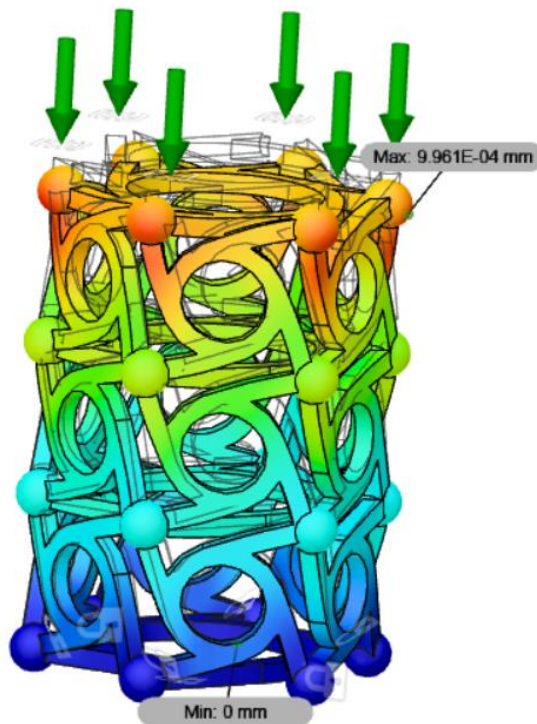




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΜΕΤΑΥΛΙΚΟΥ ΜΕ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΖΕΥΞΗΣ ΘΛΙΨΗΣ - ΣΤΡΕΨΗΣ



ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΜΟΣΤΡΑΛΗΣ ΑΛΕΞΙΟΣ (Α.Μ. 7825)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΓΕΩΡΓΙΟΣ Ι. ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2023

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Διπλωματική Εργασία που εκπονήθηκε στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου και αναφέρεται στην Μοντελοποίηση και Τρισδιάστατη εκτύπωση Μεταλλικού με ιδιότητες σύζευξης Θλίψης – Στρέψης.

Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη, η σχεδίαση και η υλοποίηση της κατασκευής του συγκεκριμένου Μεταλλικού, το οποίο εμφανίζει την ιδιότητα της Στρέψης κατά την διάρκεια της μονοαξονικής Θλιπτικής καταπόνησης, με την τεχνολογία της Τρισδιάστατης εκτύπωσης – 3D Printing.

Οφείλω να ομολογήσω πως το παρόν τεύχος και πιο συγκεκριμένα το κομμάτι των Μεταλλικών αποτέλεσε για μένα μια προσωπική πρόκληση λόγω του αυξημένου βαθμού δυσκολίας που θεωρώ ότι εμφανίζει, δεδομένης της ελλιπής σχετικής διαθέσιμης βιβλιογραφίας.

Συνεπώς, θα ήθελα να ευχαριστώ θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Γεώργιο Ι. Γιαννόπουλο, καθηγητή του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε για την πραγματοποίηση της Διπλωματικής Εργασίας, καθώς και για την υπομονή που έδειξε στις αμέτρητες ερωτήσεις και συναντήσεις που πραγματοποιήσαμε.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την στήριξη και την εμπιστοσύνη που έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου για την ανεκτίμητη συμπαράσταση και βοήθεια που μου έδωσαν.

Μοστράλης Αλέξιος

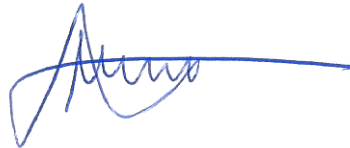
Μάιος, 2023

Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή: Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Φοιτητής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Διπλωματικής 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 Φοιτητής

ΜΟΣΤΡΑΛΗΣ ΑΛΕΞΙΟΣ

Υπογραφή



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία αναφέρεται στην Μοντελοποίηση και Τρισδιάστατη εκτύπωση Μεταϊλικού που θα εμφανίζει την ιδιότητα της μετατροπής της Θλιπτικής παραμόρφωσης σε Στρεπτική παραμόρφωση.

Η ανάπτυξη του θέματος γίνεται σε **επτά (7) κεφάλαια**.

Στο πρώτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η Τεχνολογία της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης – 3D printing, καθώς αναλύεται ο όρος, η ιστορική αναδρομή της και περιγράφονται εκτενώς όλες οι κατηγορίες της προσθετικής κατασκευής – Additive Manufacture.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα Μεταϊλικά – Metamaterials, καθώς αναλύεται ο συγκεκριμένος τύπος υλικών, δίδεται η ιστορική αναδρομή τους και περιγράφονται οι κατηγορίες τους, δίνοντας ιδιαίτερη βάση στα Μηχανικά Μεταϊλικά – Mechanical Metamaterials που είναι και το αντικείμενο της εργασίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η Μηχανική Συμπεριφορά των Πολυμερών υλικών, καθώς αναλύονται τα πολυμερή υλικά, η ιστορική αναδρομή τους και περιγράφονται οι κατηγορίες των Πολυμερών με βάση τη Μηχανική Συμπεριφορά τους. Στην συνέχεια, παρουσιάζεται το Περιβαλλοντικό Πρόβλημα που εμφανίζεται με την παραγωγή τέτοιων υλικών και αναλύονται οι τρόποι αντιμετώπισης του προβλήματος. Στο τέλος του συγκεκριμένου κεφαλαίου αναλύεται η Μηχανική Συμπεριφορά των συγκεκριμένων υλικών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα συστήματα CAD – CAE – CAM, καθώς αναλύονται εκτενώς τα συγκεκριμένα συστήματα, τα οφέλη τους και η ιστορική αναδρομή τους.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται ο Σχεδιασμός και η Δημιουργία του προτεινόμενου Μεταϊλικού, καθώς αναλύεται η κεντρική ιδέα του σχεδιασμού, η σχεδίαση, οι αριθμητικές προσομοιώσεις των δοκιμαστικών Δομών και περιγράφεται και υλοποιείται η τρισδιάστατη εκτύπωσή τους.

Στο έκτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα του πειράματος για τις τέσσερις Δομές και παρουσιάζονται και τα αντίστοιχα διαγράμματα που προέκυψαν μέσω των πειραματικών διαδικασιών. Επίσης, παρουσιάζονται και κάποια στιγμιότυπα την στιγμή της αστοχίας των Δομών.

Στο έβδομο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αριθμητικές προσομοιώσεις και το πείραμα, καθώς και πραγματοποιείται και σύγκριση των δοκιμαστικών Δομών με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Επίσης, παρουσιάζονται συγκεντρωτικοί πίνακες και διαγράμματα με σκοπό την πλήρη κατανόηση των αποτελεσμάτων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
ΚΕΦ.1: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ 3D PRINTING	15
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΗΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ	16
1.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΤΟΥ 3D PRINTING	18
1.3.1 ΕΞΩΘΗΣΗ ΥΛΙΚΟΥ – MATERIAL EXTRUSION	18
Μοντελοποίηση Συντηγμένης Εναπόθεσης Υλικού - Fused Deposition Modeling (FDM)	18
Πολυγαλακτικό Οξύ – PLA.....	19
Ακρυλονιτρίλιο Βουταδιένιο Στυρόλιο – ABS.....	20
Τρισδιάστατη Εκτύπωση στην Ανοικοδόμηση Κτηρίων - Construction 3D Printing.....	20
Τρισδιάστατη Βιοεκτύπωση - 3D Bioprinting.....	21
1.3.2 ΦΩΤΟΠΟΛΥΜΕΡΙΣΜΟΣ - VAT PHOTOPOLYMERISATION	23
Στερεολιθογραφία - Stereolithography (SLA).....	23
Ψηφιακή Επεξεργασία Φωτός - Digital Light Processing (DLP).....	24
1.3.3 ΣΥΝΤΗΞΗ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΣΚΟΝΗΣ - POWDER BED FUSION	25
Επιλεκτική Σύντηξη με την χρήση ακτινών λέιζερ - Selective Laser Sintering (SLS).....	25
Επιλεκτική Σύντηξη με την χρήση λέιζερ για μεταλλικούς κόκκους - Selective Laser Melting (SLM).....	26
1.3.4 ΨΕΚΑΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ – MATERIAL JETTING	27
1.3.5 ΨΕΚΑΣΜΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ – BLINDER JETTING	28
1.3.6 ΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΗ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ – DIRECT ENERGY DEPOSITION (DED)	29
1.3.7 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΦΥΛΛΩΝ - SHEET LAMINATION (SHL)	30
ΚΕΦ.2: ΜΕΤΑΥΛΙΚΑ	31
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	31
2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΑ ΜΕΤΑΥΛΙΚΑ	35
2.3 ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΤΑΥΛΙΚΑ – MECHANICAL METAMATERIALS	37
2.3.1 ΑΥΞΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ – AUXETIC METAMATERIALS	39
2.3.1.1 ΛΟΓΟΣ POISSON ΣΤΑ ΥΛΙΚΑ	42
2.3.1.2 ΔΟΜΕΣ ΑΥΞΗΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	43
2.3.1.3 ΑΥΞΗΤΙΚΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ.....	44
2.3.2 ΠΕΝΤΑΜΟΔΙΚΑ ΜΕΤΑΥΛΙΚΑ – PENTAMODE METAMATERIALS	45
2.3.3 ΜΕΤΑΥΛΙΚΑ ΜΕ ΑΡΝΗΤΙΚΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ POISSON ΚΑΙ ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΟΓΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑ	45
2.3.4 ΥΛΙΚΑ ΔΙΚΤΥΩΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ – LATTICE MATERIALS	45

2.3.5 ΔΟΜΕΣ ORIGAMI & KIRIGAMI	46
2.3.6 ΕΛΙΚΟΕΙΔΗ ΜΕΤΑΥΛΙΚΑ – CHIRAL METAMATERIALS	47
ΚΕΦ.3: ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	49
3.1 ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΥΛΙΚΑ	49
3.1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΥΛΙΚΑ	50
3.1.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΒΑΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ	52
3.1.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ.....	55
3.1.5 ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	56
3.1.5.1 ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ.....	59
3.1.5.2 ΒΙΟΔΙΑΣΠΩΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ	60
3.2 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΛΙΚΩΝ	62
3.2.1 ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ	64
3.2.2 ΘΛΙΨΗ.....	65
3.2.3 ΣΤΡΕΨΗ.....	66
ΚΕΦ.4: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ CAD – CAM – CAE	69
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	69
4.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ CAD-CAE-CAM	71
4.3 CAD – Computer Aided Design.....	72
4.4 CAE – Computer Aided Engineering	73
4.5 CAM – Computer Aided Manufacturing	74
ΚΕΦ.5: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΕΤΑΥΛΙΚΟΥ	75
5.1 ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΙΔΕΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	75
5.2 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΟΜΩΝ	75
5.2.1 ΔΟΜΕΣ ΜΕΤΑΥΛΙΚΩΝ.....	77
5.2.2 ΔΟΜΗ ΜΕΤΑΥΛΙΚΟΥ ΜΕ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΖΕΥΞΗΣ ΘΛΙΨΗΣ ΚΑΙ ΣΤΡΕΨΗΣ - ΚΥΒΙΚΗΣ ΜΟΡΦΗΣ ΚΥΨΕΛΙΔΑΣ.....	83
5.2.3 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΔΟΜΗ ΜΕΤΑΥΛΙΚΟΥ ΜΕ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΖΕΥΞΗΣ ΘΛΙΨΗΣ ΚΑΙ ΣΤΡΕΨΗΣ - ΕΞΑΓΩΝΙΚΗΣ ΜΟΡΦΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΟΥΣ ΚΥΨΕΛΙΔΑΣ	93
5.3 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΔΟΜΩΝ.....	104
5.4 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΕΣ ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΕΣ ΔΟΜΕΣ.....	105
ΚΕΦ.6: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΜΩΝ 1-2-3-4.....	107
ΚΕΦ.7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	117
7.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ.....	118
7.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	119
7.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	120
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	125

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Απόβλητα Τρισδιάστατης Εκτύπωσης σε αντίθεση με την Αφαιρετική Κατασκευή ..15	15
Εικόνα 2: Διαδικασία Τρισδιάστατης Εκτύπωσης	15
Εικόνα 3: Ιστορική Αναδρομή Τρισδιάστατης Εκτύπωσης	16
Εικόνα 4: Εφαρμογές Τρισδιάστατης Εκτύπωσης	17
Εικόνα 5: FDM 3D Printer	18
Εικόνα 6: Τρόπος Λειτουργίας ενός FDM 3D Printer	19
Εικόνα 7: PLA.....	19
Εικόνα 8: ABS.....	20
Εικόνα 9: 3D Εκτυπωμένο Σπίτι	20
Εικόνα 10: Απόβλητα Construction 3D Printing σε αντίθεση με τις Συμβατικές μεθόδους	21
Εικόνα 11: 3D Bioprinting	21
Εικόνα 12: 3D Εκτυπωμένο Δέρμα.....	22
Εικόνα 13: Μεταμόσχευση Βιο-τυπωμένου Αυτιού	22
Εικόνα 14: SLA 3D Printer	23
Εικόνα 15: DLP 3D Printer	24
Εικόνα 16: SLS 3D Printer	25
Εικόνα 17: SLM 3D Printer.....	26
Εικόνα 18: Material Jetting	27
Εικόνα 19: Blinder Jetting.....	28
Εικόνα 20: Direct Energy Deposition	29
Εικόνα 21: Direct Energy Deposition.....	30
Εικόνα 22: Sheet Lamination (SHL)	30
Εικόνα 23: ΜΕΤΑΥΛΙΚΑ	31
Εικόνα 24: Κατηγορίες Μεταϋλικών	32
Εικόνα 25: Negative Index Metamaterials	33
Εικόνα 26: Chiral Electromagnetic Metamaterial	33
Εικόνα 27: Acoustic Metamaterials.....	33
Εικόνα 28: Πλέγμα Μεταϋλικού με Αρνητική Διάθλαση	33
Εικόνα 29: Magnetic Metamaterial.....	34
Εικόνα 30: Mechanical Metamaterials.....	34
Εικόνα 31: Ιστορική αναδρομή Μεταϋλικών.....	36
Εικόνα 32: Κατασκευή Μηχανικών Μεταϋλικών μέσω 3D Printing.....	37
Εικόνα 33: Μηχανικά Μεταϋλικά	38
Εικόνα 34: Αυξητικό Υλικό	39
Εικόνα 35: Συμπεριφορά Αυξητικών Υλικών στην διείδυση κατά την κρουστική αξονική Θλίψη	39
Εικόνα 36: Επέκταση της ρωγμής σε ένα στερεό κελί	40
Εικόνα 37: Συντελεστής απόσβεσης - συχνότητας ηχητικού κύματος	40
Εικόνα 38: Η καμπυλότητα σε συμβατικά υλικά και η καμπυλότητα σε αυξητικά υλικά	41
Εικόνα 39: Λόγος Poisson	42
Εικόνα 40: Λόγος Poisson στα αυξητικά υλικά	42
Εικόνα 41: Γενική ταξινόμηση αυξητικών υλικών	43
Εικόνα 42: Δομές αυξητικών υλικών.....	44
Εικόνα 43: Πενταμοδικό Μεταϋλικό.....	45
Εικόνα 44: Υλικά Δικτυωτού Πλέγματος.....	45
Εικόνα 45: Δομές Origami & Kirigami.....	46

Εικόνα 46: Ελικοειδή Μεταλλικά	47
Εικόνα 47: Παραδείγματα Φυσικών και Συνθετικών πολυμερών	49
Εικόνα 48: Κατηγορίες Πολυμερών Υλικών.....	49
Εικόνα 49: Διαφημιστικό της GOODYEAR το 1930.....	50
Εικόνα 50: Βακελίτης	50
Εικόνα 51: Χρονολογίες Εφεύρεσης Πολυμερών Υλικών.....	51
Εικόνα 52: Πίνακας Πολυμερών Υλικών	52
Εικόνα 53: Παραδείγματα Θερμοπλαστικών Υλικών.....	52
Εικόνα 54: Παραδείγματα Θερμοσκληρυνόμενων Υλικών	53
Εικόνα 55: Παραδείγματα Ελαστομερών Υλικών	54
Εικόνα 56: Παγκόσμια παραγωγή πλαστικών	56
Εικόνα 57: Απόρριψη Πλαστικών στο Φυσικό Περιβάλλον.....	57
Εικόνα 58: Πλαστικά στις Θάλασσες.....	57
Εικόνα 59: Πλαστικά στην Ελλάδα.....	58
Εικόνα 60: Ποσοστά ανακύκλωσης στην Ευρωπαϊκή Ένωση	59
Εικόνα 61: Πραγματικότητα Βιοπλαστικών και 100% ανακυκλώσιμων συσκευασιών.....	61
Εικόνα 62: Ορθή Τάση	62
Εικόνα 63: Διατμητική Τάση	62
Εικόνα 64: Ορθή Παραμόρφωση	63
Εικόνα 65: Διατμητική Παραμόρφωση.....	63
Εικόνα 66: Εφελκυσμός.....	64
Εικόνα 67: Ανάλυση Καμπύλης Εφελκυσμού	64
Εικόνα 68: Θλίψη.....	65
Εικόνα 69: Διάγραμμα Όγκιμων Υλικών.....	65
Εικόνα 70: Διάγραμμα Ψαθυρών Υλικών	65
Εικόνα 71: Αστοχία Λυγισμού.....	66
Εικόνα 72: Στρέψη.....	66
Εικόνα 73: Αστοχία λόγω Στρέψης.....	66
Εικόνα 74: Μέγιστη Ορθή Τάση	67
Εικόνα 75: Τύποι Τάσεων Στρέψης.....	67
Εικόνα 76: Κύκλος Παραγωγής και Τεχνολογίες CAD - CAE - CAM.....	69
Εικόνα 77: Συστήματα CAD - CAE - CAM.....	70
Εικόνα 78: Sketchpad	71
Εικόνα 79: Πρόγραμμα τύπου AutoCAD.....	72
Εικόνα 80: Πρόγραμμα τύπου Solidworks	72
Εικόνα 81: CAE	73
Εικόνα 82: CAE	73
Εικόνα 83: CAM	74
Εικόνα 84: CAM	74
Εικόνα 85: Ιδιότητες NYLON PA 12	76
Εικόνα 86: Δομή Α.....	77
Εικόνα 87: Δομή Α – Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση	78
Εικόνα 88: Δομή Α – Μετατοπίσεις X-Y-Z.....	78
Εικόνα 89: Δομή Β.....	79
Εικόνα 90: Δομή Β – Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση.....	80
Εικόνα 91: Δομή Β – Μετατοπίσεις X-Y-Z	80
Εικόνα 92: Δομή Γ	81
Εικόνα 93: Δομή Γ – Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση.....	82

Εικόνα 94: Δομή Γ - Μετατοπίσεις X-Y-Z.....	82
Εικόνα 95: Δομή 1.....	83
Εικόνα 96: Δομή 1 – Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση.....	84
Εικόνα 97: Δομή 1 - Μετατοπίσεις X-Y-Z.....	84
Εικόνα 98: Δομή 1 – Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση.....	85
Εικόνα 99: Δομή 1 - Μετατοπίσεις X-Y-Z.....	86
Εικόνα 100: Απόσταση R – Δομή 1.....	87
Εικόνα 101: Δομή 2.....	88
Εικόνα 102: Δομή 2 – Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση.....	89
Εικόνα 103: Δομή 2 -Μετατοπίσεις X-Y-Z.....	89
Εικόνα 104: Δομή 2 – Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση.....	90
Εικόνα 105: Δομή 2 - Μετατοπίσεις X-Y-Z.....	91
Εικόνα 106: Απόσταση R – Δομή 2.....	92
Εικόνα 107: Άνω Όψη Δομής 2 - ΣΤΡΕΨΗ.....	92
Εικόνα 108: Βέλτιστη Δομή Μεταϊλικού – Εξαγωνικής Μορφής Στοιχειώδους Κυψελίδας.....	93
Εικόνα 109: Δομή 3.....	94
Εικόνα 110: Δομή 3 – Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση.....	95
Εικόνα 111: Δομή 3 - Μετατοπίσεις X-Y-Z.....	95
Εικόνα 112: Δομή 3 – Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση.....	96
Εικόνα 113: Δομή 3 - Μετατοπίσεις X-Y-Z.....	97
Εικόνα 114: Απόσταση R – Δομή 4.....	98
Εικόνα 115: Δομή 4.....	99
Εικόνα 116: Δομή 4 – Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση.....	100
Εικόνα 117: Δομή 4 - Μετατοπίσεις X-Y-Z.....	100
Εικόνα 118: Δομή 4 – Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση.....	101
Εικόνα 119: Δομή 4 - Μετατοπίσεις X-Y-Z.....	102
Εικόνα 120: Απόσταση R - Δομή 4.....	103
Εικόνα 121: Άνω Όψη Δομής 4 - ΣΤΡΕΨΗ.....	103
Εικόνα 122: HP Jet Fusion 5200.....	104
Εικόνα 123: Τρισδιάστατες Εκτυπωμένες Δομές.....	105
Εικόνα 124: Σερβοϋδραυλική μηχανή δοκιμών.....	107
Εικόνα 125: Διάγραμμα Δομής 1.....	108
Εικόνα 126: Πείραμα Δομής 1.....	108
Εικόνα 127: Στιγμιότυπο την Στιγμή της Αστοχίας – Δομή 1.....	109
Εικόνα 128: Διάγραμμα Δομής 2.....	110
Εικόνα 129: Πείραμα Δομής 2.....	110
Εικόνα 130: Στιγμιότυπο την Στιγμή της Αστοχίας - Δομή 2.....	111
Εικόνα 131: Διάγραμμα Δομής 3.....	112
Εικόνα 132: Πείραμα Δομής 3.....	112
Εικόνα 133: Στιγμιότυπο την Στιγμή της Αστοχίας - Δομή 3.....	113
Εικόνα 134: Διάγραμμα Δομής 4.....	114
Εικόνα 135: Πείραμα Δομής 4.....	114
Εικόνα 136: Στιγμιότυπο την Στιγμή της Αστοχίας – Δομή 4.....	115
Εικόνα 137: Αποτελέσματα Δυσκαμψίας Δομής 1-2-3-4.....	120
Εικόνα 138: Αποτελέσματα Συντελεστή Σύζευξης Στρεπτικών - Θλιπτικών Παραμορφώσεων για την Δομή 1-2-3-4.....	121
Εικόνα 139: Πειραματικά Αποτελέσματα (LOAD) για την Δομή 1-2-3-4.....	122
Εικόνα 140: Πειραματικά Αποτελέσματα (EXTENSION) για την Δομή 1-2-3-4.....	122

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα υλικά αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της ζωής μας και είναι βαθιά συνδεδεμένα με τον πολιτισμό μας, παρέχοντας τη βάση για τα προϊόντα και τις τεχνολογίες στις οποίες βασιζόμαστε καθημερινά. Από τα ρούχα που φοράμε μέχρι τις συσκευές που χρησιμοποιούμε, τα υλικά παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση του κόσμου στον οποίο ζούμε.

Η επιστήμη των υλικών είναι ο τομέας που μελετά τις ιδιότητες, τη δομή και τη σύνθεση των υλικών, καθώς και την επεξεργασία, το σχεδιασμό και τις εφαρμογές τους. Περιλαμβάνει την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο συμπεριφέρονται διαφορετικά υλικά κάτω από διάφορες συνθήκες και πώς μπορούν να τροποποιηθούν για να καλύψουν συγκεκριμένες ανάγκες.

Η εμφάνιση της τεχνολογίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης – 3D printing έχει φέρει επανάσταση στον τομέα της επιστήμης των υλικών, επιτρέποντας την κατασκευή πολύπλοκων και προσαρμοσμένων δομών με πρωτοφανή ακρίβεια και ταχύτητα. Η σύνδεση μεταξύ της τρισδιάστατης εκτύπωσης και των υλικών είναι θεμελιώδης, καθώς η επιλογή του υλικού που χρησιμοποιείται στην τρισδιάστατη εκτύπωση έχει άμεσο αντίκτυπο στις ιδιότητες και την απόδοση του τελικού προϊόντος. Η δυνατότητα επιλογής από ένα ευρύ φάσμα υλικών, συμπεριλαμβανομένων μετάλλων, πλαστικών, κεραμικών και σύνθετων υλικών, επέτρεψε τη δημιουργία εξαιρετικά λειτουργικών και ευέλικτων αντικειμένων, όπως ιατρικά εμφυτεύματα, εξαρτήματα αεροδιαστημικής και καταναλωτικά προϊόντα.

Ο τομέας των μεταλλικών αναδείχθηκε πρόσφατα ως ένας πολλά υποσχόμενος τομέας έρευνας, με τη δυνατότητα να φέρει επανάσταση σε πολλές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των επικοινωνιών, των αισθητήρων ανίχνευσης, της συλλογής ενέργειας, της αεροδιαστημικής και της θωράκισης κατασκευών. Τα μεταλλικά είναι τεχνητά υλικά κατασκευασμένα ώστε να έχουν μοναδικές ιδιότητες που δεν υπάρχουν στη φύση.

Ο συνδυασμός των μεταλλικών, της τρισδιάστατης εκτύπωσης και της επιστήμης των υλικών έχει ανοίξει νέους δρόμους για έρευνα και καινοτομία.

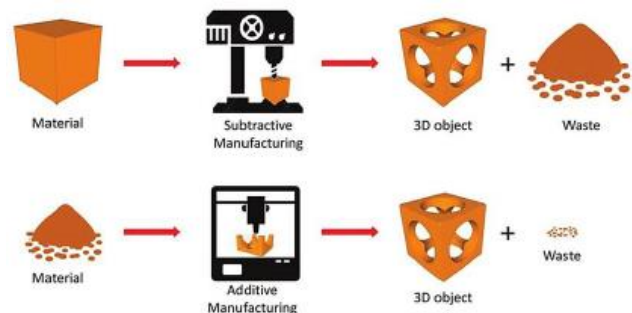
ΚΕΦ.1: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ 3D PRINTING

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης - 3D printing ή αλλιώς **προσθετικής κατασκευής - Additive Manufacturing** ορίζεται ως μια διαδικασία παραγωγής και κατασκευής τριών διαστάσεων στερεών αντικειμένων, όπου προκύπτουν από τρισδιάστατα σχέδια μέσω του Η/Υ (Computer Aided Design - CAD).

Στον κλάδο του 3D printing υπάρχει ένα πλήθος τεχνολογιών μεθόδων παραγωγής και κατασκευής που επεξεργάζονται διαφορετικά υλικά, με τις πιο διαδεδομένες στην κατηγορία των οικιακών εκτυπωτών την μέθοδο της Μοντελοποίησης Συντηγμένης Εναπόθεσης Υλικού (Fused Deposition Modeling - FDM) και την μέθοδο της Στερεολιθογραφίας (Stereolithography - SLA).

Η διαδικασία της κατασκευής του φυσικού μοντέλου πραγματοποιείται με την εναπόθεση υλικού σε διαδοχικά επίπεδα (Layers) μέχρι την πλήρη κατασκευή του. Η διαδικασία αυτή έρχεται σε πλήρη αντίθεση με την παραδοσιακή μέθοδο της Αφαιρετικής Κατασκευαστικής - Subtractive Manufacturing, κατά την οποία το πρωτογενές υλικό από το οποίο θα αποτελείται το αντικείμενο, τεμαχίζεται και υπόκειται σε διατρήσεις μέχρι να φτάσει στο επιθυμητό τελικό αποτέλεσμα (Εικόνα 1).

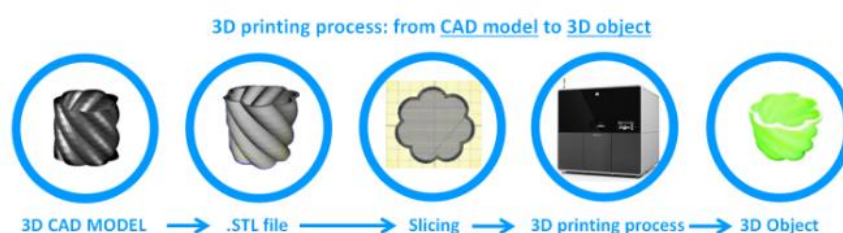


Εικόνα 1: Απόβλητα Τρισδιάστατης Εκτύπωσης σε αντίθεση με την Αφαιρετική Κατασκευή

Οι εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτύπωσης αναδύονται σχεδόν μέρα με τη μέρα, καθώς αυτή η τεχνολογία συνεχίζει να διεισδύει ευρύτερα και βαθύτερα σε κλάδους της βιομηχανίας, των κατασκευαστών και των καταναλωτών.

Το *American Society for Testing and Materials (ASTM)* προσδίδει την Τρισδιάστατη εκτύπωση – 3D printing ως:

«Η διαδικασία συνένωσης υλικών για την κατασκευή αντικειμένων από δεδομένα 3D μοντέλων, συνήθως μετά από στρώση, σε αντίθεση με αφαιρετικές μεθόδους παραγωγής».



Εικόνα 2: Διαδικασία Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

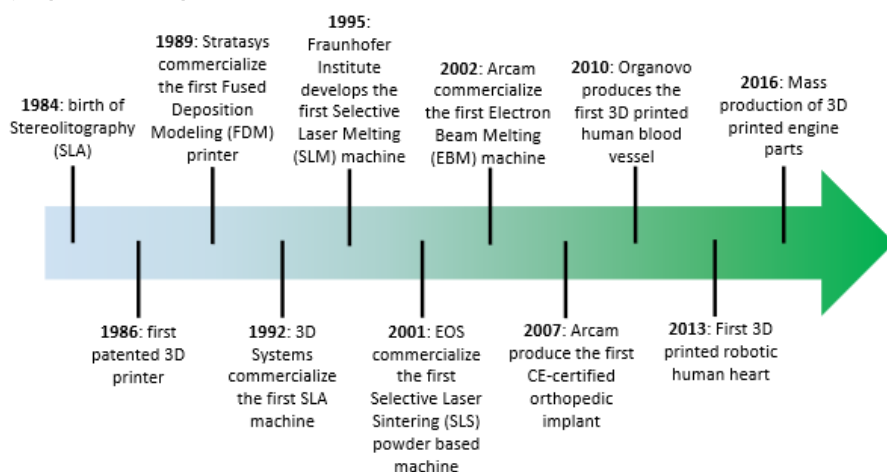
1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΗΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ

Αν και η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μια νέα τεχνολογία, η πρώτη καταγεγραμμένη ιστορικά αναφορά για την τρισδιάστατη εκτύπωση έγινε το **1974**, όταν ο **David E. H. Jones** παρουσίασε για πρώτη φορά την έννοια του 3D printing στην καθιερωμένη του στήλη Ariadne στο περιοδικό New Scientist.

Ο πρώτος εξοπλισμός 3D printing και τα αντίστοιχα υλικά κατασκευής αναπτύχθηκαν στη δεκαετία του **1980** από τον **Dr. Hideo Kodama** στην Ιαπωνία. Το 1981 εφηύρε δύο μεθόδους κατασκευής τρισδιάστατων πλαστικών αντικειμένων με θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές χρησιμοποιώντας ακτινοβολία UV. Δυστυχώς όμως, δεν κατατέθηκε η πλήρης περιγραφή της τεχνολογίας, εντός της χρονικής προθεσμίας, με αποτέλεσμα να μην μπορέσει να διεκδικήσει το ανάλογο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας.

Το **1984** ήταν η σημαδιακή χρονιά για την τρισδιάστατη εκτύπωση, όπου ο **Charles “Chuck” Hull**, πρότεινε να τοποθετηθούν οι λάμπες UV στην σκλήρυνση της υγρής ρητίνης ανά στρώση, δημιουργώντας τελικά ένα στερεό τρισδιάστατο αντικείμενο.

Το **1986** εκδόθηκε το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας στον **Charles “Chuck” Hull** με το όνομα της συγκεκριμένης τεχνολογίας «Στερεολιθογραφία – Stereolithography». Την ίδια χρονιά ο ίδιος ξεκίνησε την δική του εταιρεία «3D Systems» στη Βαλένθια της Καλιφόρνια, όπου κυκλοφόρησε το 1988 το πρώτο του εμπορικό προϊόν με τον κωδικό SLA-1. Σήμερα, η «3D Systems» είναι μία από τις μεγαλύτερες εταιρίες τρισδιάστατων εκτυπωτών με συνολική αξία 1.4 δισεκατομμύρια δολάρια.

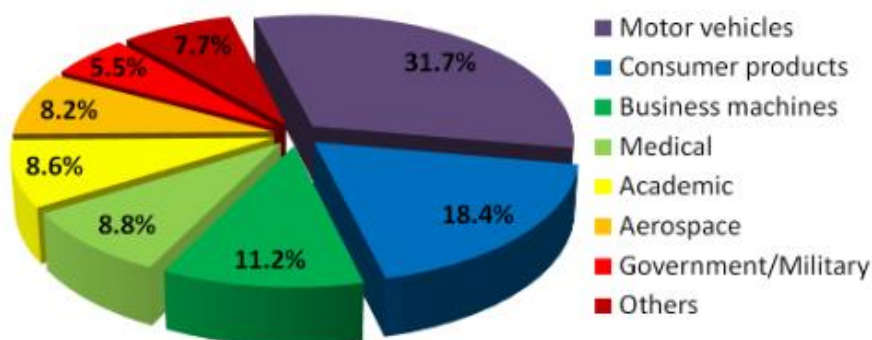


Εικόνα 3: Ιστορική Αναδρομή Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

Η τρισδιάστατη εκτύπωση ακολούθησε μια έντονη εξελίξιμη πορεία, όπως βλέπουμε και στο διάγραμμα παραπάνω (Εικόνα 3).

Από το 2010 και έπειτα οι πατέντες που είχαν κατοχυρωθεί για τις διάφορες τεχνολογίες που εφευρέθηκαν, άρχισαν να λήγουν, με αποτέλεσμα την έντονη αύξηση των εταιρειών που ασχολούνται με αυτές τις τεχνολογίες. Το επόμενο αποτέλεσμα, μετά την αύξηση των εταιριών, ήταν η ραγδαία μείωση του κόστους σε ποσοστό άνω του **95%** των εκτυπωτών και των αναλώσιμων υλικών. Η μείωση του συνολικού κόστους, μαζί με την διάχυση της γνώσης που απαιτείται για την χρήση των τρισδιάστατων εκτυπωτών, οδηγεί στην ολοένα και αυξανόμενη διάδοση τους.

Σήμερα, η τρισδιάστατη εκτύπωση χρησιμοποιείται (Εικόνα 4) για ένα ευρύ φάσμα βιομηχανικών εφαρμογών, όπως στην παραγωγή μηχανικών μερών, καθώς και για καταναλωτικά προϊόντα. Επίσης, τα τελευταία χρόνια έχει κάνει έντονα την εμφάνιση της στην Ιατρική λόγω της δυνατότητας εκτύπωσης προσαρμοσμένων προϊόντων με πολύ χαμηλό κόστος, κάτι το οποίο δεν ήταν εφικτό μέχρι πριν λίγα χρόνια.



Εικόνα 4: Εφαρμογές Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

Οι τεχνολογίες του 3D printing ταξινομούνται σύμφωνα με το **ISO/ASTM 52900** σε επτά (7) βασικές κατηγορίες, οι οποίες χωρίζονται σε διάφορους μεθόδους ανάλογα με τον τρόπο που τοποθετούν και συνδέουν τις διαδοχικές στρώσεις και ως προς η μορφή και σύσταση των πρώτων υλών που χρησιμοποιούν. Οι κατηγορίες αυτές χωρίζονται σε:

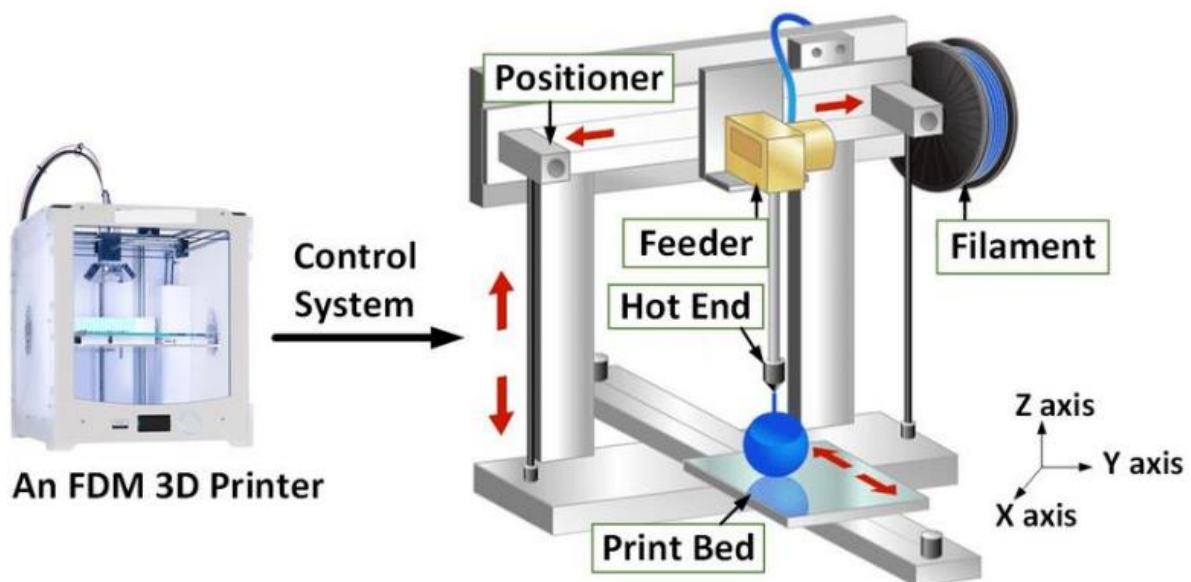
1. Εξώθηση Υλικού - **Material Extrusion**
2. Φωτοπολυμερισμός - **Vat Photopolymerisation**
3. Σύντηξη Στρώματος Σκόνης - **Powder Bed Fusion**
4. Ψεκασμός Υλικού - **Material Jetting**
5. Ψεκασμός Συγκολλητικού Υλικού - **Binder Jetting**
6. Κατευθυνόμενη Εναπόθεση Ενέργειας - **Directed Energy Deposition**
7. Συγκόλληση Φύλλων - **Sheet Lamination**

1.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΤΟΥ 3D PRINTING

1.3.1 ΕΞΩΘΗΣΗ ΥΛΙΚΟΥ – MATERIAL EXTRUSION

Μοντελοποίηση Συντηγμένης Εναπόθεσης Υλικού - Fused Deposition Modeling (FDM)

Η κυριότερη τεχνολογία εξώθησης υλικού – Material Extrusion είναι η Fused Deposition Modeling – FDM (Εικόνα 5) ή αλλιώς Fused Filament Fabrication – FFF, όπου η κατασκευή επιτυγχάνεται μέσω σύντηξης νημάτων. Βασίζεται στην τήξη και την επιλεκτική εναπόθεση μιας λεπτής ίνας θερμοπλαστικού για τον σχηματισμό αλληπάλληλων στρώσεων οι οποίες και θα δημιουργήσουν το τελικό αντικείμενο. Χαρακτηρίζεται από υψηλή σχέση απόδοσης/τιμής συγκριτικά με άλλες μεθόδους ταχείας προτυποποίησης ή συμβατικής παραγωγής. Τα παραγόμενα αντικείμενα είναι ανθεκτικά και συνήθως έτοιμα προς χρήση χωρίς να απαιτείται κάποια πρόσθετη επεξεργασία. Υστερεί στο σχηματισμό πολύ λεπτών χαρακτηριστικών και στο βαθμό λεπτομέρειας που μπορεί να αποτυπώσει. Ωστόσο, το γεγονός ότι είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία 3D printing προκύπτουν και αναπτύσσονται συνεχώς νέα υλικά που προσδίδουν στα αντικείμενα ειδικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά.

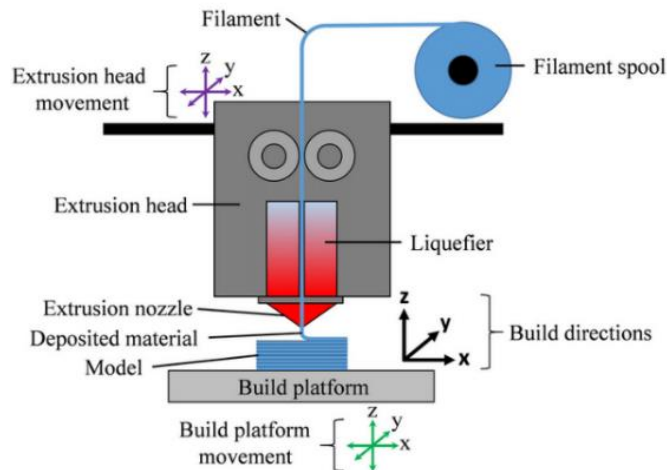


Εικόνα 5: FDM 3D Printer

Η μέθοδος Fused Deposition Modeling - FDM αναπτύχθηκε από τον **Scott Crump**, συνιδρυτή της Stratasys, το **1989**.

Τρόπος Λειτουργίας Fused Deposition Modeling (FDM)

Το καρούλι που περιέχει το υλικό σε μορφή νήματος, τροφοδοτεί μέσω μιας κινούμενης θερμαινόμενης κεφαλής (εξωθητής) και εναποτίθεται στην προηγούμενη στρώση της κατασκευής. Αυτή η θερμαινόμενη κεφαλή και η βάση εκτύπωσης κινούνται από κοινού κατά μήκος, πλάτος και ύψος. Με τον τρόπο αυτό το μηχάνημα δημιουργεί ένα στρώμα αυτού του μέρους, η βάση κινείται, δημιουργεί άλλο ένα στρώμα και ούτω καθεξής. Η ένωση αυτών των στρωμάτων δημιουργεί το αντικείμενο (Εικόνα 6).



Εικόνα 6: Τρόπος Λειτουργίας ενός FDM 3D Printer

Τα πιο δημοφιλή υλικά που χρησιμοποιούνται στους FDM 3D printers είναι το **PLA - Polylactic Acid** και το **ABS - Acrylonitrile Butadiene Styrene**. Άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται στους FDM 3D printers είναι το PETG, NYLON, TPU, PVA, HIPS και το ASA. Ωστόσο, η λίστα με τα υλικά περιέχει κι άλλα νέα υβριδικά αναλώσιμα με προσμίξεις διαφόρων πολυμερών και υλικών, όπως αναλώσιμα που αποτελούνται σαν βάση από PLA (Εικόνα 7) στο οποίο έχουν προστεθεί ρινίσματα χαλκού ή μπρούτζου ή ακόμα και ανθρακονήματα.

Πολυγαλακτικό Οξύ – PLA

Το **PLA (Polylactic Acid)** είναι ένας βιοδιασπώμενος και βιολογικός θερμοπλαστικός αλειφατικός πολυεστέρας που προέχεται από ανανεώσιμες πηγές, όπως το άμυλο καλαμποκιού, το ζαχαροκάλαμο και το ζαχαρότευτλο.

Είναι εύκολο και γρήγορο στην χρήση, καθώς δεν έχει ιδιαίτερες απαιτήσεις στην εκτύπωση του.



Εικόνα 7: PLA

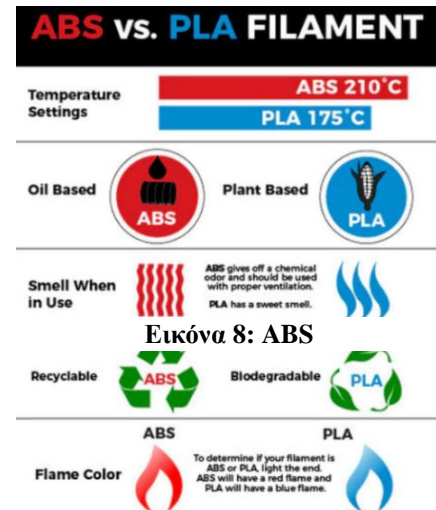
Είναι ένα από τα πιο φιλικά προς το περιβάλλον νήματα με πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες και το κόστος του είναι αρκετά χαμηλό.

Ωστόσο, σαν μειονέκτημα μπορεί να θεωρηθεί ότι το νήμα είναι αρκετά εύθραυστο και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μοντέλα που εκτίθενται στον ήλιο διότι αλλάζει το χρώμα του.

Ακρυλονιτρίλιο Βουταδιένιο Στυρόλιο – ABS

Το **ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)** είναι ένα κοινό πολυμερές θερμοπλαστικό, το οποίο παράγεται από το πετρέλαιο.

Σε σύγκριση με το PLA, το ABS (Εικόνα 8) έχει ανώτερα μηχανικά χαρακτηριστικά όπως και μεγαλύτερη αντοχή και κρούση, καθώς και παρουσιάζει ανθεκτικότητα σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Ωστόσο, το συγκεκριμένο υλικό έχει κάποιες απαιτήσεις κατά την διάρκεια της εκτύπωσης, καθώς είναι ένα τοξικό υλικό και χρειάζεται πολύ καλό αερισμό ενώ εκτυπώνεται.



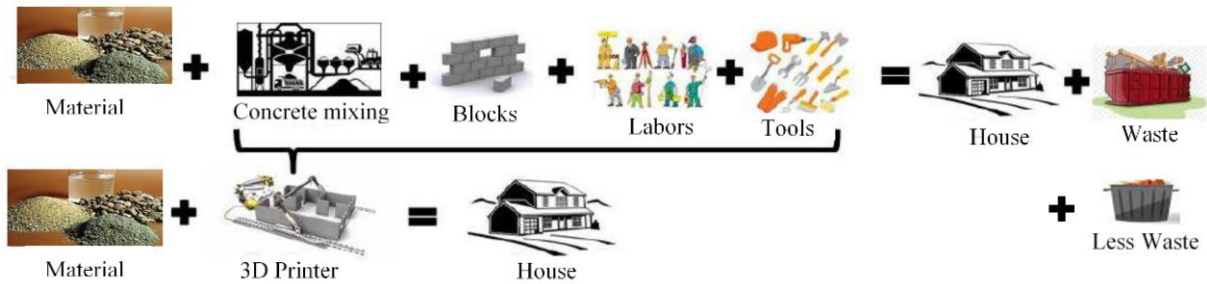
Τρισδιάστατη Εκτύπωση στην Ανοικοδόμηση Κτηρίων - Construction 3D Printing

Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης με την μέθοδο της εξώθησης υλικού έχει κάνει την εμφάνιση της, τα τελευταία χρόνια και στον κατασκευαστικό τομέα και πιο συγκεκριμένα στον τομέα των κτηριακών κατασκευών (Εικόνα 9).

Αυτή η τεχνολογία περιλαμβάνει εξαιρετικά μεγάλης κλίμακας τρισδιάστατους εκτυπωτές, σε διαστάσεις δεκάδων μέτρων, για την εξώθηση οικοδομικού υλικού από το ακροφύσιο, όπως το σκυρόδεμα.



Εικόνα 9: 3D Εκτυπωμένο Σπίτι



Εικόνα 10: Απόβλητα Construction 3D Printing σε αντίθεση με τις Συμβατικές μεθόδους

Στα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι η υψηλή ταχύτητα κατασκευής, τα μειωμένα απόβλητα (Εικόνα 10), η μείωση του εργατικού κόστους και η ευελιξία σχεδιασμού σε πολύπλοκες δομές.

Τρισδιάστατη Βιοεκτύπωση - 3D Bioprinting

Η Τρισδιάστατη Βιοεκτύπωση – 3D Bioprinting (Εικόνα 11) είναι μία μέθοδος που επιτρέπει την κατασκευή κυτταρικών δομών και ιστών, χρησιμοποιώντας οργανικά ή βιολογικά υλικά, όπως ζωντανά κύτταρα και αυξητικούς παράγοντες.

Η εκτύπωση πραγματοποιείται με την μέθοδο εξώθησης υλικού (βιοϋλικού) και η εκτύπωση γίνεται εναποτίθοντας το βιοϋλικό στοιβάδα-στοιβάδα για την δημιουργία δέρματος, ιστού ή ακόμα και οργάνου.



Εικόνα 11: 3D Bioprinting

Τα βιοϋλικά που χρησιμοποιούνται απορρίπτονται από μια βελόνα ώστε να δημιουργηθούν τα στρώματα. Είναι γνωστά και ως βιομελάνια (Bioink) και αποτελούνται κυρίως από ζωντανή ύλη, όπως κύτταρα μέσα σε ένα υλικό φορέα.

Εφαρμογές Τρισδιάστατης Βιοεκτύπωσης

- Κατασκευή τεχνητών οργάνων για μεταμοσχεύσεις, ειδικά για κάθε ασθενή
- Κατασκευή ιστών για εξέταση αποτελεσματικότητας φαρμάκων
- Πλαστική χειρουργική για τεχνητά μοσχεύματα δέρματος
- Ανάπλαση Ιστών
- Οδοντιατρική

Μέχρι και σήμερα έχουν καταφέρει να εκτυπωθούν σε πειραματικό στάδιο βιολογική τρισιδιάστατη καρδιά, νεφρό, κερατοειδής, ωθήκη, ήπαρ, πάγκρεας, δέρμα (Εικόνα 12) και αυτιά (Εικόνα 13). Ωστόσο, κανένα από τα εκτυπωμένα προϊόντα δεν έχει εγκριθεί ακόμη για ανθρώπινη χρήση.



Εικόνα 12: 3D Εκτυπωμένο Δέρμα



Before and after the 3-D printed ear transplant. PHOTO: COURTESY DR. ARTURO BONILLA MICROTIA - CONGENITAL EAR INSTITUTE

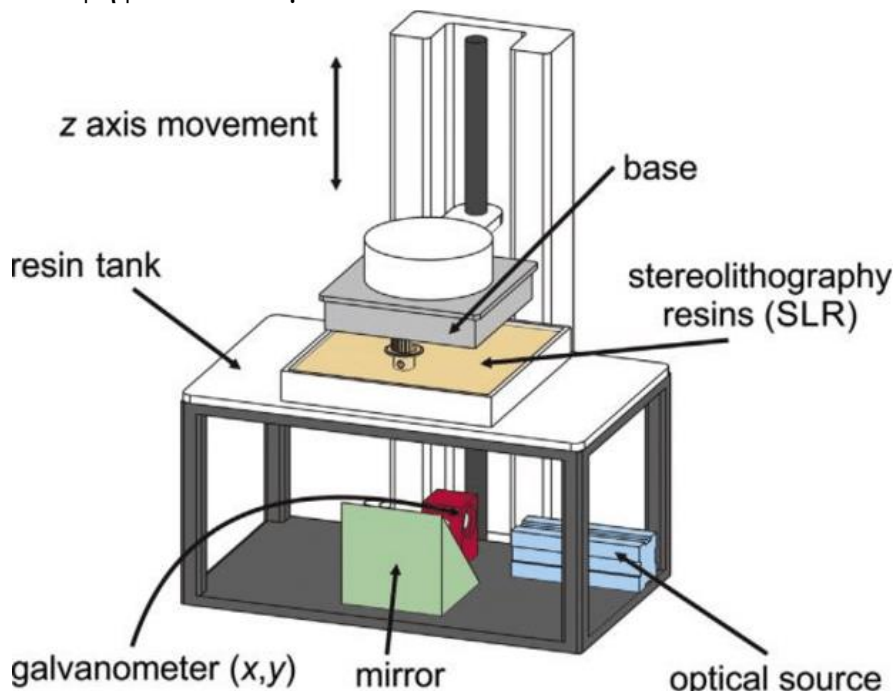
Εικόνα 13: Μεταμόσχευση Βιο-τυπωμένου Αυτιού

Εξαιρεση αποτελεί, η πρώτη στον κόσμο μεταμόσχευση βιο-τυπωμένου αυτιού από ζωντανά κύτταρα που πραγματοποιήθηκε από τον Dr. Arturo Bonilla το 2022. Αυτό αντιπροσωπεύει ένα τεράστιο βήμα στον κόσμο της βιοεκτύπωσης που δίνει το έναυσμα για την προσπάθεια νέων εφαρμογών.

1.3.2 ΦΩΤΟΠΟΛΥΜΕΡΙΣΜΟΣ - VAT PHOTOPOLYMERISATION

Στερεολιθογραφία - Stereolithography (SLA)

Η Στερεολιθογραφία (Εικόνα 14) επιτυγχάνεται μέσω του **φωτοπολυμερισμού** πολύ λεπτών στρώσεων, ειδικών για 3D εκτύπωση, υγρών ρητινών. Οι ρητίνες αυτές έχουν τη ξεχωριστή ιδιότητα να στερεοποιούνται όταν εκτίθενται σε υπεριώδη ακτινοβολία (UV). Με αυτό τον τρόπο παίρνει μορφή και ενσωματώνεται η κάθε μια στρώση πάνω στην άλλη σχηματίζοντας το φυσικό αντίγραφο του ψηφιακού 3D μοντέλου.



Εικόνα 14: SLA 3D Printer

Μετά την εκτύπωση, το αντικείμενο ανασηκώνεται από την δεξαμενή ρητίνης, χωρίς να έχει επιτευχθεί πλήρης σκλήρυνση του και απαιτεί περαιτέρω επεξεργασία κάτω από υπεριώδες φως και θερμοκρασία ώστε να αποκτήσει υψηλές μηχανικές και θερμικές ιδιότητες.

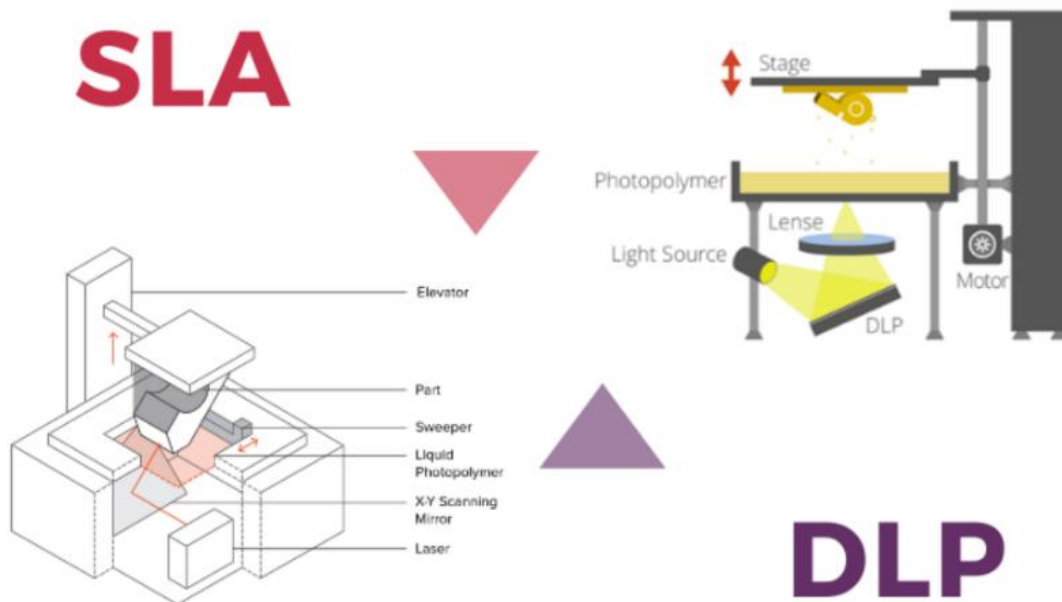
Η Στερεολιθογραφία παράγει αντικείμενα **εξαιρετικής ποιότητας, ακρίβειας και λεπτομέρειας** σε τέτοιο βαθμό ώστε τις περισσότερες φορές είναι δύσκολο να διακρίνουμε εάν το αντικείμενο είναι το τελικό προϊόν και όχι ένα εκτυπωμένο πρωτότυπο. Η επιλογή της ρητίνης που θα χρησιμοποιηθεί προσδίδει στο αντικείμενο συγκεκριμένα χαρακτηριστικά όπως δυνατότητα χύτευσης, αυξημένη αντοχή, ελαστικότητα και ούτω καθεξής.

Ψηφιακή Επεξεργασία Φωτός - Digital Light Processing (DLP)

Η τεχνολογία της Ψηφιακής Τεχνολογίας Φωτός – DLP (Εικόνα 15) είναι παρόμοια με την Στερεολιθογραφία - SLA, με την μόνη διαφορά ότι η συγκεκριμένη τεχνολογία χρησιμοποιεί projector ως πηγή φωτός αντί για laser που χρησιμοποιεί η μέθοδος της Στερεολιθογραφίας - SLA.

Αυτή η βασική διαφορά, επιτρέπει στην τεχνολογία DLP να μπορεί να εκτυπώνει ταχύτερα σε σύγκριση με την SLA, καθώς οι στρώσεις του αντικειμένου εκτίθενται στην πηγή φωτός μονομιάζ, έναντι του laser που εκτίθεται σημειακά. Όλη η υπόλοιπη μέθοδος είναι ίδια με την Στερεολιθογραφία - SLA.

Το υλικό εκτύπωσης που χρησιμοποιείται είναι και αυτό το ίδιο με την Στερεολιθογραφία - SLA, δηλαδή υγρή ρητίνη.

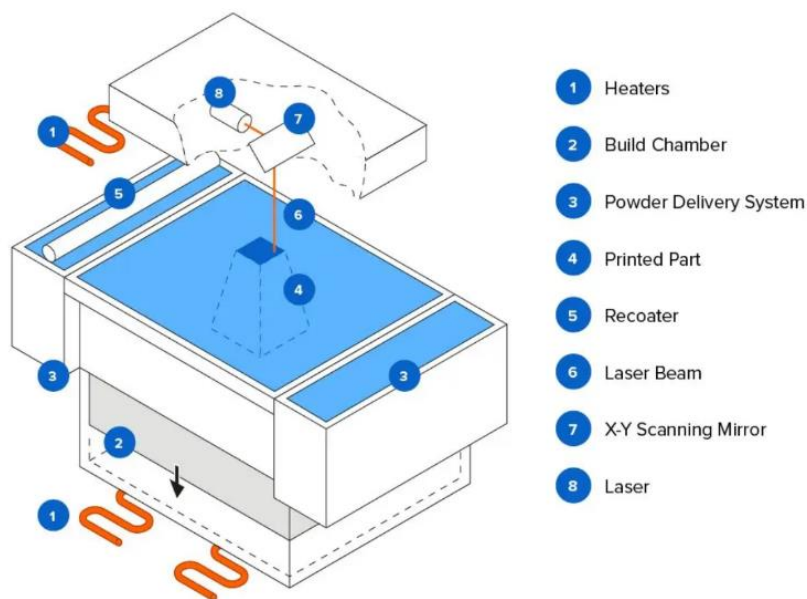


Εικόνα 15: DLP 3D Printer

1.3.3 ΣΥΝΤΗΞΗ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΣΚΟΝΗΣ - POWDER BED FUSION

Επιλεκτική Σύντηξη με την χρήση ακτινών λέιζερ - Selective Laser Sintering (SLS)

Η τεχνολογία Selective Laser Sintering – SLS (Εικόνα 16) χρησιμοποιεί υλικό με μορφή πούδρας, όπου ένα «laser» τήκει τα σωματίδια μεταξύ τους, ανά στρώση. Η όλη διαδικασία λαμβάνει μέρος σε θερμαινόμενο θάλαμο. Πρώτα ένα λεπτό στρώμα πούδρας στρώνεται στο θάλαμο εκτύπωσης και ένα laser λιώνει τα σωματίδια της πούδρας στα επιθυμητά σημεία. Έπειτα, ο θάλαμος εκτύπωσης κατεβαίνει και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.



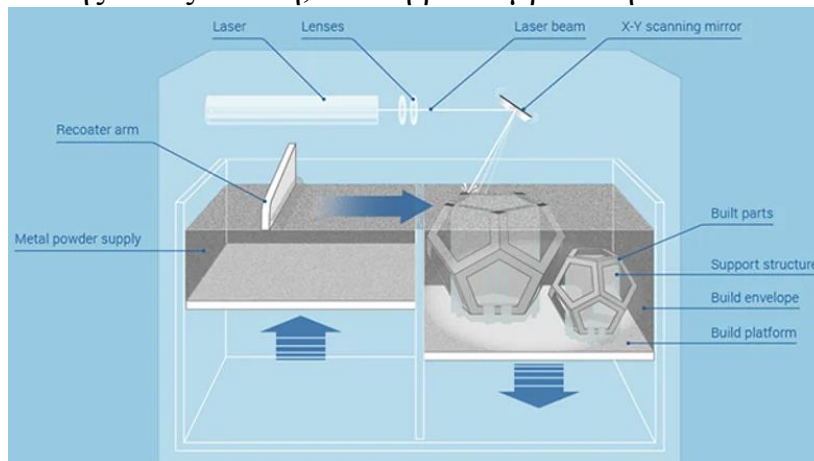
Εικόνα 16: SLS 3D Printer

Ένα τεράστιο πλεονέκτημα της τεχνολογίας SLS είναι πως οι προεξοχές και τα δύσκολα σημεία αντικειμένων δεν χρειάζονται υποστηρικτικό υλικό. Αυτό οφείλεται στο ότι πυκνή πούδρα περιβάλλει το τρισδιάστατο κομμάτι μέχρι να εκτυπωθεί, παρέχοντάς του υποστήριξη προτού το εναπομένον υλικό σκουπιστεί για να ξαναχρησιμοποιηθεί. Είναι δυνατό να εκτυπωθεί σημαντική ποσότητα αντικειμένων ανά εκτύπωση, μειώνοντας έτσι το συνολικό χρόνο εκτύπωσης.

Τα αντικείμενα που κατασκευάζονται με αυτή την τεχνολογία είναι **πολύ πυκνά** και έχουν πολύ **μεγάλη αντοχή**. Η ποιότητα της επιφάνειας του αντικειμένου είναι αξιοπρεπής, αλλά επιδέχεται μετέπειτα επεξεργασία γυαλίσματος και επικάλυψης με βερνίκι. Το πιο συνηθισμένο υλικό που χρησιμοποιείται είναι το πολυαμίδιο (PA – polyamide), το οποίο μπορεί να αναμιχθεί με αλουμίνιο, γυαλί ή ανθρακονήματα, με αποτέλεσμα καλύτερη εφαρμογή ή αντοχή στα χημικά. Αυτή η τεχνολογία είναι ιδανική για ανταλλακτικά, πρωτότυπα και λειτουργικά εξαρτήματα.

Επιλεκτική Σύντηξη με την χρήση λέιζερ για μεταλλικούς κόκκους - Selective Laser Melting (SLM)

Το Selective Laser Melting – SLM (Εικόνα 17) είναι μέθοδος προσθετικής κατασκευής που χρησιμοποιεί laser για την σύντηξη μεταλλικών κόκκων (πούδρα) σε στρώσεις για τη δημιουργία ενός στερεού αντικειμένου. Η διαδικασία ξεκινά με την λεπτή επίστρωση μεταλλικής πούδρας πάνω από την πλατφόρμα εκτύπωσης. Το laser σαρώνει τα μέρη της πούδρας που αποτελούν τη βάση του αντικειμένου, τήκοντας και ενώνοντας τους κόκκους σύμφωνα με το τρισδιάστατο σχέδιο. Όταν ολοκληρωθεί η σάρωση της πρώτης στρώσης, η πλατφόρμα εκτύπωσης χαμηλώνει και επαναστρώνεται λεπτή στρώση μεταλλικής πούδρας. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί η κατασκευή του εξαρτήματος. Το σύνθετο υλικό που χρησιμοποιείται στον SLM 3D printer είναι το **ανοξειδωτο ατσάλι 316L**, λόγω της υψηλής αντοχής του, υψηλής αντίστασης σε οξείδωση, και τη βιοσυμβατότητα.



Εικόνα 17: SLM 3D Printer

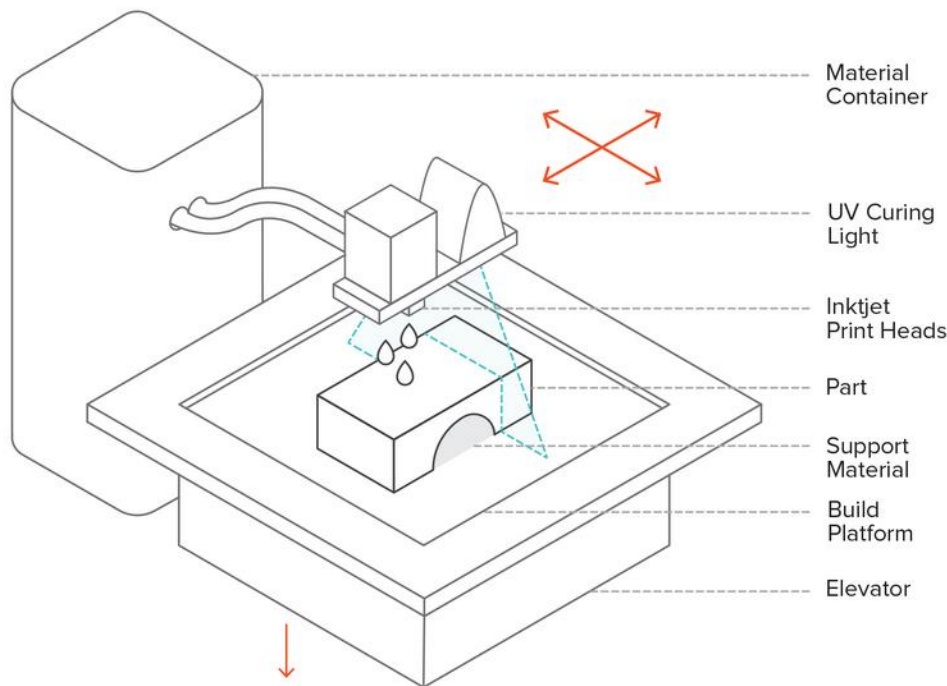
Τα πλεονεκτήματα των SLM 3D printers είναι η δυνατότητα παραγωγής εξαρτημάτων με πολύπλοκες γεωμετρίες και υψηλά επίπεδα ακρίβειας και λεπτομέρειας, καθώς και έχει την δυνατότητα να παράξει εξαρτήματα με εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες.

Ωστόσο, τα βασικά του μειονεκτήματα είναι το υψηλό κόστος σε σχέση με άλλες τεχνολογίες 3D printing, οι απαιτήσεις του σε εξειδικευμένο εξοπλισμό και υλικά, καθώς και ο περιορισμός της ποιότητας επιφάνειας λόγω τραχύτητας.

Λόγο αυτών των καλών μηχανικών ιδιοτήτων, βρίσκει εφαρμογή στην ιατρική βιομηχανία για την κατασκευή εξατομικευμένων εμφυτευμάτων και προσθετικών για χρήση στο ανθρώπινο σώμα, στην βιομηχανία της αεροδιαστημικής για την κατασκευή μερών αεροσκαφών, στην αυτοκινητοβιομηχανία για την παραγωγή μοναδικών εξαρτημάτων για οχήματα υψηλών αποδόσεων, καθώς και στην βιομηχανία πετρελαίου στην παραγωγή εξαρτημάτων διάτρησης και εξόρυξης.

1.3.4 ΨΕΚΑΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ – MATERIAL JETTING

Η μέθοδος ψεκασμού υλικού – Material Jetting (Εικόνα 18) είναι μια μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης, όπου από διάφορες κεφαλές ή ακροφύσια (Inkjet) ψεκάζονται σταγονίδια από θερμοσκληρυνόμενη φωτοπολυμερή ρητίνη και στην συνέχεια μέσω υπεριώδους ακτινοβολίας (UV) στερεοποιούνται. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται στρώση-στρώση μέχρι την δημιουργία του τελικού αντικειμένου.



Εικόνα 18: Material Jetting

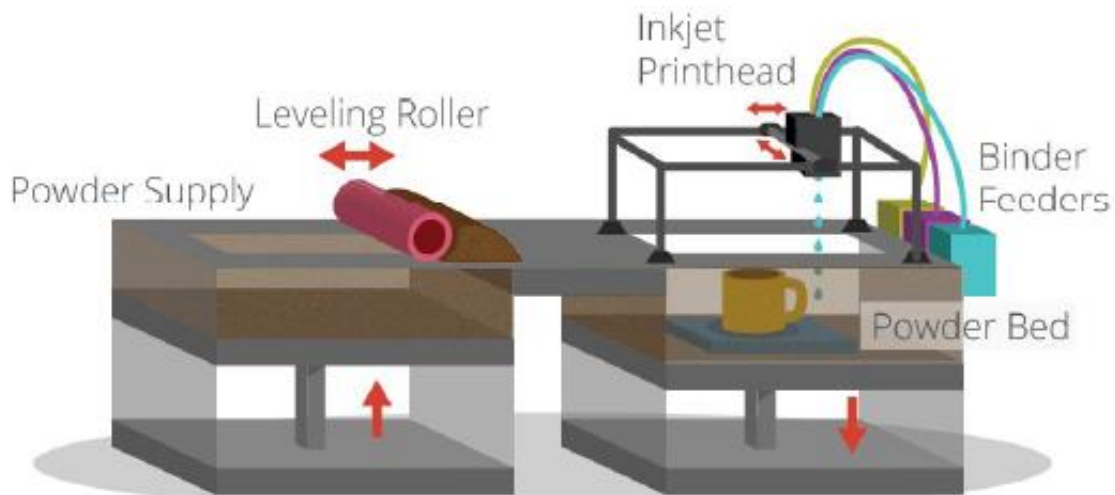
Ο τρόπος λειτουργίας είναι αρκετά παρόμοιος με έναν 2D εκτυπωτή.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι η ταχύτητα, ο μεγάλος χώρος εκτύπωσης, καθώς και το ότι μπορεί να εκτυπώσει υλικά διαφόρων ιδιοτήτων με υψηλό επίπεδο λεπτομέρειας και ακρίβειας. Επίσης, χρησιμοποιεί σαν υποστηρικτικό υλικό το κερί, το οποίο ψεκάζεται μαζί με το υλικό κατασκευής, με αποτέλεσμα να μπορεί να απομακρυνθεί εύκολα σε διάλυμα αλκοόλης ή φούρνο. Έτσι, επιτρέπει την δυνατότητα εκτύπωσης αντικειμένων ιδιαίτερων υψηλών γεωμετρικών απαιτήσεων, χωρίς να υπάρχει κίνδυνος τραυματισμού τους από την αφαίρεση του υποστηρικτικού υλικού.

Στην επωνυμία της τεχνολογίας Material Jetting υπάρχουν διαφορές μεταξύ κατασκευαστών εκτυπωτών και ιδιόκτητων υλικών και για αυτό το λόγο ανάλογα με τον κατασκευαστή αναφέρεται η επωνυμία αυτής της τεχνολογίας, όπως για παράδειγμα το **MultiJet** από την εταιρία 3D Systems ή **PolyJet** από την εταιρία Strasys.

1.3.5 ΨΕΚΑΣΜΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ – BLINDER JETTING

Η μέθοδος ψεκασμού συγκολλητικού υλικού – Blinder Jetting (Εικόνα 19) είναι μια μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης, στην οποία το υλικό κατασκευής απλώνεται πάνω στην πλατφόρμα εκτύπωσης σχηματίζοντας ένα ισοπαχές στρώμα και στην συνέχεια τα ακροφύσια των κεφαλών εκτύπωσης ψεκάζουν μικρο-σταγόνες συγκολλητικού - συνδετικού υλικού (Blinders) με σκοπό την ένωση και τον σχηματισμό του αντικειμένου ανά στρώση μέχρι τον τελικό σχηματισμό του.



Εικόνα 19: Blinder Jetting

Σαν κύρια συστατικά κατασκευής χρησιμοποιούνται πολυμερή, μέταλλα και κεραμικά σε μορφή σκόνης. Σαν υλικά διασύνδεσης χρησιμοποιούνται διαλύματα οργανικών ουσιών (binders).

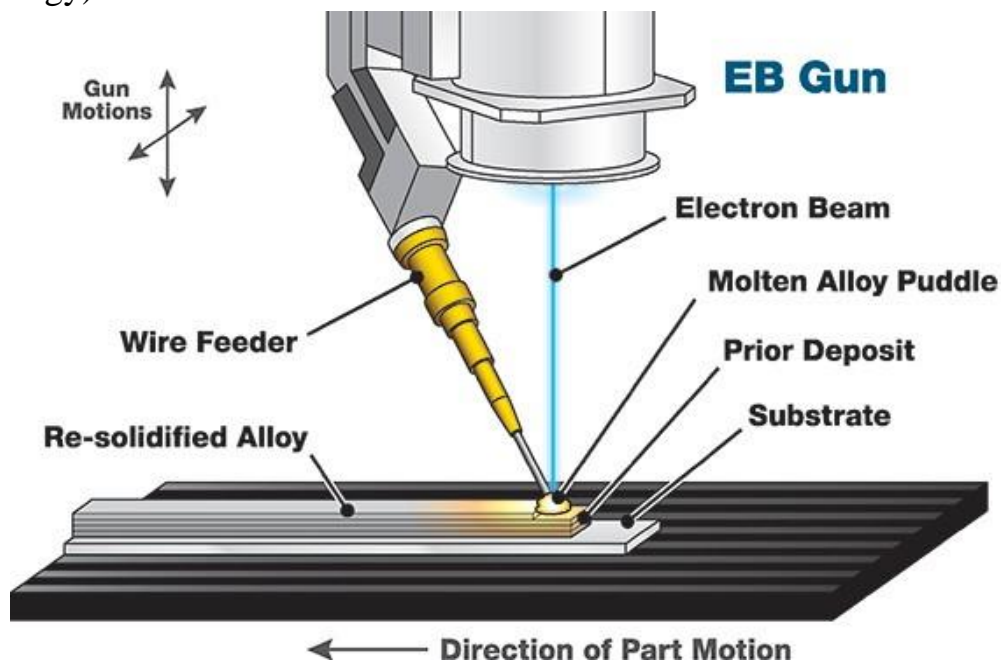
Τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι η υψηλή ταχύτητα παραγωγής και η δυνατότητα εκτύπωσης πολλών χρωμάτων και υλικών, καθώς το Blinder Jetting είναι μία από τις λίγες τεχνικές 3D printing που μπορεί να εκτυπώσει πολύχρωμα αντικείμενα, καθιστώντας το ιδανικό για αισθητικές εφαρμογές, όπως αρχιτεκτονικές μακέτες ή διακοσμητικά μοντέλα.

Το βασικό μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ότι τα τελικά προϊόντα (αναλόγως το υλικό) δεν αποτελούν προϊόντα μεγάλης αντοχής με συνέπεια την απαίτηση επεξεργασίας μετά την εκτύπωση για την ενίσχυση των ιδιοτήτων.

Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή και ως **Powder Bed, InkJet Head** και **Colorjet 3D printing**.

1.3.6 ΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΗ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ – DIRECT ENERGY DEPOSITION (DED)

Η κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας – DED (Εικόνα 20) είναι μια μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης, όπου η δημιουργία εξαρτημάτων πραγματοποιείται από την τήξη, συνήθως μεταλλικού υλικού και στην συνέχεια την εναπόθεση του σε στρώσεις. Η διαδικασία αυτή έχει πιο πολλά κοινά χαρακτηριστικά με την συγκόλληση παρά με την εξώθηση υλικού (FDM). Συχνά αναφέρεται και ως Κατευθυνόμενη Τεχνολογία Εναπόθεσης Μετάλλου (Direct Metal Deposition Technology).



Εικόνα 20: Direct Energy Deposition

Το υλικό τροφοδοσίας είναι σε μορφή σκόνης ή σε μορφή σύρματος.

Ο τρόπος λειτουργίας των DED διεργασιών είναι η χρήση μια εστιασμένης πηγής θερμότητας (συνήθως ένα λέιζερ ή δέσμη ηλεκτρονίων) για να λιώσει το υλικό τροφοδοσίας (Εικόνα 21). Η DED κεφαλή με κάθε πέρασμα της δημιουργεί παρακείμενες γραμμές του υλικού που συνθέτουν στρώματα με αποτέλεσμα την δημιουργία του τρισδιάστατου αντικειμένου. Η κατηγορία αυτή απαιτεί είτε υλική υποστήριξη ή πολυαξονική εναπόθεση.

Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιείται πιο συχνά για την επισκευή ή την προσθήκη χαρακτηριστικών σε μεταλλικά αντικείμενα με την εναπόθεση υλικού απευθείας στο μεταλλικό κομμάτι. Επίσης, χρησιμοποιείται και από ερευνητικούς οργανισμούς για την ανάπτυξη νέων κραμάτων υλικών και την εφαρμογή νέων ή προηγμένων υλικών σε νέες βιομηχανίες ή ακόμα και για την αεροδιαστημική τεχνολογία.

Οι υποκατηγορίες του DED μπορούν να χωριστούν ανάλογα με τον τύπο του υλικού πρώτης ύλης ή τον τύπο της πηγής ενέργειας. Γενικά, οι βασικές υποκατηγορίες της τεχνολογίας DED είναι:

- Laser Direct Energy Deposition
- Electron Beam Direct Energy Deposition
- Wire Direct Energy Deposition

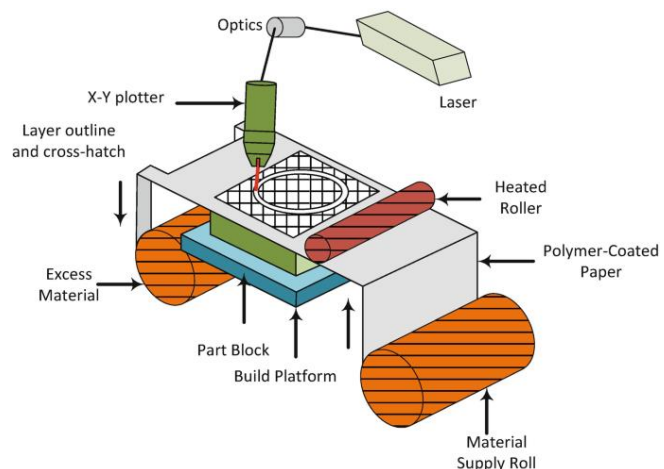


Εικόνα 21: Direct Energy Deposition

1.3.7 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΦΥΛΛΩΝ - SHEET LAMINATION (SHL)

Η Συγκόλληση Φύλλων – Sheet Lamination (Εικόνα 22) είναι μια μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης, στην οποία βασίζεται στην κατασκευή αντικειμένων με την συγκόλληση λεπτών φύλλων υλικού. Πιο συγκεκριμένα, τα φύλλα των υλικών κόβονται, στοιβάζονται και συγκολλούνται (όχι πάντα με αυτή τη σειρά) για να σχηματίσουν ένα αντικείμενο.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η ταχύτητα παραγωγής, το χαμηλό κόστος, τα απλά υλικά κατασκευής και τα μεγάλα ή πολύπλοκα εξαρτήματα που μπορούμε να κατασκευάσουμε.



Εικόνα 22: Sheet Lamination (SHL)

Το βασικό μειονέκτημα είναι η μικρή ακρίβεια που έχει.

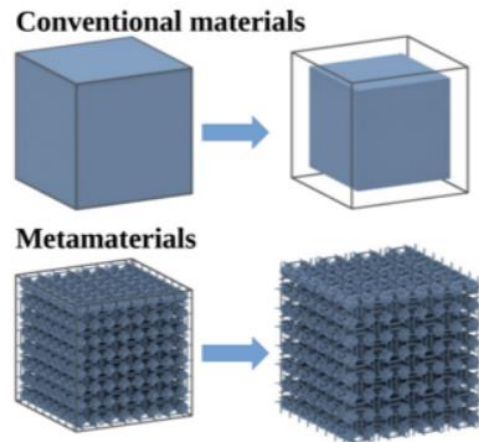
Αυτές οι διαδικασίες μπορούν περαιτέρω να κατηγοριοποιηθούν με βάση το μηχανισμό που χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί η συγκόλληση μεταξύ των στρωμάτων:

- Συγκόλληση ή Κόλληση
- Θερμική Σύνδεση
- Σύσφιξη
- Συγκόλληση με υπερήχους.

ΚΕΦ.2: ΜΕΤΑΥΛΙΚΑ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο όρος Μεταύλικά – Metamaterials (Εικόνα 23) χαρακτηρίζει μια νέα ομάδα τεχνητών κατασκευασμένων υλικών που υπερβαίνουν τις ιδιότητες των συμβατικών υλικών που υπάρχουν στην φύση. Σε αντίθεση με τα φυσικά υλικά, οι μηχανικές τους ιδιότητες μπορούν να τροποποιηθούν και να ενισχυθούν αλλάζοντας τη γεωμετρική τους δομή ή την αρχιτεκτονική τους μικροδομή.



Εικόνα 23: ΜΕΤΑΥΛΙΚΑ

Οι επιθυμητές ιδιότητες των μεταύλικών είναι οι εξής:

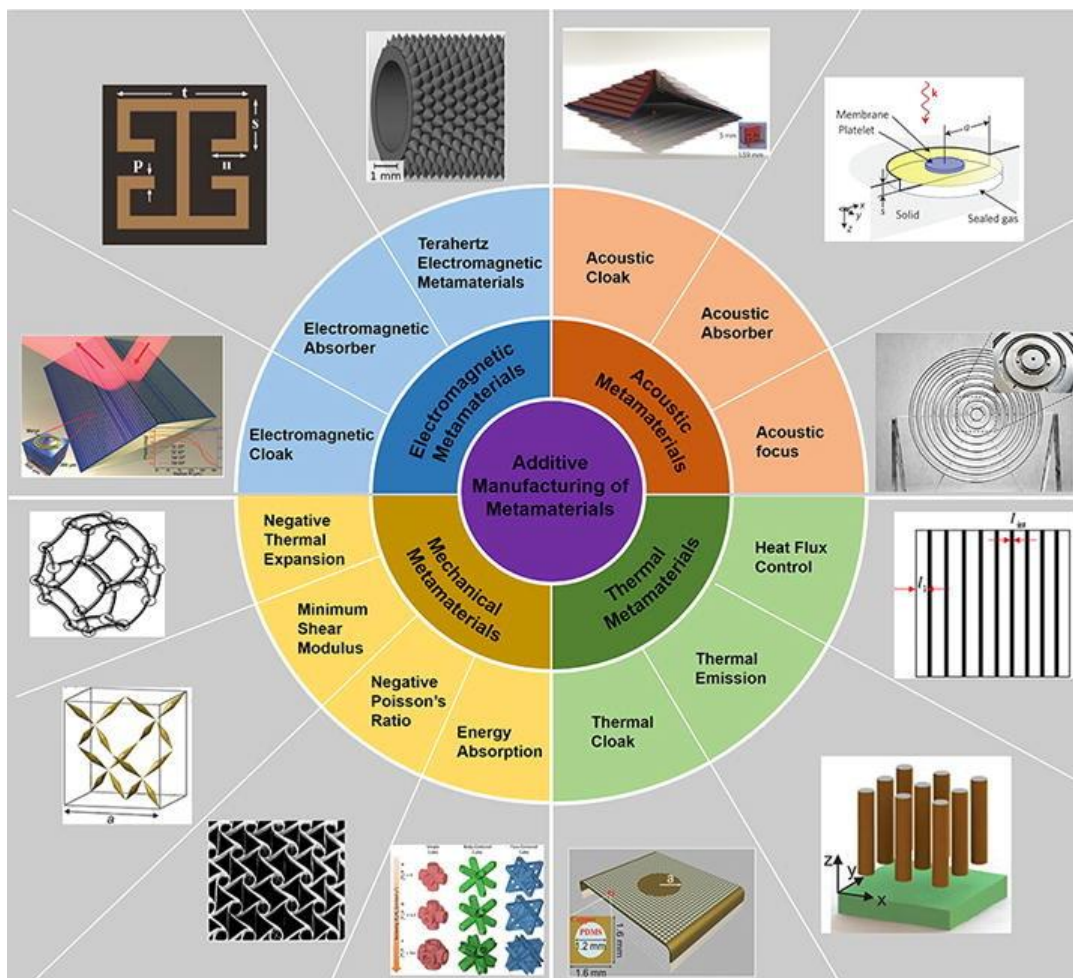
- Αρνητικό δείκτη διάθλασης
- Αρνητικό λόγο Poisson
- Φάση κύματος που προπορεύεται, καθώς αυτό απομακρύνεται από την πηγή
- Πλάτος κύματος που αυξάνεται, καθώς απομακρύνεται από την πηγή
- Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου E , η ένταση του μαγνητικού πεδίου H και τα κυματοδιανύσματα k σχηματίζουν μια αριστερόστροφη τριπλέτα

Τα Μεταύλικά περιλαμβάνονται στους τομείς, όπως είναι η ηλεκτρική εφαρμοσμένη μηχανική, ο ηλεκτρομαγνητισμός, η φυσική στερεάς κατάστασης, τα μικροκύματα, η κατασκευή κεραιών, η οπτοηλεκτρονική, η κλασική οπτική, οι επιστήμες των υλικών, η μηχανική ημιαγωγών, οι νανοεπιστήμες και άλλες.

Οι πιθανές εφαρμογές των μεταύλικών είναι ποικίλες και περιλαμβάνουν εφαρμογές αεροδιαστημικής, αισθητήρες ανίχνευσης και παρακολούθησης υποδομών, έξυπνες συσκευές διαχείρισης της ηλιακής ενέργειας, στη δημόσια ασφάλεια, σε κεραιές σφαιρικού θόλου, σε υψηλής συχνότητας επικοινωνία στο πεδίο μάχης, σε φακούς και σε κεραιές υψηλής απολαβής, βελτιωμένους αισθητήρες υπερήχων, ακόμα και σε θωράκιση κατασκευών από σεισμούς.

Τα Μεταϋλικά μπορούν να χωριστούν σε διάφορες κατηγορίες (Εικόνα 24), όπως:

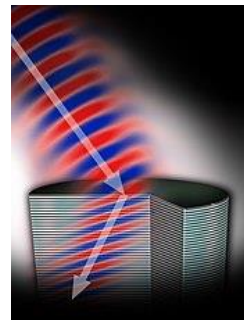
- **Μεταϋλικά αρνητικού δείκτη διάθλασης - Negative index metamaterials**
- **Ελικοειδή Ηλεκτρομαγνητικά Μεταϋλικά – Chiral Electromagnetic metamaterials**
- **Ακουστικά Μεταϋλικά - Acoustic metamaterials**
- **Φωτονικά Μεταϋλικά - Photonic metamaterials**
- **Μαγνητικά Μεταϋλικά - Magnetic metamaterials**
- **Μηχανικά Μεταϋλικά - Mechanical metamaterials**



Εικόνα 24: Κατηγορίες Μεταϋλικών

- **Negative Index Metamaterials (NIM)**

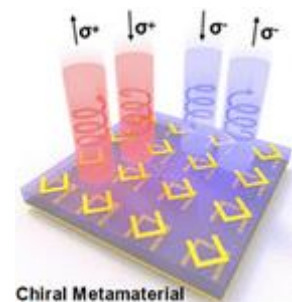
Πρόκειται για τεχνητά υλικά (Εικόνα 25) με αρνητικό δείκτη διάθλασης, που σημαίνει ότι κάμπτουν το φως προς την αντίθετη κατεύθυνση σε σύγκριση με τα φυσικά υλικά. Έχουν πιθανές εφαρμογές στην απεικόνιση υπερφακού, σε συσκευές απόκρυψης κάλυψης και σε κυματοδηγούς.



Εικόνα 25: Negative Index Metamaterials

- **Chiral Electromagnetic Metamaterials**

Πρόκειται για τεχνητά υλικά (Εικόνα 26) που είναι ελικοειδή, μια ιδιότητα ασυμμετρίας. Αποτελούνται από δομές υπομήκους κύματος που μπορούν να χειριστούν τη διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, όπως το φως. Έχουν πιθανές εφαρμογές στην οπτική αίσθηση, στην επικοινωνία, στην επεξεργασία πληροφοριών και στην συλλογή ενέργειας.



Εικόνα 26: Chiral Electromagnetic Metamaterial

- **Acoustic Metamaterials**

Πρόκειται για τεχνητά υλικά (Εικόνα 27) που μπορούν να χειριστούν την διάδοση των ηχητικών κυμάτων. Αποτελούνται από δομές υπομήκους κύματος που μπορούν να αλληλοεπιδράσουν με τα ηχητικά κύματα με τρόπους που τα φυσικά υλικά δεν μπορούν. Έχουν πιθανές εφαρμογές στον έλεγχο του θορύβου, στην απόσβεση των κραδασμών, στα σόναρ και στην απεικόνιση υπερήχων, καθώς και στην ακουστική απεικόνιση.

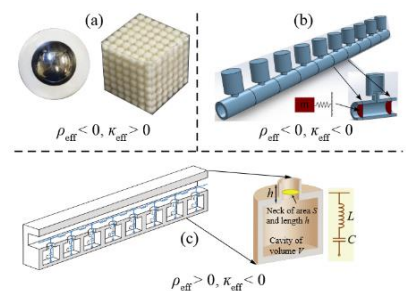


Figure 1.4 – Sketch illustration of several exemplary acoustic metamaterials with negative effective properties. (a) Negative density[30, 35]. (b) Negative bulk modulus and density[45, 46].(c) Negative bulk modulus[44].

Εικόνα 27: Acoustic Metamaterials

- **Photonic Metamaterials**

Πρόκειται για τεχνητά υλικά (γνωστά και ως Optical Metamaterials) αποτελούνται από δομές υπομήκους κύματος που μπορούν να αλληλοεπιδράσουν με το φως με τρόπους που τα φυσικά υλικά δεν μπορούν. Μπορούν να επιδείξουν ένα ευρύ φάσμα ιδιοτήτων, όπως αρνητικό δείκτη διάθλασης (Εικόνα 28), υπερφακό (superlensing) και οπτική απόκρυψη «εξαφάνιση» υλικού (cloaking). Έχουν πιθανές εφαρμογές σε οπτικά κυκλώματα, ηλιακά κύτταρα και αισθητήρια.



Εικόνα 28: Πλέγμα Μεταυλικού με Αρνητική Διάθλαση

- **Magnetic Metamaterials**

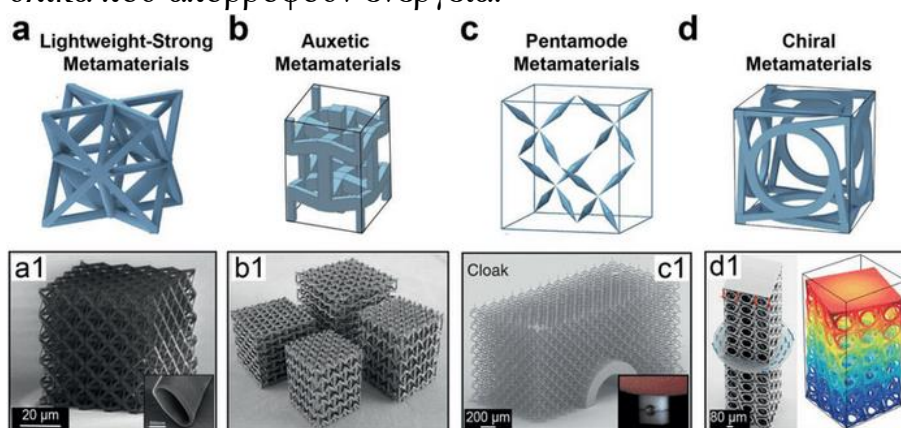
Πρόκειται για τεχνητά υλικά (Εικόνα 29) που μπορούν να χειριστούν τα μαγνητικά πεδία. Αποτελούνται από δομές υπομήκους κύματος που μπορούν να αλληλοεπιδράσουν με μαγνητικά πεδία με τρόπους που τα φυσικά υλικά δεν μπορούν. Έχουν πιθανές εφαρμογές στην απεικόνιση μαγνητικού συντονισμού (MRI), στην συλλογή ενέργειας, στην μαγνητική αιώρηση και στην μαγνητική αποθήκευση δεδομένων.



Εικόνα 29: Magnetic Metamaterial

- **Mechanical Metamaterials**

Πρόκειται για τεχνητά υλικά (Εικόνα 30) με μηχανικές ιδιότητες που ορίζονται από τη δομή τους και όχι από τη σύνθεσή τους. Οι μηχανικές τους ιδιότητες μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να έχουν τιμές που δεν μπορούν να βρεθούν στη φύση. Έχουν πιθανές εφαρμογές σε ελαφριές δομές, ανθεκτικά στην κρούση υλικά και υλικά που απορροφούν ενέργεια.



Εικόνα 30: Mechanical Metamaterials

Τα παραπάνω παραδείγματα είναι μόνο μερικοί τύποι των μεταυλικών που υπάρχουν, καθώς οι ερευνητές συνεχίζουν να αναπτύσσουν νέα υλικά με μοναδικές και χρήσιμες ιδιότητες. Μία από τις πιο συναρπαστικές ιδιότητες των μεταυλικών είναι η ικανότητά τους να χειρίζονται το φως και άλλα ηλεκτρομαγνητικά κύματα με τρόπους που τα παραδοσιακά υλικά δεν μπορούν. Μπορούν να σχεδιαστούν για να κάμπτουν το φως γύρω από αντικείμενα, καθιστώντας τα αόρατα από ορισμένες γωνίες ή για να δημιουργούν φακούς που είναι πολύ μικρότεροι και πιο αποτελεσματικοί από αυτούς που υπάρχουν στη φύση.

2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΑ ΜΕΤΑΥΛΙΚΑ

Παρακάτω επιχειρείται μια σύντομη ιστορική αναδρομή γύρω από την έννοια των Μεταϋλικών (Εικόνα 31).

Η έννοια αυτή ειπώθηκε για πρώτη φορά το **1967** από τον **Veselago** σε σχετική αναφορά που δημοσιεύτηκε εκείνη την εποχή με τίτλο "*The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of ϵ and μ* ".

Ο Victor Georgievich Veselago, Δρ. Φυσικών και Μαθηματικών επιστημών και καθηγητής πανεπιστημίου, εξέτασε την πιθανότητα ύπαρξης υλικών που έχουν ταυτόχρονα αρνητική ηλεκτρική διαπερατότητα ϵ και αρνητική μαγνητική διαπερατότητα μ , μια υπόθεση που δεν παραβιάζει τις εξισώσεις του Maxwell. Μέχρι τότε, ο δείκτης διάθλασης θεωρούνταν ότι είχε μόνο θετικές τιμές, κάτι το οποίο καταρρίφθηκε με την αναφορά του. Το αποτέλεσμα αυτής της υπόθεσης ήταν ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου E , η ένταση του μαγνητικού πεδίου H και το κυματοδιάνυσμα k να σχηματίζουν μια αριστερόστροφη τριπλέτα (Left-Handed Media-LHM), σε αντίθεση με τα συμβατικά υλικά τα οποία χαρακτηρίζονται από δεξιόστροφη τριπλέτα (Right-Handed Media-RHM). Αυτή ήταν και η πρώτη διάκριση μεταξύ των μεταϋλικών και των υλικών.

$$\begin{aligned} \vec{k} \times \vec{E} &= \omega \mu_0 \mu \vec{H} \\ \vec{k} \times \vec{H} &= -\omega \epsilon_0 \epsilon \vec{E} \end{aligned} \quad (1) \quad \begin{array}{l} \text{➤ Ζευγάρι εξισώσεων Maxwell που προέκυψε η} \\ \text{παραπάνω θεωρία} \end{array}$$

Ωστόσο, παρόλο που μεταξύ τους το ηλεκτρικό πεδίο E , η ένταση του μαγνητικού πεδίου H και του κυματικού διανύσματος K έχουν αριστερόστροφη σχέση, η σχέση που συνδέει το E , το H και το διάνυσμα Poynting S , είναι δεξιόστροφη, κάτι που συνεπάγεται ότι το κυματικό διάνυσμα θα είναι αντιπαράλληλο του διανύσματος Poynting.

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (2)$$

Ο Veselago κατέληξε στο ότι τα Μεταϋλικά δεν μπορούν να υπάρχουν στην φύση και πρέπει να χαρακτηρίζονται και από έναν αρνητικό δείκτη διάθλασης (Negative Refractive Index, NRI), μια ιδιότητα που οδηγεί σε αντιστροφή του νόμου του Snell και κατά συνέπεια στην αρνητική διάθλαση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος όταν περάσει από ένα μεταϋλικό.

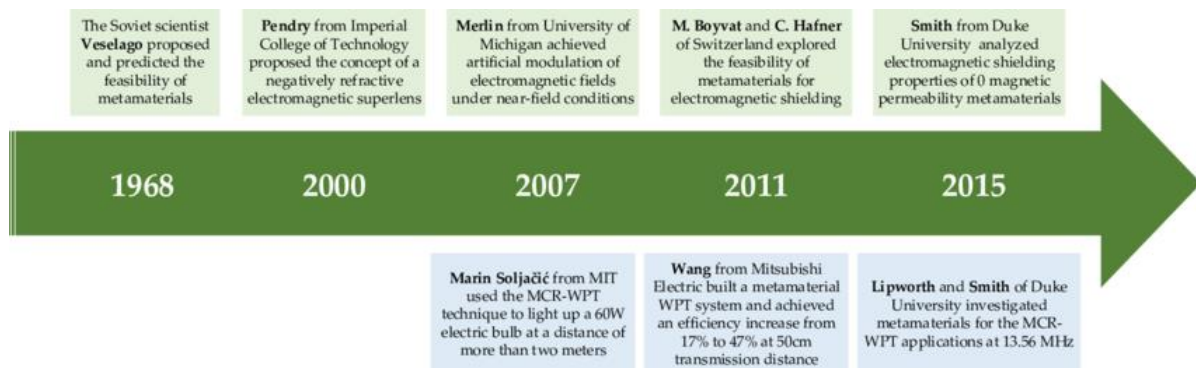
$$n = -\sqrt{\epsilon\mu} \quad (3)$$

Μετά την αναφορά του Vaselego και μέχρι και το 1999 τα μεταϋλικά δεν μελετήθηκαν βαθύτερα έως ότου μια ομάδα επιστημών με επικεφαλής τον **Pendry**, παρουσίασαν παραδείγματα για τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να επιτευχθεί η αρνητική τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας, μ , στους αγωγούς.

Το πρώτο Μεταϊλικό που κατασκευάστηκε ήταν μια ενεργά ομογενής δομή αποτελούμενη από συστοιχία χάλκινων διαχωρισμένων δακτυλίων και λεπτών μεταλλικών συρμάτων, που βρέθηκε τελικά να έχει αρνητική ηλεκτρική αγωγιμότητα και αρνητική μαγνητική διαπερατότητα, με αποτέλεσμα να παρουσιάζει και αρνητικό δείκτη διάθλασης. Ωστόσο, οι πρώτες δομές μεταϊλικών δεν παρουσίαζαν κάποια πρακτική εφαρμογή μέχρι και το 2001, όπου ανακαλύφθηκαν τα μεταϊλικά γραμμής μεταφοράς άνευ συντονισμού με αρνητικό δείκτη διάθλασης (Non-Resonant Transmission line - NRI metamaterials).

Μερικές ιδιότητες, όπως υποδείχθηκαν πρώτα από τον Veselago αλλά και αργότερα από άλλους, είναι: η τροποποίηση του νόμου του Snell που αφορά στη διάθλαση, η αντιστροφή του φαινομένου του Doppler, η αντιστροφή της ακτινοβολίας Vavilon-Cerenkov, η αντιστροφή της απόκλισης και σύγκλισης σε κοίλους και κυρτούς φακούς κ.α.

Ωστόσο το μεγαλύτερο ζήτημα στον τομέα των μεταϊλικών παραμένει ο τρόπος κατασκευής τους. Η δυσκολία οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η μονάδα ύλης ρ του μεταϊλικού θα πρέπει να είναι αισθητά μικρότερη από το μήκος κύματος λ_g ($\rho \ll \lambda_g$) των πεδίων, έτσι ώστε το μεταϊλικό να συμπεριφέρεται σαν ομοιογενές υλικό σε μακροσκοπική κλίμακα.



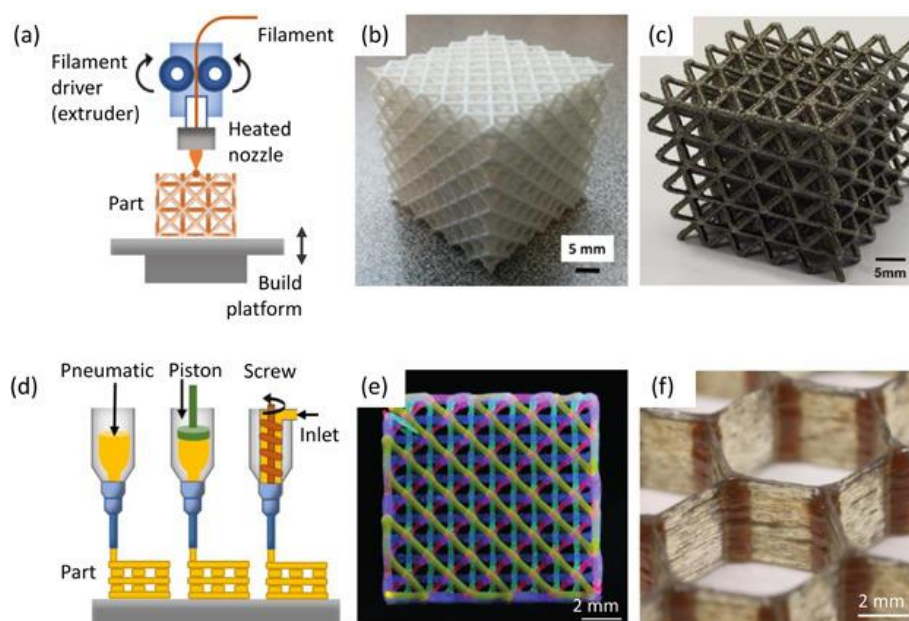
Εικόνα 31: Ιστορική αναδρομή Μεταϊλικών

2.3 ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΤΑΥΛΙΚΑ – MECHANICAL METAMATERIALS

Τα Μηχανικά Μεταϋλικά – Mechanical Metamaterials (Εικόνα 32) αποτελούν έναν από τους πιο πρόσφατους κλάδους της έρευνας μεταϋλικών που εκμεταλλεύεται την κίνηση, τις παραμορφώσεις, τις τάσεις και τη μηχανική ενέργεια μέσω της αρχιτεκτονικής δομής τους.

Αλλάζοντας την γεωμετρία των τοπικών κυψελών και την χωροθέτηση – διάταξη τους επιτυγχάνουμε την δημιουργία των μηχανικών μεταϋλικών με πρωτόγνωρες ιδιότητες και λειτουργίες, όπως εξαιρετικά υψηλή αναλογία ακαμψίας προς βάρος, αρνητικό λόγο Poisson, χειρικότητα, τοπικές παραμορφώσεις και μετασχηματισμούς σε πολλαπλά σχήματα.

Ειδικότερα, τα εύκαμπτα μηχανικά μεταϋλικά, τα οποία μπορούν να ανακτήσουν το αρχικό τους σχήμα μετά από μεγάλες παραμορφώσεις, παρουσιάζουν μεγάλες δυνατότητες εφαρμογής στην ρομποτική στα Soft Robots (=υποπεδίο της ρομποτικής που αφορά το σχεδιασμό, τον έλεγχο και την κατασκευή ρομπότ που αποτελούνται από συμβατά υλικά, αντί για άκαμπτους συνδέσμους), των οποίων η απόδοση μπορεί να βελτιωθεί από τη σύνθετη συλλογική συμπεριφορά των εξαιρετικά παραμορφώσιμων εύκαμπτων μεταϋλικών. Για παράδειγμα, τα αυξητικά μεταϋλικά κατασκευασμένα από υλικά που μοιάζουν με καουτσούκ μπορούν να συρρικνωθούν πυκνά και προς τις τρεις κατευθύνσεις υπό ένα μεγάλο μονοαξονικό συμπιεστικό φορτίο και να ανακτήσουν το αρχικό τους σχήμα χωρίς θραύση ή αστοχία. Επιπλέον, τα μεταϋλικά εμπνευσμένα από το Origami μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να διαθέτουν ευέλικτη κίνηση μονής κατεύθυνσης, ενώ παραμένουν άκαμπτα έναντι άλλων τύπων παραμορφώσεων.

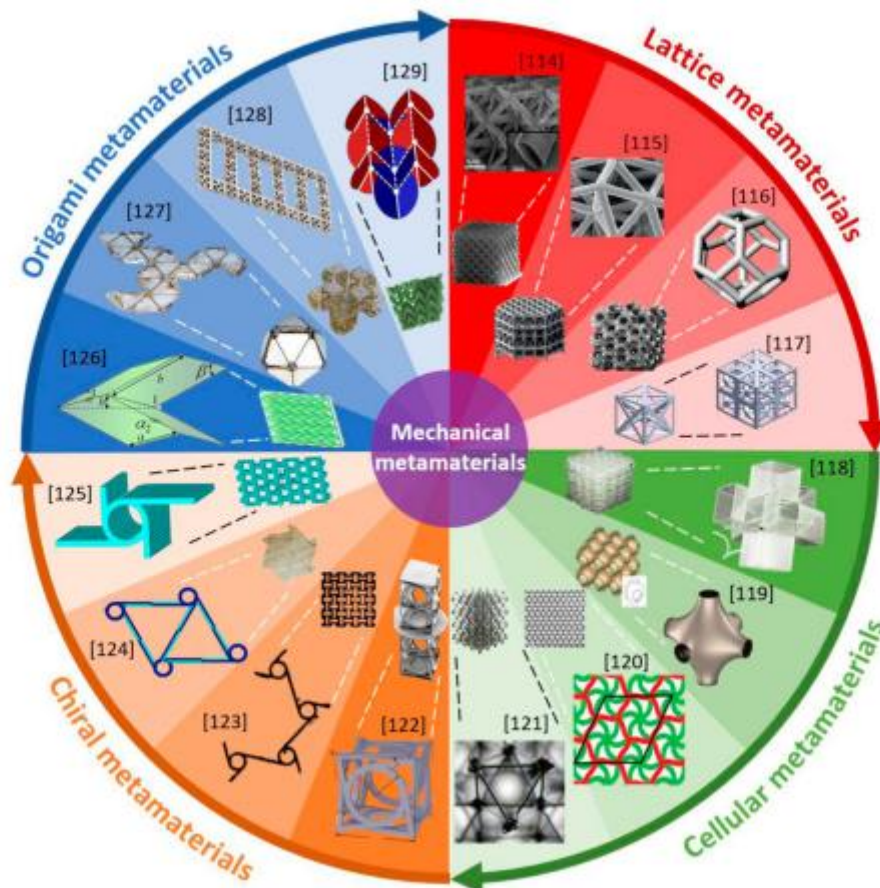


Εικόνα 32: Κατασκευή Μηχανικών Μεταϋλικών μέσω 3D Printing

Η κατασκευή των τρισδιάστατων Μηχανικών Μεταλλικών διευκολύνθηκε με την τρισδιάστατη εκτύπωση, καθώς με το 3D printing δίνεται πλέον η δυνατότητα κατασκευής υλικών χωρίς περιορισμό στην ελευθερία σχεδιασμού.

Υπάρχει μεγάλη γκάμα νέων αναδυόμενων υλικών που μπορούν να συμπεριληφθούν στον ορισμό των Μηχανικών Μεταλλικών (Εικόνα 33), όπως:

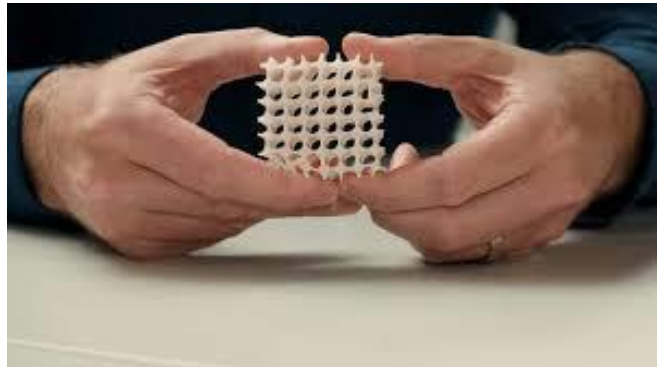
- **Αυξητικά Υλικά - Auxetic Materials**
- **Πενταμοδικά Υλικά - Pentamode Materials**
- **Μεταλλικά με αρνητικό συντελεστή Poisson και Ογκομετρική αρνητική Συμπιεστότητα**
- **Υλικά Δικτυωτού Πλέγματος - Lattice materials**
- **Δομές Origami & Kirigami**
- **Ελικοειδή Υλικά – Chiral Materials**



Εικόνα 33: Μηχανικά Μεταλλικά

2.3.1 ΑΥΞΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ – AUXETIC METAMATERIALS

Τα Αυξητικά Μεταϊλικά – Auxetic Metamaterials (Εικόνα 34) είναι ένας τύπος Μηχανικού Μεταϊλικού που έχει αρνητική αναλογία Poisson. Έχουν την ιδιότητα, όταν τανυστούν να αυξάνεται η διατομή τους κάθετα στην εφαρμοσμένη δύναμη λόγω των αρθρωτών δομών τους, οι οποίες κάμπτονται κατά την διάρκεια της τάνυσης. Τα αυξητικά υλικά έχουν αυξημένη σκληρότητα και έχουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε θραύσεις σε σύγκριση με τα συμβατικά υλικά, καθώς η διάδοση της ρωγμής είναι χαμηλότερη σε υλικά με αρνητικό λόγο Poisson. Επιπλέον, τα υλικά αυτά εκτείνονται τόσο πλευρικά όσο και στην διαμήκη διεύθυνση, οπότε αν υπάρχει ρωγμή στο υλικό, τα αυξητικά υλικά τείνουν να κλείσουν τη ρωγμή μόλις βρεθούν κάτω από ένα εφαρμοζόμενο φορτίο.



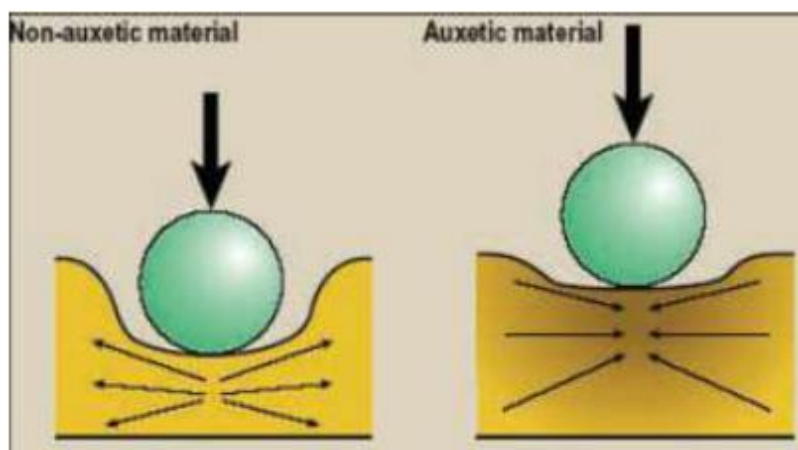
Εικόνα 34: Αυξητικό Υλικό

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΥΞΗΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα αυξητικά υλικά παρουσιάζουν τις παρακάτω ιδιότητες:

I. Αντίσταση στη διείσδυση - Indentation Behavior

Τα αυξητικά υλικά παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντίσταση στην διείσδυση λόγω της πυκνότητας του υλικού που προσδίδει ο λόγος Poisson, προκαλώντας τοπική αύξηση της πυκνότητας του υλικού κατά την διάρκεια της αξονικής θλιπτικής παραμόρφωσης (Εικόνα 35).



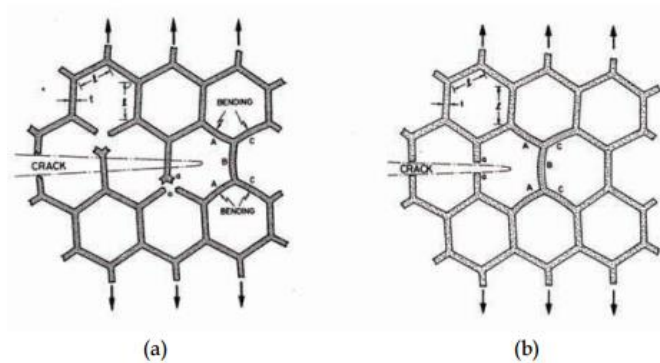
Εικόνα 35: Συμπεριφορά Αυξητικών Υλικών στην διείσδυση κατά την κρουστική αξονική Θλίψη

II. Αντοχή στη ρωγμή - Fracture Behavior

Τα αυξητικά υλικά παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή στην δημιουργία ρωγμών και καταφέρνουν να διαδίδουν την ρωγμή σταδιακά (Εικόνα 36).

Η διάδοση της ρωγμής μπορεί να συμβεί με δύο τρόπους:

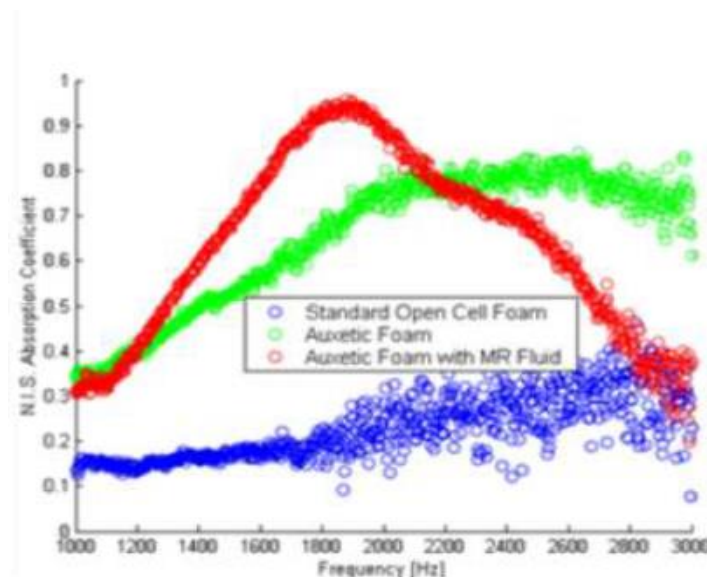
- Μέσω της αποτυχίας κάμψης του μη κάθετου τοιχώματος του κελιού ή της άκρης του.
- Από τη ρωγμή των κάθετων στοιχείων, υπό τον συνδυασμό του εφελκυσμού και της ροπής κάμψης.



Εικόνα 36: Επέκταση της ρωγμής σε ένα στερεό κελί

III. Απόσβεση ταλαντώσεων και Απορρόφηση ενέργειας

Τα αυξητικά υλικά παρουσιάζουν μεγαλύτερη απορροφητικότητα ηχητικών κυμάτων σε όλες τις συχνότητες (Εικόνα 37). Το μέγεθος των πόρων επηρεάζει το εύρος των συχνοτήτων που απορροφούνται, καθώς με μικρούς πόρους είναι αποτελεσματικότεροι στην απορρόφηση ηχητικών κυμάτων 630Hz και άνω, σε σχέση με τους μεγαλύτερους πόρους.



Εικόνα 37: Συντελεστής απόσβεσης - συχνότητας ηχητικού κύματος

IV. Μεταβλητή Διαπερατότητα - Variable Permeability

Τα αυξητικά υλικά παρουσιάζουν αύξηση στο μέγεθος των πόρων τους όταν τεντώνονται και έτσι είναι χρήσιμα σε εφαρμογές που περιέχουν κάποιο είδους φίλτρο.

V. Συγκλαστική Καμπυλότητα – Synclastic Curvature

Τα αυξητικά υλικά παρουσιάζουν το φαινόμενο της συγκλαστικής καμπυλότητας (Εικόνα 38), δηλαδή η επιφανειακή αυξητική δομή τείνει να καμπυλώσει με τον ίδιο τρόπο σε όλες τις ευθείες που περνάνε από την κορυφή της καμπύλης.

Αυτό το είδος της καμπυλότητας, είναι εξαιρετικά χρήσιμο σε κατασκευές που απαιτούν εξαρτήματα με το συγκεκριμένο σχήμα, όπως συμβαίνει στην αυτοκίνηση και στα αεροσκάφη.



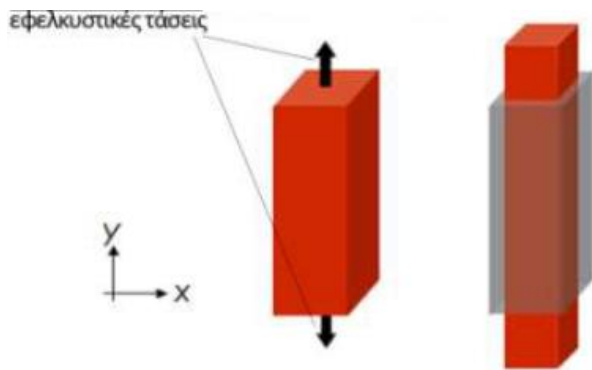
Εικόνα 38: Η καμπυλότητα σε συμβατικά υλικά και η καμπυλότητα σε αυξητικά υλικά

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΥΞΗΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα αυξητικά υλικά λόγω των αξιοσημείωτων ιδιοτήτων τους βρίσκουν εφαρμογή σε τομείς, όπως είναι η Αεροδιαστημική, η Αυτοκινητοβιομηχανία, η Στρατιωτική Άμυνα, η Βιοϊατρική, η Οικοδομική και η Κλωστοϋφαντουργική Βιομηχανία.

2.3.1.1 ΛΟΓΟΣ POISSON ΣΤΑ ΥΛΙΚΑ

Ο λόγος του Poisson ορίζεται ως ο αρνητικός λόγος της εγκάρσιας προς τη διαμήκη παραμόρφωση του υλικού όταν αυτό εντείνεται μονοαξονικά κατά τη διαμήκη διεύθυνση (Εικόνα 39). Η εφελκυστική παραμόρφωση θεωρείται με θετικό πρόσημο και η θλιπτική με αρνητικό.



$$\nu = - \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z}$$

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

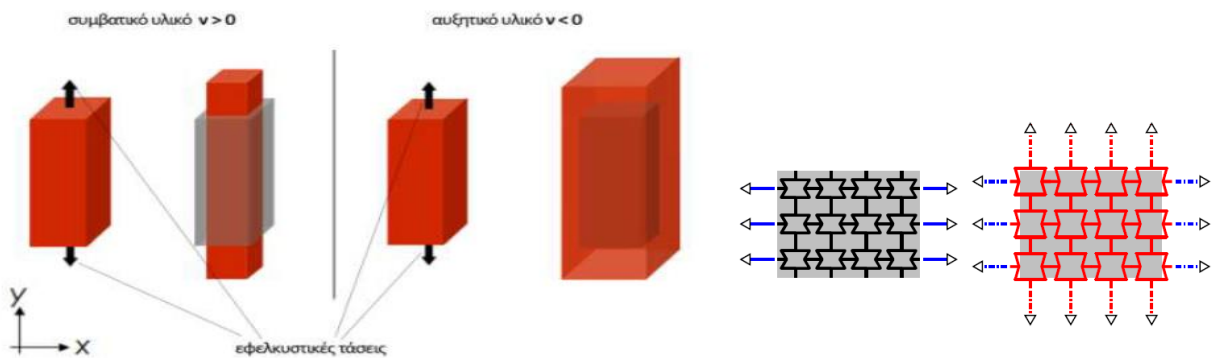
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

- ΔL : Μεταβολή στο μήκος
- L : Μήκος

Εικόνα 39: Λόγος Poisson

Ο ορισμός του λόγου Poisson έγινε με αρνητικό πρόσημο, έτσι ώστε η πληθώρα των υλικών στην φύση να έχουν θετικό πρόσημο ($0 < \nu < 0.5$).

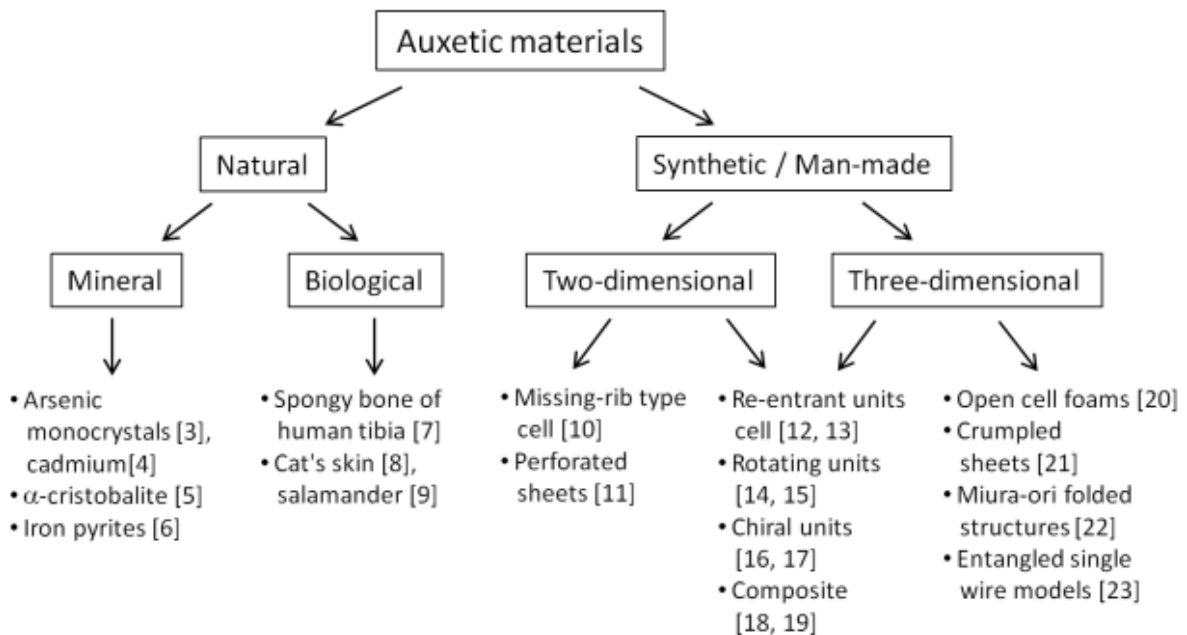
ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΑΡΝΗΤΙΚΟ ΔΕΙΚΤΗ POISSON (ΑΥΞΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ)



Εικόνα 40: Λόγος Poisson στα αυξητικά υλικά

Τα υλικά τα οποία όταν υπόκεινται σε εφελκυσμό αντί να συρρικνώνονται, επιμηκύνονται κάθετα στην κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου φορτίου, έχουν αρνητικό λόγο Poisson και ονομάζονται αυξητικά υλικά (Εικόνα 40). Αυτό οφείλεται στους τεχνητούς συνδέσμους που εμφανίζονται στο εσωτερικό της μικροδομής και βοηθάνε στο λύγισμα. Επιπλέον, ο λόγος του Poisson είναι ανεξάρτητος από την κλίμακα, δηλαδή, οι αυξητικές ιδιότητες μπορούν να οφείλονται είτε στις μικροσκοπικές δομές του υλικού είτε στις μακροσκοπικές.

2.3.1.2 ΔΟΜΕΣ ΑΥΞΗΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ



Εικόνα 41: Γενική ταξινόμηση αυξητικών υλικών

Τα αυξητικά υλικά υπάρχουν στη φύση με δύο μορφές:

- Βιολογικά
- Συνθετικά – Τεχνητά

Ανάλογα με την κατεύθυνση της παραμόρφωσης, τα συνθετικά - τεχνητά αυξητικά υλικά υπό μηχανικό φορτίο μπορούν να υποδιαιρεθούν σε δύο κύριες ομάδες:

- Δισδιάστατα
- Τρισδιάστατα

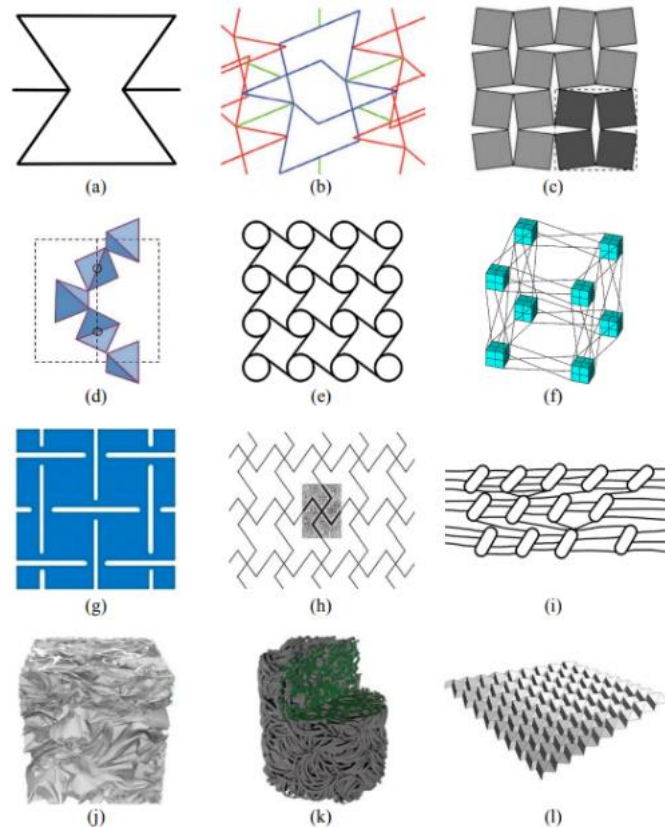
Τα πιο γνωστά φυσικά αυξητικά υλικά παρουσιάζονται στην Εικόνα 41. Η πιο μελετημένη δισδιάστατη γεωμετρία είναι το εξαγωνικό κελί μονάδας. Οι κατασκευές με αυτόν τον τύπο γεωμετρίας παρουσιάζουν αυξητική συμπεριφορά όταν εφαρμόζεται εφελκυστική ή θλιπτική δύναμη στα σημεία σύνδεσης των επανασιχθέντων κελιών.

2.3.1.3 ΑΥΞΗΤΙΚΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Εκτός από την αυτόνομη χρήση, τα αυξητικά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και ως ενισχυτικά στοιχεία (Εικόνα 42). Η χρήση αυξητικών ινών ως μέσω πλήρωσης ενισχύει τη διεπιφανειακή πρόσφυση υπό εφελκυσμό σε σύνθετα υλικά.

Υπάρχουν τέσσερις τεχνικές κατασκευής αυξητικών σύνθετων υλικών:

1. Η χρήση μιας μήτρας με αρνητική αναλογία Poisson
2. Η χρήση αυξητικών ινών και μιας συνηθισμένης μήτρας
3. Η χρήση αυξητικών ινών και μιας αυξητικής μήτρας
4. Η χρήση με στρώση συνηθισμένων σύνθετων στρωμάτων σε προκαθορισμένες κατευθύνσεις



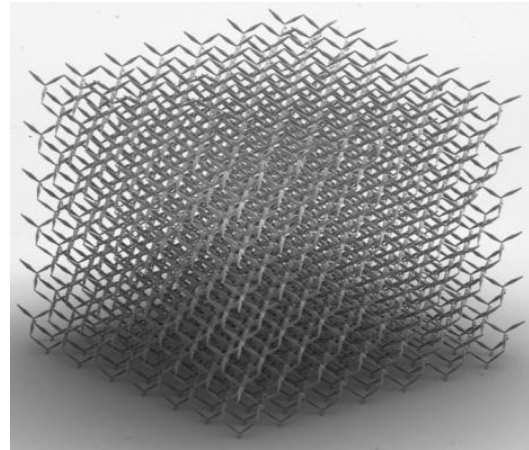
Εικόνα 42: Δομές αυξητικών υλικών

Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, η αντοχή στη θραύση αυξάνεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κατασκευής, γεγονός που καθιστά αυτά τα υλικά κατάλληλα για πολλές εφαρμογές. Η αντοχή στη θραύση εξαρτάται από την τιμή του λόγου Poisson και αυξάνεται καθώς πλησιάζει κοντά στο -1. Αυτό το χαρακτηριστικό έχει αποδειχθεί ως παράδειγμα σε σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα.

2.3.2 ΠΕΝΤΑΜΟΔΙΚΑ ΜΕΤΑΥΛΙΚΑ – PENTAMODE METAMATERIALS

Τα Πενταμοδικά Μεταύλικα – Pentamode Metamaterials (Εικόνα 43) είναι τεχνητές τρισδιάστατες δομές, οι οποίες συμπεριφέρονται σαν ρευστά, παρόλο που είναι στερεές δομές.

Αυτές οι δομές είναι πολύ δύσκολο να συμπιεστούν και να παραμορφωθούν, καθώς έχουν πεπερασμένο όγκο αλλά μηδενικό συντελεστή διάτμησης.



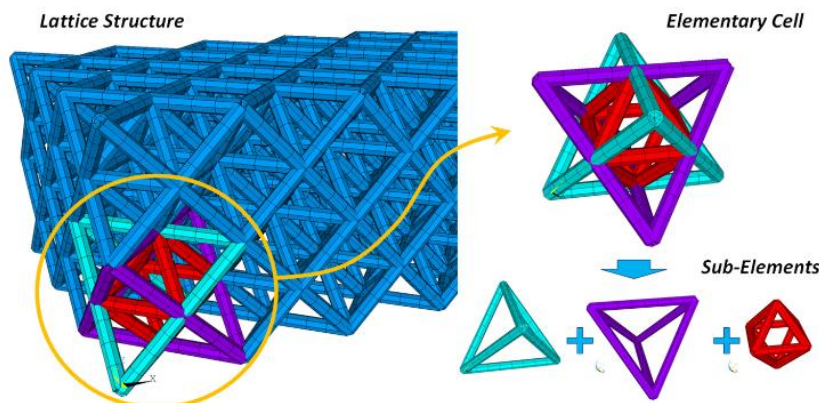
Εικόνα 43: Πενταμοδικό Μεταύλικό

2.3.3 ΜΕΤΑΥΛΙΚΑ ΜΕ ΑΡΝΗΤΙΚΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ POISSON ΚΑΙ ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΟΓΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑ

Τα συγκεκριμένα Μεταύλικα είναι σχεδιασμένα ώστε να παρουσιάζουν αρνητικό συντελεστή Poisson και αρνητική ογκομετρική συμπίεστικότητα, κάτι το οποίο δεν συμβαίνει με τα συνηθισμένα υλικά. Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν συστολή όταν τεντώνονται σε αντίθεση με τα συμβατικά υλικά που διαστέλλονται.

2.3.4 ΥΛΙΚΑ ΔΙΚΤΥΩΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ – LATTICE MATERIALS

Τα υλικά δικτυωτού πλέγματος (Εικόνα 44) είναι ένας τύπος προηγμένου υλικού μηχανικής που χαρακτηρίζεται από μια δικτυωτή δομή που αποτελείται από δοκούς. Η δομή του συγκεκριμένου μεταύλικού αποτελείται από διασυνδεδεμένες δοκούς ή δικτυώματα, όπου σχηματίζουν ένα επαναλαμβανόμενο μοτίβο.



Εικόνα 44: Υλικά Δικτυωτού Πλέγματος

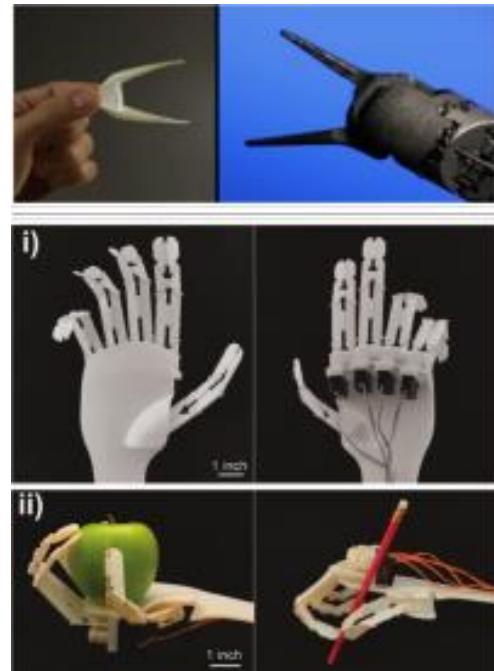
Αυτή η δομή παρέχει μια βέλτιστη ισορροπία μεταξύ ακαμψίας, αντοχής και βάρους, καθιστώντας τα υλικά δικτυωτού πλέγματος ιδανικά για χρήση σε διάφορες εφαρμογές, όπως η αεροδιαστημική και την αυτοκινητοβιομηχανία.

2.3.5 ΔΟΜΕΣ ORIGAMI & KIRIGAMI

Οι δομές Origami & Kirigami (Εικόνα 45) είχαν μεγάλο ενδιαφέρον στη ρομποτική και την αεροδιαστημική βιομηχανία λόγω της ευελιξίας τους στη δημιουργία Functional Mechanical Metamaterial.

Το Origami είναι μια παραδοσιακή ιαπωνική τεχνική αναδίπλωσης χαρτιού με συστηματική αναδίπλωση του επίπεδου χαρτιού κατά μήκος των πτυχών, μπορούν να επιτευχθούν περίπλοκες τρισδιάστατες δομές.

Το Kirigami είναι μια παραλλαγή μιας τεχνικής Origami, που κόβει χαρτί και διπλώνει κατά μήκος των πτυχών για την κατασκευή δομών.



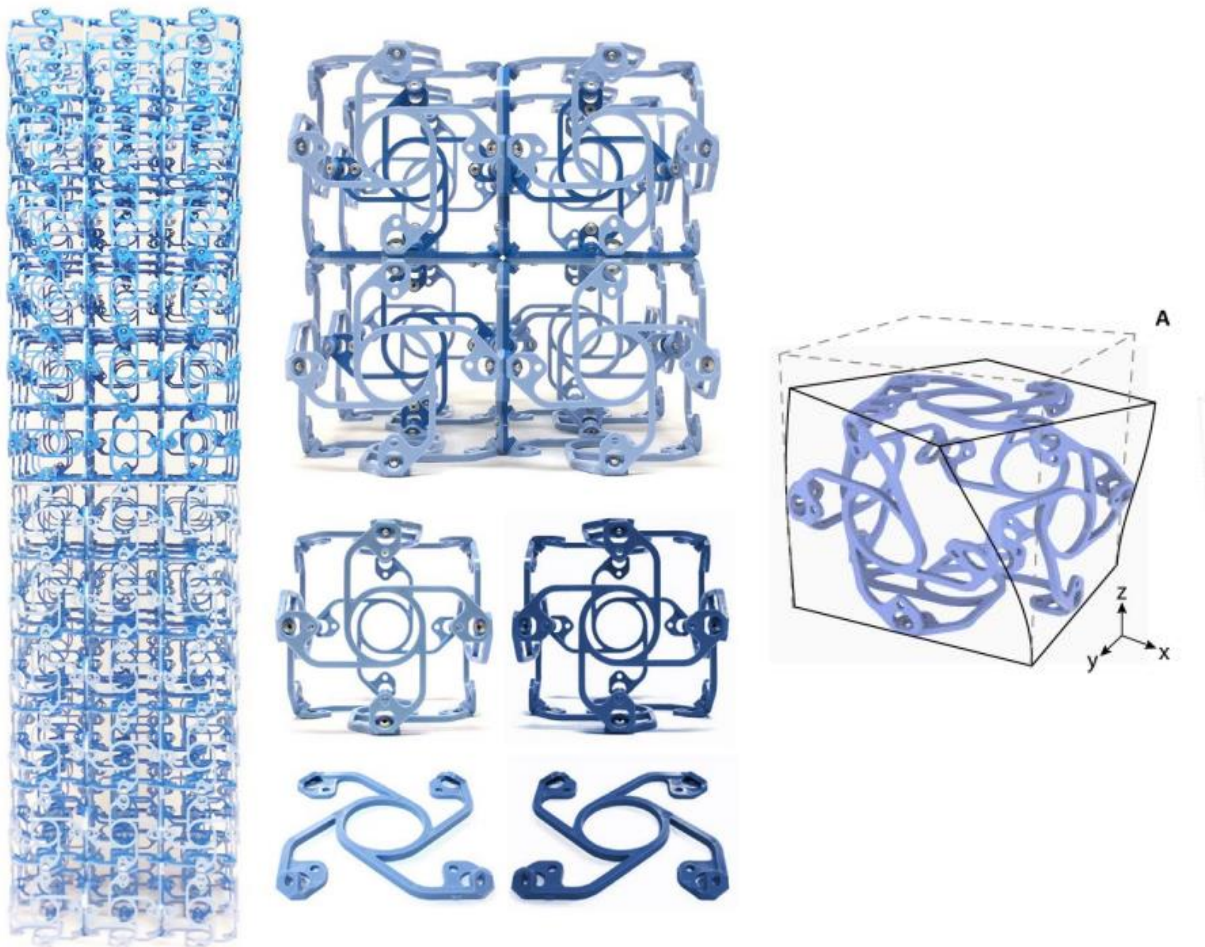
Εικόνα 45: Δομές Origami & Kirigami

Οι μηχανισμοί που χρησιμοποιούν τεχνικές Origami έχουν γίνει όλο και πιο σημαντικοί λόγω των βιομηχανικών εφαρμογών τους. Για παράδειγμα, τα μοτίβα origami Miura-ori χρησιμοποιούνται ως δομές ανάπτυξης για δορυφόρους στην αεροδιαστημική. Στη βιοϊατρική βιομηχανία, αναπτύσσονται εμπνευσμένα από origami μοσχεύματα stent και micro grippers. Επιπλέον, δομές εμπνευσμένες από το origami χρησιμοποιούνται στην ρομποτική στα Soft Robotics για πτυσσόμενα ρομποτικά χέρια και βιομιμητικά φέροντα φτερά. Οι ιδιότητες του όγκου του υλικού σε μια δομή origami καθορίζονται από τη γεωμετρία και το σχέδιο των πτυχών που το αποτελούν.

2.3.6 ΕΛΙΚΟΕΙΔΗ ΜΕΤΑΥΛΙΚΑ – CHIRAL METAMATERIALS

Τα Ελικοειδή Μεταύλικά – Chiral Metamaterials (Εικόνα 46) είναι τεχνητά υλικά σχεδιασμένα με συμπεριφορά συστροφής, ώστε να μπορούν να παρουσιάσουν μια αριστερόστροφη ή δεξιόστροφη παραμόρφωση.

Με βάση τον προσανατολισμό των ελικοειδών μικροδομών, κατά την διάρκεια της αξονικής τάσης, το συγκεκριμένο μεταύλικό παρουσιάζει συστροφή κάθετα στο επίπεδο της τάσης, είτε προς αριστερά είτε προς δεξιά.



Εικόνα 46: Ελικοειδή Μεταύλικά

Όπως αναφέραμε και παραπάνω, τα μεταύλικά και πιο συγκεκριμένα τα Μηχανικά Μεταύλικά μπορούν να χωριστούν σε πάρα πολλές κατηγορίες.

ΚΕΦ.3: ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

3.1 ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΥΛΙΚΑ

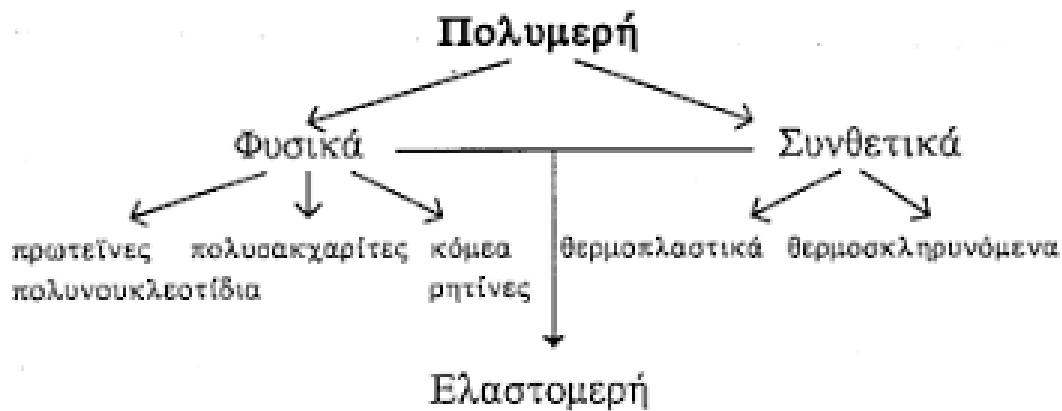
Τα πολυμερή υλικά είναι οργανικές ενώσεις βασιζόμενες στον άνθρακα και στο υδρογόνο αλλά και σε μη μεταλλικά στοιχεία όπως το οξυγόνο, το άζωτο και το πυρίτιο. Τα πολυμερή διαθέτουν πολύ μεγάλες μοριακές δομές σε αλυσίδες με βάση τον άνθρακα με γνωστότερες το Νάιλον (Nylon) και το πολυ-βινυλιο-χλωρίδιο (PVC).

Τα πολυμερή υλικά διακρίνονται σε δύο κατηγορίες (Εικόνα 47 & Εικόνα 48):

- Φυσικά: Βρίσκονται στην φύση
- Συνθετικά: Παράγονται από τον άνθρωπο

Φυσικά πολυμερή	Συνθετικά πολυμερή
☞ Άμυλο	☞ Πολυαιθυλένιο
☞ Κιτταρίνη	☞ PVC
☞ Μαλλί	☞ Πολυστερίνη
☞ Βαμβάκι	☞ Νάιλον
☞ Ξύλο	☞ Ακρυλικά
☞ Μετάξι	☞ Μελαμίνη

Εικόνα 47: Παραδείγματα Φυσικών και Συνθετικών πολυμερών



Εικόνα 48: Κατηγορίες Πολυμερών Υλικών

Η Διεθνή Ένωση Καθαρής και Εφαρμοσμένης Χημείας (*Union of Pure and Applied Chemistry IUPAC*), προσδίδει το πολυμερές σαν μία ουσία που αποτελείται από πολλά μόρια, σχετικής υψηλής μοριακής μάζας, του οποίου η δομή περιλαμβάνει την πολλαπλή επανάληψη μονάδων προερχόμενων από μόρια χαμηλής σχετικής μοριακής μάζας.

3.1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΥΛΙΚΑ

Το 1833, ο **Jöns Jakob Berzelius** επινόησε τον όρο «πολυμερές».

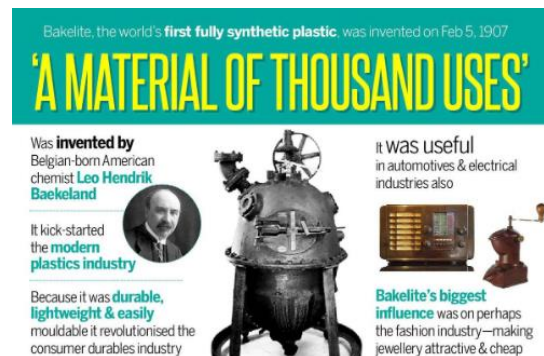
Το 1839, ο **Charles Goodyear**, χημικός από το *New Haven Connecticut*, βελτίωσε τις ιδιότητες του φυσικού καουτσούκ τοποθετώντας ένα μίγμα καουτσούκ και θείου σε θερμή εστία με αποτέλεσμα να καταφέρει να κάνει το καουτσούκ πολύ πιο ισχυρό, πιο εύκαμπτο και πιο ανθεκτικό στη θερμότητα και σε άλλες περιβαλλοντικές συνθήκες. Το 1844 ο Charles Goodyear έλαβε σχετικό δίπλωμα ευρεσιτεχνίας και ομώνυμη εταιρία αναπτύχθηκε στις ΗΠΑ (Εικόνα 49). Η διαδικασία αυτή για τη βελτίωση των ιδιοτήτων του φυσικού καουτσούκ ονομάστηκε βουλκανισμός, καθώς ακόμα και σήμερα, η βασική διεργασία παραμένει η ίδια, περισσότερο από 1.5 αιώνες μετά.



Εικόνα 49: Διαφημιστικό της GOODYEAR το 1930

Το 1870, ο **John Wesley Hyatt** κατάφερε την παρασκευή ενός συνθετικού υλικού ως υποκατάστατου του φυσικού ελεφαντόδοντου, προσθέτοντας καμφορά και αλκοόλη και κατεργαζόμενος το μείγμα υπό πίεση. Το υλικό πατενταρίστηκε με το όνομα «**Celluloid**» το 1870 και ήταν από τα πιο επιτυχημένα νέα υλικά αφού βρήκε εφαρμογές σε μεγάλο εύρος δραστηριοτήτων όπως την κατασκευή κουμπιών, κολάρων, λαβών για μαχαίρια κλπ.

Το 1907, **Leo Hendrick Baekeland** ανακάλυψε το πρώτο συνθετικό οργανικό πολυμερές, τη σύνθεση μιας θερμοσκληρυνόμενης ρητίνης φαινόλης-φορμαλδεΐδης, η οποία την ονομάστηκε **Βακελίτης** (Εικόνα 50). Την επόμενη χρονιά ίδρυσε την εταιρεία *Bakelite Corporation* για τη βιομηχανική παραγωγή της.



Εικόνα 50: Βακελίτης

Το 1920, ο **Hermann Staudinger** διατύπωσε σε μια δημοσίευση του, ότι τα πολυμερή αποτελούνται από μακριές αλυσίδες ατόμων που συγκρατούνται μεταξύ τους με ομοιοπολικούς δεσμούς, κάνοντας πιο κατανοητή την μοριακή φύση των πολυμερών. Το 1953 του απονεμήθηκε το βραβείο Νόμπελ «**Nobel**» Χημείας για τις ανακαλύψεις του, στον τομέα της μακρομοριακής χημείας.

Κατά την διάρκεια του **20^{ου} αιώνα**, η μελέτη και ανάπτυξη νέων πολυμερών υλικών επεκτάθηκε γρήγορα και οδήγησε στην ανάπτυξη σημαντικών πολυμερών, όπως το Πολυαιθυλένιο-PE, το PVC και το Νάιλον.

Οι ιδιότητες των πολυμερών μελετήθηκαν εκτενώς και αναπτύχθηκαν νέα υλικά με βελτιωμένη απόδοση για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως η συσκευασία, η κλωστοϋφαντουργία, η αυτοκινητοβιομηχανία και η αεροδιαστημική βιομηχανία.

Σήμερα, η επιστήμη των πολυμερών είναι ένα διεπιστημονικό πεδίο που περιλαμβάνει τη χημεία, τη φυσική, την επιστήμη των υλικών και τη μηχανική. Η ανάπτυξη νέων πολυμερών και υλικών με βάση τα πολυμερή συνεχίζει να είναι ένας ενεργός τομέας έρευνας, με έμφαση στη βιωσιμότητα, τη βιοαποδομησιμότητα και τις προηγμένες λειτουργίες.

Η ανακάλυψη διαφόρων σημαντικών πολυμερών σε χρονολογική σειρά παρουσιάζεται στην Εικόνα 51.

Χρονολογία	Πολυμερές	Επιστήμονας
1839	Βουλκανισμένο καουτσούκ	Goodyear, Hancock
1907	Βακελίτης	Baekeland
1919	Οξική κυτταρίνη	Dreyfus
1927	Αλκυδικές ρητίνες	Kienle
1930	Πολυστυρένιο	Staudinger
1931	Ακρυλικά	Rohm
1931	Πολυβινυλοχλωρίδιο	Klatte, Semon
1939	Πολυαιθυλένιο	Fawcett, Gibson
1939	Νάιλον-6,6	Carothers
1941	Πολυτετραφθοροαιθυλένιο	Plunett
1943	Πολυουρεθάνες	Bayer
1944	Πολυ(τερεφθαλικός αιθυλενεστέρας)	Whinfield, Dickson
1947	Εποξειδικές ρητίνες	Castan, Greenlee
1956	Γραμμικό πολυαιθυλένιο	Ziegler, Hogan
1957	Πολυπροπυλένιο	Natta
1959	Πολυ(ανθρακικοί εστέρες)	Schnell, Fox
1966	Αραμίδια	Morgan

Εικόνα 51: Χρονολογίες Εφεύρεσης Πολυμερών Υλικών

3.1.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΒΑΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

Τα Πολυμερή Υλικά ανάλογα με τις Μηχανικές και Θερμικές ιδιότητες κατηγοριοποιούνται στις εξής κατηγορίες (Εικόνα 52):

1. Θερμοπλαστικά (Thermoplastics)
2. Θερμοσκληρυνόμενα (Thermosets)
3. Ελαστομερή (Elastomers)

Πολυμερές	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Εφελκυστική Αντοχή (MPa)
Θερμοπλαστικά		
Πολυαιθυλένιο L.D.	0.15 -0.24	7-17
Πολυαιθυλένιο H.D.	0.55-1.00	20-37
Πολυστυρένιο	3.00 – 3.30	50-70
PVC	2.40-3.00	40-60
Θερμοσκληρυνόμενα		
Εποξειδικές ρητίνες	2.10-5.50	40-85
Πολυεστέρες	1.30-4.50	45-85
Ελαστομερή		
Πολυϊσοπρένιο	0.002-0.10	~10
Πολυβουταδιένιο	0.004-0.10	~10

Εικόνα 52: Πίνακας Πολυμερών Υλικών

Θερμοπλαστικά - Thermoplastics

Τα θερμοπλαστικά (Εικόνα 53) είναι μια κατηγορία πολυμερών με γραμμικές δομές, τα οποία μαλακώνουν, τήκονται και ρέουν όταν θερμαίνονται ενώ σκληραίνουν και στερεοποιούνται όταν ψύχονται. Τα υλικά αυτά είναι μαλακά και όλκιμα υλικά, τα οποία μορφοποιούνται με εφαρμογή θερμότητας και πίεσης.

Παραδείγματα θερμοπλαστικών περιλαμβάνουν το πολυαιθυλένιο, το πολυπροπυλένιο, το πολυστυρένιο και το πολυβινυλοχλωρίδιο, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες βιομηχανίες λόγω των εξαιρετικών μηχανικών ιδιοτήτων, της χαμηλής πυκνότητας και της καλής χημικής αντοχής τους.

Τα θερμοπλαστικά συνήθως επεξεργάζονται χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως χύτευση με έγχυση, εξώθηση και χύτευση με εμφύσηση, που επιτρέπουν την παραγωγή πολύπλοκων σχημάτων και εξαρτημάτων με υψηλή ακρίβεια και απόδοση. Επιπλέον, τα θερμοπλαστικά μπορούν να ανακυκλωθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν πολλές φορές, καθιστώντας τα μια βιώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον επιλογή για πολλές εφαρμογές.



Εικόνα 53: Παραδείγματα Θερμοπλαστικών Υλικών

Θερμοσκληρυνόμενα – Thermosettings

Τα Θερμοσκληρυνόμενα (Εικόνα 54) είναι μια κατηγορία πολυμερών με μη γραμμικούς δεσμούς, τα οποία αποτελούνται από μόρια πολυμερούς που συνδέονται μεταξύ τους μέσω ομοιοπολικών δεσμών, οι οποίοι δεν μπορούν να σπάσουν εύκολα από τη θερμότητα ή άλλες εξωτερικές δυνάμεις.

Παραδείγματα θερμοσκληρυνόμενων περιλαμβάνουν εποξειδικές, φαινολικές και μελαμινικές ρητίνες, οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες βιομηχανίες λόγω των εξαιρετικών μηχανικών τους ιδιοτήτων, της υψηλής θερμικής και χημικής σταθερότητας και της καλής ηλεκτρικής τους μόνωσης.



Εικόνα 54: Παραδείγματα Θερμοσκληρυνόμενων Υλικών

Τα Θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή μπορούν να μορφοποιηθούν υπό πίεση και θέρμανση, χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως, η χύτευση με συμπίεση, η χύτευση μεταφοράς και η εξώθηση, οι οποίες επιτρέπουν την παραγωγή εξαρτημάτων και εξαρτημάτων υψηλής αντοχής με υψηλή σταθερότητα διαστάσεων και ακρίβεια.

Επιπλέον, τα Θερμοσκληρυνόμενα είναι εξαιρετικά ανθεκτικά και έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, καθιστώντας τα μια προτιμώμενη επιλογή για εφαρμογές, όπως η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία και τα ηλεκτρονικά. Ωστόσο, λόγω της διασταυρούμενης δομής τους, οι θερμοσκληρυντές δεν μπορούν να ανακυκλωθούν ή να αναμορφωθούν, γεγονός που αποτελεί πρόκληση για τη διάθεσή τους και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Ελαστομερή – Elastomers

Τα Ελαστομερή (Εικόνα 55) είναι μια κατηγορία πολυμερών με υψηλή ελαστικότητα που μπορούν κατά τη φόρτισή να υποστούν μεγάλες παραμορφώσεις και να επανέλθουν στο αρχικό τους σχήμα όταν το φορτίο σταματήσει να υφίσταται.

Παραδείγματα ελαστομερών περιλαμβάνουν το φυσικό καουτσούκ, τη σιλικόνη και την πολυουρεθάνη, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες βιομηχανίες λόγω των εξαιρετικών μηχανικών ιδιοτήτων και της καλής χημικής αντοχής.

Τα ελαστομερή συνήθως επεξεργάζονται χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως εξώθηση, χύτευση με έγχυση και χύτευση με συμπίεση, που επιτρέπουν την παραγωγή εύκαμπτων εξαρτημάτων και εξαρτημάτων με υψηλή ελαστικότητα και ανθεκτικότητα.



Εικόνα 55: Παραδείγματα Ελαστομερών Υλικών

Επιπλέον, τα ελαστομερή είναι ιδιαίτερα προσαρμόσιμα σε διαφορετικά περιβάλλοντα και θερμοκρασίες, καθιστώντας τα μια προτιμώμενη επιλογή για εφαρμογές όπως στεγανοποιήσεις και παρεμβύσματα. Ωστόσο, λόγω της υψηλής ελαστικότητάς τους, τα ελαστομερή έχουν χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό, γεγονός που περιορίζει τη χρήση τους σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή φέρουσα ικανότητα και αντοχή στη φθορά.

3.1.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

Τα πολυμερή παρουσιάζουν μοναδική μηχανική συμπεριφορά, η οποία καθορίζεται κυρίως από δύο ιδιότητες:

1. Την ακαμψία τους, δηλαδή την αντίστασή τους στην ελαστική παραμόρφωση
2. Την αντοχή τους, δηλαδή την αντίστασή τους στη θραύση

Αρκετά βασικά μηχανικά χαρακτηριστικά είναι απαραίτητα για την ανάλυση των πολυμερών, όπως:

- Το μέτρο ελαστικότητας E
- Το όριο διαρροής σ_y
- Η αντοχή στον εφελκυσμό
- Η επιμήκυνση κατά τη θραύση

Η συμπεριφορά των πολυμερών στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας περιγράφεται τυπικά από δύο τιμές:

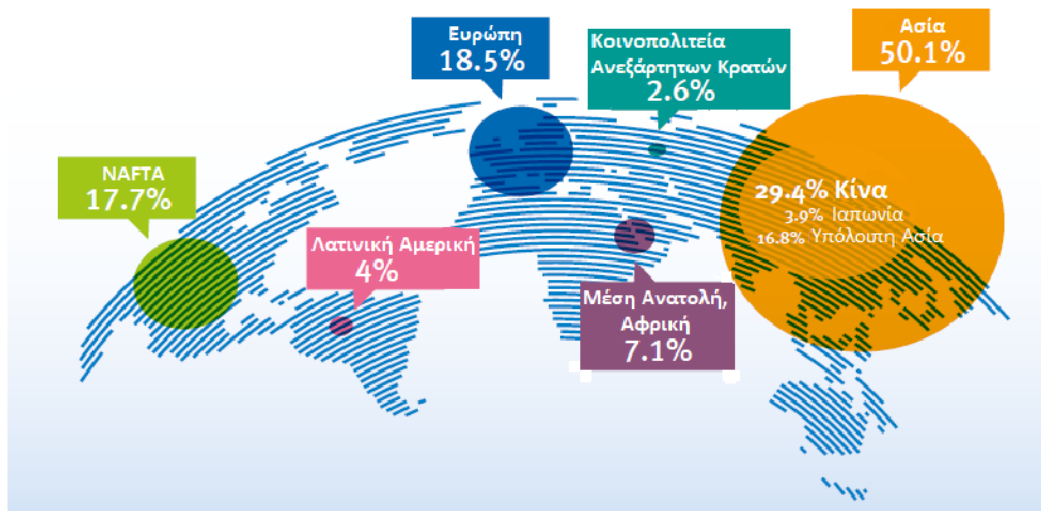
1. Τη θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου (T_g) και
2. Τη θερμοκρασία τήξης (T_m).

Τα πολυμερή υλικά διαθέτουν χαμηλές πυκνότητες και η αντοχή τους είναι χαμηλότερη των κεραμικών και των μετάλλων. Η καλή τους ολκιμότητα και η εξαιρετική τους πλαστικότητα ευνοεί την μορφοποίησή τους. Είναι αδρανή ως προς τη χημική τους σύσταση και ανθεκτικά σε πληθώρα από διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος. Το βασικότερό τους μειονέκτημα αποτελεί η ιδιότητά τους να μαλακώνουν και να αποσυντίθενται σε χαμηλές σχετικά θερμοκρασίες, γεγονός που περιορίζει τη χρήση τους.

3.1.5 ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Στον 21^ο αιώνα , η διαχείριση των απορριπτόμενων μη αποικοδομήσιμων πολυμερών αποτελεί ένα μείζον ζήτημα για την ανθρωπότητα, καθώς δημιουργούν αρκετά ανεπιθύμητα περιβαλλοντικά ζητήματα, απειλώντας το περιβάλλον και τους ζωικούς πληθυσμούς.

Η παραγωγή πλαστικών (Εικόνα 56) αυξήθηκε από 0,5 εκατομμύρια τόνους το 1950 σε 350 εκατομμύρια τόνους το 2017. Αυτή η αύξηση της χρήσης του παραγόμενου πλαστικού δημιούργησε ζητήματα διαχείρισης των αποβλήτων μετά τη λήξη χρήσης των πλαστικών που συσσωρεύονται σε χώρους υγειονομικής ταφής και σε φυσικά περιβάλλοντα. Τέτοια απόβλητα είναι ιδιαίτερα εμφανή σε θαλάσσια περιβάλλοντα, όπου έχουν παρατηρηθεί πλαστικά αντικείμενα από τους πόλους μέχρι και τον ισημερινό.



Εικόνα 56: Παγκόσμια παραγωγή πλαστικών

Τα πλαστικά έχουν άμεση επίπτωση στα θαλάσσια οικοσυστήματα και θεωρείται ότι είναι υπεύθυνο για το θάνατο ενός πολύ μεγάλου αριθμού πτηνών από κατάποση ή στραγγαλισμό. Η δειγματοληψία σε διάφορους θαλάσσιους βιότοπους έχει αποκαλύψει ότι οι πλαστικοί αυτοί ρύποι απορροφώνται από πλαγκτονικούς πληθυσμούς και κατά συνέπεια, μη βιοδιασπώμενα πλαστικά συσσωρεύονται στην τροφική αλυσίδα, θέτοντας σε κίνδυνο τόσο την άγρια ζωή όσο και τον άνθρωπο. Τα πολυμερή που βρίσκονται στον ωκεανό έχουν σημαντική επίδραση στη θαλάσσια ζωή και σε περίπτωση κατάποσης, προκαλούν εντερικές εμφράξεις σε μικρά ψάρια ή ασφουξία άλλων θαλάσσιων ζώων, όπως δελφίνια και χελώνες. Αποτελούν και κίνδυνο για την χερσαία άγρια ζωή με το να εμπλέκονται ή να εμποδίζουν τις οδούς πέψης από υλικά με οπές ή σε πλαστικές σακούλες.

Τα μη αποικοδομήσιμα πολυμερή (Εικόνα 57) έχουν επίσης την ικανότητα να λειτουργούν ως εστίες ασθένειας επειδή παραμένουν στο περιβάλλον για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα επιτρέποντας τη συσσώρευση οργανισμών.



Εικόνα 57: Απόρριψη Πλαστικών στο Φυσικό Περιβάλλον

Στην **Ελλάδα**, παράγονται κάθε χρόνο σχεδόν 730.000 τόνοι πλαστικών απορριμμάτων, από τα οποία οι 11500 τόνοι καταλήγουν στις Ελληνικές θάλασσες (Εικόνα 58 & 59) και 50000 τόνοι στη φύση γενικότερα (Εικόνα 59).



Εικόνα 58: Πλαστικά στις Θάλασσες

Στον μπλε κάδο, σε ποσοστό πάνω από 40%, απορρίπτονται μη-ανακυκλώσιμα σκουπίδια. Πρόκειται κυρίως για υπολείμματα τροφών, τα οποία μολύνουν τα υπόλοιπα προϊόντα, γεγονός που όχι μόνο δυσχεραίνει τη διαλογή, αλλά πολλές φορές έχει ως αποτέλεσμα να αχρηστεύει ολόκληρο το περιεχόμενο του μπλε κάδου.



Εικόνα 59: Πλαστικά στην Ελλάδα

Σε παγκόσμια κλίμακα, από τους 8.3 δισεκατομμύρια τόνους πλαστικών που έχουν εισαχθεί στην αγορά μεταξύ 1950 και 2015, έχουν δημιουργηθεί συνολικά 5.8 δισεκατομμύρια τόνοι πλαστικών απορριμμάτων.

Από αυτούς:

- Το **12%** αποτεφρώθηκε
- Το **9%** ανακυκλώθηκε
- Το **79%** περίπου απορρίφθηκε σε χώρους υγειονομικής ταφής ή στο περιβάλλον

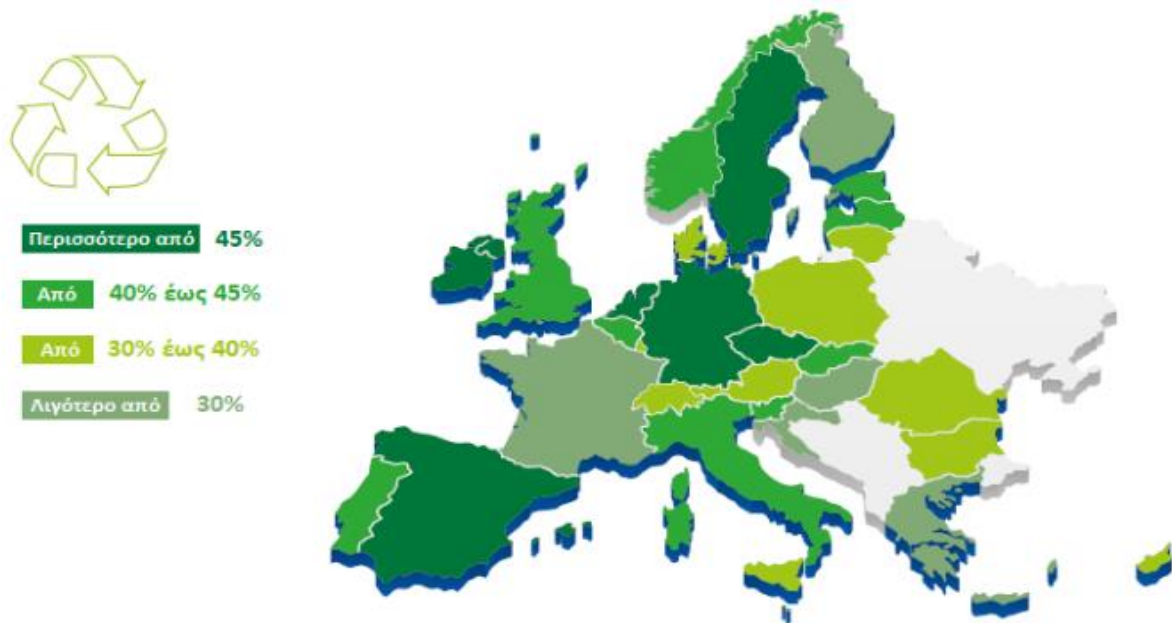
Τα τελευταία χρόνια γίνεται μια παγκόσμια προσπάθεια για μείωση του πλαστικού. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση επικρατεί έντονη κινητικότητα για τον περιορισμό της πλαστικής ρύπανσης, καθώς τον Μάιο του 2018 στο πλαίσιο υλοποίησης της στρατηγικής για τις πλαστικές ύλες, η Ε.Ε. ανακοίνωσε πρόταση Ευρωπαϊκής οδηγίας για τον περιορισμό των επιπτώσεων συγκεκριμένων πλαστικών προϊόντων στο περιβάλλον. Η συγκεκριμένη πρόταση στρέφεται κυρίως σε 10 πλαστικά προϊόντα μιας χρήσης και σε αλιευτικά εργαλεία.

3.1.5.1 ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

Τα μέτρα για την ορθή αντιμετώπιση της αύξησης των πλαστικών είναι:

- Επαναχρησιμοποίηση των προϊόντων
- Ανακύκλωση

Η Ευρωπαϊκή Ένωση από το 2006 έως το 2016 αύξησε την ανακύκλωση των πλαστικών απορριμμάτων κατά 79% (Εικόνα 60) και η υγειονομική ταφή μειώθηκε κατά 43%.



Εικόνα 60: Ποσοστά ανακύκλωσης στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Σύμφωνα με την **GREENPEACE**, η μόνη ουσιαστική λύση του προβλήματος αποτελεί μόνο η επαναχρησιμοποίηση των προϊόντων, καθώς με την ανακύκλωση εμφανίζονται τα εξής προβλήματα:

- Τα συστήματα ανακύκλωσης δεν μπορούν να συμβαδίσουν με τον τεράστιο όγκο πλαστικών σκουπιδιών που παράγεται. Ένα παράδειγμα, αποτελεί η Γερμανία, η οποία έχει τα υψηλότερα ποσοστά ανακύκλωσης στον κόσμο με βάση τη συγκομιδή, πάνω από το 60% όλων των πλαστικών απορριμμάτων καίγεται και μόνο το 38% ανακυκλώνεται.
- Το πλαστικό που δεν ανακυκλώνεται εγχώρια συνήθως πακετάρετε σε μεικτά δεμάτια και εξάγεται μαζικά σε άλλες χώρες για να το διαχειριστούν. Παρόλα αυτά, ανεξάρτητα από την τύχη του, η χώρα εξαγωγής το υπολογίζει ως ανακυκλωμένο πλαστικό, ενώ η πραγματική ποσότητα που ανακυκλώνεται εντός της χώρας είναι πολύ χαμηλότερη.

- Το πλαστικό δεν ανακυκλώνεται αλλά “υποκυκλώνεται”, δηλαδή αντί από την παλιά πλαστική συσκευασία να παρασκευαστεί μία νέα πλαστική συσκευασία, το πλαστικό χρησιμοποιείται για τη δημιουργία προϊόντων χαμηλότερης ποιότητας και αξίας που δεν μπορούν τις περισσότερες φορές να ανακυκλωθούν περαιτέρω. Επομένως ό,τι διαφημίζεται ως ανακυκλώσιμο δεν σημαίνει ότι ανακυκλώνεται.

3.1.5.2 ΒΙΟΔΙΑΣΠΩΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες, η εξάντληση των ορυκτών πόρων, η διαχείριση των στερεών αποβλήτων που συσχετίζεται με την εκτεταμένη παραγωγή πλαστικών υλικών, σε συνδυασμό με την αντοχή τους και η ανάγκη για επίλυση θεμάτων, όπως η διαχείριση γεωργικών μεμβρανών, η συλλογή και ο διαχωρισμός απορριμμάτων έχει προκαλέσει το έντονο ενδιαφέρον για βιοαποικοδομήσιμα πολυμερή.

Στην αγορά είδη βρίσκονται διάφοροι τύποι αποικοδομήσιμων πλαστικών, όπως τα φυσικά πλαστικά που παράγονται από μικροοργανισμούς, πλαστικά με μείγματα πολυμερών και φωτοαποικοδομήσιμα πλαστικά, οι οποίοι μπορούν πλέον να είναι ανταγωνιστικοί με μη βιοαποικοδομήσιμα θερμοπλαστικά σε διάφορους τομείς (συσκευασία, βιοϊατρική, κλωστοϋφαντουργία).

Τα βιοαποικοδομήσιμα πολυμερή μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις κατηγορίες:

1. Φυσικοί πολυσακχαρίτες και άλλα βιοπολυμερή
2. Πολυεστέρες που παράγονται από μικροοργανισμούς
3. Συνθετικά πολυμερή από μονομερή βιολογική προέλευση
4. Πολυεστέρες από μονομερή ορυκτών καυσίμων

Τα συνθετικά βιοαποικοδομήσιμα πλαστικά έχουν ορισμένα πλεονεκτήματα σε σύγκριση με εκείνα που παράγονται από φυσικά παραγόμενα μακρομόρια (άμυλο, κυτταρίνη), όπως μεγαλύτερη ευχρηστία, σταθερή ποιότητα υλικού και δυνατότητα επεξεργασίας συγκρίσιμη με τα συμβατικά πλαστικά.

Για την περιβαλλοντικά ασφαλή εφαρμογή τέτοιων αποικοδομήσιμων πλαστικών, είναι σημαντικό να αποδειχθεί ότι τα ενδιάμεσα προϊόντα, ακόμη και εκείνα που είναι διασπώμενα, δεν έχουν καμία οικοτοξικολογική επίδραση.

Σύμφωνα με την **GREENPEACE**, το βιοπλαστικό δεν αποτελεί λύση του περιβαλλοντικού προβλήματος, καθώς με τα βιοπλαστικά εμφανίζονται τα εξής προβλήματα:

- Η λέξη βιοπλαστικά δεν έχει συγκεκριμένο ορισμό και η εντύπωση ότι αυτά τα προϊόντα είναι πιο "φυσικά" επειδή προέρχονται από φυτά είναι λάθος, καθώς η παραγωγή πλαστικού από οργανικά υλικά μπορεί να περιλαμβάνει παρόμοια χημικά με αυτά του συμβατικού πλαστικού ή μπορεί και να περιέχει πλαστικό από ορυκτά καύσιμα σε ένα ποσοστό.
- Τα περισσότερα βιοπλαστικά παράγονται από αγροτικές καλλιέργειες, οπότε ανταγωνίζονται άλλες καλλιέργειες με αποτέλεσμα να απειλούν τη διατροφική ασφάλεια της ανθρωπότητας και εντείνουν την ανάγκη για καταπατήσεις γης και αύξηση των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου.
- Τα βιοδιασπώμενα πλαστικά αποικοδομούνται σε συνθήκες με πολύ υψηλές θερμοκρασίες και υγρασία, που συναντώνται σπάνια στο περιβάλλον. Επίσης, όπως και το κλασικό πλαστικό, διασπώνται σε μικρότερα κομμάτια που μπορούν να καταλήξουν σε ζωικούς οργανισμούς και στην τροφική αλυσίδα. Από την άλλη το κομποστοποιήσιμο πλαστικό αποικοδομείται τελείως, συνήθως όμως μόνο σε συνθήκες που μπορούν να δημιουργηθούν και πάλι μόνο εργοστασιακά. Καθώς οι απαιτούμενες υποδομές είναι σπάνιες, το κομποστοποιήσιμο πλαστικό καταλήγει κατά κύριο λόγο στις χωματερές ή στην ανακύκλωση όπου δημιουργεί επιπλέον προβλήματα (Εικόνα 61).



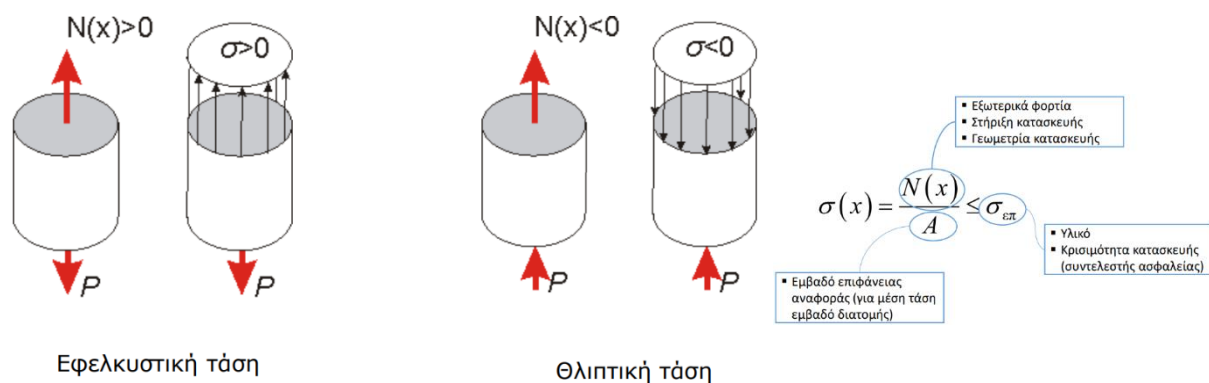
Εικόνα 61: Πραγματικότητα Βιοπλαστικών και 100% ανακυκλώσιμων συσκευασιών

3.2 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΛΙΚΩΝ

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά ενός υλικού προκύπτουν από την Μηχανική Συμπεριφορά του, όταν του ασκούνται οι ανάλογες καταπονήσεις λόγω των φορτίων. Η συμπεριφορά αυτή εξαρτάται από τον τρόπο που δρουν οι καταπονήσεις, αποτέλεσμα του οποίου είναι η ανάπτυξη εσωτερικών δυνάμεων στα υλικά που ονομάζονται τάσεις (stress). Οι τάσεις ανάλογα με το αν δρουν κάθετα ή εφαπτομενικά στην επιφάνεια διακρίνονται σε ορθές (σ) ή διατμητικές (τ).

ΜΕΣΗ ΟΡΘΗ ΤΑΣΗ

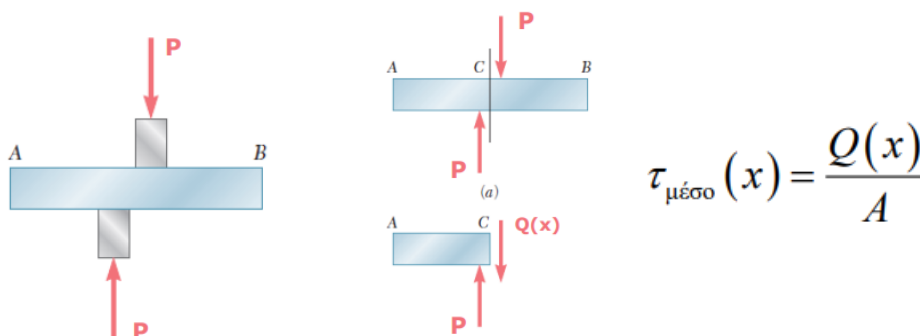
Η τάση σε μια επιφάνεια αναφοράς ισούται με την συνισταμένη δύναμη που δρα κάθετα σε αυτή δια το εμβαδό της (Εικόνα 62).



Εικόνα 62: Ορθή Τάση

ΜΕΣΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΤΑΣΗ

Η διατμητική τάση (Εικόνα 63), σε αντίθεση με την ορθή τάση, αναπτύσσεται όταν εφαρμόζονται εγκάρσιες δυνάμεις σε ένα μέλος.



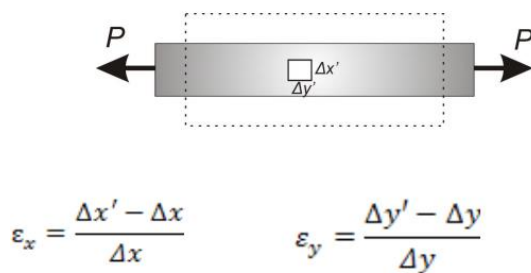
Εικόνα 63: Διατμητική Τάση

Οι διατμητικές τάσεις αναπτύσσονται σε κοχλίες, πείρους και ήλους που χρησιμοποιούνται για να συνδέσουν διάφορα δομικά στοιχεία και τμήματα κατασκευών και μηχανών.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

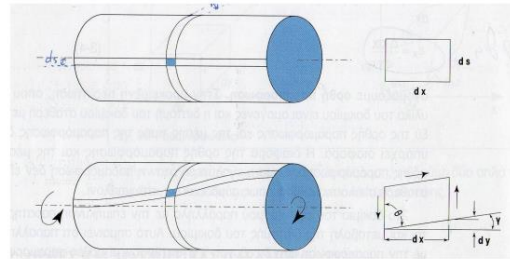
Εκτός από την ανάλυση της τάσης, μας ενδιαφέρει και η ανάλυση των παραμορφώσεων, η οποία εκφράζει την μεταβολή του όγκου του σώματος (Ορθή Παραμόρφωση – Εικόνα 64) και την αλλαγή της γεωμετρίας του (Διατμητική Παραμόρφωση – Εικόνα 65).

ΟΡΘΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ



Εικόνα 64: Ορθή Παραμόρφωση

ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ



Εικόνα 65: Διατμητική Παραμόρφωση

Για τον προσδιορισμό ή τον έλεγχο των μηχανικών ιδιοτήτων, διενεργούνται οι αντίστοιχες πειραματικές δοκιμές, όπως:

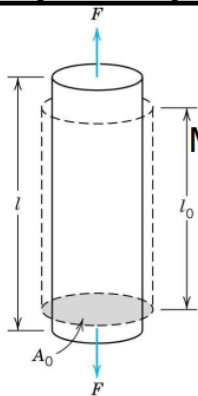
- Πείραμα Εφελκυσμού
- Πείραμα Θλίψης
- Πείραμα Στρέψης
- Πείραμα Κόπωσης
- Πείραμα Κάμψης
- Πείραμα Λυγισμού
- Πείραμα Κρούσης
- Πείραμα Σκληρότητας
- Πείραμα Ερπυσμού

3.2.1 ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ

Η δοκιμή του εφελκυσμού είναι μία από τις σπουδαιότερες μηχανολογικές μηχανικές δοκιμές, καθώς από τα αποτελέσματα θα προκύψουν σημαντικές ιδιότητες του εξεταζόμενου υλικού, όπως το όριο και το μέτρο ελαστικότητας, το όριο θραύσης και άλλες.

Εφελκυσμός (Εικόνα 66) είναι η καταπόνηση κατά την οποία σε ένα σώμα εφαρμόζονται δύο ομοαξονικά εξωτερικά φορτία (ίσα και αντιθέτου φοράς) που προσπαθούν να το επιμηκύνουν.

Εφελκυσμός



$$\text{Μηχανική τάση} = \sigma = \frac{F}{A_o}$$

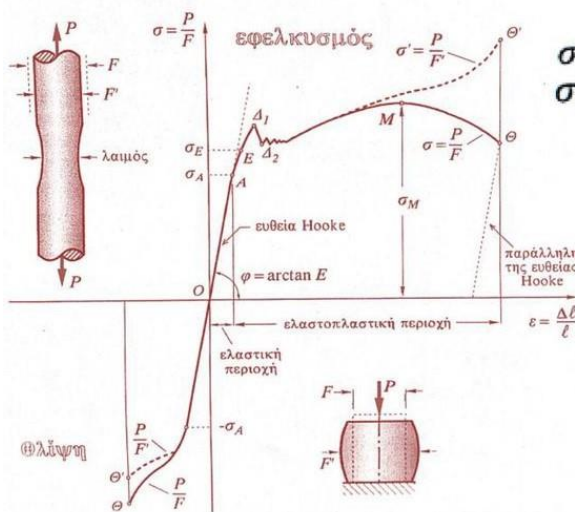
$$\text{Μηχανική παραμόρφωση} = \varepsilon = \frac{l_i - l_o}{l_o} = \frac{\Delta l}{l_o}$$

A_o = αρχική διατομή
 l_i = στιγμιαίο μήκος
 l_o = αρχικό μήκος

Παρατήρηση: η παραμόρφωση δεν έχει μονάδες. Εικόνα 66: Εφελκυσμός

Στο πείραμα του εφελκυσμού εφελκύουμε ένα δοκίμιο κατάλληλης γεωμετρίας και διαστάσεων με αυξανόμενη μετατόπιση των άκρων του έως την αστοχία και μετράμε πως μεταβάλλεται η δύναμη που εφαρμόζεται στα άκρα του δοκιμίου με την επιμήκυνσή του. Στο τέλος χαράζουμε την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης (Εικόνα 67).

Ανάλυση καμπύλης εφελκυσμού



σ_A : όριο αναλογίας
 σ_E : όριο διαρροής

Στην καμπύλη τάσης παραμόρφωσης διακρίνονται οι 3 περιοχές παραμόρφωσης. Αρχικά η ελαστική περιοχή όπου ισχύει ο νόμος Hooke $\sigma = E \cdot \varepsilon$, στη συνέχεια η ελαστοπλαστική περιοχή όπου και στα δοκίμια σχηματίζεται "λαιμός" και τέλος η περιοχή ανηγμένης παραμόρφωσης.

Εικόνα 67: Ανάλυση Καμπύλης Εφελκυσμού

3.2.2 ΘΛΙΨΗ

Θλίψη είναι η καταπόνηση κατά την οποία σε ένα σώμα εφαρμόζονται δύο ομοαξονικά εξωτερικά φορτία (ίσα και αντιθέτου φοράς) που προσπαθούν να το βραχύνουν (Εικόνα 68).

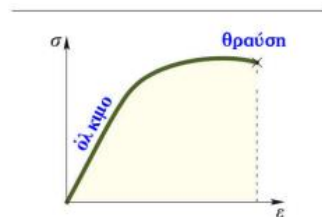
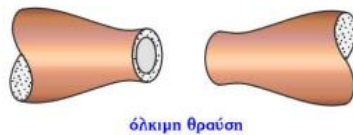
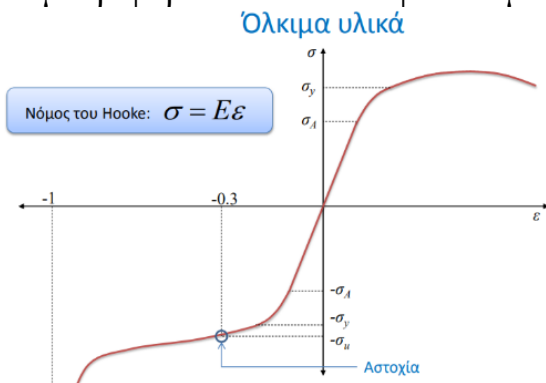


ΘΛΙΨΗ: αρνητικό πρόσημο (-)

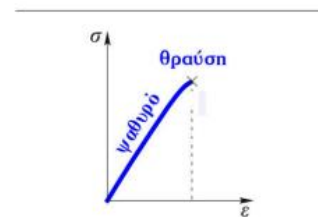
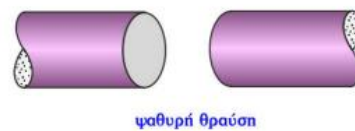
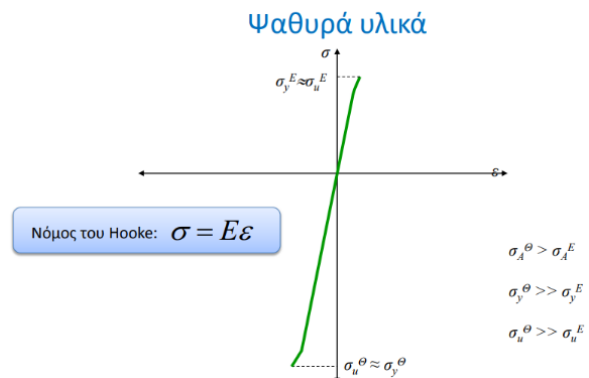
ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ: θετικό πρόσημο (+)

Εικόνα 68: Θλίψη

Στο πείραμα της Θλίψης ασκούμε θλιπτικό φορτίο σε δοκίμιο τυποποιημένης γεωμετρίας και διαστάσεων μέχρι το υλικό να αστοχήσει. Η συμπεριφορά του υλικού και ο τρόπος που αστοχεί εξαρτάται σημαντικά από το αν το υλικό είναι όλκιμο (Εικόνα 69) ή ψαθυρό (Εικόνα 70). Το πείραμα της θλίψης έχει νόημα κυρίως για ψαθυρά υλικά, τα οποία παρουσιάζουν πολύ διαφορετική συμπεριφορά από ότι σε εφελκυσμό.



Εικόνα 69: Διάγραμμα Όλκιμων Υλικών



Εικόνα 70: Διάγραμμα Ψαθυρών Υλικών

ΑΣΤΟΧΙΑ ΛΥΓΙΣΜΟΥ

Ο Λυγισμός (Εικόνα 71) προκύπτει όταν κατά την διάρκεια της θλίψης το δοκίμιο αστοχεί εγκάρσια στη φόρτιση του.

Η τιμή της Θλιπτικής Δύναμης, στην οποία εμφανίζεται το φαινόμενο του Λυγισμού, ονομάζεται Κρίσιμο Φορτίο Λυγισμού:

$$P_{κρ.} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l_k^2}$$

- E: Μέτρο Ελαστικότητας
- I: Ροπή Αδράνειας της διατομής
- l_k : Ενεργό Μήκος



Εικόνα 71:
Αστοχία
Λυγισμού

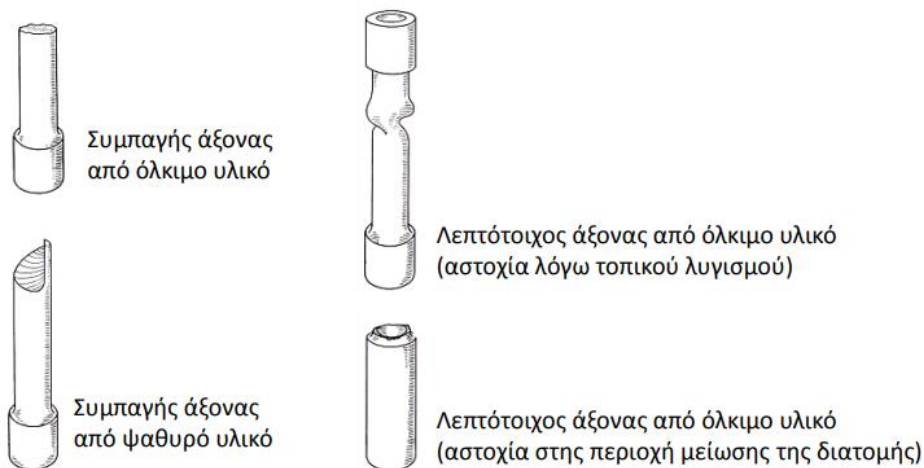
3.2.3 ΣΤΡΕΨΗ

Ένα σώμα (άξονας) καταπονείται σε στρέψη (Εικόνα 72) όταν σε δύο διακεκριμένες διατομές, που τα επίπεδά τους είναι κάθετα στον ευθύγραμμο κεντροβαρικό άξονά της, δρουν ίσες και αντίρροπες ροπές M_T . Οι Στρεπτικές παραμορφώσεις στη θραύση εξαρτώνται από το είδος του υλικού (Εικόνα 73).



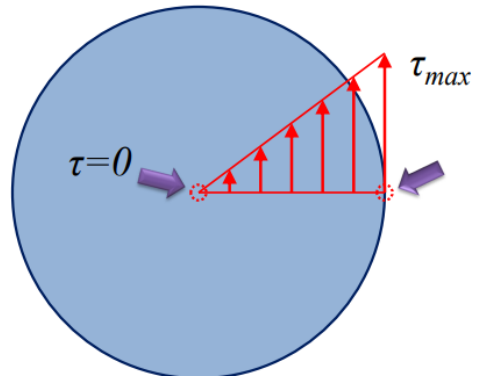
Εικόνα 72: Στρέψη

Αστοχία λόγω στρέψης



Εικόνα 73: Αστοχία λόγω Στρέψης

Στην στρέψη εμφανίζονται διατμητικές τάσεις, όπου η μέγιστη ορθή τάση εμφανίζεται στην άκρη της διαμέτρου και είναι και η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση για την δεδομένη M_T (Εικόνα 74).



Εικόνα 74: Μέγιστη Ορθή Τάση

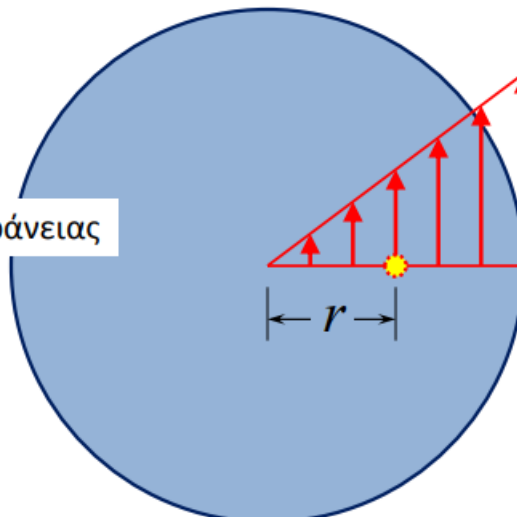
Η τάση στην Στρέψη εκφράζεται από τις σχέσεις που παρουσιάζονται στη Εικόνα 75.

$$\tau = \frac{M_T}{I_P} r$$

I_P : Πολική ροπή αδράνειας

Κυκλική διατομή:

$$I_P = \frac{\pi d^4}{32}$$



$$\tau_{\max} = \frac{M_T}{W_P}$$

W_P : Πολική ροπή αντίστασης

Κυκλική διατομή:

$$W_P = \frac{\pi d^3}{16}$$

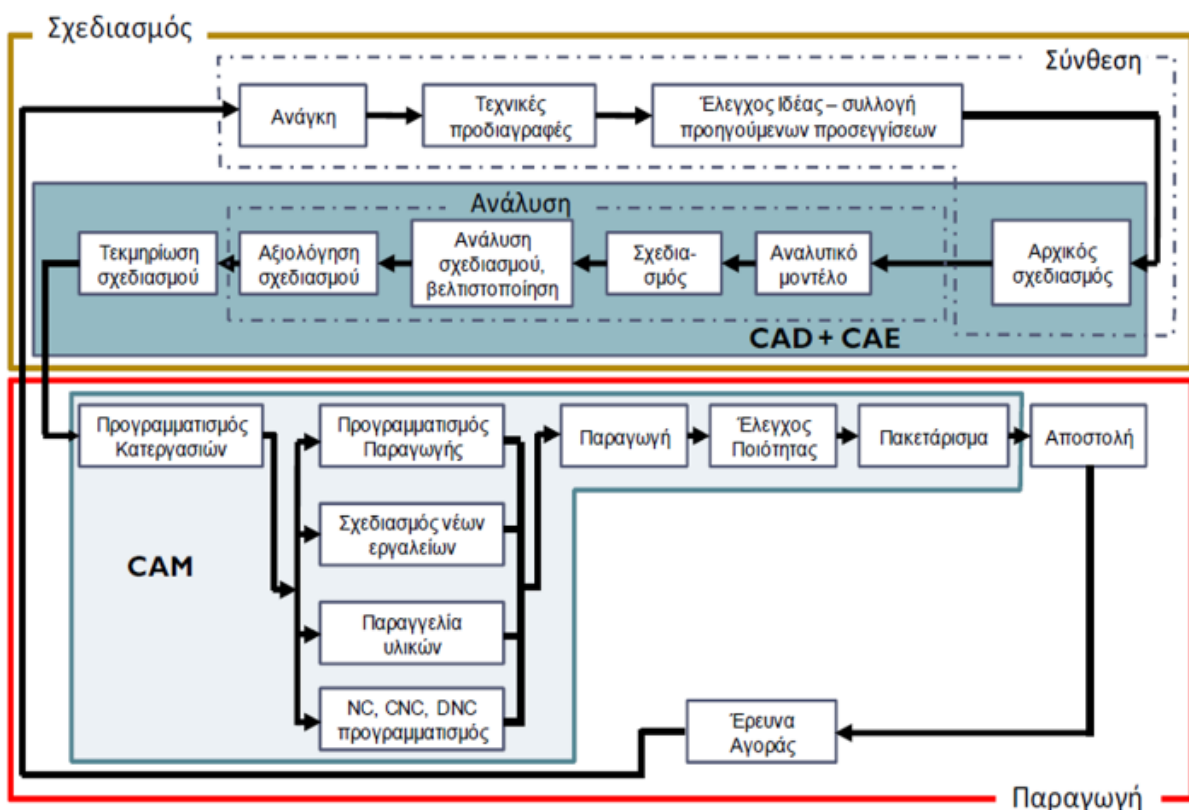
Εικόνα 75: Τύποι Τάσεων Στρέψης

ΚΕΦ.4: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ CAD – CAM – CAE

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση συστημάτων CAD – CAE – CAM για τον σχεδιασμό, μελέτη και κατασκευή υψηλής ποιότητας προϊόντων, αποτελούν δύο κρίσιμες τεχνολογίες που έχουν φέρει επανάσταση στον κατασκευαστικό κλάδο, καθιστώντας δυνατή την ολοκληρωμένη αυτοματοποίηση των παραγωγικών λειτουργιών (Εικόνα 76).

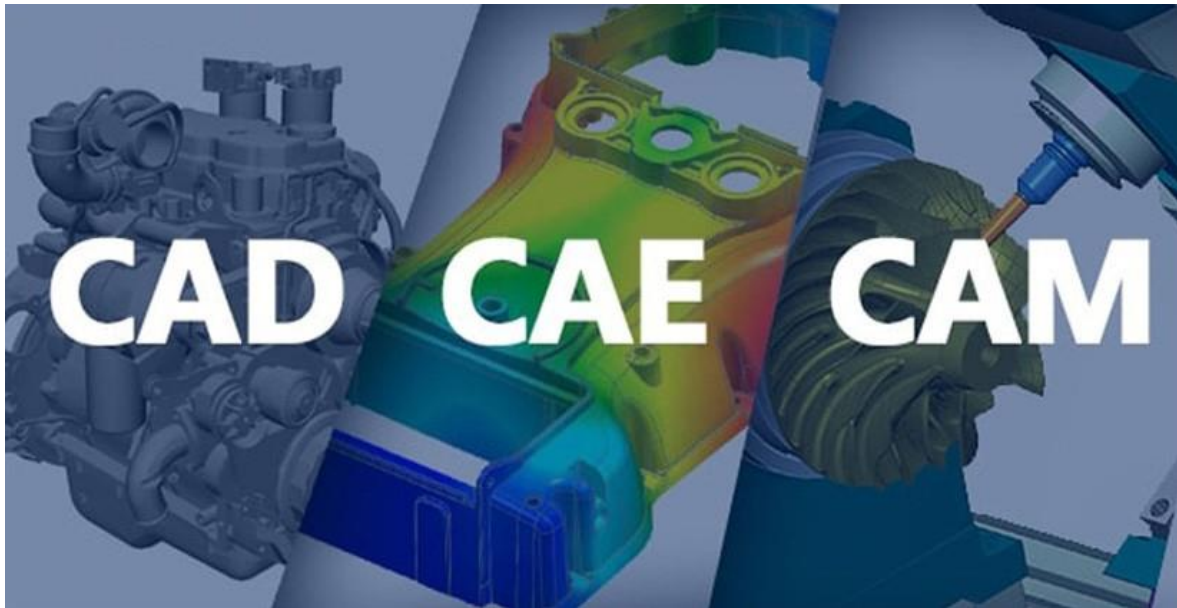
- CAD – Computer Aided Design: Η χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή για τον σχεδιασμό προϊόντων και συστημάτων
- CAE – Computer Aided Engineering: Η χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή για την μελέτη των συστημάτων
- CAM – Computer Aided Manufacturing: Η χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή για τον έλεγχο παραγωγής



Εικόνα 76: Κύκλος Παραγωγής και Τεχνολογίες CAD - CAE - CAM

Τα σημαντικότερα οφέλη αυτών των συστημάτων είναι η μείωση του χρόνου και του κόστους παραγωγής, καθώς χρησιμοποιώντας ψηφιακά μοντέλα, οι σχεδιαστές και οι μηχανικοί μπορούν να δημιουργήσουν και να δοκιμάσουν σχέδια χωρίς να χρειάζεται να κατασκευάσουν φυσικά πρωτότυπα, τα οποία

μπορεί να είναι δαπανηρά και χρονοβόρα. Αυτό επιτρέπει στους κατασκευαστές να φέρουν προϊόντα στην αγορά πιο γρήγορα, να μειώσουν το κόστος παραγωγής και να αυξήσουν τα περιθώρια κέρδους τους.



Εικόνα 77: Συστήματα CAD - CAE - CAM

Τα συστήματα CAD-CAE-CAM χρησιμοποιούνται ευρέως σε μια ποικιλία βιομηχανιών, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική, η αρχιτεκτονική και τα καταναλωτικά προϊόντα. Στην αυτοκινητοβιομηχανία, αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούνται για το ακριβή σχεδιασμό και την κατασκευή αυτοκινήτων και ανταλλακτικών. Στην αεροδιαστημική, χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό και την κατασκευή αεροσκαφών και των εξαρτημάτων τους. Στην αρχιτεκτονική, αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία λεπτομερών σχεδίων κτιρίων που μπορούν εύκολα να τροποποιηθούν και να βελτιστοποιηθούν πριν ξεκινήσει η κατασκευή. Στα καταναλωτικά προϊόντα, αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό και την κατασκευή όλων, από οικιακές συσκευές μέχρι παιχνίδια και ηλεκτρονικά.

4.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ CAD-CAE-CAM

Τα πρώτα βήματα του συστήματος CAD άρχισαν το **1957** από τον **Patrick J. Hanratty**, ο οποίος δημιούργησε το «*PRONTO*», μια πρώιμη εμπορική γλώσσα προγραμματισμού αριθμητικού ελέγχου.

Το πρώτο σύστημα CAD αναπτύχθηκε το **1963** από τον **Ivan Sutherland** στο Πανεπιστήμιο της Μασαχουσέτης (MIT), ο οποίος δημιούργησε το «*SKETCHPAD*» (Εικόνα 78). Το σύστημα αυτό χρησιμοποιούσε την γραφική επικοινωνία του χρήστη με το σύστημα με την χρήση μιας πένας φωτός και οθόνης καθοδικών ακτινών.



Εικόνα 78: Sketchpad

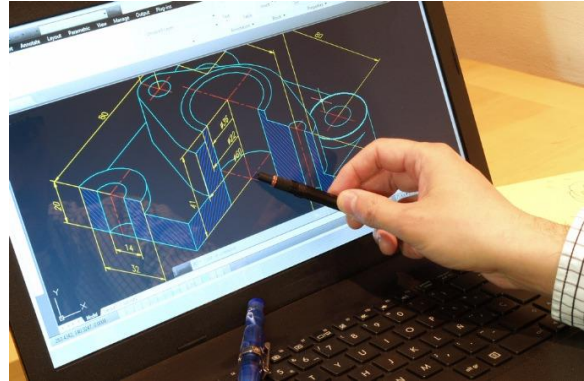
Το **1970**, ο Patrick J. Hanratty, μετά την δημιουργία του «*PRONTO*», δημιούργησε μία από τις πρώτες εταιρείες CAD/CAM την *ICS*, η οποία ήταν ανεπιτυχής για το λόγο ότι το σύστημα λειτουργούσε μόνο σε έναν τύπο Ηλεκτρονικού Υπολογιστή. Το **1971**, ο ίδιος δημιούργησε την «*Manufacturing and Consulting Services*», η οποία ανέπτυξε ένα νέο λογισμικό CAD, το *Automated Drafting and Machinery – ADAM*. Η εταιρεία αυτή έδωσε τον κώδικά της και σε πολλές άλλες εταιρείες, όπως *McDonnell Douglas (Unigraphics)*, *Computervision (CADDs)*, *Calma*, *Gerber*, *Autotrol* και *Control Data*.

Η ανάπτυξη των συστημάτων CAD-CAE-CAM συμβαδίζει με την ανάπτυξη των Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, καθώς με την εξέλιξη τα συστήματα από την δυσδιάστατη απεικόνιση εξελίχθηκαν στην τρισδιάστατη απεικόνιση.

Σήμερα, τα συστήματα CAD/CAM έχουν γίνει αναπόσπαστο μέρος της μεταποιητικής βιομηχανίας και η χρήση αυτών των συστημάτων έχει οδηγήσει σε σημαντικές βελτιώσεις στην ποιότητα των προϊόντων, το κόστος και τον χρόνο διάθεσης στην αγορά. Η ανάπτυξη συστημάτων CAD/CAM που βασίζονται σε σύννεφο και η χρήση τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης σε αυτά τα συστήματα είναι πιθανό να είναι τα επόμενα σημαντικά ορόσημα στην ιστορία του CAD/CAE/CAM.

4.3 CAD – Computer Aided Design

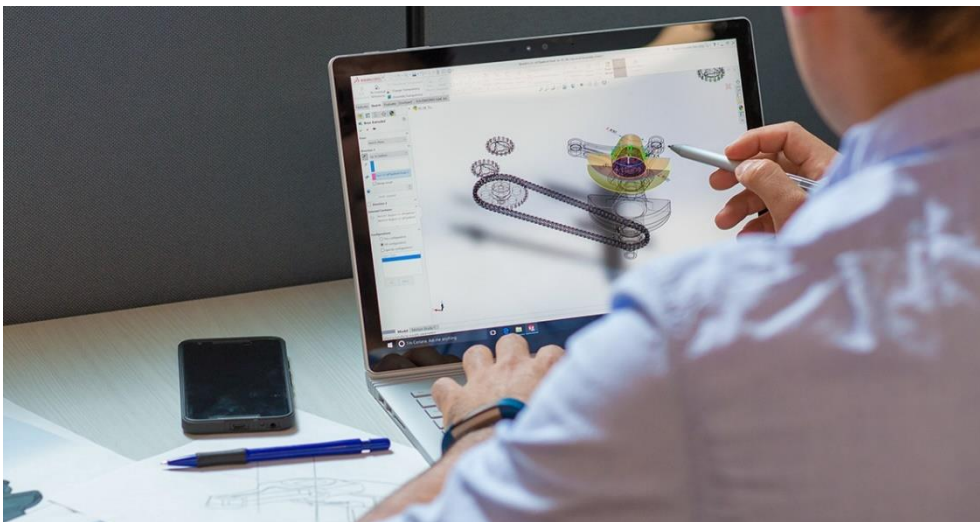
Το CAD – Computer Aided Design αποτελεί ένα σύστημα λογισμικού (Εικόνα 79), όπου με την χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή μπορούν να σχεδιαστούν δυσδιάστατα ή τρισδιάστατα αντικείμενα. Επιτρέπει στους σχεδιαστές και τους μηχανικούς να δημιουργούν εικονικά μοντέλα προϊόντων, κτιρίων και άλλων κατασκευών που μπορούν εύκολα να τροποποιηθούν και να βελτιωθούν πριν ξεκινήσει η πραγματική διαδικασία κατασκευής.



Εικόνα 79: Πρόγραμμα τύπου AutoCAD

Ο βασικότερος ρόλος του λογισμικού CAD είναι ο ορισμός της γεωμετρίας του σχεδίου, καθώς αποτελεί την βάση για την εκτέλεση των υπόλοιπων συστημάτων CAE και CAM.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του CAD αποτελεί ο εύκολος επανασχεδιασμός και μετατροπή του αντικειμένου «Ευέλικτο Μοντέλο» με βάση τα αποτελέσματα των CAE και CAM.

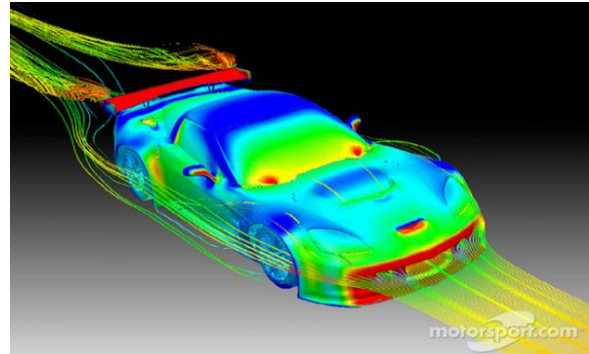


Εικόνα 80: Πρόγραμμα τύπου Solidworks

Παραδείγματα προγραμμάτων CAD αποτελούν το SOLIDWORKS (Εικόνα 80), το Fusion 360, το CATIA και το AutoCAD.

4.4 CAE – Computer Aided Engineering

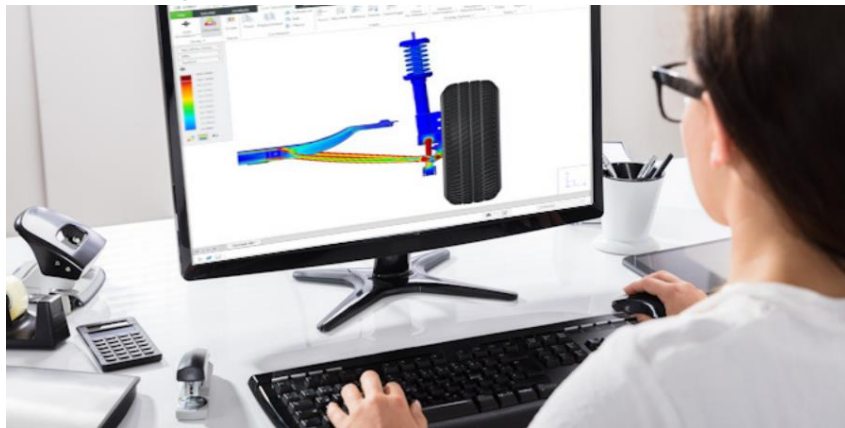
Το CAE – Computer Aided Engineering (Εικόνα 81) αποτελεί ένα σύστημα λογισμικού, όπου με την χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή μπορούν να προσομοιωθούν οι γεωμετρίες που προκύπτουν από το CAD με σκοπό να μελετηθούν και να αναλυθούν οι συμπεριφορές τους για την βελτιστοποίησή τους.



Εικόνα 81: CAE

Τα εργαλεία των CAE (Εικόνα 82) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορες αναλύσεις, όπως:

- Προγράμματα ανάλυσης κινηματικής με σκοπό την ανάλυση της κίνησης, τον καθορισμό της τροχιάς και τις ταχύτητες ζεύξης μεταξύ εξαρτημάτων σε μηχανισμούς.
- Δυναμική ανάλυση μεγάλων παραμορφώσεων με σκοπό τον υπολογισμό των φορτίων και των παραμορφώσεων σε σύνθετες συναρμολογήσεις, όπως τα αυτοκίνητα.



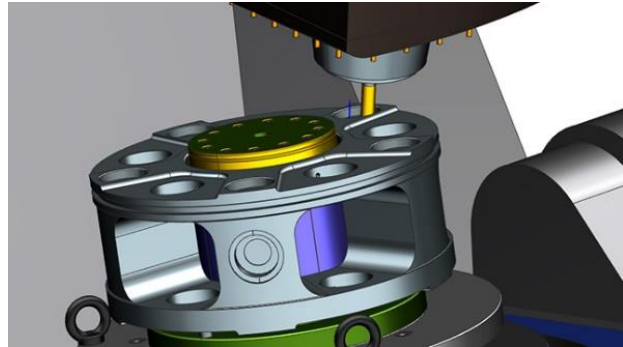
Εικόνα 82: CAE

Η πιο διαδομένη μέθοδος ανάλυσης με Η/Υ αποτελεί η χρήση των πεπερασμένων στοιχείων – Finite Element Method (FEM), η οποία χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό:

- Τάσεων και Παραμορφώσεων
- Μετάδοση Θερμότητας
- Κατανομή του Μαγνητικού Πεδίου
- Ρευστοδυναμικής Ροής και γενικότερα προβλημάτων Συνεχούς Ροής

4.5 CAM – Computer Aided Manufacturing

Το CAM – Computer Aided Manufacturing (Εικόνα 83) αποτελεί ένα σύστημα λογισμικού, όπου με την χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή μπορεί να πραγματοποιηθεί έλεγχος της διαδικασίας παραγωγής του αντικειμένου.



Εικόνα 83: CAM

Περιλαμβάνει τη χρήση ψηφιακών προγραμματιζόμενων οδηγιών – εντολών με σκοπό τον έλεγχο και τον χειρισμό εργαλειομηχανών, οι οποίες φρεζάρουν, κόβουν, τρνάρουν, λειάνουν, σφυρηλατούν ή ακόμα και εκτυπώνουν ένα ολοκληρωμένο εξάρτημα.



Εικόνα 84: CAM

Τα συστήματα CAM (Εικόνα 84) διαβάζουν τα δεδομένα σχεδιασμού που δημιουργούνται από συστήματα CAD και τα μετατρέπουν σε οδηγίες που μπορούν να γίνουν κατανοητές από τις μηχανές. Αυτό επιτρέπει μεγαλύτερη αυτοματοποίηση στη διαδικασία παραγωγής, μειώνοντας την ανάγκη για ανθρώπινη παρέμβαση και ελαχιστοποιώντας τα λάθη.

ΚΕΦ.5: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΕΤΑΥΛΙΚΟΥ

5.1 ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΙΔΕΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Η κεντρική ιδέα της παρούσας εργασίας αποτελεί η δημιουργία ενός Μεταϋλικού που θα εμφανίζει την ιδιότητα της μετατροπής της Θλιπτικής παραμόρφωσης σε Στρεπτική παραμόρφωση. Πιο συγκεκριμένα θα μπορεί να μετατρέπει την μονοαξονική παραμόρφωση κατά την διάρκεια της Θλίψης σε Στρέψη. Το Μεταϋλικό θα αποτελείται από μια περιοδική δομή όμοιων κυψελίδων, όπου κάθε κυψελίδα θα έχει συγκεκριμένη μικροδομή μορφής δικτυώματος.

Στόχος της εργασίας είναι η ανάλυση και μελέτη με την βοήθεια προσομοιώσεων με πεπερασμένα στοιχεία (FEM), ώστε να βρεθεί η βέλτιστη δομή με βάση τις Μηχανικές ιδιότητες των συγκεκριμένων Μεταϋλικών. Στην συνέχεια, η ιδανική δομή που θα προκύψει, θα κατασκευαστεί με την τεχνική της τρισδιάστατης εκτύπωσης από πολυμερή υλικό, προς επιβεβαίωση και τεκμηρίωση των αριθμητικών προβλέψεων αναφορικά με την αναμενόμενη συμπεριφορά συζευγμένης παραμόρφωσης του.

5.2 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΟΜΩΝ

Η Σχεδίαση των δομών των Μεταϋλικών πραγματοποιήθηκαν στο περιβάλλον της Autodesk Fusion 360, καθώς το συγκεκριμένο πρόγραμμα παρέχει και τα δύο συστήματα που χρειαζόμαστε για την μελέτη, δηλαδή το CAD και το CAE.

Αρχικά, η μελέτη για την εύρεση της βέλτιστης δομής Μεταϋλικού ξεκίνησε με την αναζήτηση και ανάλυση άλλων δομών Μεταϋλικών με σκοπό την κατανόηση τους. Για αυτό σχεδιάστηκαν διάφορες δομές Μεταϋλικών, καθώς και μελετήθηκαν οι συμπεριφορές τους, όπως φαίνεται παρακάτω. Στην συνέχεια, ξεκίνησε η μελέτη για τον σχεδιασμό μιας νέας δομής Μεταϋλικού που να έχει καλές ιδιότητες σε θλίψη. Η τελική προτεινόμενη δομή επιλέχθηκε μετά από πολλές δοκιμές αναφορικά με την ικανοποίηση συγκεκριμένων απαιτούμενων χαρακτηριστικών, όπως φαίνεται στην Παράγραφο 5.2.3 με τίτλο «Βέλτιστη

Δομή Μεταλλικού με ιδιότητες σύζευξης Θλίψης και Στρέψης – Εξαγωνικής Μορφής Στοιχειώδους Κυψελίδας».

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις αριθμητικές προσομοιώσεις των δομών, καθώς και στις εκτυπωμένες δομές είναι το **NYLON PA 12** που εμφανίζει τις ιδιότητες που παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στην Εικόνα 85.

Το NYLON PA 12 είναι ένα πολυμερές Νάιλον, το οποίο θεωρείται ένα πολύ καλό πλαστικό γενικής χρήσης με ευρείες εφαρμογές πρόσθετων και είναι γνωστό για την σκληρότητα, την αντοχή σε εφελκυσμό, την αντοχή σε κρούση και την ικανότητά του να κάμπτεται χωρίς θραύση.

Material: 12 - Nylon - PA 603-CF (with EOS P 3D Printers)	
Density	1.1E-06 kg / mm ³
Young's Modulus	2.881 GPa
Poisson's Ratio	0.18
Yield Strength	25.86 MPa
Ultimate Tensile Strength	32.74 MPa
Thermal Conductivity	5.5E-04 W / (mm C)
Thermal Expansion Coefficient	4.347E-05 / C
Specific Heat	1530 J / (kg C)

Εικόνα 85: Ιδιότητες NYLON PA 12

Στις δομές των Μεταλλικών πραγματοποιήθηκαν δύο αριθμητικές προσομοιώσεις:

Στην πρώτη αριθμητική προσομοίωση ασκήθηκε πίεση **0.01 MPA** στην διεύθυνση του άξονα «Z» και η **Πάκτωση** βρισκόταν στην κάτω πλευρά της δομής.

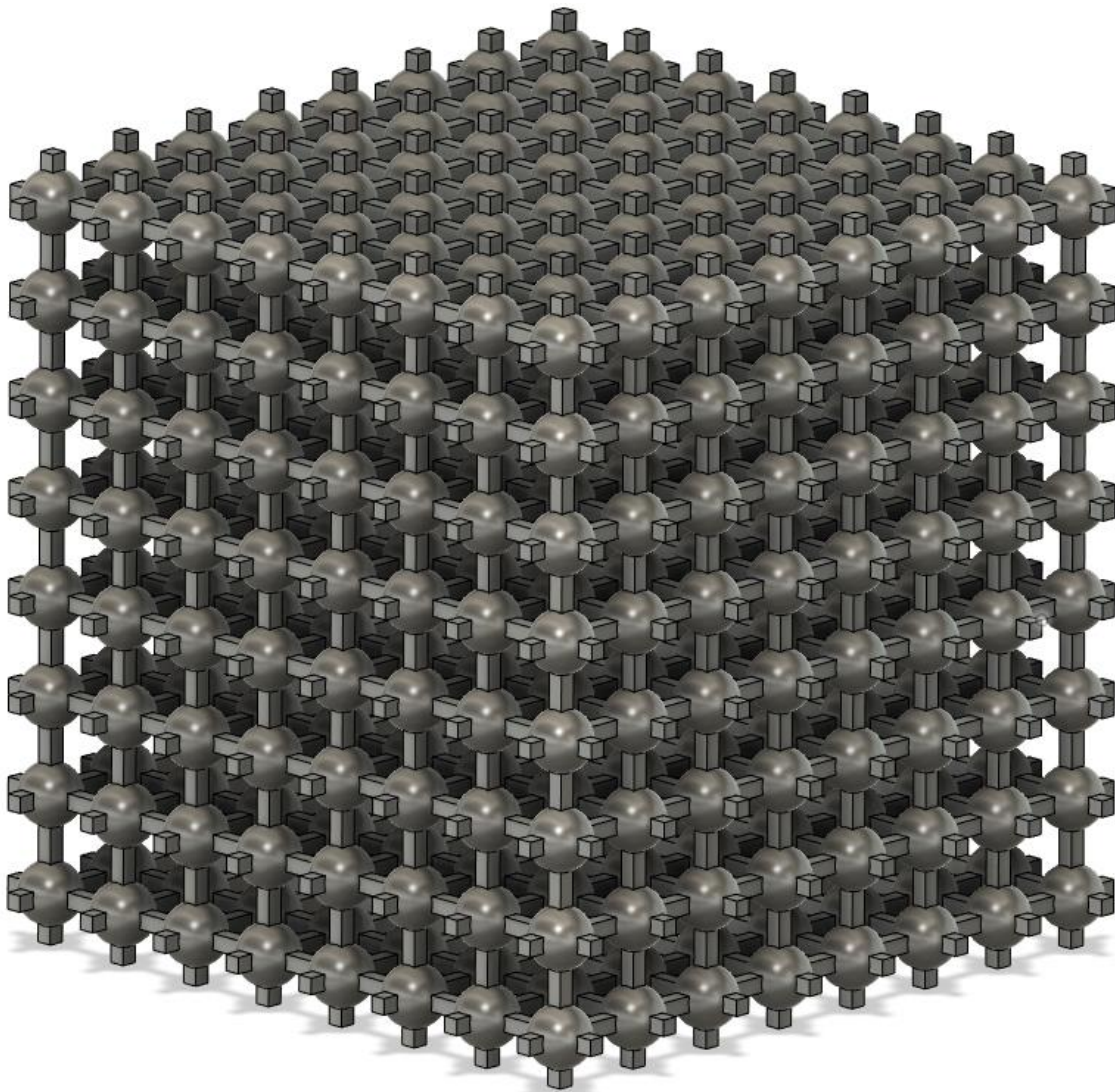
Στην δεύτερη αριθμητική προσομοίωση αντί για πίεση ασκήθηκε **Μετατόπιση - Displacement** κατά **1mm** στην διεύθυνση του άξονα «Z» και η **Πάκτωση** βρισκόταν στην κάτω πλευρά της δομής.

Πιο συγκεκριμένα στις Δομές A, B, Γ (βλέπε Παρ. 5.2.1) πραγματοποιήθηκε μόνο η πρώτη αριθμητική προσομοίωση ενώ στις τελευταίες δομές, δηλαδή στην Δομή Μεταλλικού – Κυβικής Μορφής Στοιχειώδους Κυψελίδας (βλέπε Παρ. 5.2.2) και στην Βέλτιστη Δομή Μεταλλικού – Εξαγωνικής Μορφής Στοιχειώδους Κυψελίδας (βλέπε Παρ. 5.2.3) πραγματοποιήθηκαν και οι δύο προσομοιώσεις.

5.2.1 ΔΟΜΕΣ ΜΕΤΑΥΛΙΚΩΝ

Δομή Α

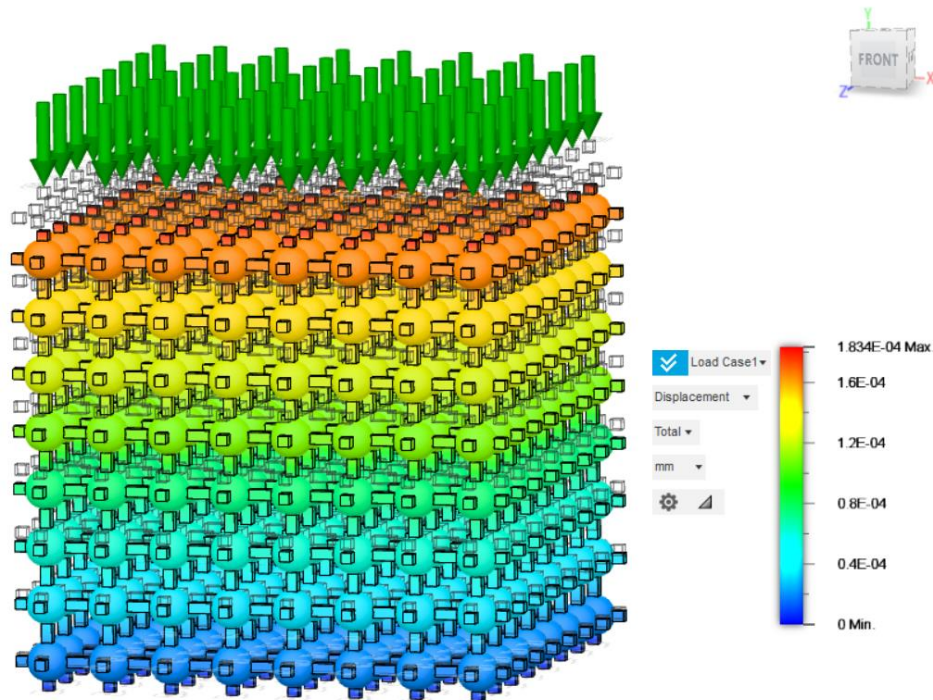
Στην εικόνα 86 παρουσιάζεται η Δομή Α, στην οποία ασκήθηκε Πίεση **0.01 ΜΡΑ** στην διεύθυνση του άξονα «Ζ», καθώς η **Πάκτωση** βρισκόταν στην κάτω πλευρά της δομής. Τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης εμφανίζονται παρακάτω.



Εικόνα 86: Δομή Α

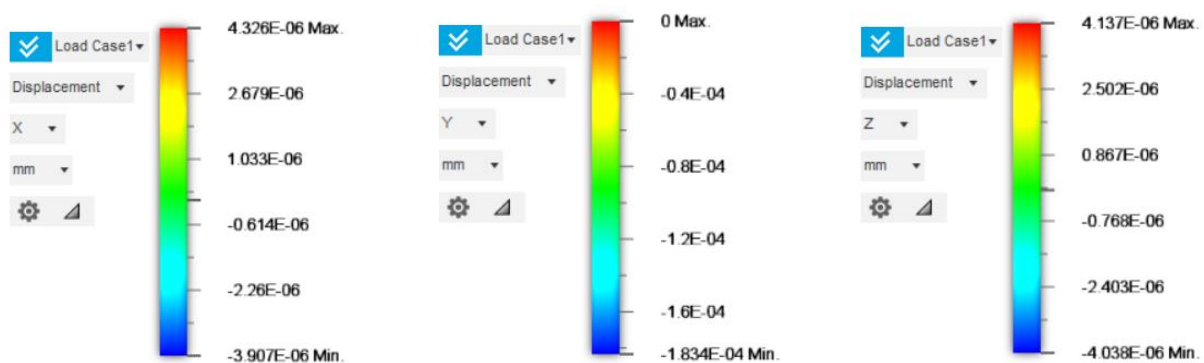
Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση

Στην εικόνα 87 παρουσιάζεται η **Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση** της Δομής Α, η οποία ανέρχεται στα $1.834 \cdot 10^{-4}$ mm.



Εικόνα 87: Δομή Α – Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση

ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ - DISPLACEMENTS X-Y-Z

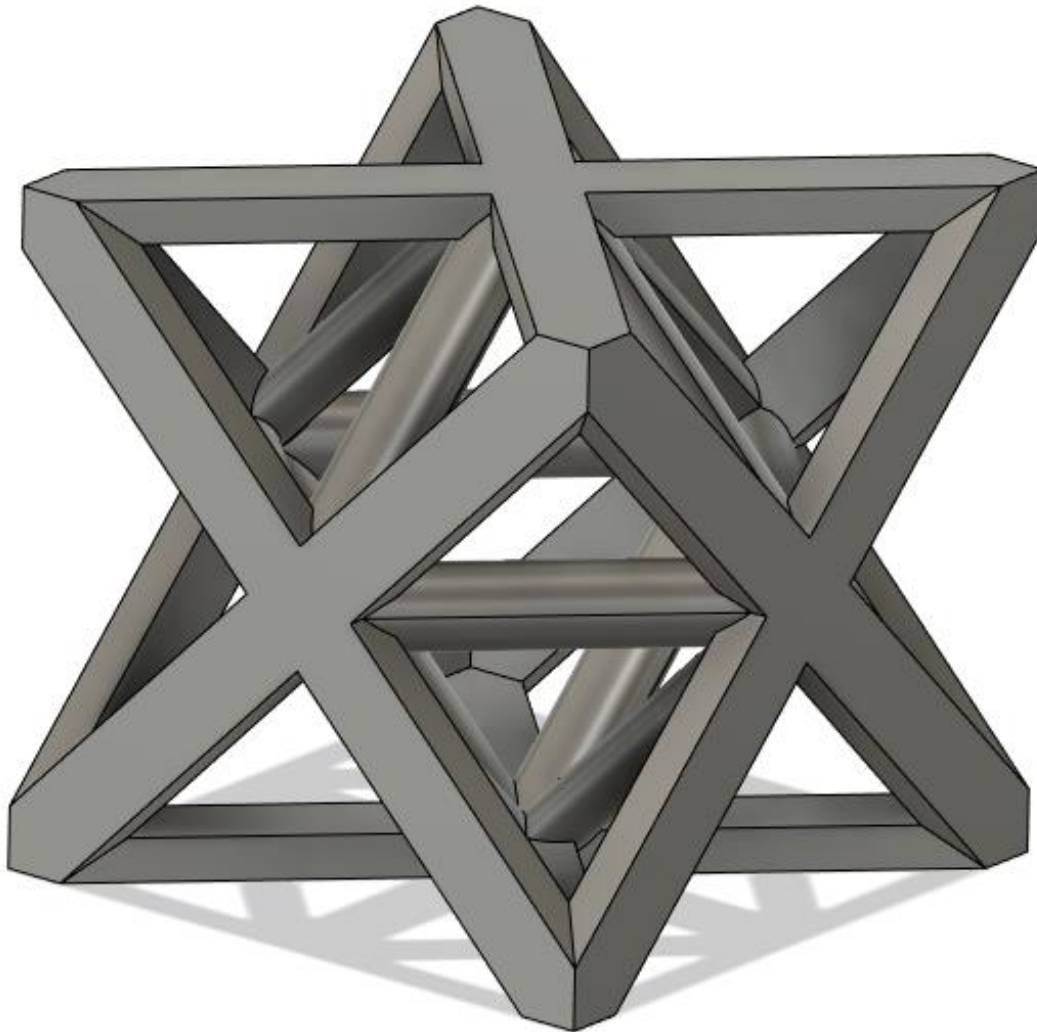


Εικόνα 88: Δομή Α – Μετατοπίσεις X-Y-Z

Στην εικόνα 88 παρατηρείται ότι ασκώντας Πίεση-Pressure = 0,01MPa στην διεύθυνση του άξονα «Z», οι μέγιστες παραμορφώσεις που εμφανίζονται στους άξονες X-Y-Z, ανέρχονται κατά απόλυτη τιμή, στα $4.326 \cdot 10^{-6}$ mm, στα $1.834 \cdot 10^{-4}$ mm και στα $4.137 \cdot 10^{-6}$ mm αντίστοιχα.

Δομή Β

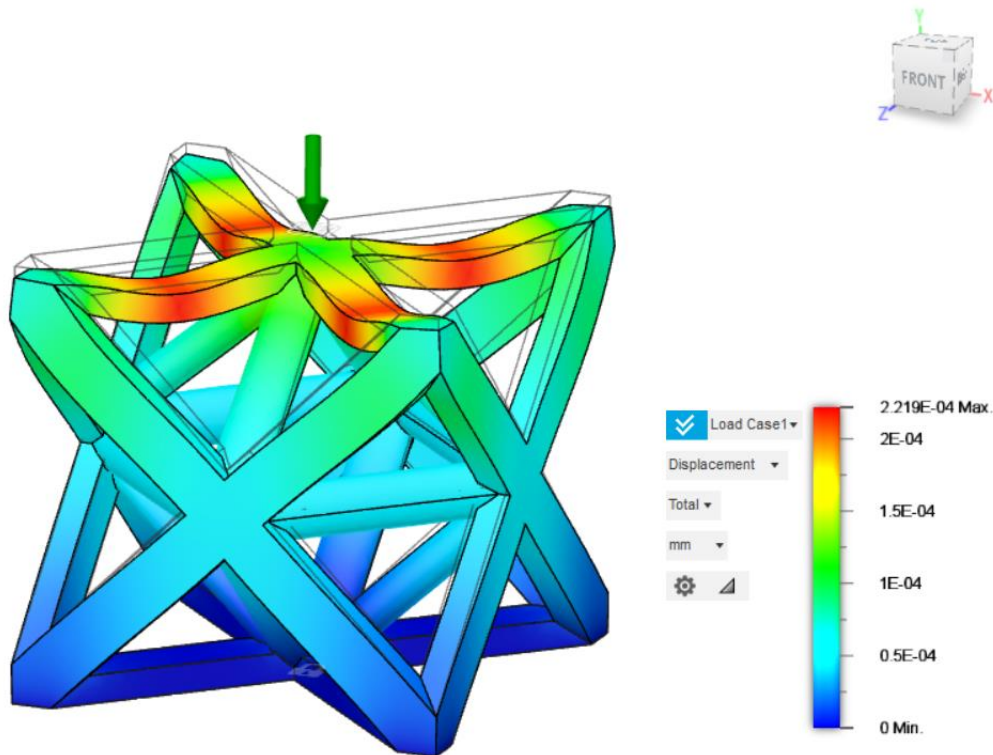
Στην εικόνα 89 παρουσιάζεται η Δομή Β, στην οποία ασκήθηκε Πίεση **0.01 ΜΡΑ** στην διεύθυνση του άξονα «Z», καθώς η **Πάκτωση** βρισκόταν στην κάτω πλευρά της δομής. Τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης εμφανίζονται παρακάτω.



Εικόνα 89: Δομή Β

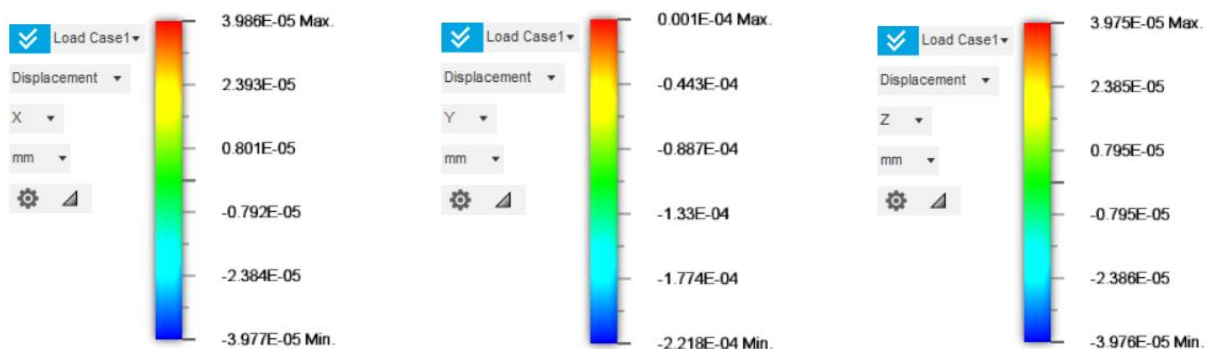
Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση

Στην εικόνα 90 παρουσιάζεται η **Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση** της Δομής B, η οποία ανέρχεται στα $2.219 \cdot 10^{-4}$ mm.



Εικόνα 90: Δομή B – Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση

ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ - DISPLACEMENTS X-Y-Z

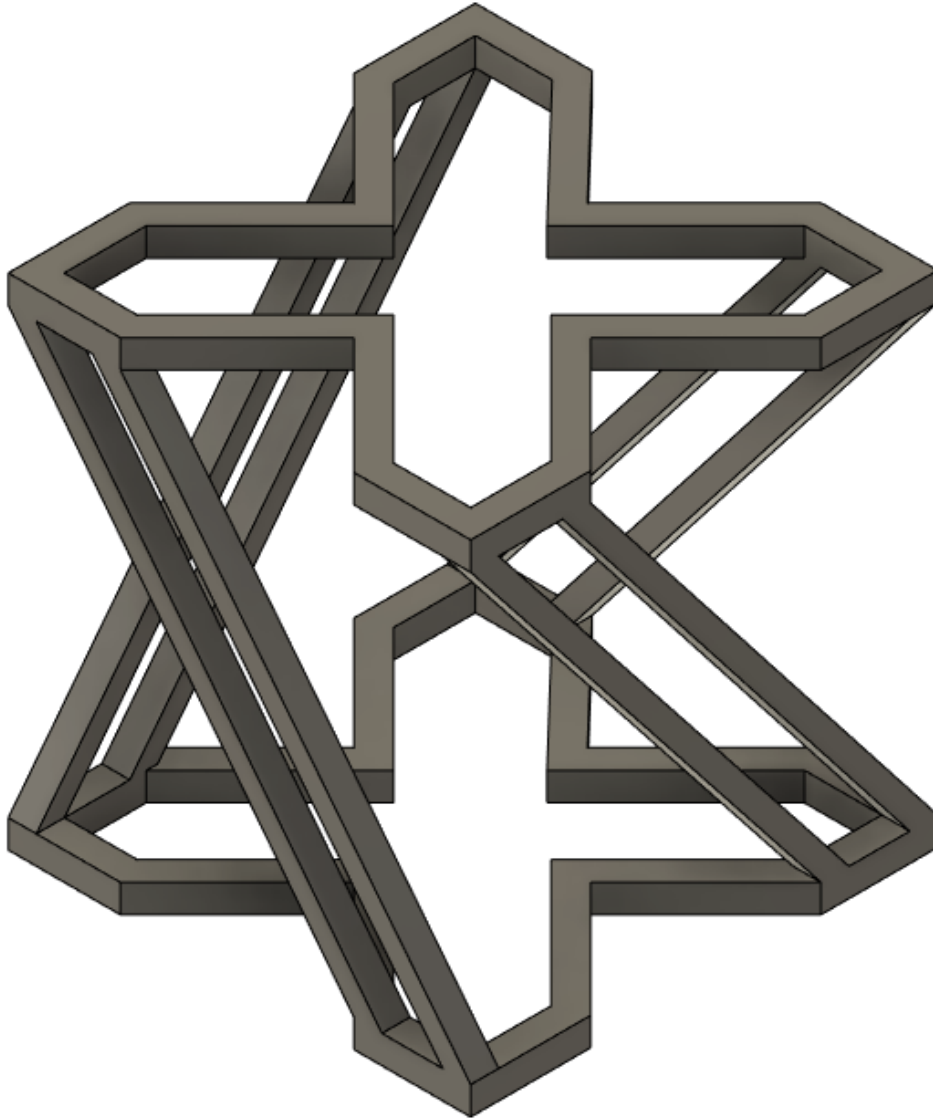


Εικόνα 91: Δομή B – Μετατοπίσεις X-Y-Z

Στην εικόνα 91 παρατηρείται ότι ασκώντας Πίεση-Pressure = 0,01MPa στην διεύθυνση του άξονα «Z», οι μέγιστες παραμορφώσεις που εμφανίζονται στους άξονες X-Y-Z, ανέρχονται κατά απόλυτη τιμή, στα $3.986 \cdot 10^{-5}$ mm, στα $2.218 \cdot 10^{-4}$ mm και στα $3.976 \cdot 10^{-5}$ mm αντίστοιχα.

ΔΟΜΗ Γ

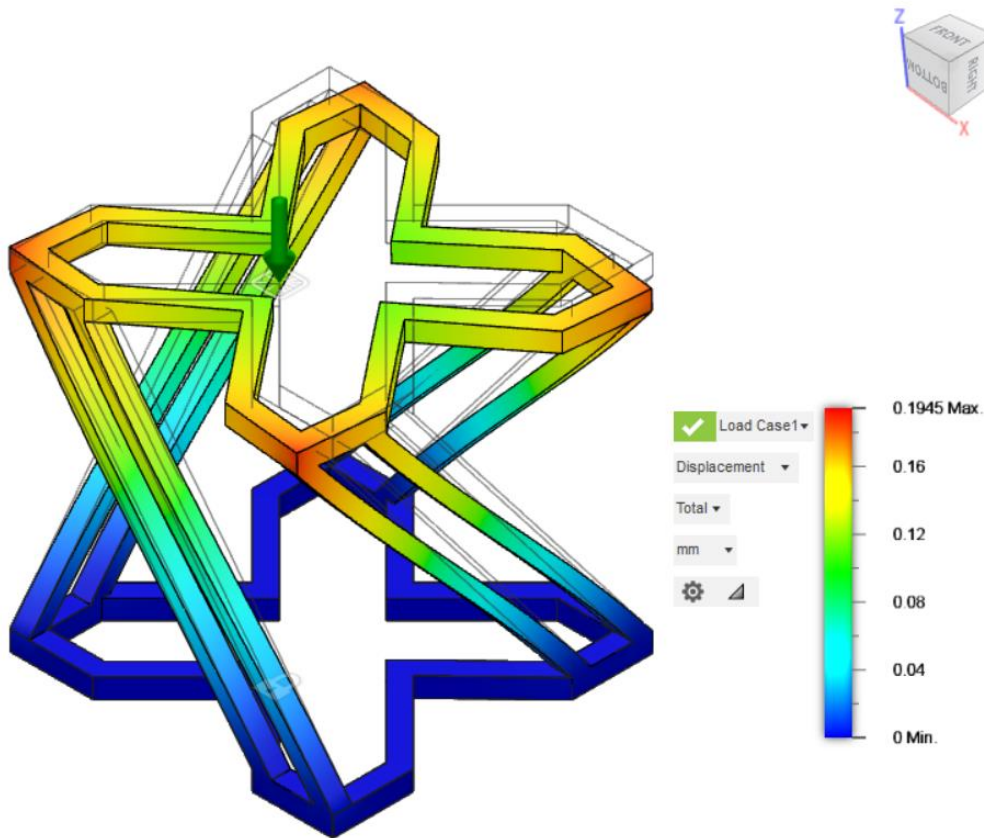
Στην εικόνα 92 παρουσιάζεται η Δομή Γ, στην οποία ασκήθηκε Πίεση **0.01 ΜΡΑ** στην διεύθυνση του άξονα «Z», καθώς η **Πάκτωση** βρισκόταν στην κάτω πλευρά της δομής. Τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης εμφανίζονται παρακάτω



Εικόνα 92: Δομή Γ

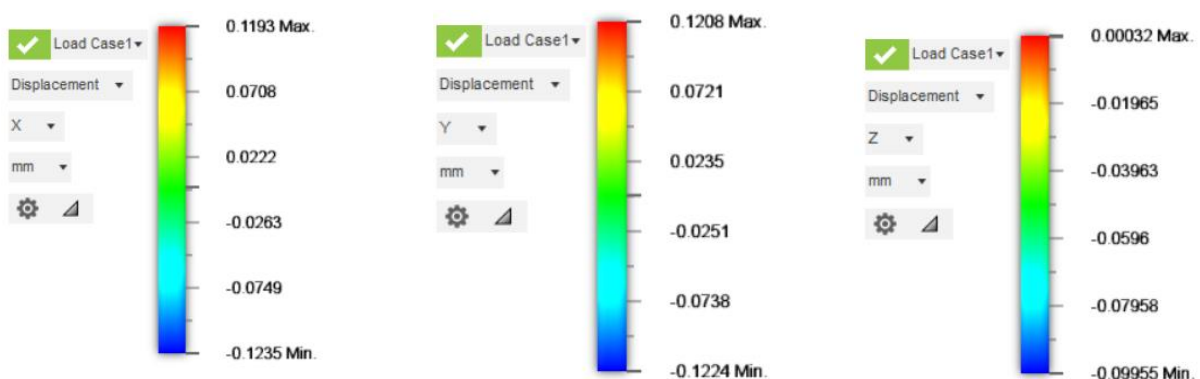
Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση

Στην εικόνα 93 παρουσιάζεται η **Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση** της Δομής Γ, η οποία ανέρχεται στα **0.1945 mm**.



Εικόνα 93: Δομή Γ – Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση

ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ - DISPLACEMENTS X-Y-Z



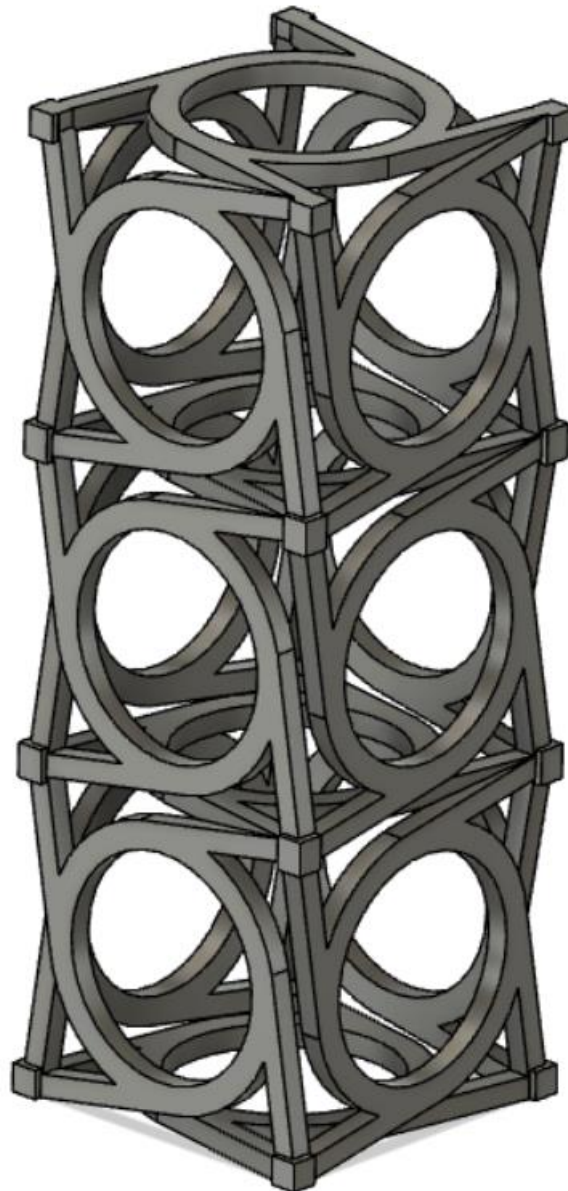
Εικόνα 94: Δομή Γ - Μετατοπίσεις X-Y-Z

Στην εικόνα 94 παρατηρείται ότι ασκώντας Πίεση-Pressure = 0,01MPa στην διεύθυνση του άξονα «Z», οι μέγιστες παραμορφώσεις που εμφανίζονται στους άξονες X-Y-Z, ανέρχονται κατά απόλυτη τιμή, στα **0.1235 mm**, στα **0.1224 mm** και στα **0.09955 mm** αντίστοιχα.

5.2.2 ΔΟΜΗ ΜΕΤΑΥΛΙΚΟΥ ΜΕ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΖΕΥΞΗΣ ΘΛΙΨΗΣ ΚΑΙ ΣΤΡΕΨΗΣ - ΚΥΒΙΚΗΣ ΜΟΡΦΗΣ ΚΥΨΕΛΙΔΑΣ

ΔΟΜΗ 1

Στην εικόνα 95 παρουσιάζεται η Δομή 1, όπου στην συγκεκριμένη δομή πραγματοποιήθηκαν δύο αριθμητικές προσομοιώσεις. Στην πρώτη αριθμητική προσομοίωση ασκήθηκε Πίεση **0.01 MPA** στην διεύθυνση του άξονα «Z», καθώς η **Πάκτωση** βρισκόταν στην κάτω πλευρά της δομής. Στην δεύτερη αριθμητική προσομοίωση αντί για πίεση ασκήθηκε **Μετατόπιση - Displacement** κατά **1mm** στην διεύθυνση του άξονα «Z», καθώς η **Πάκτωση** βρισκόταν στην κάτω πλευρά της δομής. Τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώσεων εμφανίζονται παρακάτω.

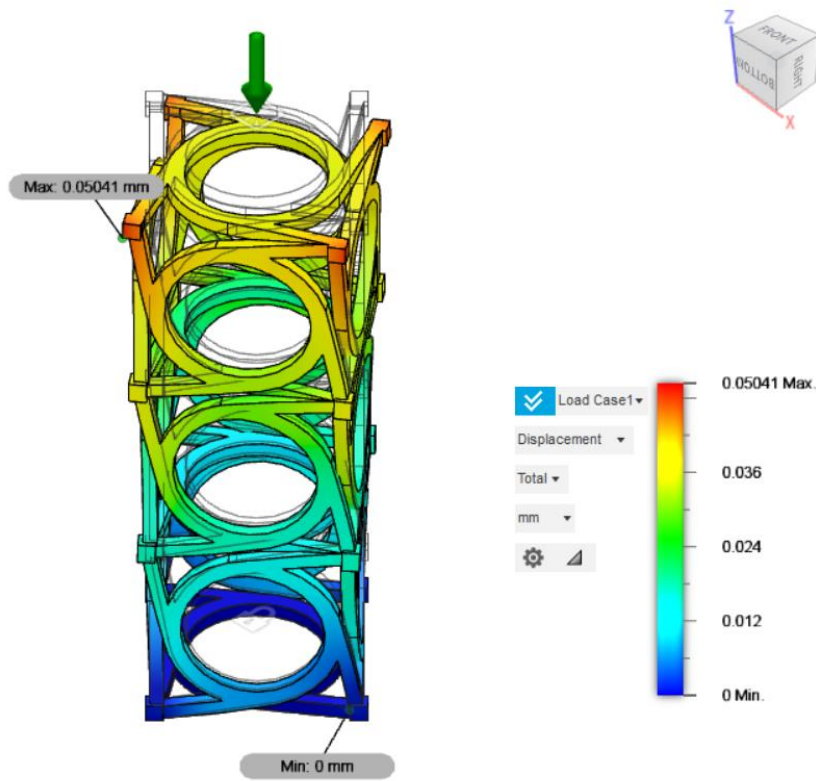


Εικόνα 95: Δομή 1

1. ΠΙΕΣΗ - PRESSURE: 0.01 MPa

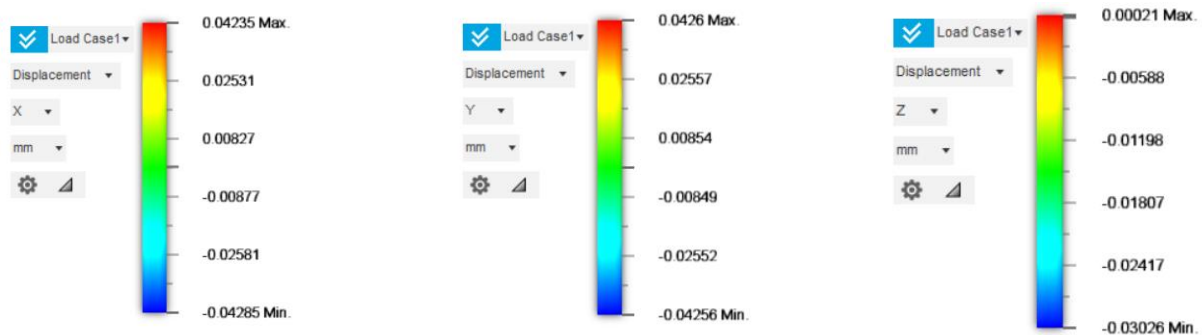
Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση

Στην εικόνα 96 παρουσιάζεται η **Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση** της Δομής 1, η οποία ανέρχεται στα **0.05041 mm**.



Εικόνα 96: Δομή 1 – Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση

ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ – DISPLACEMENTS X-Y-Z



Εικόνα 97: Δομή 1 - Μετατοπίσεις X-Y-Z

Στην εικόνα 97 παρατηρείται ότι ασκώντας Πίεση-Pressure = 0,01MPa στην διεύθυνση του άξονα «Z», οι μέγιστες παραμορφώσεις που εμφανίζονται στους άξονες X-Y-Z, ανέρχονται κατά απόλυτη τιμή, στα **0.04285 mm**, στα **0.0426 mm** και στα **0.03026 mm** αντίστοιχα.

Υπολογισμός Δυσκαμψίας

Ο υπολογισμός της Δυσκαμψίας της Δομής 1, υπολογίζεται εφαρμόζοντας τον Νόμο του Hooke κατά την αξονική διεύθυνση «Z».

$$\sigma_z = E_{z_{δομής}} \cdot \varepsilon_z \Rightarrow E_{z_{δομής}} = \frac{\sigma_z}{\varepsilon_z} = \frac{0.01}{\frac{U_{z \text{ κίτρινο}}}{l_{z_0}}} = \frac{0.01}{\frac{0.00588}{68.8}}$$

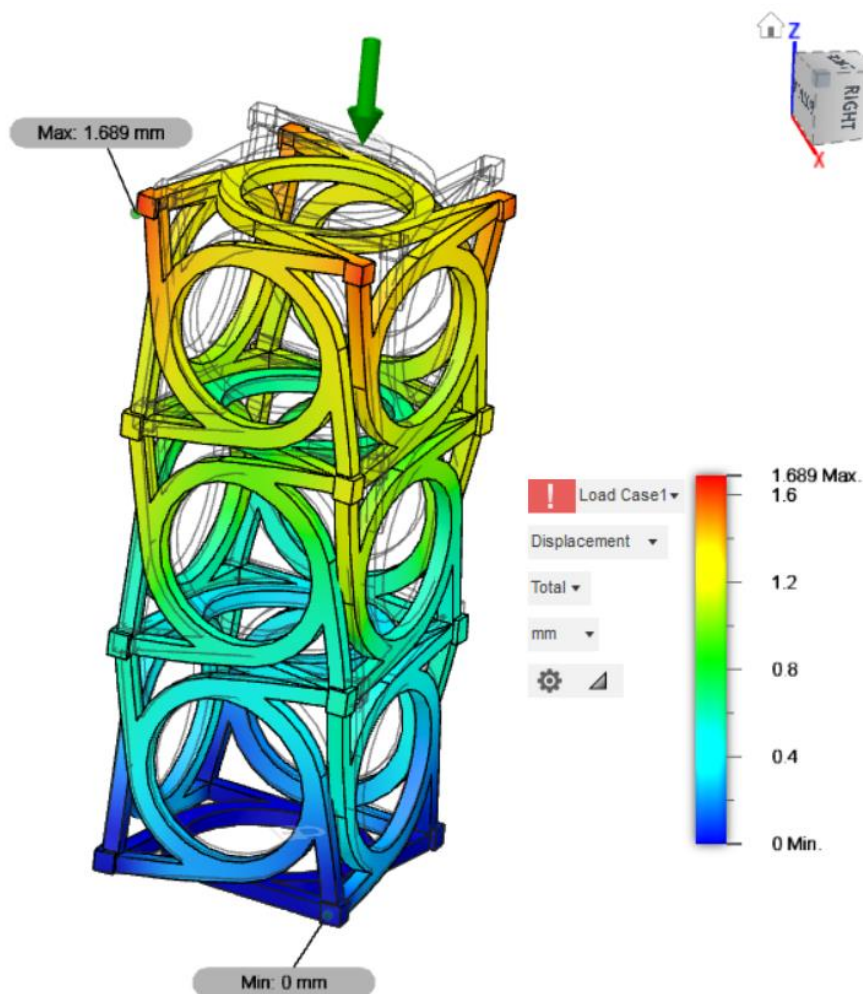
$$\Rightarrow E_{z_{δομής}} = 117 \text{ MPa} \quad (4)$$

l_{z_0} : Μήκος Δομής κατά τον «Z» άξονα

2. ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ - DISPLACEMENT: 1mm

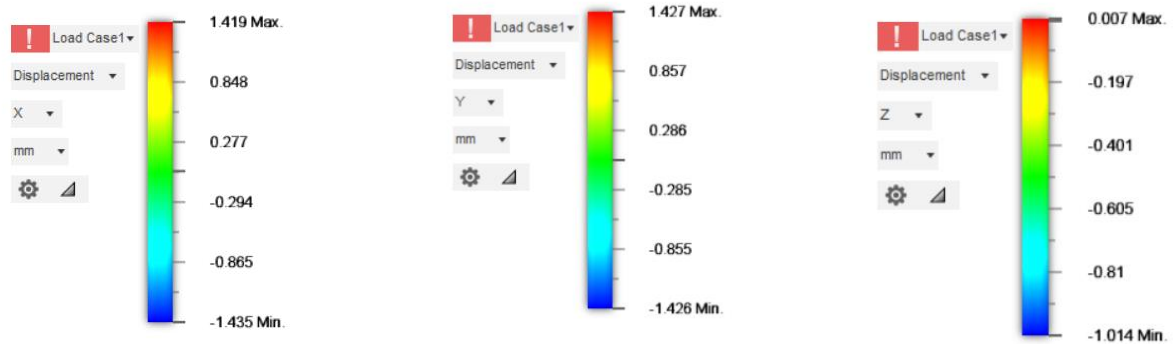
Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση

Στην εικόνα 98 παρουσιάζεται η **Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση** της Δομής 1, η οποία ανέρχεται στα **1.689 mm**.



Εικόνα 98: Δομή 1 – Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση

ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ – DISPLACEMENTS X-Y-Z



Εικόνα 99: Δομή 1 - Μετατοπίσεις X-Y-Z

Στην εικόνα 99 παρατηρείται ότι ασκώντας Πίεση-Pressure = 0,01MPa στην διεύθυνση του άξονα «Z», οι μέγιστες παραμορφώσεις που εμφανίζονται στους άξονες X-Y-Z, ανέρχονται κατά απόλυτη τιμή, στα **1.435 mm**, στα **1.427 mm** και στα **1.014 mm** αντίστοιχα.

Υπολογισμός Αξονικής Παραμόρφωσης στην Θλίψη

Ο υπολογισμός της αξονικής παραμόρφωσης στην θλίψη της Δομής 1, υπολογίζεται διαιρώντας την διαφορά αρχικού-τελικού μήκους με το πραγματικό μήκος της δομής, κατά την αξονική διεύθυνση «Z».

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta L_z}{l_{z_0}} = \frac{U_z}{l_{z_0}} = \frac{1}{68.8} \Rightarrow \varepsilon_z = \mathbf{0.0145} \quad (5)$$

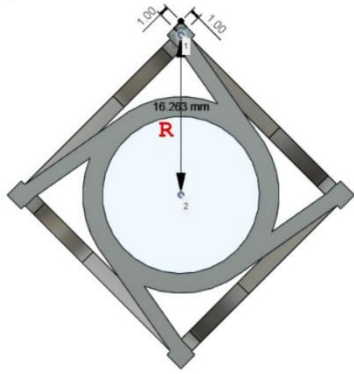
l_{z_0} : Μήκος Δομής κατά τον «Z» άξονα

Υπολογισμός Αξονικής Παραμόρφωσης στην Στρέψη

Ο υπολογισμός της αξονικής παραμόρφωσης στην Στρέψη της Δομής 1, υπολογίζεται διαιρώντας την Μετατόπιση κατά την αξονική διεύθυνση «Y» με την απόσταση R.

$$\gamma = \varepsilon_{στρέψης} = \frac{U_{y_{max}}}{R} = \frac{1.427}{16.263} \Rightarrow \gamma = \mathbf{0.0877 \text{ rad}} \quad (6)$$

$$\gamma = 0.0877 \cdot \frac{180}{\pi} \Rightarrow \gamma = \mathbf{5.025^\circ} \quad (7)$$



Στην εικόνα 100 παρουσιάζεται η απόσταση του κέντρου κύκλου με το κέντρο του κύβου «R», η οποία και χρησιμοποιήθηκε στην παραπάνω εξίσωση, ώστε να υπάρχει ένα συγκρίσιμο σημείο αναφοράς σε κάθε δομή πριν και μετά την παραμόρφωση.

Εικόνα 100: Απόσταση R – Δομή 1

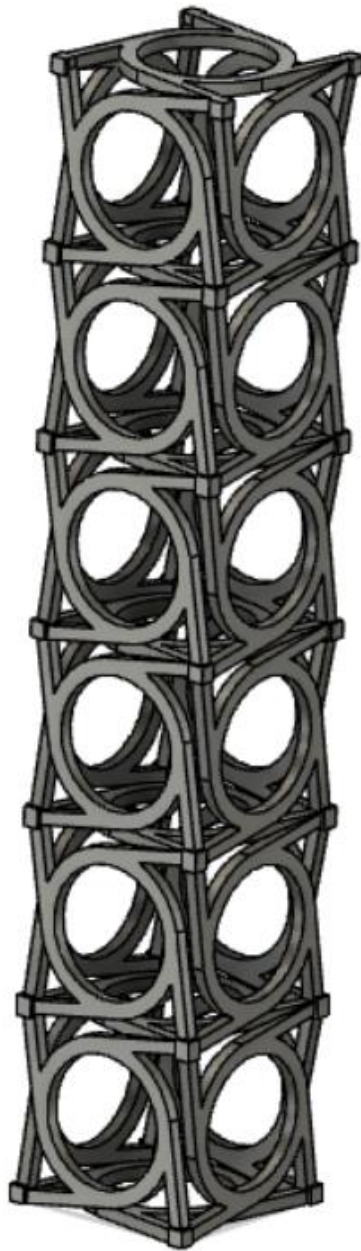
Υπολογισμός Συντελεστή Σύζευξης Στρεπτικών-Θλιπτικών Παραμορφώσεων

Ο υπολογισμός του Συντελεστή Σύζευξης Στρεπτικών-Θλιπτικών Παραμορφώσεων της Δομής 1, υπολογίζεται διαιρώντας την αξονική παραμόρφωση στην θλίψη με την αξονική παραμόρφωση στην Στρέψη.

$$\alpha = \frac{\varepsilon_{στρέψης}}{\varepsilon_{αξονικό}} = \frac{\gamma}{\varepsilon_{θλίψης}} = \frac{0.0877}{0.0145} \Rightarrow \alpha = \mathbf{6.048} \quad (8)$$

ΔΟΜΗ 2

Στην εικόνα 101 παρουσιάζεται η Δομή 2, όπου στην συγκεκριμένη δομή πραγματοποιήθηκαν δύο αριθμητικές προσομοιώσεις. Στην πρώτη αριθμητική προσομοίωση ασκήθηκε Πίεση **0.01 MPA** στην διεύθυνση του άξονα «Z», καθώς η **Πάκτωση** βρισκόταν στην κάτω πλευρά της δομής. Στην δεύτερη αριθμητική προσομοίωση αντί για πίεση ασκήθηκε **Μετατόπιση - Displacement** κατά **1mm** στην διεύθυνση του άξονα «Z», καθώς η **Πάκτωση** βρισκόταν στην κάτω πλευρά της δομής. Τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώσεων εμφανίζονται παρακάτω.

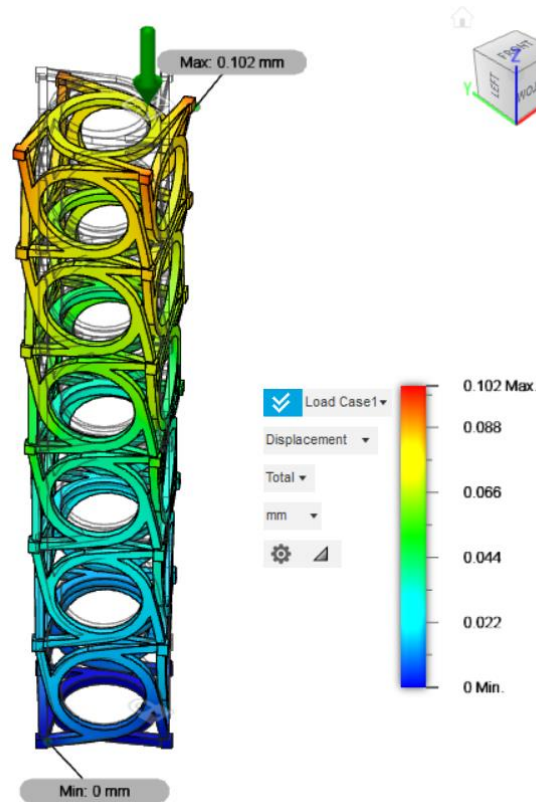


Εικόνα 101: Δομή 2

1. ΠΙΕΣΗ - PRESSURE: 0.01 MPa

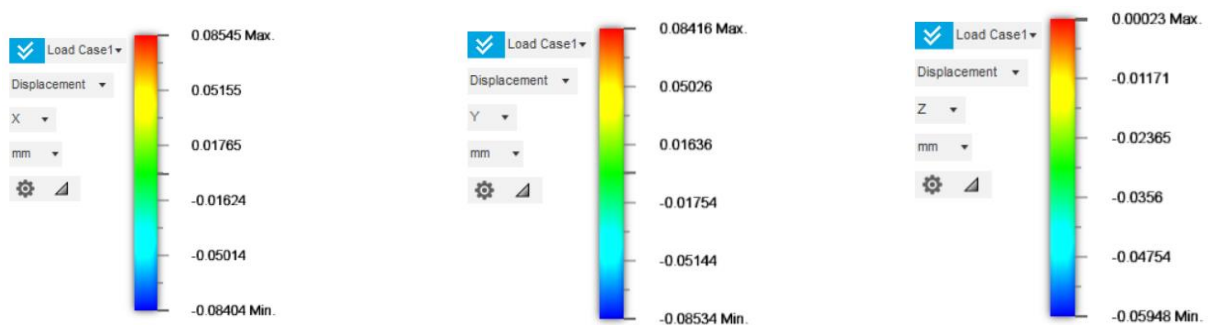
Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση

Στην εικόνα 102 παρουσιάζεται η **Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση** της Δομής 2, η οποία ανέρχεται στα **0.102 mm**.



Εικόνα 102: Δομή 2 – Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση

ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ – DISPLACEMENTS X-Y-Z



Εικόνα 103: Δομή 2 -Μετατοπίσεις X-Y-Z

Στην εικόνα 103 παρατηρείται ότι ασκώντας Πίεση-Pressure = 0,01MPa στην διεύθυνση του άξονα «Z», οι μέγιστες παραμορφώσεις που εμφανίζονται στους άξονες X-Y-Z, ανέρχονται κατά απόλυτη τιμή, στα **0.08545 mm**, στα **0.08534 mm** και στα **0.05948 mm** αντίστοιχα.

Υπολογισμός Δυσκαμψίας Δομής

Ο υπολογισμός της Δυσκαμψίας της Δομής 1, υπολογίζεται εφαρμόζοντας τον Νόμο του Hooke κατά την αξονική διεύθυνση «Z».

$$\sigma_z = E_{z\text{δομής}} \cdot \varepsilon_z \Rightarrow E_{z\text{δομής}} = \frac{\sigma_z}{\varepsilon_z} = \frac{0.01}{\frac{U_{z\text{κίτρινο}}}{l_{z_0}}} = \frac{0.01}{\frac{0.01171}{68.8}}$$

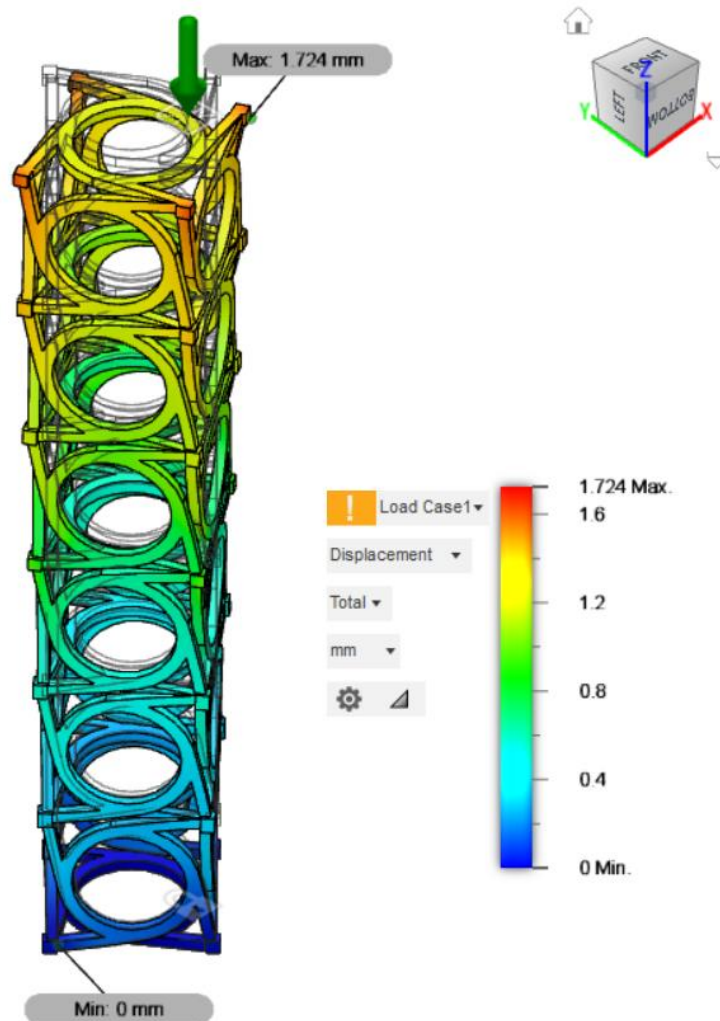
$$\Rightarrow E_{z\text{δομής}} = 58.753 \text{ MPa (9)}$$

l_{z_0} : Μήκος Δομής κατά τον «Z» άξονα

2. ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ - DISPLACEMENT: 1mm

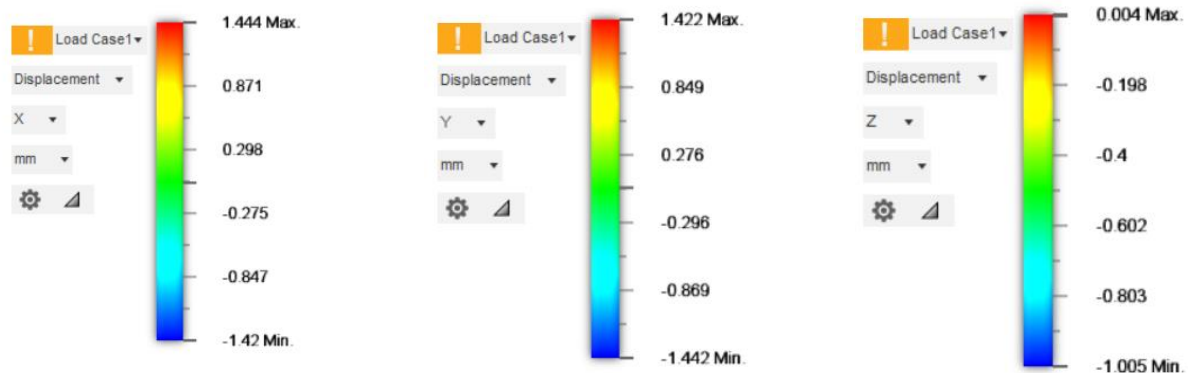
Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση

Στην εικόνα 104 παρουσιάζεται η **Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση** της Δομής 2, η οποία ανέρχεται στα **1.724 mm**.



Εικόνα 104: Δομή 2 – Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση

ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ – DISPLACEMENTS X-Y-Z



Εικόνα 105: Δομή 2 - Μετατοπίσεις X-Y-Z

Στην εικόνα 105 παρατηρείται ότι ασκώντας Πίεση-Pressure = 0,01MPa στην διεύθυνση του άξονα «Z», οι μέγιστες παραμορφώσεις που εμφανίζονται στους άξονες X-Y-Z, ανέρχονται κατά απόλυτη τιμή, στα **1.444 mm**, στα **1.442 mm** και στα **1.005 mm** αντίστοιχα.

Υπολογισμός Αξονικής Παραμόρφωσης στην Θλίψη

Ο υπολογισμός της αξονικής παραμόρφωσης στην θλίψη της Δομής 1, υπολογίζεται διαιρώντας την διαφορά αρχικού-τελικού μήκους με το πραγματικό μήκος της δομής, κατά την αξονική διεύθυνση «Z».

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta L_z}{l_{z0}} = \frac{U_z}{l_{z0}} = \frac{1}{135.6} \Rightarrow \varepsilon_z = \mathbf{0.0074} \quad (10)$$

l_{z0} : Μήκος Δομής κατά τον «Z» άξονα

Υπολογισμός Αξονικής Παραμόρφωσης στην Στρέψη

Ο υπολογισμός της αξονικής παραμόρφωσης στην Στρέψη της Δομής 1, υπολογίζεται διαιρώντας την Μετατόπιση κατά την αξονική διεύθυνση «Y» με την απόσταση R.

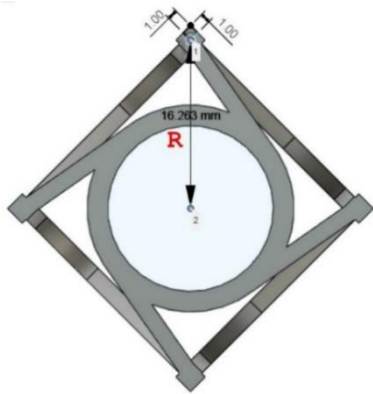
$$\gamma = \varepsilon_{στρέψης} = \frac{U_{y_{max}}}{R} = \frac{1.442}{16.263} \Rightarrow \gamma = \mathbf{0.0886 \text{ rad}} \quad (11)$$

$$\gamma = 0.0886 \cdot \frac{180}{\pi} \Rightarrow \gamma = \mathbf{4.962^\circ} \quad (12)$$

Υπολογισμός Συντελεστή Σύζευξης Στρεπτικών-Θλιπτικών Παραμορφώσεων

Ο υπολογισμός του Συντελεστή Σύζευξης Στρεπτικών-Θλιπτικών Παραμορφώσεων της Δομής 1, υπολογίζεται διαιρώντας την αξονική παραμόρφωση στην θλίψη με την αξονική παραμόρφωση στην Στρέψη.

$$\alpha = \frac{\varepsilon_{\text{στρέψης}}}{\varepsilon_{\text{αξονικό}}} = \frac{\gamma}{\varepsilon_{\text{θλίψης}}} = \frac{0.0886}{0.0074} \Rightarrow \alpha = \mathbf{11.973} \quad (13)$$

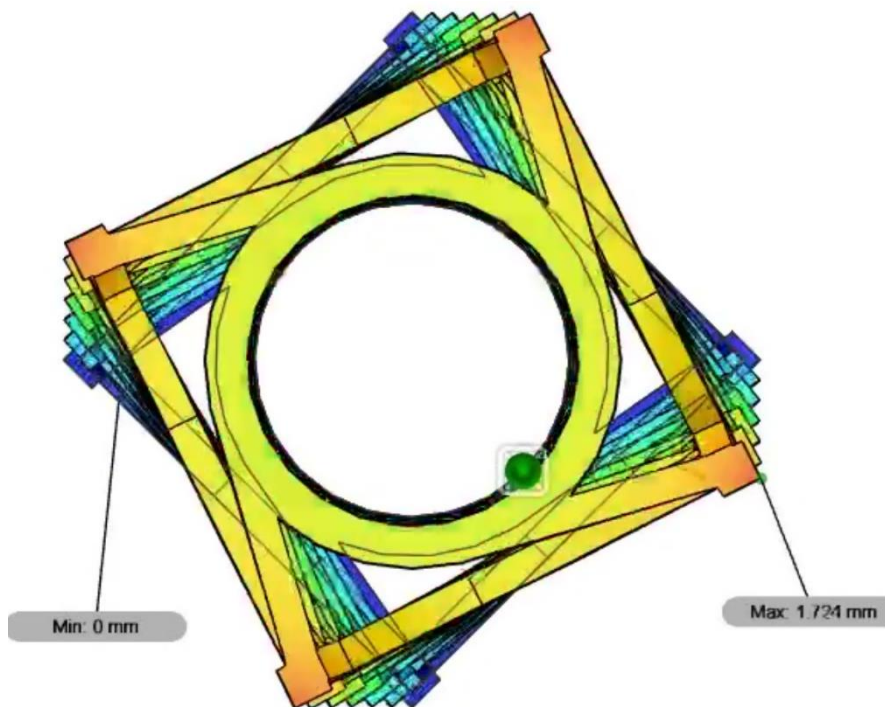


Στην εικόνα 106 παρουσιάζεται η απόσταση του κέντρου κύκλου με το κέντρο του κύβου «R», η οποία και χρησιμοποιήθηκε στην παραπάνω εξίσωση, ώστε να υπάρχει ένα συγκρίσιμο σημείο αναφοράς σε κάθε δομή πριν και μετά την παραμόρφωση.

Εικόνα 106: Απόσταση R – Δομή 2

ΑΝΩ ΟΨΗ ΔΟΜΗΣ 2

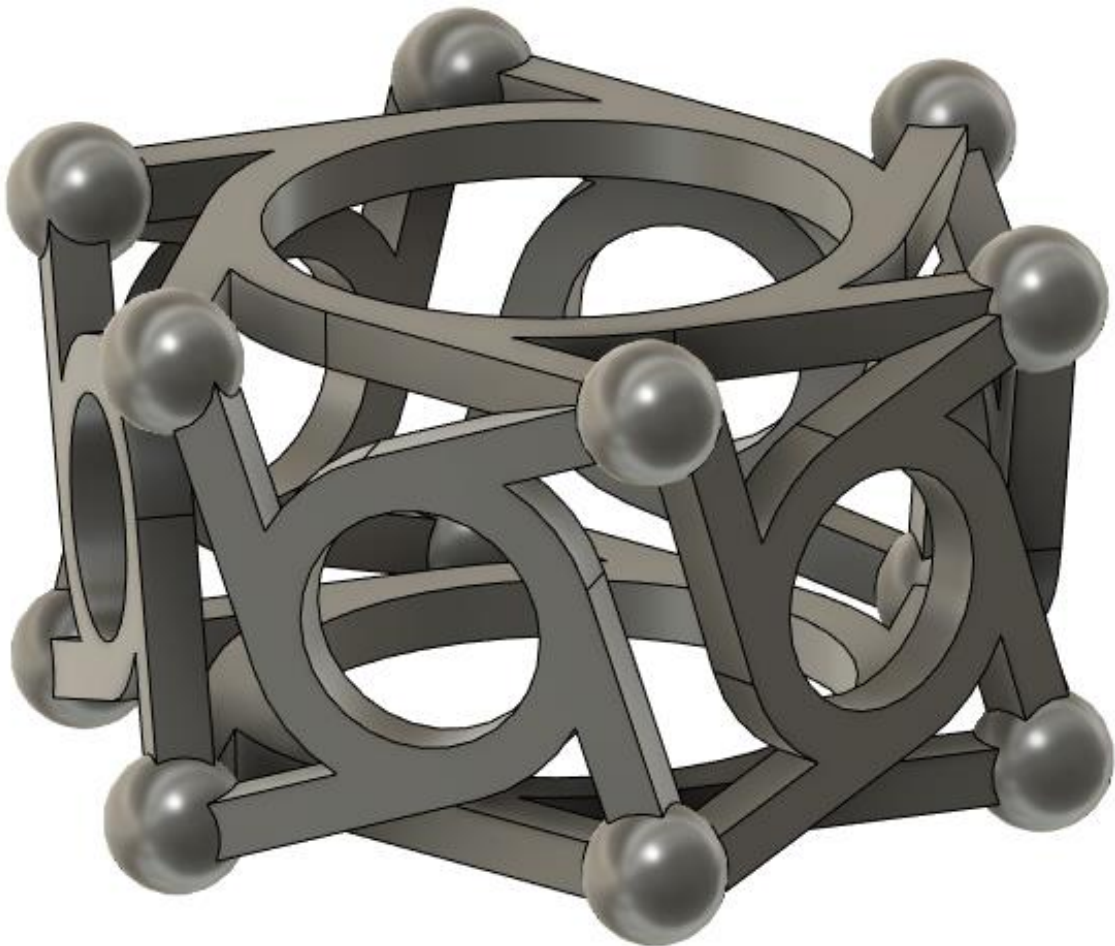
Στην εικόνα 107 παρουσιάζεται η άνω όψη της Δομής 2 την στιγμή της Θλιπτικής Αστοχίας, στην οποία μπορούμε να διακρίνουμε την Στρεπτική Παραμόρφωση.



Εικόνα 107: Άνω Όψη Δομής 2 - ΣΤΡΕΨΗ

5.2.3 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΔΟΜΗ ΜΕΤΑΥΛΙΚΟΥ ΜΕ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΖΕΥΞΗΣ ΘΛΙΨΗΣ ΚΑΙ ΣΤΡΕΨΗΣ - ΕΞΑΓΩΝΙΚΗΣ ΜΟΡΦΗΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΟΥΣ ΚΥΨΕΛΙΔΑΣ

Η Βέλτιστη Δομή του Μεταύλικού μας (Εξαγωνικής Μορφής Στοιχειώδους Κυψελίδας) παρουσιάζεται παρακάτω, η οποία προέκυψε έπειτα από πολλές προσπάθειες σχεδίασης και αριθμητικών προσομοιώσεων. Η συγκεκριμένη δομή περιλαμβάνεται από ένα εξάγωνο, όπου οι 6 «ακίδες» των 2 εξάγωνων ενώνονται με τις αντίστοιχες 4 «ακίδες» τετραγώνων. Όλες οι ακίδες έχουν 30 μοίρες κλίση και στα σημεία που ενώνονται οι «ακίδες» υπάρχουν σφαίρες για να είναι πιο ομοιόμορφες οι ενώσεις.



Εικόνα 108: Βέλτιστη Δομή Μεταύλικού – Εξαγωνικής Μορφής Στοιχειώδους Κυψελίδας

ΔΟΜΗ 3

Στην εικόνα 109 παρουσιάζεται η Δομή 3, όπου στην συγκεκριμένη δομή πραγματοποιήθηκαν δύο αριθμητικές προσομοιώσεις. Στην πρώτη αριθμητική προσομοίωση ασκήθηκε πίεση **0.01 MPA** στην διεύθυνση του άξονα «Z», καθώς η **Πάκτωση** βρισκόταν στην κάτω πλευρά της δομής. Στην δεύτερη αριθμητική προσομοίωση αντί για πίεση ασκήθηκε **Μετατόπιση - Displacement** κατά **1mm** στην διεύθυνση του άξονα «Z», καθώς η **Πάκτωση** βρισκόταν στην κάτω πλευρά της δομής. Τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώσεων εμφανίζονται παρακάτω.

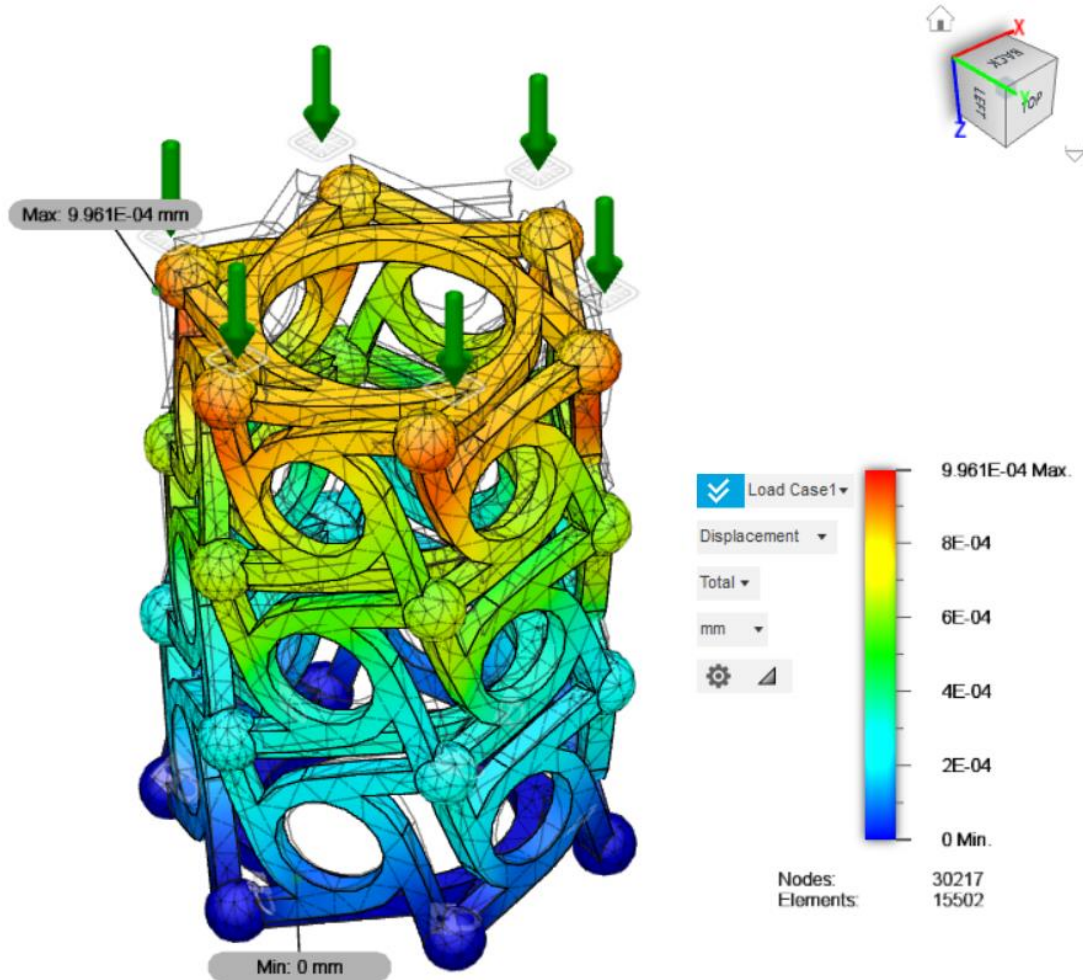


Εικόνα 109: Δομή 3

1. ΠΙΕΣΗ - PRESSURE: 0.01 MPa

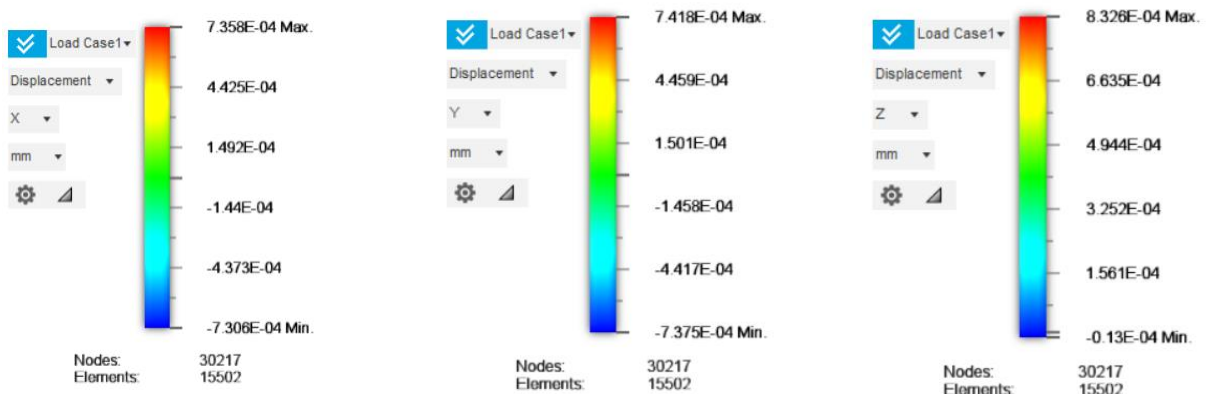
Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση

Στην εικόνα 110 παρουσιάζεται η Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση της Δομής 3, η οποία ανέρχεται στα $9.961 \cdot 10^{-4}$ mm.



Εικόνα 110: Δομή 3 – Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση

ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ – DISPLACEMENTS X-Y-Z



Εικόνα 111: Δομή 3 - Μετατοπίσεις X-Y-Z

Στην εικόνα 111 παρατηρείται ότι ασκώντας Πίεση-Pressure = 0,01MPa στην διεύθυνση του άξονα «Z», οι μέγιστες παραμορφώσεις που εμφανίζονται στους άξονες X-Y-Z, ανέρχονται κατά απόλυτη τιμή, στα $7.358 \cdot 10^{-4}$ mm, στα $7.418 \cdot 10^{-4}$ mm και στα $8.326 \cdot 10^{-4}$ mm αντίστοιχα.

Υπολογισμός Δυσκαμψίας Δομής

Ο υπολογισμός της Δυσκαμψίας της Δομής 1, υπολογίζεται εφαρμόζοντας τον Νόμο του Hooke κατά την αξονική διεύθυνση «Z».

$$\sigma_z = E_{z_{δομής}} \cdot \varepsilon_z \Rightarrow E_{z_{δομής}} = \frac{\sigma_z}{\varepsilon_z} = \frac{0.01}{\frac{U_{z_{κίτρινο}}}{l_{z_0}}} = \frac{0.01}{\frac{6.635 \cdot 10^{-4}}{50}}$$

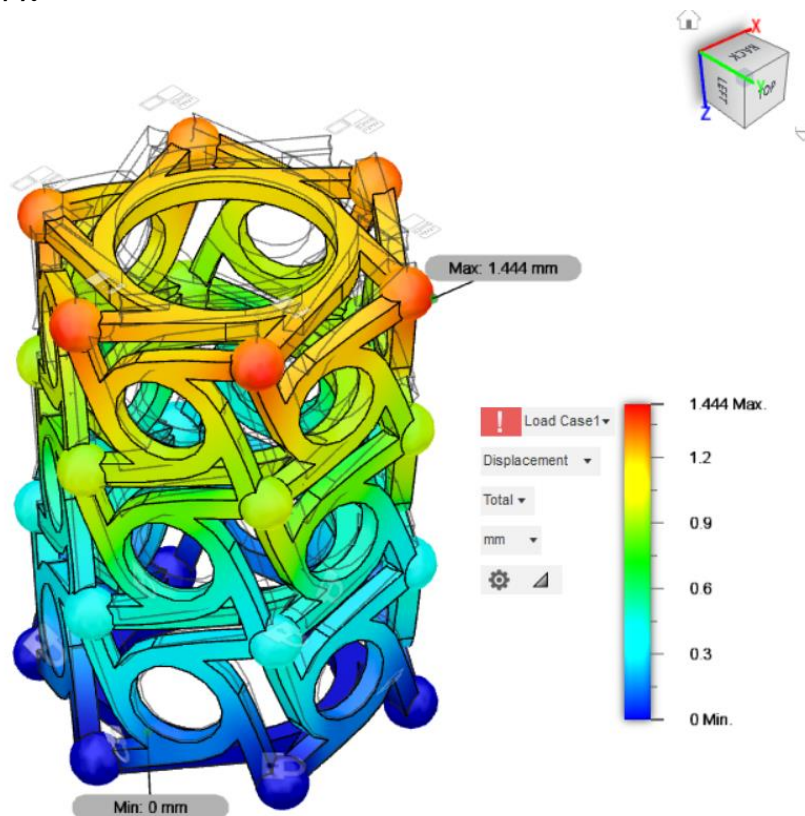
$$\Rightarrow E_{z_{δομής}} = 753.58 \text{ MPa} \quad (14)$$

l_{z_0} : Μήκος Δομής κατά τον «Z» άξονα

2. ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ - DISPLACEMENT: 1mm

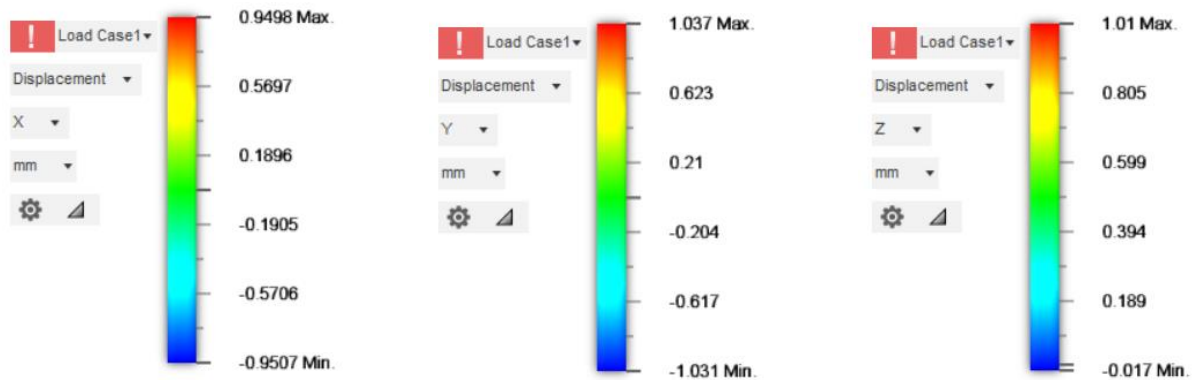
Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση

Στην εικόνα 112 παρουσιάζεται η **Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση** της Δομής 3, η οποία ανέρχεται στα **1.444 mm**.



Εικόνα 112: Δομή 3 – Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση

ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ – DISPLACEMENTS X-Y-Z



Εικόνα 113: Δομή 3 - Μετατοπίσεις X-Y-Z

Στην εικόνα 113 παρατηρείται ότι ασκώντας Πίεση-Pressure = 0,01MPa στην διεύθυνση του άξονα «Z», οι μέγιστες παραμορφώσεις που εμφανίζονται στους άξονες **X-Y-Z**, ανέρχονται κατά απόλυτη τιμή, στα **0.9507 mm**, στα **1.037 mm** και στα **1.01 mm** αντίστοιχα.

Υπολογισμός Αξονικής Παραμόρφωσης στην Θλίψη

Ο υπολογισμός της αξονικής παραμόρφωσης στην θλίψη της Δομής 1, υπολογίζεται διαιρώντας την διαφορά αρχικού-τελικού μήκους με το πραγματικό μήκος της δομής, κατά την αξονική διεύθυνση «Z».

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta L_z}{l_{z_0}} = \frac{U_z}{l_{z_0}} = \frac{1}{50} \Rightarrow \varepsilon_z = \mathbf{0.02} \quad (15)$$

l_{z_0} : Μήκος Δομής κατά τον «Z» άξονα

Υπολογισμός Αξονικής Παραμόρφωσης στην Στρέψη

Ο υπολογισμός της αξονικής παραμόρφωσης στην Στρέψη της Δομής 1, υπολογίζεται διαιρώντας την Μετατόπιση κατά την αξονική διεύθυνση «Y» με την απόσταση R.

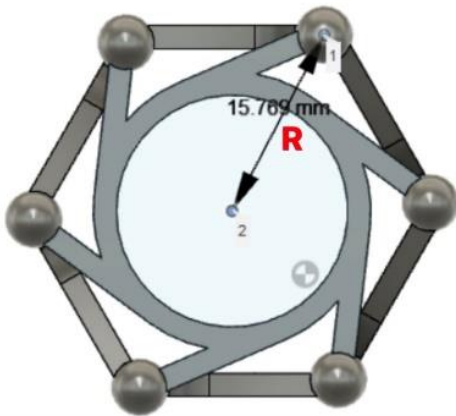
$$\gamma = \varepsilon_{στρέψης} = \frac{U_{y_{max}}}{R} = \frac{1.037}{15.769} \Rightarrow \gamma = \mathbf{0.0658 \text{ rad}} \quad (16)$$

$$\gamma = 0.0658 \cdot \frac{180}{\pi} \Rightarrow \gamma = \mathbf{3.770^\circ} \quad (17)$$

Υπολογισμός Συντελεστή Σύζευξης Στρεπτικών-Θλιπτικών Παραμορφώσεων

Ο υπολογισμός του Συντελεστή Σύζευξης Στρεπτικών-Θλιπτικών Παραμορφώσεων της Δομής 1, υπολογίζεται διαιρώντας την αξονική παραμόρφωση στην θλίψη με την αξονική παραμόρφωση στην Στρέψη.

$$\alpha = \frac{\varepsilon_{\text{στρέψης}}}{\varepsilon_{\text{αξονικό}}} = \frac{\gamma}{\varepsilon_{\text{θλίψης}}} = \frac{0.0658}{0.02} \Rightarrow \alpha = 3.29 \quad (18)$$



Στην εικόνα 114 παρουσιάζεται η απόσταση του κέντρου κύκλου με το κέντρο της σφαίρας «R», η οποία και χρησιμοποιήθηκε στην παραπάνω εξίσωση, ώστε να υπάρχει ένα συγκρίσιμο σημείο αναφοράς σε κάθε δομή πριν και μετά την παραμόρφωση.

Εικόνα 114: Απόσταση R – Δομή 4

ΔΟΜΗ 4

Στην εικόνα 115 παρουσιάζεται η Δομή 4, όπου στην συγκεκριμένη δομή πραγματοποιήθηκαν δύο αριθμητικές προσομοιώσεις. Στην πρώτη αριθμητική προσομοίωση ασκήθηκε πίεση **0.01 MPA** στην διεύθυνση του άξονα «Z», καθώς η **Πάκτωση** βρισκόταν στην κάτω πλευρά της δομής. Στην δεύτερη αριθμητική προσομοίωση αντί για πίεση ασκήθηκε **Μετατόπιση - Displacement** κατά **1mm** στην διεύθυνση του άξονα «Z», καθώς η **Πάκτωση** βρισκόταν στην κάτω πλευρά της δομής. Τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώσεων εμφανίζονται παρακάτω.

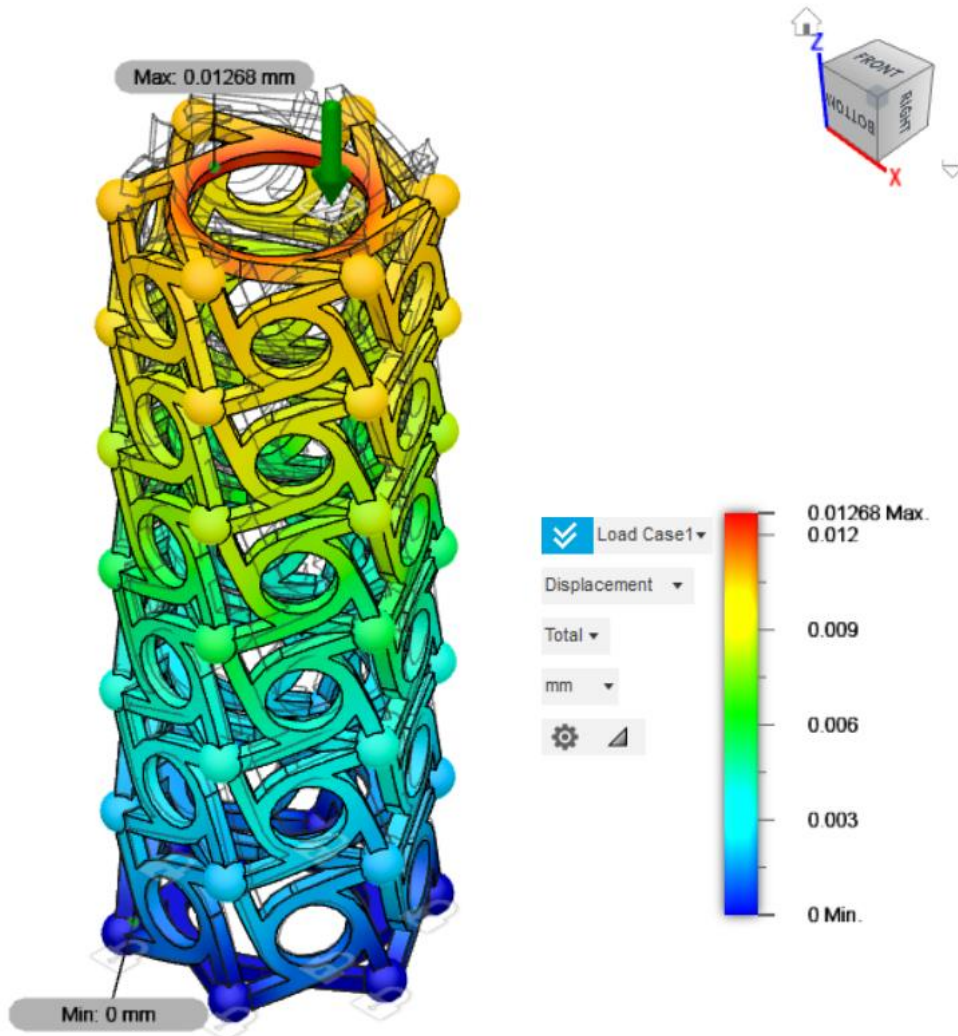


Εικόνα 115: Δομή 4

1. ΠΙΕΣΗ - PRESSURE: 0.01 MPa

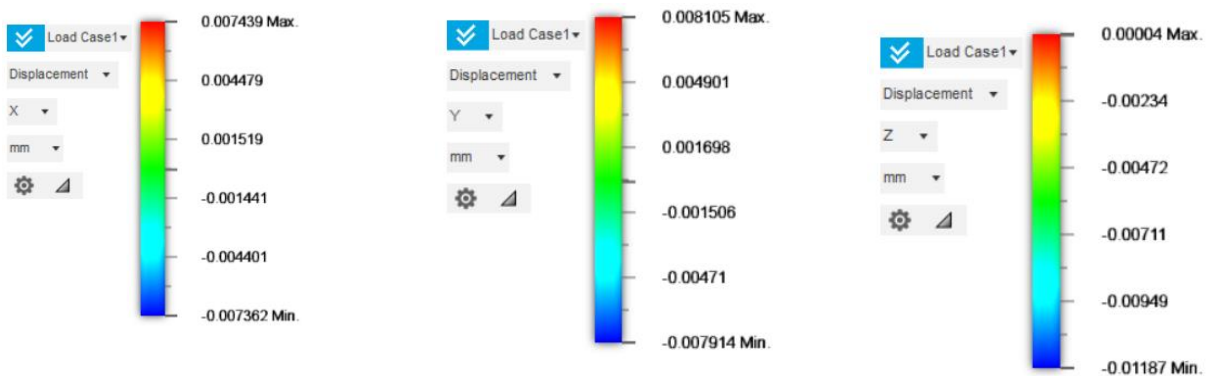
Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση

Στην εικόνα 116 παρουσιάζεται η **Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση** της Δομής 4, η οποία ανέρχεται στα **0.01268 mm**.



Εικόνα 116: Δομή 4 – Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση

ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ – DISPLACEMENTS X-Y-Z



Εικόνα 117: Δομή 4 - Μετατοπίσεις X-Y-Z

Στην εικόνα 117 παρατηρείται ότι ασκώντας Πίεση-Pressure = 0,01MPa στην διεύθυνση του άξονα «Z», οι μέγιστες παραμορφώσεις που εμφανίζονται στους άξονες X-Y-Z, ανέρχονται κατά απόλυτη τιμή, στα **0.007439 mm**, στα **0.008105 mm** και στα **0.01187 mm** αντίστοιχα.

Υπολογισμός Δυσκαμψίας Δομής

Ο υπολογισμός της Δυσκαμψίας της Δομής 1, υπολογίζεται εφαρμόζοντας τον Νόμο του Hooke κατά την αξονική διεύθυνση «Z».

$$\sigma_z = E_{z_{\text{δομής}}} \cdot \varepsilon_z \Rightarrow E_{z_{\text{δομής}}} = \frac{\sigma_z}{\varepsilon_z} = \frac{0.01}{\frac{U_{z_{\text{κίτρινο}}}}{l_{z_0}}} = \frac{0.01}{\frac{0.00234}{95.4}}$$

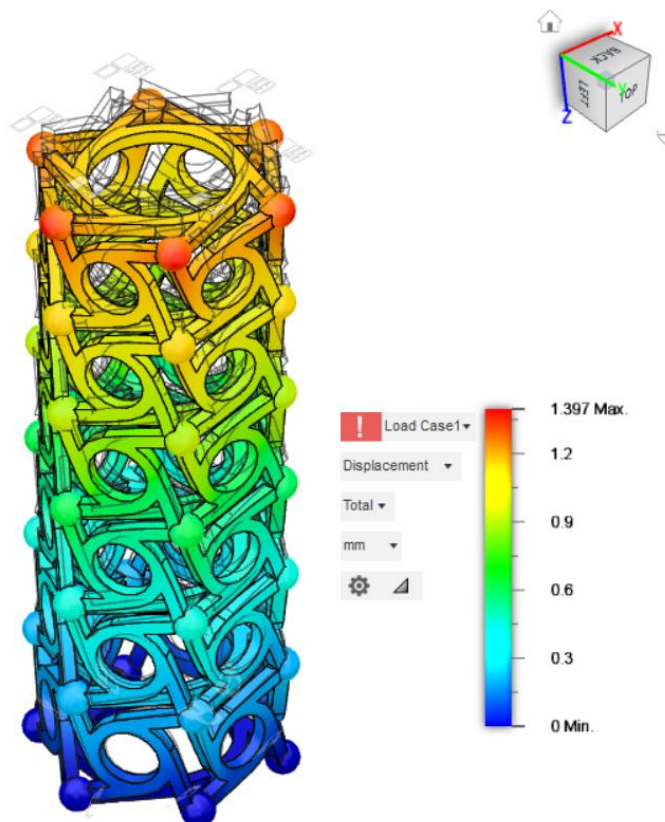
$$\Rightarrow E_{z_{\text{δομής}}} = 407.692 \text{ MPa (19)}$$

l_{z_0} : Μήκος Δομής κατά τον «Z» άξονα

2. ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ - DISPLACEMENT: 1mm

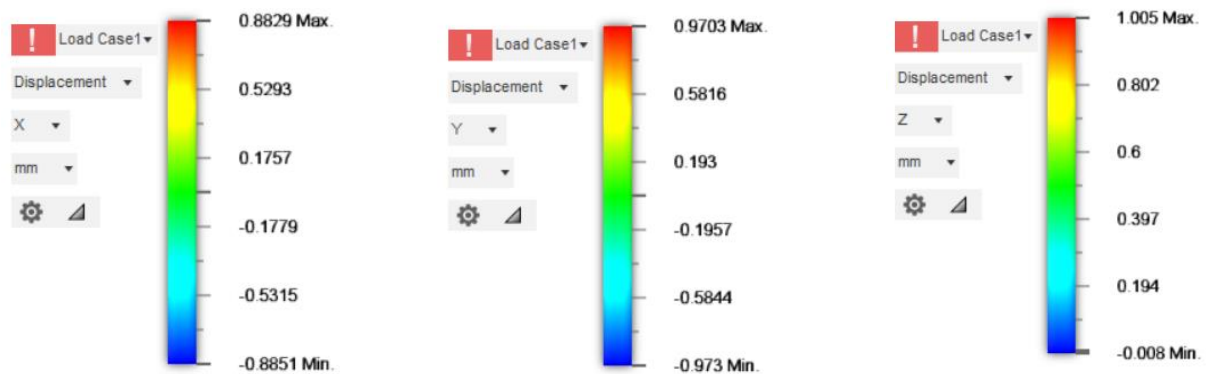
Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση

Στην εικόνα 118 παρουσιάζεται η **Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση** της Δομής 4, η οποία ανέρχεται στα **1.397 mm**.



Εικόνα 118: Δομή 4 – Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση

ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ – DISPLACEMENTS X-Y-Z



Εικόνα 119: Δομή 4 - Μετατοπίσεις X-Y-Z

Στην εικόνα 119 παρατηρείται ότι ασκώντας Πίεση-Pressure = 0,01MPa στην διεύθυνση του άξονα «Z», οι μέγιστες παραμορφώσεις που εμφανίζονται στους άξονες X-Y-Z, ανέρχονται κατά απόλυτη τιμή, στα **0.8851 mm**, στα **0.973 mm** και στα **1.005 mm** αντίστοιχα.

Υπολογισμός Αξονικής Παραμόρφωσης στην Θλίψη

Ο υπολογισμός της αξονικής παραμόρφωσης στην θλίψη της Δομής 1, υπολογίζεται διαιρώντας την διαφορά αρχικού-τελικού μήκους με το πραγματικό μήκος της δομής, κατά την αξονική διεύθυνση «Z».

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta L_z}{l_{z_0}} = \frac{U_z}{l_{z_0}} = \frac{1}{95.4} \Rightarrow \varepsilon_z = \mathbf{0.0105} \quad (20)$$

l_{z_0} : Μήκος Δομής κατά τον «Z» άξονα

Υπολογισμός Αξονικής Παραμόρφωσης στην Στρέψη

Ο υπολογισμός της αξονικής παραμόρφωσης στην Στρέψη της Δομής 1, υπολογίζεται διαιρώντας την Μετατόπιση κατά την αξονική διεύθυνση «Y» με την απόσταση R.

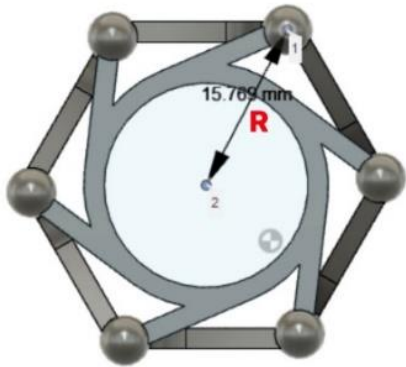
$$\gamma = \varepsilon_{στρέψης} = \frac{U_{y_{max}}}{R} = \frac{0.9703}{15.769} \Rightarrow \gamma = \mathbf{0.0615 \text{ rad}} \quad (21)$$

$$\gamma = 0.0615 \cdot \frac{180}{\pi} \Rightarrow \gamma = \mathbf{3.524^\circ} \quad (22)$$

Υπολογισμός Συντελεστή Σύζευξης Στρεπτικών-Θλιπτικών Παραμορφώσεων

Ο υπολογισμός του Συντελεστή Σύζευξης Στρεπτικών-Θλιπτικών Παραμορφώσεων της Δομής 1, υπολογίζεται διαιρώντας την αξονική παραμόρφωση στην θλίψη με την αξονική παραμόρφωση στην Στρέψη.

$$\alpha = \frac{\varepsilon_{στρέψης}}{\varepsilon_{αξονικό}} = \frac{\gamma}{\varepsilon_{θλίψης}} = \frac{0.0615}{0.0105} \Rightarrow \alpha = 5.857 \quad (23)$$

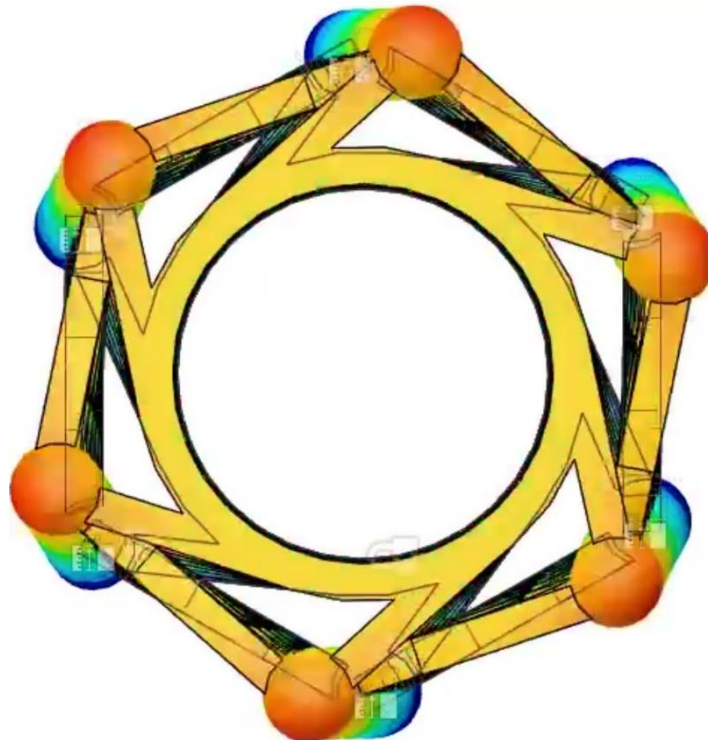


Στην εικόνα 120 παρουσιάζεται η απόσταση του κέντρου κύκλου με το κέντρο της σφαίρας «R», η οποία και χρησιμοποιήθηκε στην παραπάνω εξίσωση, ώστε να υπάρχει ένα συγκρίσιμο σημείο αναφοράς σε κάθε δομή πριν και μετά την παραμόρφωση.

Εικόνα 120: Απόσταση R - Δομή 4

ΑΝΩ ΟΨΗ ΔΟΜΗΣ 4

Στην εικόνα 121 παρουσιάζεται η άνω όψη της Δομής 4 την στιγμή της Θλιπτικής αστοχίας, στην οποία μπορούμε να διακρίνουμε την Στρεπτική παραμόρφωση.



Εικόνα 121: Άνω Όψη Δομής 4 - ΣΤΡΕΨΗ

5.3 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΔΟΜΩΝ

Η τρισδιάστατη εκτύπωση των σχεδιασμένων δομών Μεταλλικών πραγματοποιήθηκε στον εκτυπωτή της **HP Jet Fusion 5200** (Εικόνα 122), ο οποίος ανήκει στην κατηγορία του Selective Laser Sintering – SLS. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν το **NYLON PA 12**.



Εικόνα 122: HP Jet Fusion 5200

Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε ο συγκεκριμένος τρισδιάστατος εκτυπωτής και το συγκεκριμένο υλικό εκτύπωσης ήταν για να πέτυχουμε το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα εκτύπωσης, δηλαδή υψηλή λεπτομέρεια και ακρίβεια διαστάσεων σε συνδυασμό με την ισχυρή ποιότητα.

5.4 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΕΣ ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΕΣ ΔΟΜΕΣ

Στην εικόνα 123 παρουσιάζονται οι τρισδιάστατες εκτυπωμένες δομές, εκτυπωμένες με την τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης και πιο συγκεκριμένα με την μέθοδο Selective Laser Sintering – SLS.



Εικόνα 123: Τρισδιάστατες Εκτυπωμένες Δομές

ΚΕΦ.6: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΜΩΝ 1-2-3-4

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στην Σερβοϋδραυλική μηχανή δοκιμών του εργαστηρίου του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου (Εικόνα 124), η οποία μπορεί να ασκήσει μέγιστο φορτίο **10 KN**.

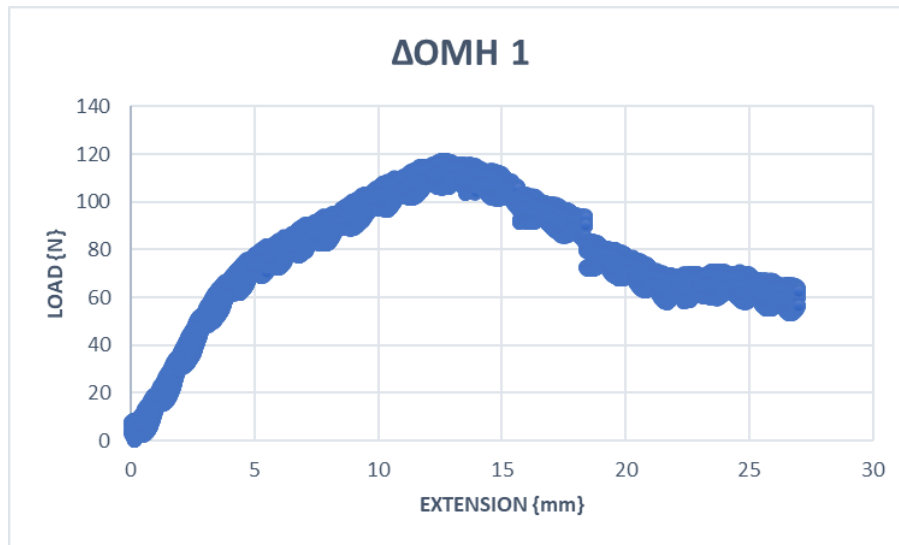


Εικόνα 124: Σερβοϋδραυλική μηχανή δοκιμών

Τα αποτελέσματα που μας έδωσε η μηχανή παραθέτονται στα παρακάτω διαγράμματα. Όλες οι δομές πακτώθηκαν στο κάτω μέρος με τη χρήση ισχυρής κόλλας, καθώς τοποθετήθηκαν σε μεταλλική ορθογωνική βάση σχήματος «Π» για να μπορέσουμε να πετύχουμε όμοια καθετότητα.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΔΟΜΗ 1

Στην εικόνα 125 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της Δομής 1 που μας έδωσε η Σερβοϋδραυλική μηχανή.



Εικόνα 125: Διάγραμμα Δομής 1

Παρατηρούμε ότι για την Δομή 1 (Εικόνα 125), η αστοχία εμφανίζεται στα **12 mm** για δύναμη **120 N**, όπου η θλιπτική παραμόρφωση προκύπτει ως εξής:

$$\text{Θλιπτική Παραμόρφωση} = \frac{\text{Extension}}{L_0} = \frac{12}{68.8} = \mathbf{0.174} \quad (24)$$



Εικόνα 126: Πείραμα Δομής 1

ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ ΤΗΝ ΣΤΙΓΜΗ ΤΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

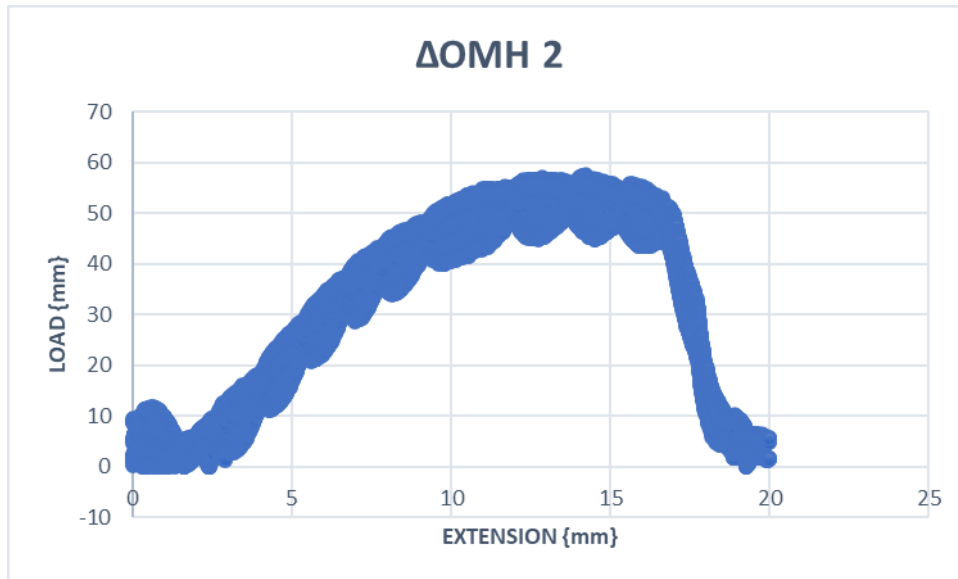
Στην εικόνα 127 παρουσιάζεται το στιγμιότυπο την στιγμή της αστοχίας της Δομής 1, κατά την διάρκεια του πειράματος.



Εικόνα 127: Στιγμιότυπο την Στιγμή της Αστοχίας – Δομή 1

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΔΟΜΗ 2

Στην εικόνα 128 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της Δομής 2 που μας έδωσε η Σερβοϋδραυλική μηχανή.



Εικόνα 128: Διάγραμμα Δομής 2

Παρατηρούμε ότι για την Δομή 2 (Εικόνα 128), η αστοχία εμφανίζεται στα **13 mm** για δύναμη **55 N**, όπου η θλιπτική παραμόρφωση προκύπτει ως εξής:

$$\text{Θλιπτική Παραμόρφωση} = \frac{\text{Extension}}{L_0} = \frac{13}{135.6} = \mathbf{0.096 \text{ (25)}}$$



Εικόνα 129: Πείραμα Δομής 2

ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ ΤΗΝ ΣΤΙΓΜΗ ΤΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

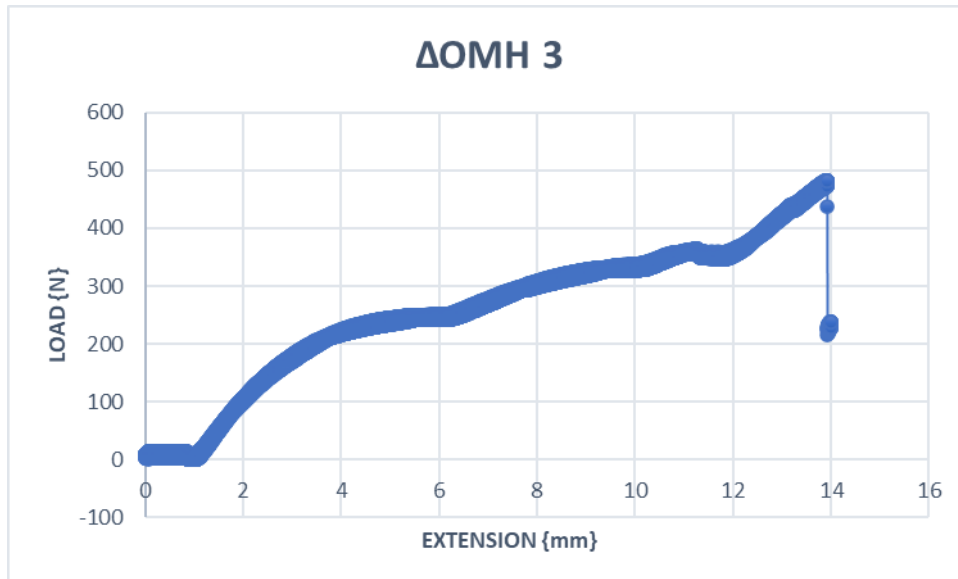
Στην εικόνα 130 παρουσιάζεται το στιγμιότυπο την στιγμή της αστοχίας της Δομής 2, κατά την διάρκεια του πειράματος.



Εικόνα 130: Στιγμιότυπο την Στιγμή της Αστοχίας - Δομή 2

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΔΟΜΗ 3

Στην εικόνα 131 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της Δομής 3 που μας έδωσε η Σερβοϋδραυλική μηχανή.



Εικόνα 131: Διάγραμμα Δομής 3

Παρατηρούμε ότι για την Δομή 3 (Εικόνα 131), η αστοχία εμφανίζεται στα **14 mm** για δύναμη **480 N**, όπου η θλιπτική παραμόρφωση προκύπτει ως εξής:

$$\text{Θλιπτική Παραμόρφωση} = \frac{\text{Extension}}{L_0} = \frac{14}{50} = \mathbf{0.280} \quad (26)$$



Εικόνα 132: Πείραμα Δομής 3

ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ ΤΗΝ ΣΤΙΓΜΗ ΤΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

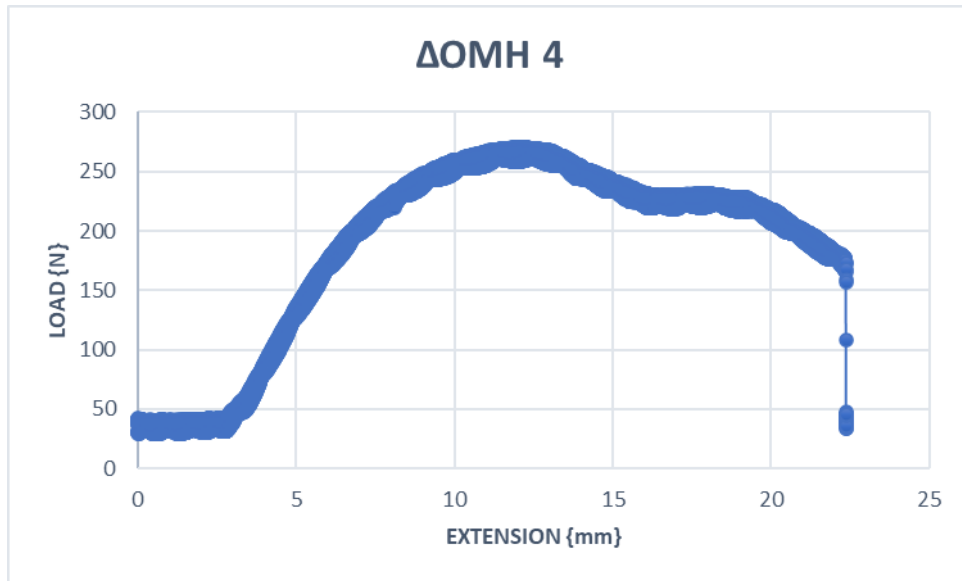
Στην εικόνα 133 παρουσιάζεται το στιγμιότυπο την στιγμή της αστοχίας της Δομής 3, κατά την διάρκεια του πειράματος.



Εικόνα 133: Στιγμιότυπο την Στιγμή της Αστοχίας - Δομή 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΔΟΜΗ 4

Στην εικόνα 134 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της Δομής 4 που μας έδωσε η Σερβοϋδραυλική μηχανή.



Εικόνα 134: Διάγραμμα Δομής 4

Παρατηρούμε ότι για την Δομή 4 (Εικόνα 134), η αστοχία εμφανίζεται στα **12 mm** για δύναμη **270 N**, όπου η θλιπτική παραμόρφωση προκύπτει ως εξής:

$$\text{Θλιπτική Παραμόρφωση} = \frac{\text{Extension}}{L_0} = \frac{12}{95.4} = \mathbf{0.126} \quad (27)$$



Εικόνα 135: Πείραμα Δομής 4

ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ ΤΗΝ ΣΤΙΓΜΗ ΤΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Στην εικόνα 136 παρουσιάζεται το στιγμιότυπο την στιγμή της αστοχίας της Δομής 4, κατά την διάρκεια του πειράματος.



Εικόνα 136: Στιγμιότυπο την Στιγμή της Αστοχίας – Δομή 4

ΚΕΦ.7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κάνοντας μια γενική ανασκόπηση της παρούσας εργασίας, στόχος ήταν η δημιουργία ενός Μεταϋλικού, δηλαδή μιας τρισδιάστατης δομής με την ιδιότητα να εμφανίζει Στρέψη κατά την διάρκεια της μονοαξονικής Θλίψης της. Για να μην προκύψει κίνδυνος αστοχίας της δομής σε λυγισμό η δομή, θα έπρεπε εκτός των άλλων ο προτεινόμενος σχεδιασμός να παρέχει υψηλή δυσκαμψία στη θλίψη αλλά και διατομή που να προσεγγίζει την συμμετρικότητα του κύκλου.

Αρχικά, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα της Autodesk το Fusion 360, σχεδιαστήκαν μια σειρά από Μεταϋλικά με στόχο να βρεθεί ένας βέλτιστο σχεδιασμός που να φέρει ιδιότητες σύζευξης Θλίψης και Στρέψης. Αυτό πραγματοποιήθηκε μελετώντας τη μηχανική συμπεριφορά των υπό δοκιμή Μεταϋλικών με αριθμητικές προσομοιώσεις και αναλύοντας τα αποτελέσματα που προέκυπταν.

Στην συνέχεια, υιοθετήθηκαν οι επικρατέστερες δομές Εξαγωνικής Μορφής Στοιχειώδους Κυψελίδας και την Δομή Μεταϋλικού και Κυβικής Μορφής Στοιχειώδους Κυψελίδας και τυπώθηκαν χρησιμοποιώντας σαν υλικό το NYLON PA 12 με στόχο να πραγματοποιηθούν αντίστοιχα πειράματα με την Σερβοϋδραυλική μηχανή δοκιμών του εργαστηρίου του Τμήματος. Οι Δομές που τυπώθηκαν ήταν 4 στο σύνολο. Δύο εξαγωνικής μορφής (μήκους τριών και τεσσάρων κυψελίδων) και δύο δομές ανάλογου μεγέθους αλλά κυβικής μορφής (μήκους τριών και τεσσάρων κυψελίδων).

Τέλος, για την ολοκλήρωση της παρούσας πτυχιακής, στις παραγράφους που ακολουθούν συγκρίνονται τα αριθμητικά και πειραματικά αποτελέσματα για βρεθεί και να προταθεί η ιδανικότερη δομή μεταϋλικού. Το τελικό πόρισμα είναι ότι για την περίπτωση της θλίψης όπου υφίσταται κίνδυνος αστοχίας σε λυγισμό καλύτερη δομή είναι αυτή που φέρει την εξαγωνική προτεινόμενη κυψελίδα. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι η συγκεκριμένη δομή παρέχει ικανοποιητική σύζευξη θλιπτικής-αξονικής παραμόρφωσης (συγκρίσιμη με αυτή που παρέχεται από την δομή κυβικής κυψελίδας) ενώ παράλληλα υπερτερεί θεαματικά σε αντίσταση έναντι λυγισμού εξαιτίας της πολλαπλάσιας αξονικής δυσκαμψίας που παρουσιάζει αλλά και εξαγωνικού σχήματος της διατομής της. Προφανώς όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος του μεταϋλικού εξαγωνικής κυψελίδας όσο μεγαλύτερο είναι το κέρδος σε στρεπτική παραμόρφωση ενώ όσο μικρότερο είναι το μήκος του τόσο μεγαλύτερη η ανθεκτικότητά του σε λυγισμό.

7.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώσεων των Δομών 1 (κυβική δομή μήκους 3 κυψελίδων), 2 (κυβική δομή μήκους 6 κυψελίδων), 3 (εξαγωνική δομή μήκους 3 κυψελίδων) και 4 (εξαγωνική δομή μήκους 6 κυψελίδων) παρουσιάζονται παρακάτω.

1. ΠΙΕΣΗ – PRESSURE: 0.01 MPa

Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα των Δομών 1-2-3-4, τα οποία προέκυψαν ασκώντας πίεση 0.01 MPa στην διεύθυνση του άξονα «Z», καθώς η Πάκτωση βρισκόταν στην κάτω πλευρά της δομής.

ΠΙΕΣΗ: 0.01MPa	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	TOTAL (mm)	ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ ΔΟΜΗΣ (MPa)
ΔΟΜΗ 1	0.04285	0.0426	0.03026	0.05041	117
ΔΟΜΗ 2	0.08545	0.08534	0.05948	0.102	58.753
ΔΟΜΗ 3	$7.358 \cdot 10^{-4}$	$7.418 \cdot 10^{-4}$	$8.326 \cdot 10^{-4}$	$9.961 \cdot 10^{-4}$	753.58
ΔΟΜΗ 4	0.007439	0.008105	0.01187	0.01268	407.692

Πίνακας 1: Αποτελέσματα Αριθμητικής Προσομοίωσης – Πίεση

2. ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ – DISPLACEMENT: 1mm

Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα των Δομών 1-2-3-4, τα οποία προέκυψαν ασκώντας ασκήθηκε Μετατόπιση - Displacement κατά 1mm στην διεύθυνση του άξονα «Z», καθώς η Πάκτωση βρισκόταν στην κάτω πλευρά της δομής.

ΜΕΤΟΠΙΣΗ: 1mm	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	TOTAL (mm)	ϵ_z	γ (°)	α
ΔΟΜΗ 1	1.435	1.427	1.014	1.689	0.0145	5.025	6.048
ΔΟΜΗ 2	1.444	1.442	1.005	1.724	0.0074	4.962	11.973
ΔΟΜΗ 3	0.9507	1.037	1.01	1.444	0.02	3.770	3.29
ΔΟΜΗ 4	0.8851	0.973	1.005	1.397	0.0105	3.524	5.857

Πίνακας 2: Αποτελέσματα Αριθμητικής Προσομοίωσης - Μετατόπιση

ϵ_z : Αξονική Παραμόρφωση στην Θλίψη

γ : Αξονικής Παραμόρφωσης στην Στρέψη

α : Συντελεστής Σύζευξης Στρεπτικών-Θλιπτικών Παραμορφώσεων

7.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Στην παράγραφο αυτή παρατίθενται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των πειραμάτων για τη Δομή 1 (κυβική δομή μήκους 3 κυψελίδων), 2 (κυβική δομή μήκους 6 κυψελίδων), 3 (εξαγωνική δομή μήκους 3 κυψελίδων) και 4 (εξαγωνική δομή μήκους 6 κυψελίδων).

Στον πίνακα 3 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα των Δομών 1-2-3-4, τα οποία προέκυψαν ασκώντας σταθερό αυξητικό φορτίο κατά την διεύθυνση του άξονα «Z» μέχρι την αστοχία τους.

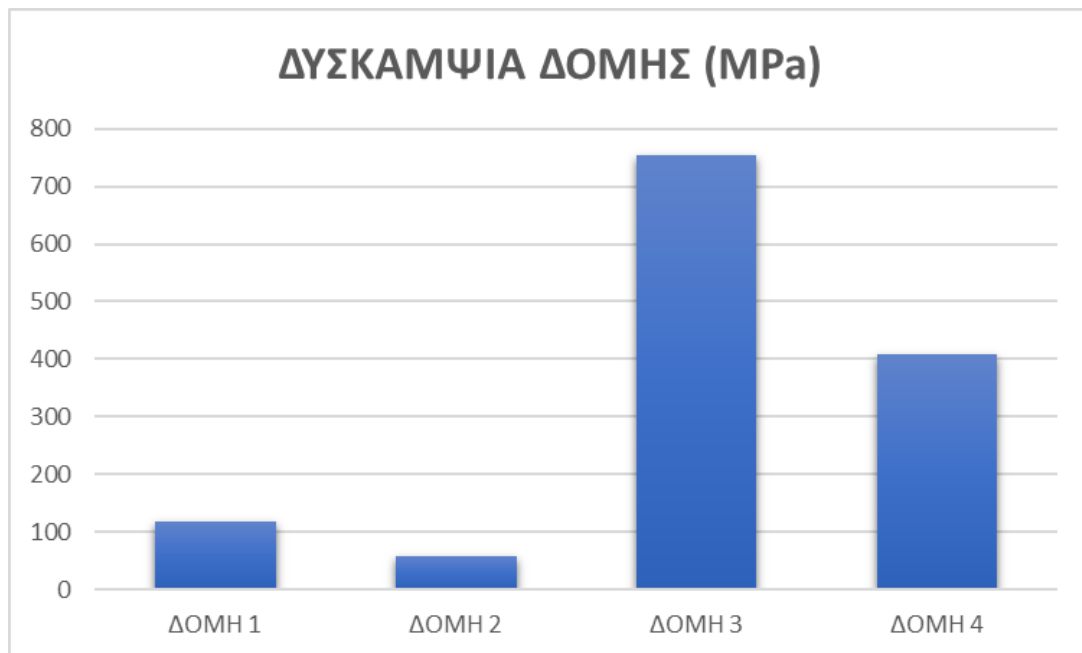
ΑΣΤΟΧΙΑ	LOAD (N)	EXTENSION (mm)	ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ
ΔΟΜΗ 1	120	12	0.174
ΔΟΜΗ 2	55	13	0.096
ΔΟΜΗ 3	480	14	0.280
ΔΟΜΗ 4	270	12	0.126

Πίνακας 3: Αποτελέσματα Πειράματος

7.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων πραγματοποιώντας αντιπαραθέτοντας τα χαρακτηριστικά των Δομών 1 με 3 και των Δομών 2 με 4.

1. ΠΙΕΣΗ – PRESSURE: 0.01 MPa

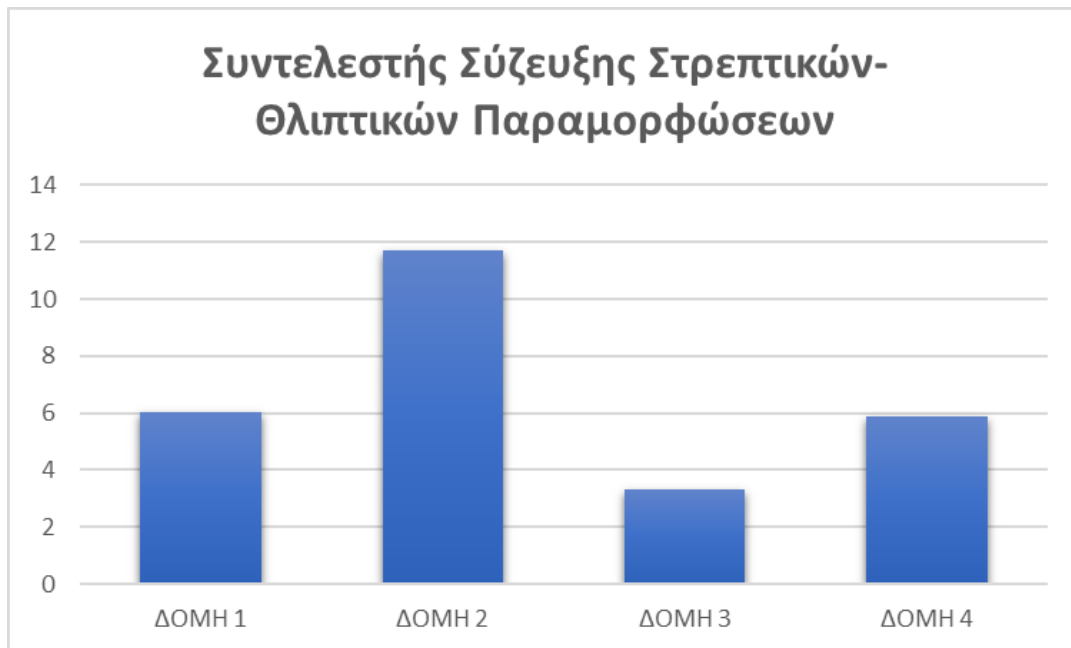


Εικόνα 137: Αποτελέσματα Δυσκαμψίας Δομής 1-2-3-4

Στην εικόνα 137, για την αριθμητική προσομοίωση που προέκυψε ασκώντας πίεση 0.01 MPa στην διεύθυνση του άξονα «Z» παρατηρούμε ότι η Δομή 3 και η Δομή 4 έχουν **πολύ μεγαλύτερη δυσκαμψία** από ότι η Δομή 1 και 2 αντίστοιχα.

Πιο συγκεκριμένα η Δομή 1 και 2 παρουσιάζουν περίπου **6.5 φορές μεγαλύτερη Δυσκαμψία** σε σύγκριση με την Δομή 3 και 4 με αποτέλεσμα να εμφανίζουν πολύ πιο δύσκολα το φαινόμενο του Λυγισμού.

2. ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ – DISPLACEMENT: 1mm

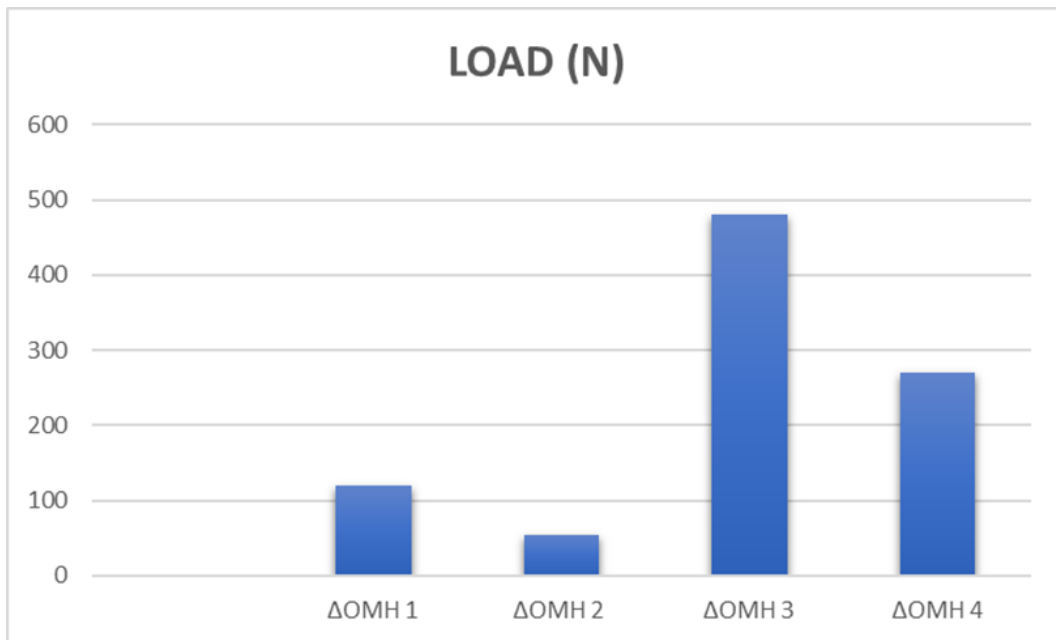


Εικόνα 138: Αποτελέσματα Συντελεστή Σύζευξης Στρεπτικών - Θλιπτικών Παραμορφώσεων για την Δομή 1-2-3-4

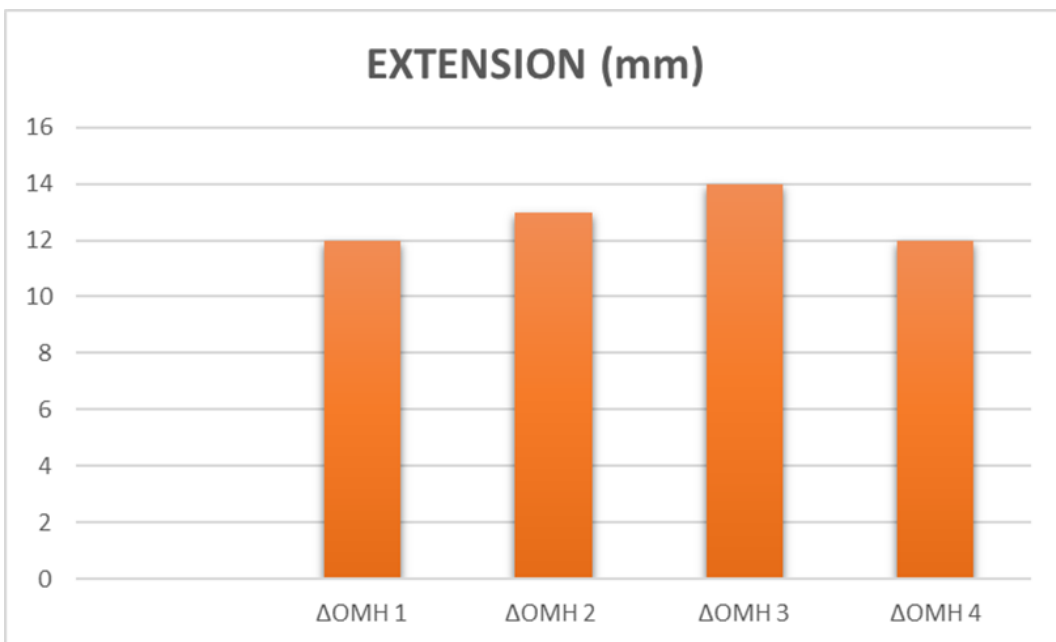
Στην εικόνα 138, για την αριθμητική προσομοίωση που προέκυψε ασκώντας Μετατόπιση - Displacement κατά 1mm στην διεύθυνση του άξονα «Z» παρατηρούμε ότι οι Δομές 3 και 4 έχουν **μικρότερο Συντελεστή Σύζευξης Στρεπτικών-Θλιπτικών Παραμορφώσεων** από ότι η Δομή 1 και 2 αντίστοιχα.

Πιο συγκεκριμένα οι Δομές 3 και 4 παρουσιάζουν περίπου **50% μικρότερη αναλογία Στρεπτικής – Θλιπτικής Παραμόρφωσης** σε σύγκριση με την Δομή 1 και 2 με αποτέλεσμα να εμφανίζουν μικρότερη Στρέψη κατά την διάρκεια της Θλιπτικής Παραμόρφωσης.

3. ΠΕΙΡΑΜΑ



Εικόνα 139: Πειραματικά Αποτελέσματα (LOAD) για την Δομή 1-2-3-4



Εικόνα 140: Πειραματικά Αποτελέσματα (EXTENSION) για την Δομή 1-2-3-4

Στις Εικόνες 139 και 140 συνοψίζονται απεικονιστικά τα αποτελέσματα της πειραματικής προσπάθειας. Ασκώντας σταθερά αυξητικό θλιπτικό φορτίο κατά την διεύθυνση του άξονα «Z», παρατηρούμε ότι οι όλες οι Δομές αστόχησαν περίπου στα 12-14 mm (Εικόνα 140) ενώ οι Δομές 3 και 4 άντεξαν **μεγαλύτερο φορτίο** μέχρι την αστοχία τους από ότι οι Δομές 1 και 2, αντίστοιχα (Εικόνα 139).

Πιο συγκεκριμένα, οι Δομές 3 και 4 φάνηκαν να παραλαμβάνουν με ασφάλεια τέσσερις με πέντε φορές μεγαλύτερο θλιπτικό φορτίο σε σχέση με τις αντίστοιχες Δομές 1 και 2.

Συμπερασματικά, στην παρούσα Διπλωματική Εργασία καταφέραμε να σχεδιάσουμε και να κατασκευάσουμε μια Δομή Μεταϊλικού, Εξαγωνικής Μορφής Στοιχειώδους Κυψελίδας, η οποία έχει την ιδιότητα της μετατροπής της Θλιπτικής παραμόρφωσης σε Στρεπτική παραμόρφωση. Επίσης, εκτός από ότι καταφέραμε να φτιάξουμε ένα Μεταϊλικό που μετατρέπει την μονοαξονική παραμόρφωση κατά την διάρκεια της Θλίψης σε Στρέψη, καταφέραμε να πετύχουμε εξαιρετικές ιδιότητες στην Δυσκαμψία με αποτέλεσμα η Δομή να μην εμφανίζει λυγισμό.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

- Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ – ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ, ΤΑΧΕΙΑ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΜΕΣΗ ΨΗΦΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ, 2017
- Ben Redwood, Filemon Schöffner, Brian Garret, The 3D Printing Handbook: Technologies, Design and Applications, 2017
- Elizabeth Matias, Bharat Rao, 3D Printing: On Its Historical Evolution and the Implications for Business, 2015
- Simone Lantean, A novel approach to fabricate bioinspired programmable composite materials: the 3D Printing way, 2021
- Prateek Kuma Singh, Exploring 3D Printing – Master Thesis, 2020 [1]
- Alberto Cattenone, Analysis and Simulation of Additive manufacturing processes, 2018 [2]
- Yuanyuan Xu, Xiaoyue Wu, Xiao Guo, Bin Kong, The Boom in 3D-Printed Sensor Technology, 2017 [3]
- Julian Kollataj, Additive Manufacturing (3D Printing) - A Potential Future for Tennis Racket Production, 2016 [4]
- Brandon Andrew Phillips, THE DESIGN, FABRICATION, AND APPLICATIONS OF 3D PRINTED CAPACITORS, 2021 [5]
- Bridger T. Irons, Current and Future Applications of 3D Printing Using Custom Made Materials, 2020 [6]
- Barbara Cabrera Agudo, Analysis of additive manufacturing in the aeronautical field, 2018 [7]
- Αλέξανδρος Κάλτση, Τρισδιάστατη εκτύπωση & στρατιωτικές εφαρμογές, 2017

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

- Τι είναι οι 3D εκτυπωτές - 3D printers, 3D EXPERT
- Τα Είδη της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης, DZ TECHS
- Κατηγορίες Τρισδιάστατης Εκτύπωσης, ANIMA
- What are the types of 3D printers and what can they do, HUBS
- The 7 Main Types of 3D Printing Technology, All3DP
- Taking 3D printing to multi-story heights, RENTAL MANAGEMENT

- 3D Βιοεκτυπώσεις ανθρώπινων ιστών & οργάνων: Από την σφαίρα της φαντασίας στη σφαίρα της πραγματικότητας, METROPOLITAN HOSPITAL

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

- George V. Eleftheriades, Keith G. Balmain, Negative-Refraction Metamaterials – Fundamental, Principles and Applications, New Jersey 2005
- Georgios I. Giannopoulos, Stylianos K. Georgantzinou, A Tunable Metamaterial Joint for Mechanical Shock Applications Inspired by Carbon Nanotubes, 2021
- Παναγιώτης Κουτσιανίτη, Σχεδιασμός μικροδομής ευφύων υλικών και κατασκευών με χρήση βελτιστοποίησης, 2020
- Bin-Bin Zheng, Rong-Chang Zhong, Xuan Chen, Ming-Hui Fu, Ling-Ling Hu, A novel metamaterial with tension-torsion coupling effect, 2019
- Liang Wang, Haitao Liu, Mingran An, Compression spin bio-inspired arm: A conceptual model based on compression-torsion cubic mechanical metamaterials with variable cross-section, 2020
- Xiaoyang Zheng, Xiaofeng Guo, Ikumu Watanabe, A mathematically defined 3D auxetic metamaterial with tunable mechanical and conduction properties, 2020
- Mahmoud M. Osman, Mostafa Shazly, Ehab A. El-Danaf, Parastoo Jamshidi, Moataz M. Attallah, Compressive Behavior of Stretched and Composite Microlattice Metamaterial for Energy Absorption Applications, 2019
- Xin Ren, Jianhu Shen, Phuong Tran, Tuan D. Ngo, Yi Min Xie, Design and characterisation of a tuneable 3D buckling-induced auxetic metamaterial, 2017
- Κυττάρη Θεοδώρα, Τρισδιάστατη εκτύπωση (3D) συνθέτων υλικών πολυμερικής μήτρας με έξυπνη σχεδίαση, 2019
- Pengcheng Jiao & Amir H. Alavi, Artificial intelligence-enabled smart mechanical metamaterials: advent and future trends, 2020
- Brahim Lemkalli, Muamer Kadic, Youssef El Badri, Sebastien Guenneau, Abdenbi Bouzid, Younes Achaoui, Mapping of Elastic Properties of Twisting Metamaterials onto Micropolar Continuum using Static Calculations, 2022
- Francesco Di Caprio, Stefania Franchitti, Rosario Borrelli, Costanzo Bellini, Vittorio Di Cocco and Luca Sorrentino, Ti-6Al-4V Octet-Truss

Lattice Structures under Bending Load Conditions: Numerical and Experimental Results, 2022

- Benjamin Eric Jenett, Discrete Mechanical Metamaterials, 2020
- Katia Bertoldi, Vincenzo Vitelli, Johan Christensen and Martin van Hecke, Flexible mechanical metamaterials, 2017
- Mohammad Usman Waheed, Functional Mechanical Metamaterials Development of Programmable Mechanical Structures, 2021

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

- Μεταϋλικά που διαθλούν το φως λίγο διαφορετικά, G-PHYSICS.COM

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

- Ashby Mike / Johnson Kara, Υλικά και σχεδιασμός, 2006
- Τριανταφυλλοπούλου Σταυρούλα, Βιοαποικοδομήσιμα Πολυμερή Υλικά
- Διαμαντάκος Ιωάννης, Σημειώσεις Αντοχής Υλικών, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

- Λύσεις για την πλαστική ρύπανση: ουσία ή ευχολόγια; , GREENPEACE
- Πλαστική ρύπανση: πραγματικές λύσεις ή “ψευδολύσεις”; , GREENPEACE
- Τί σημαίνει βιοδιασπώμενο? , NATURESSE

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

- ΜΠΙΛΛΑΛΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ, ΜΑΡΑΒΕΛΑΚΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ, ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ CAM/CAD ΚΑΙ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ, 2014
- ΤΟΝΙΑ ΠΡΩΤΟΠΑΠΑΔΑΚΗ, Βιοδιάσπαση φιλμ πολυστυρενίου (PS) και πολυαιθυλενίου (PE) μετά από έκθεση σε ακτινοβολία UV, 2019

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

- Patrick Hanratty, ENGINEERING AND ICS HALL OF FAME
- Συστήματα CAD/CAM & Τρισδιάστατη Μοντελοποίηση