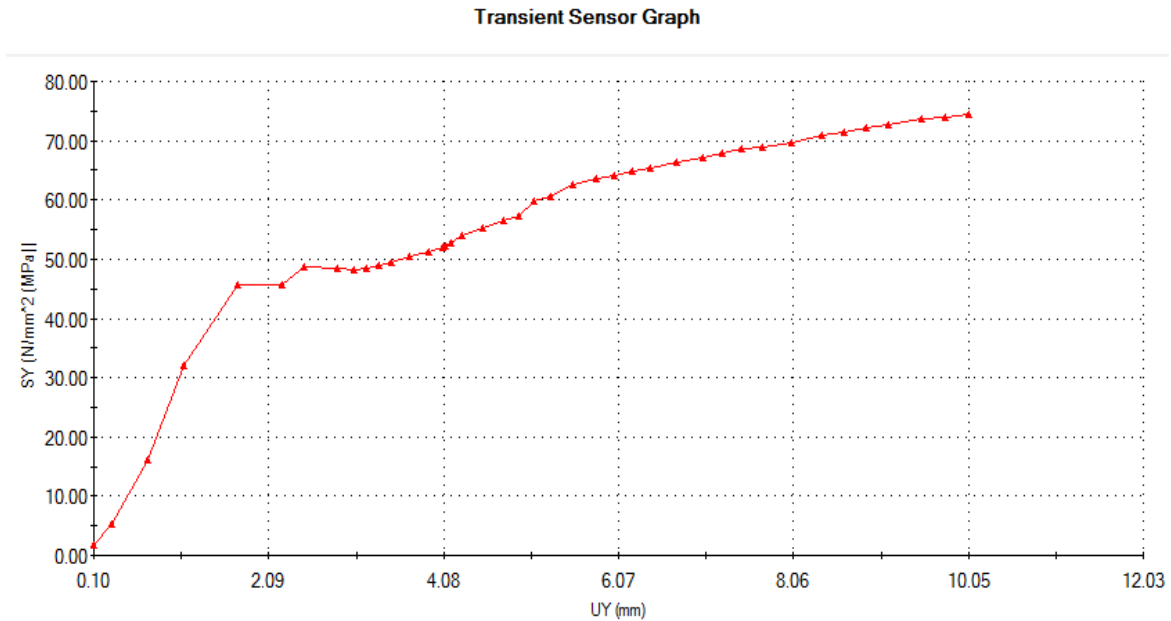


Εικόνα 75: Επιλογή συμμετρικών στηρίξεων για τον άξονα ψ για τη δομή re-entrant.

Τρέχοντας την ανάλυση με την ίδια πλεγματοποίηση όπως στον άξονα χ θα έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα. Στις δύο αναλύσεις που κάναμε αλλάζοντας μόνο τις στηρίξεις προέκυψαν παρόμοια αποτελέσματα, επομένως θα χρησιμοποιήσουμε τα αποτελέσματα της μίας ανάλυσης (απλές στηρίξεις). Η ανάλυση θυμίζουμε ότι έγινε για σε καταπόνηση εφελκυσμού και θλίψης με τη μέθοδο μετατόπισης των 20mm και 6mm αντίστοιχα.

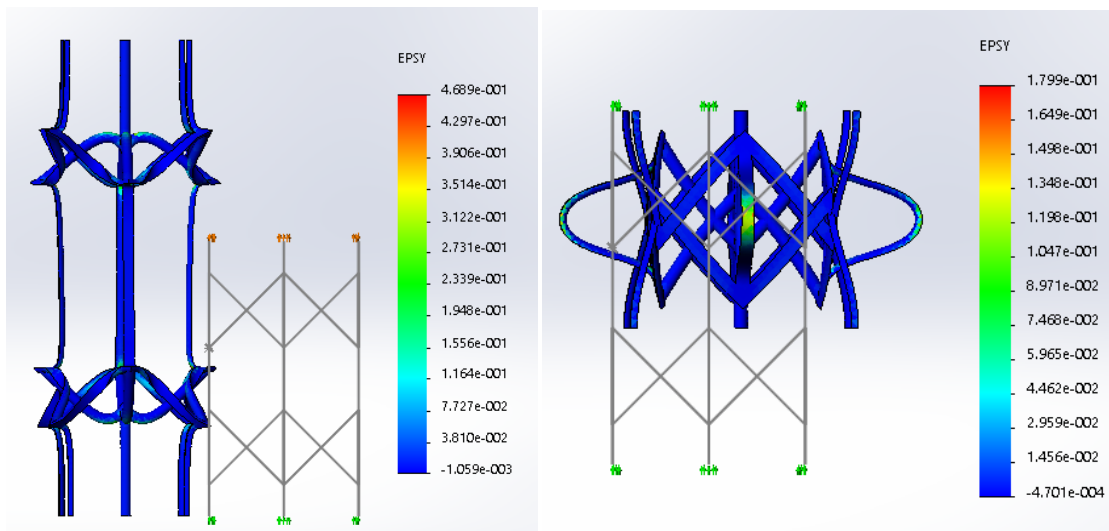


Σχήμα 76: Διάγραμμα τάσης - μετατόπισης για εφελκυσμό στον άξονα ψ της δομής re-entrant (μετατόπισης 20mm).



Σχήμα 77: Διάγραμμα τάσης - μετατόπισης για θλίψη στον άξονα ψ της δομής *re-entrant* (μετατόπισης 10mm).

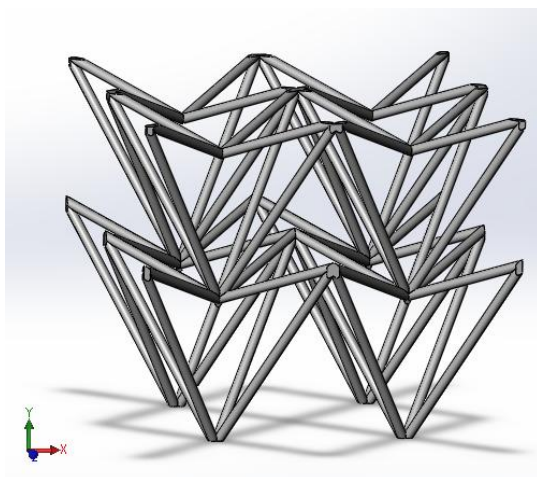
Στις παρακάτω εικόνες βλέπουμε τη συμπεριφορά της δομής στην παραμόρφωση από την ανάλυση που κάναμε.



Εικόνα 78: Παραμόρφωση δομής στον άξονα ψ από καταπόνηση εφελκυσμού και θλίψης.

6.2.2 Αυξητική Δομή (run flat)

Στην αυξητική δομή αρνητικού λόγου Poisson η επιλογή χαρακτηριστικών γίνεται με τον ίδιο τρόπο όπως τις άλλες δομές μόνο που θα έχουμε άλλες στηρίξεις λόγω της ασυμμετρίας της δομής. Δεν θα εξεταστεί η μοναδιαία κυψελίδα αλλά θα εξετάσουμε έναν μικρό κύβο αποτελούμενο από την αυξητική δομή διότι υπάρχει αδυναμία στο να επιλέξουμε τις επιφάνειες για την καταπόνηση των δυνάμεων στη προσομοίωση. Έτσι δημιουργούμε τον μικρό κύβο που περιλαμβάνει δύο μοναδιαίες κυψελίδες στον άξονα x , δύο στον άξονα y και δύο στον άξονα z . Στην εικόνα 79 μπορούμε να δούμε την δομή που θα εξετάσουμε.

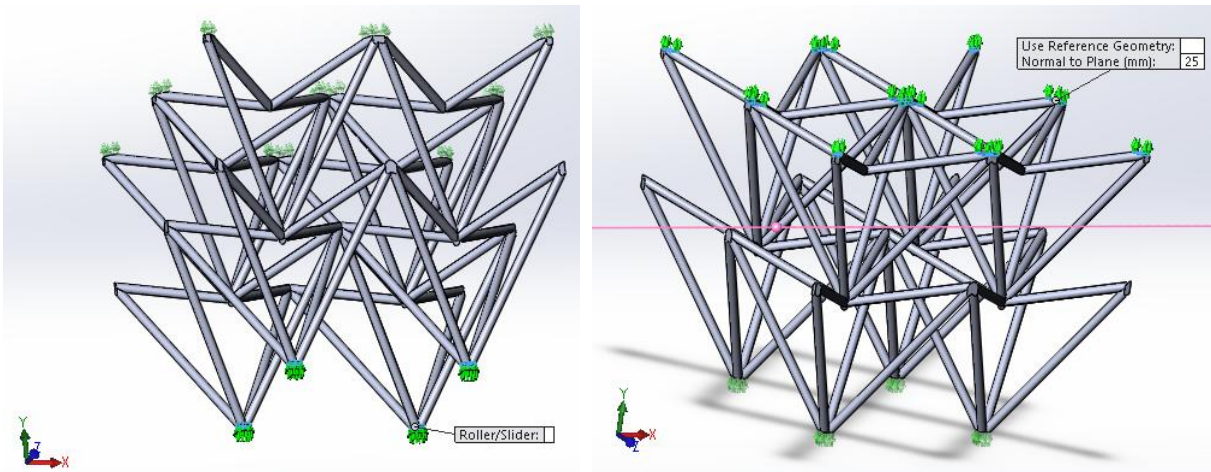


Εικόνα 79: Το μοντέλο που θα εξεταστεί για την αυξητική δομή (run flat).

Άξονας y

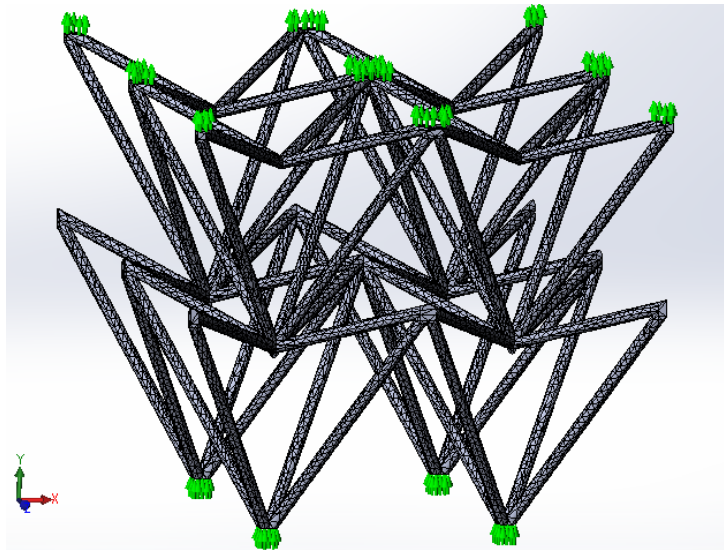
Με τον ίδιο τρόπο γίνεται επιλογή του υλικού εφαρμογής (ABS) και στηρίξεων. Σε αυτήν την περίπτωση δεν θα χρειαστεί να κάνουμε ανάλυση με συμμετρικές στηρίξεις γιατί το έχουμε φέρει ήδη σε μορφή συμμετρίας. Η γεωμετρία αναφοράς θα γίνει με μετατόπιση στα 25mm.

Επομένως οι στηρίξεις θα έχουν ως εξής:



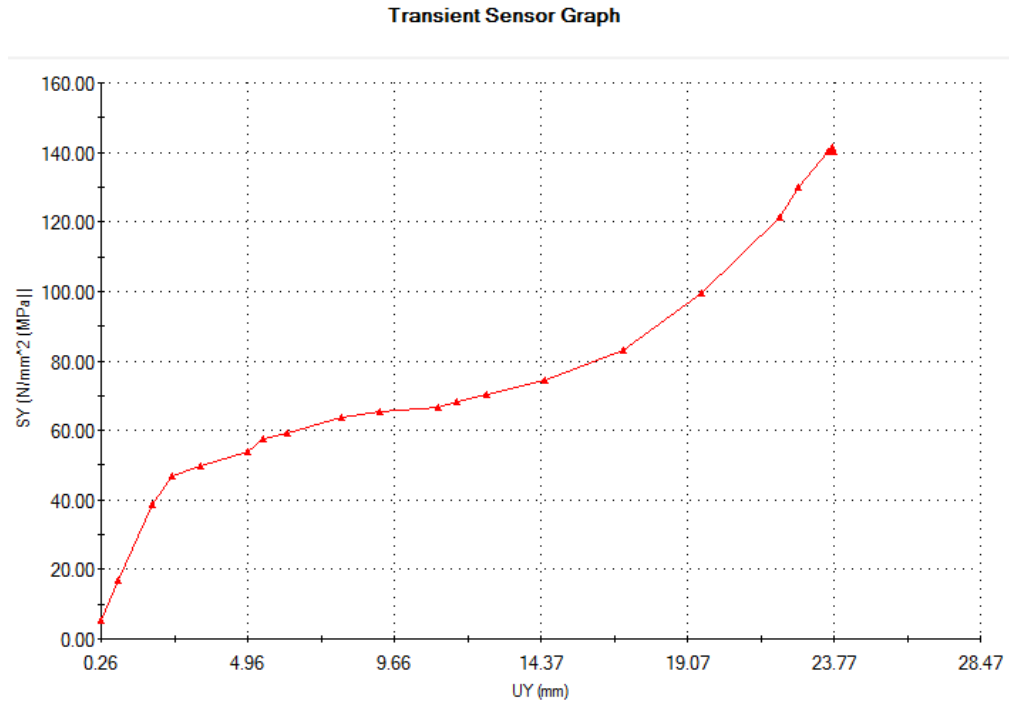
Εικόνα 80: Επιλογή στηρίξεων για την αυξητική δομή (runflat), ολίσθηση στην κάτω επιφάνεια και γεωμετρία αναφοράς στην επάνω.

Η Διακριτοποίηση θα είναι με καμπυλωτό και αραιό πλέγμα όπως και στις άλλες δομές.

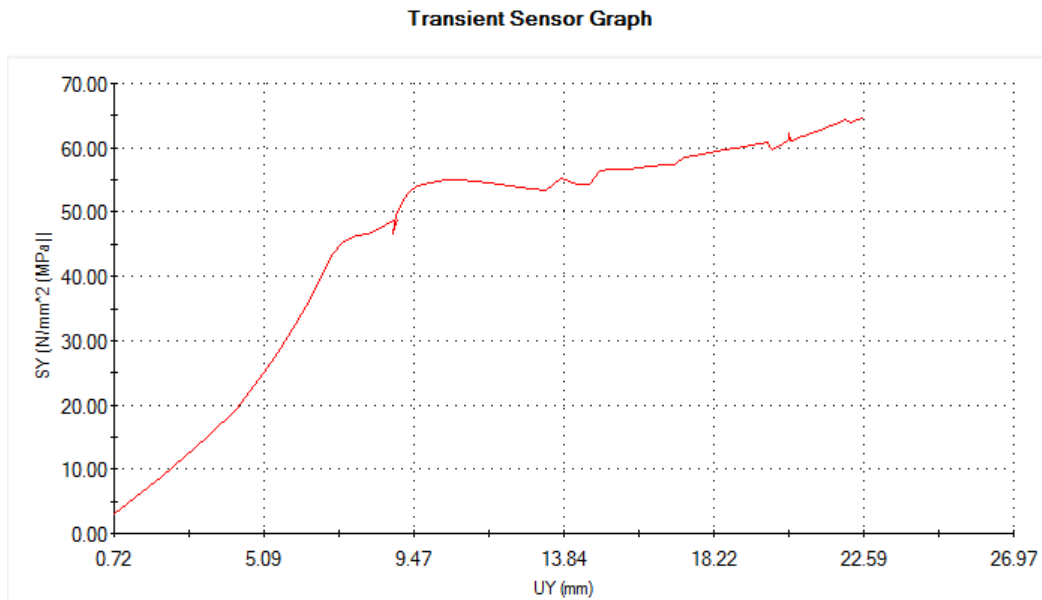


Εικόνα 81: Διακριτοποίηση μοντέλου.

Έχοντας τρέξει την ανάλυση θα προκύψουν τα παρακάτω διαγράμματα για την ανάλυση στον άξονα ψ , για εφελκυστικές και θλιπτικές καταπονήσεις.

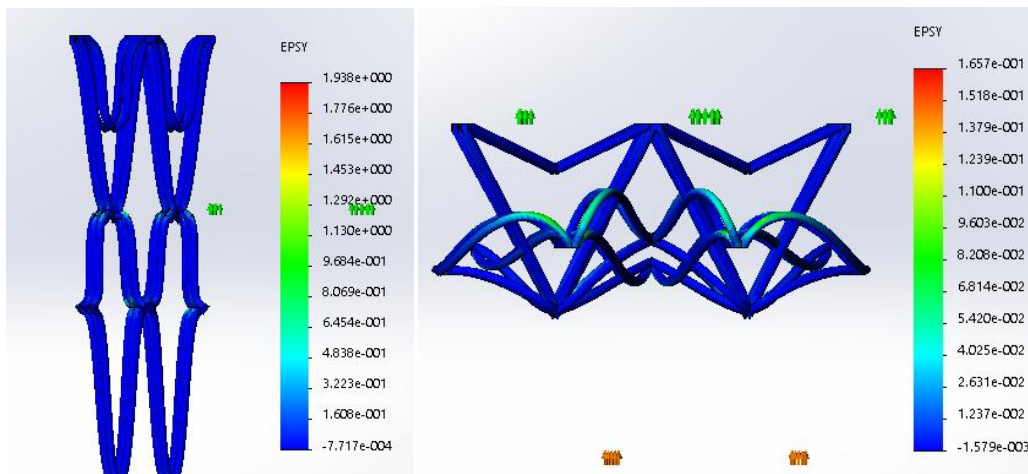


Σχήμα 82: Διάγραμμα τάσης - μετατόπισης για εφελκυσμό με μετατόπιση 25mm στον άξονα ψ.



Σχήμα 83: Διάγραμμα τάσης - μετατόπισης για θλίψη με μετατόπιση 30mm στον άξονα ψ.

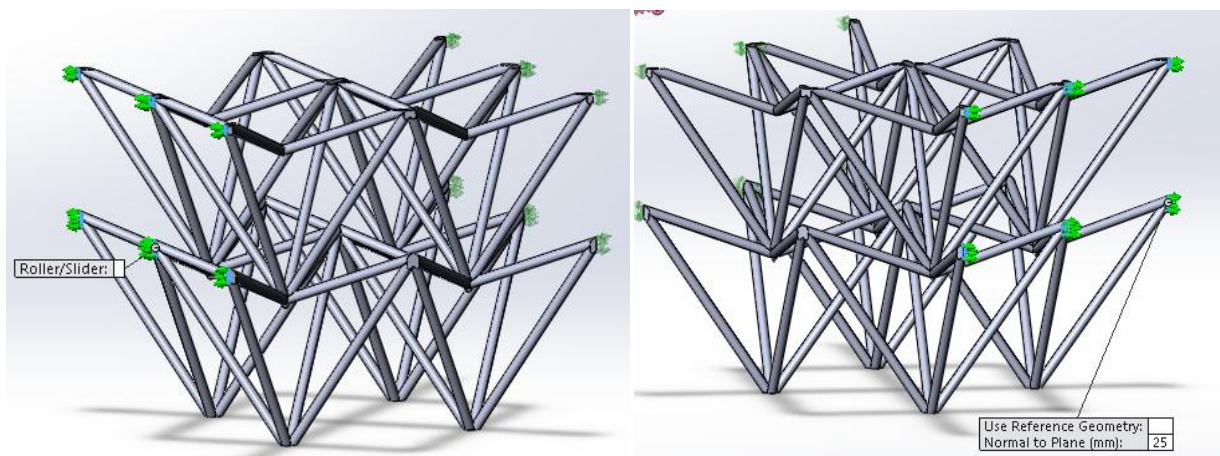
Στις παρακάτω εικόνες βλέπουμε τη συμπεριφορά της δομής στην παραμόρφωση από την ανάλυση που κάναμε.



Εικόνα 84: Αποτελέσματα παραμόρφωσης για εφελκυσμό και θλίψη στον άξονα ψ για την αυξητική δομή (run flat).

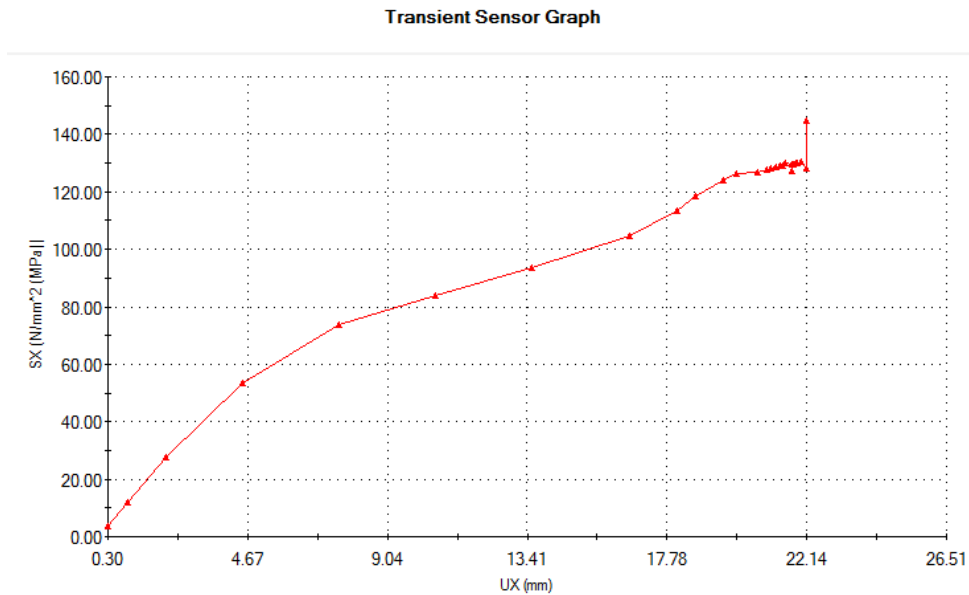
Άξονας χ

Κάνουμε τις ίδιες εργασίες για τον άξονα χ , επιλέγοντας όμως τις επιφάνειες στηρίξεων για τον χ άξονα. Η διακριτοποίηση επιλέγεται η ίδια.

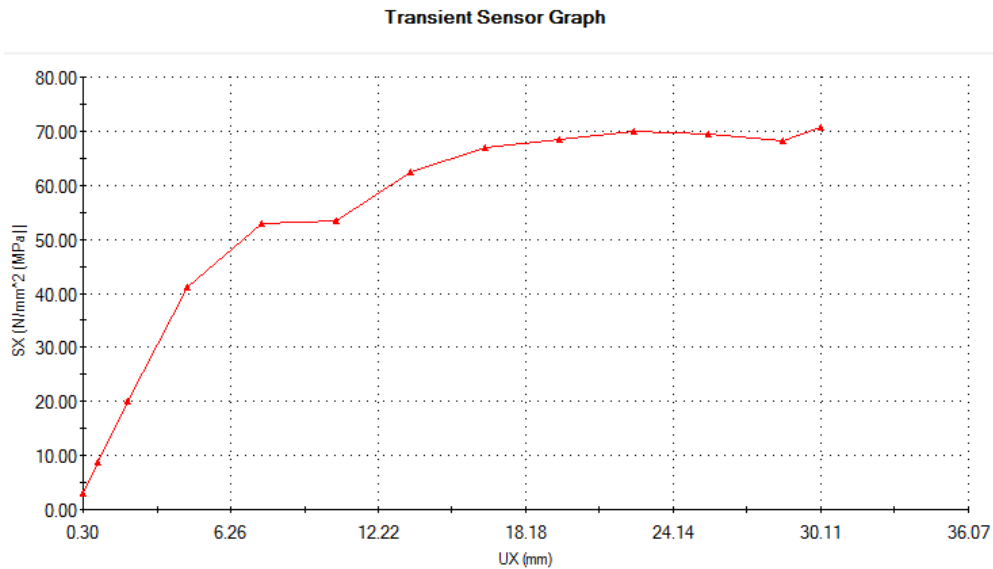


Εικόνα 85: Επιλογή στηρίξεων για τον άξονα χ στη αυξητική δομή (run flat), ολίσθηση στην αριστερή μεριά ενώ γεωμετρία αναφοράς στην δεξιά (μετατόπιση 30mm).

Παρακάτω βλέπουμε τα διαγράμματα τάσης - μετατόπισης προέκυψαν από την ανάλυση της δομής για τον άξονα χ για μετατόπιση 30 mm εφελκυστικά και 30mm θλιπτικά.

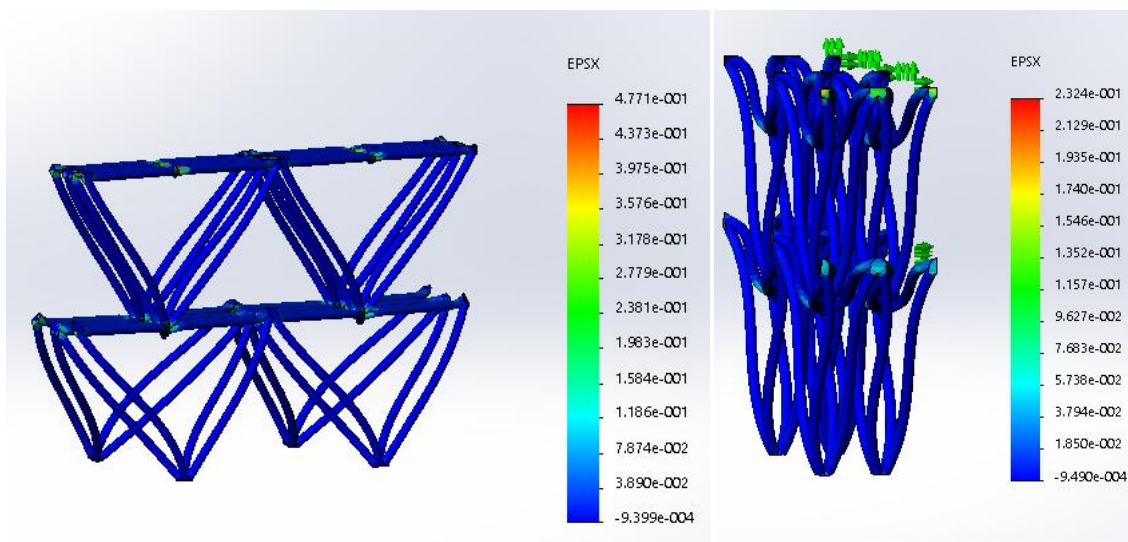


Σχήμα 86: Διάγραμμα τάσης - μετατόπισης για εφελκυσμό με μετατόπιση 30mm στον άξονα χ.



Σχήμα 87: Διάγραμμα τάσης - μετατόπισης για θλίψη με μετατόπιση 30mm στον άξονα χ.

Στις παρακάτω εικόνες βλέπουμε τη συμπεριφορά της δομής στην παραμόρφωση από την ανάλυση που κάναμε.

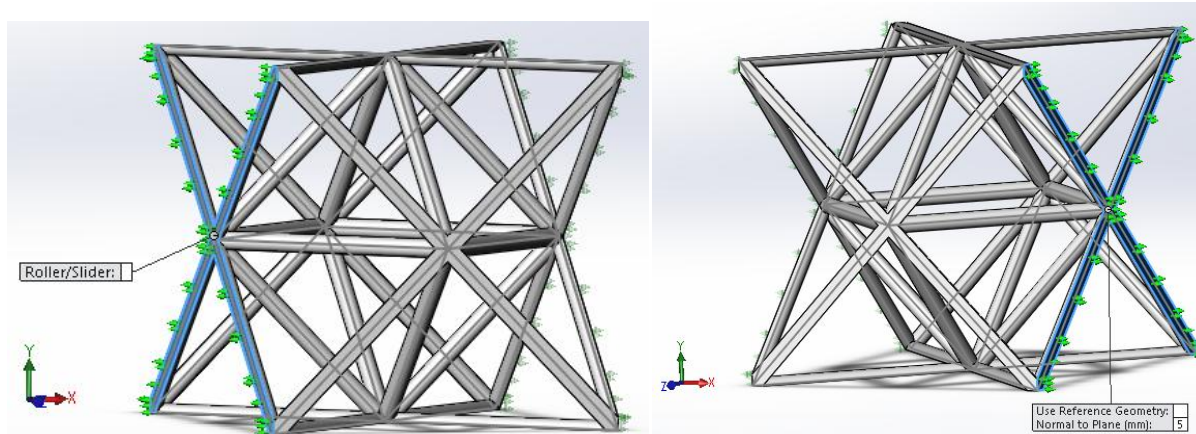


Εικόνα 89: Αποτελέσματα παραμόρφωσης για εφελκυσμό και θλίψη στον άξονα x για την αυξητική δομή (run flat).

6.2.3. Οκταεδρική Δομή (Octet)

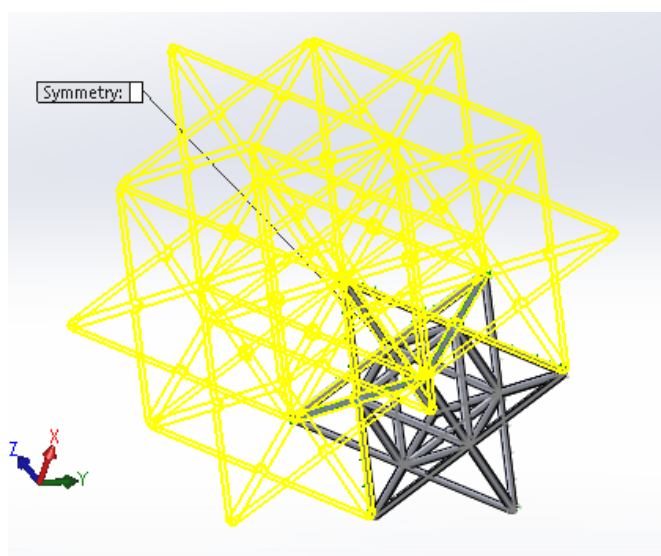
Στην οκταεδρική δομή η ρύθμιση των παραμέτρων και των χαρακτηριστικών γίνεται ακριβώς όπως και στην επαναεισερχόμενη αυξητική δομή (re-entrant). Επιλέγουμε το υλικό εφαρμογής (ABS), τις στηρίξεις και τη διακριτοποίηση. Στη δομή αυτή δεν θα χρειαστεί να γίνει ανάλυση σε παραπάνω από έναν άξονα διότι είναι συμμετρική σε όλους τους άξονες. Επίσης θα γίνει και δεύτερη ανάλυση με συμμετρικές στηρίξεις αφού θα εξεταστεί μόνο η μοναδιαία κυψελίδα. Η γεωμετρία αναφοράς θα ρυθμιστεί να μετατοπιστεί στα 5 mm αφού δεν καταφέραμε για μεγαλύτερη μετατόπιση.

Επομένως, επιλέγοντας τις στηρίξεις έχουμε :



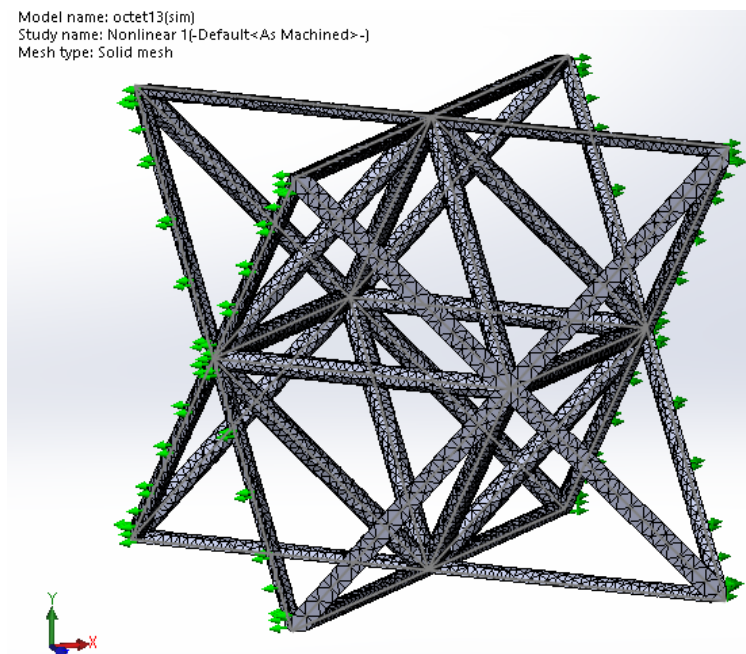
Εικόνα 90: Επιλογή στηρίξεων στην οκταεδρική δομή, αριστερά έχουμε ολίσθηση ενώ δεξιά γεωμετρία αναφοράς στα 5mm.

Οι συμμετρικές στηρίξεις γίνονται και αυτές όπως στην επαναεισερχόμενη δομή (re-entrant). Η ανάλυση των συμμετρικών στηρίξεων έγινε στον άξονα ψ .



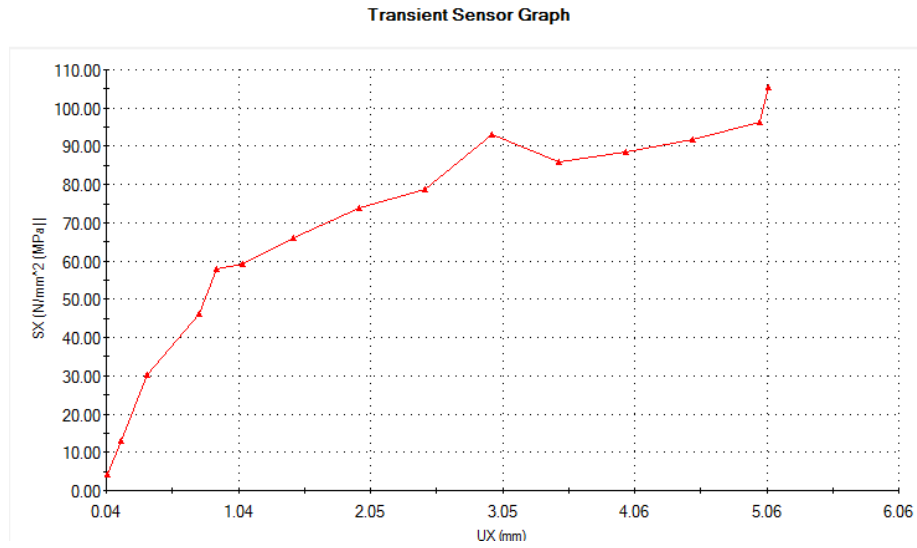
Εικόνα 91: Επιλογή συμμετρικών στηρίξεων για τον άξονα ψ για την οκταεδρική δομή.

Η Διακριτοποίηση γίνεται όπως όλες τις άλλες δομες, δηλαδή καμπυλοτή με αραιό πλέγμα. Μπορούμε να τη δούμε και στην παρακάτω εικόνα.

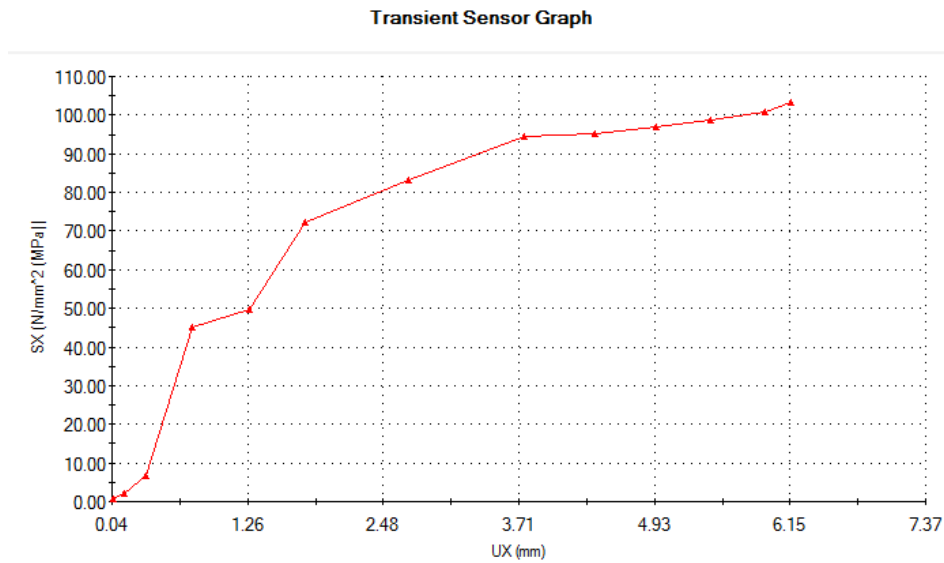


Εικόνα 92: Διακριτοποίηση μοντέλου.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση με κανονικές στηρίξεις σε σύγκριση με τις συμμετρικές στηρίξεις είναι παρόμοιες. Η δομή καταπονθήθηκε όπως και κάθε δομή σε εφελκυσμό αλλά και σε θλίψη. Επομένως ως αποτέλεσμα έχουμε τα παρακάτω διαγράμματα τάσης - μετατόπισης.

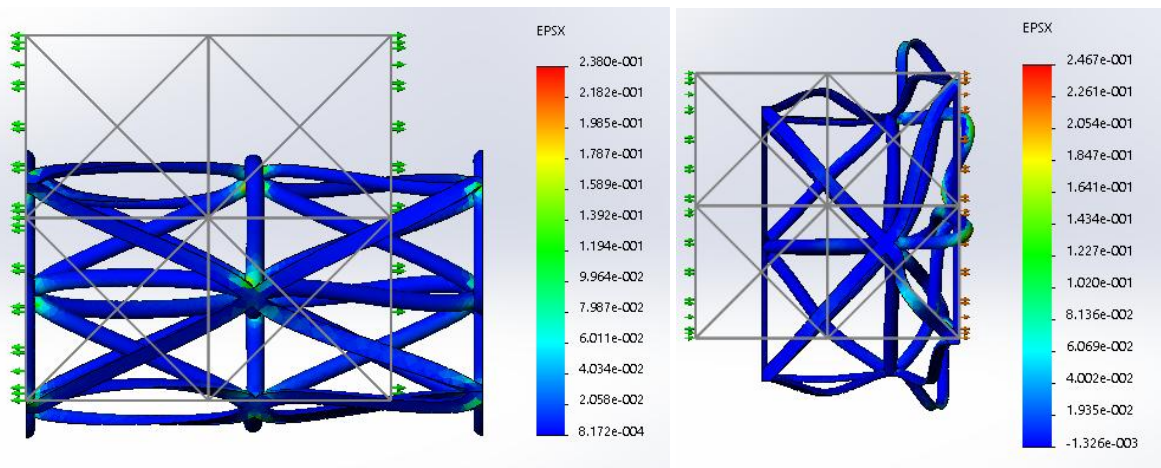


Σχήμα 92: Διάγραμμα τάσης - μετατόπισης για εφελκυσμό με μετατόπιση 5mm στον άξονα χ.



Σχήμα 93: Διάγραμμα τάσης - μετατόπισης για θλίψη με μετατόπιση 5mm στον άξονα χ.

Στις παρακάτω εικόνες βλέπουμε τη συμπεριφορά της οκταεδρικής δομής στην παραμόρφωση από την ανάλυση που κάναμε.



Εικόνα 94: Αποτελέσματα παραμόρφωσης για εφελκυσμό και θλίψη στον άξονα x για την οκταεδρική δομή (octet).

6.2.4 Εξαγωνική Δομή Κυψέλης (Honeycomb structure)

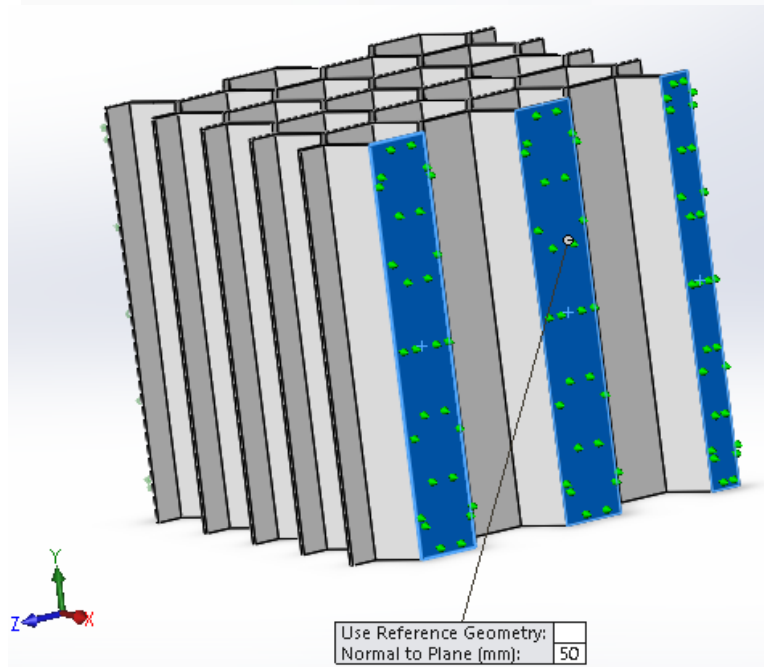
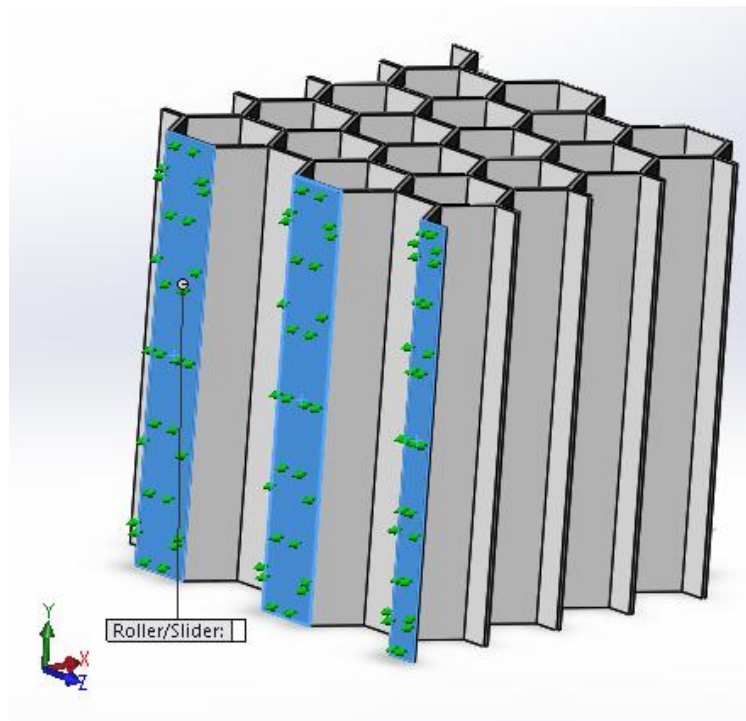
Η εξαγωνική δομή κυψέλης, όπως την έχουμε παρουσιάσει και στο τέταρτο κεφάλαιο μοιάζει με την κηρήθρα της μέλισσας. Για τον λόγο το ότι δεν υπάρχει μοναδιαία κυψελίδα όπως τις άλλες δομές θα πρέπει να εξετάσουμε όλο το μοντέλο. Η ανάλυση θα γίνει για τον άξονα x και για τον άξονα z της δομής.

Αρχίζοντας, όπως σε κάθε δομή, μία νέα μελέτη ρυθμίζοντας παραμέτρους και χαρακτηριστικά. Το υλικό που εφαρμόζουμε είναι το ίδιο (ABS). Στη Δομή αυτή όπως είπαμε εξετάζουμε όλο το μοντέλο, επομένως δεν θα χρειαστεί να κάνουμε δεύτερη μελέτη για συμμετρικές στηρίξεις. Οι στηρίξεις θα είναι απλές με ολίσθηση στη μία επιφάνεια και γεωμετρία αναφοράς στην άλλη για να την μετατοπίσουμε.

Όπως σε όλες τις προσομοιώσεις θα γίνει ανάλυση για καταπόνηση σε εφελκυσμό αλλά και για θλίψη.

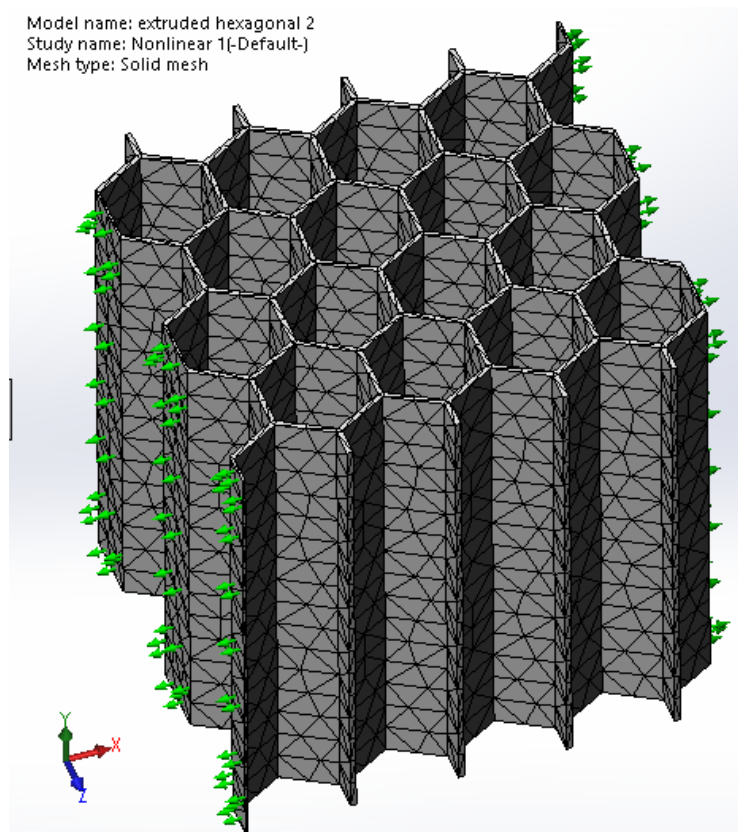
Άξονας x

Επιλέγοντας τις στηρίξεις για τον άξονα x , βάζουμε ολίσθηση στην αριστερή πλευρά και γεωμετρία αναφοράς για να μετατοπιστεί στα 50mm από την δεξιά.



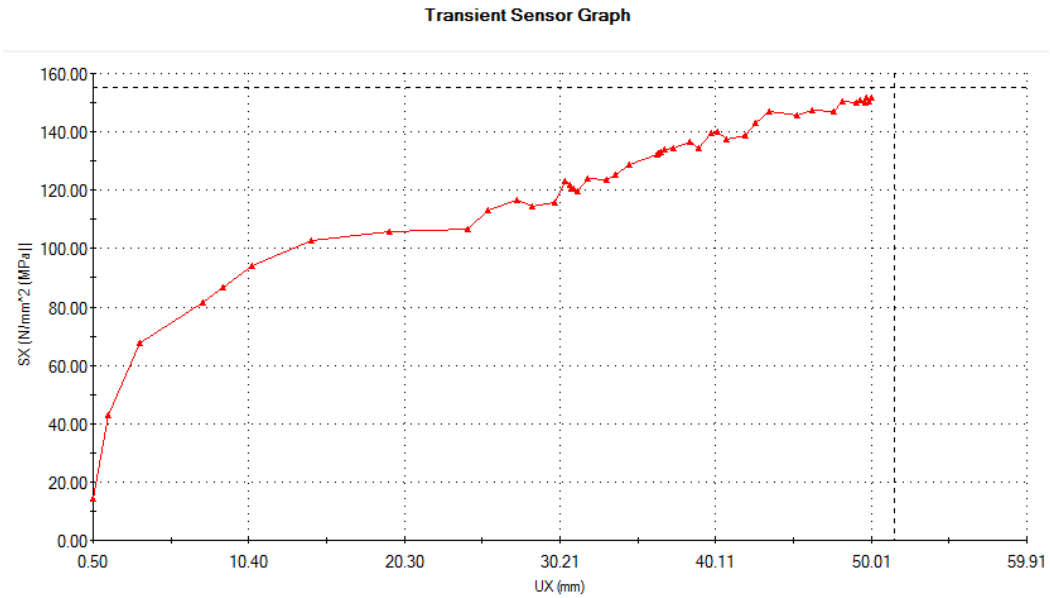
Εικόνα 95: Επιλογή στηρίξεων στην εξαγωνική δομή, αριστερά έχουμε ολίσθηση ενώ δεξιά γεωμετρία αναφοράς για μετατόπιση 50mm.

Επειδή το μοντέλο μας είναι πιο μεγάλο σε σχέση με τις υπόλοιπες δομές που εξετάζουμε, η διακριτοποίηση δεν θα είναι ίδια. Θα πρέπει να την κάνουμε αρκετά πιο πυκνή. Επομένως επιλέγουμε καμπυλωτή τριεδρική με σχετικά πυκνή πλεγματοποίηση.

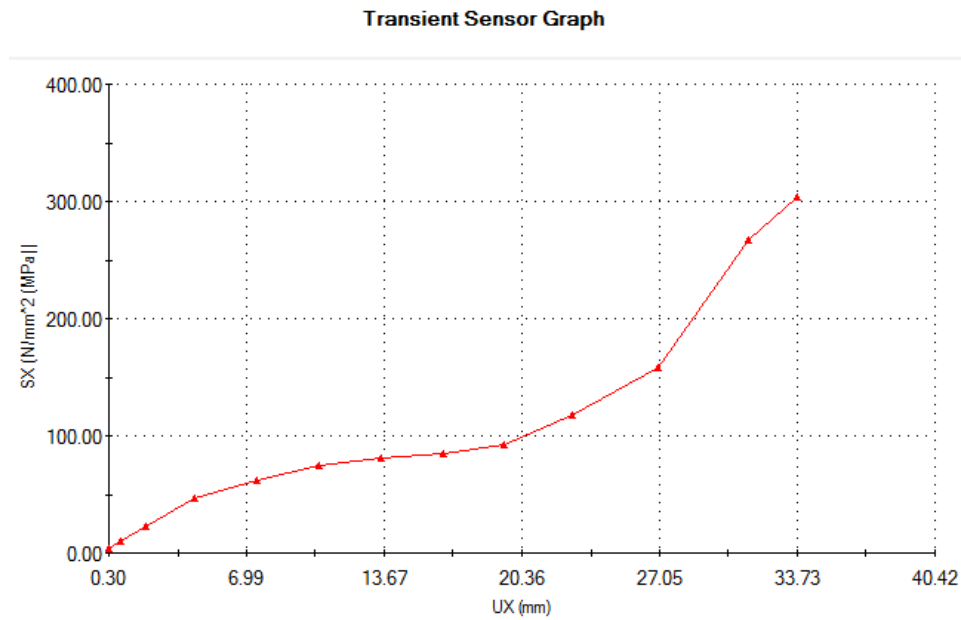


Εικόνα 96: Διακριτοποίηση μοντέλου.

Τρέχοντας την ανάλυση παίρνουμε τα παρακάτω διαγράμματα τάσης-μετατόπισης για εφελκυστική και θλιπτική καταπόνηση στον άξονα χ.

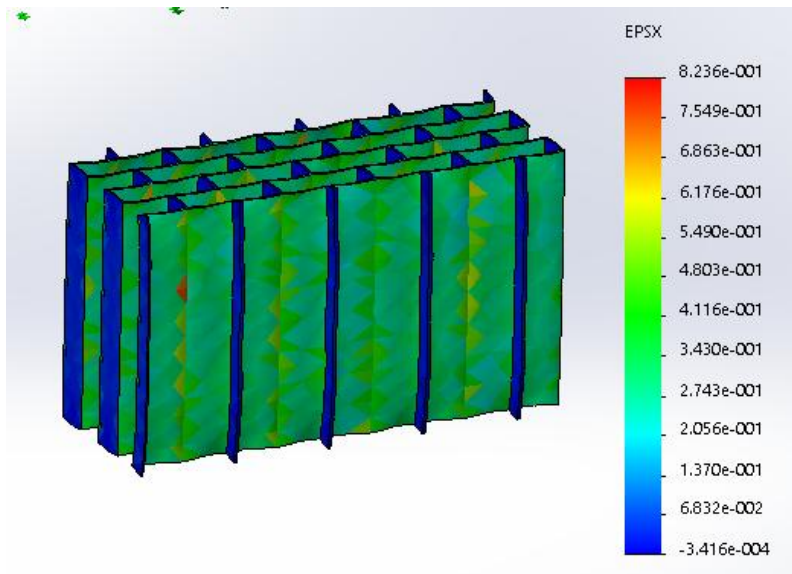


Σχήμα 97: Διάγραμμα τάσης - μετατόπισης για εφελκυσμό με μετατόπιση 50mm στον άξονα χ.

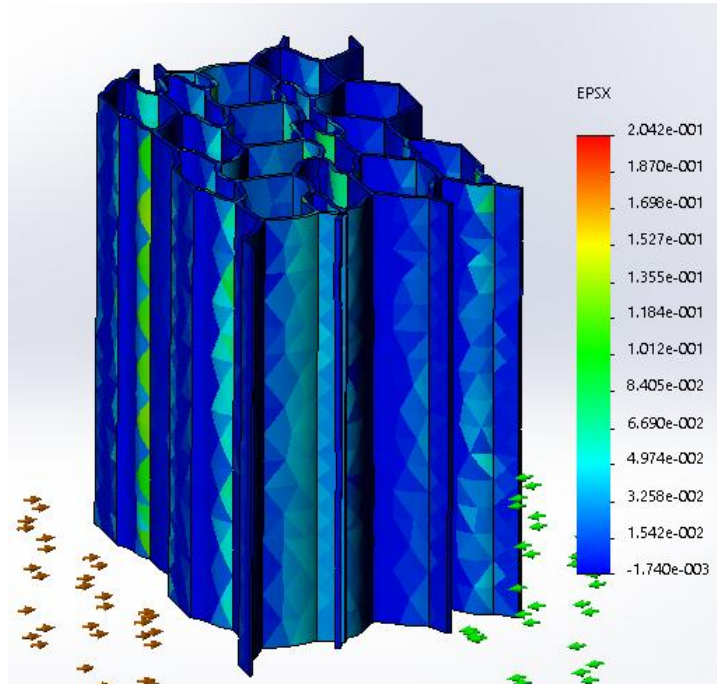


Σχήμα 98: Διάγραμμα τάσης - μετατόπισης για θλίψη με μετατόπιση 30mm στον άξονα χ.

Στις παρακάτω εικόνες μπορούμε να παρατηρήσουμε την παραμόρφωση που δέχεται η εξαγωνική δομή υπό την καταπόνηση εφελκυσμού στα 50mm και θλίψης στα 30mm.



Εικόνα 99: Παραμόρφωση Εξαγωνικής δομής μετατοπισμένη εφελκυστικά στα 50mm.

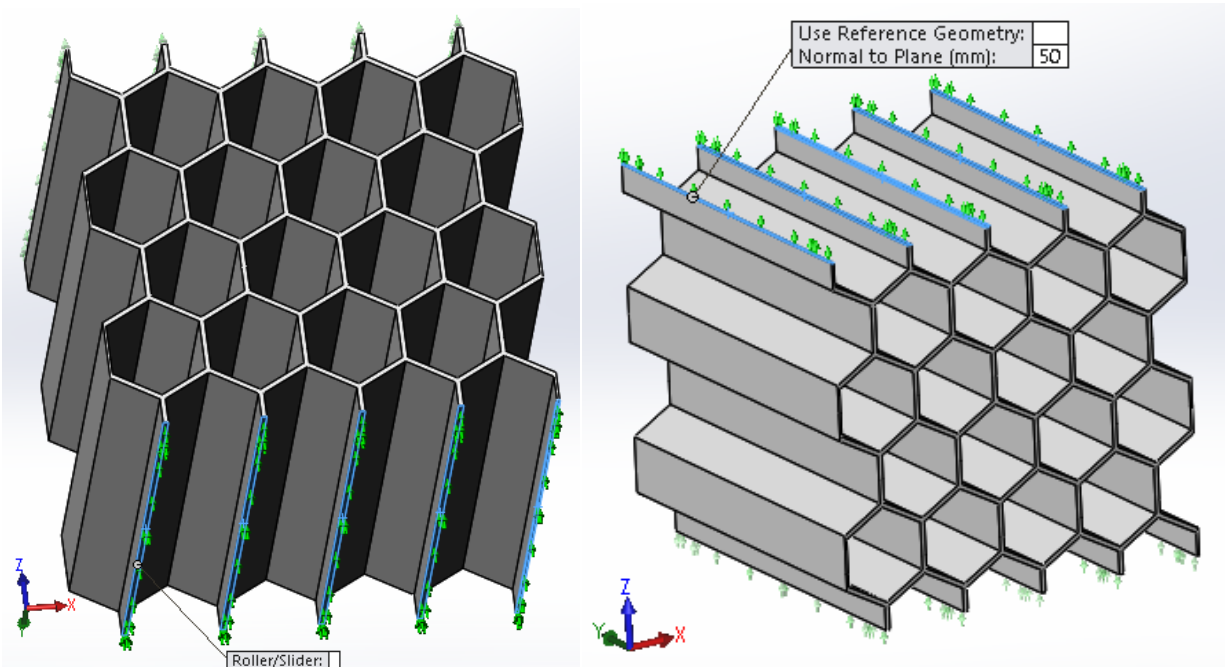


Εικόνα 100: Παραμόρφωση Εξαγωνικής δομής μετατοπισμένη θλιπτικά στα 30mm

Άξονας z

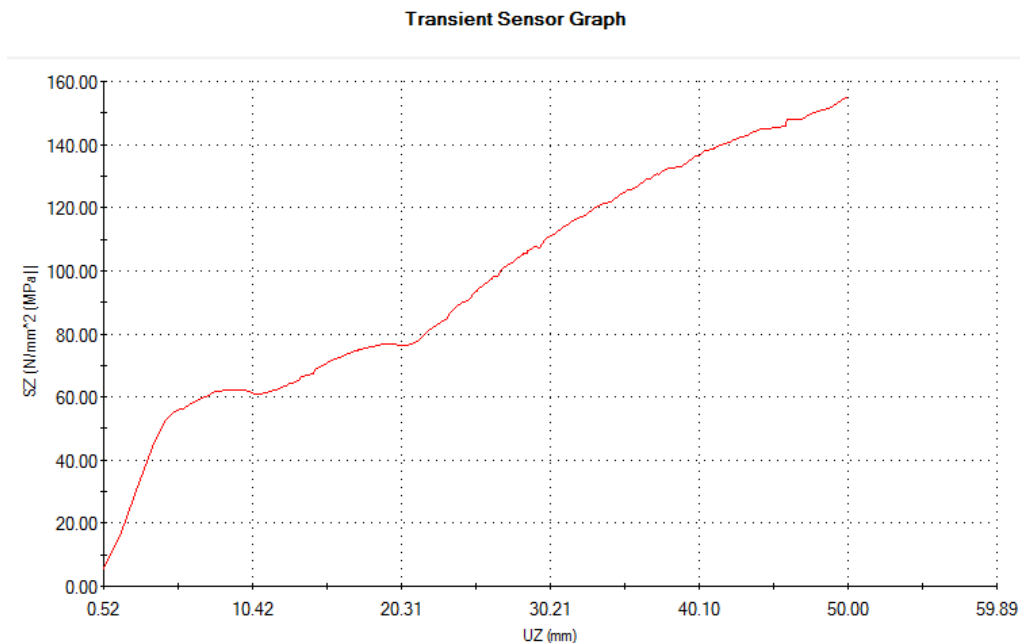
Δημιουργούμε νέα μελέτη για τον άξονα z και κάνουμε τις ίδιες εργασίες όπως και για τον άξονα x. Η διακριτοποίηση της δομής και το υλικό θα είναι ίδια, το μόνο που θα αλλάξει θα είναι οι στηρίξεις για τον άξονα z.

Επιλέγουμε ολίσθηση για την κάτω πλευρά και για την πάνω γεωμετρία αναφοράς να μετατοπιστεί 50 mm για εφελκυσμό και 30mm για θλίψη αντίστοιχα.

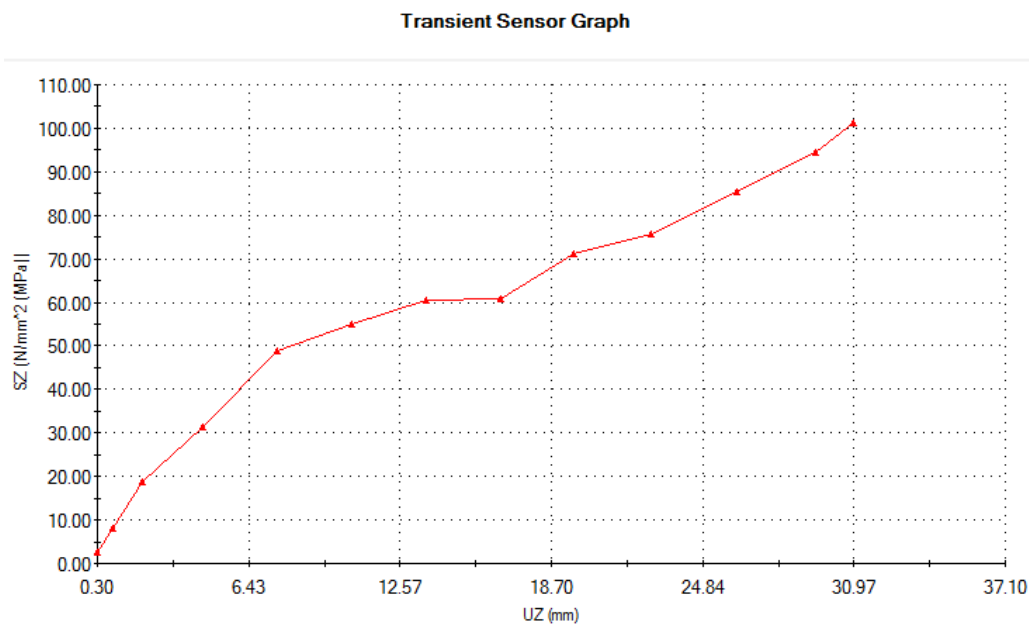


Εικόνα 101: Επιλογή στηρίξεων στην εξαγωνική δομή.

Τρέχοντας την ανάλυση παίρνουμε τα παρακάτω διαγράμματα τάσης-μετατόπισης για εφελκυστική και θλιπτική καταπόνηση για τον άξονα z του μοντέλου.

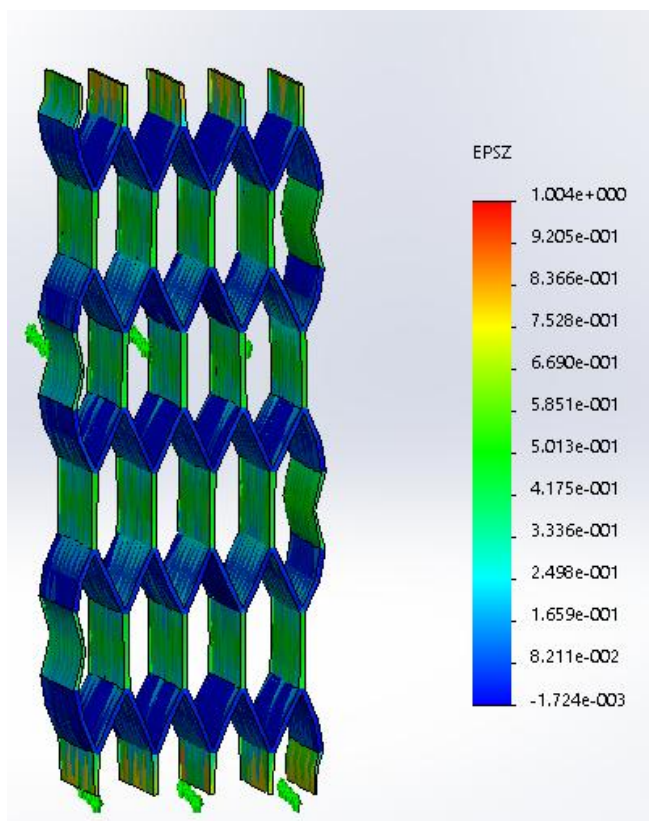


Σχήμα 102: Διάγραμμα τάσης - μετατόπισης για εφελκυσμό με μετατόπιση 50mm στον άξονα z.

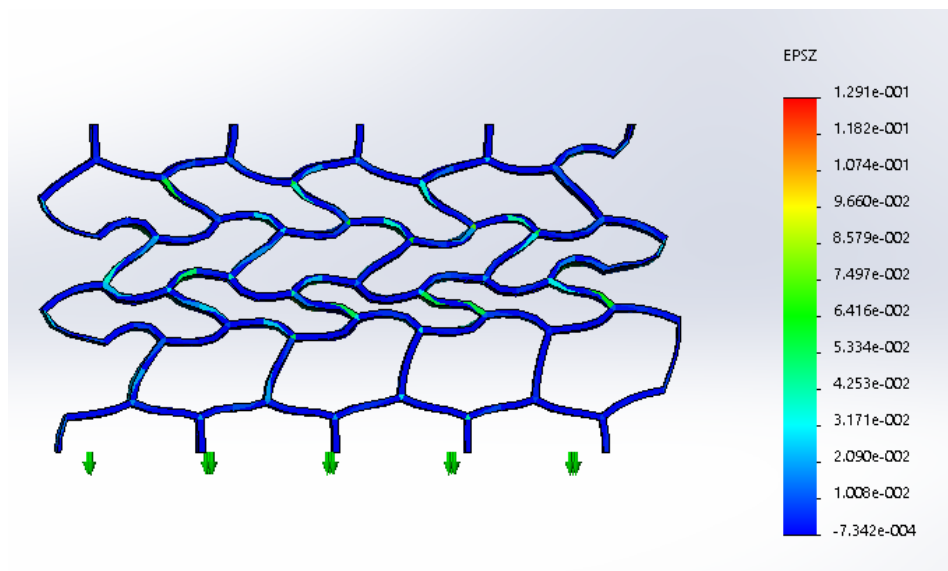


Σχήμα 103: Διάγραμμα τάσης - μετατόπισης για θλίψη με μετατόπιση 30mm στον άξονα z.

Επίσης παρατηρήσουμε την παραμόρφωση που δέχεται η εξαγωνική δομή στον άξονα z υπό την καταπόνηση εφελκυσμού στα 50mm και θλίψης στα 30mm.



Εικόνα 104: Παραμόρφωση Εξαγωνικής δομής μετατοπισμένη εφελκυστικά στα 50mm.



Εικόνα 105: Παραμόρφωση Εξαγωνικής δομής μετατοπισμένη θλιπτικά στα 30mm.

7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

7.1 Διαγράμματα - Σχολιασμός Διαγραμμάτων

Αντλώντας πληροφορίες από τα διαγράμματα των αναλύσεων μπορούμε να δούμε καλύτερα τη συμπεριφορά των τρισδιάστατων δομών. Για να δούμε τη συμπεριφορά αυτή, είναι σημαντικό να κατασκευάσουμε τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης κάθε δομής. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει στον άξονα ψ να έχουμε αποτυπώσει τη πραγματική τάση (normal stress Mpa), η οποία καταγράφεται από την προσομοίωση στο διάγραμμα τάσης – μετατόπισης, και τη πραγματική παραμόρφωση (normal strain) στον άξονα χ της καμπύλης. Επειδή δεν υπάρχει επιλογή από την καταγραφή δεδομένων της προσομοίωσης στο πρόγραμμα να παρουσιάζει σε διάγραμμα τη πραγματική παραμόρφωση, θα πρέπει να την υπολογίσουμε εμείς.

Σε κάθε διάγραμμα τάσης – μετατόπισης που έχουμε σαν αποτέλεσμα, παίρνουμε ζευγάρια τιμών για κάθε μετατόπιση, την τάση που την αντιστοιχεί. Γνωρίζοντας την μετατόπιση υπολογίζουμε την παραμόρφωση. Η παραμόρφωση υπολογίζεται όπως έχουμε εξηγήσει στα παραπάνω κεφάλαια από την παρακάτω σχέση:

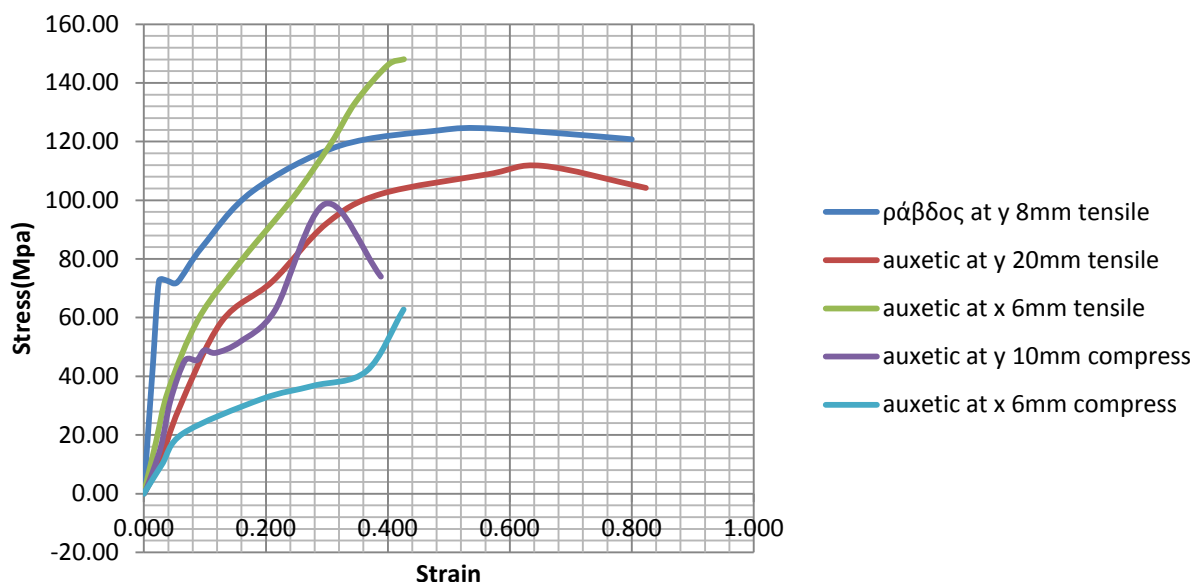
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

Θυμίζουμε πως το l είναι το αρχικό μήκος της ράβδου και Δl η μετατόπιση που δέχθηκε η δομή.

Έχοντας υπολογίσει τη παραμόρφωση για κάθε δομή πλέον μπορούμε να δημιουργήσουμε το διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης για κάθε δομή. Σε κάθε διάγραμμα παρουσιάζεται και το διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης της ράβδου, που έχουμε υπολογίσει στην προσομοίωση της ράβδου, για σύγκριση με τα διαγράμματα των τρισδιάστατων δομών που σχεδιάστηκαν.

Επαναισερχομενη δομή (Re-entrant)

Παρακάτω δημιουργήσαμε τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης για την επαναισερχόμενη (re-entrant) αυξητική δομή σε κάθε περίπτωση ανάλυσης. Από τα δεξιά του διαγράμματος βλέπουμε την περιγραφή της καμπύλης στα χιλιοστά που έχουμε μετατοπίσει τη δομή μας.



Σχήμα 106: Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης για την αυξητική δομή (re-entrant) σε εφελκυσμό και θλίψη σε σύγκριση με τη ράβδο.

Σημαντική αναφορά μπορούμε να κάνουμε στο μέτρο ελαστικότητας, που όπως φαίνεται σε όλες τις περιπτώσεις καταφέραμε μέσω της δομής να το ελαχιστοποιήσουμε σε σύγκριση με της ράβδου. Σαν αποτέλεσμα του μέτρου ελαστικότητας είναι να καταφέρουμε να δώσουμε ευκαμψία στη δομή μας. Το μέτρο ελαστικότητας προκύπτει από τον τύπο υπολογισμού της τάσης $\sigma = E \times \varepsilon$ επομένως για το μέτρο ελαστικότητας θα ισχύει $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$. Καταφέροντας να αυξήσουμε την παραμόρφωση μειώνεται και το μέτρο ελαστικότητας. Όσο πιο μικρό το μέτρο ελαστικότητας, τόσο πιο εύκαμπτο το υλικό μας.

Στην προσπάθεια εφέλκησης στον άξονα χ της δομής, βλέπουμε την καμπύλη να κατευθύνετε σχεδόν γραμμικά φτάνοντας στο όριο θραύσης στα 150 Mpa κατά πού μεγαλύτερο της ράβδου. Ενώ στον άξονα ψ της δομής μπορεί να μην καταφέραμε να αυξήσουμε το όριο θραύσης, αλλά καταφέραμε να επιμηκύνουμε την παραμόρφωση στη γραμμική περιοχή.

Στην θλίψη της δομής προέκυψε μικρότερη παραμόρφωση σε σχέση με τον εφελκυσμό αλλά έχουμε και πάλι μεγαλύτερη της ράβδου. Το όριο διαρροής, δηλαδή στο στάδιο που ξεκινάει να παρουσιάζει λαιμό μειώθηκε σημαντικά και ακόμα περισσότερο στη θλίψη του άξονα χ της δομής.

Συμπέρασμα από την προσομοίωση είναι ότι καταφέραμε να δώσουμε στη αυξητική δομή (re-entrant) εύκαμπτη συμπεριφορά σε σύγκριση με τη ράβδο καταφέροντας να αυξήσουμε τη παραμόρφωση στο όριο διαρροής στη γραμμική περιοχή, με λίγα λόγια καθυστερήσαμε τη δημιουργία λαιμού.

Ενδεικτικά θα υπολογίσουμε και το λόγο Poisson για την αυξητική δομή re-entrant από την παραμόρφωση που προέκυψε. Επομένως για μετατόπιση στον άξονα χ της δομής μελετάμε το πρώτο βήμα της ανάλυσης.

$$v_{xz} = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} = -\frac{U_z/l_z}{U_x/l_x} = -\frac{0.00636/25.86}{0.01/14.14} = -\frac{0.000246}{0.000707} = -0.42$$

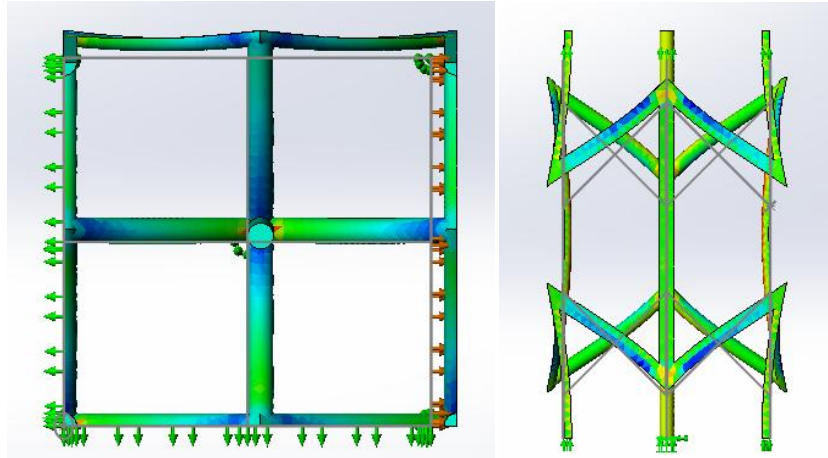
Ενώ από την ανάλυση για τον άξονα ψ της δομής θα έχουμε:

$$v_{yx} = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} = -\frac{U_x/l_x}{U_y/l_y} = -\frac{0.0046/14.14}{0.01/25.86} = -\frac{0.000325}{0.000387} = -0.84$$

Όπου U_x έχουμε τη μετατόπιση στη γραμμική περιοχή του πρώτου βήματος για τον άξονα χ της δομής και l_x το αρχικό μήκος της δομής. Ενώ όπου U_y έχουμε τη μετατόπιση στη γραμμική περιοχή του πρώτου βήματος για τον άξονα ψ της δομής και l_y το αρχικό μήκος της δομής. Αντίστοιχα έχουμε και για U_z, l_z .

Επομένως από την ανάλυση προκύπτει αρνητικός λόγος Poisson που χαρακτηρίζει καλύτερη συμπεριφορά από μία ράβδο με ABS υλικό με λόγο 0.394. Ο αρνητικός λόγος Poisson μας εξηγεί πως όταν εφελκούμε τη δομή μας στον άξονα χ δίνουμε όγκο στους άλλους άξονες. Το ίδιο θα συμβεί σε όποιον άξονα και αν εφελκυστεί.

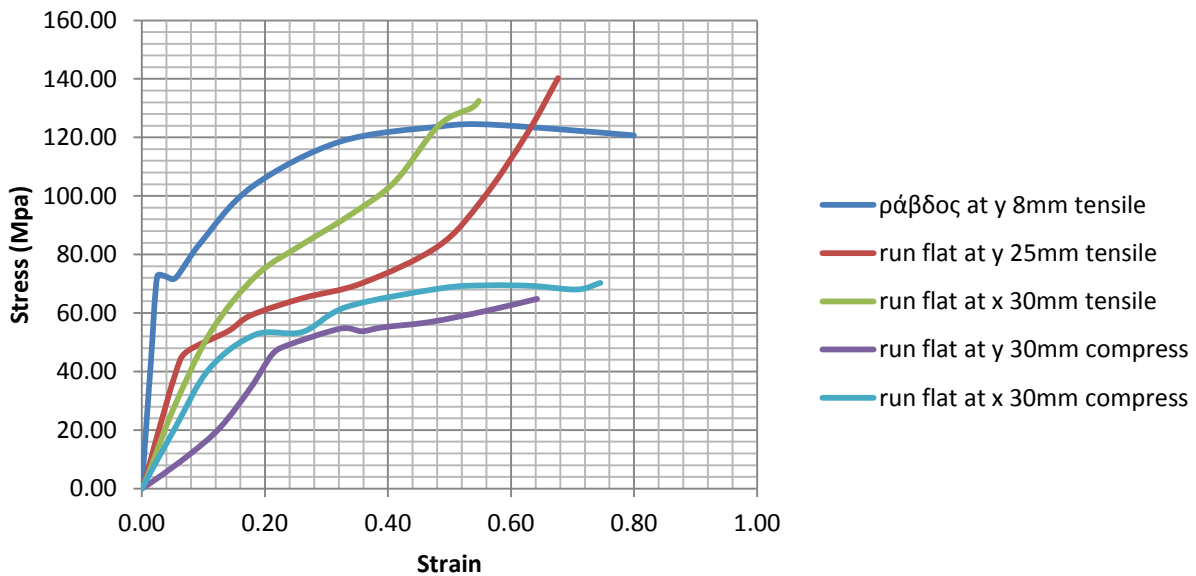
Στη παρακάτω εικόνα μπορούμε να δούμε στη δομή πως έχει πάρει όγκο στους αντίστοιχους άξονες.



Εικόνα 107: Κατά τον εφελκυσμό της δομής βλέπουμε τους υπόλοιπους άξονες να παίρνουν όγκο πράγμα που δικαιολογεί τον αρνητικό λόγο Poisson.

Αυξητική δομή (Run flat)

Κατασκευάζοντας και τις καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης και για την αυξητική δομή (run flat), παίρνουμε τα αποτελέσματα που σχολιάζουμε παρακάτω. Δεξιά του διαγράμματος περιγράφουμε τις περιπτώσεις της κάθε καμπύλης.



Σχήμα 108: Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης για την αυξητική δομή (runflat) σε εφελκυσμό και θλίψη σε σύγκριση με τη ράβδο.

Παρόμοια με την αυξητική δομή re-entrant, βλέπουμε πως καταφέραμε να ελαχιστοποιήσουμε και στην αυξητική δομή run flat το μέτρο ελαστικότητας. Με αρκετά μεγαλύτερη παραμόρφωση στο όριο διαρροής στη γραμμική περιοχή καταφέραμε εύκαμπτη συμπεριφορά. Επίσης αυξήσαμε το όριο θραύσης με αποτέλεσμα να έχουμε μεγαλύτερη παραμόρφωση στη θραύση. Το όριο θραύσης στη ράβδο είναι όπως εξηγήσαμε στα 120 Mpa ενώ της δομής έχει ξεπεράσει τα 120 Mpa στις περιπτώσεις εφελκυσμού.

Συμπέρασμα από τις καμπύλες είναι πως καταφέρνοντας να επιμηκύνουμε την αρχή δημιουργίας λαιμού, αυξάνουμε και τη παραμόρφωση στη γραμμική περιοχή. Επομένως, όμοια και με την επαναεισερχόμενη δομή (re-entrant) και η αυξητική δομή (run flat) παρουσίασε ελαστική συμπεριφορά αντιθέτως με την ράβδο.

Υπολογίζουμε και το νόμο Poisson για την αυξητική δομή run flat από την παραμόρφωση που προέκυψε. Επομένως για μετατόπιση στον άξονα x της δομής μελετάμε το πρώτο βήμα της ανάλυσης.

$$v_{xz} = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} = -\frac{U_z/l_z}{U_x/l_x} = -\frac{-0.00773/40.46}{0.0099/40.46} = \frac{0.00019}{0.00024} = 0.79$$

Ενώ από την ανάλυση για τον άξονα ψ της δομής θα έχουμε:

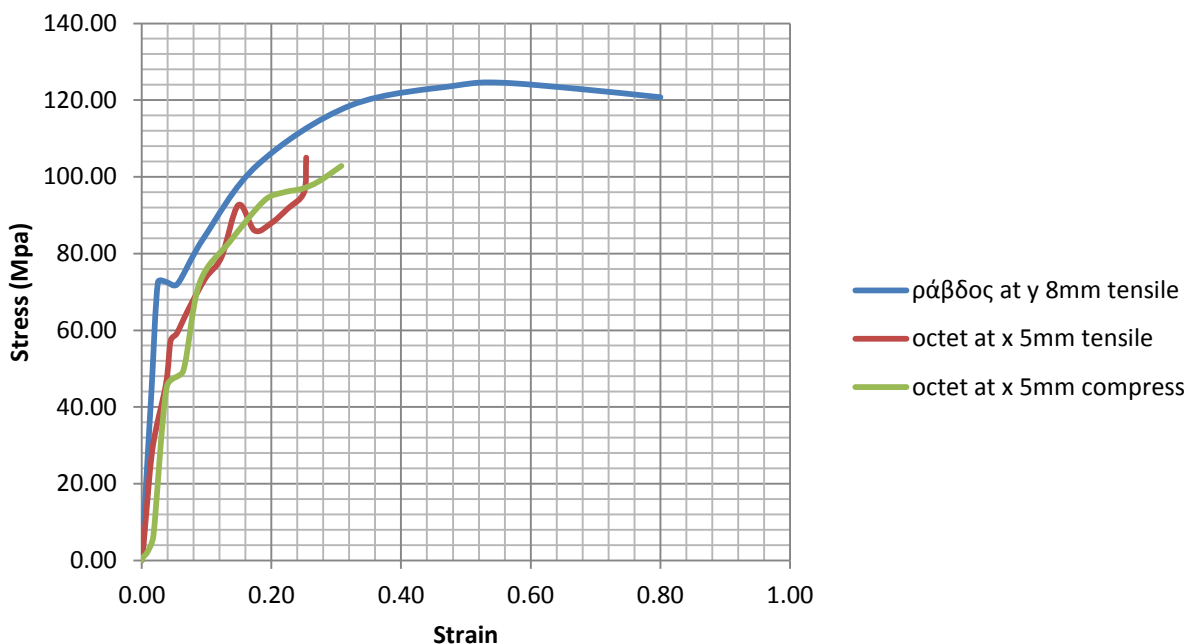
$$v_{yx} = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} = -\frac{U_x/l_x}{U_y/l_y} = -\frac{0.01094/35.22}{0.0099/40.46} = -\frac{0.000311}{0.00024} = -1.29$$

Όπου U_x έχουμε τη μετατόπιση στη γραμμική περιοχή του πρώτου βήματος για τον άξονα x της δομής και l_x το αρχικό μήκος της δομής. Ενώ όπου U_y έχουμε τη μετατόπιση στη γραμμική περιοχή του πρώτου βήματος για τον άξονα ψ της δομής και l_y το αρχικό μήκος της δομής. Αντίστοιχα, όπου U_z έχουμε τη μετατόπιση στη γραμμική περιοχή του πρώτου βήματος για τον άξονα z της δομής και l_z το αρχικό μήκος της δομής αντίστοιχο άξονα.

Επομένως από την ανάλυση προκύπτει αρνητικός λόγος Poisson στον άξονα ψ της δομής, που χαρακτηρίζει καλύτερη συμπεριφορά από μία ράβδο με ABS υλικό και λόγο 0.394 κάτι που το συναντήσαμε και στην επαναεισερχόμενη δομή re-entrant. Ο αρνητικός λόγος Poisson μας εξηγεί πως όταν εφελκούμε τη δομή μας στον άξονα ψ δίνουμε όγκο στους άλλους άξονες. Στον άξονα x της δομής προκύπτει θετικός αριθμός μεγαλύτερος από 0.394 που σημαίνει μεγαλύτερη ελαστικότητα.

Οκταεδρική δομή (Octet)

Όπως και στις υπόλοιπες δομές έτσι και στην οκταεδρική δομή κατασκευάσαμε της καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης, όπως φαίνεται και στο σχήμα 109. Δεξιά του διαγράμματος περιγράφουμε τις περιπτώσεις της κάθε καμπύλης.



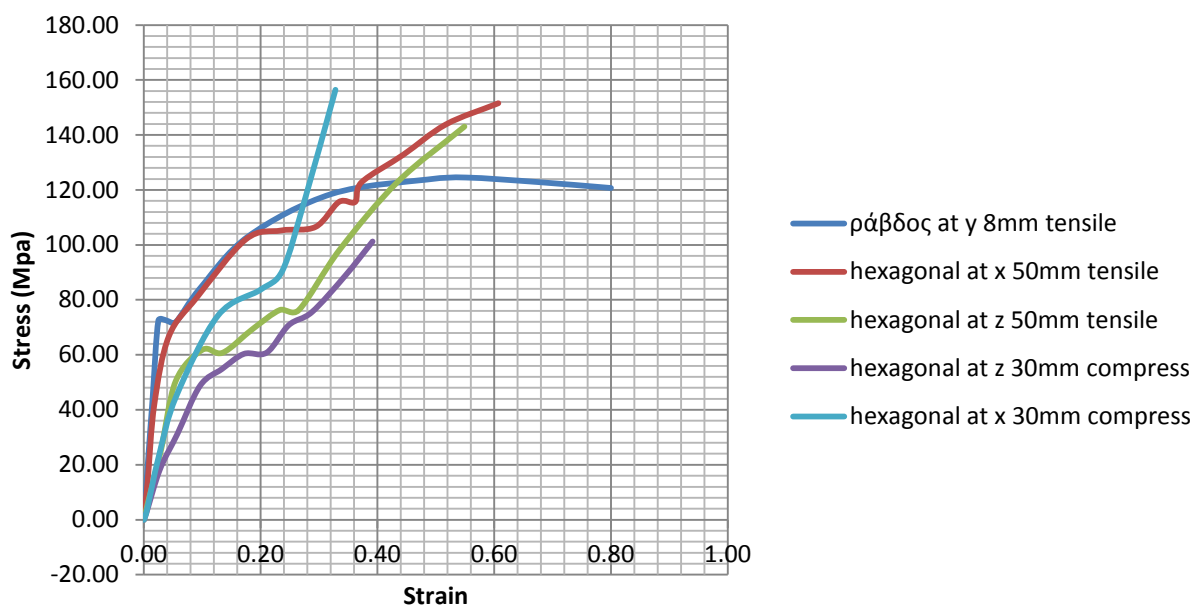
Σχήμα 109: Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης για την οκταεδρική δομή (octet) σε εφελκυσμό και θλίψη σε σύγκριση με τη ράβδο.

Στην προσομοίωση της οκταεδρικής δομής δεν καταφέραμε να μετατοπίσουμε την επιφάνεια στον άξονα χ της δομής αρκετά. Σαν αποτέλεσμα που φαίνεται και στην καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης στον εφελκυσμό και στην θλίψη η συμπεριφορά είναι σχεδόν παρόμοια με της ράβδου. Στη θλίψη καταφέραμε να ελαχιστοποιήσουμε το μέτρο ελαστικότητας ελάχιστα, αλλά όχι αρκετά.

Συμπέρασμα από την ανάλυση της οκταεδρικής δομής είναι η αδυναμία της δομής για αρκετή ελαστική συμπεριφορά. Σημειώνουμε όμως πως από τη ράβδο καταφέραμε κάποια μικρή ελαστικότητα.

Εξαγωνική Δομή (Hexagonal)

Στην εξαγωνική δομή κυψέλης, όπως περιγράψαμε και στην ανάλυση του μοντέλου, επειδή δεν αποτελείται από στοιχειώδης κύτταρα η δομή κάναμε προσομοίωση σε όλο το μοντέλο. Παρακάτω παρουσιάζονται οι καμπύλες Τάσης - Παραμόρφωσης για την εξαγωνική δομή όπως σε κάθε δομή. Στα δεξιά του διαγράμματος περιγράφονται οι περιπτώσεις ανάλυσης.



Σχήμα 110: Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης για την εξαγωνική δομή (hexagonal) σε εφελκυσμό και θλίψη σε σύγκριση με τη ράβδο.

Στον άξονα x της δομής με μετατόπιση στα 50mm στη περίπτωση εφελκυσμού, βλέπουμε ότι παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με τη ράβδο με διαφορά στην αύξηση του ορίου θραύσης στα 150 Mpa. Αντιθέτως, στις υπόλοιπες περιπτώσεις βλέπουμε να έχουμε ελαχιστοποιήσει το μέτρο ελαστικότητας και καθυστερώντας την εμφάνιση λαιμού αρκετά ώστε να επιτύχουμε εύκαμπτη συμπεριφορά. Στις καμπύλες των περιπτώσεων εφελκυσμού στον άξονα z και θλίψης στους άξονες z και x των δομών, παρατηρούμε πως φορτίζονται σχεδόν γραμμικά μέχρι το όριο θραύσης το οποίο σημαίνει πως καταφέρνουμε ευκαμπτότητα σε μεγάλο βαθμό.

Συμπέρασμα από την ανάλυση της δομής είναι η επίτευξη του στόχου μας για ελαστική συμπεριφορά στην εξαγωνική δομή σε σύγκριση με τη ράβδο. Όσο για τον εφελκυσμό στον άξονα x της δομής, μπορεί να μην καταφέραμε να ελαχιστοποιήσουμε το μέτρο ελαστικότητας αρκετά αλλά αυξήσαμε τη παραμόρφωση στο όριο θραύσης.

Ενδεικτικά για σύγκριση θα υπολογίσουμε το λόγο Poisson και για την εξαγωνική δομή κυψέλης από την παραμόρφωση που προέκυψε. Επομένως για μετατόπιση στον άξονα x της δομής μελετάμε το πρώτο βήμα της ανάλυσης.

$$v_{xz} = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} = -\frac{U_z/l_z}{U_x/l_x} = -\frac{-0.004502/79.33}{0.01/82.44} = \frac{0.0000567}{0.000121} = 0.47$$

Ενώ από την ανάλυση για τον άξονα z της δομής θα έχουμε:

$$v_{zx} = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{U_x/l_x}{U_z/l_z} = -\frac{-0.00703/82.44}{0.0099/79.33} = \frac{0.000085}{0.000125} = 0.68$$

Όπου U_x έχουμε τη μετατόπιση στη γραμμική περιοχή του πρώτου βήματος για τον άξονα x της δομής και l_x το αρχικό μήκος της δομής. Ενώ όπου U_z έχουμε τη μετατόπιση στη γραμμική περιοχή του πρώτου βήματος για τον άξονα z της δομής και l_z το αρχικό μήκος της δομής.

Επομένως από την ανάλυση προκύπτει μεγαλύτερος λόγος Poisson στην ελαστική περιοχή που χαρακτηρίζει καλύτερη εύκαμπτη συμπεριφορά από μία ράβδο με ABS υλικό με λόγο 0.394.

7.2 Πίνακας Αποτελεσμάτων

Στον Παρακάτω Πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας μετά από υπολογισμό σε κάθε μία δομή ξεχωριστά για κάθε περίπτωση. Επίσης αναφέρεται και η παραμόρφωση στο όριο θραύσης. Το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται από την γραμμική περιοχή της καμπύλης τάσης- παραμόρφωσης (περιοχή Hooke) από την σχέση $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$.

Πίνακας 1 : Υπολογισμός Μέτρου ελαστικότητας κάθε δομής

| <i>Δομές</i> | <i>Μέτρο Ελαστικότητας</i> | <i>Παραμόρφωση στο όριο θραύσης</i> |
|--|----------------------------|-------------------------------------|
| Ράβδος | 2933 N/mm ² | 0.486 |
| Αυξητική Re-entrant | | |
| <i>Εφελκυσμός στον άξονα χ της δομής</i> | 876 N/mm ² | 0.426 |
| <i>Εφελκυσμός στον άξονα ψ της δομής</i> | 400 N/mm ² | 0.605 |
| <i>Θλίψη στον άξονα χ της δομής</i> | 336 N/mm ² | 0.430 |
| <i>Θλίψη στον άξονα ψ της δομής</i> | 571 N/mm ² | 0.298 |
| Αυξητική Run Flat | | |
| <i>Εφελκυσμός στον άξονα χ της δομής</i> | 515 N/mm ² | 0.547 |
| <i>Εφελκυσμός στον άξονα ψ της δομής</i> | 718 N/mm ² | 0.677 |
| <i>Θλίψη στον άξονα χ της δομής</i> | 383 N/mm ² | 0.560 |
| <i>Θλίψη στον άξονα ψ της δομής</i> | 150 N/mm ² | 0.640 |
| Οκταεδρική | | |
| <i>Εφελκυσμός στον άξονα χ της δομής</i> | 1773 N/mm ² | 0.250 |
| <i>Θλίψη στον άξονα χ της δομής</i> | 1172 N/mm ² | 0.310 |
| Εξαγωνική Κυψέλης | | |
| <i>Εφελκυσμός στον άξονα χ της δομής</i> | 2330 N/mm ² | 0.610 |
| <i>Εφελκυσμός στον άξονα z της δομής</i> | 863 N/mm ² | 0.550 |
| <i>Θλίψη στον άξονα χ της δομής</i> | 900 N/mm ² | 0.328 |
| <i>Θλίψη στον άξονα z της δομής</i> | 665 N/mm ² | 0.391 |

Συνοψίζοντας, από τον πίνακα 1 παρατηρούμε πως όλες οι δομές παρουσιάζουν μικρότερο μέτρο ελαστικότητας από την ράβδο με 2933 N/mm². Οι βέλτιστες όμως δομές για ελαστική συμπεριφορά είναι η Αυξητική re-entrant και η Run flat. Ακόμα στην περίπτωση θλίψης όλων των δομών παρατηρούμε μεγάλη ευκαμπτότητα μειώνοντας το μέτρο ελαστικότητας κατά πολύ. Επίσης, στην εξαγωνική δομή παρατηρούμε μικρό μέτρο ελαστικότητας για θλιπτικές δυνάμεις ενώ για εφελκυστικές αρκετά μεγαλύτερο, ειδικότερα στον άξονα χ της δομής. Για την οκταεδρική δομή παρατηρούμε μικρή παραμόρφωση στο όριο θραύσης και μέτρο ελαστικότητας μεγαλύτερο από τις υπόλοιπες δομές. Τέλος, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως όλες οι δομές έχουν καλύτερη συμπεριφορά ευκαμψίας από την συμπεριφορά της ράβδου.

8. ΤΑΧΕΙΑ ΠΡΟΤΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ

8.1 Ορισμός Ταχείας Προτυποποίησης

Η Ταχεία προτυποποίηση είναι μία νέα τεχνολογία κατασκευής μοντέλων στρώμα-στρώμα (layer by layer) που μείωσε το χρόνο κατασκευής μοντέλων κάθε πολυπλοκότητας σε ώρες αντί για ημέρες, εβδομάδες ή ακόμα και μήνες. Αποτελεί πλέον για πολλές εταιρείες έναν απαραίτητο κρίκο στην διαδικασία εξέλιξης των προϊόντων.

Η πρώτη εμπορική διαδικασία παρουσιάστηκε στην Έκθεση Autofact στο Detroit, το Νοέμβριο του 1987, από την εταιρεία 3D Systems Inc. Σήμερα υπάρχουν πάνω από 30 διαδικασίες, μερικές από τις οποίες είναι εμπορικές, ενώ άλλες βρίσκονται υπό εξέλιξη σε εργαστήρια έρευνας. Η ακρίβεια έχει βελτιωθεί σημαντικά και οι επιλογές των υλικών είναι σχετικά πολλές. Τα μοντέλα χρησιμοποιούνται όλο και πιο συχνά για λειτουργικές δοκιμές ή για να παράγονται εργαλεία.

Είναι αλήθεια πως μπορούμε να πετύχουμε Ταχεία Πρωτοτυποποίηση και με συμβατικές μεθόδους, όπως με μηχανές NC. Παρ' όλα αυτά, ο όρος RPT έχει καθιερωθεί να περιγράφει τις νέες τεχνολογίες που κατασκευάζουν μοντέλα προσθέτοντας υλικό και όχι αφαιρώντας.

8.1.1 Τρόπος Λειτουργίας

Από τα συστήματα στερεάς μοντελοποίησης παίρνουμε ένα αρχείο τύπου STL. Αυτό τροφοδοτείται στο σύστημα ΤΠ που κόβει λεπτές οριζόντιες διατομές διαμέσου του αρχείου STL, στο επιθυμητό πάχος (πχ. 0.2mm). Το εξάρτημα δημιουργείται σε στρώματα. Το σύστημα RP χειρίζεται τη στοίβα των ψηφιακών διατομών για να παράγει το κάθε επίπεδο υλικού, το έναν πάνω από το άλλο.

8.1.2 Βασικά Στάδια Ταχείας Πρωτοτυποποίησης

Οι τεχνικές της ταχεία πρωτοτυποποίησης αποτελούνται από τα παρακάτω κοινά στάδια :

- Δημιουργία του CAD-μοντέλου με απευθείας σχεδίαση ή με σάρωση αντικειμένου από 3d scanner.
- Μετατροπή των CAD-δεδομένων σε μορφή αρχείου STL. Επειδή τα διάφορα λογισμικά πακέτα CAD χρησιμοποιούν ένα μεγάλο αριθμό διαφορετικών αλγορίθμων για την αναπαράσταση και την απεικόνιση των στερεών μοντέλων, η μορφή STL (Standard Triangulation Language) έχει οριστεί ως πρότυπο για την επίτευξη σταθερότητας στον κλάδο της ταχείας πρωτοτυποποίησης. Το αρχείο μορφής STL είναι μία ανακατασκευή της οπτικής απεικόνισης της γεωμετρίας

των αντικειμένων, από δομικά τριγωνικά στοιχεία. Με τη χρησιμοποίηση τριγωνικών στοιχείων δημιουργούνται πολυεπίπεδες καμπύλες επιφάνειας οι οποίες προσεγγίζουν τις αρχικές. Η αύξηση του αριθμού των τριγωνικών στοιχείων οδηγεί σε καλύτερη προσέγγιση της μορφής του αντικειμένου, αλλά αυξάνει το μέγεθος του STL αρχείου. Για τον λόγο αυτό είναι αναγκαίο να υπάρχει ισορροπία ανάμεσα στο μέγεθος του αρχείου και την ακρίβεια του αντικειμένου.

- Παραγωγή του αντικειμένου στρώμα με στρώμα. Η γεωμετρία του αντικειμένου διαιρείται σε ένα πλήθος οριζόντιων τομών, οι οποίες αντιστοιχούν στο πλήθος των στρωμάτων που κατασκευάζονται στη μηχανή πρωτοτυποποίησης. Αυτή η διαδικασία είναι πλήρως αυτοματοποιημένη.
- Τελική Επεξεργασία. Αυτό το στάδιο περιλαμβάνει τον καθαρισμό και το φινίρισμα του αντικειμένου και την απομάκρυνση των υποστηρικτικών δομών. Κάποιες τεχνικές ταχείας πρωτοτυποποίησης δημιουργούν ταυτόχρονα με το αντικείμενο και υποστηρικτικές δομές οι οποίες είναι απαραίτητες για να μην καταρρεύσει το παραγόμενο αντικείμενο. Ανάλογα από το υλικό που κατασκευάζετε το αντικείμενο λαμβάνει μέρος επιπλέον επεξεργασία ώστε το τελικό παραγόμενο να αποκτήσει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες.

8.2 Τεχνολογίες Ταχείας Πρωτοτυποποίησης

8.2.1 Στερεολιθογραφία- Stereolithography

Η στερεολιθογραφία είναι η παλαιότερη τεχνική τρισδιάστατης εκτύπωσης. Την εφεύρε ο *Charles Hall* το 1984 και καταχωρήθηκε το 1986. Με την τεχνική αυτή κατασκευάζονται τρισδιάστατα αντικείμενα από υγρά φωτοευαίσθητα πολυμερή, τα οποία στερεοποιούνται όταν εκτεθούν σε υπεριώδη ακτινοβολία.

Αρχικά, ο ανελκυστήρας βρίσκεται σε μια απόσταση από την επιφάνεια του ρευστού ίση με το πάχος του πρώτου στρώματος. Η ακτίνα laser σαρώνει την επιφάνεια. Το ρευστό είναι φωτο-πολυμερές και με τις υπεριώδης ακτίνες laser στερεοποιείται. Ο ανελκυστήρας μετακινείται προς τα κάτω και με την ίδια διαδικασία παράγεται το επόμενο επίπεδο. Στο τέλος το μοντέλο αφαιρείται από το διάλυμα και το παγιδευμένο στο εσωτερικό του μοντέλου ρευστό, αφαιρείται σε ειδικό φούρνο.

Η ακτίνα laser που στερεοποιεί το ρευστό είναι η ακτίνα HeCd. Μια δεύτερη ακτίνα laser χρησιμοποιείται για να επιβεβαιώνει ότι η επιφάνεια του ρευστού βρίσκεται στη σωστή θέση. Ο σαρωτής σπάει τις επιφανειακές εντάσεις, επιβεβαιώνει ότι πετυχαίνουμε επίπεδη επιφάνεια και ελαχιστοποιεί το χρόνο διαδικασίας για κάθε layer.

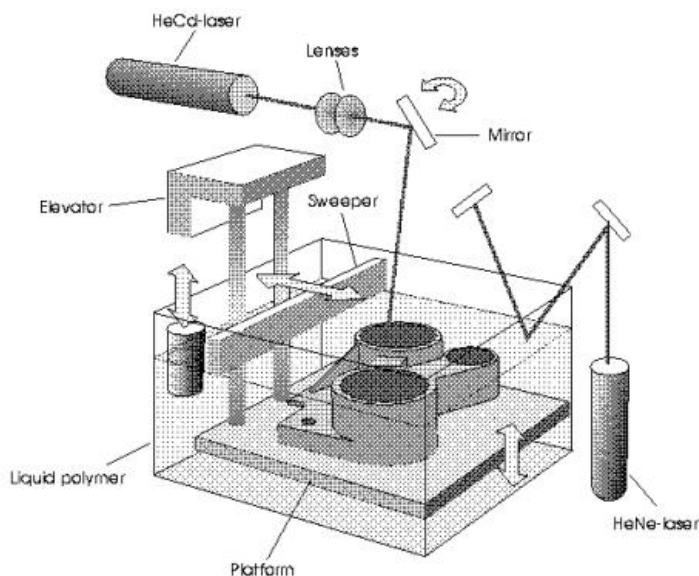
Απαιτούνται υποστηρικτικές κατασκευές που αφαιρούνται συνήθως χειροκίνητα στο τέλος. Ο χρόνος σάρωσης εξαρτάται από την γεωμετρία των περιγραμμάτων και την ταχύτητα του laser.

Το πάχος των επιπέδων μπορεί να είναι 0.1 mm, κατασκευάζει μοντέλα βάρους μέχρι και 68 kg, λειτουργεί σε Windows NT, και έχει βάρος σχεδόν 1700 kg.

Ένα από τα πλεονεκτήματα της στερεολιθογραφίας είναι η ταχύτητά της. Τα λειτουργικά της μέρη μπορούν να κατασκευασθούν σε μια μέρα. Το χρονικό διάστημα που χρειάζεται να παράξει ένα συγκεκριμένο μέρος εξαρτάται από το μέγεθος και τη πολυπλοκότητα του σχεδίου και μπορεί να διαρκέσει από μερικές ώρες ως και περισσότερες από μια μέρες. Τα Περισσότερα μηχανήματα στερεολιθογραφίας μπορούν να παράξουν αντικείμενα μεγέθους περίπου 50 × 50 × 60 cm (20 "X 20" X 24").

Πρωτότυπα εξαρτήματα κατασκευασμένα με στερεολιθογραφία είναι αρκετά ισχυρή για να υποστούν κατεργασίες και να χρησιμοποιηθεί ως κύρια πρότυπα για χύτευση με έγχυση, θερμομόρφωση, χύτευση με εμφύσηση, και σε διάφορες διαδικασίες χύτευσης μετάλλων.

Ακόμα με τη διαδικασία της στερεολιθογραφίας μπορείς να κατασκευάσεις αντικείμενα με ευρεία ποικιλία σχημάτων αν και κοστίζει. Το κόστος των μηχανημάτων στερεολιθογραφίας κοστίζουν από 100.000\$ σε πάνω από 500.000\$.



Εικόνα 111 : Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας της στερεολιθογραφίας

Γενικότερα στη Στερεολιθογραφία μπορούμε να πούμε ότι έχουμε :

- Κομμάτια από ρητίνες (τοξικά, αποφεύγεται η επαφή με τον άνθρωπο, γίνεται χρήση ειδικού εξοπλισμού, όπως γάντια και λοιπά)
- Έχουμε καλή ποιότητα επιφανείας αλλά μικρή αντοχή κομματιών (δεν ενδείκνυται για λειτουργικές δοκιμές). Τα τελευταία χρόνια έχει βελτιωθεί σημαντικά η αντοχή των υλικών που χρησιμοποιούνται.
- Δυνατότητα πολύπλοκης γεωμετρίας με μεγάλη ακρίβεια.
- Πολύ υψηλό κόστος μηχανών.
- Μικρή δυνατότητα επεξεργασίας επιφανειών.



Εικόνα 112 : Μηχανή Στερεοληθογραφίας

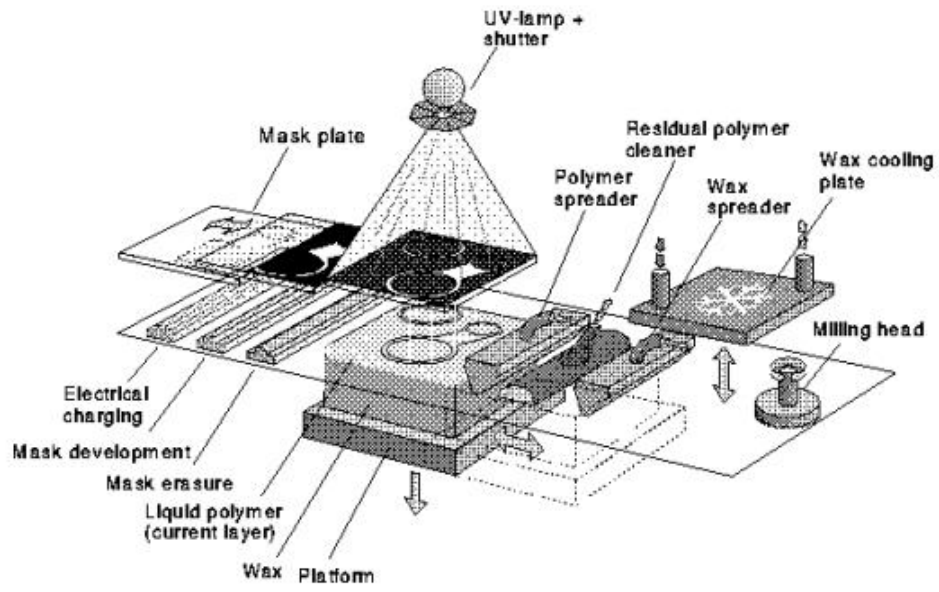
8.2.2 Solid Ground Curing

Το Solid ground curing είναι τεχνική παρόμοιας της Στερεολυθογραφία με κάποιες Διαφορές.

Οι Διαφορές αυτές είναι οι εξής :

- Το διάλυμα μετακινείται και οριζόντια μεταφέροντας τον ενεργό χώρο διαδικασίας σε διαφορετικούς σταθμούς στη μηχανή.
- Η πηγή φωτός και η διαδικασία. Χρησιμοποιείται λάμπα υπεριώδους φωτός που φωτίζει το θάλαμο και στερεοποιείται όλο η στρώση. Για να διαλέξουμε την περιοχή που πρέπει να στερεοποιηθεί, δημιουργείται μια μάσκα σε μια γυάλινη επιφάνεια και σβήνεται διαδοχικά μετά τη χρήση της. Η γυάλινη πλάκα με τη μάσκα τοποθετείται μεταξύ της λάμπας και της επιφάνειας του χώρου εργασίας.
- Τα μοντέλα χτίζονται περικυκλωμένα από κερί, περιορίζοντας την ανάγκη χρήσης κατασκευών για υποστήριξη. Μόλις μια στρώση έχει εκτεθεί στο υπεριώδες φως της λάμπας, οι περιοχές που δεν έχουν στερεοποιηθεί, αυτές που γεμίζουν με υπολείμματα, αντικαθίστανται με κερί. Αυτό επιτυγχάνεται με εξάλειψη των καταλοίπων και στρώνοντας έναν layer από κερί. Πετυχαίνουμε την σκλήρυνση του κεριού με μια παγωμένη μεταλλική πλάκα και διαδοχικά ο layer επεξεργάζεται στο σωστό ύψος. Επίσης, ο σταθμός κατεργασίας δίνει τη δυνατότητα να αφαιρεθούν layers. Ο νέος layer του πολυμερούς έχει εφαρμοστεί όταν ο χώρος εργασίας μετακινείται από το χώρο κατεργασίας πίσω στο θάλαμο έκθεσης φωτός.

Οι τελευταίες βελτιώσεις που ανακοινώθηκαν από την *Cubital* είναι η δυνατότητα να αλλάζει το μέγεθος του χώρου κατεργασίας και μια επιπλέον λάμπα υπεριώδους φωτός. Το σύστημα αυτό της *Cubital* μπορεί να πετύχει πάχος layer ίσο με 0.1-0.2 mm, μπορεί να κατασκευάσει έναν layer σε 70 sec και κοστίζει 470.000 \$.



Εικόνα 113 : Διαδικασία *Solid ground*

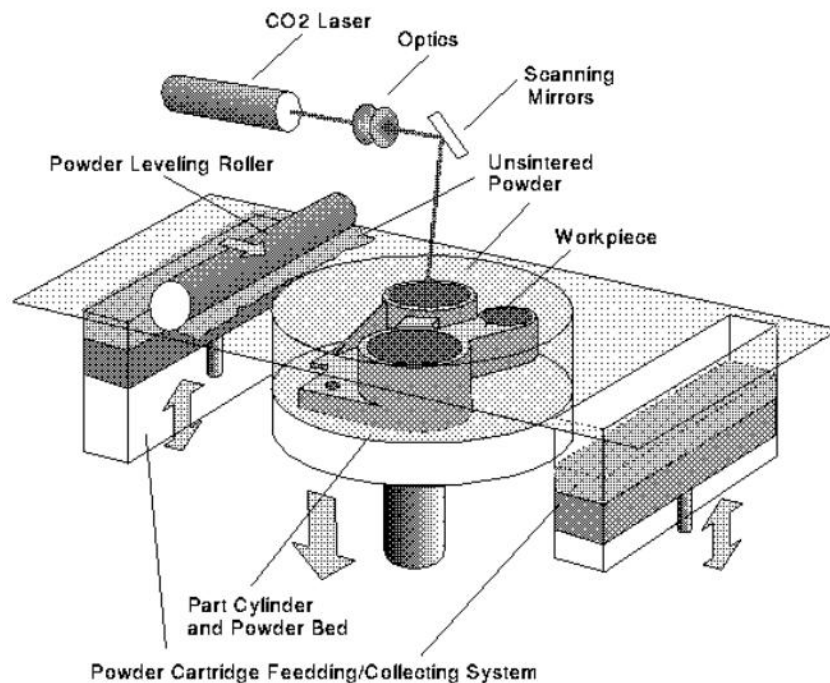


Εικόνα 114 : Μηχανή *Cubital*

8.2.3 Selective Laser Sintering

Η μέθοδος SLS αναπτύχθηκε από το Πανεπιστήμιο Austin του Τέξας. Στη θέση του ρευστού πολυμερούς, σκόνης από διάφορα υλικά απλώνονται σε μια πλατφόρμα από έναν κύλινδρο. Ένα laser συμπυκνώνει επιλεγμένες περιοχές, αναγκάζοντας τα σωματίδια να λιώσουν και να στερεοποιηθούν. Αντίθετα με τις μεθόδους που παρουσιάστηκαν πιο πριν, όπου υπάρχει μόνο μια μεταβατική φάση, στην διαδικασία SLS υπάρχουν δύο: από στερεό σε ρευστό και πίσω πάλι σε στερεό. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται και διερευνούνται είναι: πλαστικό, κερί, μέταλλο και επικαλυμμένα κεραμικά. Πιστεύεται πως θα είναι εφικτό να κατασκευάζονται μοντέλα και από άλλα υλικά, εκτός από πλαστικό, που να έχουν τις απαιτούμενες ιδιότητες με αυτές τις μεθόδους.

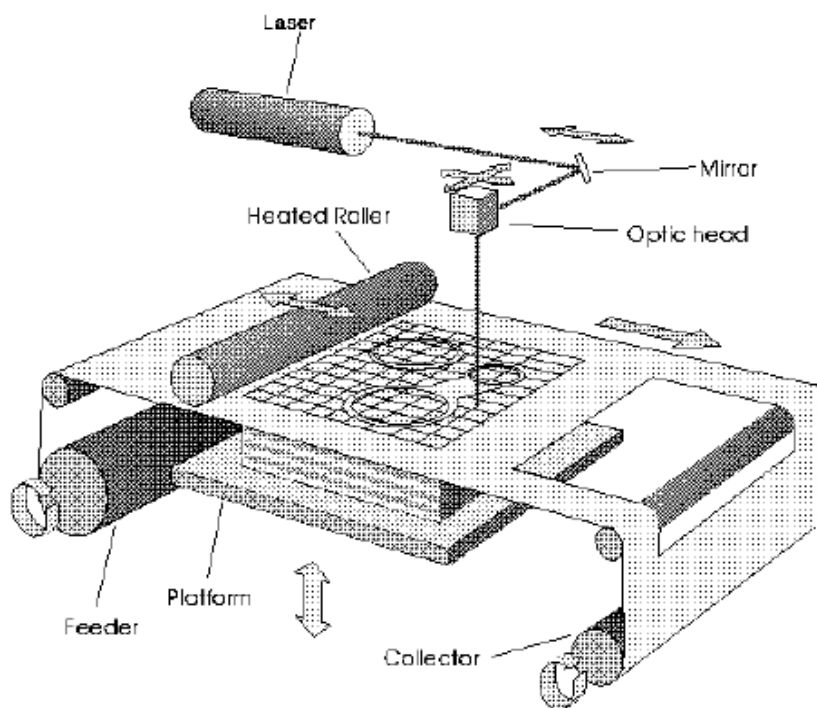
Η διαδικασία που αναπτύχθηκε στο Austin εκμεταλλεύεται εμπορικά η εταιρεία *DTM Corp*. Επίσης η εταιρεία *EOS GmbH* έχει παρουσιάσει στην αγορά μια διαδικασία που διεξάγεται με τις ίδιες αρχές.



Εικόνα 115: Διαδικασία SLS

8.2.4 Laminated Object Manufacturing - LOM

Η εταιρεία *HELISYS* ανέπτυξε και εκμεταλλεύεται εμπορικά ένα σύστημα το οποίο ‘ κόβει και ‘ ενοποιεί’ ελάσματα. Το κάτω μέρος της επιφάνειας του ελάσματος έχει μια συγκολλητική ουσία, η οποία όταν πιεσθεί και θερμανθεί από έναν κύλινδρο, την αναγκάζει να κολλήσει πάνω στο προηγούμενο έλασμα. Το έλασμα κόβεται από ένα laser ακολουθώντας το περίγραμμα της τομής. Το πάχος του ελάσματος δεν είναι σταθερό. Συνεπώς, ένας αισθητήρας μετράει το πάχος του παρόντος ελάσματος και το μοντέλο κόβεται ανάλογα.

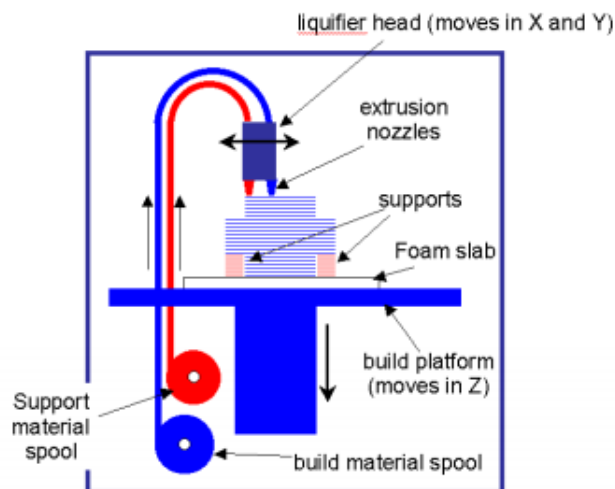


Εικόνα 116 : Διαδικασία LOM

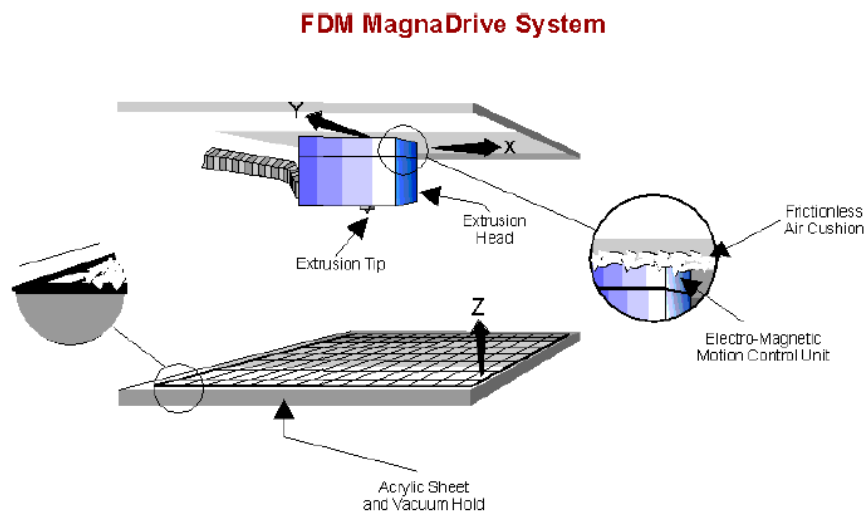
8.2.5 Fused Deposition Modeling

Η διαδικασία FDM αναπτύχθηκε από την εταιρεία *Stratasys Inc.* Υλοποιείται εξωθώντας λιωμένο υλικό διαμέσου ενός x-y ελεγχόμενου στομίου, πάνω σε ένα αφρώδες υπόστρωμα. Το υλικό έρχεται σε νηματώδη μορφή σε ένα καρούλι, το οποίο τροφοδοτείται στο πίσω μέρος της μηχανής. Το νήμα σπρώχνεται μέσω θερμαινόμενων άκρων στο στόμιο καθώς κινείται και εξωθείται. Η κίνηση και προέκταση ελέγχονται έτσι ώστε το υλικό να κατατίθεται παίρνοντας τη μορφή διαδοχικών layers ενός τρισδιάστατου μοντέλου.

Η κεφαλή εξώθησης του συστήματος, περιέχει μια μονάδα ελέγχου Ηλεκτρομαγνητικής κίνησης και κινείται πάνω από την μεταλλική πλάκα. Η κεφαλή απωθείται από την πλάκα από ένα κύμα αέρα για να διατηρείται στο επιθυμητό ύψος. Αυτός ο τρόπος επιτρέπει στην κεφαλή να κινείται με μεγάλες ταχύτητες, όταν οι προστριβές τείνουν στο μηδέν. Το σύστημα Quantum έχει τη δυνατότητα να κατασκευάσει μοντέλα με διαστάσεις ως 600x500x600 mm.



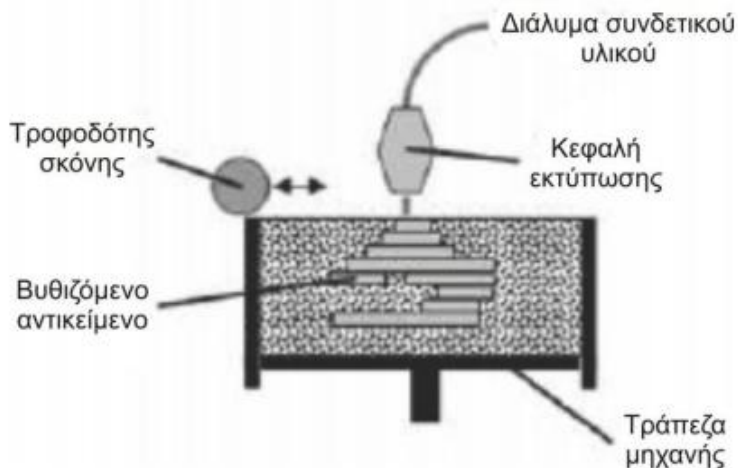
Εικόνα 117 : Διαδικασία FDM



Εικόνα 118: Το νέο σύστημα της Stratasys, Quantum με MagnaDrive Τεχνολογία

8.3 Τρισδιάστατη Εκτύπωση - 3d Printing

Ο όρος 3d printing χρησιμοποιείται στη βιβλιογραφία συχνά για όλες τις διαδικασίες της ταχείας πρωτοτυποποίησης. Η αρχή λειτουργίας της τεχνικής φαίνεται στη παρακάτω εικόνα.

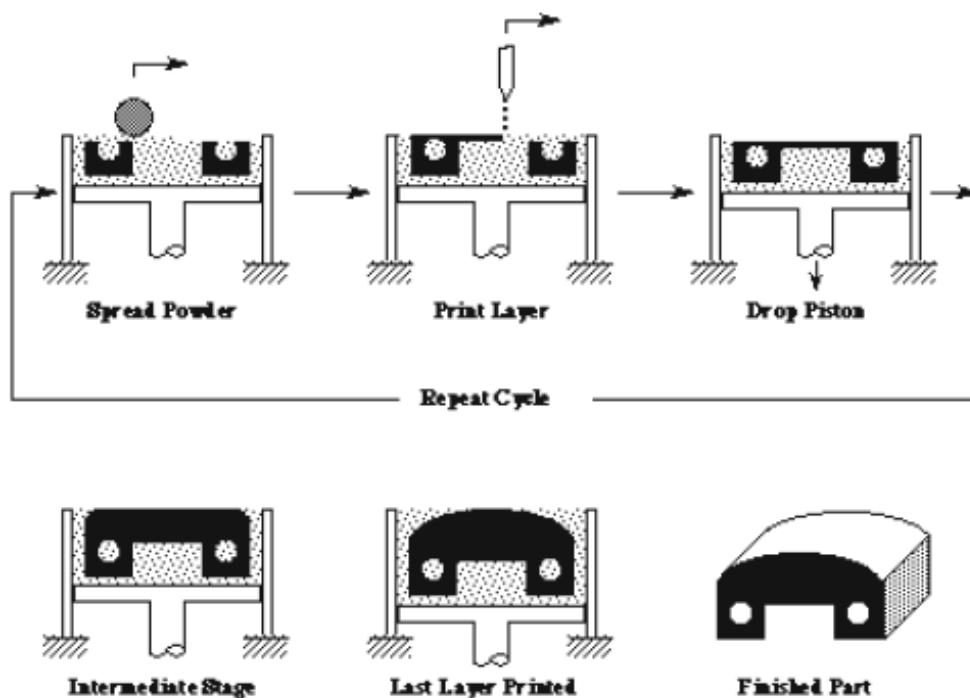


Εικόνα 119 : Αρχή λειτουργίας της διαδικασίας τρισδιάστατης εκτύπωσης

Σύμφωνα με αυτήν την διαδικασία ένα στρώμα σκόνης απλώνεται στην επιφάνεια της τράπεζας της μηχανής. Τα σωματίδια ενώνονται μεταξύ τους με υγρή

κόλλα (συνδετικό υλικό). Το συνδετικό υλικό εναποτίθεται μέσω μίας πολυκάναλης κεφαλής ψεκασμού πάνω στο επίπεδο του στρώματος. Μετά την δημιουργία του στρώματος, η τράπεζα της μηχανής μετακινείται προς τα κάτω έτσι ώστε να επαναληφθεί η διαδικασία για το επόμενο στρώμα και σταδιακά να δημιουργηθεί όλο το αντικείμενο. Εφόσον τελειώσει η διαδικασία, η τράπεζα της μηχανής επιστρέφει στο αρχικό επίπεδο και απομακρύνεται η μη στερεοποιημένη σκόνη από το αντικείμενο, το οποίο είναι εύθραυστο. Τέλος είναι απαραίτητο το αντικείμενο να διεμποτιστεί με κατάλληλο υλικό ώστε να βελτιωθούν οι μηχανικές του ιδιότητες.

Κατά το στάδιο της κατασκευής του αντικειμένου δεν είναι απαραίτητη η δημιουργία υποστηρικτικών δομών, διότι το αντικείμενο στηρίζεται από τα σωματίδια της σκόνης που το περιβάλλει. Επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα με την προσθήκη χρώματος στο συνδετικό υλικό, το τελικό αντικείμενο να παραχθεί σε οποιοδήποτε χρώμα. Διάφορα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν με αυτήν την τεχνολογία, όπως πλαστικά, κεραμικά και μέταλλα με τη μορφή σκόνης. Χαρακτηριστικό αυτής της διαδικασίας είναι ότι το τελικό αντικείμενο έχει περιορισμένη επιφανειακή ποιότητα.

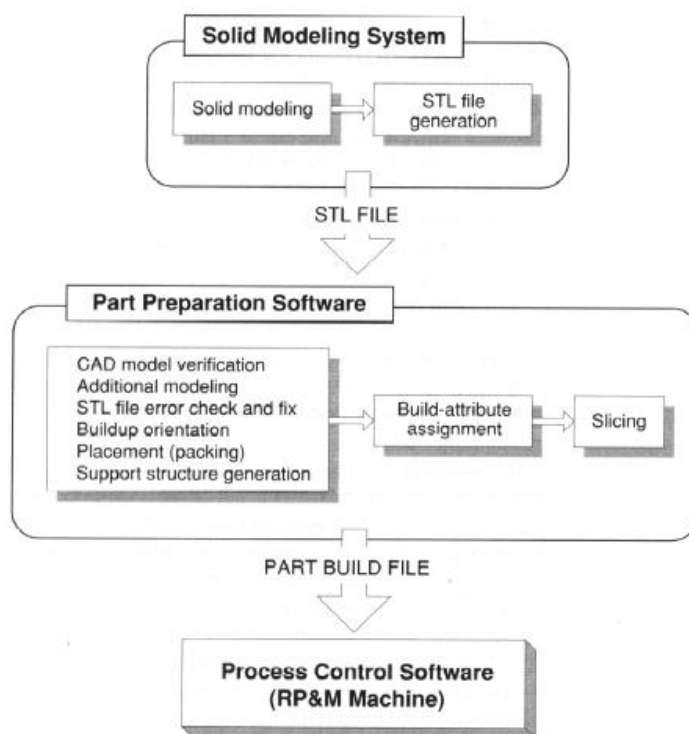


Εικόνα 120: Η διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης σε 5 φάσεις.

8.4 Μεταφορά Δεδομένων Σε Συστήματα Ταχείας Πρωτοτυποποίησης

Η ταχύτητα είναι ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της τεχνολογίας της ταχείας πρωτοτυποποίησης, όταν συγκρίνεται με τις συμβατικές μεθόδους. Στην Πραγματικότητα η χρήση της ταχείας πρωτοτυποποίησης δικαιώνεται μόνο αν το μοντέλο μπορεί να δημιουργηθεί γρήγορα. Πολύ συχνά ωστόσο, ο περιοριστικός παράγοντας είναι ο χρόνος που ξοδεύεται για να προετοιμαστούν τα δεδομένα. Εάν τα δεδομένα είναι σωστά, ο χρόνος κατασκευής είναι γνωστός και σχετικά γρήγορος.

Οι λειτουργίες λογισμικού για ταχεία πρωτοτυποποίηση μπορεί να είναι ότι το κόστος κατασκευής συνδέεται άμεσα με την ποσότητα της δουλειάς που ξοδεύεται για την προετοιμασία των δεδομένων και το χτίσιμο του μοντέλου. Επίσης βασικό κριτήριο αξιολόγησης οποιοδήποτε εργαλείου λογισμικού είναι η ελαχιστοποίηση του πλήθους επαφών που πρέπει να κάνουν ο σχεδιαστής και ο κατασκευαστής ή η βελτίωση της μεταξύ τους επικοινωνίας.



Εικόνα 121 : Λειτουργίες Λογισμικού για ταχεία πρωτοτυποποίηση

Μερικά από τα συνηθισμένα σφάλματα που παρουσιάζονται ταχεία πρωτοτυποποίηση είναι τα ασυνεχή κάθετα διανύσματα (inconsistent normals), λάθος τομές μεταξύ facets, λάθος κάθετα διανύσματα (αυτά που παρέχονται δεν συμφωνούν

με αυτά που υπολογίζονται), δημιουργία εσωτερικών τοίχων και στηριγμάτων και εφελκυσμένα facets.

8.5 Εφαρμογές της Ταχείας Προτοτυποποίησης - Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

Η Ταχεία προτοτυποποίηση και η τρισδιάστατη εκτύπωση πλέον εφαρμόζονται σε πολλά και ποικίλα αντικείμενα λόγω κυρίως της μείωσης του χρόνου και του κόστους παράγωγης που διαθέτουν. Εφαρμογές τέτοιες μπορεί να είναι βιομηχανικές, ιατρικές, πολιτιστικής κληρονομιάς ακόμα και σε εφαρμογές ρουχισμού και κοσμημάτων. Επίσης μπορούμε να τα συναντήσουμε στην αεροναυπηγική, στην αυτοκινητοβιομηχανία και στην ναυπηγική. Στην εικόνα 122 μπορούμε να δούμε φωτογραφίες από διάφορες τέτοιες εφαρμογές στην πράξη.



Εικόνα 122: Διάφορες εφαρμογές πρωτοτύπων ταχείας προτυποποίησης

8.6 Τρισδιάστατος Εκτυπωτής Maker Gear M2

Το M2 είναι ο νεότερος τρισδιάστατος εκτυπωτής από την Maker Gear. Έχει σχεδιαστεί για να είναι γρήγορη, ακριβής και αξιόπιστη η εκτύπωσή του και να μπορεί να δημιουργεί αντικείμενα τριών διαστάσεων σχεδιασμένα από Η/Υ. Το M2 είναι κατασκευασμένο με πολλά εξαιρετικά χαρακτηριστικά, όπως τη δυνατότητα να εκτυπώνει με ανάλυση 0,01, που σημαίνει πως η δημιουργία του ενός στρώματος από το νήμα υλικού είναι λεπτότερο από ό, τι ένα φύλλο χαρτιού.

Είναι μια μηχανή ταχείας πρωτοτυποποίησης η οποία ανήκει στην κατηγορία των F.F.F. (F.D.M.) μηχανών. Έχει την δυνατότητα κατασκευής μικρών αντικειμένων, μεγάλης ακρίβειας, σχεδιασμένα σε ψηφιακά αρχεία C.A.D. Ως πρώτη ύλη, χρησιμοποιεί πλαστικό νήμα (ABS ή PLA) το οποίο τίκεται σε κατάλληλη θερμοκρασία, με σκοπό την κατασκευή του επιθυμητού αντικειμένου. Αποτελείται από το κύριο σώμα, που πάνω σε αυτό, βρίσκονται οι βηματικοί κινητήρες οι οποίοι εκτελούν τις κινήσεις των τριών αξόνων (X,Y,Z). Η τράπεζα μαζί με την θερμαινόμενη πλάκα (heatbed), αποτελούν την περιοχή εκτύπωσης και καθορίζουν το μέγιστο του μεγέθους της. Επιπλέον στο κύριο σώμα, είναι τοποθετημένο το εργαλειοφορείο της μηχανής, το οποίο φέρει πάνω του το θερμαινόμενο ακροφύσιο (hotend), καθώς και τον μηχανισμό εξώθησης του πλαστικού (extruder). Η μετάδοση κίνησης, από τις βηματικούς κινητήρες γίνεται με διάταξη κοχλία-περικόχλιο για τον άξονα Z, ενώ για του άξονες X και Y χρησιμοποιείται οδοντωτός ιμάντας σε συνεργασία με οδοντωτό τροχό. Η κίνηση αυτή μεταφέρεται πάνω σε λείους άξονες (γλίστρες) οι οποίοι λειτουργούν σαν οδηγοί για την τράπεζα και το εργαλειοφορείο. Η πλακέτα αριθμητικού ελέγχου (NC), ελέγχει τους βηματικούς κινητήρες, με την χρήση εντολών (κώδικας G και M) τις οποίες μπορούμε να εισάγουμε μέσω κάρτας μνήμης ή του control panel είτε μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή.

8.6.1 Ανάλυση Βασικών Λειτουργικών Εξαρτημάτων

Το Maker Gear M2 αποτελείται από 4 βασικά κομμάτια:

- Κύριο σώμα
- Τράπεζα
- Εργαλειοφορείο
- Πλακέτα αριθμητικού ελέγχου και ηλεκτρονικά μέρη

Κύριο σώμα

Το κύριο σώμα χρησιμεύει για την στήριξη όλων των εξαρτημάτων όπως την τράπεζα, το εργαλειοφορείο και τα ηλεκτρονικά μέρη. Είναι εξαιρετικά άκαμπτο και αποτελείται από κατασκευή πλαισίων από χάλυβα. Τοποθετημένα στο κύριο σώμα του εκτυπωτή M2 θα δούμε:

- Τα Δομικά στοιχεία κατασκευασμένα με υψηλή ακρίβεια τα οποία συγκρατούν τα μέρη του εκτυπωτή.

- Στο πάνω μέρος βλέπουμε την πλατφόρμα που προσαρμόζεται με ειδικές βάσεις στο κύριο σώμα και αποτελείται από το εργαλειοφορείο. Στην αριστερή πλευρά της πλατφόρμας, έχουμε την βάση του βηματικού κινητήρα η οποία τον συγκρατεί σε 3 σημεία ενώ στην δεξιά πλευρά υπάρχει η τροχαλία η οποία καθοδηγεί τον ιμάντα και μεταφέρει την κίνηση.
- Στο αριστερό μέρος του σκελετού όπως βλέπουμε και στην εικόνα 122, έχει τοποθετηθεί ο οδηγός για το υλικό κατεργασίας. Αυτός βοηθάει στην ομαλή τροφοδοσία με υλικό, σε όποια κίνηση και να κάνει η μηχανή, καθ' όλη την διάρκεια εκτύπωσης.

Τράπεζα

Η πλατφόρμα της τράπεζας, προσαρμόζεται πάνω στο κύριο σώμα, με την χρήση ειδικών πλαστικών βάσεων, που συγκρατούν τις γλίστρες και πάνω σε αυτές γίνεται η κίνηση στον άξονα Υ. Αποτελείται από:

- Μια γυάλινη επιφάνεια, η οποία αποτελεί τον χώρο εκτύπωσης της μηχανής. Εξυπηρετεί στην επιπεδότητα της τράπεζας, στην ομοιόμορφη επαγωγή της θερμότητας, και τέλος κατά την ολοκλήρωση της διαδικασίας εκτύπωσης, η αποκόλληση του κομματιού γίνεται ευκολότερη.
- Την θερμαινόμενη πλάκα (heated bed) η οποία, καθορίζει τον μέγιστο χώρο εκτύπωσης. Αποτελείται από μια αντίσταση την οποία η μηχανή τροφοδοτεί με ρεύμα και την ελέγχει με την χρήση ενός αισθητήρα θερμοκρασίας ο οποίος είναι τοποθετημένος στο κέντρο της πλάκας. Ο σκοπός του heated bed είναι ο έλεγχος της θερμοκρασίας του κομματιού και η αποφυγή της απότομης μεταβολής της θερμοκρασίας του. Αυτό βελτιώνει κατά πολύ την ποιότητα του αντικειμένου καθώς το λιωμένο πλαστικό ψύχεται από τον αέρα και συστέλλεται. Όταν η συστολή δεν γίνεται ομοιόμορφα σε όλο το κομμάτι, το αποτέλεσμα είναι ένα αλλοιωμένο προϊόν, κακής ποιότητας επιφάνειας και μη σωστή ένωση των στρωμάτων (layers). Το φαινόμενο αυτό της αλλοίωσης είναι πιο έντονο στις γωνίες, όπου τις παρατηρούμε να σηκώνονται από την τράπεζα εκτύπωσης. Η θερμαινόμενη πλατφόρμα επιτρέπει στο εκτυπωμένο προϊόν να παραμένει ζεστό καθ' όλη την διαδικασία εκτύπωσης κάνοντας στο τέλος την συστολή του κομματιού ομοιόμορφη.
- Το σύστημα ρύθμισης της ευθυγράμμισης, είναι μια διάταξη κοχλιών και ελατήριων οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στις 4 γωνίες του heated bed. Η χρήση τους είναι να ρυθμίζουμε το ύψος της εκάστου γωνίας με σκοπό την απόλυτη επιπεδότητα του τραπέζιού έτσι ώστε το πρώτο layer να έχει το επιθυμητό πάχος. Η ρύθμιση αυτή γίνεται, βιδώνοντας ή ξεβιδώνοντας τον εκάστοτε κοχλία αλλάζοντας έτσι το ύψος της αντίστοιχης γωνίας.
- Τέλος έχουμε μια επιφάνεια που εξυπηρετεί στην συγκράτηση των παραπάνω και την προσαρμογή του τραπέζιού στις γλίστρες. Πάνω σε αυτή βρίσκονται οι βάσεις συγκράτησης του ιμάντα για την μεταφορά της κίνησης, ο ταυιστήρας του ιμάντα καθώς και οι βάσεις ενώσεις της πλατφόρμας στις γλίστρες. Επιπλέον

συγκρατεί το heated bed με το σύστημα ρύθμισης ευθυγράμμισης και την γυάλινη επιφάνεια.

Εργαλειοφορείο

Το εργαλειοφορείο είναι τοποθετημένο πάνω στην πλατφόρμα του άξονα X και φέρει πάνω του τα εργαλεία που χρησιμεύουν για την εκτύπωση του αντικειμένου. Αυτά αναλύονται σε:

- Ο extruder, είναι ο μηχανισμός με τον οποίο γίνεται η τροφοδοσία της μηχανής με το υλικό κατεργασίας. Η συναρμολόγησή του αποτελείται από έναν βηματικό κινητήρα, μια διάταξης οδοντωτών τροχών, και έναν κοχλία που διαθέτει οδόντωση όπου λειτουργεί σαν αρπάγη. Ανάλογα με τους ηλεκτρονικούς παλμούς που στέλνονται στον βηματικό κινητήρα περιστρέφονται οι οδοντωτοί τροχοί και ο κοχλίας με σκοπό να ωθήσει με συγκεκριμένο βήμα το υλικό κατεργασίας στη θερμαινόμενη κεφαλή εκτύπωσης (hotend).
- Το hot-end, τοποθετείτε στην απόληξη του extruder, και τροφοδοτείται από αυτόν. Καθώς το υλικό εισέρχεται στο hot-end αυτό τήκεται και εξέρχεται σε μορφή νήματος. Έχει σαν βάση ένα ακροφύσιο (nozzle) φτιαγμένο από ορείχαλκο ή αλουμίνιο ώστε να έχει καλή επαγωγή θερμότητας. Συνήθως, χρησιμοποιείται συνδεσμολογία κεραμικών αντιστάσεων μεγάλης ισχύος ή μερικές φορές καλώδιο από nichrome που, είναι ένα μη μαγνητικό κράμα, νικελίου, χρωμίου και μερικές φορές σιδήρου. Η διάταξη αυτή, επιτρέπει στο hot-end να φτάνει στη θερμοκρασία τήξης του υλικού κατεργασίας, η οποία κυμαίνεται από 185 οC μέχρι 240 οC ανάλογα με το υλικό. Πάνω από οποιαδήποτε εστία θέρμανσης, τοποθετείται μόνωση που είναι είτε μια ειδική ταινία, είτε μια επικάλυψη από ένα κεραμικό υλικό υγρής μορφής καθώς μετά την θέρμανση του στερεοποιείται και λειτουργεί σαν μονωτής. Για τον έλεγχο της θερμοκρασίας χρησιμοποιούμε έναν αισθητήρα που βρίσκεται πάνω στο μεταλλικό περίβλημα και μέσω του αλγορίθμου της μηχανής γνωρίζουμε την θερμοκρασία του οποιαδήποτε χρονική στιγμή.
- Δίπλα στην κεφαλή του hot-end είναι τοποθετημένος ένας ανεμιστήρας. Αυτό εξυπηρετεί στην άμεση ψύξη του υλικού κατεργασίας που εξέρχεται, για την κατασκευή ιδιόμορφων επιφανειών. Ο έλεγχος της λειτουργίας του γίνεται αυτόματα από τον αλγόριθμο της μηχανής μέσω του προγράμματος G.A.M. όπου αυτό το κρίνει απαραίτητο. Η κατασκευή γεφυρών χωρίς ενδιάμεσες βάσεις στήριξης και χωρίς την χρήση ανεμιστήρα δεν θα ήταν δυνατή, καθώς το νήμα εξέρχεται σε υψηλές θερμοκρασίες και δεν μπορεί να σταθεροποιηθεί άμεσα. Έτσι, αυτό που επιτυγχάνεται με την χρήση του ανεμιστήρα, είναι η άμεση κατασκευή γεφυρών μεγάλου μήκους, χωρίς την αλλοίωση του αποτελέσματος.

Πλακέτα αριθμητικού ελέγχου και ηλεκτρονικά μέρη.

Η πλακέτα αριθμητικού ελέγχου, μαζί με τα ηλεκτρονικά μέρη, αποτελεί τον εγκέφαλο και τα αισθητήρια όργανα της μηχανής. Οποιαδήποτε λειτουργία κάνει, ορίζεται μέσω του κώδικα G και M, τον οποίο μετατρέπει, σε κινήσεις των αξόνων και σε λειτουργίες των εξαρτημάτων. Η σύνδεση τους, με τους βηματικούς κινητήρες, τους

διακόπτες ορίων (end-stops), τους αισθητήρες θερμοκρασίας και τα θερμαινόμενα μέρη, μας δίνουν όλες τις απαραίτητες πληροφορίες που χρειαζόμαστε για την ασφαλή λειτουργία της μηχανής. Η διάταξη των πλακετών αποτελείται από ένα Arduino και μια πλακέτα RAMBo, οι οποίες συνδέονται με καλώδιο USB στον Ηλεκτρονικό Υπολογιστή. Με την χρήση προγραμμάτων C.A.D/C.A.M. παίρνουν τα δεδομένα και καθορίζουν την λειτουργία της.

Οι ηλεκτρονικές πλακέτες ελέγχουν την διεργασία της εκτύπωσης και οι βασικές λειτουργίες τους είναι:

- **Επεξεργασία των πληροφοριών του κώδικα G και M.**

Ο κώδικας αυτός, είναι η γλωσσά επικοινωνίας του χρηστή με όλες τις εργαλειομηχανές C.N.C. Συντάσσεται είτε χειροκίνητα είτε αυτόματα μέσω του προγράμματος C.A.M. και οι πλακέτες μετατρέπουν τις εντολές του, σε κινήσεις και λειτουργίες της μηχανής.

- **Οδήγηση των βηματικών κινητήρων**

Η οδήγηση των βηματικών κινητήρων, επιτυγχάνεται μέσω ηλεκτρονικών οδηγών, που είναι τοποθετημένοι πάνω στην RAMBo, και μετατρέπουν τις εντολές, σε παλμούς ρεύματος για την κίνηση τους.

- **Έλεγχος της θερμοκρασίας του hot-end και του heated bed.**

Ο έλεγχος επιτυγχάνεται μέσω της ύπαρξης αισθητήρων, οι όποιοι στέλνουν τα δεδομένα για την θερμοκρασία στην πλακέτα αριθμητικού έλεγχου και αυτή μας εμφανίζει μέσα στο γραφικό περιβάλλον του Υπολογιστή, και στον controller την θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου (°C).

- **Έλεγχος των end-stops (όρια μηχανής)**

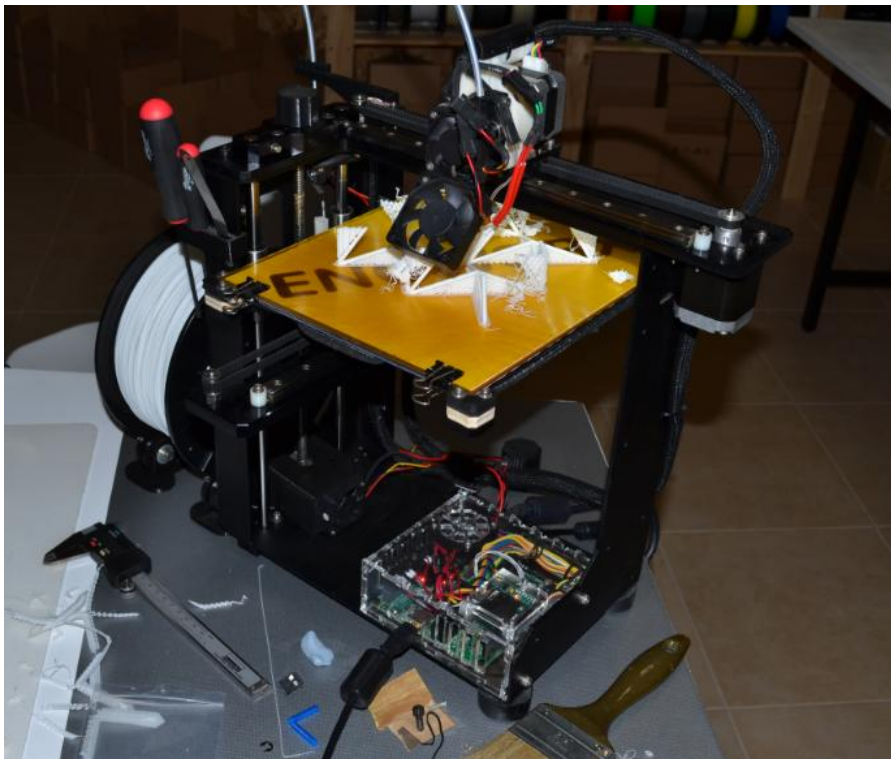
Τα end-stops είναι διακόπτες είτε μαγνητικοί, είτε απλοί και καθορίζουν την μέγιστη διαδρομή της κάθε πλατφόρμας. Είναι τοποθετημένοι στα άκρα των αξόνων, και στέλνουν τα δεδομένα στην πλακέτα αριθμητικού έλεγχου, και προστατεύοντας έτσι τα κινούμενα από τυχόν χτυπήματα στα άκρα.

- **Έλεγχος λειτουργίας του ανεμιστήρα.**

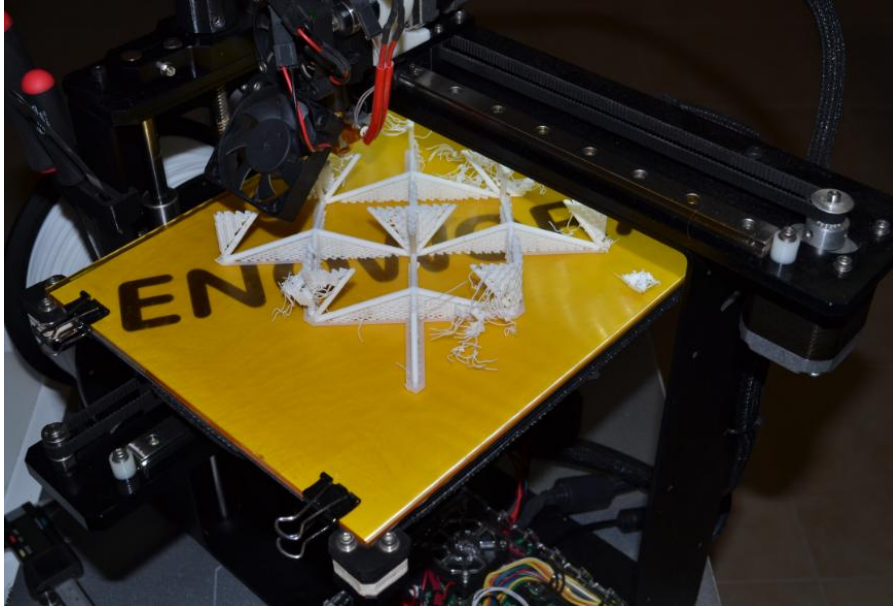
Το Arduino Mega 2560 είναι ένας μικροελεγκτής με βάση το κύκλωμα ATmega2560. Διαθέτει 54 ψηφιακούς ακροδέκτες εισόδου / εξόδου (εκ των οποίων 14 μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως έξοδοι PWM), 16 αναλογικές εισόδους, 4 UARTs (σειριακές θύρες), ένα 16 MHz κρύσταλλο, μια σύνδεση USB, μια υποδοχή για τροφοδοσία ρεύματος και ένα κουμπί επαναφοράς (RESET). Συνδέεται σε έναν υπολογιστή με ένα καλώδιο USB ή με τροφοδοτικό ή μπαταρία για ξεκινήσει η λειτουργία του.

Το RepRap Arduino Mega-compatible Motherboard ή εν συντομία RAMBo είναι μία όλα σε μία πλακέτα Ramps με στόχο την ευκολία, την αξιοπιστία, και την απόδοση και είναι σχεδιασμένη να διαθέτει όλα τα απαραίτητα εξαρτήματα για την λειτουργία μιας μηχανής RepRap (προτυποποίησης). Το RAMPS (RepRap Arduino Mega Pololu Shield), συνδέεται με την πλατφόρμα Arduino και έχει χώρο για αρκετές επεκτάσεις. Η διάταξή του περιλαμβάνει βύσματα για οδηγούς βηματικών κινητήρων και ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου τα οποία είναι εύκολα στην λειτουργία από ένα Arduino και έχουν την δυνατότητα αναβάθμισης όπως κάρτα μνήμης SD, Bluetooth, οθόνη ενδείξεων και άλλα.

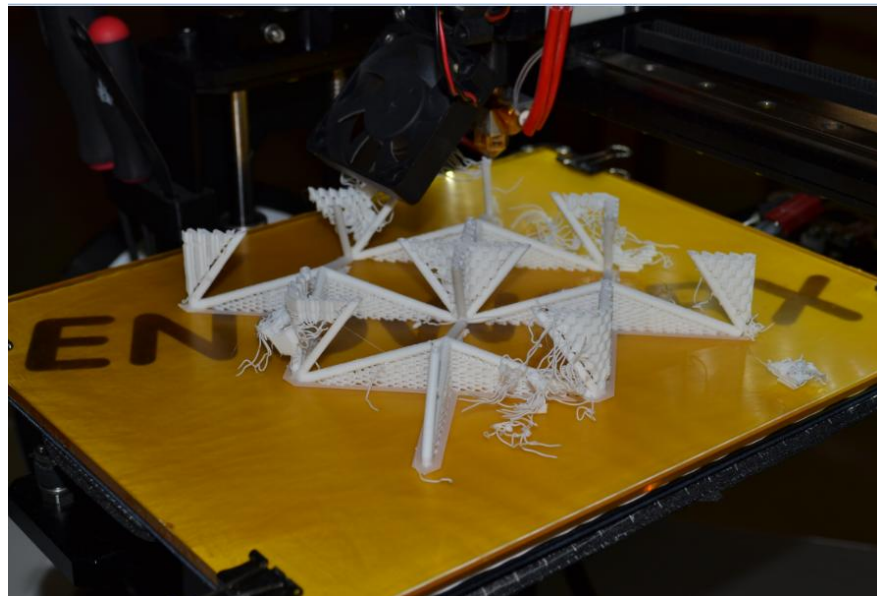
Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες εικόνες από τον εκτυπωτή Maker Gear M2 και από την διάρκεια εκτύπωσης των δομών.



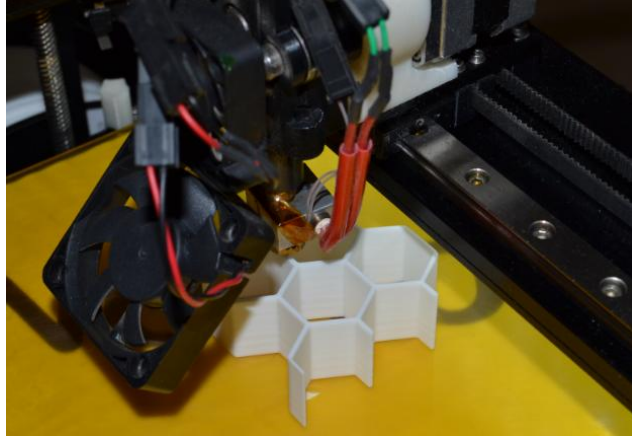
Εικόνα 123: Εκτυπωτής τύπου M2 της Maker Gear.



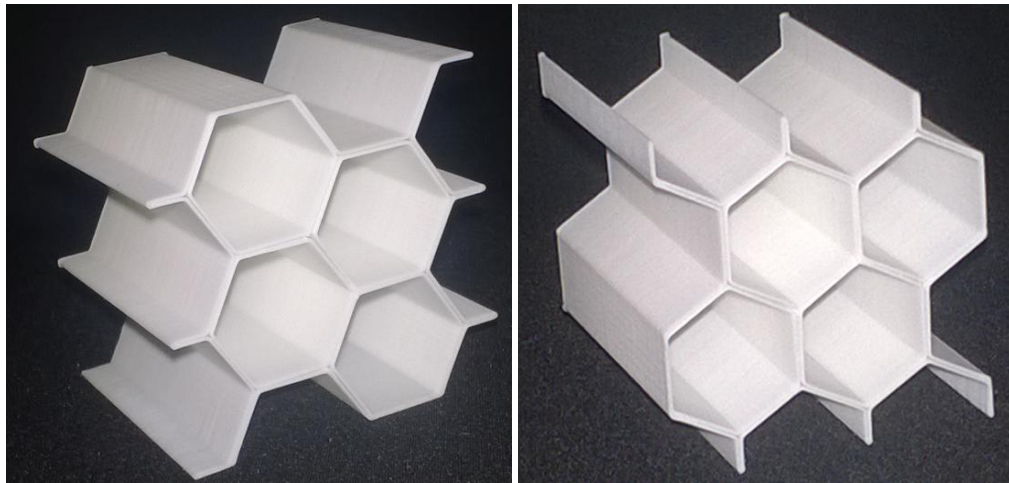
Εικόνα 124: Εκτύπωση της αυξητικής δομής Run flat.



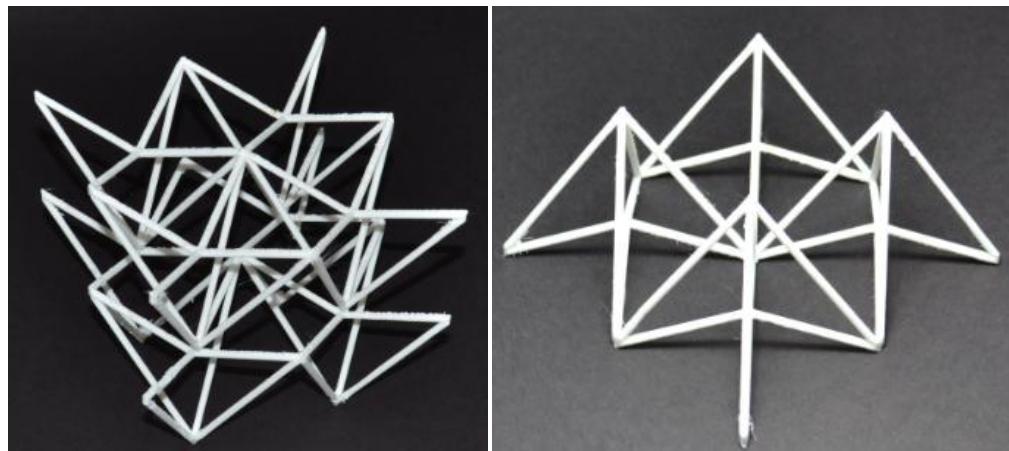
Εικόνα 125: Λειτουργία extruder στην εκτύπωση της δομής Run flat.



Εικόνα 126: Λειτουργία extruder στην εκτύπωση της εξαγωνικής δομής.



Εικόνα 126: Εξαγωνική δομή κυψέλης (hexagonal structure) τυπωμένη.



Εικόνα 127: Αυξητική Δομή Run flat τυπωμένη τρισδιάστατα.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη πτυχιακή αυτή εργασία έγινε έρευνα για τρισδιάστατες δομές που μπορούν να δεχθούν εύκαμπτη συμπεριφορά. Από την έρευνα δομών καταλήξαμε σε τέσσερις, την επαναεισερχόμενη αυξητική δομή (re-entrant), την αυξητική δομή αρνητικού λόγου Poisson (run flat), την οκταεδρική δομή (octet) και την εξαγωνική δομή κυψέλης (hexagonal). Οι τρισδιάστατες αυτές δομές σχεδιάστηκαν από το λογισμικό πακέτο SolidWorks, και αφού σχεδιάστηκαν έγινε προσομοίωση αυτών μέσω του SolidWorks Simulation για θερμοπλαστικό υλικό. Προσομοίωση έγινε για κάθε δομή σε εφελκυσμό και για θλίψη, μετατοπίζοντας επιφάνειες κάθε άξονα.

Από την προσομοίωση καταφέραμε να δούμε τη συμπεριφορά κάθε δομής αναλυτικά από τη καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης που κατασκευάσαμε. Καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι οι δομές δέχθηκαν ελαστική συμπεριφορά μεγαλύτερη από της ράβδου που συγκρίναμε. Αντιθέτως στην οκταεδρική δομή δεν καταφέραμε να δώσουμε εύκαμπτη συμπεριφορά όσο στις άλλες δομές.

Τα αποτελέσματα που αντλήσαμε από κάθε καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης και μας οδήγησε στο συμπέρασμα της ελαστικής συμπεριφοράς των δομών είναι η ελαχιστοποίηση του μέτρου ελαστικότητας (όσο μεγαλύτερο το μέτρο ελαστικότητας τόσο πιο ανθεκτική στην παραμόρφωση η δομή). Επίσης καταφέραμε να αυξήσουμε τη παραμόρφωση στο όριο διαρροής στη γραμμική περιοχή της καμπύλης όπου είναι σημαντικό για την επίτευξη του στόχου μας. Σε μερικές δομές καταφέραμε να αυξήσουμε και το όριο θραύσης του υλικού. Θυμίζουμε πως το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι ABS plastic, θερμοπλαστικό υλικό με όχι αρκετή εύκαμπτη συμπεριφορά.

Φεύγοντας από το κομμάτι της προσομοίωσης έγινε προσπάθεια τύπωσης των τεσσάρων δομών σε μορφή κύβου σε τρισδιάστατο εκτυπωτή από ABS υλικό. Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής που χρησιμοποιήθηκε όπως περιγράφουμε και στο 8ο κεφάλαιο είναι ο Maker Gear Τύπου M2 της εταιρίας ENOWORX που βρίσκεται στη Πάτρα, Ελλάδα.

Η έρευνα και η μελέτη του θέματος της πτυχιακής αυτής εργασίας, θα έχει και μελλοντικές ασχολίες όπως να μελετηθούνε ακόμα περισσότερες δομές που θα μπορούν να δεχθούν εύκαμπτη συμπεριφορά και να γίνει πειραματική ανάλυση σε πραγματικές φορτίσεις από μηχανές εφελκυσμού και θλίψης. Επίσης θα μπορούσε εκτός από θερμοπλαστικό υλικό να μελετηθεί ακόμα σε διάφορα μέταλλα.

Τέλος, την τεχνολογία της ευκαμπτότητας των υλικών που καταφέραμε να επιτύχουμε μέσω των τρισδιάστατων δομών με εφαρμογή θερμοπλαστικού υλικού θα μπορούσαμε να τα εφαρμόσουμε σε διάφορα αντικείμενα που απαιτούν ευκαμπτότητα αλλά ταυτόχρονα και αντοχή στη θραύση. Τέτοιες εφαρμογές θα μπορούσαν να είναι όπως στην αρχιτεκτονική, στην μηχανολογία, στην ναυπηγική, στη αυτοκινητοβιομηχανία και σημαντικότερα στην αεροναυπηγική. Επίσης, θα μπορούσαν να εφαρμοστούν στην αεροδιαστημική μηχανική και στις ανάγκες των στρατιωτικών υπηρεσιών. Ακόμα, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν και στις ανάγκες της Ιατρικής και βίοιατρικής ή και για ψυχαγωγικούς σκοπούς(π.χ. παιχνίδια). Οι εφαρμογές των ελαστομερών υλικών, όπως είναι για παράδειγμα το καουτσούκ, θα μπορούσαν αντικατασταθούν από υλικά μεγάλης ακαμψίας με εφαρμογή των τρισδιάστατων δομών που σχεδιάστηκαν και αναλύθηκαν σε σημείο να έχουν σχεδόν ίδια συμπεριφορά.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΠΗΓΕΣ

1. ΔΗΜΗΤΡΗΣ Ι. ΠΑΝΤΕΛΗΣ, Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά, 2^η αναθεωρημένη έκδοση, εκδόσεις Παπαρωτηρίου.
2. WILLIAM D. CALLISTER, Jr., Fundamentals Of Materials Science and Engineering, 5th Edition.
3. WILLIAM D. CALLISTER, Jr., Material Science and Engineering, 7th Edition
4. Y. Zhu, MAE 314 - Solid Mechanics, NC State University.
5. Δ.ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ, «http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/A1_Polim_eri_Genika.pdf», ΕΜΠ.
6. OSAMA A.M. ABDELAAL and SAIED M.H. DARWISH , Analysis, Fabricstion and a Biomedical Application Auxetic Cellular Structures, September 2012
7. RANT DARJA , RIJAVEC TATJANA and PAVKO CUDEN ALENKA , Auxetic Textiles, University of Ljubjana, 2013
8. KEVIN J. MALONEY, CHRISTOPHER S. ROPER, ALAN J. JACOBSEN WILLIAM B. CARTER, LORENZO VALDEVIT, TOBIAS A. SCHAEGLER, Micro lattices As Architected Thin Films: Analysis of Mechanical Properties And High Strain Elastic Recovery, University of California, August 2013
9. LARRY D. PEEL P.E., Studying The Physical Properties And Auxetic Behavior Of 3d Printed Fasteners, Texas A&M University, Kingsville 2011.
10. F.A. Cosso, FEA Of Auxetic Honeycombs 2012
11. V. S. DESHPANDE, N. A. FLECK, M.F. ASHBY, Effective Properties Of The Octet Lattice Material, Cambridge University, 2001.
12. JENS BAUER, STEFAN HENGSBACH, IWIZA TESARI, RUTH SCHWAIGER, OLIVER KRAFT, High Strength Cellular Ceramic Composites With 3d Micro architecture , Stanford University, California, August 2013
13. THEODOROS THEMISTOCLEOUS, Choreographic Architecture: Inscribing Instructions In An Auxetic Based Material, University College London, September 2012

14. ZHENG-DONG MA, YUANYUAN LIU, XIAOMING LIU, CE SUN, YUSHUN CUI, Ultralightweight Runflat Tires Based Upon Negative Poisson Ratio Auxetic Structures, July 2011.
15. TIRUPATHI R. CHANDRUPATLA, ASHOK D. BELEGUNDU , Εισαγωγή Στα Πεπερασμένα Στοιχεία Για Μηχανικούς , 3^η Αμερικάνικη Έκδοση.
16. J. ED AKIN, Finite Analysis Concepts via SolidWorks, Rice University, Houston, Texas, 2009.
17. ΜΠΙΛΑΛΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ , Σημειώσεις Εργαστηρίου CAD, Πολυτεχνείο Κρήτης.
18. DASSAULT SYSTEMS, SolidWorks Simulation Training.
19. ΚΙΑΦΑΣ ΛΟΥΚΑΣ – ΒΑΣΙΛΑΚΗΣ ΛΑΜΠΡΟΣ, Κατασκευή Τρισδιάστατου Εκτυπωτή Ταχείας Πρωτοτυποποίησης Πλαστικών Εξαρτημάτων, ΑΤΕΙ Πατρών, Πάτρα 2013

ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ

1. www.wikipedia.org
2. www.solidworks.com
3. help.solidworks.com
4. www.matbase.com (material properties)
5. www.azom.com (Mechanical properties of thermoplastics)
6. www.shapeways.com
7. www.stratasys.com