ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΓΕΝΙΚΟ ΤΜΗΜΑ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
« ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΓΩΝΙΣΤΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ »

« Master of Science in Design and Manufacturing of Sports Vehicle Systems »

«ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΝΤΟΧΩΝ 3D ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΩΝ ΤΕΜΑΧΙΩΝ ΑΠΟ ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ»

Διπλωματική Εργασία

που υποβλήθηκε στο Γενικό Τμήμα του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών ως μέρος των απαιτήσεων για την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στη Σχεδίαση και Κατασκευή Συστημάτων Αγωνιστικών Οχημάτων από τον

ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ Α. ΚΙΟΣΗΣ

Ψαχνά, 2021

ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΓΕΝΙΚΟ ΤΜΗΜΑ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

« ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΓΩΝΙΣΤΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ »

« Master of Science in Design and Manufacturing of Sports Vehicle Systems »

«ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΝΤΟΧΩΝ 3D ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΩΝ ΤΕΜΑΧΙΩΝ ΑΠΟ ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ »

Διπλωματική Εργασία

που υποβλήθηκε στο Γενικό Τμήμα του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών ως μέρος των απαιτήσεων για την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στη Σχεδίαση και Κατασκευή Συστημάτων Αγωνιστικών Οχημάτων από τον

ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ Α. ΚΙΟΣΗΣ

Δήλωση Αυθεντικότητας, ζητήματα copyright

Ο μεταπτυχιακός φοιτητής που εκπόνησε την παρούσα διπλωματική εργασία φέρει ολόκληρη την ευθύνη προσδιορισμού της δίκαιης χρήσης του υλικού, η οποία ορίζεται στη βάση των εξής παραγόντων: του σκοπού και χαρακτήρα της χρήσης (μη εμπορικός, μη κερδοσκοπικός , αλλά εκπαιδευτικός-ερευνητικός), της φύσης του υλικού που χρησιμοποιεί (τμήμα του κειμένου, πίνακες, σχήματα, εικόνες κ.τ.λ.), του ποσοστού και της σημαντικότητας του τμήματος που χρησιμοποιεί σε σχέση με το όλο κείμενο υπό copyright, και των πιθανών συνεπειών της χρήσης αυτής στην αγορά ή την γενικότερη αξία του υπό copyright κειμένου

(Υπογραφή)

……..

Ψαχνά, 2021

«ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΝΤΟΧΩΝ 3D ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΩΝ ΤΕΜΑΧΙΩΝ ΑΠΟ ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Του
ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ Α. ΚΙΟΣΗΣ

Επιβλέπων Καθηγητής : Δρ. Αγαθοκλής Κριμπένης

« Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εγκρίθηκε ομόφωνα από την τριμελή εξεταστική επιτροπή η οποία ορίστηκε από την Γενική Συνέλευση του Γενικού Τμήματος του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, σύμφωνα με το νόμο και τον εγκεκριμένο οδηγό σπουδών του ΠΜΣ Σχεδίαση και Κατασκευή Συστημάτων Αγωνιστικών Οχημάτων. Τα μέλη της Επιτροπής ήταν ο κ. Αντώνιος Φατσής, ο κ. Αγαθοκλής Κριμπένης και ο κ. Στυλιανός Μαρκολέφας.»

«ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΝΤΟΧΩΝ 3D ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΩΝ ΤΕΜΑΧΙΩΝ ΑΠΟ ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ.»

«Η έγκριση της Διπλωματικής Εργασίας από το Γενικό Τμήμα του ΕΚΠΑ δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα.»
Εξεταστική Επιτροπή Διπλωματικής Εργασίας

(Υπογραφή)	*(Υπογραφή)*	*(Υπογραφή)*
.....	.....	.....
Αντώνιος Φατσής	Αγαθοκλής Κριμπένης	Στυλιανός Μαρκολέφας
Καθηγητής Ε.Κ.Π.Α.	Επίκουρος Καθηγητής Ε.Κ.Π.Α	Επίκουρος Καθηγητής Ε.Κ.Π.Α.

Ψαχνά, 2021

Περίληψη

Η σύγχρονη βιομηχανία σύνθετων υλικών έχει ιστορία μόλις 30 ετών και ξεκίνησε με την παραγωγή σύνθετων υλικών πολυμερούς μήτρας με ενίσχυση ινών γυαλιού (Glass Fiber Reinforced Polymers, GFRP) και ινών άνθρακα (Carbon Fiber Reinforced Polymers, CFRP). Η αυξανόμενη ερευνητική δραστηριότητα στον κλάδο των σύνθετων υλικών έχει δώσει πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα και τα σύνθετα βρίσκουν ολοένα και μεγαλύτερη εφαρμογή στην αεροναυπηγική βιομηχανία και στην αυτοκινητοβιομηχανία. Η ταυτόχρονη ανάπτυξη της νανοτεχνολογίας έχει δώσει νέα προοπτική στη χρήση των σύνθετων υλικών, καθώς τα βελτιωμένα χαρακτηριστικά των νανοδομών μπορούν να αναβαθμίσουν αισθητά τις ήδη σημαντικές μηχανικές ιδιότητες των κλασικών σύνθετων υλικών.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση (3D printing) είναι μια μέθοδος κατασκευής με πρόσθεση υλικού κατά την οποία κατασκευάζονται αντικείμενα μέσω της διαδοχικής πρόσθεσης επάλληλων στρώσεων υλικού. Στη τρισδιάστατη εκτύπωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι τύποι υλικού, κυρίως πολυμερή, μεταλλικά και κεραμικά. Σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες και εξοπλισμό προσθετικής κατασκευής, οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές εξώθησης υλικού είναι συνήθως ταχύτεροι, φθηνότεροι και ευκολότεροι στη χρήση.

Σκοπός της εκπόνησης της πτυχιακής εργασίας είναι η εισαγωγή στην τρισδιάστατη εκτύπωση με την βοήθεια της τεχνολογίας υλικών, με σκοπό την αναζήτηση και δημιουργία μεθόδων εκτύπωσης, που αυξάνουν κυρίως τις μηχανικές αντοχές σε εξαρτήματα που εκτυπώνονται από 3Δ εκτυπωτές.

Λέξεις Κλειδιά

Τρισδιάστατη εκτύπωση (3D printing), Σύνθετα υλικά, Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων

Abstract

The modern composite industry has a history of just 30 years and began with the production of polymer matrix composites with glass fiber reinforcement (Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP)). The growing research activity in the composites industry has yielded many promising results and composites are finding increasing application in the aerospace industry and the automotive industry. The simultaneous development of nanotechnology has given a new perspective to the use of composite materials, as the improved characteristics of nanostructures can significantly upgrade the already important mechanical properties of classic composite materials.

3D printing is a method of additive production technology in which objects are made by the successive addition of overlapping layers of material. Various types of material can be used in 3D printing, mainly polymers, metal and ceramics. Compared to other additive technologies and equipment, material extrusion 3D printers are usually faster, cheaper, and easier to use.

The purpose of the dissertation is to introduce 3D printing with the help of material technology, in order to search and create printing methods, which mainly increase the mechanical strength of components that are printed with 3D printers.

Keywords

3D printing, Composite materials, Finite Element analysis

Ευχαριστίες.

Με την ολοκλήρωση του μεταπτυχιακού, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα μου Επίκουρου Καθηγητή Δρ. Μηχ. Μηχ. Αγαθοκλή Αν. Κριμπένη για την καθοδήγηση του και τον χρόνο που αφιέρωσε, τόσο κατά την επιλογή του θέματος όσο και κα την πραγματοποίηση της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω και το διδακτικό προσωπικό του μεταπτυχιακού προγράμματος ‹‹Σχεδίαση και κατασκευή συστημάτων αγωνιστικών οχημάτων›› για την επιστημονική και επαγγελματική εκπαίδευση, καθώς και τις γνώσεις που μου προσέφεραν κατά την διάρκεια των σπουδών μου. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την πολύτιμη στήριξη και την βοήθεια τους σε όλες τις σπουδές μου.

Πίνακας εικόνων.

Εικόνα 1: Κυπέλλωση αργύρου από τήγμα αργυρούχου. 13
Εικόνα 2: Ξίφος ή λεπίδα ξίφους της ύστερης Εποχής. 15
Εικόνα 1.1: Εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου κυβοκτάεδρου διαμαντιού. 16
Εικόνα 1.2: Νανοδομή φουλερενίου. 17
Εικόνα 1.3: Μικροδομή περλίτη. 17
Εικόνα 1.4: Ίνα ανθρακονήματος διαμέτρου 6 μικρομέτρων. 19
Εικόνα 1.5: Σχηματική απεικόνιση στρωματικού σύνθετο 19
Εικόνα 1.6: Η επαναλαμβανόμενη βασική μονάδα του πολυπροπυλενίου. 19
Εικόνα 1.7: Ταξινόμηση κατασκευαστικών μεθόδων. [3] 21
Εικόνα 2.1: Τρισδιάστατος εκτυπωτής (Maker Bot). 22
Εικόνα 2.2: Εξέλιξη κατασκευής 3Δ αντικειμένου. 23
Εικόνα 2.3: Layer by Layer 3Δ εκτύπωση. 23
Εικόνα 2.4: Μοντέλο από πρόγραμμα CAD (αριστερά), Σάρωση μοντέλου (δεξιά). 23
Εικόνα 2.5: STL αρχείο (αριστερά), Πρόγραμμα CURA (δεξιά). 24
Εικόνα 2.6: Αποκόλληση από πλάκα εκτύπωσης (αριστερά), Απομάκρυνση σκόνης (μέση), Απομάκρυνση από τράπεζα σκόνης (δεξιά). 25
Εικόνα 2.7: Τυπική αφαίρεση υποστήριξης (αριστερά), Αφαίρεση υποστήριξης με διαλύτη (δεξιά). 25
Εικόνα 2.8: Αφαίρεση υποστήριξης (αριστερά), Λείανση αντικειμένου (δεξιά). 25
Εικόνα 2.9: Αντικείμενα πριν την συγκόλληση (αριστερά), Συγκολλημένο αντικείμενο (δεξιά). 26
Εικόνα 2.10: Αστάρωμα αντικειμένων (αριστερά και μέση), Στίλβωση αντικειμένου (δεξιά). 26
Εικόνα 2.11: Αντικείμενο μετά από επιμετάλλωση. 26
Εικόνα 2.12: Αντικείμενα κατά την θερμοσκλήρυνση. 26
Εικόνα 2.13: Charles Hull (αριστερά), SLA-1 (δεξιά). 27
Εικόνα 2.14: Carl Deckard (αριστερά), Διαδικασία SLS (δεξιά). 27
Εικόνα 2.15: Scott Crump (αριστερά), Stratasys FDM (δεξιά). 27
Εικόνα 2.16: Σχέδιο Desktop Factory (αριστερά), Dr. Bowyer με το μοντέλο RepRap (δεξιά). 29
Εικόνα 2.17: 3Δ εκτυπωτής BfB RapMan (αριστερά), 3Δ εκτυπωτής B9Creator (δεξιά). 30
Εικόνα 2.18: Εξώθηση υλικού (αριστερά), Εναπόθεση υλικού (κέντρο), Κατεργασία FDM (δεξιά). 31
Εικόνα 2.19: Βασικά μέρη 3Δ εκτυπωτών SLA. 32
Εικόνα 2.20: Βασικά μέρη 3Δ εκτυπωτών SLS. 32
Εικόνα 2.21: Βασικά μέρη 3Δ εκτυπωτών SLM. 33
Εικόνα 2.22: Βασικά μέρη 3Δ εκτυπωτών DMLS. 33
Εικόνα 2.23: Βασικά μέρη 3Δ εκτυπωτών Material jetting. 33
Εικόνα 2.24: Βασικά μέρη 3Δ εκτυπωτών Material jetting DOD. 34
Εικόνα 2.25: Βασικά μέρη 3Δ εκτυπωτών Bending jetting. 34
Εικόνα 2.26: Μέθοδος με χρήση σκόνης (αριστερά), Μέθοδος με χρήση σύρματος (δεξιά). 35
Εικόνα 2.27: Βασικά μέρη 3Δ εκτυπωτών Sheet lamination. 35
Εικόνα 2.28: Τρισδιάστατος εκτυπωτής τύπου Mendel RepRap στο hackerspace. 36
Εικόνα 2.29: Χρήση 3Δ εκτυπωτών στην αρχιτεκτονική (αριστερά), στην τοπογραφία (δεξιά). 37
Εικόνα 2.30: 3Δ εκτύπωση στο διάστημα. 37
Εικόνα 2.31: Αεροπλάνο από 3Δ εκτύπωση. 38
Εικόνα 2.32: Εκτύπωση καλουπιών (αριστερά), Κυκλωμάτων (μέση), ηλεκτρονικών εξαρτημάτων (δεξιά). 38
Εικόνα 2.33: Εκτύπωση αμαξώματος (αριστερά), εξαρτήματα Formula 1 (μέση), εξαρτήματα οχημάτων (δεξιά). 38
Εικόνα 2.34: Προσθετικά μέλη (αριστερά), Προχειρουργικά μοντέλα (μέση), Καλούπι εμφυτευμάτων (δεξιά). 39
Εικόνα 2.35: Εκτύπωση ιστών για μεταμόσχευση. 39
Εικόνα 2.36: Χρήσεις 3Δ εκτυπώσεων στην εκπαίδευση. 40
Εικόνα 2.37: Χρήση στον μοντελισμό (αριστερά), Εκτύπωση παιχνιδιών (δεξιά). 40

Εικόνα 2.38: Αντίγραφα αγαλμάτων (αριστερά), Χρήση στον κινηματογράφο (μέση), Εκτύπωση κοσμημάτων (δεξιά). **41**
Εικόνα 2.39: TNO (αριστερά), Foodini, Beehex (μέση), ChefJet, Choc Creator (δεξιά). **41**
Εικόνα 2.40: Όπλο από θερμοπλαστικό (αριστερά), Εκτύπωση μερών του M-16 (μέση και δεξιά). **42**
Εικόνα 3.1: Εφελκύστηκες τάσεις. **51**
Εικόνα 3.2: Διαγραμματική παράσταση σ-ε. **52**
Εικόνα 3.3: Σχήμα τυπωμένου δείγματος. **53**
Εικόνα 3.4: Διαστάσεις δοκιμίου εφελκισμού. **54**
Εικόνα 3.5: Σχεδίαση δοκιμίου εφελκυσμού στο Solidworks. **54**
Εικόνα 3.6: Επεξεργασία δοκιμίου στο λογισμικό Cura. **54**
Εικόνα 3.7: Τρόπος εκτύπωσης του δοκιμίου. **55**
Εικόνα 3.8: Εκτυπωτής AW3D AXIOM 3D Printer. **55**
Εικόνα 3.9: Διάταξη Σερβοϋδραυλική μηχανή εφελκυσμού. **57**
Εικόνα 3.10: Εκτυπωμένα δοκίμια πριν την πειραματική διαδικασία. **57**
Εικόνα 3.11: Δοκίμια μετά την πειραματική διαδικασία. **57**
Εικόνα 3.12: Πειραματικά αποτελέσματα σε μορφή γραφήματος. **58**
Εικόνα 3.14: Απεικόνιση κάμψης λόγω ταλάντωσης. **59**
Εικόνα 4.2: Συγκεντρωτικό γράφημα «σ-ε» **77**
Εικόνα 4.3: Εισαγωγή σχεδίου στο SOLIDWORKS. **78**
Εικόνα 4.4: Προσομοίωση πειράματος εφελκυσμού στο SOLIDWORKS. **78**
Εικόνα 4.5: Επιλογή γραμμικής ανάλυσης στο SOLIDWORKS. **79**
Εικόνα 4.6: Εισαγωγή δεδομένων στην βιβλιοθήκη του SOLIDWORKS. **79**
Εικόνα 4.7: Επιλογή παραμέτρων εφελκυσμού στο simulation του SOLIDWORKS. **80**
Εικόνα 4.8: Εισαγωγή πλέγματος στο simulation του SOLIDWORKS. **80**
Εικόνα 4.9: Εξαγωγή αποτελεσμάτων πειράματος εφελκυσμού στο SOLIDWORKS. **81**
Εικόνα 4.10: Προσομοίωση πειράματος κάμψης στο SOLIDWORKS. **82**
Εικόνα 4.11: γραμμικής ανάλυσης στο SOLIDWORKS. **82**
Εικόνα 4.12: Δήλωση παραμέτρων πειράματος κάμψης στο simulation του SOLIDWORKS. **83**
Εικόνα 4.13: Εισαγωγή πλέγματος στο simulation του SOLIDWORKS. **83**
Εικόνα 4.14: Εξαγωγή αποτελεσμάτων πειράματος κάμψης στο SOLIDWORKS. **84**
Εικόνα 5.1: Συγκεντρωτικό γράφημα «σ-ε» **85**

Περιεχόμενα.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ. 8

ΛΙΣΤΑ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ. 12

ΕΙΣΑΓΩΓΗ: ΙΣΤΟΡΙΚΉ ΑΝΑΔΡΟΜΉ. 13

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ, ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΚΑΙ ΤΙΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ. 16

1) ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΥΛΙΚΩΝ. 16
1.1)Βασικές αρχές της επιστήμης των υλικών. 16
1.2) Δομή. 16
1.2.1) Ατομική Δομή. 16
1.2.2) Νανοδομή. 17
1.2.3) Μικροδομή. 17
1.2.4) Μακροδομή. 17
1.2.5) Ιδιότητες. 18
1.3) Υλικά. 18
1.3.1.) Σύνθετα υλικά. 19
1.3.2) Πολυμερή. 19
2) ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ. 20

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΚΑΙ ΕΚΤΥΠΩΤΕΣ. 22

2.1) Εισαγωγή. 22
2.1.1)Τι είναι 3d εκτύπωση. 22
2.1.1.1)Βασικές θεμελιώδεις αρχές. 23
2.1.2) Ιστορική αναδρομή των 3d εκτυπωτών. 26
2.1.3) Πως δουλεύει ένας 3Δ εκτυπωτής. 30
2.1.3.1) Κατηγορίες κατεργασιών πρόσθεσης ή προσθήκης υλικού. 31
2.1.4) Χρήση 3Δ εκτυπωτών. 36

2.2) ΥΛΙΚΑ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ. 42

2.2.1) ΓΕΝΙΚΗΣ ΧΡΗΣΗΣ. 43
2.2.2) ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ. 44
2.2.3) ΑΙΣΘΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ. 45
2.2.4)ΕΙΔΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ. 46
2.2.5) ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ABS. 46

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ-ΚΑΜΨΗΣ. 51

3.1) Πείραμα εφελκυσμού “Ultimate Tensile Strength”. 51
3.1.1) Εισαγωγή. 51
3.1.1.1) Κεντρικός εφελκυσμός. 52
3.1.1.2) Έκκεντρος εφελκυσμός. 52
3.1.2) Παρουσίαση πειράματος εφελκυσμού. 53
3.1.2.1) ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ. 53
3.1.2.2) ΥΛΙΚΑ. 55
3.1.2.3) ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΚΕΥΩΝ 55
3.1.2.3.1) Συσκευή εκτύπωσης 55
3.1.2.3.2) Μηχανή εφελκυσμού. 57
3.1.2.4) ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ. 57
3.1.3) Παρουσίαση αποτελεσμάτων. 58

3.2) ΠΕΙΡΑΜΑ ΚΑΜΨΗΣ (BENDING) 59

3.2.1) ΕΙΣΑΓΩΓΗ 59
3.2.2) Παρουσίαση πειράματος κάμψης. 62
3.2.2.1) ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ 62
3.2.2.2) ΥΛΙΚΑ. 63
3.2.2.3) ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΚΕΥΩΝ 63
3.2.2.4) ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ. 64
3.2.3) Παρουσίαση αποτελεσμάτων. 65
4.1) Εισαγωγή. 66
4.2) Πρόγραμμα SOLIDWORKS. 67
4.2.1) Γενικά 67
4.2.2) Ιστορία. 67
4.2.4) Μορφή αρχείου. 68
4.2.5) SOLIDWORKS Simulation (FEA). 68
4.2.5.1) ΣΚΟΠΟΣ. 68
4.2.5.2) ΟΦΕΛΗ. 69
4.2.5.3) ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ 69
4.2.5.4) Υποστήριξη σχεδιασμού SOLIDWORKS. 69
4.2.5.5) Αποτελέσματα και επεξεργασία μετά. 69
4.2.5.6) Γενική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. 70
4.2.5.7) Τύποι ανάλυσης. 70
4.2.5.8) Όροι επικοινωνίας 70
4.2.5.9) Συνδετήρες 70
4.2.5.10) Φορτία και όρια 70
4.3)Παρουσίαση προσομοίωσης πειράματος εφελκυσμού και κάμψης. 70
4.3.1) Γενικά. 70
4.3.2) Προσομοίωση εφελκυσμού 71
4.3.3) Προσομοίωση κάμψης. 81
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ. 85
5.1) Εισαγωγή. 85
5.2)Παρουσίαση αποτελεσμάτων. 86
5.2.1) Υλικά 3Δ εκτύπωσης. 86
5.2.2) Αποτελέσματα από πειράματα. 86
5.2.3) Αποτελέσματα από προσομοίωση πειραμάτων. 87
5.2.3.1) Προσομοίωση εφελκυσμού 87
5.2.3.2) Προσομοίωση κάμψης 91
5.3) Συμπεράσματα. 94
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΊΑ 95
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ 97

Λίστα συντομογραφιών.

FDM	Fused Deposition Modeling
ABS	Acrylonitrile , Butadiene, Styrene
PLA	Polylactic Acid
PC	Polycarbonate
SLA	Stereolithography
SLS	Selective Laser Sintering
PVC	Polyvinyl Chloride
SEM	Scanning Electron Microscopy
FEM	Finite Element Method
CAD	Computer-Aided Design

Εισαγωγή: Ιστορική αναδρομή.

Οι διάφορες ιστορικές περίοδοι συχνά χωρίζονται με βάση το κύριο υλικό που τις χαρακτηρίζει. Για παράδειγμα λέμε Λίθινη Εποχή, Εποχή του Χαλκού, Εποχή του Σιδήρου, και Εποχή του ατσαλιού. Ξεκινώντας από την κατασκευή κεραμικών και την επακόλουθη ανάπτυξη της μεταλλουργίας, η επιστήμη των υλικών μπορεί να θεωρηθεί ως μια από τις αρχικές μορφές της μηχανικής και της εφαρμοσμένης επιστήμης. Η σύγχρονη επιστήμη των υλικών εξελίχθηκε από την Μεταλλουργία, που είναι εξέλιξη της εξόρυξης και πιθανόν της κεραμικής και της χρήσης της φωτιάς. [1]

Η ιστορία της μεταλλουργίας είναι άμεσα συνδεδεμένη με την εξέλιξη του ανθρώπου και την μετάβαση του από την προϊστορία στην ιστορία. Τα πρώτα μεταλλικά αντικείμενα κατασκευάστηκαν από αυτούσια εξορυσσόμενα μέταλλα, όπως από χρυσό (Αίγυπτος, Μεσοποταμία), από χαλκό (Περσία, Μεσοποταμία, Αίγυπτος) και από λευκόχρυσο (Αίγυπτος, Ίνκας), ή από σίδηρο που οι άνθρωποι έβρισκαν μόνον σε μετεωρίτες (Εσκιμώοι της Γροιλανδίας). Έτσι, περίπου 5000 χρόνια π.Χ., ο άνθρωπος πέρασε από την Εποχή του Λίθου στην Εποχή του Χαλκού. Η μετάβαση αυτή δεν έγινε παντού την ίδια εποχή. Στην συνέχεια ο άνθρωπος έμαθε να κατεργάζεται μίγματα από ορυκτά διαφόρων μετάλλων με αποτέλεσμα να ανακαλύψει τα κράματα του χαλκού (κρατέρωμα ή μπρούντζος: κράμα χαλκού – κασσίτερου). Οι κάτοικοι της Μεσογείου και της Κεντρικής Ευρώπης ανακάλυψαν πώς να λιώνουν σιδηρομετάλλευμα σε μικρές καμίνους για να παράγουν πορώδη σίδηρο σε στερεή κατάσταση, από τον οποίο παρήγαγαν στην συνέχεια χάλυβα. Οι Ινδοί, οι Κινέζοι και οι Ιάπωνες γνώριζαν επίσης από τα αρχαία χρόνια πώς να παράγουν αντικείμενα από σίδηρο. Οι Ρωμαίοι γνώριζαν πώς να παράγουν ορείχαλκο (κράμα χαλκού – ψευδάργυρου), αλλά πρώτοι οι Ινδοί παρήγαγαν ψευδάργυρο σε καθαρή μορφή τον 14^{ο} αιώνα μ.Χ.. [2]

Η γνώση της μεταλλουργίας επέτρεψε σε ορισμένους λαούς να επεκτείνουν την ισχύ τους και να επιβληθούν σε άλλους λαούς. Για παράδειγμα τον 9^{ο} αιώνα π.Χ. οι Δωριείς, που γνώριζαν πώς να φτιάχνουν όπλα και άλλα αντικείμενα από σίδηρο, κατάφεραν να επιβληθούν στους Αχαιούς και τις άλλες Ελληνικές φυλές, οι οποίες είχαν όπλα λιγότερο ανθεκτικά φτιαγμένα από χαλκό, και έτσι η Ελληνική χερσόνησος πέρασε στην Εποχή του Σιδήρου. [2]

Η γνώση της μεταλλουργίας έδωσε επίσης την δυνατότητα στον άνθρωπο να δημιουργήσει το χρήμα, δηλαδή μεταλλικά αντικείμενα τα οποία αντιπροσώπευαν μια συγκεκριμένη αξία. Οι Αθηναίοι με τον άργυρο που παρήγαγαν από τα μεταλλεία του Λαυρίου, μπόρεσαν να χρηματοδοτήσουν την ναυπήγηση τριήρων και να δημιουργήσουν την Αθηναϊκή Κοινοπολιτεία τον 5^{ο} αιώνα π.Χ.. Παρομοίως, οι Μακεδόνες στηρίχθηκαν στον χρυσό του Παγγαίου για να χρηματοδοτήσουν την ανάπτυξη της αυτοκρατορίας του Μέγα Αλέξανδρου, ενώ οι Ρωμαίοι στηρίχθηκαν εν μέρει στον άργυρο των μεταλλείων της Ισπανίας για να κοσμήσουν την Ρώμη (βλ. εικόνα 0.1). [2]

Εικόνα 1: Κυπέλλωση αργύρου από τήγμα αργυρούχου.

Η εκτεταμένη γνώση της μεταλλουργίας επέτρεψε στους Ευρωπαίους να καταλάβουν και να αποικήσουν τις χώρες που ανακάλυψαν τον 15^{ο} και 16^{ο} αιώνα μ.Χ.. Η ανακάλυψη του

μεταλλουργικού άνθρακα και της ατμομηχανής έδωσε νέα ώθηση στην μεταλλουργία του σιδήρου κατά τον 18^{ο} αιώνα. Προς τα τέλη του 18^{ου} αιώνα, εμφανίστηκαν στην Αγγλία και οι πρώτες ατμοκίνητες μονάδες έλασης χάλυβα. Οι παλαιές μέθοδοι άμεσης αναγωγής σιδηρομεταλλευμάτων αντικαταστάθηκαν κατά τον 19^{ο} αιώνα από την πολύ πιο παραγωγική υψικάμινο, τους μεταλλάκτες (μεγάλους κάδους όπου ο τηγμένος χυτοσίδηρος μεταβάλλεται σε χάλυβα με την εμφύσηση αέρα ή οξυγόνου) και τις καμίνους ανοικτής εστίας (κάμινος Siemens – Martin). [2]

Μια σημαντική εξέλιξη στην κατανόηση των υλικών έγινε στο τέλος του 19^{ου} αιώνα, όπου ο Αμερικανός επιστήμονας Τζοσάια Γουίλαρντ Γκιμπς έδειξε την σύνδεση μεταξύ των φυσικών ιδιοτήτων ενός υλικού, των Θερμοδυναμικών ιδιοτήτων και της ατομικής δομής. Οι σημαντικές εξελίξεις στην σύγχρονη επιστήμη των υλικών αφορούν την κατανόηση και Παρασκευή μεταλλικών κραμάτων, του πυριτίου και του άνθρακα. Η επιστήμη των υλικών έχει επίσης προωθηθεί, από την ανάπτυξη τεχνολογιών όπως τα πλαστικά, οι ημιαγωγοί και τα βιοϋλικά. [1]

Στα τέλη του 19^{ου} αιώνα έκαναν την εμφάνιση τους και υδρο-μεταλλουργικές μέθοδοι παραγωγής μη σιδηρούχων μετάλλων. Η εκχύλιση (διαλυτοποίηση) σε κυανιούχα υδατικά διαλύματα επέτρεψε την εκμετάλλευση πτωχών μεταλλευμάτων χρυσού. Η εκχύλιση βωξίτη σε διαλύματα καυστικού νατρίου επέτρεψε την φθηνή παραγωγή αλουμίνας (Al_2O_3), και με την ηλεκτρόλυση τήγματος αλουμίνας και κρυόλιθου (Na_3AlF_6) έγινε δυνατή η παραγωγή φθηνού μεταλλικού αλουμινίου, το οποίο μέχρι τότε θεωρούνταν πολύτιμο μέταλλο. Η μέθοδος της οξειδωτικής φρύξης σφαλερίτη (ZnS) και η εκχύλιση του φρύγματος (ZnO) σε θειικό οξύ επέτρεψε την φθηνή παραγωγή ψευδάργυρου. Επίσης, προς τα τέλη του 19^{ου} αιώνα, νέες μέθοδοι κατεργασίας των μετάλλων, όπως η διέλαση σωλήνων από χάλυβα χωρίς ραφή (αδελφοί Rienhard και Max Mannessman, Γερμανία, 1886), έφεραν επανάσταση στην μεταλλοτεχνία. Η μεταλλογνωσία καθιερώθηκε ως ιδιαίτερος επιστημονικός κλάδος (ο όρος «φυσική μεταλλουργία» εμφανίστηκε το 1914). Κράματα ήδη υπάρχοντα εκείνον τον καιρό, όπως ο χάλυβας (κράμα σιδήρου – άνθρακα), μελετήθηκαν και ταξινομήθηκαν συστηματικά με την βοήθεια του μικροσκοπίου και των ακτινών Χ (1912). Νέα κράματα, όπως το ντουραλουμίνιο (1906), ο ανοξείδωτος χάλυβας (1909-1912), κ.α., δημιουργήθηκαν για να καλύψουν νέες καταναλωτικές ή τεχνολογικές ανάγκες. [2]

Μετά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, η ζήτηση μεταλλουργικών προϊόντων παρουσίασε έντονη αύξηση. Ταυτοχρόνως αυξήθηκαν οι απαιτήσεις του καταναλωτικού κοινού για προϊόντα ποιότητας παρασκευασμένα με μεθόδους που να καταναλώνουν μικρή ποσότητα ενέργειας και να είναι «φιλικές προς το περιβάλλον». Για παράδειγμα, στις χαλυβουργίες, οι κάμινοι Siemens-Martin αντικαταστάθηκαν από τους μεταλλάκτες εμφύσησης καθαρού οξυγόνου (μεταλλάκτες LD, BOP, AOD), ενώ στις μονάδες κατεργασίας θειούχων μεταλλευμάτων ψευδαργύρου, οι περιστροφικοί κάμινοι φρύξης αντικαταστάθηκαν από κάμινους ρευστοστερεής κλίνης. Οι κάμινοι ακαριαίας τήξης αντικατέστησαν τους μεταλλάκτες Pierce-Smith στην παραγωγή αργού νικελίου και αργού χαλκού. Και ο τομέας της μεταλλογνωσίας παρουσίασε σημαντικές προόδους κατά τον 20ο αι., κυρίως εξαιτίας της προόδου στον τομέα της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας. Νέες θεωρίες, όπως αυτή των κρυσταλλικών ατελειών ή ελαττωμάτων, επέτρεψαν στους μεταλλογνώστες να εξηγήσουν πολλές ιδιότητες των μετάλλων και των κραμάτων, αλλά και να σχεδιάσουν νέα κράματα βελτιωμένων ιδιοτήτων. [2]

Εικόνα 2: Ξίφος ή λεπίδα ξίφους της ύστερης Εποχής.

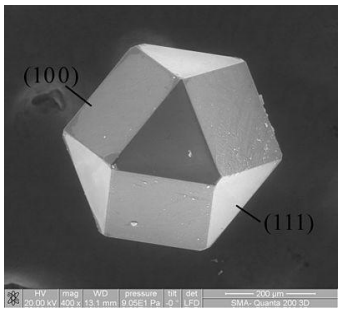
Πριν την δεκαετία του 1960 (αλλά και σε μερικές περιπτώσεις μερικές δεκαετίες αργότερα), πολλά πανεπιστημιακά τμήματα επιστήμης υλικών ονομάζονταν τμήματα μεταλλουργίας δίνοντας την έμφαση που δινόταν τον 19^{ο} και τον 20^{ο} αιώνα στα μέταλλα. Στις Ηνωμένες Πολιτείες η επιστήμη των υλικών αναπτύχθηκε έντονα στις αρχές της δεκαετίας του 1960 μέσω του Οργανισμού Προωθημένων Ερευνητικών Έργων που χρηματοδότησε μια σειρά πανεπιστημιακών εργαστηρίων με σκοπό «την επέκταση του εθνικού προγράμματος βασικής έρευνας και εκπαίδευσης στις επιστήμες των υλικών». Το πεδίο έχει από τότε επεκταθεί για να συμπεριλάβει όλες τις κατηγορίες υλικών συμπεριλαμβάνοντας τα κεραμικά υλικά, τα πολυμερή, τους ημιαγωγούς και τα μαγνητικά, τα υλικά ιατρικών επιθεμάτων καθώς και τα βιοϋλικά και τα νανοϋλικά. [1]

Κεφάλαιο 1:Εισαγωγή στις βασικές αρχές της επιστήμης των υλικών, στις κατασκευαστικές μεθόδους και τις τεχνολογίες.

1) Επιστήμη υλικών.

1.1)Βασικές αρχές της επιστήμης των υλικών.

Ως υλικό ορίζουμε μια ουσία (συνήθως στερεή) που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Υπάρχουν αμέτρητα υλικά γύρω μας, μπορούμε να τα βρούμε παντού από τα κτήρια έως σε ένα διαστημόπλοιο. Τα υλικά χωρίζονται γενικά σε δύο κατηγορίες τα κρυσταλλικά (βλ. εικόνα 1.1) και τα άμορφα. Τυπικά παραδείγματα υλικών είναι τα μέταλλα, οι ημιαγωγοί, τα κεραμικά και τα πολυμερή. Τα σύγχρονα προηγμένα υλικά συμπεριλαμβάνουν τα Νανοϋλικά και τα βιοϋλικά κτλ. Μια από τις βασικές αρχές της επιστήμης των υλικών είναι η μελέτη της δομής των υλικών και η σχέση της με τις ιδιότητες τους. Από την στιγμή που ένας επιστήμονας των υλικών γνωρίζει αυτό τον συσχετισμό δομής-ιδιοτήτων μπορεί να μελετήσει/σχεδιάσει την απόδοση του σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Καθοριστική παράμετρος για την δομή ενός υλικού και κατά συνέπεια για τις ιδιότητες του είναι τα χημικά συστατικά του και η επεξεργασία που έχει υποστεί για να φτάσει στην τελική του μορφή. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά σε συνδυασμό με τους βασικούς νόμους της θερμοδυναμικής και της φυσικής, καθορίζουν την μικροδομή ενός υλικού και κατά συνέπεια τις ιδιότητες του. [1]



Εικόνα 1.1: Εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου κυβοκτάεδρου διαμαντιού.

1.2) Δομή.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η δομή είναι ένα από τα βασικά συστατικά του πεδίου της επιστήμης των υλικών. Η επιστήμη των υλικών μελετά την δομή των υλικών από το ατομικό επίπεδο έως τις μακροσκοπικές διαστάσεις. Ο χαρακτηρισμός είναι η μεθοδολογία με την οποία οι επιστήμες των υλικών μελετούν την δομή ενός υλικού. Αυτό συμπεριλαμβάνει τεχνικές όπως η περίθλαση με ακτίνες Χ, ηλεκτρόνια ή νετρόνια και διάφορες μορφές φασματοσκοπίας και χημικής ανάλυσης ως φασματοσκοπία Ράμαν, φασματοσκοπία ακτίνων Χ (EDS), χρωματογραφία, θερμική ανάλυση, ηλεκτρονική μικροσκοπία κ.τ.λ. η δομή μελετάται σε διάφορα επίπεδα, όπως αναφέρεται αναλυτικά παρακάτω. [1]

1.2.1) Ατομική Δομή.

Αυτή αφορά τα άτομα από τα οποία αποτελούνται τα υλικά και το πώς διατάσσονται για να σχηματίσουν μόρια, κρυστάλλους κτλ. Οι περισσότερες ηλεκτρικές, μαγνητικές και χημικές ιδιότητες των υλικών προκύπτουν από αυτό το επίπεδο της δομής. Η κλίμακα μεγέθους είναι στην περιοχή των Άνγκστρομ. Ο τρόπος με τον οποίο τα άτομα και τα μόρια διατάσσονται στον χώρο και δημιουργούν δεσμούς είναι θεμελιώδες για την μελέτη των ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς των υλικών. [1]

1.2.2) Νανοδομή.

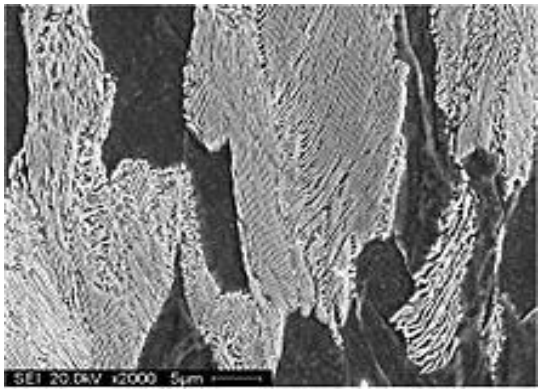
Οι νανοδομές (βλ. εικόνα 1.2) αναφέρονται σε αντικείμενα και δομές που οι διαστάσεις του κυμαίνονται από 1 έως 100 νανόμετρα. Σε πολλά υλικά τα άτομα ή τα μόρια συνενώνονται σχηματίζοντας αντικείμενα στην κλίμακα των νανομέτρων. Αυτό οδηγεί σε ενδιαφέρουσες ηλεκτρικές, μαγνητικές, οπτικές και μηχανικές ιδιότητες.

Εικόνα 1.2: Νανοδομή φουλερενίου.

Στην περιγραφή των νανοδομών είναι καλό να γίνει διάκριση μεταξύ του αριθμού των διαστάσεων στην νανοκλίμακα. Οι νανοδομημένες επιφάνειες έχουν **μία διάσταση** στην νανοκλίμακα, δηλαδή μόνο το πάχος της επιφάνειας ενός αντικειμένου είναι από 1 - 100 νανόμετρα. Οι νανοσωλήνες έχουν **δύο διαστάσεις** στην νανοκλίμακα, δηλαδή η διάμετρος και το πάχος του νανοσωλήνα είναι από 1 - 100 νανόμετρα ενώ το μήκος του μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερο. Τέλος τα νανοσωματίδια έχουν **τρείς διαστάσεις** στην νανοκλίμακα, δηλαδή το σωματίδιο είναι από 1 - 100 νανόμετρα σε κάθε διάσταση. Τα υλικά των οποίων τα άτομα ή μόρια σχηματίζουν συστατικά στην νανοκλίμακα ονομάζονται Νανοϋλικά. Τα Νανοϋλικά αποτελούν κρίσιμο αντικείμενο έρευνας της επιστήμης των υλικών λόγω των μοναδικών ιδιοτήτων που παρουσιάζουν. [1]

1.2.3) Μικροδομή.

Η μικροδομή ενός υλικού (βλ. εικόνα 1.3) μπορεί να επηρεάσει ισχυρά τις φυσικές του ιδιότητες, όπως η μηχανική αντοχή, η δυσκολία σε θραύση, η ολκιμότητα, η σκληρότητα, η αντίσταση στην διάβρωση, οι θερμικές ιδιότητες, η αντίσταση στην φθορά κ.τ.λ. Τα περισσότερα παραδοσιακά υλικά, όπως τα μέταλλα και τα κεραμικά έχουν μικροδομή. αναφέρεται σε αντικείμενα ή δομές που οι διαστάσεις τους κυμαίνονται από 0.1 έως 1000 μικρόμετρα. Συχνά η μικροδομή ενός υλικού μπορεί να παρατηρηθεί με την χρήση ενός μικροσκοπίου. [1]



Εικόνα 1.3: Μικροδομή περλίτη.

1.2.4) Μακροδομή.

Η μακροδομή αναφέρεται στην αντικείμενα ή δομές που οι διαστάσεις τους είναι μεγαλύτερες από 1 χιλιοστό. Η μακροδομή μπορεί να παρατηρηθεί με γυμνό οφθαλμό. [1]

1.2.5) Ιδιότητες.

Όλα τα υλικά κατά τη χρήση τους εκτίθενται σε εξωτερικά ερεθίσματα τα οποία προκαλούν κάποιου είδους απόκριση. Η ιδιότητα είναι ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα του υλικού, που εκφράζει το είδος και το μέγεθος της απόκρισής του σε κάποιο συγκεκριμένο ερέθισμα. Οι ιδιότητες ενός υλικού καθορίζουν την χρησιμότητα του και επομένως το πεδίο εφαρμογών που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Γενικά οι ορισμοί των ιδιοτήτων δίνονται ανεξάρτητα από το σχήμα και το μέγεθος του υλικού. Ουσιαστικά όλες οι σημαντικές ιδιότητες των στερεών υλικών μπορούν να ομαδοποιηθούν σε έξι διαφορετικές κατηγορίες: μηχανικές, ηλεκτρικές, θερμικές, μαγνητικές, οπτικές και ιδιότητες φθοράς. Για κάθε μία υπάρχει ένα διαφορετικό είδος ερεθίσματος ικανό να προκαλέσει διαφορετικές αποκρίσεις. [1]

- Μηχανικές Ιδιότητες

Οι μηχανικές ιδιότητες συσχετίζουν την παραμόρφωση με ένα ασκούμενο φορτίο ή δύναμη. Σαν παραδείγματα αναφέρονται το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή.

- Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Στις ηλεκτρικές ιδιότητες, όπως είναι η ηλεκτρική ειδική αγωγιμότητα και η διηλεκτρική σταθερά, το ερέθισμα είναι ένα ηλεκτρικό πεδίο.

- Θερμικές Ιδιότητες

Η θερμική συμπεριφορά των στερεών μπορεί να παρουσιαστεί βάσει
της θερμοχωρητικότητας και της ειδικής θερμικής αγωγιμότητας.

- Μαγνητικές Ιδιότητες

Οι μαγνητικές ιδιότητες δείχνουν την απόκριση ενός υλικού στην εφαρμογή μαγνητικού πεδίου.

- Οπτικές Ιδιότητες

Για τις οπτικές ιδιότητες, το ερέθισμα είναι η ηλεκτρομαγνητική (ή φωτεινή) ακτινοβολία. Ο δείκτης διάθλασης και η ανακλαστικότητα είναι αντιπροσωπευτικές οπτικές ιδιότητες.

- Χημικές Ιδιότητες

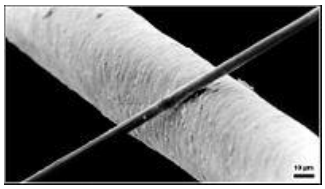
Τέλος, τα χαρακτηριστικά της χημικής υποβάθμισης υποδηλώνουν τη χημική δραστικότητα των υλικών ή το πώς το χημικό περιβάλλον στο οποίο το υλικό εκτίθεται προκαλεί την μεταβολή των χαρακτηριστικών του.

1.3) Υλικά.

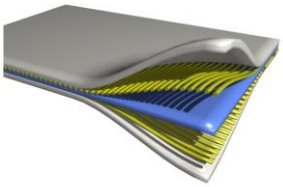
Τα περισσότερα υλικά μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες, τα μέταλλα, τα κεραμικά και τα πολυμερή (πλαστικά). Μεταξύ των κατηγοριών υπάρχουν βασικές διαφορές στη δομή και τις ιδιότητες των υλικών (φυσικές, μηχανικές, χημικές), οι οποίες καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη μέθοδο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία/κατεργασία τους. Μια τέταρτη κατηγορία υλικών είναι τα σύνθετα (composites), τα οποία αποτελούν συνδυασμό δύο τουλάχιστον υλικών από διαφορετικές κατηγορίες (π.χ. σύνθετα από πολυμερές και κεραμικά) και τα οποία έχουν αρκετά διαφορετικές ιδιότητες και από τα δύο βασικά συστατικά του.

Η επιστήμη των υλικών συγκεντρώνει έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον. Εκτός από τα πανεπιστημιακά τμήματα που το αντικείμενο τους είναι καθαρά η επιστήμη των υλικών, πολλά πανεπιστημιακά τμήματα που το αντικείμενο τους κυμαίνεται από την φυσική έως την χημεία και χημική μηχανική ή και την βιολογία ασχολούνται ερευνητικά με θέματα της επιστήμης των υλικών. Η έρευνα στην επιστήμη των υλικών είναι επομένως ραγδαία αναπτυσσόμενη και διεξάγεται από πολλά και διαφορετικά πεδία. Η παρακάτω λίστα, που δεν είναι σε καμιά περίπτωση πλήρης, δίνει μια εικόνα παρουσιάζοντας τους κύριους τομείς έρευνας.

1.3.1.) Σύνθετα υλικά.



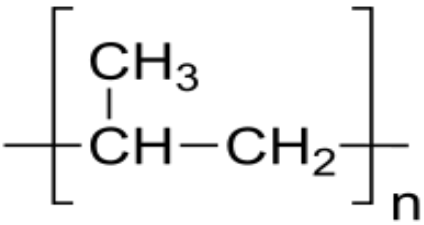
Εικόνα 1.4: Ίνα ανθρακονήματος διαμέτρου 6 μικρομέτρων.



Εικόνα 1.5: Σχηματική απεικόνιση στρωματικού σύνθετο

Οι ίνες (βλ. εικόνα 1.4) χρησιμοποιούνται συχνά για την μηχανική ενίσχυση των σύνθετων υλικών. Μια ακόμη εφαρμογή της επιστήμης των υλικών στην βιομηχανία είναι η παρασκευή σύνθετων υλικών. Τα σύνθετα υλικά είναι υλικά που αποτελούνται από δύο ή παραπάνω μακροσκοπικές φάσεις (βλ. εικόνα 1.5). Οι εφαρμογές τους κυμαίνονται από δομικά υλικά όπως το οπλισμένο σκυρόδεμα, έως και θερμομονωτικά πλακίδια που παίζουν σημαντικό ρόλο στις διαστημικές αποστολές (βλ. σύστημα θερμικής προστασίας του διαστημικού λεωφορείου. Ένα παράδειγμα είναι ο ενισχυμένος άνθρακας-άνθρακας (RCC) , ένα γκρίζο στην εμφάνιση υλικό, που μπορεί να αντέξει σε υψηλές θερμοκρασίες (1510 °C) και προστατεύει το διαστημικό λεωφορείο κατά την επανεισόδο του στην ατμόσφαιρα. Το σύνθετο αυτό πολυστρωματικό υλικό κατασκευάζεται από γραφίτη και τεχνητό μετάξι και εμποτίζεται με φαινολική ρητίνη. Μετά την σκλήρυνση σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση, το πολυστρωματικό υλικό πυρολύεται για την απανθράκωση της ρητίνης, εμποτισμένης με αλκοόλη σε θάλαμο κενού και στην συνέχεια πυρολύεται/σκληραίνεται για την μετατροπή της αλκοόλης σε άνθρακα. Για την προστασία από την οξείδωση, έτσι ώστε να μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί, τα εξωτερικά στρώματα του υλικού μετατρέπονται σε καρβίδιο του πυριτίου. Άλλα παραδείγματα είναι τα "πλαστικά" περιβλήματα των τηλεοπτικών συσκευών, κινητών τηλεφώνων κ.τ.λ. Αυτά τα πλαστικά περιβλήματα είναι συνήθως σύνθετα υλικά που αποτελούνται από μια θερμοπλαστική μήτρα όπως το Ακρυλονιτρίλιο-Βουταδιένιο-Στυρένιο (ABS) στο οποίο προστίθεται ανθρακικό ασβέστιο, τάλκης, ίνες γυαλιού ή ανθρακονήματα για αύξηση της αντοχής του όγκου ή της ηλεκτροστατικής διασποράς. [1]

1.3.2) Πολυμερή.



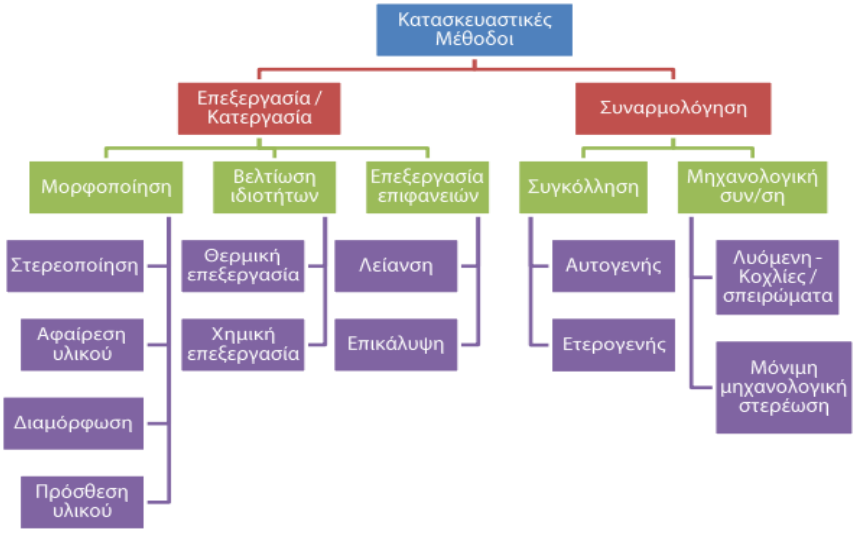
Εικόνα 1.6: Η επαναλαμβανόμενη βασική μονάδα του πολυπροπυλενίου.

Τα πολυμερή αποτελούν ένα σημαντικό κομμάτι της επιστήμης και τεχνολογίας υλικών. Τα πολυμερή είναι οι πρώτες ύλες (οι ρητίνες) από τις οποίες κατασκευάζονται τα υλικά που ονομάζουμε πλαστικά. Τα πλαστικά είναι το τελικό προϊόν, που δημιουργείται αφού ένα ή περισσότερα πολυμερή

προστεθούν σε μια ρητίνη κατά την επεξεργασία, η οποία στην συνέχεια διαμορφώνεται στην τελική της μορφή. Κοινά πολυμερή είναι το πολυαιθυλένιο (PE), το πολυπροπυλένιο (βλ. εικόνα 1.6), το Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC), το Πολυστυρένιο, το νάιλον, ο πολυεστέρας, τα ακρυλικά, οι πολυουρεθάνες και τα πολυκαρβονικά. Τα πλαστικά γενικά κατηγοριοποιούνται ως "εμπορικά", "ειδικής χρήσης" and "μηχανικά". Το PVC (Πολυβινυλοχλωρίδιο) χρησιμοποιείται ευρύτατα, είναι φτηνό, και παρασκευάζεται σε μεγάλες ποσότητες. Το συναντάμε σε μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών όπως το συνθετικό δέρμα, ως μονωτή στα ηλεκτρικά καλώδια, καθώς και στα δοχεία συσκευασίας και αποθήκευσης τροφίμων. Η κατασκευή και η επεξεργασία του είναι απλή και καλά εδραιωμένη. Η ευελιξία του PVC οφείλεται στην ευρεία γκάμα των πλαστικοποιητών και άλλων πρόσθετων που δέχεται. Ο όρος «πρόσθετα» στην επιστήμη των πολυμερών αναφέρεται στις χημικές ουσίες και ενώσεις προστίθενται στη βάση του πολυμερούς να τροποποιήσει τις ιδιότητες του υλικού. Τα πολυκαρβονικά συνήθως χρησιμοποιούνται ως δομικά πλαστικά εξαιτίας της υψηλής αντοχής τους και των ιδιαίτερων ιδιοτήτων τους. Δεν χρησιμοποιούνται ως αναλώσιμα σε αντίθεση με τα εμπορικά πλαστικά. Τα πλαστικά ειδικής χρήσης είναι υλικά με μοναδικά χαρακτηριστικά, όπως η υπέρ-υψηλή αντοχή, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, ο ηλεκτροφθορισμός, η υψηλή θερμική σταθερότητα κ.τ.λ. Οι διαχωριστικές γραμμές μεταξύ των διάφορων τύπων πλαστικού δεν βασίζονται στο υλικό αλλά στις ιδιότητες και στις εφαρμογές τους. Για παράδειγμα το πολυαιθυλένιο (PE) είναι ένα φτηνό, χαμηλής τριβής πολυμερές που χρησιμοποιείται για να κατασκευαστούν αναλώσιμες σακούλες και σακούλες σκουπιδιών και θεωρείται εμπορικό πλαστικό, ενώ το μεσαίας πυκνότητας πολυαιθυλένιο (MDPE) χρησιμοποιείται για την κατασκευή υπόγειων σωλήνων για φυσικό αέριο και νερό και το υπέρ-υψηλού μοριακού βάρους πολυαιθυλένιο (UHMWPE) είναι ένα δομικό πλαστικό που χρησιμοποιείται ευρέως στις ράγες ολίσθησης σε βιομηχανικό εξοπλισμό και στις υποδοχές χαμηλής τριβής σε εμφυτευμένες αρθρώσεις ισχίου. [1]

2) Κατασκευαστικές μέθοδοι.

Όπως προαναφέραμε στον κατασκευαστικό κλάδο της οικονομίας (μεταποίηση) παράγονται προϊόντα μέσω μετατροπής και σύνδεσης υλικών προερχόμενων κυρίως από τον πρωτογενή τομέα αλλά και εξαρτημάτων/προϊόντων άλλων μονάδων του δευτερογενή τομέα. Για την μεταποίηση των διάφορων υλικών έχουν αναπτυχθεί από τις απαρχές της ανθρώπινης δραστηριότητας διάφορες τεχνικές και μέθοδοι, οι οποίες περιγράφονται συνήθως με τον όρο κατασκευαστικές μέθοδοι ή τεχνικές (manufacturing processes). Η επεξεργασία των υλικών επιτελείται με την ελεγχόμενη εφαρμογή ενέργειας (θερμικής, μηχανικής, ηλεκτρικής και χημικής) και τη χρήση μηχανών ή εργαλείων. Η επεξεργασία απαιτεί σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό και την ανάλωση ανθρώπινης ενέργειας, είτε για τον χειρισμό, έλεγχο ή/και την επίβλεψη του σχετικού εξοπλισμού ή για την διαχείριση των υλικών (φόρτωση/εκφόρτωση). Οι κατασκευαστικές μέθοδοι μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες: στις μεθόδους κατεργασίας/επεξεργασίας (processing operations) και σε αυτές της συναρμολόγησης (assembly operations) (βλ. εικόνα 1.7).



Εικόνα 1.7: Ταξινόμηση κατασκευαστικών μεθόδων. [3]

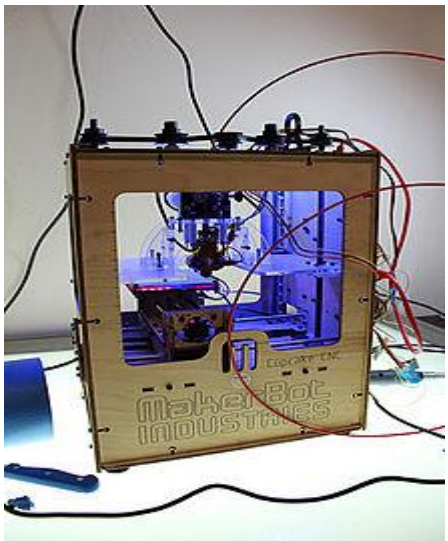
Εφαρμόζοντας μια τεχνική επεξεργασίας αλλάζει η κατάσταση της πρώτης ύλης προς μια πιο εξελιγμένη και χρήσιμη κατάσταση, τροποποιώντας τη γεωμετρία/μορφή, τις ιδιότητες και την εμφάνιση της πρώτης ύλης. Γενικά οι τεχνικές επεξεργασίας εφαρμόζονται σε διακριτά κομμάτια/μονάδες υπό επεξεργασία, αλλά μπορούν να εφαρμοστούν και σε μονάδες συναρμολογημένες σε προηγούμενα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας. Διακρίνονται τρεις κατηγορίες μεθόδων κατεργασίας: οι κατεργασίες μορφοποίησης (shaping operations), οι κατεργασίες βελτίωσης των ιδιοτήτων (property-enhancing operations) και οι επιφανειακές κατεργασίες (surface processing operations). Οι κατεργασίες μορφοποίησης, όπως η χύτευση, η διαμόρφωση και η κοπή, αλλάζουν τη βασική μορφή της αρχικής πρώτης ύλης, ενώ οι επιφανειακές κατεργασίες, όπως ο καθαρισμός, η επικάλυψη και η βαφή, εφαρμόζονται στις επιφάνειες του κομματιού. Συνηθισμένες κατεργασίες βελτίωσης των ιδιοτήτων αποτελούν η θερμική και η χημική επεξεργασία. Η δεύτερη κατηγορία κατασκευαστικών τεχνικών είναι αυτή της συναρμολόγησης κατά την οποίο διάφορα υλικά/εξαρτήματα, τα οποία είναι συνήθως προϊόντα κάποιας διαδικασίας μεταποίησης, συνδέονται ή συνενώνονται σε μια νέα, πιο σύνθετη μονάδα/προϊόν. Η νέα αυτή μονάδα αναφέρεται συχνά με τους όρους συναρμολόγημα ή διάταξη (assembly), υποσυναρμολόγημα (subassembly) ή κάποιο άλλον όρο που αναφέρεται στη συγκεκριμένη μέθοδο συναρμολόγησης που χρησιμοποιήθηκε (π.χ. ηλεκτροσυγκόλληση, συγκολλητή κατασκευή κλπ.). Η σύνδεση μεταξύ των εξαρτημάτων επιτυγχάνεται είτε με συγκόλληση είτε με τη χρήση μηχανικών μέσων όπως βίδες (κοχλίες), πείροι και καρφιά (ήλοι). Οι τεχνικές συγκόλλησης οδηγούν συνήθως σε ένα σχετικά σταθερό δεσμό μεταξύ των εξαρτημάτων που είναι δύσκολο να διασπαστεί, είτε με τη χρήση κάποιας συγκολλητικής ουσίας (ετερογενείς) είτε χωρίς αυτή (αυτογενείς). Παράδειγμα αυτογενούς συγκόλλησης αποτελούν η οξυγονοκόλληση και η ηλεκτροκόλληση ενώ αντίστοιχα ετερογενή συγκόλληση έχουμε εφαρμόζοντας κασσιτεροκόλληση ή συγκόλληση με εποξεικές κόλλες δύο συστατικών. Η μηχανική συναρμολόγηση, από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιείται όταν απαιτείται ένας δεσμός που θα μπορεί να λυθεί σχετικά εύκολα, όπως π.χ. στην σύνδεση δύο εξαρτημάτων με κοχλίες, αλλά και για πιο σταθερές (μόνιμες) συνδέσεις, όπως π.χ. στην σύνδεση με πιρτσίνια, με πίεση (press/snap fitting) ή με συστολή/διαστολή (expansion fitting).

Κεφάλαιο 2: Τρισδιάστατη εκτύπωση και εκτυπωτές.

2.1) Εισαγωγή.

Η **τρισδιάστατη εκτύπωση** (3D printing) είναι μια μέθοδος προσθετικής κατασκευής στην οποία κατασκευάζονται αντικείμενα μέσω της διαδοχικής πρόσθεσης επάλληλων στρώσεων υλικού. Στη τρισδιάστατη εκτύπωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι τύποι υλικού, κυρίως κεραμικά και πολυμερή. Σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες και μεθόδους πρόσθεσης ή προσθήκης υλικού, οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές (βλ. εικόνα 2.1) είναι συνήθως ταχύτεροι, φθηνότεροι και ευκολότεροι στη χρήση. Για τον λόγο αυτό πολλοί πιστεύουν ότι στα επόμενα χρόνια η παγκόσμια παραγωγή αγαθών θα στραφεί προς αυτή την κατεύθυνση, αντικαθιστώντας σταδιακά τις παραδοσιακές τεχνικές. Δεν είναι λίγοι αυτοί που πιστεύουν ότι η τρισδιάστατη εκτύπωση θα αποτελέσει μία «νέα βιομηχανική επανάσταση», καθώς θα φέρει αποκέντρωση των παραγωγικών διαδικασιών, ανοίγοντας τον δρόμο για παραγωγή τοπική και μικρής κλίμακας, προσαρμοσμένη στις τρέχουσες ανάγκες.

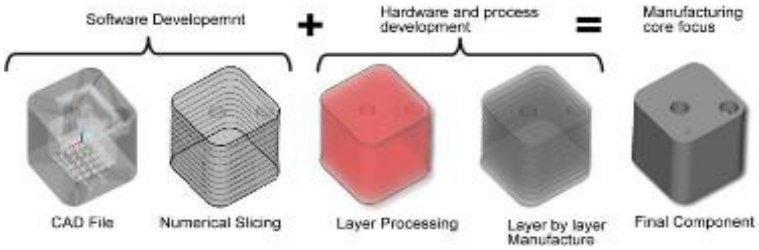
Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές χρησιμοποιούνται κυρίως για την κατασκευή φυσικών μοντέλων και πρωτοτύπων από σχεδιαστές, μηχανικούς και ομάδες ανάπτυξης νέων προϊόντων, έχουν τη δυνατότητα να εκτυπώνουν μέρη και εξαρτήματα από διάφορα υλικά, με διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες και συχνά σε μια ενιαία διαδικασία κατασκευής. Η νέα τεχνολογία διαχείρισης και μετακίνησης υλικών (ως έχουν ή με αναπαραγωγή τους), ονομάζεται (ψηφιακό) MatterNet, κατά αναλογία της τεχνολογίας του διαδικτύου (internet), που επιτρέπει την διαχείριση και μεταφορά των πληροφοριών (κειμένων, σταθερών ή κινούμενων εικόνων και ήχου). [4]



Εικόνα 2.1: Τρισδιάστατος εκτυπωτής (Maker Bot).

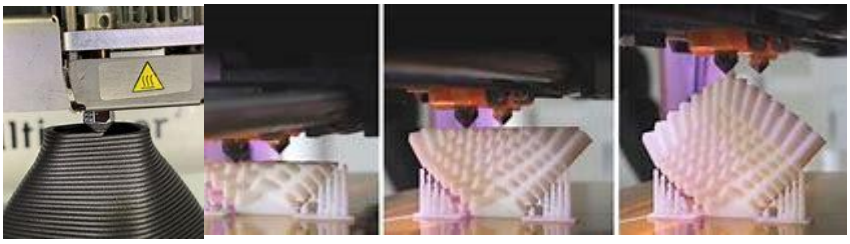
2.1.1)Τι είναι 3d εκτύπωση.

Κατά την διαδικασία της 3Δ εκτύπωσης κατασκευάζεται ένα αντικείμενο τριών διαστάσεων από ένα μηχανολογικό σχέδιο σχεδιασμένο σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, μέσω της διαδοχικής πρόσθεσης επάλληλων στρώσεων υλικού, και για αυτό τον λόγο την αποκαλούν κατεργασία πρόσθεσης ή προσθήκης υλικού (ΚΠΥ) (βλ. εικόνα 2.2). [5]



Εικόνα 2.2: Εξέλιξη κατασκευής 3Δ αντικειμένου.

Ο όρος 3Δ εκτύπωση καλύπτει ένα πλήθος από διαδικασίες στις οποίες το υλικό ενώνεται ή στερεοποιείται υπό τον έλεγχο του ηλεκτρονικού υπολογιστή για να δημιουργηθεί ένα αντικείμενο τριών διαστάσεων, με το υλικό να προστίθεται (όπως για παράδειγμα μόρια υγρού ή κόκκοι σκόνης που ενώνονται με σύντηξη), τυπικά σε στρώσεις (βλ. εικόνα 2.3). [5]



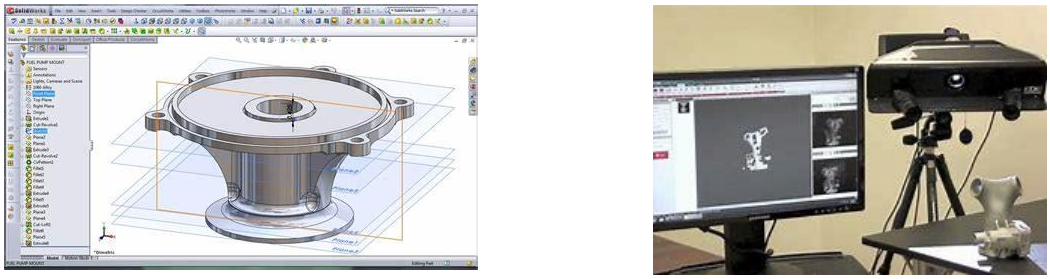
Εικόνα 2.3: Layer by Layer 3Δ εκτύπωση.

Την δεκαετία του 1990, οι τεχνικές της 3Δ εκτύπωσης θεωρούνταν ιδανικές μόνο για την παραγωγή φυσικών μοντέλων και πρωτοτύπων και ο πιο κατάλληλος όρος για αυτό είναι ταχεία πρωτοτυποποίηση. Η ακρίβεια, η επαναληπτικότητα, και το εύρος των υλικών έχουν κάνει εφικτή την χρήση μερικών διαδικασιών 3Δ εκτύπωσης στην βιομηχανική παραγωγή. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της 3Δ εκτύπωσης είναι η ικανότητα της παραγωγής πολύπλοκων μορφών ή γεωμετριών, συμπεριλαμβανομένου κούφιων αντικειμένων για την μείωση του βάρους, με την βασική προϋπόθεση για την παραγωγή ενός 3Δ εκτυπωμένου αντικειμένου να είναι η ύπαρξη ενός ψηφιακού 3Δ μοντέλου ή ενός σχεδιαστικού αρχείου. Επίσης οι βιομηχανίες έχουν την δυνατότητα να εκτυπώνουν εξαρτήματα από διάφορα υλικά, με διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες και συχνά σε μια ενιαία διαδικασία κατασκευής. Οι πιο κοινά χρησιμοποιούμενες διαδικασίες 3Δ εκτύπωσης (46% το 2018) είναι η μέθοδος εξώθησης υλικού FFF (Fused Filament Fabrication). Αν και η μέθοδος FFF επινοήθηκε πιο μετά από τις μεθόδους, της στερεολιθογραφίας (stereolithography, SLA) και της επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης με χρήση δέσμης laser, είναι η πιο οικονομική από τις τρεις με μεγάλη διαφορά, το οποίο κάνει αυτή την διαδικασία την πιο δημοφιλή. Παρακάτω θα γίνει εκτενέστερη αναφορά για την κάθε μια από τις παραπάνω διαδικασίες. [5]

2.1.1.1)Βασικές θεμελιώδεις αρχές.

- Μοντελοποίηση.

Τα μοντέλα για 3Δ εκτύπωση μπορούν να δημιουργηθούν με την βοήθεια σχεδιαστικών προγραμμάτων CAD ή μέσω σαρωτή (βλ. εικόνα 2.4).

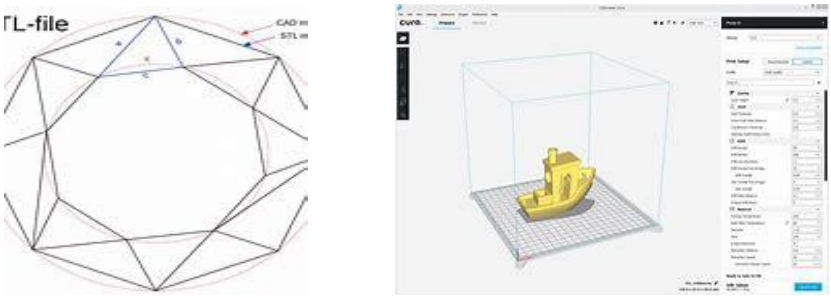


Εικόνα 2.4: Μοντέλο από πρόγραμμα CAD (αριστερά), Σάρωση μοντέλου (δεξιά).

Η τρισδιάστατη μοντελοποίηση είναι μια διαδικασία ανάλυσης και συλλογής δεδομένων σχετικά με το σχήμα και την εμφάνιση ενός αντικειμένου. Με βάση αυτά τα δεδομένα, τρισδιάστατο μοντέλο ενός αντικειμένου μπορεί να παραχθεί. Η δημιουργία 3Δ μοντέλων προς εκτύπωση, είτε μέσω προγραμμάτων CAD είτε μέσω σάρωσης, είναι πολύ δύσκολα για τους μέσους καταναλωτές. Αυτός είναι και ο λόγος που τα τελευταία χρόνια έχουν εμφανιστεί πολλές εταιρίες στην αγορά που αναλαμβάνουν την σχεδίαση και την εκτύπωση αντικειμένων. [5]

- 3Δ Εκτύπωση – κατασκευή.

Πριν την εκτύπωση ενός μοντέλου από ένα αρχείο stl πρέπει να ανοιχθεί από ένα λογισμικό που ονομάζεται slicer το οποίο μετατρέπει το τρισδιάστατο μοντέλο σε μια σειρά λεπτών στρωμάτων και παράγει ένα αρχείο G-code από το αρχείο stl που περιέχει οδηγίες για έναν εκτυπωτή. Υπάρχουν πολλά προγράμματα ανοιχτού κώδικα που κάνουν αυτή την δουλειά όπως είναι το slic3r, το cura κ.α. (βλ. εικόνα 2.5).



Εικόνα 2.5: STL αρχείο (αριστερά), Πρόγραμμα CURA (δεξιά).

Ο 3Δ εκτυπωτής ακολουθεί τις οδηγίες του G-code για την πρόσθεση διαδοχικών επιπέδων υγρού, σκόνης ή φύλλου υλικού για την κατασκευή ενός αντικειμένου. Αυτά τα επίπεδα, τα οποία αντιστοιχούν στις πραγματικές διατομές του σχεδιαστικού μοντέλου CAD, ενώνονται ή συγχωνεύονται για να δημιουργήσουν το τελικό σχήμα ενός μοντέλου. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι η ικανότητα της να δημιουργεί σχεδόν οποιοδήποτε σχήμα ή γεωμετρικό χαρακτηριστικό. Η 3Δ εκτύπωση – κατασκευή ενός μοντέλου με τις υπάρχουσες μεθόδους μπορεί να διαρκέσει από ώρες έως και μέρες, ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται, το μέγεθος και την πολυπλοκότητα του. Τα συστήματα ΚΠΥ μπορούν να μειώσουν αυτόν τον χρόνο σε πολύ λίγες ώρες, ανάλογα με τον τύπο της μηχανής το μέγεθος και τον αριθμό των αντικειμένων που παράγονται. [5]

- Ολοκλήρωση - επεξεργασία.

Αν και το τελικό αποτέλεσμα που παράγεται από έναν 3d εκτυπωτή είναι επαρκές για πολλές εφαρμογές, εκτυπώνοντας ένα ελαφρώς μεγαλύτερο σε διαστάσεις αντικείμενο και στη συνέχεια πραγματοποιώντας αφαίρεση υλικού με μια διαδικασία υψηλότερης ακρίβειας μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια και πιο καλό τελικό αποτέλεσμα. Επίσης οι περισσότερες από τις κατεργασίες πρόσθεσης υλικού απαιτούν επεξεργασία του αντικειμένου μετά την εκτύπωση η οποία περιλαμβάνει απλές ή περισσότερο σύνθετες πρακτικές. Το ποιες πρακτικές θα χρησιμοποιηθούν εξαρτάται άμεσα από το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την εκτύπωση. [6]

Μερικές από τις πρακτικές αυτές είναι:

- Η εξαγωγή του αντικειμένου από την συσκευή που μπορεί να είναι από την απλή αποκόλληση του αντικειμένου από την πλατφόρμα εκτύπωσης ή απομάκρυνση από την τράπεζα σκόνης. (βλ. εικόνα 2.6) [7].

Εικόνα 2.6: Αποκόλληση από πλάκα εκτύπωσης (αριστερά), Απομάκρυνση σκόνης (μέση), Απομάκρυνση από τράπεζα σκόνης (δεξιά).

- Η αφαίρεση υποστήριξης που είναι συνήθως το πρώτο στάδιο της επεξεργασίας μετά την εκτύπωση για όποια κατεργασία απαιτεί και αν βέβαια το σχέδιο χρειάζεται υποστήριξη για την εκτύπωση. Οι καλά τοποθετημένες δομές στήριξης και ο κατάλληλος προσανατολισμός στην εκτύπωση μπορούν να μειώσουν σημαντικά την ανάγκη υποστηρίξεων. Η αφαίρεση της υποστήριξης είναι υποχρεωτική και δεν παράγει βελτιωμένο φινίρισμα επιφάνειας. Η υποστήριξη μπορεί γενικά να χωριστεί σε 2 κατηγορίες, την τυπική και με διαλύτη (βλ. εικόνα 2.7).

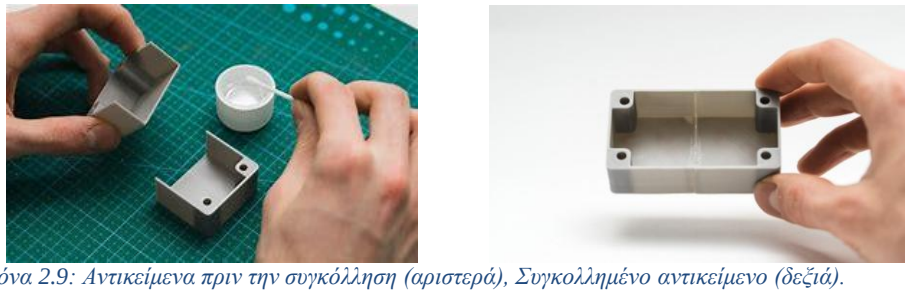
Εικόνα 2.7: Τυπική αφαίρεση υποστήριξης (αριστερά), Αφαίρεση υποστήριξης με διαλύτη (δεξιά).

Στην τυπική, το υλικό στήριξης μπορεί γενικά να αφαιρεθεί με ελάχιστη προσπάθεια, αν και υπάρχει δυσκολία σε σημεία όπως τρύπες ή κοιλότητες. Στην αφαίρεση υποστήριξης με διαλύτη τα τυποποιημένα διαλυτά υλικά υποστήριξης αφαιρούνται τοποθετώντας την εκτύπωση σε ένα λουτρό του κατάλληλου διαλύτη μέχρι να διαλυθεί το υλικό υποστήριξης. Μερικοί διαλύτες είναι το HIPS (συνήθως σχετίζεται με ABS), το PVA (συνήθως σχετίζεται με PLA), το Hydrofill. [7]

- Η λείανση των αντικειμένων ειδικά σε αυτά που έχουν αφαιρεθεί οι υποστηρίξεις για την εξομάλυνση των τμημάτων και την απομάκρυνση οποιωνδήποτε σημαδιών ή υπολειμμάτων. Αυτό βέβαια αν ενδιαφέρει η καλή εικόνα του 3Δ εκτυπωμένου αντικειμένου (βλ. εικόνα 2.8). [7]

Εικόνα 2.8: Αφαίρεση υποστήριξης (αριστερά), Λείανση αντικειμένου (δεξιά).

- Η συγκόλληση. Όταν το μέγεθος του αντικειμένου υπερβαίνει τη μέγιστη διάσταση εκτύπωσης και ο σχεδιασμός απαιτεί να χωριστεί σε μικρότερα τμήματα και μετά την εκτύπωση να συγκολληθεί (βλ. εικόνα 2.9). [7]



Εικόνα 2.9: Αντικείμενα πριν την συγκόλληση (αριστερά), Συγκολλημένο αντικείμενο (δεξιά).

- Στίλβωση, αστάρωμα και βαφή, εποξειδική επικάλυψη. Η στίλβωση δίνει στα τυποποιημένα θερμοπλαστικά ένα φινίρισμα σαν καθρέπτη. Το αστάρωμα είναι η προετοιμασία για την βαφή στα χρώματα που επιθυμούμε. Η εποξειδική επικάλυψη είναι η χρήση ρητίνης προς σκλήρυνση (βλ. εικόνα 2.10). [7]

Εικόνα 2.10: Αστάρωμα αντικειμένων (αριστερά και μέση), Στίλβωση αντικειμένου (δεξιά).

- Επίστρωση μετάλλων που μπορεί να γίνει με ηλεκτρολυτική διαδικασία στο σπίτι η σε ένα μηχανουργείο. Η σωστή επιμετάλλωση απαιτεί μεγάλη γνώση των υλικών και αυτό που μπορεί να γίνει στο σπίτι είναι περιορισμένο σε σύγκριση με το τι μπορεί να κάνει ένας επαγγελματίας (βλ. εικόνα 2.11). [7]

Εικόνα 2.11: Αντικείμενο μετά από επιμετάλλωση.

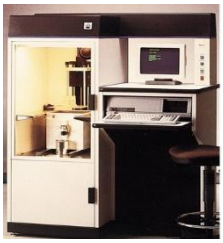
- Θερμοσκλήρυνση, αυτή η πρακτική είναι υποχρεωτική σε όλα τα αντικείμενα που εκτυπώνονται με την κατεργασία πολυμερισμός σε δεξαμενή ή στερεολιθογραφία, ώστε να επιβεβαιωθεί ο πλήρης πολυμερισμός. Αυτό βεβαιώνει ότι πραγματοποιείται δικτύωση μεταξύ των δεσμών του πολυμερούς διότι η ανεπαρκής σκλήρυνση επηρεάζει τη μηχανική αρτιότητα και την ασφάλεια. Ο χρόνος σκλήρυνσης με UV εξαρτάται από τη μάζα και το υλικό και τα τεμάχια θα πρέπει να επανατοποθετούνται στον θάλαμο σκλήρυνσης ώστε το φως να φτάσει σε όλες τις πλευρές τους (βλ. εικόνα 2.12). [7]

Εικόνα 2.12: Αντικείμενα κατά την θερμοσκλήρυνση.

2.1.2) Ιστορική αναδρομή των 3d εκτυπωτών.

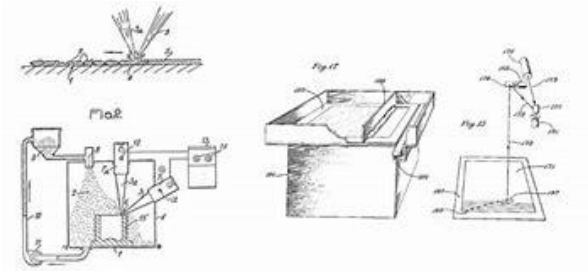
Οι πρώτες τεχνολογίες 3Δ εκτύπωσης άρχισαν να εμφανίζονται στα τέλη της δεκαετίας του 1980, την οποία εποχή αυτή η διαδικασία ονομαζόταν Ταχεία Πρωτοτυποποίηση (RP: Rapid Prototyping).

Αυτό γιατί οι διαδικασίες είχαν αρχικά επινοηθεί ως μία γρήγορη και οικονομική μέθοδος για την δημιουργία πρωτοτύπων για την παραγωγική εξέλιξη στην βιομηχανία. Η πρώτη καταχωρημένη εφαρμογή για την τεχνολογία RP υπάρχει από τον Dr. Kodama, στην Ιαπωνία, τον Μάιο του 1980. Δυστυχώς για τον Dr. Kodama, η πλήρης κατοχύρωση των προδιαγραφών δεν έγινε μέσα στον ένα χρόνο προθεσμίας μετά την εφαρμογή, το οποίο είναι δυσάρεστο διότι ήταν δικηγόρος που ειδικεύεται σε διπλώματα ευρεσιτεχνίας. Στην πραγματικότητα, παρόλα αυτά, η προέλευση της 3Δ εκτύπωσης εντοπίζεται το 1986, όταν κατοχυρώνεται το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για την μέθοδο της στερεολιθογραφίας (SLA). Η ευρεσιτεχνία ανήκει στον Charles (Chuck) Hull (βλ. εικόνα 2.13), ο οποίος εφηύρε την δική του SLA συσκευή το 1983. Ο Hull ίδρυσε την εταιρία 3d Systems corporation, η οποία είναι από τις μεγαλύτερες και πιο παραγωγικές εταιρίες που δραστηριοποιούνται στον τομέα των 3Δ εκτυπώσεων μέχρι σήμερα. [8]



Εικόνα 2.13: Charles Hull (αριστερά), SLA-1 (δεξιά).

Η εταιρεία πρώτα διαφήμισε ένα σύστημα RP, το SLA-1 (βλ. εικόνα 2.13) το οποίο παρουσιάστηκε το 1987 και μετά από σχολαστικούς ελέγχους, το πρώτο πουλήθηκε το 1988. Ενώ το SLA-1 είναι το πρώτο, δεν ήταν όμως το μόνο με την RP τεχνολογία που αναπτύχθηκε εκείνη την περίοδο, καθώς το 1987 ο Carl Deckard, ο οποίος εργαζόταν στο πανεπιστήμιο του Τέξας, κατοχύρωσε μια ευρεσιτεχνία στις Η.Π.Α. για την διαδικασία επιλεκτικής πυρορυσσωμάτωσης με χρήση δέσμης laser (Selective Laser Sintering, SLS)(βλ. εικόνα 2.14). Αυτή η ευρεσιτεχνία εκδόθηκε το 1989 και αδειοδοτήθηκε στην εταιρεία DTM, η οποία αργότερα αποκτήθηκε από την 3d systems. [8]



Εικόνα 2.14: Carl Deckard (αριστερά), Διαδικασία SLS (δεξιά).

Το 1989 ήταν επίσης η χρονιά την οποία ο Soctt Crump, συνιδρυτής της εταιρείας Stratasys, ο οποίος κατοχύρωσε μια ευρεσιτεχνία για την διαδικασία FDM (Fused Deposition Modelling). Η διαδικασία FDM είναι επίσης η μέθοδος που χρησιμοποιείται από πολλές νέες συσκευές, οι οποίες βασίζονται στο μοντέλο RepRap (**Rep**licating **Rap**id-prototyper). Η ευρεσιτεχνία για την διαδικασία FDM κατοχυρώθηκε στην εταιρεία Stratasys το 1992 και η οποία ανήκει στην εταιρεία μέχρι σήμερα (βλ. εικόνα 2.15). [8]

Εικόνα 2.15: Scott Crump (αριστερά), Stratasys FDM (δεξιά).

Στην Ευρώπη, το 1989 παρουσιάστηκε η εταιρεία EOS GmbH στην Γερμανία, ιδρυθείσα από τον Hans Langer. Η εταιρεία ενώ μελετούσε την διαδικασία SLA, τελικά εστίασε σε μεγάλο βαθμό στην διαδικασία LS (Laser Sintering), η οποία μέχρι και σήμερα συνεχώς εξελίσσεται. Σήμερα τα συστήματα της EOS έχουν αναγνώριση σε όλο τον κόσμο για την παραγωγική ποιότητα των βιομηχανικών πρωτοτύπων. Πούλησε το πρώτο σύστημα το 1990. Η διαδικασία DMLS (Direct Metal Laser Sintering) της εταιρείας προέκυψε από μια αρχική μελέτη με ένα τμήμα της Φιλανδικής εταιρείας Electrolux, η οποία αργότερα αγοράστηκε από την EOS.

Άλλες τεχνολογίες και μέθοδοι 3Δ εκτυπώσεων αναπτύχθηκαν επίσης στην αρχή της δεκαετίας του 1990, ειδικότερα η BPM (Ballistic Particle Manufacturing) αρχικά κατοχυρώθηκε από τον William Masters, η LOM (Laminated Object Manufacturing) αρχικά κατοχυρώθηκε από τον Michael Feygin, η SGC (Solid Ground Curing) αρχικά κατοχυρώθηκε από τον Itzchak Pomerantz και η 3DP (3 Dimensional Printing) αρχικά κατοχυρώθηκε από τον Emanuel Sachs. Έτσι στις αρχές της δεκαετίας του 1990 έχουμε έναν αναπτυσσόμενο αριθμό ανταγωνιστριών εταιρειών στην αγορά αλλά μόνο 3 από τις αρχικές υπάρχουν ακόμα και σήμερα.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1990 και στην αρχή της δεκαετίας του 2000 ένας αριθμός από νέες τεχνολογίες συνέχισαν να εμφανίζονται, ακόμα εστιασμένες όλες στις βιομηχανικές εφαρμογές. Μέσα από την έρευνα αναπτύχθηκαν νέες τεχνολογίες για ειδικά εργαλεία, χυτά και άλλες κατασκευαστικές εφαρμογές. Έτσι δημιουργήθηκαν οι ορολογίες RT (Rapid Tooling), RC (Rapid casting) και RM (Rapid Manufacturing) αντίστοιχα.

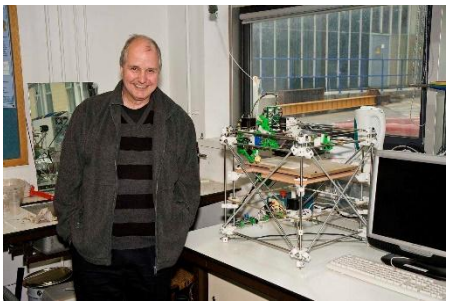
Όσον αφορά εμπορικές επιχειρήσεις, η εταιρεία Sanders Prototype (αργότερα με την επωνυμία Solidscape) και η ZCorporation ιδρύθηκαν το 1996, η Arcam ιδρύθηκε το 1997, η Objet Geometries το 1998, η MCP Technologies παρουσίασε την τεχνολογία SLM το 2000, η εταιρεία EnvisionTec ιδρύθηκε το 2002, η εταιρεία ExOne ιδρύθηκε το 2005 ως παρακλάδι των εταιρειών Extrude Hone Corporation και Sciaky inc και ήταν πρωτοπόροσμε την δική της κατεργασία πρόσθεσης ή προσθήκης υλικού που βασίστηκε στην συγκόλληση με ακτίνα ηλεκτρονίου. Αυτές οι εταιρείες οδήγησαν στην άνοδο, στην κατάταξη, των δυτικών εταιρειών στην παγκόσμια αγορά. Η ορολογία εξελίχθηκε με την αύξηση των κατασκευαστικών εφαρμογών και ο αποδεκτός όρος για όλες τις εφαρμογές ήταν η AM (Additive Manufacturing). Επίσης υπήρχαν πολλές παράλληλες εξελίξεις και στο ανατολικό ημισφαίριο. Ωστόσο, αυτές οι τεχνολογίες, αν και είναι σημαντικές από μόνες τους έχουν καταφέρει να κάνουν μεγάλη επιτυχία σε τοπικό επίπεδο και δεν κατάφεραν να επηρεάσουν πραγματικά την παγκόσμια αγορά εκείνη την εποχή.

Κατά τα μέσα της δεκαετίας του 2000, ο τομέας των 3Δ εκτυπώσεων άρχισε να δείχνει σημάδια διαφοροποίησης με δύο συγκεκριμένους τομείς έμφασης που είναι πιο ευδιάκριτοι σήμερα. Πρώτον, υπήρχε το υψηλό κόστος της 3Δ εκτύπωσης. Ακόμα τα συστήματα ήταν πολύ ακριβά και χρησιμοποιούνταν περισσότερο για την παραγωγή εξαρτημάτων υψηλής αξίας, ιδιαίτερης μηχανικής σχεδίασης και με πολύπλοκα μέρη. Αυτός ο τρόπος χρήσης των 3Δ εκτυπωτών συνεχίστηκε και τα αποτελέσματα τώρα αρχίζουν να γίνονται ορατά σε εφαρμογές παραγωγής σε όλους τους τομείς, όπως είναι ο τομέας της αεροδιαστημικής, της αυτοβιομηχανίας, της ιατρικής, των κοσμημάτων, και μπορούμε να πούμε ότι τα χρόνια που δαπάνησαν οι εταιρίες στις έρευνες και την εξέλιξη αυτών των συστημάτων αποδίδουν καρπούς. Παρόλα αυτά πολλές μεγάλες ιδέες παραμένουν μυστικές ή και απόρρητες βάσει συμφωνιών μη αποκάλυψης (NDA, **non-disclosure agreement**). Από την άλλη πλευρά, ορισμένοι από τους κατασκευαστές συστημάτων 3Δ εκτύπωσης ανέπτυξαν και προώθησαν νέα μοντέλα. Συγκεκριμένα, εστίασαν στην ανάπτυξη νέων ιδεών και στην βελτίωση λειτουργικών πρωτοτύπων, έτσι ώστε οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές να είναι φιλικοί προς τον χρήστη, με καλή σχέση

κόστους – απόδοσης και να μπορεί να υπάρχει ένας 3Δ εκτυπωτής σε κάθε γραφείο ή σπίτι όπως οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές.

Έτσι οι 3Δ εκτυπωτές βρέθηκαν στο χαμηλότερο άκρο της αγοράς, αν και σήμερα θεωρούνται μεσαίας γκάμας αγαθό, ειδικά μετά τον μετά τον ‘’πόλεμο’’ που προέκυψε στις τιμές και την σταδιακή βελτίωση στην ακρίβεια, την ταχύτητα καθώς και στα υλικά της εκτύπωσης.

Το 2007, εμφανίστηκε στην αγορά το πρώτο σύστημα 3Δ εκτύπωσης κάτω από 10.000$ αλλά δεν έκανε την επιτυχία που αναμενόταν. Αυτό οφείλεται εν μέρει στο ίδιο το σύστημα, αλλά και σε άλλες επιρροές στην αγορά. Πολλοί χρήστες αλλά και άνθρωποί του κλάδου θεωρούν ότι εκείνη την εποχή κλειδί για το άνοιγμα της τεχνολογίας της 3Δ εκτύπωσης σε ένα πολύ ευρύτερο κοινό θα ήταν η απόκτηση ενός 3Δ εκτυπωτή κάτω από 5.000$. Για αρκετό χρονικό διάστημα του ίδιου έτους, ο ερχομός του πολύ αναμενόμενου σχεδίου Desktop Factory (βλ. εικόνα 2.16), το οποίο πολλοί προέβλεπαν ότι θα ήταν η πολυπόθητη επιτυχία, δεν κατάφερε να εκπληρώσει τις προσδοκίες καθώς η εταιρία δεν κατάφερε να το βγάλει στην παραγωγή. Το σχέδιο Desktop Factory καθώς και ο δημιουργός του Cathy Lewis, αποκτήθηκαν, μαζί με την εταιρεία IP, από την 3D Systems το 2008 και όλα εξαφανίστηκαν. Όπως αποδείχθηκε όμως, το 2007 ήταν στην πραγματικότητα η χρονιά που σηματοδότησε την τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης ως προσβάσιμη στο ευρύ κοινό, παρόλο που λίγοι το συνειδητοποίησαν τότε, καθώς έγινε γνωστό το μοντέλο RepRap (Replicating Rapid prototyper). Ο Dr. Bowyer ήδη από το 2004 συνέλαβε την ιδέα του μοντέλου RepRap, η οποία ήταν η πρώτη γενικού σκοπού αυτό-αναπαραγόμενη μηχανή παραγωγής (βλ. εικόνα 2.16). Η ομάδα του πανεπιστημίου του Bath ανέπτυξε τα επόμενα χρόνια την ιδέα ενός 3Δ εκτυπωτή χαμηλού κόστους, ο οποίος θα ήταν σε θέση να εκτυπώσει τα περισσότερα από τα δικά του πλαστικά εξαρτήματα. Ο Vik Oliver και ο Rhys Jones ήταν αυτοί που ανέπτυξαν την ιδέα ως και τα λειτουργικά πρωτότυπα ενός 3Δ εκτυπωτή που χρησιμοποιεί την διαδικασία απόθεσης υλικού. [8]



Εικόνα 2.16: Σχέδιο Desktop Factory (αριστερά), Dr. Bowyer με το μοντέλο RepRap (δεξιά).

Παρόλα αυτά τον Ιανουάριο του 2009 διατίθεται στο εμπόριο προς πώληση ο πρώτος 3Δ εκτυπωτής σε κομμάτια προς συναρμολόγηση (kit) και με βάση την μέθοδο RepRap. Αυτός ήταν ο 3Δ εκτυπωτής BfB RapMan (βλ. εικόνα 2.17). Ακολούθησε στενά η εταιρεία Makerbot Industries τον Απρίλιο του ίδιου έτους, οι ιδρυτές της οποίας συμμετείχαν πολύ στην ανάπτυξη του μοντέλου RepRap έως ότου αποχώρησαν από την φιλοσοφία Open Source μετά από εκτεταμένες επενδύσεις. Από το 2009, ένας μεγάλος αριθμός παρόμοιων εκτυπωτών εναπόθεσης έχουν εμφανιστεί στην αγορά. Το ενδιαφέρον εδώ είναι ότι, παρόλο που το μοντέλο RepRap έχει δημιουργήσει έναν εντελώς νέο τομέα εμπορικών εκτυπωτών, η νοοτροπία της μεθόδου RepRap αφορά αποκλειστικά τις εξελίξεις στην φιλοσοφία του Open Source για την 3Δ εκτύπωση και την διατήρηση της εμπορικότητας. [8]

Εικόνα 2.17: 3Δ εκτυπωτής BfB RapMan (αριστερά), 3Δ εκτυπωτής B9Creator (δεξιά).

Το 2012 ήταν η χρονιά που έκαναν την εμφάνιση τους στην αγορά νέες κατεργασίες πρόσθεσης ή προσθήκης υλικού. Τον Ιούνιο εμφανίστηκε ο 3Δ εκτυπωτής με την ονομασία B9Creator (βλ. εικόνα 2.17) ο οποίος χρησιμοποιούσε την κατεργασία του πολυμερισμού σε δεξαμενή (ή Στερεολιθογραφία, SLA) με την μέθοδο της προβεβλημένης εικόνας. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί για την προβολή τεχνολογία Digital Light Processing, DLP. Τον Δεκέμβριο της ίδιας χρονιάς εμφανίστηκε και άλλος ένας 3Δ εκτυπωτής που χρησιμοποιούσε την κατεργασία του πολυμερισμού σε δεξαμενή αλλά με την χρήση laser και η ονομασία του ήταν Form 1. Και οι δύο έγιναν γνωστοί στην αγορά από τον ιστότοπο Kickstarter και έκαναν μεγάλη επιτυχία.

Το 2012 ήταν επίσης η χρονιά που πολλά Μ.Μ.Ε. ασχολήθηκαν με την τεχνολογία των 3Δ εκτυπωτών κυρίως λόγο των σημαντικών εξελίξεων που πραγματοποιήθηκαν σε βιομηχανικό επίπεδο. Αυτό που δεν μπορεί να αμφισβητηθεί είναι ο αντίκτυπος που έχει η 3Δ εκτύπωση στον βιομηχανικό τομέα και οι τεράστιες δυνατότητες που επιδεικνύει η τρισδιάστατη εκτύπωση στο μέλλον της καταναλωτικής αγοράς. Έτσι το 2013 είναι η χρονιά της εδραίωσης και σημαντικής εξέλιξης των 3Δ εκτυπωτών. [8]

2.1.3) Πως δουλεύει ένας 3Δ εκτυπωτής.

Η βασική ιδέα πίσω από την τρισδιάστατη εκτύπωση συναντάται στους σχηματισμούς πετρωμάτων σε μεγάλα βάθη κάτω από τη γη (οι σταγόνες του νερού εναποθέτουν λεπτές στρώσεις μετάλλων σχηματίζοντας σταλακτίτες και σταλαγμίτες), ενώ ένα πιο σύγχρονο παράδειγμα είναι ένα κοινός επιτραπέζιος εκτυπωτής. Όπως ακριβώς ένας εκτυπωτής ψεκασμού μελάνης προσθέτει μεμονωμένες κουκίδες του μελανιού για να σχηματίσουν μια εικόνα, ένας 3Δ εκτυπωτής προσθέτει υλικό μόνο όπου χρειάζεται, ακολουθώντας εντολές από ένα ψηφιακό αρχείο.

Η τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής εφαρμόζεται σε εκτυπωτές με διάφορα μεγέθη και σχήματα ανεξάρτητα όμως από το είδος του 3Δ εκτυπωτή ή από το υλικό που χρησιμοποιείται, η διαδικασία της 3Δ εκτύπωσης ακολουθεί τα ίδια βασικά βήματα. Ξεκινά με τη δημιουργία ενός 3Δ σχεδίου από το αντικείμενο που θέλει κανείς να εκτυπώσει, χρησιμοποιώντας ψηφιακό λογισμικό CAD (Computer Aided Design). Το ψηφιακό μοντέλο μπορεί επίσης να προκύψει μέσω της χρήσης κάποιου τρισδιάστατου σαρωτή είτε κατεβάζοντας απλώς κάποιο αρχείο από τη διαδικτυακή αγορά.

Η προετοιμασία του εκτυπωτή περιλαμβάνει καταρχάς το γέμισμά του με τις πρώτες ύλες (όπως πλαστικά, σκόνες μετάλλων). Πρέπει μάλιστα να διαλέξει κανείς το υλικό με το οποίο θα επιτύχει καλύτερα τις συγκεκριμένες ιδιότητες που απαιτούνται για το αντικείμενο που θέλει να παραγάγει. Η ποικιλία των υλικών που χρησιμοποιούνται στους 3Δ εκτυπωτές είναι πολύ μεγάλη, περικλείει πλαστικά, κεραμικά, ρητίνη, μέταλλα, άμμο, υφάσματα, βιοϋλικά, γυαλί ακόμα και τροφή. Επιπλέον, απαιτείται προετοιμασία της πλατφόρμας κατασκευής (σε ορισμένες περιπτώσεις, ίσως χρειαστεί να καθαριστεί ή να εφαρμόσει μια κόλλα για να αποτραπεί η μετακίνηση και στρέβλωση του αντικειμένου από τη θερμότητα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκτύπωσης).

Μόλις φορτωθεί το ψηφιακό μοντέλο στον εκτυπωτή, το μηχάνημα αναλαμβάνει αυτόματα τη δημιουργία του επιθυμητού αντικειμένου. Ενώ οι διεργασίες εκτύπωσης ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο της τεχνολογίας του 3Δ εκτυπωτή, η εξώθηση υλικού (η οποία περιλαμβάνει έναν αριθμό διαφορετικών τύπων διεργασιών) είναι η πιο κοινή μέθοδος που χρησιμοποιείται στους επιτραπέζιους 3Δ εκτυπωτές.

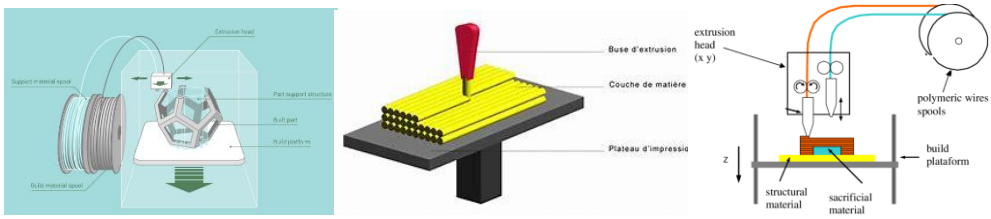
Το υλικό εκτύπωσης, κατά κανόνα ένα πλαστικό νήμα, θερμαίνεται μέχρις ότου υγροποιείται και εξωθείται μέσω του ακροφυσίου (η άκρη από την οποία εκτινάσσεται το νήμα) εκτύπωσης. Χρησιμοποιώντας πληροφορίες από το ψηφιακό αρχείο, ο σχεδιασμός είναι χωρισμένος σε λεπτές δισδιάστατες διατομές, ώστε ο εκτυπωτής να ξέρει ακριβώς πού να τοποθετήσει το πλαστικό υλικό (πολυμερές) μέσω του ακροφυσίου σε λεπτές στρώσεις, συχνά 0,1 χιλιοστά πάχος. Το πολυμερές στερεοποιείται γρήγορα και δένεται με το κάτω στρώμα του υλικού, πριν χαμηλώσει η πλατφόρμα και η κεφαλή εκτύπωσης προσθέσει άλλο στρώμα. Ανάλογα με το μέγεθος και την πολυπλοκότητα του αντικειμένου, η όλη διαδικασία μπορεί να διαρκέσει από λεπτά έως ημέρες.

Αφού ολοκληρωθεί η εκτύπωση, κάθε αντικείμενο απαιτεί μία ελάχιστη επεξεργασία η οποία περιλαμβάνει ποικιλία πρακτικών (απλών ή περισσότερο σύνθετων), από την απλή αποκόλληση του αντικειμένου από την πλατφόρμα εκτύπωσης, έως την αφαίρεση δομών στήριξης από το αντικείμενο (προσωρινό υλικό που τυπώνεται για τη στήριξη προεξοχών επί του αντικειμένου), το βούρτσισμα, το φινίρισμα κτλ. Αυτό το βήμα απαιτεί συχνά εξειδικευμένες δεξιότητες και υλικά. Όταν το αντικείμενο πρωτοτυπώνεται, συχνά δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα ή να ολοκληρωθεί μέχρις ότου λειανθεί, βερνικωθεί ή βαφτεί ώστε να ολοκληρωθεί ο αρχικός σχεδιασμός του. Το υλικό το οποίο έχει επιλεχθεί είναι αυτό το οποίο θα καθορίσει ποια μέθοδος μετά - επεξεργασίας είναι η πιο αρμόδια. [4]

2.1.3.1) <u>Κατηγορίες κατεργασιών πρόσθεσης ή προσθήκης υλικού.</u>

Εξώθηση υλικού (Material extrusion).

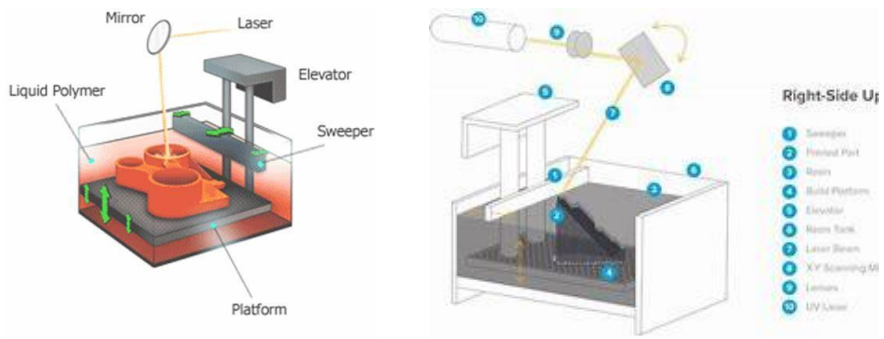
Νήμα πολυμερούς διοχετεύεται μέσω ενός ζεσταμένου ακροφυσίου εξώθησης (βλ. εικόνα 2.18). Το πολυμερές τήκεται (λιώνει και εξωθείται μέσω ακροφυσίου, το οποίο εναποθέτει το πολυμερές σαν γραμμή, λόγω της κίνησης της κεφαλής εξώθησης. Οι γραμμές αυτές εναποτίθενται διαδοχικά σε επάλληλες στρώσεις υλικού ώστε να δημιουργηθεί η 3Δ γεωμετρία (βλ. εικόνα 2.18). Ο θάλαμος ή η επιφάνεια πάνω στην οποία χτίζεται το τεμάχιο συχνά είναι ζεσταμένη, ώστε να αποφεύγεται υπερβολική παραμόρφωση του τεμαχίου. Η κατεργασία αυτή αναφέρεται και ως fused deposition modeling (FDM)(βλ. εικόνα 2.18). [9]



Εικόνα 2.18: Εξώθηση υλικού (αριστερά), Εναπόθεση υλικού (κέντρο), Κατεργασία FDM (δεξιά).

Πολυμερισμός σε δεξαμενή (Vat photo-polymerization).

Ο πολυμερισμός σε δεξαμενή (ή Στερεολιθογραφία SL ή SLA) αποτελεί την πρώτη ιστορικά κατεργασία πρόσθεσης ή προσθήκης υλικού (βλ. εικόνα 2.19). Ο πολυμερισμός σε δεξαμενή βασίζεται στην φωτολιθογραφία. Η φωτολιθογραφία είναι μια διαδικασία, κατά την οποία χρησιμοποιείται το φως για να μεταφέρει ένα γεωμετρικό μοτίβο από μια μάσκα φωτός σε ένα φωτο-ευαίσθητο χημικό, το οποίο καλείται φωτοαντίσταση (photoresist).



Εικόνα 2.19: Βασικά μέρη 3Δ εκτυπωτών SLA.

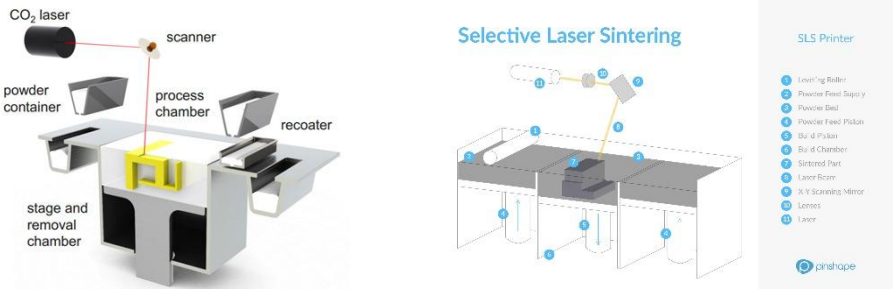
Η φωτολιθογραφία χρησιμοποιείται κατά κόρον για την κατασκευή ηλεκτρονικών όπως ημιαγωγών, MEMS (Micro – Electrical – Mechanical – Systems), τυπωμένα κυκλώματα, LCD & OLED displays κ.α.. Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι για την επίτευξη του φωτο-πολυμερισμού: με laser και με προβεβλημένη εικόνα. Η στερεολιθογραφία με laser (SLA) χρησιμοποιεί laser στο υπεριώδες μήκος κύματος (UV wavelength), στα 350nm. Το laser σαρώνει την υγρή επιφάνεια και αναγκάζει το υγρό να στερεοποιηθεί. Η πλατφόρμα τότε υποχωρεί κατά ένα επίπεδο, το οποίο στη συνέχεια επικαλύπτεται με νέο υλικό και σαρώνεται εκ νέου. Η στερεολιθογραφία με προβολή χρησιμοποιεί DLP (Digital Light Processing). Η εικόνα προβάλλεται από την κάτω μεριά και πολυμερίζει το συγκεκριμένο επίπεδο. Στη συνέχεια το αντικείμενο μετακινείται επάνω κατά ένα επίπεδο και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. [9]

Σύντηξη σε τράπεζα σκόνης (Powder bed fusion).

Η σύντηξη σε τράπεζα σκόνης είναι η κατεργασία πρόσθεσης ή προσθήκης υλικού, κατά την οποία χρησιμοποιείται θερμική ενέργεια, ώστε να λιώσουν επιλεκτικά περιοχές μιας τράπεζας, πάνω στην οποία υπάρχει σκόνη του υλικού τεμαχίου. Υπάρχουν 3 βασικοί μηχανισμοί για την υλοποίηση του λιωσίματος:

1) **<u>Η πυροσυσσωμάτωση (sintering, SLS),</u>**

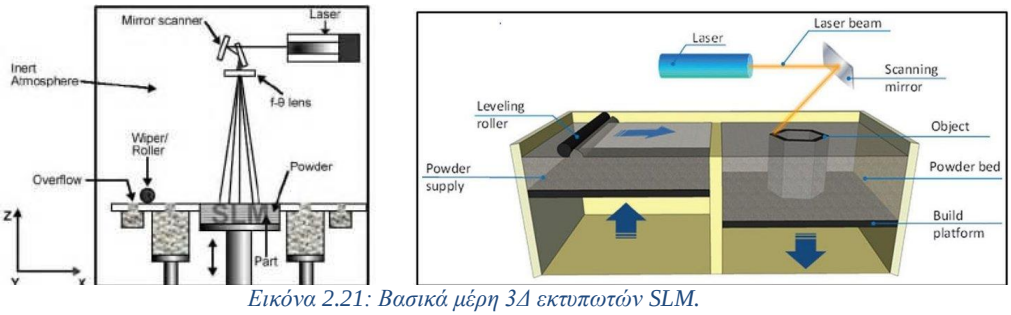
Η κατεργασία αυτή ονομάζεται Selective Laser Sintering (SLS) δηλαδή επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με laser και εφαρμόζεται σε μη μεταλλικά υλικά (βλ. εικόνα 2.20). Δεν είναι τήξη. Τα σωματίδια (κόκκοι) είναι σχεδόν σφαιρικά και σε ένθερμη κατάσταση. Προστίθεται επιπλέον θερμότητα (μέσω δέσμης laser ή άλλης τεχνολογίας) και δημιουργία λαιμού (necking). Δημιουργία ορίων και το πορώδες αρχίζει και ελαττώνεται. Τελικό στάδιο κατά το οποίο η σκόνη έχει συντηχθεί και οι πόροι έχουν γίνει μικρότεροι. [9]



Εικόνα 2.20: Βασικά μέρη 3Δ εκτυπωτών SLS.

2) **<u>Η τήξη (melting, SLM),</u>**

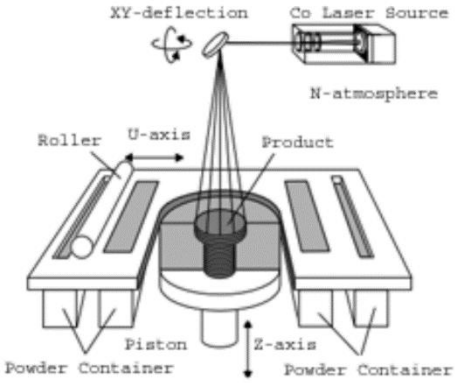
Η κατεργασία αυτή ονομάζεται Selective Laser Melting (SLM) δηλαδή επιλεκτική τήξη με laser και εφαρμόζεται κυρίως σε μεταλλικά υλικά (βλ. εικόνα 2.21). Τα σωματίδια (κόκκοι) είναι σχεδόν σφαιρικά και σε ένθερμη κατάσταση. Προστίθεται επιπλέον θερμότητα (μέσω δέσμης laser ή άλλης τεχνολογίας), μεγαλύτερη από αυτή της πυροσυσσωμάτωσης. Η σκόνη λιώνει και ρέει. Γίνεται ταχεία ψύξη και έτσι γίνεται η δημιουργία των ορίων των κόκκων. [9]



Εικόνα 2.21: Βασικά μέρη 3Δ εκτυπωτών SLM.

3) <u>Η πυροσυσσωμάτωση συνδετικού μέσου (binder sintering, DMLS).</u>

Η κατεργασία αυτή ονομάζεται Direct Metal Laser Sintering (DMLS) δηλαδή απευθείας πυροσυσσωμάτωση μετάλλων με laser κυρίως για μεταλλικά υλικά (βλ. εικόνα 2.22). Πραγματοποιείται πυροσυσσωμάτωση ενός συστατικού του υλικού όταν τα σωματίδια (π.χ. από ανοξείδωτο χάλυβα) επικαλυμμένα με πολυμερές πυροσυσσωματώνονται με τον τυπικό τρόπο. Το τεμάχιο που προκύπτει τοποθετείται σε φούρνο, όπου το συνδετικό μέσο καίγεται (στους 900 ºC για ανοξείδωτο χάλυβα). Το τεμάχιο εμποτίζεται με κράμα χαμηλότερης θερμοκρασίας (π.χ. ορείχαλκος), ώστε να ολοκληρωθεί το τεμάχιο. [9]



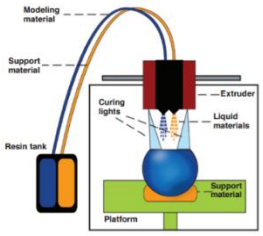
Εικόνα 2.22: Βασικά μέρη 3Δ εκτυπωτών DMLS.

Εκτόξευση υλικού (Material jetting).

Η κατεργασία της εκτόξευσης υλικού ακολουθεί την παρακάτω σειρά: εκτίναξη σταγόνας - κίνηση σταγόνας - πρόσκρουση σταγόνας - εξάπλωση σταγόνας και τέλος στερεοποίηση σταγόνας. Υπάρχουν δύο τεχνικές εκτόξευσης υλικού:

1) <u>Σύστημα συνεχούς ροής,</u>

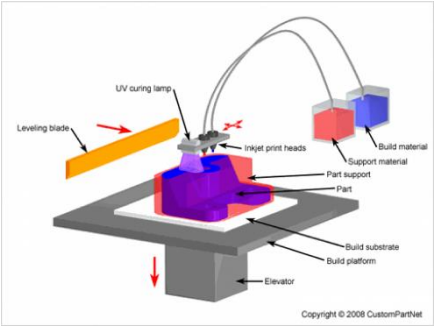
Το σύστημα συνεχούς ροής είναι μια ηλεκτρομηχανική συσκευή που δημιουργεί ταλαντώσεις πίεσης, οι οποίες μεταδίδονται μέσω του ρευστού και το υλικό εξωθείται μέσω ακροφυσίου (βλ. εικόνα 2.23). Ο αρχικός πίδακας κόβεται σε σταγονίδια (D=150μm) και το ηλεκτροστατικό πεδίο φορτίζει τα σταγονίδια. Τα φορτισμένα σταγονίδια κατευθύνονται προς την επιθυμητή τους θέση. Εάν η συγκεκριμένη σταγόνα δεν τυπώνει, κατευθύνεται στο δοχείο μέσω συσκευής συγκράτησης (catcher). [9]



Εικόνα 2.23: Βασικά μέρη 3Δ εκτυπωτών Material jetting.

2) <u>Σύστημα σταγόνας κατ' απαίτηση</u>

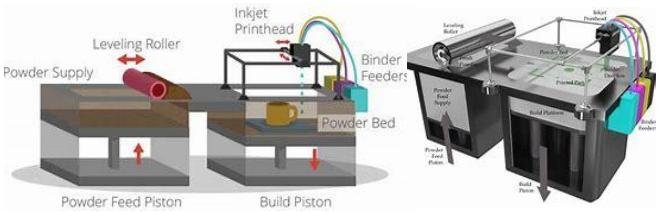
Στην σταγόνα κατ' απαίτηση DOD (Drop On Demand) τα σταγονίδια παράγονται απευθείας από ακροφύσιο (βλ. εικόνα 2.24). Οι παλμοί πίεσης στο ακροφύσιο εξωθούν το υγρό. Ένας επενεργητής παράγει τους παλμούς πίεσης. Οι συνηθέστεροι επενεργητές είναι οι θερμικοί και οι πιεζοηλεκτρικοί αλλά ερευνώνται και άλλοι όπως οι ηλεκτροστατικοί, οι ακουστικοί κ.α.. [9]



Εικόνα 2.24: Βασικά μέρη 3Δ εκτυπωτών Material jetting DOD.

Εκτόξευση συνδετικού υλικού (Binder jetting).

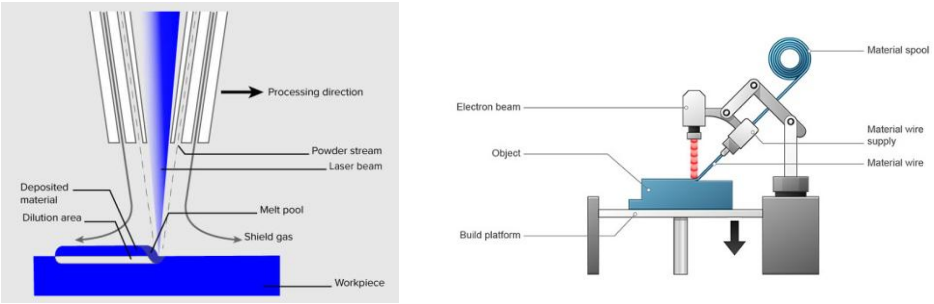
Είναι μια κατεργασία πρόσθεσης ή προσθήκης υλικού κατά την οποία ένα υγρό συστατικό συγκόλλησης εναποτίθεται, ώστε να συγκολλήσει κονιοποιημένο υλικό. Είναι κατεργασία παρόμοια με την σύντηξη σε τράπεζα σκόνης, με την διαφορά ότι εκτοξεύεται συνδετικό υλικό αντί για να τήκεται η σκόνη με laser (βλ. εικόνα 2.25). Είναι επίσης κατεργασία παρόμοια με την εκτόξευση υλικού, με την διαφορά ότι εκτοξεύεται συνδετικό υλικό, το οποίο αποτελεί μέρος του τελικού τεμαχίου. Η φιλοσοφία παραγωγής σταγονιδίων είναι ακριβώς όπως και στην εκτόξευση υλικού κατ' απαίτηση. Οι επενεργητές είναι ίδιου τύπου με αυτούς της εκτόξευσης υλικού δηλαδή θερμικοί και πιεζοηλεκτρικοί.



Εικόνα 2.25: Βασικά μέρη 3Δ εκτυπωτών Bending jetting.

Εναπόθεση με κατευθυνόμενη ενέργεια (Directed energy deposition).

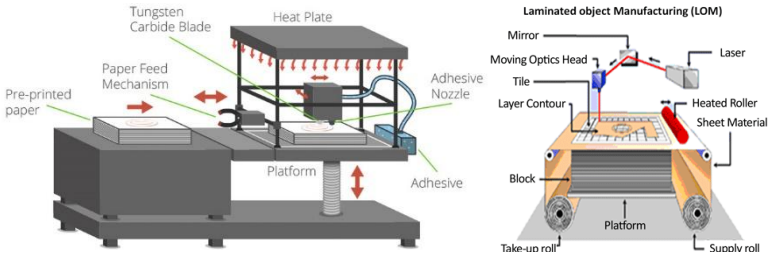
Αυτή η κατεργασία χρησιμοποιεί μια δέσμη ενέργειας, η οποία επιτρέπει τη δημιουργία τεμαχίων λιώνοντας σκόνη που διέρχεται μέσα από σωλήνα ή σύρμα (βλ. εικόνα 2.26). Λειτουργεί με πολυμερή και κεραμικά, αλλά κυρίως με μέταλλα. Το laser, η ακτίνα ηλεκτρονίων και το τόξο πλάσματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την τήξη του τροφοδοτούμενου υλικού. Σε αυτό το σημείο, η μέθοδος μοιάζει με την σύντηξη σε τράπεζα σκόνης. Η διαφορά τους είναι ότι το υλικό τροφοδοτείται από την κεφαλή και δεν είναι ήδη τοποθετημένο όταν πραγματοποιείται η τήξη. Η μέθοδος αυτή είναι λιγότερο ακριβής και τα τεμάχια απαιτούν φινίρισμα με εργαλειομηχανές CNC μετά την εκτύπωση. Με την χρήση του τόξου πλάσματος, το λιωμένο υλικό έχει την τάση να απλώνει. Το laser είναι η πιο φθηνή μεθοδολογία τήξης και τα μέταλλα απαιτούν περιβάλλον αδρανούς αερίου για να αποφεύγεται η ανάπτυξη οξειδίων. Υπάρχουν πολλές παραλλαγές της εναπόθεσης με κατευθυνόμενη ενέργεια με τις πιο γνωστές να είναι η DMD (Direct Metal Deposition), η LENS (Laser Engineered Net Shaping) και η EBFF (Electron Beam Freeform Fabrication). [9]



Εικόνα 2.26: Μέθοδος με χρήση σκόνης (αριστερά), Μέθοδος με χρήση σύρματος (δεξιά).

Στρωμάτωση φύλλων (Sheet lamination).

Η κατεργασία αυτή χρησιμοποιεί οποιοδήποτε υλικό βρίσκεται σε μορφή φύλλου (μέταλλο, χαρτί, πλαστικό) και το κολλάει. Ένα εργαλείο κοπής (συνήθως μαχαίρι ή laser) κόβει το προφίλ του συγκεκριμένου επιπέδου. Νέο επίπεδο εναποτίθεται και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να παραχθεί όλο το τεμάχιο. Αναφέρεται και ως LOM (Laminate Object Manufacture) (βλ. εικόνα 2.27).



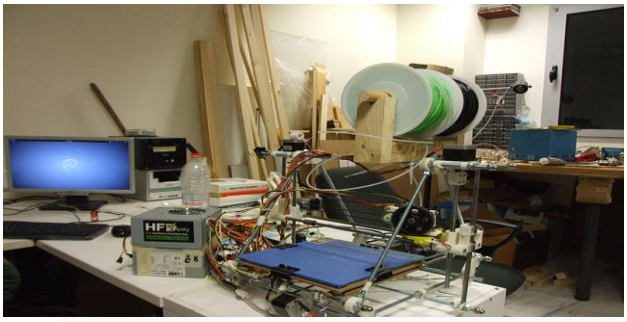
Εικόνα 2.27: Βασικά μέρη 3Δ εκτυπωτών Sheet lamination.

Τύπος υλικού (Type Materials)	**Τεχνολογία** (Technologies)	**Υλικά** (Materials)
Εξώθηση (Extrusion)	**Μοντελοποίηση απόθεσης τήξης** Fused deposition modeling (FDM)	Θερμοπλαστικά (π.χ. PLA, ABS), ευτηκτικά μέταλλα, βρώσιμα υλικά
Κοκκώδης (Granular)	**Άμεση σύντηξη με λέιζερ μετάλλων** Direct metal laser sintering (DMLS)	Σχεδόν οποιοδήποτε κράμα μετάλλου
	Τήξη δέσμης ηλεκτρονίων Electron beam melting (EBM)	Κράματα τιτανίου
	Επιλεκτική θερμοσυσσωμάτωση Selective heat sintering (SHS)	Θερμοπλαστική σκόνη
	Επιλεκτική σύντηξη με λέιζερ Selective laser sintering (SLS)	Θερμοπλαστικά, μεταλλικές σκόνες, κεραμικές σκόνες
	Τρισδιάστατη εκτύπωση σε σκόνη και κεφαλή inkjet, 3D εκτύπωση με γύψο Powder bed and inkjet head 3D printing, Plaster based 3D printing (PP)	γύψος
Ελασματοποιημένο (Laminated)	**Κατασκευή πλαστικοποιημένων αντικειμένων** Laminated object manufacturing (LOM)	Χαρτί, μεταλλικό φύλλο, πλαστική μεμβράνη
Πολυμερισμός με φως (Light polymerized)	**Στερεολιθογραφία** Stereolithography (SLA)	Φωτοπολυμερές
	Ψηφιακή επεξεργασία φωτός Digital Light processing (DLP)	Υγρή ρητίνη

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά μεθόδων τρισδιάστατης εκτύπωσης.

2.1.4) Χρήση 3Δ εκτυπωτών.

Η τεχνολογία των 3Δ εκτυπωτών βρίσκει χρήση σε διάφορους τομείς όπως είναι της κατασκευής κοσμημάτων, την κατασκευή υποδημάτων, στον βιομηχανικό σχεδιασμό, στην αρχιτεκτονική, στην αυτοκινητοβιομηχανία, την αεροδιαστημική, την οδοντιατρική, την εκπαίδευση, στην ιατρική, στην χαρτογράφηση πληροφοριακών συστημάτων και πολλά άλλα. Ειδικά με τους εκτυπωτές που χρησιμοποιούν πλαστικό μπορούν να κατασκευαστούν εξολκείς ελαστικών ποδηλάτων, κρεμάστρες, καπάκια, εργαλεία για dremel κ.λ.π.. με την χρήση πλαστικού και σχεδίων CAD, που βρίσκονται ελεύθερα στο internet σε διάφορες πλατφόρμες είτε που μπορεί κάποιος μόνος του να δημιουργήσει, μπορεί πολύ εύκολα να δημιουργηθεί από το πιο μικρό εξάρτημα, έως ολόκληρη κατασκευή κομμάτι-κομμάτι. Επίσης μια ιδιότητα των 3Δ εκτυπωτών είναι ότι μπορούν να αναπαράγουν τον εαυτό τους (Rep Rap) αφού μπορούν να εκτυπώσουν τα κομμάτια που τους αποτελούν. (βλ. εικόνα 2.28).



Εικόνα 2.28: Τρισδιάστατος εκτυπωτής τύπου Mendel RepRap στο hackerspace.

Ένα στρατηγικό πλεονέκτημα της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η δυνατότητα παραγωγής περισσότερο εξατομικευμένων και περίπλοκων αντικειμένων χρησιμοποιώντας ακριβώς όσο υλικό είναι αναγκαίο. Επίσης, η τρισδιάστατη εκτύπωση βοηθά στην τυποποίηση της παραγωγής μειώνοντας την ανάγκη παρουσίας γραμμής παραγωγής και συντελεί στη μείωση εκπομπών CO2 λόγω λιγότερων μετακινήσεων (logistics). Η τρισδιάστατη εκτύπωση, όπως σχεδόν κάθε τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για επικίνδυνους σκοπούς, όπως για παράδειγμα στην εύκολη κατασκευή όπλων.

Η εφεύρεση της 3Δ εκτύπωσης μειώνει τον χρόνο παραγωγής της πρώτης έκδοσης ενός προϊόντος και μας απελευθερώνει από ποικίλα εμπόδια τα οποία συναντάμε στις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής. Είναι δυνατόν να παραγάγουμε μοναδικά αντικείμενα, σε μικρές ποσότητες, με χαμηλό κόστος. Επιταχύνεται ο κύκλος σχεδιασμού, παραγωγής και ελέγχου επιτρέποντας στον σχεδιαστή να αξιολογήσει άμεσα τη βιωσιμότητα ενός προϊόντος και να ενσωματώσει αλλαγές σχεδιασμού όπου τυχόν απαιτούνται. Η δυνατότητα να τροποποιήσει κανείς ένα σχέδιο σε απευθείας σύνδεση και αμέσως να δημιουργήσει το αντικείμενο, χωρίς σπατάλη χύτευσης ή διάτρησης, καθιστά την κατασκευή με την διαδικασία πρόσθεσης ή προσθήκης υλικού έναν οικονομικό τρόπο για τη δημιουργία μεμονωμένων αντικειμένων, μικρών παρτίδων. Τα αντικείμενα μπορούν να κατασκευαστούν μόλις δημιουργηθεί το τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο, εξαλείφοντας την ανάγκη για ακριβές και χρονοβόρο εξοπλισμό και κατασκευή πρωτοτύπου. Οι τεχνικές της προσθετικής τεχνολογίας επιτρέπουν την ταχεία αντίδραση στις αγορές και δημιουργούν νέες δυνατότητες παραγωγής εκτός των εργοστασίων, όπως κινητές μονάδες που μπορούν να τοποθετηθούν κοντά στην πηγή των τοπικών υλικών. Αυτή η τεχνολογία επίσης συμβάλλει στη μείωση της απώλειας υλικού κατά την παραγωγή. Χτίζοντας αντικείμενα σε αλλεπάλληλες στρώσεις, αντί των παραδοσιακών μεθόδων κατεργασίας όπου αποκόπτεται το υλικό, μειώνονται οι ανάγκες και το κόστος των υλικών μέχρι 90%. Αυτές οι τεχνικές εξοικονομούν ενέργεια με την εξάλειψη των σταδίων παραγωγής, χρησιμοποιώντας ουσιαστικά λιγότερο υλικό, επιτρέποντας την επαναχρησιμοποίηση των υποπροϊόντων, και την παραγωγή ελαφρύτερων προϊόντων. Η 3Δ εκτύπωση έχει νόημα για την κατασκευή προϊόντων υψηλής τεχνολογίας με πολύπλοκα σχέδια, αλλά είναι λιγότερο

αποτελεσματική για την παραγωγή απλών προϊόντων που παράγονται σε μεγάλες ποσότητες, όπως τα καθίσματα γηπέδου ή τα δοχεία απορριμμάτων. [4]

❖ Οικιακός 3d εκτυπωτής.

Έχουν υπάρξει πολλές προσπάθειες για την ανάπτυξη ενός 3Δ εκτυπωτή κατάλληλου για οικιακή χρήση, έτσι ώστε να γίνει αυτή η τεχνολογία διαθέσιμη και προσιτή στο ευρύτερο κοινό. Μεγάλο μέρος αυτής της προσπάθειας στοχεύει σε DIY (Do It Yourself = κάνε το μόνος σου) ενθουσιώδεις κοινότητες που σχετίζονται στενά με την ακαδημαϊκή κοινότητα. Η 3Δ εκτύπωση δίνει στον καθένα τη δύναμη να κατασκευάσει αντικείμενα μόνο όταν προκύπτει πραγματική ανάγκη ή επιθυμία και με αυτόν τον τρόπο εμπλέκει πολλούς ανθρώπους στην παραγωγή και ακόμα και στην πώληση των δημιουργιών τους, αποφεύγοντας την παραδοσιακή προσέγγιση και τα δίκτυα διανομής. Οι 3Δ εκτυπωτές μεταστρέφουν τους καταναλωτές σε δημιουργούς ή κατασκευαστές των πραγμάτων. Η κίνηση αυτή, που συχνά αποκαλείται *Το κίνημα των δημιουργών (The Maker Movement)*, συμβάλλει στην ώθηση της καινοτομίας και στη δημιουργία ενός εντελώς νέου τρόπου της επιχειρηματικής δραστηριότητας. Τα προϊόντα πλέον δεν είναι απαραίτητο να προκύπτουν μέσω της μαζικής παραγωγής, αλλά μπορεί να παράγονται σε μικρές παρτίδες, να τυπώνονται επί τόπου ή να προσαρμόζονται πρώτα στις μοναδικές ανάγκες ενός ατόμου. [4]

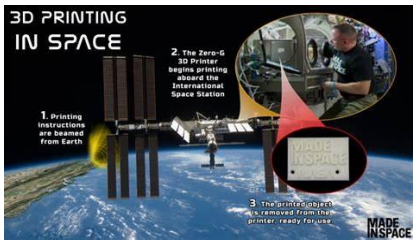
❖ Αρχιτεκτονική και GIS.

Η μακέτα στην αρχιτεκτονική είναι το σημαντικότερο εργαλείο απεικόνισης. Με την χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης ο αρχιτέκτονας έχει την δυνατότητα να πειραματιστεί με ακρίβεια και λεπτομέρεια (βλ. εικόνα 2.29). Είναι ένα πραγματικό εργαλείο για την προώθηση του τελικού σχεδίου στον πελάτη. Η τρισδιάστατη εκτύπωση επαναπροσδιορίζει την έννοια της μακέτας καθιστώντας την ένα αυτόνομο έργο και ένα διαχρονικό αντικείμενο. Τα επόμενο βήμα είναι η δημιουργία τεράστιων 3Δ εκτυπωτών για την κατασκευή ολόκληρων κτιρίων χρησιμοποιώντας το τσιμέντο ως υλικό κατασκευής. Η κατασκευή των κτιρίων αναμένεται να είναι φθηνή αφού μειώνονται τα λειτουργικά κόστη, λόγω του μειωμένου απαιτούμενου ανθρώπινου δυναμικού. Επειδή και ο χρόνος κατασκευής είναι μικρότερος, 3Δ σπίτια ή καταλύματα μπορούν εύκολα να κατασκευαστούν μετά από φυσικές καταστροφές. Επιπρόσθετα μπορούν να υλοποιηθούν κατασκευαστικά σχέδια, τα οποία δεν μπορούν να επιτευχθούν με συμβατικές μεθόδους. Μέχρι σήμερα έχει ολοκληρωθεί η κατασκευή κάποιων κτιρίων ενώ αναμένεται να υπάρξει αύξηση τα επόμενα χρόνια. Τέλος η χαρτογράφηση και τα τοπογραφικά σχέδια παίρνουν τρισδιάστατη μορφή. Μέσω του Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS) τα τοπογραφικά gis δεδομένα, μετατρέπονται σε πραγματικότητα (βλ. εικόνα 2.29). Κατοικίες, σχολεία, ακόμη και πόλεις μπορούν να εκτυπωθούν από 3Δ δεδομένα. [10], [11], [12]

Εικόνα 2.29: Χρήση 3Δ εκτυπωτών στην αρχιτεκτονική (αριστερά), στην τοπογραφία (δεξιά).

❖ Διάστημα.

Η κατασκευή κτιρίων δεν περιορίζεται μόνο στη γη. Η Εθνική Υπηρεσία Αεροναυπηγικής και Διαστήματος (NASA) και άλλες διαστημικές Υπηρεσίες σχεδιάζουν να εγκαταστήσουν 3Δ εκτυπωμένα κτίρια στο διάστημα. Η NASA προσανατολίζεται στην δημιουργία αποικιών στον Άρη, ενώ η Ευρωπαϊκή Διαστημική Υπηρεσία (ESA) σχεδιάζει μία ερευνητική βάση στο φεγγάρι, η οποία θα εκτυπωθεί τρισδιάστατα χρησιμοποιώντας ως υλικό κατασκευής το σεληνιακό έδαφος. Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές στο διάστημα δίνουν τη δυνατότητα στους αστροναύτες να κατασκευάζουν



Εικόνα 2.30: 3Δ εκτύπωση στο διάστημα.

εργαλεία και εξαρτήματα σε συνθήκες μηδενικής βαρύτητας (βλ. εικόνα 2.30). Μείωση του εξοπλισμού, που ενδεχομένως θα απαιτηθεί, συνεπάγεται σημαντική μείωση του κόστους των αποστολών. Οι συσκευές πρέπει να αντέχουν τις δονήσεις της εκτόξευσης και να λειτουργούν με ασφάλεια. Η NASA εξετάζει επίσης το ενδεχόμενο εκτύπωσης μικρών δορυφόρων, οι οποίοι θα εκτοξεύονται από τον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό και θα μεταφέρουν δεδομένα στη Γη. [10], [13]

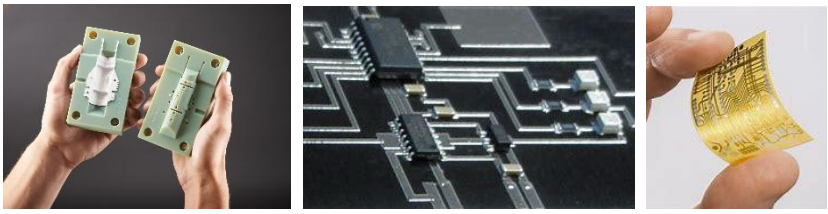
❖ Αεροναυπηγική.

Εικόνα 2.31: Αεροπλάνο από 3Δ εκτύπωση.

Η 3Δ εκτύπωση είναι πολύ ελκυστική για τους κατασκευαστές αεροπλάνων. Με τις δυνατότητες που αυτή δίνει, σχεδιάζονται και βελτιστοποιούνται εξαρτήματα και κομμάτια του αεροπλάνου προσδίδοντας λιγότερο βάρος με τις ίδιες ή και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Αυτό μεταφράζεται αυτομάτως σε μικρότερη κατανάλωση καυσίμου και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Ο σχεδιασμός εξαρτημάτων από τον υπολογιστή και η τύπωσή τους από τρισδιάστατους εκτυπωτές αποτελεί πλέον τετριμμένο φαινόμενο στην αεροπορική βιομηχανία (βλ. εικόνα 2.31). Μία δύσκολη εφαρμογή της 3Δ εκτύπωσης είναι η δημιουργία ενός πλήρους ακροφυσίου ψεκασμού καυσίμου για τουρμπίνες αεροπλάνων, που παράγεται σε μια ενιαία διαδικασία εκτύπωσης. [10]

❖ Μηχανολογία – αυτοκινητοβιομηχανία.

Στον κλάδο της μηχανολογίας συναντάται η κατασκευή καλουπιών, πλαστικών και ανταλλακτικών, καθώς και ανακατασκευές αυτών (βλ. εικόνα 2.32). Ένα σημαντικό πλεονέκτημα για την εφαρμογή αυτής της νέας τεχνολογίας για βιομηχανικές χρήσεις είναι ότι τα τυπωμένα αντικείμενα είναι πιο σταθερά και ελαφρύτερα από τα συμβατικά προϊόντα. Η εκτύπωση των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων είναι μία ακόμη εφαρμογή. Έχει αναπτυχθεί μελάνη (Nano Ink) που λειτουργεί ως ηλεκτρικός αγωγός και μπορεί να τυπωθεί απευθείας πάνω σε πλαστικό ή άλλα υλικά (βλ. εικόνα 2.32), καθιστώντας κατά αυτό τον τρόπο δυνατή την ενσωμάτωση απλών κυκλωμάτων σε τυπωμένα αντικείμενα.



Εικόνα 2.32: Εκτύπωση καλουπιών (αριστερά), Κυκλωμάτων (μέση), ηλεκτρονικών εξαρτημάτων (δεξιά).

Η έκρηξη της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης έχει αρχίσει να μεταλλάσσει τον κλάδο της αυτοκινητοβιομηχανίας. Ολόκληρα αμαξώματα, πλήρως λειτουργικά ποδήλατα και ακόμα και μη επανδρωμένα αεροσκάφη έχουν δημιουργηθεί με τη χρήση τέτοιων εκτυπωτών (βλ. εικόνα 2.33). Ανταλλακτικά και μηχανές θα μπορούν να κατασκευάζονται ταχύτερα και φθηνότερα από ποτέ. Κάθε αυτοκίνητο ή μέρος του θα μπορεί να προσαρμόζεται για να ταιριάζει σε κάθε αγοραστή ξεχωριστά.

Εικόνα 2.33: Εκτύπωση αμαξώματος (αριστερά), εξαρτήματα Formula 1 (μέση), εξαρτήματα οχημάτων (δεξιά).

Η αυτοκινητοβιομηχανίες, την χρησιμοποιούν επίσης για να παράγουν νέα πρωτότυπα μοντέλα αυτοκινήτου από συνθετική ρητίνη. Κατασκευαστές αυτοκινήτων της Formula 1 (βλ. εικόνα 2.33), χρησιμοποιούν την ίδια τεχνολογία και για βελτιστοποίηση αεροδυναμικής. Ένας τομέας στον οποίο οι 3Δ εκτυπωτές δείχνουν ένα πολλά υποσχόμενο μέλλον, και χρησιμοποιούνται ήδη, είναι στην κατασκευή ανταλλακτικών. Δυσεύρετα εξαρτήματα για μοντέλα – αντίκες μπορούν να αντικατασταθούν είτε μέσω της αντίστροφης σχεδίασης (Reverse engineering) (βλ. εικόνα 2.33), είτε μέσω της επανασχεδίασης. Επιπρόσθετα οι κατασκευαστές έχουν ξεκινήσει τη δημιουργία αποθετηρίων 3Δ μοντέλων εξαρτημάτων, με σκοπό στο μέλλον την παραγωγή τους υστέρα από απαίτηση του πελάτη, ανεξαρτήτως παλαιότητας με λογικό κόστος και μείωση του κόστους παραγωγής αλλά και της διατήρησης μεγάλου αποθέματος σε αποθηκευτικούς χώρους. [10]

❖ <u>Ιατρική – βιοιατρική – οδοντιατρική – φαρμακευτική.</u>

Ιατρικός εξοπλισμός, ακουστικά βαρηκοΐας εμφυτεύματα, και κατασκευή προσθετικών μελών, είναι μόνο μερικές ιατρικές εφαρμογές. Το κύριο πλεονέκτημα είναι ότι τα νέα προσθετικά μέλη κατασκευάζονται εύκολα, με μικρότερο κόστος, προσαρμοσμένα στις ανάγκες κάθε ατόμου ξεχωριστά (βλ. εικόνα 2.34). Επίσης με τη τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να κατασκευαστεί τρισδιάστατο μοντέλο περιοχής με κύριο στόχο την επισκόπηση για επιλογή της κατάλληλης θεραπευτικής προσέγγισης (χειρουργικός εμβολισμός, χειρουργική επέμβαση, ακτινοχειρουργική), εκτίμηση ρίσκου σε χειρουργικές επεμβάσεις και εκπαίδευση του επεμβαίνοντος σε λεπτές κινήσεις στο τρισδιάστατο ρεαλιστικό μοντέλο της συγκεκριμένης περιοχής προχειρουργικά (βλ. εικόνα 2.34).

Εικόνα 2.34: Προσθετικά μέλη (αριστερά), Προχειρουργικά μοντέλα (μέση), Καλούπι εμφυτευμάτων (δεξιά).

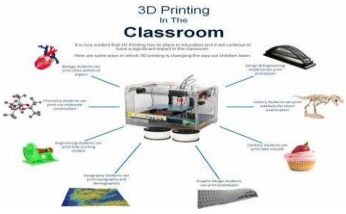
Επίσης άλλες εφαρμογές είναι η δοκιμή ή προσαρμογή μεταλλικών ή άλλων προθέσεων σε τρισδιάστατο μοντέλο (π.χ. κρανίο) πριν την εφαρμογή τους στον ασθενή, εξοικονομώντας πολύτιμο εγχειρητικό χρόνο, όπως επίσης και η 3Δ εκτύπωση εξατομικευμένου για κάθε ασθενή μοντέλου (καλούπι) για εμφύτευμα ισχίου με τη διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης και η συνακόλουθη κατασκευή εξατομικευμένου εμφυτεύματος ισχίου για το συγκεκριμένο ασθενή (βλ. εικόνα 2.34). Επιπλέον εφαρμόζεται για τρισδιάστατη εκτύπωση δομών (π.χ. γνάθων) για εκπαιδευτικούς λόγους (π.χ. τοποθέτηση εμφυτευμάτων) ή για λόγους επίδειξης / επεξήγησης σε ασθενείς / φοιτητές. Ένας άλλος κλάδος ιδιαίτερης βαρύτητας και σημαντικών απαιτήσεων είναι η βιοιατρική. Ο στόχος είναι η δυνατότητα να «εκτυπώνονται» τρισδιάστατα συμπληρωματικοί ιστοί, οι οποίοι με τη σειρά τους θα συμβάλλουν στην αναγέννηση των οργάνων, όπως είναι οι νευρώνες, τα τμήματα αρτηριών και οι χόνδροι για τις αρθρώσεις δημιουργούνται, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μεταμοσχεύσεις (βλ. εικόνα 2.35). Μέχρι στιγμής, ήδη υπάρχουν εκτυπωμένα μέρη ιστών, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε δοκιμές νέων φαρμάκων. Η παρασκευή οδοντιατρικών γεφυρών και η κατασκευή εκμαγείων, μπορεί να αναζητηθεί σε λύσεις 3Δ εκτύπωσης κατά τις οποίες η συσκευή χτίζει τη δομή σε στρώματα από ρητινώδες υλικό. Τα ρητινούχα αυτά μοντέλα μπορούν στη συνέχεια να χυτευτούν με την μέθοδο του χαμένου κεριού και να αντικατασταθούν από μέταλλο. Έτσι, επιπλέον μπορούν να εκτυπωθούν πρωτότυπα για

Εικόνα 2.35: Εκτύπωση ιστών για μεταμόσχευση.

χύτευση σκελετών μερικής οδοντοστοιχίας, συγκρατητικές συσκευές για ορθοδοντική χρήση, προχειρουργικοί νάρθηκες για τοποθέτηση εμφυτευμάτων. Η εκτύπωση ακολουθεί τη ψηφιακή απεικόνιση / σχεδιασμό των εκμαγείων / αποκαταστάσεων. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με ενδοστοματικές συσκευές καταγραφής, είτε ψηφιοποιώντας ένα συμβατικό αποτύπωμα. Οι ερευνητές των φαρμακευτικών πειραματίζονται επίσης με φάρμακα. Ένας υπολογιστής παρέχει τον τύπο και ο εκτυπωτής συνθέτει το χάπι από μεμονωμένα συστατικά, σύμφωνα με τις ιδιαίτερες ανάγκες του ασθενούς. [10], [14], [15]

❖ Εκπαίδευση.

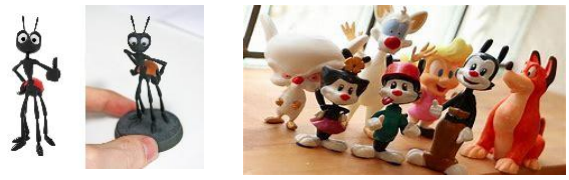
Με την απλή δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων δίνεται η δυνατότητα να γίνει το μάθημα πιο δια δραστικό και δημιουργικό. Ο ερευνητής ή ο ακαδημαϊκός μπορεί να πειραματιστεί σε πρωτότυπα, φτιαγμένα με ακρίβεια και ταχύτητα με βάση τις αποκλειστικές του ανάγκες διευκολύνοντας την εργαστηριακή έρευνα ή να εργαστεί σε ρεαλιστικά αντίγραφα μέσω της χρήσης της τρισδιάστατης σάρωσης (βλ. εικόνα 2.36). Ο καθηγητής και ο μαθητής αποκτούν ένα νέο εργαλείο έρευνας και μάθησης. Η ευελιξία της τεχνολογίας 3Δ σημαίνει ότι ο τομέας της έρευνας και της μάθησης απλοποιείται και επεκτείνεται επιτρέποντας την ανάπτυξη της τεχνολογίας, της επιστήμης και της εκπαίδευσης. Η τρισδιάστατη εκτύπωση προσφέρει μια επαναστατική αναβάθμιση στην εκπαίδευση. [13], [16]



Εικόνα 2.36: Χρήσεις 3Δ εκτυπώσεων στην εκπαίδευση.

❖ Παραγωγή καταναλωτικών αγαθών – ψυχαγωγία.

Οι πιο αισιόδοξοι προβλέπουν ότι, μια μέρα στο μέλλον, κάθε νοικοκυριό θα έχει τον δικό του τρισδιάστατο εκτυπωτή, τον οποίο θα χρησιμοποιεί σε τακτική βάση για τις ανάγκες του σπιτιού (βλ. εικόνα 2.37). Παιχνίδια για τα παιδιά, εργαλεία, ανταλλακτικά, χρήσιμα αντικείμενα, διακοσμητικά είδη μπορούν να εκτυπωθούν. Ο κάθε καταναλωτής με την απλή χρήση στο γραφείο ή στο σπίτι του ενός μηχανήματος τρισδιάστατης εκτύπωσης, μπορεί ο ίδιος να κατασκευάζει αντικείμενα, είτε έχοντας προμηθευτεί τα επιθυμητά ψηφιακά σχέδια είτε έχοντας σαρώσει φυσικά αντικείμενα. Με μία σάρωση και μία εκτύπωση, κρατάει κανείς τον εαυτό του στα χέρια του σε μικρογραφία. Μπορεί κάποιος να δημιουργήσει τα παιχνίδια του υπολογιστή του σε μικρές μινιατούρες, το μοντέλο animation που πάντα ήθελε, μία θήκη κινητού, κ.α. Η 3Δ εκτύπωση γίνεται παιχνίδι-διασκέδαση, ένα χόμπι όπως ο μοντελισμός (βλ. εικόνα 2.37). [13], [16]


Εικόνα 2.37: Χρήση στον μοντελισμό (αριστερά), Εκτύπωση παιχνιδιών (δεξιά).

❖ Αρχαιολογία – τέχνη – κινηματογράφος – κοσμήματα.

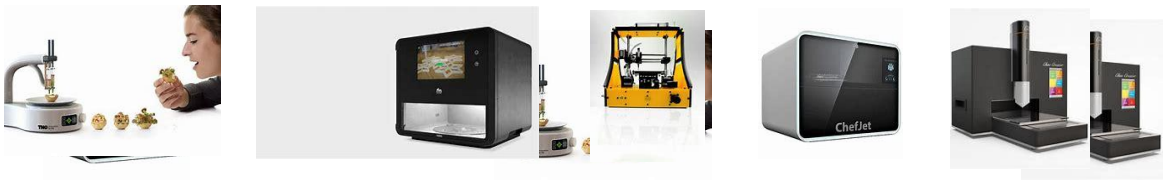
Με τη χρήση των τεχνικών της ψηφιακής φωτογραμμετρίας και της τρισδιάστατης σάρωσης με laser, μπορούν να δημιουργηθούν τρισδιάστατα ψηφιακά μοντέλα των αγαλμάτων, με σκοπό την 3Δ εκτύπωση πιστών αντιγράφων μαρμάρινων αγαλμάτων με πρώτη ύλη τη μαρμαρόσκονη ή τη ρητίνη (βλ. εικόνα 2.38). Στην περίπτωση μαζικής παραγωγής αντιγράφων χρησιμοποιούνται 3Δ εκτυπωμένα καλούπια. Αλλά και στις περιπτώσεις αποκατάστασης αρχαίων ευρημάτων και στα μέρη που δεν έχουν βρεθεί ή είναι κατεστραμμένα, μπορούν να σαρωθούν ή να σχεδιαστούν, να εκτυπωθούν και να προστεθούν. Επιπρόσθετα και ο καλλιτέχνης μπορεί με τη χρήση του υπολογιστή να δημιουργήσει έργα τέχνης, εξατομικευμένα, μοναδικά ή σε πολλαπλά αντίγραφα.

Εικόνα 2.38: Αντίγραφα αγαλμάτων (αριστερά), Χρήση στον κινηματογράφο (μέση), Εκτύπωση κοσμημάτων (δεξιά).

Στον κινηματογράφο η απαίτηση για δημιουργία πρωτοτύπων μοντέλων για τις ανάγκες των ταινιών με απαιτητικά εφέ οδηγούν στην 3Δ εκτύπωση (βλ. εικόνα 2.38). Πέραν των ανωτέρω 3Δ εκτύπωση έχει ιδιαίτερη άνθιση στον τομέα του κοσμήματος. Η διαδικασία παραγωγής κοσμημάτων διευκολύνεται καθώς ο κοσμηματοποιός έχει τη δυνατότητα να τυπώσει καλούπια πολύπλοκων σχεδίων, ή να σαρώσει ένα υπάρχον κόσμημα δημιουργώντας τρισδιάστατο αρχείο, να το επεξεργαστεί και να το επανεκτυπώσει. Τα πρωτότυπα μοντέλα που κατασκευάζονται κυρίως από ρητίνη, τα οποία μπορούν να χυτευτούν και να αντικατασταθούν από μέταλλο (βλ. εικόνα 2.38). [16]

- Μαγειρική – ζαχαροπλαστική.

Η 3Δ εκτύπωση τροφίμων είναι μια τελευταία τάση στη βιομηχανία. Από τη χρηματοδότηση της NASA για την κατασκευή τρισδιάστατου εκτυπωτή που θα φτιάχνει φαγητό για αστροναύτες μέχρι σήμερα, η τιμή των 3Δ εκτυπωτών τροφίμων γίνεται ολοένα και φθηνότερη με περισσότερες επιλογές ως προς τα τρόφιμα που μπορεί να ετοιμάσει. Ένας 3Δ εκτυπωτής τροφίμων, είναι ένας τροποποιημένος 3Δ εκτυπωτής που διαθέτει ειδική υπό πίεση δεξαμενή / δεξαμενές για να εξωθήσει την πρώτη ύλη (τρόφιμο) που είναι υπό τη μορφή υγρού ή πάστας. Στην αγορά έχουν κάνει την εμφάνισή τους αρκετοί 3Δ εκτυπωτές τροφίμων όπως ο TNO, ο οποίος μπορεί να εκτυπώσει 15-20



Εικόνα 2.39: TNO (αριστερά), Foodini, Beehex (μέση), ChefJet, Choc Creator (δεξιά).

τεμάχια τροποποιημένα ζυμαρικά Barilla κάθε δύο λεπτά, ο «Foodini», ο xyz και ο «Beehex», με δυνατότητα να παρασκευάσουν μπισκότα, σοκολάτες, ζυμαρικά και πίτσα τουλάχιστον, με υλικά που επιλέγει και τοποθετεί στη συσκευή ο χρήστης. Άλλοι εκτυπωτές όπως ο «ChefJet» και ο «ChefJet Pro» (για έγχρωμες εκτυπώσεις) έχουν δυνατότητα εκτύπωσης ζάχαρης με προσθήκη σοκολάτας ή σιροπιών σε διάφορες γεύσεις ενώ ο «Choc Creator» θεωρείται ο πρώτος εκτυπωτής σοκολάτας (βλ. εικόνα 2.39). Οι εκτυπωτές αυτοί έχουν εισβάλει σε γαστρονομικούς χώρους για την δημιουργία ξεχωριστών πιάτων και γλυκών, καθώς και γαρνιτούρες για κοκτέιλ και διακοσμητικά γαμήλιας τούρτας, καθότι υπάρχουν σχέδια που κανείς chef ή pastry chef θα μπορούσε να δημιουργήσει. Από την άλλη μεριά άλλοι ειδικοί πιστεύουν ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν δυσάρεστα αλλά άφθονα συστατικά, που δεν καταναλώνονται στην ακατέργαστη μορφή τους αλλά είναι πλούσια σε βιταμίνες, όπως έντομα, σκουλήκια και φύκια, για τη δημιουργία οκίων πιάτων. Αυτό μπορεί να οδηγήσει και στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (όπως π.χ. από την εκτροφή ζώων), αλλά και να προσφέρει μια ανανεώσιμη μορφή τροφής σε έναν αυξανόμενο παγκόσμιο πληθυσμό. [13], [10]

- Όπλα – πυρομαχικά.

Η κατασκευή λειτουργικών όπλων υπάρχει ήδη στο προσκήνιο. Τα περισσότερα από αυτά βασίζονται σε υπάρχοντα σχέδια. Αν και πολλά από αυτά έχουν ως υλικό κατασκευής το θερμοπλαστικό (βλ. εικόνα 2.40), η εκτύπωση μεταλλικών όπλων υφίσταται μολονότι είναι ακριβή

διαδικασία. Είναι όμως αρκετά ώριμη για να χρησιμοποιηθεί από τον στρατό, τόσο ως ενιαία κατασκευή όσο και σε επίπεδο ανταλλακτικών. Τα μεταλλικά κράματα είναι πολύ πιο αξιόπιστα και ασφαλές για τα πυροβόλα όπλα. Η εταιρεία «Solid Concepts» έχει κατασκευάσει το 1911 μοντέλο

Εικόνα 2.40: Όπλο από θερμοπλαστικό (αριστερά), Εκτύπωση μερών του M-16 (μέση και δεξιά).

όπλου, ενώ υπάρχουν και σχέδια για την εκτύπωση του AR-15, που είναι η εμπορική πολιτική έκδοση του M-16 (βλ. εικόνα 2.40). Έρευνα έχει γίνει και στην κατασκευή κατευθυνόμενων πυραύλων. Η εταιρεία Raytheon προσπαθεί να εκτυπώσει τα ηλεκτρονικά και τη δομή και μετά να τα ενσωματώσει ως σύνολο, ενώ στο επόμενο βήμα προσβλέπει να εκτυπώνονται όλα μαζί ως ολοκληρωμένο σύστημα. Το Αμερικάνικο Ναυτικό από τον Σεπτέμβριο του 2016 διενεργεί δοκιμές με τρισδιάστατα τυπωμένα πυρομαχικά. Τα πυρομαχικά αυτά αποδεικνύονται πιο θανατηφόρα σε σχέση με τα παραδοσιακά κατασκευασμένα. Μπορούν να βελτιωθούν περαιτέρω, με το προσαρμόζονται ανάλογα την αποστολή, για να επιτυγχάνονται συγκεκριμένα αποτελέσματα για τους ιδιαίτερους στόχους, ύψη, παράπλευρη ζημιά, ή ακόμα και περιβαλλοντικές εκτιμήσεις. Μερικά από αυτά μπορούν να γίνουν αυτήν την περίοδο με πολύ ακριβά, χειροποίητα πυρομαχικά, αλλά με την 3Δ εκτύπωση θα μπορούν να γίνονται καλύτερα, γρηγορότερα και πιθανώς φτηνότερα. Κατά την παρούσα χρονική στιγμή το κόστος είναι απαγορευτικό για την παραγωγή σημαντικών μερών, χρειάζονται περισσότερες δοκιμές και αξιολογήσεις προτού να μπορέσουν να ενσωματωθούν σε μία μεγαλύτερη αλυσίδα εφοδιασμού. Ωστόσο και ο στρατός σχεδιάζει νέα σχήματα για τις κεφαλές πυραύλων ώστε η έκρηξη να δημιουργεί αποτελέσματα που πληρούν συγκεκριμένα κριτήρια, όπως τα θραύσματα της έκρηξης να διασκορπίζονται σε ειδικά μεγέθη και σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις. Η κατευθυνόμενη έκρηξη μπορεί να οδηγήσει σε επιθέσεις ακόμα μεγαλύτερης ακριβείας. [10]

2.2) Υλικά εκτύπωσης.

Οι δύο κύριες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για τις 3Δ εκτυπώσεις με επιτραπέζιο σύστημα εκτύπωσης είναι η εξώθηση υλικού (Fused Deposition Modeling – FDM) και η Στερεολιθογραφία (SLA). Για αυτούς που τώρα εξοικειώνονται με την ιδέα της 3Δ εκτύπωσης, η τεχνολογία FDM τροφοδοτεί λιωμένο πλαστικό νήμα μέσω ενός ακροφυσίου, το οποίο κινείται και διαμορφώνει ένα σχέδιο, ολοκληρώνοντας ένα στρώμα τη φορά και συνεχίζοντας από κάτω προς τα πάνω την εκτύπωση διαδοχικών στρωμάτων. Η τεχνολογία SLA δημιουργεί τα στρώματα της εκτύπωσης με την επεξεργασία ρητίνης, με συγκεκριμένα μήκη κύματος φωτός. Αυτοί οι δύο τύποι 3Δ εκτυπωτών χρησιμοποιούν διαφορετικά υλικά για την εκτύπωση. Οι εκτυπωτές FDM χρησιμοποιούν νήμα ενώ τα μηχανήματα SLA ρητίνη. [17]

Οι FDM εκτυπωτές χρησιμοποιούν δύο μεγέθη νήματος: 1,75mm ή 2,85mm. Η λάθος επιλογή μεγέθους νήματος μπορεί να προκαλέσει αποτυχημένες εκτυπώσεις ή ακόμη και βλάβη στο μηχάνημα. Κάθε εκτυπωτής FDM έχει ελαφρώς διαφορετικά χαρακτηριστικά, επομένως για την σωστή επιλογή του νήματος πρέπει να ληφθεί υπόψιν η θερμοκρασία, η ταχύτητα και οι λειτουργικές ρυθμίσεις του εκτυπωτή. [17]

Η ρητίνη είναι το υλικό που χρησιμοποιείται για τους SLA 3Δ εκτυπωτές. Είναι ένα ιξώδες υγρό που έρχεται εμφιαλωμένο ή σε φυσίγγια, ενώ το νήμα FDM είναι ένα νήμα πλαστικού που έρχεται τυλιγμένη σε καρούλι. Για την επιλογή του τύπου υλικού που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει πρώτα να καθοριστεί ο σκοπός του μοντέλου και να αποφασιστούν οι ιδιότητες του. [17]

Παρακάτω αναλύονται τα υλικά εκτύπωσης σε τέσσερις κατηγορίες, με βάση τη λειτουργία και τον σκοπό, ώστε να μπορεί να γίνει σωστά η επιλογή του προς χρήση υλικού.

2.2.1) ΓΕΝΙΚΗΣ ΧΡΗΣΗΣ.

FDM

- PLA (πολυλακτικό οξύ).

Το PLA είναι κατασκευασμένο από βιολογικά υλικά, όπως το άμυλο καλαμποκιού, το ζαχαροκάλαμο και η ρίζα ταπιόκας, τα οποία το καθιστούν βιοδιασπώμενο. Όταν θερμαίνεται, εκπέμπει ένα γλυκό άρωμα που μυρίζει παρόμοια με το σιρόπι. Αντίθετα από το ABS, δεν εκπέμπει τοξικές αναθυμιάσεις, οπότε δεν χρειάζεται ειδικό περίβλημα. Σε γενικές γραμμές, το PLA είναι λιγότερο ιδιοσυγκρασιακό και απαιτεί μια χαμηλότερη θερμοκρασία εκτύπωσης από το ABS και δεν χρειάζεται θερμαινόμενη πλάκα κατασκευής. Η συγκόλληση των διαδοχικών στρωμάτων είναι πολύ δυνατή με το PLA, ωστόσο το ίδιο το υλικό είναι εύθραυστο και είναι πολύ πιθανό να σπάσει ή να ραγίσει σε περίπτωση πτώσης. Αν χρειάζεστε κάτι για μηχανικούς σκοπούς, τότε ένα πιο σκληρό υλικό είναι σίγουρα πιο κατάλληλο. [17]

FDM

- HIPS (πολυστυρένιο υψηλής επίδρασης).

Το HIPS χρησιμοποιείται κυρίως ως υλικό υποστήριξης για ABS και λειτουργεί σωστά όταν χρησιμοποιείται με FDM εκτυπωτή διπλής εξώθησης. Είναι ένα εξαιρετικό υλικό υποστήριξης επειδή διαλύεται εύκολα σε Limonene. Αυτό διευκολύνει την αφαίρεση των στηριγμάτων κατά τη διάρκεια του φινιρίσματος, αφήνοντας την τελική επιφάνεια στην επιθυμητή κατάσταση. Αυτό είναι το ιδανικό υλικό για εκτύπωση σχεδίων με προεξοχές ή πολύπλοκων εξαρτημάτων. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σαν PLA από μόνο του, ως ένα υλικό γενικής χρήσης. [17]

FDM

- **PETG (τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο).**

Το PETG είναι τόσο εύκαμπτο και ανθεκτικό, γεγονός που το καθιστά ένα καλό υλικό για λειτουργικά ποιοτικά προϊόντα μηχανικής. Είναι χημικά ανθεκτικό και δεν απορροφά το νερό, όπως πολλά άλλα υλικά. Το PETG έχει παρόμοιο εύρος τιμών με το PLA και το ABS και είναι μηχανικά παρόμοιο με το ABS, αν και μπορεί να εκτυπωθεί χωρίς θερμαινόμενη πλάκα κατασκευής και εξωθείται μεταξύ των 220-250 °C. Η συγκόλληση των στρώσεων είναι πολύ δυνατή, γεγονός που ευνοεί τη χρήση της σε μηχανικά μέρη, drones κ.α.. [17]

SLA

- **Πρότυπη ρητίνη.**

Η τυπική ρητίνη είναι εξαιρετικό υλικό αν δημιουργείτε ένα πρωτότυπο ενός προϊόντος που δεν θα υποστεί έντονη πίεση από λειτουργική χρήση. Υπάρχει σε διάφορα χρώματα και προσφέρει εκτυπώσεις με άψογο φινίρισμα λείας επιφάνειας. Εφόσον οι SLA εκτυπωτές είναι σε θέση να παράγουν λεπτότερες λεπτομέρειες σε εξαρτήματα, αυτή η ρητίνη χρησιμοποιείται συνήθως από μηχανικούς ή σχεδιαστές που δίνουν προτεραιότητα στην εμφάνιση της εκτύπωσης παρά στη λειτουργία. [17]

2.2.2) ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.

FDM

- **ABS (στυρόλιο βουταδιενίου ακρυλονιτριλίου).**

Το ABS έχει υψηλότερο σημείο τήξης από άλλα νημάτια και απαιτεί μια θερμαινόμενη πλάκα κατασκευής για την αποφυγή στρέβλωσης. Είναι επίσης ελαφρώς πιο στιβαρό από το PLA. Η στιβαρότητα και η ανθεκτικότητα του δίνουν στην εκτύπωσή μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, ωστόσο έχει κακή αντοχή στην υπεριώδη ακτινοβολία, οπότε δεν ενδείκνυται η χρήση της εκτύπωσης σε εξωτερικούς χώρους. Είναι επίσης γνωστό ότι το ABS εκπέμπει επιβλαβείς αναθυμιάσεις κατά την εκτύπωση, επομένως συνιστάται η χρήση ειδικού περιβλήματος και εξαερισμού. [17]

SLA

- **Σκληρή ρητίνη.**

Αυτή η ρητίνη είναι ειδικά κατασκευασμένη για ανθεκτικότητα και στιβαρότητα κρούσης. Όπως και το πλαστικό ABS, η σκληρή ρητίνη χρησιμοποιείται ιδανικά για λειτουργικά, μηχανικά εξαρτήματα. Μπορεί να αντέξει σε συνθήκες υψηλής πίεσης και τάσης στρέβλωσης πριν να υποστεί βλάβες. [17]

FDM

- **PLA ινών άνθρακα.**

Το PLA Fibre Carbon είναι δημοφιλές λόγω της υψηλής του στιβαρότητας και ανθεκτικότητας. Το νήμα από ανθρακονήματα της Proto-Pasta συνδυάζει PLA με 15% ίνες άνθρακα κατ' όγκο. Αυτό το νήμα έχει την τάση να είναι εύθραυστο, οπότε χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή κατά τον εφοδιασμό του εκτυπωτή. Η στιβαρότητά του είναι τέλεια για εκτύπωση drone, αυτοκινήτων τηλεχειρισμού, ελίκων και πλαισίων. Οι πρόσθετες ίνες άνθρακα στο νήμα προϋποθέτουν, για το βέλτιστο αποτέλεσμα, μεγαλύτερα μεγέθη ακροφυσίων, ξεκινώντας από το ενδεικτικό των 0,4 mm. [17]

FDM

- **Εύκαμπτο νήμα (TPE και TPU).**

Τα εύκαμπτα νήματα είναι συνήθως κατασκευασμένα από πολυουρεθάνη ή πολυαιθυλένιο. Υπάρχουν δυσκολίες κατά την εκτύπωση, καθώς το νήμα τείνει να λυγίζει στον extruder, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει στρεβλώσεις στην εκτύπωση. Για καλύτερα αποτελέσματα συνιστάται η εκτύπωση με extruder άμεσης κίνησης και με υψηλότερες θερμοκρασίες εξέλασης. Η επιβράδυνση των ταχυτήτων εκτύπωσης βοηθάει στην αποφυγή των στρεβλώσεων. [17]

SLA

- **Ευέλικτη ρητίνη.**

Το SLA διαθέτει επίσης εύκαμπτη ρητίνη, που επιτρέπει την εκτύπωση εύκαμπτων και λειτουργικών εξαρτημάτων. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για πρωτότυπα εργονομικών εφαρμογών, όπως χερούλια και λαβές κάθε είδους. Αν και οι εκτυπωτές FDM απαιτούν μερικές φορές ειδικό ακροφύσιο για εκτύπωση ευέλικτου νήματος, οι εκτυπωτές ρητίνης δεν απαιτούν ειδικά πρόσθετα για εκτύπωση με εύκαμπτη ρητίνη. [17]

SLA

- **Ρητίνη υψηλής θερμοκρασίας.**

Τα εργαστήρια μόλις έθεσαν σε κυκλοφορία ένα υλικό, το οποίο έχει θερμοκρασία θερμικής εκτροπής στους 289°C στα 45 MPa, το υψηλότερο μέγεθος θερμικής αντοχής στην αγορά σε αυτό το επίπεδο πίεσης. Αυτό το καθιστά το τέλειο υλικό για εφαρμογές που εκθέτουν την εκτύπωση σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως πρωτότυπα μούχλας, περιβαλλοντικές δοκιμές και ρευστοποιήσεις. [17]

SLA

- **Ανθεκτική ρητίνη.**

Η ανθεκτική ρητίνη είναι ρητίνη χαμηλής τριβής και μεγάλης αντοχής στην κρούση, που προσιδιάζει στο πολυπροπυλένιο. Αυτό το υλικό είναι πολύ καλό για πρωτότυπα καταναλωτικών προϊόντων και εξαρτήματα που θα υποστούν φθορά, όπως σφαιρικές συνδέσεις και έδρανα. [17]

2.2.3) ΑΙΣΘΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.

FDM

- **Νήματα ξύλου.**

Τα νήματα όπως το Woodfill και το Laywood είναι κατασκευασμένα από έναν συνδυασμό εκχύλισης πλαστικού με ίνες ξύλου και πολυμερή συνδετικά, που του επιτρέπουν εξώθηση παρόμοια με το PLA. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δημιουργήσει ένα εφέ καθαρών στρωμάτων σαν το πραγματικό ξύλο και έχει μια εμφάνιση και αίσθηση ξύλου στην εκτύπωση. Επειδή τα νήματα ξύλου είναι βασισμένα σε PLA, δεν απαιτούν θερμαινόμενη πλάκα κατασκευής για την εκτύπωση. Μπορεί εύκολα να αλλαχθεί το χρώμα του νήματος αλλάζοντας τη θερμοκρασία. [17]

FDM

- **Θερμοχρωμικό PLA.**

Αυτό το νήμα έχει την ιδιότητα να αλλάζει χρώμα με την έκθεση σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Διαφορετικές ποικιλίες φέρουν επίσης διαφορετικά χρώματα – κάποια μετατρέπονται από μπλε σε πράσινο και άλλα από γκρι σε λευκό – και η λίστα συνεχίζεται. Το νήμα βασίζεται σε υλικό PLA οπότε δεν απαιτεί θερμαινόμενη πλάκα κατασκευής. Υπάρχει ένα ακόμη νήμα με βάση το PLA, το οποίο αλλάζει χρώματα με την έκθεση στο φως. Το θερμοχρωμικό PLA έχει έναν αριθμό τακτικών εφαρμογών, από τη βιομηχανία κινητών τηλεφώνων μέχρι και καταναλωτικά προϊόντα. [17]

FDM

- **PLA με σκόνη μετάλλου.**

Τα μεταλλικά νήματα είναι κατασκευασμένα συνδυάζοντας PLA με σκόνη μετάλλου. Τα τέσσερα πιο δημοφιλή μεταλλικά σύνθετα υλικά είναι ο μπρούτζος, ο χαλκός, ο χάλυβας και ο σίδηρος. Η μεταλλική σκόνη κάνει την εκτύπωση περίπου τέσσερις φορές βαρύτερη από το τυπικό PLA. Αν και έχει την εμφάνιση και την αίσθηση του μετάλλου όταν εκτυπωθεί, απαιτείται μετα-επεξεργασία για να επιτευχθεί ένα πλήρες αποτέλεσμα. Πριν από τη μετα-επεξεργασία, το μπρούτζινο PLA συνήθως έχει μια θαμπή, τραχιά εμφάνιση. [17]

2.2.4)ΕΙΔΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.

FDM

- **Αγώγιμο PLA.**

Το αγώγιμο PLA προσφέρει μια σειρά επιλογών για βασικές, χαμηλής τάσης εφαρμογές. Παραδείγματα εφαρμογών περιλαμβάνουν εργασίες με LED και Arduino. Γενικός κανόνας του αγώγιμου PLA είναι η επιτυχής χρήση του σε οποιαδήποτε εφαρμογή μπορεί να τρέξει μέσω μιας αντίστασης των 1000 Ω. Αν και το υλικό είναι ανθεκτικό, δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για βαριές μηχανικές εφαρμογές. Το αγώγιμο PLA μπορεί συγκολληθεί σε εκτύπωση τυπικού PLA, που είναι πολύ χρήσιμο αν επιθυμείτε να εκτυπώστε τα κυκλώματα πάνω σε μια κανονική εκτύπωση PLA. [17]

SLA

- **Χυτευόμενη ρητίνη.**

Η χυτευόμενη ρητίνη χρησιμοποιείται για την κατασκευή καλουπιών επένδυσης χυτεύματος σε υψηλή λεπτομέρεια. Γίνεται η σχεδίαση του CAD, ακολουθεί η εκτύπωση με ένα χυτευόμενο υλικό, και έπειτα χρησιμοποιείται αυτό το εκτυπωμένο μέρος στην χύτευση επένδυσης, όπως γίνεται με ένα μοντέλο κεριού. Οι εύκαμπτες ρητίνες καίγονται καθαρά αφήνοντας ελάχιστη τέφρα ή μικρά υπολείμματα, γεγονός που το καθιστά ιδανικό για εξαρτήματα όπως κοσμήματα, μινιατούρες ή μικρά μηχανικά εξαρτήματα. [17]

SLA

- **Κεραμική ρητίνη.**

Η κεραμική ρητίνη αποτελεί καλή επιλογή για καλλιτέχνες ή άτομα με εφαρμογές πολύ υψηλών θερμικών απαιτήσεων. Η διαδικασία εκτύπωσης είναι παρόμοια με τις άλλες ρητίνες, ωστόσο υπάρχει η δυνατότητα να το γυαλίστεγυαλιστεί το στο τέλος της εκτύπωσης. [17]

SLA

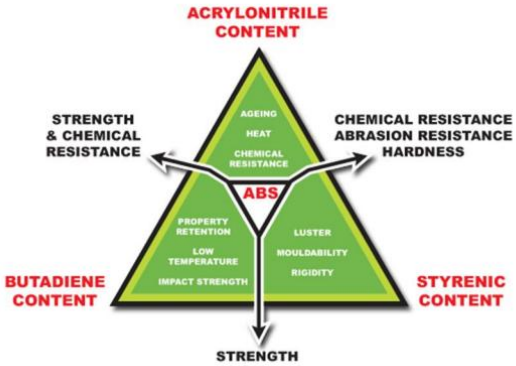
- **Βιοσυμβατή ρητίνη.**

Υπάρχουν πολλές διαφορετικές βιοσυμβατές ρητίνες στην αγορά, με διαφορετικές πιστοποιήσεις. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία χειρουργικών οδηγών, αποκλειστικά για την επίτευξη αυξημένης ακρίβειας κατά τη διάρκεια της χειρουργικής επέμβασης και τη βελτιστοποίηση των κλινικών αποτελεσμάτων. [17]

2.2.5) ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ABS.

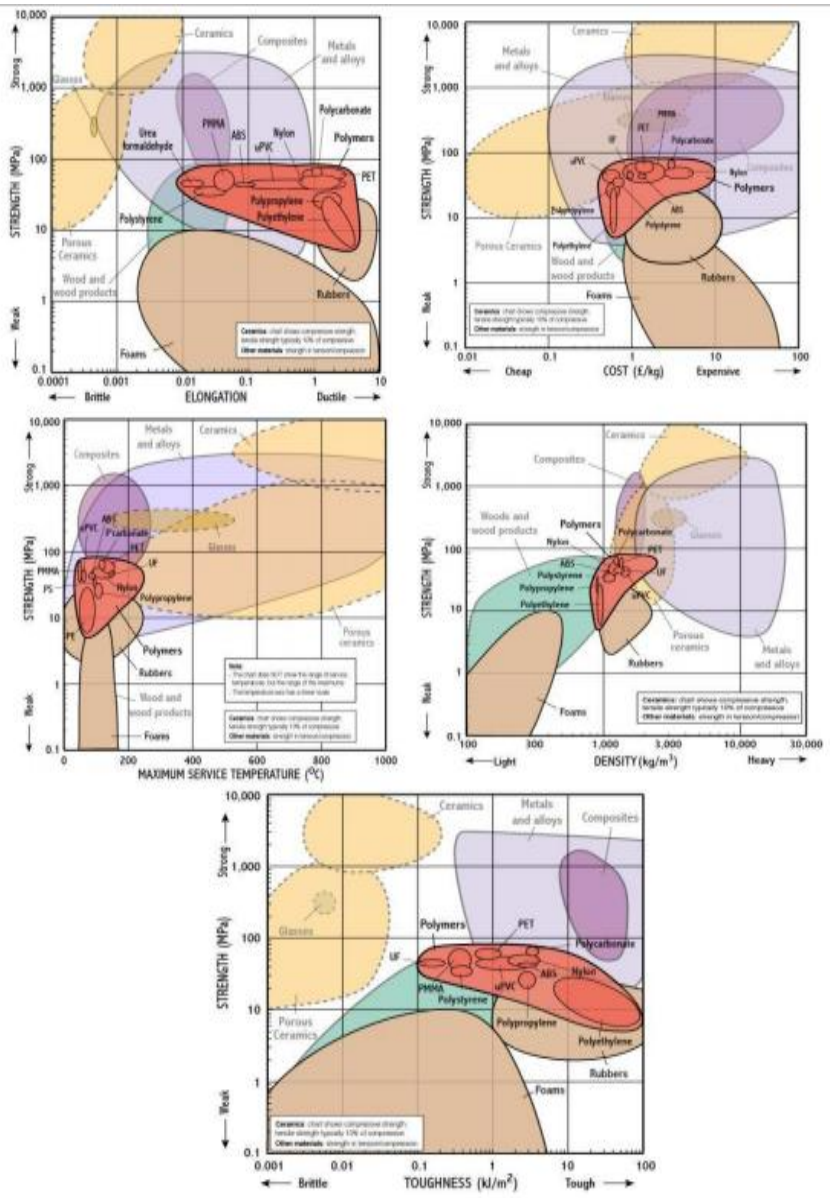
Το ABS ανήκει στην κατηγορία τον θερμοπλαστικών των πολυμερών υλικών όπου έχει την ικανότητα με τη βοήθεια της θερμότητας να τήκεται και στην συνέχεια να σταθεροποιείται με τη ψύξη. Τα πολυμερή υλικά έχουν τα εξής πλεονεκτήματα : 1) Είναι ελαφριά. 2) Είναι ανθεκτικά. 3) Έχουν χαμηλό κόστος. 4) Όσο αναφορά τη βιομηχανική παραγωγή τους, έχουν εύκολη επεξεργασία η όποια συνεπάγεται ευκολία της παραγωγής τους. 5) Έχουν αντίσταση στη διάβρωση. 6) Είναι μονωτικά υλικά. Τα παραπάνω πλεονεκτήματα δεν σημαίνει ότι δεν έχουν και κάποια μειονεκτήματα σε μικρότερο βαθμό όπως: 1) Είναι εύφλεκτα. 2) Έχουν χαμηλό σημείο τήξεως. 3) Συμβάλουν στην περιβαλλοντική ρύπανση. Το ABS ως πλαστικό υλικό έχει πολλά θετικά και αρνητικά. Τα σημαντικότερα θετικά του είναι ότι έχει μεγάλη αντοχή σε ερπυσμό (θερμοκρασία), αντοχή σε κρούση και μέτριες μηχανικές ιδιότητες. Κάποια πλεονεκτήματα ακόμα που παρέχει το ABS είναι τα παρακάτω:

- Υψηλή ολκιμότητα σε συνδυασμό με την υψηλή αντοχή σε κρούση.
- Υψηλή αντοχή στην υπεριώδη ακτινοβολία.
- Είναι ανακυκλώσιμο.
- Υψηλή αντίσταση στη τριβή.
- Υψηλή σκληρότητα.
- Εύκολη συγκόλληση.
- Είναι ελαφρύ.
- Το χρώμα του είναι φυσικό.
- Αντοχή σε δραστικά χημικά αντιδραστήρια.
- Η επιφάνεια του είναι αρκετά λεία.
- Μέσω του δαχτυλιδιού καουτσούκ όπου επιτρέπονται πολλές συμβατές μέθοδοι συναρμολόγησης σωληνώσεων.
- Είναι μη τοξικό και δεν έχει οσμές.
- Υψηλές ανοχές παραμόρφωσης για υπόγειες εφαρμογές (High strain tolerance for buried applications).



Εικόνα 2.41: Φυσικές & Μηχανικές ιδιότητες ABS.

Πλεονεκτήματα ακόμα μπορούν να βρεθούν αναλύοντας εις βάθος τα συστατικά από τα όποια αποτελείται το ABS. Ποιο συγκεκριμένα αναλύοντας τη δομή του βλέπουμε ότι το στυρένιο παρέχει καλή επεξεργασιμότητα, το ακρυλονιτρίλιο έχει την ιδιότητα να έχει αντοχή στην θερμότητα αλλά και χημική αντίσταση και τέλος το βουταδιένιο έχει την ικανότητα να παρέχει στο προϊόν περισσότερη σκληρότητα και ανθεκτικότητα σε χαμηλές θερμοκρασίες.



Εικόνα 2.42: Διαγραμματικές απεικονίσεις όλων των πολυμερών: δύναμη προς επιμήκυνση, δύναμη προς το κόστος, δύναμη προς μέγιστη θερμοκρασία, δύναμη προς πυκνότητα και δύναμη προς σκληρότητα.

Η προσθήκη διαφόρων πρόσθετων ουσιών που μπορεί να είναι ενισχυτικά, άλλα πολυμερή, χρωστικές ύλες, σταθεροποιητές για την εμπόδιση της φθοράς από το φως τους περιβαλλοντικούς παράγοντες και τη θερμοκρασία, λιπαντικά για την βελτιωμένη μορφοποίηση και μείωση του ιξώδους έχουν σαν σκοπό να βελτιώσουν της μηχανικές τους ιδιότητες, να αυξήσουν την αντοχή τους στην ακαμψία και την επίτευξη καλύτερου συνδυασμού ιδιοτήτων. Ο γραμμικός συντελεστής του ABS είναι 10,1x10^-5m/m °C, η πυκνότητα του είναι 1.04-1.08 g cm^-3, το Ph ανέρχεται 8.0- 9.5, Tensile strength 41-45 Mpa, Young's modulus 2,1-2,4 Gpa. Ακόμα το ABS έχει ισχυρή ανθεκτικότητα σε πάρα πολλά χημικά μέσα όπως είναι σε υδατικά οξέα, συμπυκνωμένα υδροχλωρικά και φωσφορικά οξέα, αλκάλια, αλκοόλες και ζωικά, φυτικά και ορυκτά έλαια, αλλά προσβάλλεται από συμπυκνωμένα θειικά και νιτρικά οξέα. Επίσης είναι διαλυτό σε διχλωριούχο αιθυλένιο, εστέρες, κετόνες ή ακετόνη. Όλα τα παραπάνω αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα (βλ. πίνακα 2-1).

Πίνακας: Πίνακας με ιδιότητες ABSPLUS.

Mechanical Properties[1]	Test Method	English	Metric
Tensile Strength (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	5,300 psi	37 MPa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	330,000 psi	2,320 MPa
Tensile Elongation (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	3%	3%
Flexural Delamination	ASTM D790	4,500 psi	31 MPa
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	7,600 psi	53 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	320,000 psi	2,250 MPa
IZOD Impact, notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	2.0 ft-lb/in	106 J/m

Thermal Properties[2]	Test Method	English	Metric
Heat Deflection (HDT) @ 66 psi	ASTM D648	204°F	96°C
Heat Deflection (HDT) @ 264 psi	ASTM D648	180°F	82°C
Glass Transition Temperature (Tg)	DMA (SSYS)	226°F	108°C
Melt Point	---------	Not Applicable[3]	Not Applicable[3]
Coefficient of Thermal Expansion	ASTM E831	4.90E-05 in/in/°F	---------

Electrical Properties[4]	Test Method	Value Range
Volume Resistivity	ASTM D257	3.0x10e14 - 6.0x10e13 ohms
Dielectric Constant	ASTM D150-98	2.9 - 2.6
Dissipation Factor	ASTM D150-98	.0053 - .0046
Dielectric Strength	ASTM D149-09, Method A	320 - 100 V/mm
Dielectric Strength	IEC 60112	28.0 kV/mm

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω υπάρχουν και ορισμένα αρνητικά τα οποία είναι:

- Κακές μηχανικές ιδιότητες.
- Γήρανση.
- Υψηλό κόστος.
- Χαμηλή αντοχή στης καιρικές συνθήκες.

Ακόμα, ένα μεγάλο πρόβλημα για το ABS και τη χρήση του είναι η υγρασία. Σε κάθε χρήση του θα πρέπει να έχει προβλεφθεί η όσο είναι το δυνατό η 'απομόνωση' της υγρασίας από το ABS γιατί αν εισχωρήσει μέσα σε αυτό τις περισσότερες φορές του προκαλεί σημαντικές φθορές και υποβάθμιση της δομής του. Άξιο αναφοράς επίσης είναι η έκθεση του σε UV. Αν γίνει αυτή για μεγάλο χρονικό διάστημα σε παρατεταμένη χρήση δημιουργείται πρόβλημα στη σύσταση του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να παρουσιάσει χημικά και μηχανικά προβλήματα που είναι αποτέλεσμα της σταδιακής αλλοίωσης της σύστασης του. Ιδιότητες με βάση τον τρόπο εκτύπωσης ABS: Η θερμοκρασία την ώρα της εκτύπωσης του τεμαχίου έχει καθοριστικό ρόλο στις ιδιότητες και συνεπώς στη χρήση του. Συγκεκριμένα εκτυπώνοντας το ABS με χαμηλή θερμοκρασία έχουμε σαν αποτέλεσμα την αύξηση τις αντοχής του σε κρούση, καθώς και σε σκληρότητα. Αντίθετα αν η

εκτύπωση πραγματοποιηθεί σε υψηλότερη θερμοκρασία το υλικό θα έχει μεγαλύτερη αντοχή στη θερμοκρασία όπως αναφέρονται στο παρακάτω πίνακα (βλέπε πίνακα 2-2).

Πίνακας: Ιδιότητες ABS.

Mechanical Properties[1]	Test Method	Imperial	Metric
Tensile Strength, Type 1, 0.125	ASTM D638	3,200 psi	22 MPa
Tensile Modulus, Type 1, 0.125	ASTM D638	236,000 psi	1,627 Mpa
Tensile Elongation, Type 1, 0.125	ASTM D638	6 %	6 %
Flexural Strength	ASTM D790	6,000 psi	41 MPa
Flexural Modulus	ASTM D790	266,000 psi	1,834 MPa
IZOD Impact, notched	ASTM D256	2 ft-lb/in	106.78 J/a
IZOD Impact, un-notched	ASTM D256	4 ft-lb/in	213.56 J/a

Thermal Properties	Test Method	Imperial	Metric
Heat Deflection Temperature @ 66 psi	ASTM D648	195° F	90° C
Heat Deflection Temperature @ 264 psi	ASTM D648	169° F	76° C
Glass Transition Temperature (Tg)	DMA (SSYS)	219° F	104° C
Coefficient of Thermal Expansion	ASTM D696	5.60E-05 in/in/F	- - - - -
Melt Point	- - - - - - - - -	Not Applicable[2]	Not Applicable[2]

Other	Test Method	Value
Specific Gravity	ASTM D792	1.05
Flame Classification	UL 94	HB
Rockwell Hardness	ASTM D785	R105
Dielectric Strength kV/mm	IEC 60112	32
Dielectric Constant @ 60Mhz	IEC 60250	2.4

Κεφάλαιο 3:Παρουσίαση πειραμάτων εφελκυσμού-κάμψης.

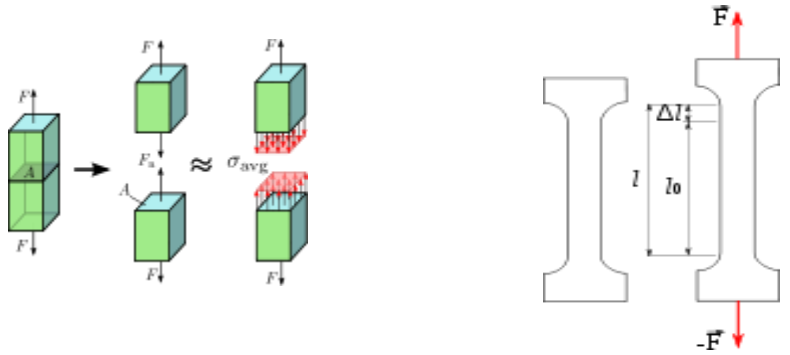
3.1) Πείραμα εφελκυσμού “Ultimate Tensile Strength”.

3.1.1) Εισαγωγή.

Εφελκυσμός ονομάζεται η εντατική κατάσταση κατά την οποία σε ένα σώμα ασκούνται δυνάμεις αντίθετης φοράς που τείνουν να το επιμηκύνουν (βλ. εικόνα 3.1). Ο εφελκυσμός είναι μία από τις δύο μονοαξονικές εντατικές καταστάσεις ενός παραμορφώσιμου στερεού σώματος. Η άλλη μονοαξονική εντατική κατάσταση είναι η θλίψη. Η ισορροπία δυνάμεων είναι μηδέν.

$$\sum \vec{F} = 0.$$

Θεωρώντας νοητή τομή σε κάποια θέση (βλ. εικόνα 3.1) από την ισορροπία δυνάμεων μπορούμε να υπολογίσουμε τις εφελκύστηκες (ορθές) τάσεις στη διατομή. [18]



Εικόνα 3.1: Εφελκύστηκες τάσεις.

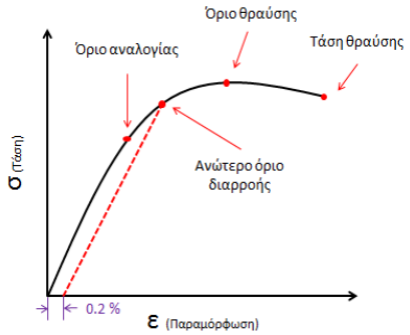
➢ **Δοκιμή εφελκυσμού.**

Η δοκιμή του εφελκυσμού είναι η συνηθέστερη μηχανική δοκιμή. Συνίσταται στην υποβολή δοκιμίου, του προς χαρακτηρισμό υλικού, σε εφελκυστική καταπόνηση κατά τη διάρκεια της οποίας καταγράφεται η προκαλούμενη επιμήκυνση Δl.

σ (Αντοχή εφελκυσμού)	$\sigma = \frac{F}{A}\left[\frac{Nt}{m^2}\right]$	**σθρ.** (Τάση θραύσης)	$\sigma\theta\rho. = \frac{F\theta\rho.}{A}\left[\frac{Nt}{m^2}\right]$
ε (Ειδική επιμήκυνση)	$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}\left[\frac{m}{m}\right]$	**σμη** (Όριο θραύσης)	$\sigma\mu\epsilon\gamma. = \frac{F\mu\epsilon\gamma.}{A}\left[\frac{Nt}{m^2}\right]$
E (Μέτρο Ελαστικότητας)	$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}[Nt/m^2]$		

- ✓ Τάση (Stress): Είναι το πηλίκο της δύναμης που ασκείται κάθετα στη διατομή του δοκιμίου προς την επιφάνεια της διατομής του δοκιμίου.
- ✓ Παραμόρφωση (Strain): Είναι το πηλίκο της επιμήκυνσης προς το αρχικό του μήκος.
- ✓ Μετρό ελαστικότητας (Modulus of elasticity): Είναι το πηλίκο της τάσης προς την παραμόρφωση στην ελαστική περιοχή του δοκιμίου και αντιστοιχεί ποιο αντιπροσωπευτικά στην κλίση του ευθύγραμμου τμήματος του διαγράμματος «σ-ε».
- ✓ Αντοχή διαρροής (ή παραμόρφωσης) (Yield strength): Είναι η τάση πέραν της οποίας το υλικό εισέρχεται στην πλαστική περιοχή δηλαδή είναι η μεγίστη τάση που αντέχει το υλικό πριν την έναρξη της πλαστικής (μόνιμης) του παραμόρφωσης.

- ✓ Ανοχή εφελκυσμού (Tensile Strength): Η μέγιστη τάση στην όποια αντέχει το υλικό πριν την θραύση του. Αντιστοιχεί στο υψηλότερο σημείο της καμπύλης «σ-ε»
- ✓ Τάση θραύσης: Είναι το πηλίκο της δύναμης όπου το δοκίμιο θραύεται προς την αρχική επιφάνεια της διατομής του δοκιμίου.
- ✓ Όριο θραύσης: Είναι το σημείο της καμπύλης «σ-ε» το οποίο αντιστοιχεί στην αντοχή εφελκυσμού.
- ✓ Όριο Διαρροής: Είναι το σημείο της καμπύλης «σ-ε» το οποίο αντιστοιχεί στην αντοχή διαρροής.



Εικόνα 3.2: Διαγραμματική παράσταση σ-ε.

3.1.1.1) Κεντρικός εφελκυσμός.

Όταν η εξωτερική δύναμη ασκείται στο κέντρο βάρους της διατομής ο εφελκυσμός ονομάζεται κεντρικός. Με την προϋπόθεση ότι το στοιχείο είναι ευθύγραμμο, η διατομή παραμένει σταθερή και η εξωτερική δύναμη ασκείται ομοιόμορφα ισχύει ότι οι τάσεις κατανέμονται ομοιόμορφα στη διατομή.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

*όπου **σ** την εφελκυστική τάση, **F** την εξωτερική δύναμη και **A** το εμβαδόν της διατομής*

Ακόμα και στην περίπτωση που η εξωτερική δύναμη δεν ασκείται ομοιόμορφα στα άκρα του στοιχείου, μετά από κάποιο μήκος η κατανομή γίνεται ομοιόμορφη λόγω της αρχής του Saint Venant Στα γραμμικά ελαστικά υλικά ισχύει ο νόμος του Hooke και η επιμήκυνση θα είναι:

$$\Delta L = \frac{\sigma}{E} L$$

*όπου **σ** η εφελκυστική τάση, **E** το μέτρο ελαστικότητας του υλικού και **L** το αρχικό μήκος*

Για να ισχύει ο νόμος του Hooke η τάση δεν πρέπει να ξεπερνά μια τιμή χαρακτηριστική του υλικού. Στα ψαθυρά υλικά η υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής οδηγεί σε θραύση, ενώ στα όλκιμα υλικά αν οι τάσεις ξεπεράσουν το όριο διαρροής αρχικά θα έχουμε πλαστική παραμόρφωση και τελικά θραύση του στοιχείου.

3.1.1.2) Έκκεντρος εφελκυσμός.

Όταν η εξωτερική δύναμη δεν ασκείται στο κέντρο βάρους της διατομής ο εφελκυσμός ονομάζεται έκκεντρος. **Εκκεντρότητα e** ονομάζεται η απόσταση της συνισταμένης της δύναμης από το κέντρο βάρους της διατομής. Ένας απλός τρόπος να υπολογιστούν οι ορθές τάσεις της διατομής είναι να μεταφερθεί η εξωτερική δύναμη στο κέντρο βάρους με ταυτόχρονη εφαρμογή καμπτικής ροπής :

$$M = Fe$$

Η λύση προκύπτει από την επαλληλία του κεντρικού εφελκυσμού λόγω της F και της κάμψης λόγω της M. Προϋπόθεση για να ισχύει η επαλληλία είναι οι συνολικές παραμορφώσεις να παραμείνουν εντός της ελαστικής περιοχής.

$$\sigma = \sigma_N + \sigma_M = \frac{F}{A} + \frac{Fe}{I_z} y$$

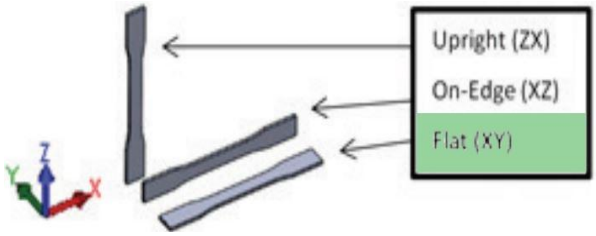
όπου:

- I_z : Η ροπή αδράνειας ως προς τον κεντροβαρικό άξονα που είναι παράλληλος στον άξονα της κάμψης.
- y : απόσταση του σημείου με τάση σ από τον παραπάνω άξονα.

3.1.2) Παρουσίαση πειράματος εφελκυσμού.

Στην πτυχιακή αυτή εξετάζεται η επίδραση της ταχύτητας εφελκυσμού στις μηχανικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν. Η ταχύτητα εφελκυσμού αντιστοιχεί σε ταχύτητα παραμόρφωσης εφελκυσμού. Συνεπώς εξετάζεται η μεταβολή των τιμών των μηχανικών παραμέτρων όπως η Αντοχή Διαρροής (σy), η Αντοχή Εφελκυσμού (σTS) και το Μέτρο Ελαστικότητας (E). Για τις δοκιμασίες επιλέχθηκε το πρότυπο ISO 527. Η ανάλογη δοκιμή για τη μέτρηση των εφελκυστικών ιδιοτήτων στο σύστημα ASTM είναι D638. Τα δείγματα εκτυπώθηκαν σε εκτυπωτή AXIOM 3D. Τα δείγματα είχαν σχήμα "κόκαλου σκύλου" βλ. εικόνα 3.3). Κάθε νήμα εκτυπώθηκε με τις δικές του μοναδικές ρυθμίσεις εκτύπωσης, όπως ταχύτητα, ταχύτητα ροής και οι ακριβείς ρυθμίσεις που χρησιμοποιήθηκαν για ένα συγκεκριμένο νήμα μπορούν να βρεθούν στην ενότητα σημειώσεων κάθε φύλλου δεδομένων υλικού. Ωστόσο, ορισμένα χαρακτηριστικά ήταν συνεπή σε όλα τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι τα ακόλουθα:

- Με συμπλήρωση 90%
- Στην ίδια κατεύθυνση
- Στην ίδια ποσότητα
- Σε κλειστούς θαλάμους
- Χρησιμοποιώντας ένα θερμαινόμενο τραπέζι εκτύπωσης
- Τυπωμένο "επίπεδο" στο επίπεδο XY (προσανατολισμό 45ο οριζόντια)

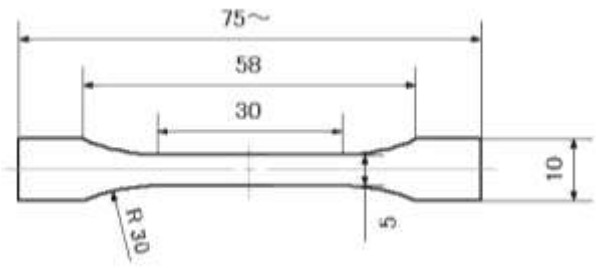


Εικόνα 3.3: Σχήμα τυπωμένου δείγματος.

Εκτυπώθηκαν τουλάχιστον έξι δείγματα σε κάθε υλικό και πραγματοποιήσαμε δοκιμές για οκτώ διαφορετικά υλικά. [19]

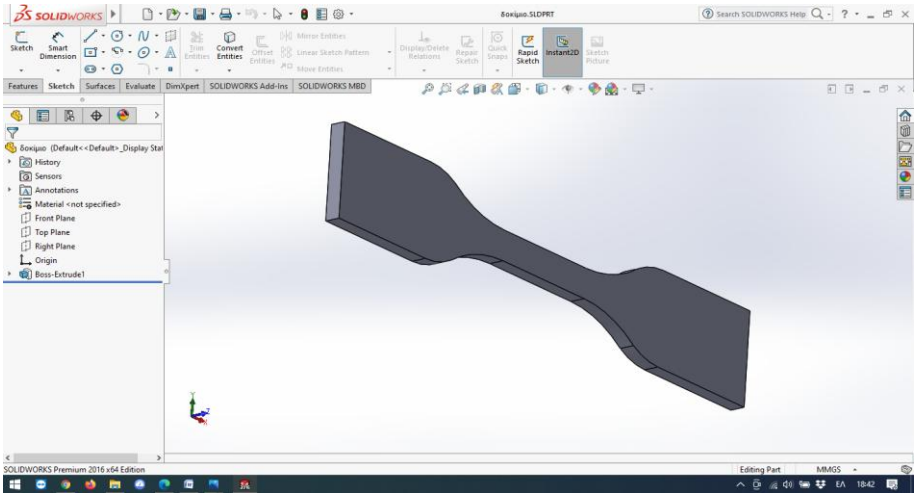
3.1.2.1) ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.

Αρχικά σχεδιάστηκαν τα δοκίμια με βάση [το πρότυπο ISO 527-2]



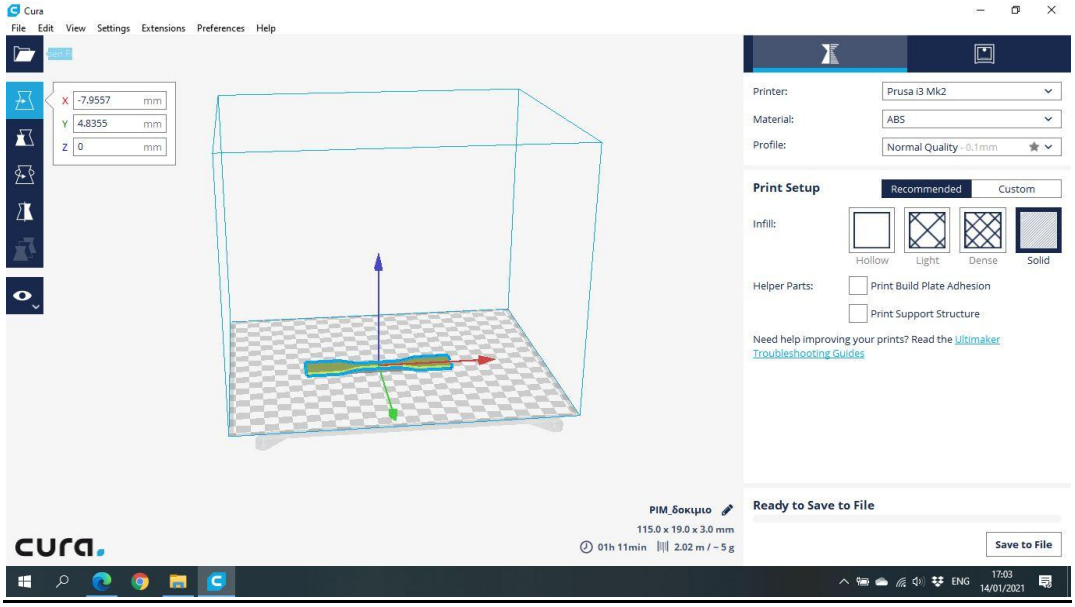
Εικόνα 3.4: Διαστάσεις δοκιμίου εφελκισμού.

στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Solidworks (βλ. εικόνα 3.5).



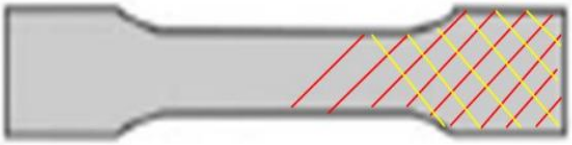
Εικόνα 3.5: Σχεδίαση δοκιμίου εφελκυσμού στο Solidworks.

Έπειτα αποθηκεύτηκε σε αρχείο της μορφής STL το οποίο μεταφέρθηκε στο λογισμικό Cura για να γίνει η εκτύπωση των δοκιμίων (βλ. εικόνα 3.6).



Εικόνα 3.6: Επεξεργασία δοκιμίου στο λογισμικό Cura.

Η τοποθέτηση των δοκιμίων ως προς την πλάκα εναπόθεσης του υλικού από την κεφαλή του εκτυπωτή είναι οριζόντια και η κίνηση που κάνει η κεφαλή είναι 45° (στον άξονα χ,y) προς την πλάκα η οποία παραμένει σταθερή. Για την ποιο εύκολη κατανόηση όσο αναφορά την κατασκευή τους παρατίθεται το σχήμα όπου η δόμηση του γίνεται από κάτω προς τα πάνω μέχρι να φτάσει στο πάχος το οποίο έχει καθοριστεί (βλ. εικόνα 3.7).



Εικόνα 3.7: Τρόπος εκτύπωσης του δοκιμίου.

Οι γραμμές που φαίνονται μας δείχνουν το πώς κτίζεται το δοκίμιο. Αρχικά δημιουργείται μια στρώση με προσανατολισμό απόθεσης 45ο ως προς τη διεύθυνση εφελκυσμού (κόκκινες γραμμές) και αφού ολοκληρωθεί αυτή η στρώση υλικού τοποθετείται η άλλη στρώση με ανάλογο προσανατολισμό (κίτρινες γραμμές). Η αλληλουχία αυτή απόθεσης στρώσεων του υλικού συνεχίζεται ακριβώς με τον ίδιο τρόπο μέχρι να ολοκληρωθεί η εκτύπωση του δοκιμίου με πάχος το οποίο έχει προκαθοριστεί. Το πάχος τον γραμμών απόθεσης του υλικού καθορίζεται από τους εκτυπωτές (Layer Resolution) (βλ. εικόνα 3.7).

3.1.2.2) ΥΛΙΚΑ.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι καρούλια νήματος έχουν την ίδια διάμετρο (D= 2.88mm) και παρουσιάζονται παρακάτω: [19]

1) 910 ALLOY Nylon
2) MG94 ABS (Natural)
3) PETG (Yellow)
4) PLA PREMIUM (Yellow)

3.1.2.3) ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΚΕΥΩΝ

3.1.2.3.1) Συσκευή εκτύπωσης

Οι συσκευές όπου εκτυπώθηκαν τα δοκίμια είναι οι εκτυπωτές 3D AXIOM. [20]

Εικόνα 3.8: Εκτυπωτής AW3D AXIOM 3D Printer.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εκτυπωτή που χρησιμοποιήθηκε εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας: Τεχνικά χαρακτηριστικά εκτυπωτή 3D AXION

Printing Performance	
EXTRUDER CONFIGURATION	Single Bowden Tube
BUILD VOLUME	12.5" x 8" x 10"
RECOMMENDED MAX. PRINT SPEED*	250 mm/sec
TRAVEL SPEED	125+ mm/sec
MAX. EXTRUDER TEMP.	315°C
MAX. BED TEMP.	140°C
CALIBRATION	Auto-Leveling
UPGRADEABLE	Yes
Filament Compatibility	
FILAMENT SIZE	2.85mm +/-0.10
Printer Design	
WEIGHT (LBS)	61 lbs.
HEIGHT (IN)	19.5"
WIDTH (IN)	23.5"
DEPTH (IN)	19.5"
FRAME CONSTRUCTION	Aluminum, Polycarbonate
HEATED BED	Yes
PRINT PLATE MATERIAL	Borosilicate Glass
Connectivity & Accessories	
PROVIDED SOFTWARE	APEX
CONNECTIVITY	Ethernet, Micro SD, USB Cable, Wi-Fi

PRINT VIA REMOVABLE DEVICE	SD Card
MAINTENANCE TOOLS INCLUDED	Allen Wrenches, Micro Drill Bit Set
FILAMENT INCLUDED	Yes

3.1.2.3.2) Μηχανή εφελκυσμού.

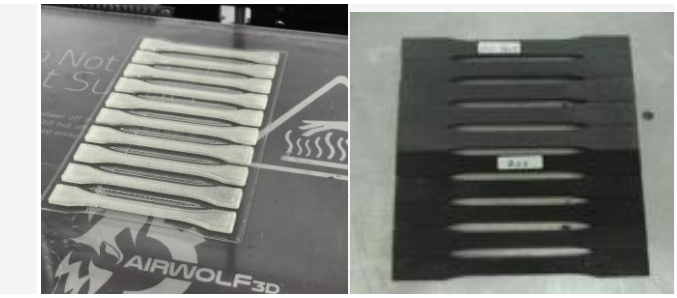
Ορίζεται η διάταξη η οποία μπορεί να εφαρμόσει δυνάμεις εφελκυσμού σε ένα δοκίμιο. Η ταχύτητα εφαρμογής της δύναμης (φορτίο) μπορεί να ρυθμίζεται με κατάλληλο χειρισμό της μηχανής. Οι μηχανές εφελκυσμού ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους διακρίνονται σε δυο κατηγορίες: [19]

1) Ηλεκτρομηχανικές
2) Σερβοϋδραυλικές

Εικόνα 3.9: Διάταξη Σερβοϋδραυλική μηχανή εφελκυσμού.

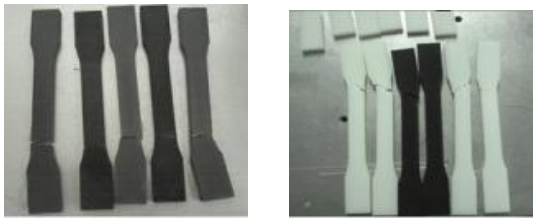
3.1.2.4) ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.

Αρχικά τοποθετείται το νήμα στον εκτυπωτή που αναφέρθηκε παραπάνω, φορτώνεται το σχέδιο εκτύπωσης μέσο του προγράμματος στον εκτυπωτή, αφού πρώτα ο εκτυπωτής έχει προγραμματιστεί να κάνει προθέρμανση του τραπεζίου εκτύπωσης. Ο χρόνος εκτύπωσης καθορίζεται από το πρόγραμμα εκτύπωσης και εξαρτάται από την ταχύτητα. Στο πείραμα επιλέχτηκε η πιο χαμηλή ταχύτητα εκτύπωσης, έτσι ώστε να υπάρξει η βέλτιστη ποιότητα εκτύπωσης.



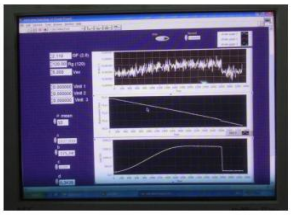
Εικόνα 3.10: Εκτυπωμένα δοκίμια πριν την πειραματική διαδικασία.

Μετά την εκτύπωση και ετοιμασία όλων των δοκιμίων (βλ. εικόνα 3.10), ακολουθεί η δοκιμασία εφελκυσμού στην μηχανή. Ο ρυθμός εφελκυσμού των δοκιμίων είναι με 1 mm/min, σε θερμοκρασία δωματίου. Οι αισθητήρες μέτρησης της μηχανής εφελκυσμού,



Εικόνα 3.11: Δοκίμια μετά την πειραματική διαδικασία.

Load cell και extensometer συνδέονται με κατάλληλη κάρτα σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για τη μεταφορά των δεδομένων μέτρησης που είναι το φορτίο και η μεταβολή του μήκους. Στον υπολογιστή είναι εγκατεστημένο το πρόγραμμα για την καταγραφή των δεδομένων. Μετά το τέλος κάθε πειράματος παίρνουμε στην οθόνη του υπολογιστή τα εξής τρία διαγράμματα τα όποια δίνει το πρόγραμμα (βλ. εικόνα 3.12).



Εικόνα 3.12: Πειραματικά αποτελέσματα σε μορφή γραφήματος.

Η πρώτη γραφική παράσταση είναι το φορτίο ως προς χρόνο η δεύτερη είναι μεταβολή μήκους του δοκιμίου προς χρόνο και τέλος η τρίτη γραφική παράσταση που είναι φορτίο προς τον χρόνο. Οι μετρήσεις καταγράφονται με τη μορφή αρχείων txt για να μπορέσουν να εξάγουμε τα δεδομένα του πειράματος έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν για περεταίρω επεξεργασία. [19]

3.1.3) Παρουσίαση αποτελεσμάτων.

Εκτυπώθηκαν τουλάχιστον έξι δείγματα σε κάθε υλικό και πραγματοποιήσαμε δοκιμές για οκτώ διαφορετικά υλικά. Η τελική ισχύς και η επιμήκυνση κατα την θραύση προσδιορίστηκαν έπειτα με τον υπολογισμό του μέσου όρου όλων των δειγμάτων που δοκιμάστηκαν. Τα αποτελέσματα έχουν ως εξής: (βλ. πίνακας 1)

Πίνακας 1: Όριο θραύσης υλικών

FILAMENT NAME	ΟΡΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ (ULTIMATE STRENGTH)
MG94 ABS (Natural)	46.4 MPa
910 ALLOY Nylon	47.7 MPa
PETG (Yellow)	50.0 MPa
PLA PREMIUM (Yellow)	64.4 MPa

Παρακάτω παρουσιάζομαι πίνακα με την σύγκριση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών που δοκιμάστηκαν: (βλ. πίνακας 2)

Πίνακας 2: ιδιότητες υλικών

	910 ΑΛΟΙ	**MG94 ABS ΝΗΜΑ**	**ΝΗΜΑ PETG**	**PREMIUM PLA FILAMENT**
ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ	47,7 MPa	46,4 Mpa	50,0 Mpa	64,4 Mpa
ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΗ	28,8%	21,6%	21,5%	15,3%
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΞΩΘΗΤΗ	240C-250C	235C- 260C	235C -255C	195C – 225C

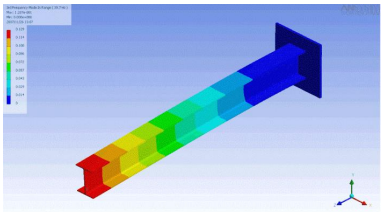
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΞΩΘΗΤΗ	70C – 80C	110C-130C	80C-120C	60C – 70C
ΘΕΡΜΑΙΝΟΜΕΝΟ ΚΡΕΒΑΤΙ	Οχι	Οχι	Οχι	Ναί
ΣΥΝΙΣΤΩΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	Wolfbite NITRO	Wolfbite για ABS, PETG, TPU και TPE	Wolfbite για ABS, PETG, TPU και TPE	WolfBite Nano
ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ	2,88mm	2,88mm	2,88mm	2,88mm
ΧΡΩΜΑ	Μαύρο, φυσικό	Μαύρο, σκούρο μπλε, γκρι, ανοιχτό μπλε, φυσικό, πορτοκαλί, μοβ, κόκκινο, λευκό, κίτρινο	Μαύρο, μπλε, κόκκινο, λευκό, κίτρινο	Μαύρο, Μπλε, Πράσινο, Φυσικό, Πορτοκαλί, Κόκκινο, Ασημί, Λευκό, Κίτρινο

3.2) Πείραμα κάμψης (bending)

3.2.1) Εισαγωγή

Κάμψη είναι το αποτέλεσμα κάθετων δυνάμεων ή ροπών που ασκούνται σε ένα μακρόστενο σώμα. Όπως το σώμα τείνει να καμπυλωθεί στη μία πλευρά του προκαλείται θλίψη (συμπίεση) και στην άλλη εφελκυσμός (τράβηγμα) (βλ. εικόνα 3.13). Η κάμψη προκαλεί την παραμόρφωση ή ακόμα και την θραύση του σώματος. [21]

Εικόνα 3.13: Απεικόνιση κάμψης μιας δοκού που στηρίζεται στα άκρα

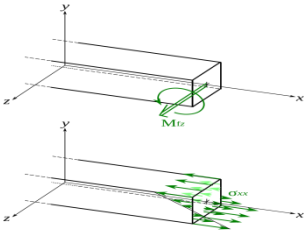


Εικόνα 3.14: Απεικόνιση κάμψης λόγω ταλάντωσης.

- **Εσωτερικές τάσεις**

Ο τρίτος νόμος του Νεύτωνα προβλέπει ότι για να υπάρχει ισορροπία σε ένα σώμα πρέπει οι δυνάμεις που του ασκούνται να εξουδετερώνουν η μία την άλλη. Πρέπει συνεπώς, σε κάθε σημείο του καμπτόμενου σώματος, οι εξωτερικές δυνάμεις να εξουδετερώνονται από άλλες που

αναπτύσσονται στο εσωτερικό του. Σε ένα σώμα σε κάμψη λοιπόν εμφανίζονται εσωτερικές τάσεις. Οι τάσεις που είναι κάθετες στη διατομή του στοιχείου ονομάζονται ορθές. [21]



Εικόνα 3.15: Ορθές τάσεις σε διατομή που κάμπτεται λόγω συγκεντρωμένης ροπής.

Οι εφελκυστικές θεωρούνται θετικές ενώ οι θλιπτικές αρνητικές. Η γραμμή όπου μηδενίζονται οι ορθές τάσεις ονομάζεται ουδέτερη γραμμή και χωρίζει τη διατομή στην εφελκυόμενη και τη θλιβόμενη περιοχή. Ο υπολογισμός των τάσεων είναι πολύ σημαντικός για τον έλεγχο της αντοχής του σώματος.

- **<u>Θεωρία κάμψης Όιλερ – Μπερνούλι.</u>**

Για τον υπολογισμό των ορθών τάσεων στη διατομή ενός στοιχείου πρέπει να ισχύουν οι εξής συνθήκες και παραδοχές:

- Οι διατομές που πριν την κάμψη ήταν επίπεδες και κάθετες στον άξονα του στοιχείου παραμένουν επίπεδες και κάθετες ως προς τον παραμορφωμένο λόγω κάμψης άξονά του (παραδοχή Μπερνούλι).
- Το υλικό είναι γραμμικά ελαστικό, ομογενές και ισότροπο. Γραμμικά ελαστικό ονομάζεται το υλικό που υπακούει στο νόμο του Χουκ, ενώ ισότροπο το υλικό που έχει την ίδια συμπεριφορά προς κάθε διεύθυνση.
- Το στοιχείο είναι αρχικά ευθύγραμμο και σταθερής διατομής. Ισχύει και στην περίπτωση που οι μεταβολές της διατομής είναι μικρές και ομαλές κατά το μήκος.

.

Οι ορθές τάσεις δίνονται από τη σχέση:

$$\sigma = \frac{M_{(x)} z}{I_z}.$$

Όπου:

- $\boldsymbol{M_x}$: Η ροπή κάμψης στο σημείο .
- $\boldsymbol{I_z}$: Η ροπή αδράνειας ως προς τον κεντροβαρικό άξονα που είναι παράλληλος στον άξονα της κάμψης.
- $\boldsymbol{z}$: απόσταση του σημείου με τάση σ από τον παραπάνω άξονα.

Απουσία αξονικών δυνάμεων ο άξονας της ροπής αδράνειας ταυτίζεται με τον ουδέτερο άξονα της διατομής. Η μέγιστη ορθή τάση:

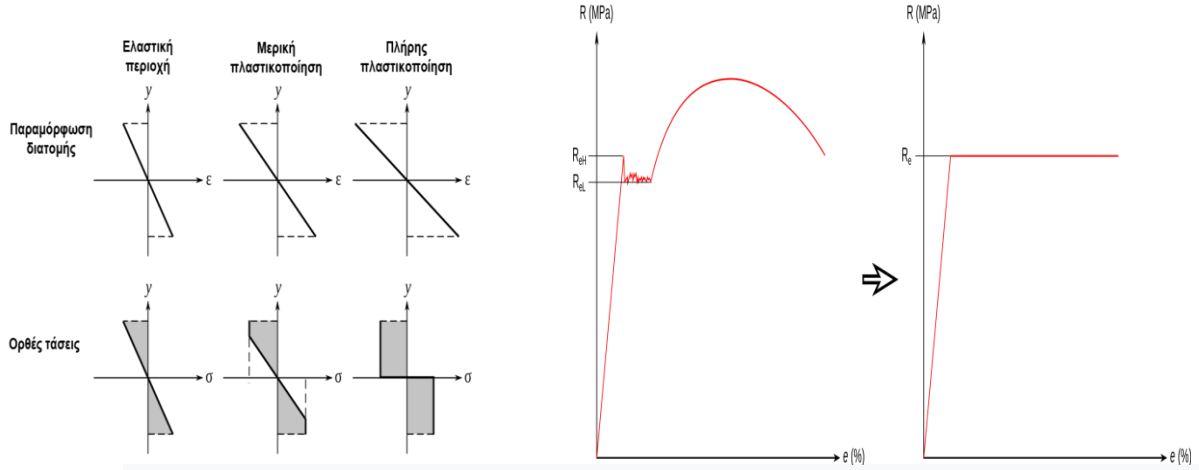
$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} z_{max}}{I_z}.$$

Η $\boldsymbol{\sigma max}$ δεν μπορεί να ξεπερνά μια τιμή που είναι χαρακτηριστική για το υλικό. Στα ψαθυρά υλικά μιλάμε για τη θλιπτική ή εφελκυστική αντοχή του ενώ στα όλκιμα υλικά για το όριο διαρροής. Από αυτόν τον περιορισμό προκύπτει η μέγιστη ελαστική ροπή στο στοιχείο. Κατά το σχεδιασμό στοιχείων με επιτρεπόμενες τάσεις η χαρακτηριστική τάση του υλικού μειώνεται σε

κάποιο ποσοστό που δίνεται από τον συντελεστή ασφαλείας. Στόχος είναι να καλυφθεί η αβεβαιότητα της πραγματικής αντοχής και να μειωθεί η πιθανότητα αστοχίας. [21]

- **<u>Ελαστοπλαστική ανάλυση</u>**

Ροπή μεγαλύτερη από την μέγιστη ελαστική προκαλεί θραύση στα ψαθυρά υλικά. Στα όλκιμα υλικά όμως το όριο διαρροής δεν ταυτίζεται με το όριο θραύσης. Όπως φαίνεται στο σχήμα σε μεγαλύτερη φόρτιση τα πιο απομακρυσμένα τμήματα της διατομής εμφανίζουν πλαστικές παραμορφώσεις, ενώ το κέντρο της διατομής παραμένει στην ελαστική περιοχή. Το εύρος του ελαστικού πυρήνα μειώνεται συνεχώς με την αύξηση της φόρτισης έως την πλήρη πλαστικοποίηση όλης της διατομής. Στην ελαστοπλαστική ανάλυση κατά προσέγγιση θεωρείται ότι το υλικό υπακούει στο νόμο του Hooke μέχρι το όριο διαρροής του αλλά για επιπλέον παραμόρφωση η τάση παραμένει σταθερή. Μετά την πλήρη πλαστικοποίηση οι παραμορφώσεις γίνονται πολύ μεγάλες και σχηματίζεται πλαστική άρθρωση (βλ. εικόνα 3.16). [21]



Εικόνα 3.16: Παραμόρφωση και τάση στη διατομή (αριστερά), Πραγματική και απλοποιημένη καμπύλη τάσης- παραμόρφωσης όλκιμου υλικού (δεξιά).

- **<u>Ελαστική γραμμή.</u>**

Κατά την κάμψη το σχήμα του σώματος είναι διαφορετικό από το αρχικό λόγω της παραμόρφωσης. Σε κάθε σημείο του σώματος αντιστοιχεί και μια μετατόπιση από την αρχική του θέση που ονομάζεται βέλος κάμψης. Το σχήμα του παραμορφωμένου άξονα του σώματος ονομάζεται ελαστική γραμμή και η συνάρτηση που δίνει τα βέλη κάμψης, δηλαδή την κατακόρυφη μετατόπιση ενός σημείου του άξονα σε σχέση με την αρχική του θέση, ονομάζεται εξίσωση της ελαστικής γραμμής. Ο υπολογισμός της ελαστικής γραμμής έχει μεγάλη σημασία στις τεχνικές κατασκευές. Πρέπει να εξασφαλίζεται ότι τα βέλη κάμψης δε δημιουργούν πρόβλημα ασφάλειας, λειτουργικότητας ή αισθητικής.

Η συνάρτηση της κλίσης φ του παραμορφωμένου στοιχείου σε κάθε θέση x είναι:

$$\phi_{(x)} = \frac{1}{EI_z} \int -M_{(x)}\, dx + c_1$$

Η εξίσωση της ελαστικής γραμμής είναι:

$$w_{(x)} = \frac{1}{EI_z} \iint -M_{(x)}\, dx + c_1 x + c_2$$

ή

$$w_{(x)} = \int \phi_{(x)}\, dx + c_2$$

Όπου:

- $\boldsymbol{E}$: Το μέτρο ελαστικότητας του υλικού.
- M_x: Η ροπή αδράνειας.
- $\boldsymbol{I_{(z)}}$: Η ροπή κάμψης στο σημείο x
- $\boldsymbol{w_x}$, $\boldsymbol{\varphi_x}$: Σταθερές ολοκλήρωσης που προκύπτουν από τις συνθήκες στήριξης.

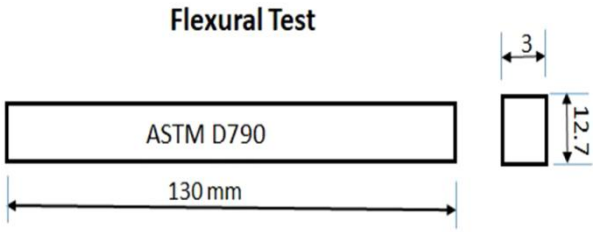
Θα πρέπει οι $\boldsymbol{c_{(1)}}$ και $\boldsymbol{c_{(2)}}$ να μηδενίζουν στις θέσεις που υπάρχει εμπόδιο κατακόρυφης μετατόπισης και στροφής αντίστοιχα.

3.2.2) Παρουσίαση πειράματος κάμψης.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιείται μελέτη της αντοχής σε κάμψη πολυμερών δοκιμίων τεσσάρων διαφορετικών υλικών, τα οποία έχουν κατασκευαστεί με τη μέθοδο της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται τα εξής υλικά: πολυγαλακτικό οξύ (pla), ακρυλονιτρίλιο βουταδιενίου-στυρολίου (abs), advanced pla και συμπολυμερές τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο με γλυκόλη (PET-G). Και για τα τέσσερα υλικά χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος μοντελοποίησης με εναπόθεση υλικού (FDM) και η εκτύπωση έγινε σε επιτραπέζιο εκτυπωτή. Οι κύριες παράμετροι εκτύπωσης σε όλα τα υλικά ήταν παρόμοιες και επιλέχθηκαν βάσει προηγούμενων σχετικών μελετών που αναφέρονται σε επόμενο κεφάλαιο. Η δοκιμή αντοχής αφορά τεστ κάμψεως τριών σημείων σύμφωνα με τις απαιτήσεις του προτύπου ASTM D70 ‘’ Πλαστικά – Προσδιορισμός ιδιοτήτων κάμψης’’. Οι μετρήσεις που ελήφθησαν κατά την πειραματική διαδικασία (φορτίο σε N και βέλος κάμψης σε mm), χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία των διαγραμμάτων φορτίου- βέλους κάμψης, τον υπολογισμό των ορθών τάσεων καθώς και τον υπολογισμό των μέτρων ελαστικότητας των υλικών.

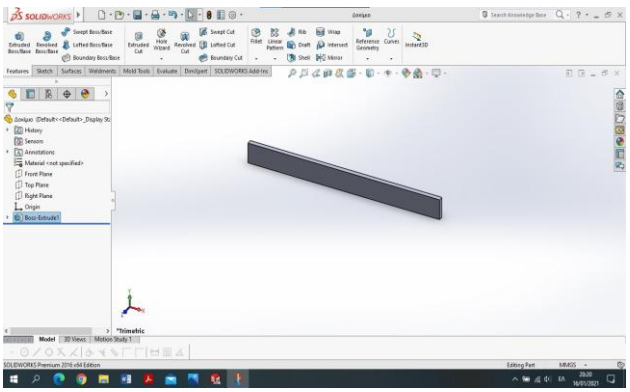
3.2.2.1) ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Αρχικά σχεδιάστηκαν τα δοκίμια με βάση το [πρότυπο ASTM D790] (βλ. εικόνα 3.17)



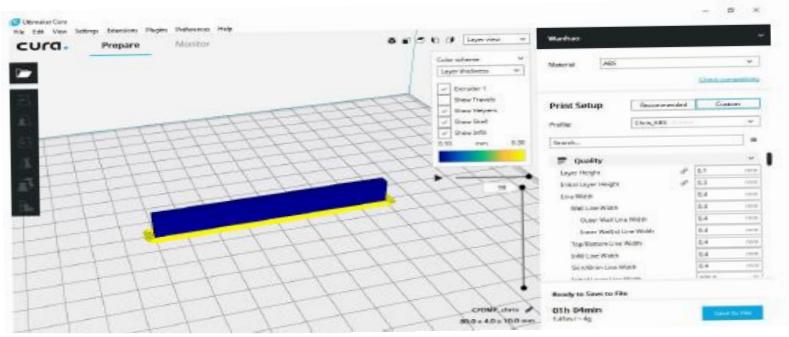
Εικόνα 3.17: Διαστάσεις δοκιμίου κάμψης.

Στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Solidworks.



Εικόνα 3.18: Σχεδίαση δοκιμίου κάμψης στο Solidworks.

Έπειτα το σχέδιο αποθηκεύτηκε σε αρχείο μορφής STL το οποίο μεταφέρθηκε στο λογισμικό Cura για να γίνει η εκτύπωση των δοκιμίων.



Εικόνα 3.19: Επεξεργασία δοκιμίου στο λογισμικό Cura.

Το γέμισμα (infill) ρυθμίστηκε στο 100%, ώστε το δοκίμιο να είναι συμπαγές και να μην υπάρχουν κενά μεταξύ των στρώσεων. Εναλλακτικός τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι να ρυθμιστεί το πάχος των στρώσεων ώστε να είναι λίγο μεγαλύτερο από την μεταξύ τους απόσταση σε κάθε στρώση, έτσι ώστε να «γεμίζει» πλήρως το προφίλ.

Το πάχος στρώσης ορίστηκε ίσο με 0,1mm για βέλτιστη αντοχή αλλά και εξοικονόμηση χρόνου, καθώς περεταίρω μείωση του πάχους της θα αύξανε κατά πολύ το χρόνο κατεργασίας, συνεπώς και το κόστος, χωρίς να βελτιώνει σε ικανοποιητικό βαθμό την αντοχή του δοκιμίου. Συνεπώς για την ολοκλήρωση του δοκιμίου χρειάστηκαν 100 στρώσεις. Ο προσανατολισμός εκτύπωσης που επιλέχθηκε είναι: το μήκος L του δοκιμίου κατά την κατεύθυνση του άξονα x(0°), το πάχος του κατά τον άξονα y και το πλάτος κατά τον άξονα z, προσανατολισμός που εν συντομία μπορεί να χαρακτηριστεί ως οριζόντιος επί των ακμών του αντικειμένου. Η γωνία των στρώσεων επίσης παίζει σημαντικό ρόλο και για την βέλτιστη αντοχή σε κάμψη η βέλτιστη ρύθμιση είναι 0/90, δηλαδή αρχίζοντας η στρώση παράλληλα προς τον άξονα x και κατόπιν το γέμισμα της επόμενης στρώσης σε γωνία 90° ως προς την πρώτη και το ίδιο μοτίβο να επαναλαμβάνεται μέχρι την ολοκλήρωση και των 100 στρώσεων.

Επίσης αρκετά σημαντικό ρόλο στην αντοχή του τελικού προϊόντος παίζει και η ταχύτητα εναπόθεσης του υλικού, η ταχύτητα δηλαδή με την οποία κινείται η κεφαλή η οποία εξωθεί το ημι-τηγμένο νήμα. Η ταχύτητα εναπόθεσης επηρεάζει σημαντικά τον χρόνο κατεργασίας, συνεπώς και το συνολικό κόστος μιας κατασκευής. Η ταχύτητα εναπόθεσης επιλέχθηκε ίση για όλα τα δοκίμια. Αρχικός στόχος ήταν η επιλογή μιας ταχύτητας, για να επιτευχθεί μείωση του χρόνου κατεργασίας, ωστόσο κατά την εκτύπωση των πρώτων δοκιμίων παρουσιάστηκαν αστοχίες, λόγω ασυνέχειας σε κάποια σημεία των στρώσεων και αποκόλληση του δοκιμίου από το τραπέζι εκτύπωσης του τρισδιάστατου εκτυπωτή.

3.2.2.2) ΥΛΙΚΑ.

Τα υλικά που καταναλώθηκαν είναι καρούλια νήματος έχουν την ίδια διάμετρο (D= 2.88mm) και παρουσιάζονται παρακάτω:

1) MG94 ABS (Natural)
2) PETG (Yellow)
3) PLA PREMIUM (Yellow)

3.2.2.3) ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΚΕΥΩΝ

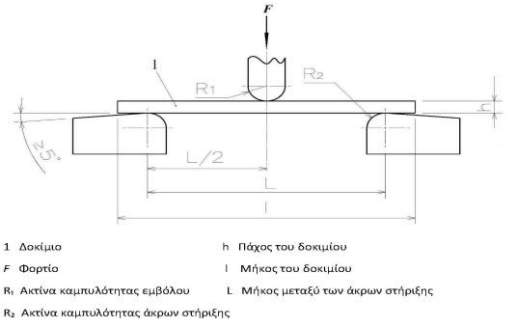
Διάταξη αντοχής σε κάμψη.

Η πειραματική διάταξη του εργαστηρίου φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (βλ. εικόνα 3.20):

Εικόνα 3.20: Πειραματική διάταξη για αντοχή σε κάμψη.

Τα άκρα στήριξης, ορίζουν το ενεργό μήκος L, το οποίο πληροί τους υπολογισμούς της παραμόρφωσης. Η απόσταση μεταξύ των άκρων στήριξης είναι ρυθμιζόμενη, ώστε να ορίζεται το L σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε πειραματικής διαδικασίας. Η σχέση που ορίζει το ενεργό μήκος L είναι:

L= (16± 1) h (όπως ορίζεται από την τροποποίηση 1, στις 1/4/2013 του προτύπου ISO178), όπου h το πάχος του δοκιμίου, επομένως για πάχος h= 4mm, που είναι το πάχος του προτεινόμενου δοκιμίου, όπως περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω, προκύπτει ότι L= 64± 4mm. Το δοκίμιο στηρίζεται ελεύθερα στα άκρα της βάσης στήριξης, τα οποία έχουν καμπυλότητα R_2= 5,0mm ±0,2mm ώστε να μπορεί να κάμπτεται ομαλά το δοκίμιο χωρίς να μετακινείται από τη θέση του. Σε απόσταση L/2, το έμβολο ασκεί δύναμη F στο δοκίμιο, αυξανόμενη μέχρι να επέλθει θραύση του. Το έμβολο έχει και αυτό καμπυλότητα R_1= 5,0mm ±0,2mm (βλ. εικόνα 3.21).

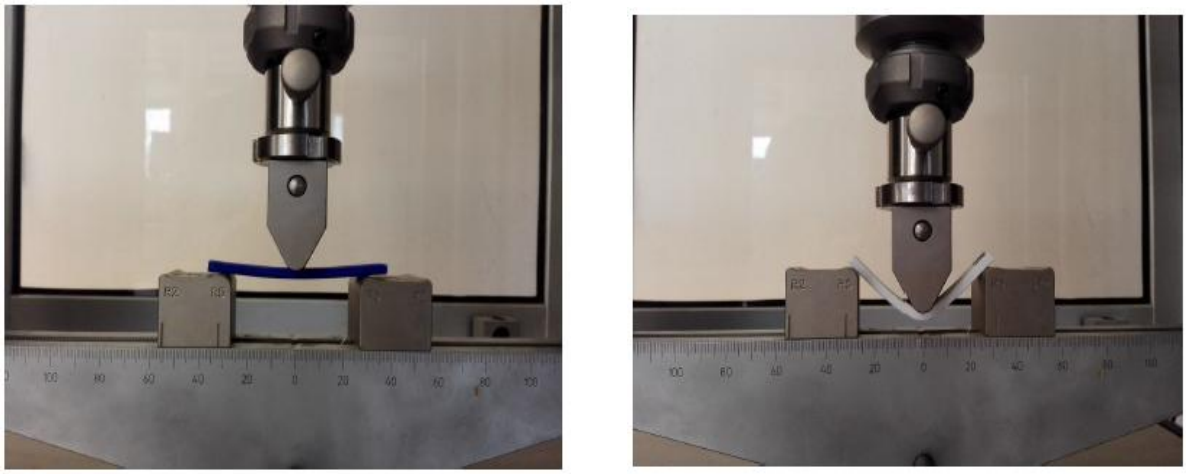


Εικόνα 3.21: πειραματικής διάταξης για κάμψη τριών σημείων.

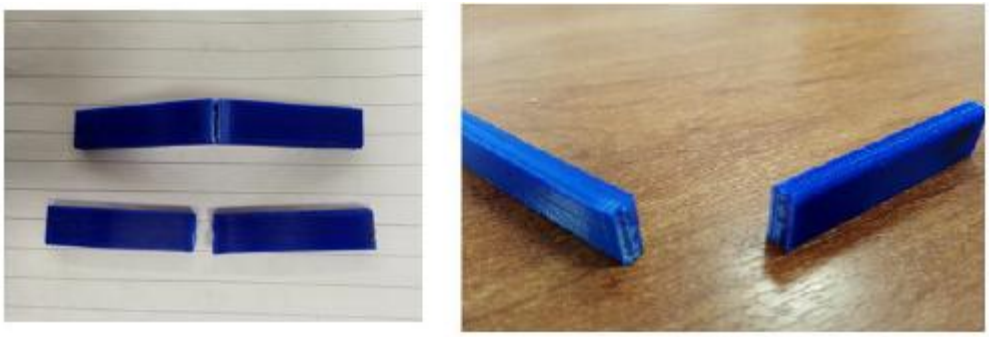
Το σύστημα μέτρησης της ασκούμενης δύναμης συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις της «κατηγορίας 1», που ορίζεται στο πρότυπο ISO 7500-1 Metallic materials- Verification of static uniaxial testing machines- Part 1:Tensions/ compression testing machines- Verification and calibration of the force- measuring system. Το σύστημα μέτρησης της παραμόρφωσης συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις που ορίζει το πρότυπο ISO 9513.

3.2.2.4) ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.

Για την σωστή εξέλιξη του πειράματος της κάμψης τριών σημείων πρέπει να ρυθμιστούν τα άκρα στήριξης του δοκιμίου όπως προκύπτει από τη σχέση που ορίζει το πρότυπο. Αφού η ρύθμιση γίνει σωστά, το δοκίμιο τοποθετείται συμμετρικά στα δύο στηρίγματα σχηματίζοντας ορθές γωνίες με τα στηρίγματα και το έμβολο που θα ασκήσει το φορτίο. Το έμβολο τοποθετείται σε επαφή με το δοκίμιο και μηδενίζονται οι ενδείξεις φορτίου και διαδρομής εμβόλου (βέλος κάμψης). Καταχωρείται το μήκος ανάμεσα στα άκρα στήριξης και δίνεται εντολή στο πρόγραμμα της μηχανής για την έναρξη της διαδικασίας.



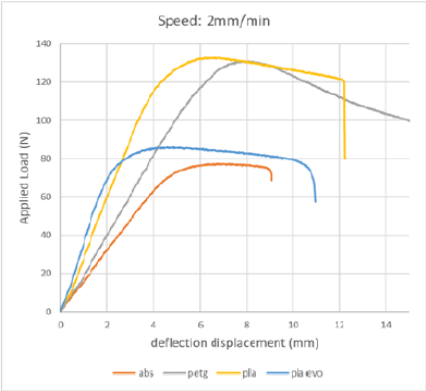
Εικόνα 3.22: Δοκίμιο PLA σε κάμψη (αριστερά), Δοκίμιο PETG σε κάμψη (δεξιά).



Εικόνα 3.23: Δοκίμια μετά την πειραματική διαδικασία της κάμψης.

3.2.3) Παρουσίαση αποτελεσμάτων.

Από τις μετρήσεις εφαρμοζόμενου φορτίου – βέλους κάμψης προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα:



Εικόνα 3.24: Διάγραμμα αποτελεσμάτων κάμψης.

Ενώ στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές μέγιστου εφαρμοσμένου φορτίου και του αντίστοιχου βέλου κάμψης για κάθε υλικό.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ		
ΥΛΙΚΑ	2mm/min	
	MAXIMUM APPLIED LOAD (N)	f (mm)
ABS	471	23.4
PETG	144	6.27
PLA-PREMIUM	626	22.4

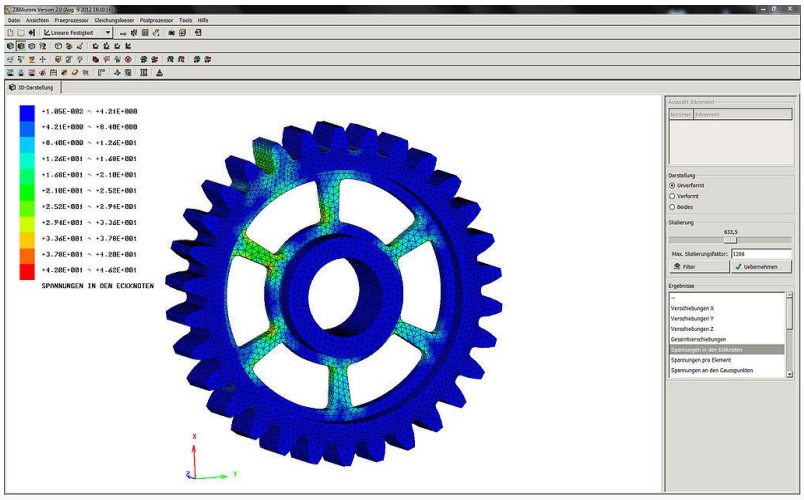
Κεφάλαιο 4:Μοντελοποίηση με Πεπερασμένα Στοιχεία του εφελκυσμού και κάμψης των τρισδιάστατα εκτυπωμένων τεμαχίων.

4.1) Εισαγωγή.

Η **μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων** είναι μια αριθμητική μέθοδος (δηλ. μέθοδος υπολογισμού με χρήση Η/Υ) για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων.

Η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τα διάφορα τεχνικά προβλήματα είναι δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, όπου οι καταπονήσεις και τα γεωμετρικά σχήματα είναι πάρα πολύ απλά. Όμως, υπήρχε η ανάγκη να λυθούν και πιο σύνθετα προβλήματα και γι' αυτό το λόγο αναπτύχθηκαν διάφορες προσεγγιστικές μέθοδοι (βλ. εικόνα 3.25)

Μία τέτοια μέθοδος είναι και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή η μέθοδος είναι μεν προσεγγιστική, αλλά μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα. Το μειονέκτημά της είναι οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, ιδίως όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα μοντέλα. Αυτό όμως το μειονέκτημα ξεπεράστηκε τα τελευταία χρόνια χάρη στη ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστών. Η επιτυχία αυτής της μεθόδου ήταν τόσο μεγάλη, που ακόμα και σήμερα χρησιμοποιείται στην έρευνα και στην βιομηχανία για τον υπολογισμό και τη μελέτη διάφορων κατασκευών. [22]



Εικόνα 4.1: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων υπολογιστικής ανάλυσης των τάσεων σε οδοντωτό τροχό (γρανάζι) με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (εικόνα από Z88 Aurora).

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία εξέλιξη των μητρωϊκών μεθόδων αριθμητικής επίλυσης διαφορικών εξισώσεων και έγινε από διαφόρους σπουδαίους επιστήμονες όπως ο Ιωάννης Αργύρης, ο Ρέι Κλαφ, ο Βάλτερ Ριτζ, ο Μπόρις Γκαλέρκιν και άλλοι.

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

1. Εισάγεται η γεωμετρία της κατασκευής σε ένα πρόγραμμα CAD και δημιουργείται το τρισδιάστατο μοντέλο.
2. Χωρίζεται το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία και αφού ετοιμαστεί το πλέγμα **επιλέγεται το είδος της επίλυσης και εισάγονται τα επιπλέον δεδομένα που** απαιτούνται. Παραδείγματος χάριν, αν επιλεγεί να λυθεί το μοντέλο σε στατική καταπόνηση θα πρέπει να δοθούν τα δεδομένα για τις δυνάμεις και τις στηρίξεις. Αυτή η διαδικασία γίνεται με προγράμματα που αποκαλούνται pre processor.

3. Όταν ετοιμαστούν τα δεδομένα για επίλυση, εισάγονται σε ένα πρόγραμμα το οποίο θα κάνει την επίλυση του προβλήματος. Τέτοιου είδους προγράμματα λέγονται solver και χρησιμοποιούν για τις επιλύσεις αριθμητικές μεθόδους.
4. Όταν τελειώσει η επίλυση τα αποτελέσματα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα πρόγραμμα, που αποκαλείται post processor, για να μπορέσει ο μελετητής να δει τα αποτελέσματα. [22]

4.2) Πρόγραμμα SOLIDWORKS.

4.2.1) Γενικά

Το SolidWorks είναι ένα συμπαγές μοντέλο σχεδιασμού με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD) και το πρόγραμμα μηχανογράφησης (CAE) που εκδόθηκε από την Dassault Systèmes, το οποίο εκτελείται κυρίως στα Microsoft Windows. Ενώ είναι δυνατή η εκτέλεση του SolidWorks σε Mac που βασίζεται σε Intel με εγκατεστημένα τα Windows, ο προγραμματιστής της εφαρμογής συνιστά αυτό.Το SolidWorks δεν υποστηρίζει macOS. Σύμφωνα με τον εκδότη, περισσότεροι από δύο εκατομμύρια μηχανικοί και σχεδιαστές σε περισσότερες από 165.000 εταιρείες χρησιμοποιούν το SolidWorks από το 2013. Επίσης, σύμφωνα με την εταιρεία, τα έσοδα 2011-2012 της SolidWorks ανήλθαν σε 483 εκατομμύρια δολάρια.

4.2.2) Ιστορία.

Η SolidWorks Corporation ιδρύθηκε τον Δεκέμβριο του 1993 από τον πτυχιούχο Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης, Jon Hirschtick. Ο Hirschtick χρησιμοποίησε 1 εκατομμύριο δολάρια που είχε κερδίσει ενώ ήταν μέλος του MIT Blackjack Team για να ιδρύσει την εταιρεία. Αρχικά με έδρα το Waltham, Μασαχουσέτη, Ηνωμένες Πολιτείες, ο Hirschtick προσέλαβε μια ομάδα μηχανικών με στόχο την κατασκευή λογισμικού 3Δ CAD που ήταν εύχρηστο, προσιτό και διαθέσιμο στην επιφάνεια εργασίας των Windows. Λειτουργώντας αργότερα από την Concord, Μασαχουσέτη, η SolidWorks κυκλοφόρησε το πρώτο της προϊόν SolidWorks 95, τον Νοέμβριο του 1995. Το 1997, η Dassault, γνωστή για το λογισμικό CATIA CAD, απέκτησε το SolidWorks για 310 εκατομμύρια δολάρια σε απόθεμα. Ο Jon Hirschtick παρέμεινε ενήμερος για τα επόμενα 14 χρόνια σε διάφορους ρόλους. Υπό την ηγεσία του, η SolidWorks αυξήθηκε σε μια εταιρεία εσόδων 100 εκατομμυρίων δολαρίων. Η SolidWorks διαθέτει αυτήν τη στιγμή αρκετές εκδόσεις του λογισμικού SolidWorks CAD εκτός από το eDrawings, ένα εργαλείο συνεργασίας και το DraftSight, ένα προϊόν 2D CAD. Η SolidWorks ήταν επικεφαλής του John McEleney από το 2001 έως τον Ιούλιο του 2007 και ο Jeff Ray από το 2007 έως τον Ιανουάριο του 2011. Ο σημερινός διευθύνων σύμβουλος είναι ο Gian Paolo Bassi από τον Ιανουάριο του 2015. Ο Gian Paolo Bassi αντικαθιστά τον Bertrand Sicot, ο οποίος προωθείται ως Αντιπρόεδρος Πωλήσεων της Dassault Systèmes ‘Value Solutions κανάλι πωλήσεων.

4.2.3) Τεχνολογία μοντελοποίησης.

Το SolidWorks είναι ένα συμπαγές μοντέλο και χρησιμοποιεί μια παραμετρική προσέγγιση βασισμένη σε χαρακτηριστικά που αναπτύχθηκε αρχικά από την PTC (Creo / Pro-Engineer) για τη δημιουργία μοντέλων και συναρμολογήσεων. Το λογισμικό είναι γραμμένο στον Parasolid-kernel. Οι παράμετροι αναφέρονται σε περιορισμούς των οποίων οι τιμές καθορίζουν το σχήμα ή τη γεωμετρία του μοντέλου ή του συγκροτήματος. Οι παράμετροι μπορεί να είναι είτε αριθμητικές παράμετροι, όπως μήκη γραμμής ή διάμετρος κύκλου, ή γεωμετρικές παράμετροι, όπως εφαπτομένη, παράλληλος, ομόκεντρος, οριζόντιος ή κατακόρυφος κ.λπ. για να καταγράψετε την πρόθεση σχεδίασης. Η πρόθεση σχεδίασης είναι ο τρόπος με τον οποίο ο δημιουργός του εξαρτήματος θέλει να ανταποκριθεί σε αλλαγές και ενημερώσεις. Για παράδειγμα, θα θέλατε η τρύπα στην κορυφή ενός δοχείου ποτών να παραμείνει στην πάνω επιφάνεια, ανεξάρτητα από το ύψος ή το μέγεθος του δοχείου. Το SolidWorks επιτρέπει στο χρήστη να καθορίσει ότι η τρύπα είναι ένα χαρακτηριστικό στην πάνω επιφάνεια και,

στη συνέχεια, θα τιμήσει την πρόθεση σχεδιασμού τους, ανεξάρτητα από το ύψος που αργότερα αποδίδουν στο κουτί. Τα χαρακτηριστικά αναφέρονται στα δομικά στοιχεία του τμήματος. Είναι τα σχήματα και οι λειτουργίες που κατασκευάζουν το τμήμα. Τα χαρακτηριστικά που βασίζονται σε σχήμα ξεκινούν συνήθως με ένα 2D ή 3D σκίτσο σχημάτων όπως αφεντικά, τρύπες, κουλοχέρηδες κ.λπ. Αυτό το σχήμα στη συνέχεια εξωθείται για προσθήκη ή κοπή για αφαίρεση υλικού από το τμήμα. Οι λειτουργίες που βασίζονται στη λειτουργία δεν βασίζονται σε σκίτσα και περιλαμβάνουν λειτουργίες όπως φιλέτα, chamfers, κελύφη, εφαρμογή προσχέδιο στις όψεις ενός εξαρτήματος κ.λπ. Η κατασκευή ενός μοντέλου στο SolidWorks ξεκινά συνήθως με ένα 2D σκίτσο (αν και διατίθενται τρισδιάστατα σκίτσα για χρήστες ενέργειας). Το σχέδιο αποτελείται από γεωμετρία όπως σημεία, γραμμές, τόξα, κωνικά (εκτός από την υπερβολή) και splines. Οι διαστάσεις προστίθενται στο σκίτσο για να καθορίσουν το μέγεθος και τη θέση της γεωμετρίας. Οι σχέσεις χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό χαρακτηριστικών όπως η εφαπτομένη, ο παραλληλισμός, η κάθετη και η ομόκεντρος. Η παραμετρική φύση του SolidWorks σημαίνει ότι οι διαστάσεις και οι σχέσεις οδηγούν στη γεωμετρία και όχι το αντίστροφο. Οι διαστάσεις στο σχέδιο μπορούν να ελεγχθούν ανεξάρτητα ή από σχέσεις με άλλες παραμέτρους εντός ή εκτός του σχεδίου. Σε μια συνέλευση, οι σχέσεις αναλογικού προς σκίτσο είναι σύντροφοι. Ακριβώς όπως οι σχέσεις σκίτσων ορίζουν συνθήκες όπως εφαπτομενικότητα, παραλληλισμός και ομόκεντρος σε σχέση με τη γεωμετρία σκίτσων, οι συνάδελφοι συναρμολόγησης ορίζουν ισοδύναμες σχέσεις σε σχέση με τα μεμονωμένα μέρη ή εξαρτήματα, επιτρέποντας την εύκολη κατασκευή συγκροτημάτων. Το SolidWorks περιλαμβάνει επίσης πρόσθετα προηγμένα χαρακτηριστικά ζευγαρώματος, όπως οι σχέσεις μετάδοσης κίνησης και οπαδών εκκεντροφόρων, τα οποία επιτρέπουν σε μοντέλα ταχυτήτων να αναπαράγουν με ακρίβεια την περιστροφική κίνηση μιας πραγματικής αμαξοστοιχίας. Τέλος, τα σχέδια μπορούν να δημιουργηθούν είτε από εξαρτήματα είτε από συγκροτήματα. Οι προβολές δημιουργούνται αυτόματα από το συμπαγές μοντέλο και, στη συνέχεια, οι σημειώσεις, οι διαστάσεις και οι ανοχές μπορούν εύκολα να προστεθούν στο σχέδιο, όπως απαιτείται. Η ενότητα σχεδίασης περιλαμβάνει τα περισσότερα μεγέθη και πρότυπα χαρτιού (ANSI, ISO, DIN, GOST, JIS, BSI και SAC).

4.2.4) Μορφή αρχείου.

Τα αρχεία SolidWorks (πριν από την έκδοση 2015) χρησιμοποιούν τη μορφή αρχείου Microsoft Structured Storage. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν διάφορα αρχεία ενσωματωμένα σε κάθε αρχείο SLDDRW (αρχεία σχεδίασης), SLDPRT (τμήματα αρχείων), SLDASM (αρχεία συναρμολόγησης), συμπεριλαμβανομένων bitmaps προεπισκόπησης και δευτερευόντων αρχείων μεταδεδομένων. Διάφορα εργαλεία τρίτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή αυτών των δευτερευόντων αρχείων, αν και τα δευτερεύοντα αρχεία χρησιμοποιούν σε πολλές περιπτώσεις ιδιόκτητες δυαδικές μορφές αρχείων. Το SolidWorks επιτρέπει την αποθήκευση πληροφοριών 3Δ Model σε μορφή * .step, η οποία επιτρέπει στο μοντέλο να εμφανίζεται και να τροποποιείται σε άλλες πλατφόρμες από άλλους προμηθευτές.

4.2.5) SOLIDWORKS Simulation (FEA).

4.2.5.1) ΣΚΟΠΟΣ.

Το SOLIDWORKS Simulation είναι μια ολοκληρωμένη λύση δομικής ανάλυσης πλήρως ενσωματωμένη στα SOLIDWORKS που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από σχεδιαστές και αναλυτές για να επιτρέψουν στις εταιρείες να κάνουν τα προϊόντα τους στην αγορά γρηγορότερα και με μικρότερο κόστος χωρίς να θυσιάζεται η ποιότητα ή η απόδοση. Το SOLIDWORKS Simulation είναι ένα χαρτοφυλάκιο δομικής ανάλυσης λύσεις χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Finite Element Analysis (FEA) για να προβλέψτε την πραγματική φυσική συμπεριφορά ενός προϊόντος με ουσιαστικά δοκιμή μοντέλων CAD. Το χαρτοφυλάκιο παρέχει γραμμικό, μη γραμμικό λύσεις στατικής και δυναμικής ανάλυσης χωρισμένες σε τρεις προϊόντα: Simulation Standard, Simulation Professional και το

Simulation Premium, το καθένα από τα οποία προσθέτει εύχρηστο δυνατότητες επίλυσης ολοένα και πιο δύσκολων προβλημάτων.

4.2.5.2) ΟΦΕΛΗ.

• Αξιολογεί την απόδοση πολλαπλών μεταβλητών με ταχεία ταχύτητα βήμα.
• Μειώνει το χρόνο στην αγορά καθορίζοντας γρήγορα το βέλτιστο σχεδιαστικές λύσεις.
• Προβλέπει την απόδοση του προϊόντος, το Factor of Safety (FOS) και δυνατότητες κόπωσης νωρίς στη διαδικασία.
• Μειώνει το κόστος υλικών. Το SOLIDWORKS Simulation επιτρέπει σχεδιάστε ομάδες για να αφαιρέσετε με ασφάλεια το περιττό υλικό.
• Πραγματικά δοκιμάζοντας και βελτιώνοντας πρώτα τα σχέδιά σας, το δαπανηρό η διαδικασία δοκιμών και πιστοποίησης βελτιστοποιείται μειώνοντας τη δική σας χρόνο-προς-αγορά.

4.2.5.3) ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ

Το SOLIDWORKS Simulation Standard δίνει στους σχεδιαστές προϊόντων ένα διαισθητικό εικονικό περιβάλλον δοκιμών για γραμμική στατική κίνηση, κίνηση βάσει χρονισμού και προσομοίωση κόπωσης υψηλού κύκλου Σχεδιαστές και οι μηχανικοί μπορούν να αντιμετωπίσουν την κοινή δομική μηχανική προκλήσεις με τη Στατική Μελέτη η οποία προϋποθέτει γραμμικό ελαστικό στατική διαμόρφωση ελαστικών και γραμμικών υλικών, και όλα αυτά τα φορτία και τα φωτιστικά είναι στατικά (δεν υπάρχει διακύμανση στο χρόνο). Με αυτά παραμέτρους, οι χρήστες μπορούν να υπολογίσουν τις τάσεις των εξαρτημάτων, τις πιέσεις, FOS και μετατοπίσεις. Η μελέτη κόπωσης εκτιμά την υψηλή διάρκεια ζωής της κόπωσης εξαρτήματα που υπόκεινται σε πολλαπλά διαφορετικά φορτία όπου το η μέγιστη τάση είναι κάτω από την τάση απόδοσης υλικού. Σωρευτικός Η θεωρία ζημιών χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη τοποθεσιών και κύκλων έως αποτυχία. Το Trend Tracker και το Design Insight Plot επιτρέπουν στους σχεδιαστές για να επισημάνετε τις βέλτιστες αλλαγές στο σχεδιασμό ενώ λειτουργούν. Η ανάλυση κίνησης με βάση το χρόνο είναι ένα άκαμπτο κινηματικό σώμα και δυναμικό εργαλείο κίνησης που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των ταχυτήτων, των επιταχύνσεων, και κινήσεις ενός συγκροτήματος υπό λειτουργικά φορτία. Επιπλέον, οι σχεδιαστές και οι μηχανικοί μπορούν να καθορίσουν τη συναρμολόγηση απαιτήσεις ισχύος μαζί με εφέ ελατηρίου και αποσβεστήρα. Με την ολοκλήρωση της ανάλυσης κίνησης, το συστατικό σώμα και φορτία σύνδεσης μπορούν να συμπεριληφθούν σε μια γραμμική ανάλυση για ένα ολοκληρωμένη διαρθρωτική έρευνα. Το SOLIDWORKS Simulation Standard παρέχει ταυτόχρονο μηχανική προσέγγιση που βοηθά τους μηχανικούς να γνωρίζουν εάν το προϊόν τους θα λειτουργήσει σωστά και πόσο θα διαρκέσει.

4.2.5.4) Υποστήριξη σχεδιασμού SOLIDWORKS.

• Πλήρως ενσωματωμένο σε SOLIDWORKS 3D CAD
• Υποστήριξη διαμορφώσεων και υλικών SOLIDWORKS
• Βοήθεια, τεκμηρίωση και βάση γνώσεων
• Μακροεντολές και διεπαφές προγραμματισμού εφαρμογών (API)

4.2.5.5) Αποτελέσματα και επεξεργασία μετά.

• Αποτελέσματα προσομοίωσης επικάλυψης σε γραφικά SOLIDWORKS
• Υπολογισμός πίεσης, τάσης, μετατόπισης και FOS
• Υπολογισμός δυνάμεων αντίδρασης και ροπών
• Περίγραμμα, Ισο-Επιφάνεια, Επιφάνεια, Οικόπεδο αποτελεσμάτων ενότητας
• Κινούμενη εικόνα αποτελεσμάτων
• Εργαλείο ανίχνευσης
• Συγκρίνετε τα δεδομένα δοκιμής
• Ανίχνευση καυτού σημείου (μοναδικότητα στρες)
• Αποτελέσματα που βασίζονται στην εξίσωση

• Προσαρμόσιμη αναφορά προσομοίωσης
• eDrawings® των αποτελεσμάτων προσομοίωσης SOLIDWORKS.

4.2.5.6) Γενική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.

• Ανάλυση μεμονωμένου και πολλαπλού σώματος
• Ανάλυση συναρμολόγησης
• Μοντελοποίηση Solid, Shell και Beam
• 3D & 2D ανάλυση
• προσαρμοστικός τύπος στοιχείου h και p
• Δυνατότητες ελέγχου πλέγματος
• Υπο-μοντελοποίηση
• Λύση εκφόρτωσης

4.2.5.7) Τύποι ανάλυσης.

• Γραμμική στατική ανάλυση
• Ανάλυση κόπωσης
• Ανάλυση συχνότητας
• Ανάλυση γραμμικής λυγισμού
• Γραμμική θερμική ανάλυση
• Βελτιστοποίηση σχεδιασμού (παραμετρική)
• Μελέτες τοπολογίας
• Ανάλυση δοκιμής πτώσης
• Προσομοίωση Σχεδίου Σκαφών Πίεσης
• Ανάλυση κίνησης βάσει χρόνου
• Ανάλυση κίνησης βάσει συμβάντων
• Γραμμική δυναμική ανάλυση
• Μη γραμμική στατική ανάλυση
• Μη γραμμική δυναμική ανάλυση

4.2.5.8) Όροι επικοινωνίας

• Συνδετικές, συρόμενες και συρρικνωμένες συνθήκες επαφής
• Κατάσταση αυτο-επαφής
• Κατάσταση αντίστασης θερμικής επαφής
• Μόνωση

4.2.5.9) Συνδετήρες

• Μπουλόνι, ελατήριο, πείρος, ελαστικό στήριγμα και ρουλεμάν
• Έλεγχος ασφάλειας συνδετήρων
• Βύσμα συγκόλλησης άκρων και σημείων

4.2.5.10) Φορτία και όρια

• Υποστήριξη για καρτεσιανές, κυλινδρικές και σφαιρικές συντεταγμένες συστήματα
• Φωτιστικά για τη συνταγογράφηση μηδενικών ή μη μηδενικών μετατοπίσεων
• Δομικά φορτία
• Φόρτωση θερμοκρασίας
• Εισαγωγή ροής / θερμικών εφέ
• Load Case Manager
• Καμπύλες φόρτωσης

4.3)Παρουσίαση προσομοίωσης πειράματος εφελκυσμού και κάμψης.

4.3.1) Γενικά.

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην εκτύπωση των δοκιμίων που πήρα μέρος στην πειραματική διαδικασία

καθώς και την διαδικασία παραμετροποίησης του Simulation στο Solidworks. Οι ιδιότητες των υλικών θα μας βοηθήσουν στην δημιουργία και προσθήκη αρχείων στην βιβλιοθήκη υλικών του Solidworks, έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση του πειράματος εφελκυσμού, τα υλικά αυτά είναι: (βλ. πίνακας 1)

Πίνακας 1: Υλικά προσομοίωσης εφελκυσμού

1) 910 ALLOY Nylon
2) MG94 ABS (Natural)
3) PETG (Yellow)
4) PLA PREMIUM (Yellow)
5) POLYPROPYLENE

ενώ παρακάτω παρουσιάζονται τα υλικά ώστε να χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση του πειράματος κάμψης και είναι: (βλ. πίνακας 2)

Πίνακας 2: Υλικά προσομοίωσης κάμψης

1) MG94 ABS (Natural)
2) PETG (Yellow)
3) PLA PREMIUM (Yellow)

4.3.2) Προσομοίωση εφελκυσμού

Αυτή η ενότητα έχει σαν σκοπό την παρουσίαση της προσομοίωσης του πειράματος του εφελκυσμού που παρουσιάστηκε στην ενότητα 1 του 3^{ου} κεφαλαίου.

Αρχικά δημιουργήθηκε ένα υπολογιστικό φύλλο στο excel με τα δεδομένα για κάθε υλικό, που θα χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία αρχείων στην βιβλιοθήκη του Solidworks ,όπως φαίνεται παρακάτω:

1) MG94 ABS

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
force(N)	position (mm)						Μέσος όρος (mm)	Μέσος όρος (m)	σ(N/mm^2)	ε=ΔL/L(mm)	σ(N/m^2)
	1	2	3	4	5	6					
0	0	0	0	0	0	0	0	0.0000	0.0	0.00	0.00
50	1.11	1.11	1.27	1.43	1.67	1.75	1.39	0.0014	5	0.05	5.00E+06
100	1.91	1.99	2.07	2.23	2.48	2.54	2.20	0.0022	10	0.03	1.00E+07
150	2.39	2.40	2.46	2.70	2.78	3.09	2.64	0.0026	15	0.01	1.50E+07
200	2.81	2.85	2.86	3.02	3.34	3.50	3.06	0.0031	20	0.01	2.00E+07
250	3.15	3.18	3.32	3.42	3.77	3.90	3.46	0.0035	25	0.01	2.50E+07
300	3.42	3.50	3.58	3.82	4.13	4.29	3.79	0.0038	30	0.01	3.00E+07
350	3.74	3.85	3.96	4.13	4.45	4.61	4.12	0.0041	35	0.01	3.50E+07
400	3.98	4.21	4.29	4.45	4.77	4.96	4.44	0.0044	40	0.01	4.00E+07
450	4.29	4.61	4.77	4.83	5.09	5.41	4.83	0.0048	45	0.01	4.50E+07
464	4.53	5.01	5.09	5.08	5.33	5.33	5.06	0.0051	46.4	0.01	4.64E+07
450	5.88	5.90	5.91	5.93	5.93	5.95	5.92	0.0059	45	0.03	4.50E+07
425	6.52	6.51	6.52	6.35	6.36	6.41	6.44	0.0064	42.5	0.02	4.25E+07

Εμβαδόν (A)	10	mm^2	0.00001	m^2
Μέτρο ελαστικότητας (E)	257.5	N/mm^2		
Μήκος (L)	30	mm	0.03	m
	4.640E+07	Pa ή N/m^2	46.4	N/mm^2

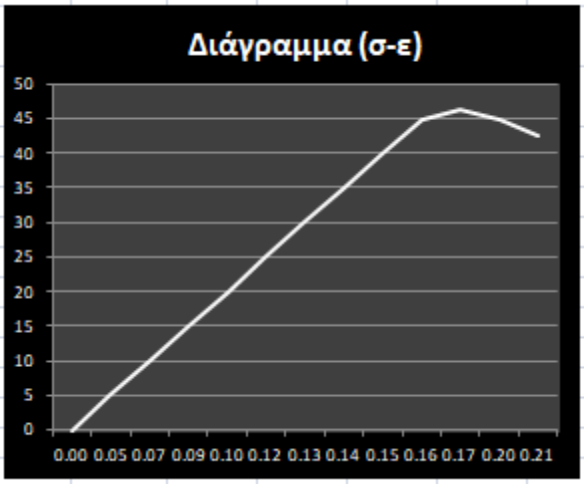
AIRWOLF 3D TESTED PROPERTIES

Ultimate Strength: 46.4 MPa

Elongation at Break: 21.6 %

Διαστολή	12.5	mm

ΤΙΜΕΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ			
Α/Α	Ορθή τάση (σ)	ειδική επιμήκυνση(ε)	
			%
1	0	0.00	
2	5	0.05	4.64
3	10	0.07	7.34
4	15	0.09	8.79
5	20	0.10	10.21
6	25	0.12	11.52
7	30	0.13	12.63
8	35	0.14	13.74
9	40	0.15	14.81
10	45	0.16	16.11
11	46.4	0.17	16.87
12	45	0.20	19.72
13	42.5	0.21	21.48



2) 910-ALLOY NYLON

force(N)	position (mm)						Μέσος όρος (mm)	Μέσος όρος (m)	σ(N/mm^2)	ε=ΔL/L(mm)	σ(N/m^2)
	1	2	3	4	5	6					
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0000	0	0.00	0.000E+00
50	0.80	0.95	0.95	1.27	1.27	1.75	1.17	0.0012	5	0.04	5.000E+06
100	1.43	1.75	1.91	2.07	2.07	2.39	1.93	0.0019	10	0.03	1.000E+07
150	1.91	2.23	2.39	2.39	2.70	3.02	2.44	0.0024	15	0.02	1.500E+07
200	2.39	2.70	2.86	2.86	3.18	3.66	2.94	0.0029	20	0.02	2.000E+07
250	2.86	3.02	3.34	3.42	3.66	4.13	3.41	0.0034	25	0.02	2.500E+07
300	3.26	3.50	3.82	3.94	4.13	4.61	3.88	0.0039	30	0.02	3.000E+07
350	3.66	3.82	4.13	4.29	4.45	5.09	4.24	0.0042	35	0.01	3.500E+07
400	4.13	4.29	4.61	4.77	5.09	5.49	4.73	0.0047	40	0.02	4.000E+07
450	4.61	4.77	5.09	5.57	5.22	5.20	5.08	0.0051	45	0.01	4.500E+07
477	4.93	5.09	5.41	5.68	5.36	5.38	5.31	0.0053	47.7	0.01	4.770E+07
450	5.09	5.41	5.49	5.72	5.88	6.52	5.68	0.0057	45	0.01	4.500E+07
425	6.68	7.00	7.16	7.47	8.75	9.70	7.79	0.0078	42.5	0.07	4.250E+07

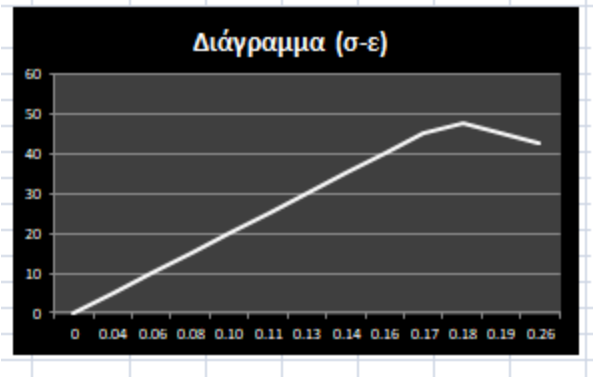
Εμβαδόν (A)	10	mm^2	0.00001	m^2
Μέτρο ελαστικότητας (E)	247.6	N/mm^2		
Μήκος (L)	30	mm	0.03	m
	4.740E+07	Pa ή N/m^2	47.4	N/mm^2

AIRWOLF 3D TESTED PROPERTIES

Ultimate Strength:	47.7 MPa
Elongation at Break:	28.8%

Διαστολή	16.7	mm

ΤΙΜΕΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ			
ΑΙΑ	Ορθή τάση (σ)	ειδική επιμήκυνση(ε)	
			%
1	0	0	0
2	5	0.04	3.89
3	10	0.06	6.45
4	15	0.08	8.13
5	20	0.10	9.81
6	25	0.11	11.35
7	30	0.13	12.92
8	35	0.14	14.13
9	40	0.16	15.77
10	45	0.17	16.92
11	47.7	0.18	17.69
12	45	0.19	18.95
13	42.5	0.26	25.97



3) PETG

force(N)	position (mm)						Μέσος όρος	Μέσος όρος (m)	σ(N/mm^2)	ε=ΔL/L(mm)	σ(N/m^2)
	1	2	3	4	5	6					
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.0000	0	0.00	0.00E+00
100	1.59	1.91	1.99	2.07	2.15	2.23	1.9875	0.0020	10	0.07	1.00E+07
150	1.91	1.92	2.23	2.39	2.54	2.56	2.2578	0.0023	15	0.01	1.50E+07
200	2.54	2.54	2.70	2.86	3.10	3.18	2.8223	0.0028	20	0.02	2.00E+07
250	2.86	2.88	3.02	3.18	3.50	3.58	3.1694	0.0032	25	0.01	2.50E+07
300	3.34	3.37	3.47	3.66	3.98	3.99	3.6332	0.0036	30	0.02	3.00E+07
350	3.67	3.74	3.82	3.98	4.13	4.26	3.9316	0.0039	35	0.01	3.50E+07
400	4.13	4.17	4.20	4.45	4.77	4.93	4.4414	0.0044	40	0.02	4.00E+07
450	4.45	4.56	4.61	4.93	5.22	5.25	4.8363	0.0048	45	0.01	4.50E+07
500	5.25	5.41	5.44	5.53	5.72	5.76	5.5173	0.0055	50	0.02	5.00E+07
450	5.41	5.88	5.90	6.36	6.84	7.16	6.2567	0.0063	45	0.02	4.50E+07

Εμβαδόν (A)	10	mm^2	0.00001	m^2
Μέτρο ελαστικότητας (E)	266.6	N/mm^2		
Μήκος (L)	30	mm	0.03	m
	5.00E+07	Pa ή N/m^2	50	N/mm^2

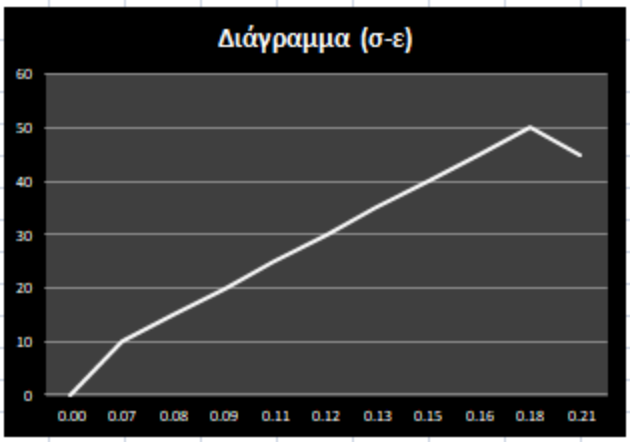
AIRWOLF 3D TESTED PROPERTIES

Ultimate Strength: 50.0 MPa

Elongation at Break: 21.5 %

Διασταλή	12.47	mm

ΤΙΜΕΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ			
A/A	Ορθή τάση (σ)	ειδική επιμήκυνση(ε)	
			%
1	0	0.00	0.00
2	10	0.07	6.63
3	15	0.08	7.53
4	20	0.09	9.41
5	25	0.11	10.56
6	30	0.12	12.11
7	35	0.13	13.11
8	40	0.15	14.80
9	45	0.16	16.12
10	50	0.18	18.39
11	45	0.21	20.86



4) PLA PREMIUM

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
force(N)	position (mm)						Μέσος όρος	Μέσος όρος (m)	σ(N/mm^2)	ε=ΔL/L(mm)	σ(N/m^2)
	1	2	3	4	5	6					
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00E+00
100	1.27	1.28	1.31	1.31	1.59	1.60	1.39	0.0014	10	0.05	1.00E+07
150	1.66	1.59	1.68	1.69	1.90	1.91	1.74	0.0017	15	0.01	1.50E+07
200	1.99	2.00	2.11	2.15	2.31	2.37	2.15	0.0022	20	0.01	2.00E+07
250	2.37	2.39	2.40	2.54	2.54	2.56	2.47	0.0025	25	0.01	2.50E+07
300	2.63	2.66	2.69	2.70	2.91	2.94	2.76	0.0028	30	0.01	3.00E+07
350	2.77	2.78	2.79	2.82	3.26	3.28	2.95	0.0030	35	0.01	3.50E+07
400	3.16	3.17	3.18	3.19	3.49	3.50	3.28	0.0033	40	0.01	4.00E+07
450	3.41	3.42	3.43	3.44	3.72	3.75	3.53	0.0035	45	0.01	4.50E+07
500	3.64	3.65	3.66	3.67	4.05	4.09	3.79	0.0038	50	0.01	5.00E+07
550	3.97	3.98	3.98	4.00	4.29	4.29	4.08	0.0041	55	0.01	5.50E+07
644	4.36	4.36	4.37	4.38	4.77	4.93	4.53	0.0045	64.4	0.01	6.44E+07

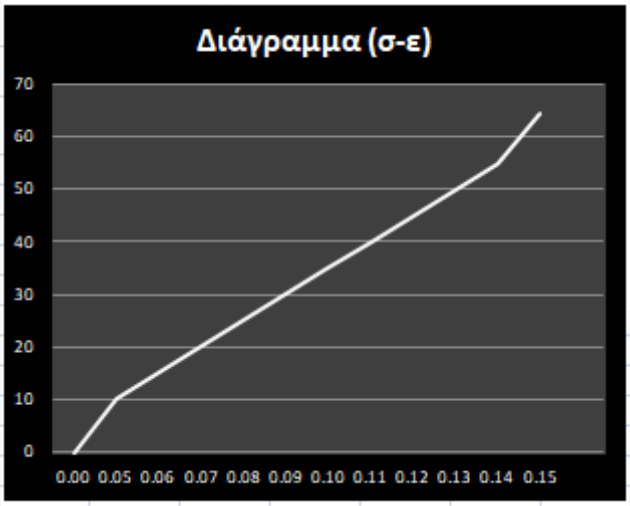
Εμβαδόν (A)	10	mm^2	0.00001	m^2
Μέτρο ελαστικό τητας (E)	384.60	N/mm^2		
Μήκος (L)	30	mm	0.03	m
	6.440E+07	Pa ή N/m^2	64.4	N/mm^2

AIRWOLF 3D TESTED PROPERTIES

Ultimate Strength:	64.4 MPa
Elongation at Break:	15.3%

Διαστολή	8.874	mm

ΤΙΜΕΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ			
ΑΙΑ	Ορθή τάση (σ)	ειδική επιμήκυνση(ε)	
			%
1	0	0.00	0.00
2	10	0.05	4.65
3	15	0.06	5.79
4	20	0.07	7.18
5	25	0.08	8.22
6	30	0.09	9.19
7	35	0.10	9.84
8	40	0.11	10.94
9	45	0.12	11.76
10	50	0.13	12.65
11	55	0.14	13.61
12	64.4	0.15	15.10



5) POLYPROPYLENE

force(N)	position (mm)						Μέσος όρος (mm)	Μέσος όρος (m)	σ(N/mm^2)	=ΔL/L(mm	σ(N/m^2)
	1	2	3	4	5	6					
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0000	0	0.00	0.000E+00
25	0.32	0.32	0.64	0.79	0.86	0.86	0.63	0.0006	2.5	0.02	2.500E+06
50	2.22	2.29	2.54	2.70	2.86	3.02	2.60	0.0026	5	0.07	5.000E+06
75	2.83	2.86	3.11	3.18	3.49	3.81	3.21	0.0032	7.5	0.02	7.500E+06
100	3.49	3.81	3.97	4.13	4.76	5.40	4.26	0.0043	10	0.03	1.000E+07
125	6.03	6.35	7.30	8.26	9.21	10.16	7.88	0.0079	12.5	0.12	1.250E+07
130	8.89	9.37	9.53	10.16	10.80	10.95	9.95	0.0099	13	0.07	1.300E+07
120	18.73	19.05	20.00	20.32	20.96	21.90	20.16	0.0202	12	0.34	1.200E+07
115	22.23	25.40	38.10	39.68	41.28	44.45	35.19	0.0352	11.5	0.50	1.150E+07
110	22.23	25.40	51.44	52.39	53.90	54.90	43.38	0.0434	11	0.27	1.100E+07

Εμβαδόν (A)	10	mm^2	0.00001	m^2
Μέτρο ελαστικό τητας (E)		N/mm^2		
Μήκος (L)	30	mm	0.03	m
	1.280E+07	Pa ή N/m^2	12.8	N/mm^2

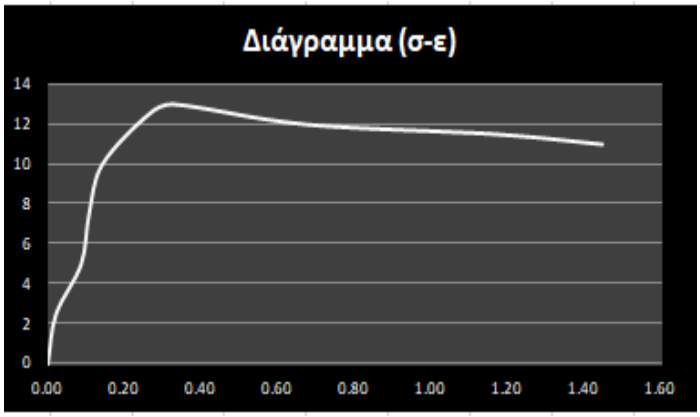
AIRWOLF 3D TESTED PROPERTIES

Ultimate Strength: 12.8 MPa

Elongation at Break: 716 %

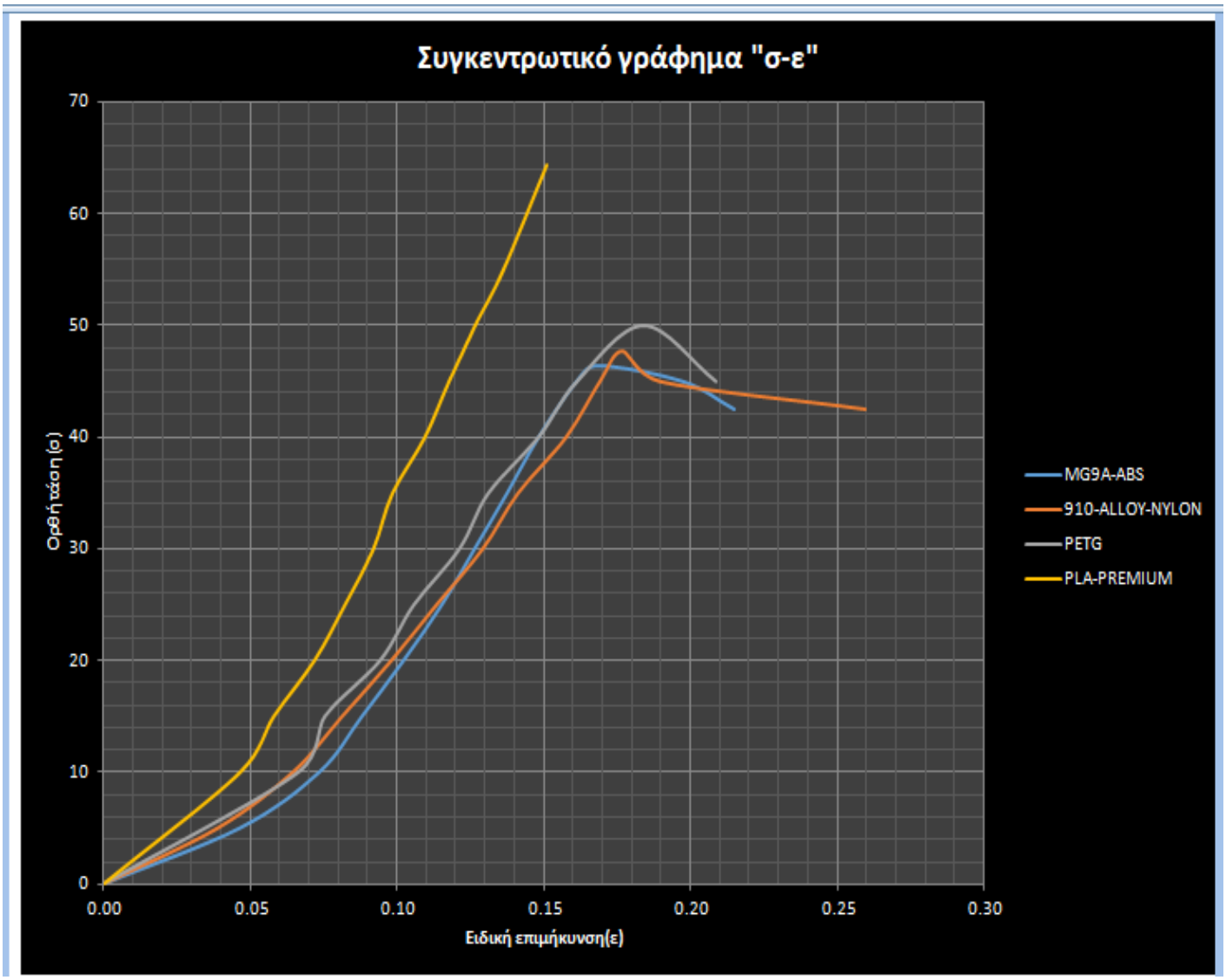
Διαστολή	415.28	mm

ΤΙΜΕΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ		
Α/Α	Ορθή τάση (σ)	Μετατόπηση (ε)
1	0	0.00
2	2.5	0.02
3	5	0.09
4	7.5	0.11
5	10	0.14
6	12.5	0.26
7	13	0.33
8	12	0.67
9	11.5	1.17
10	11	1.45

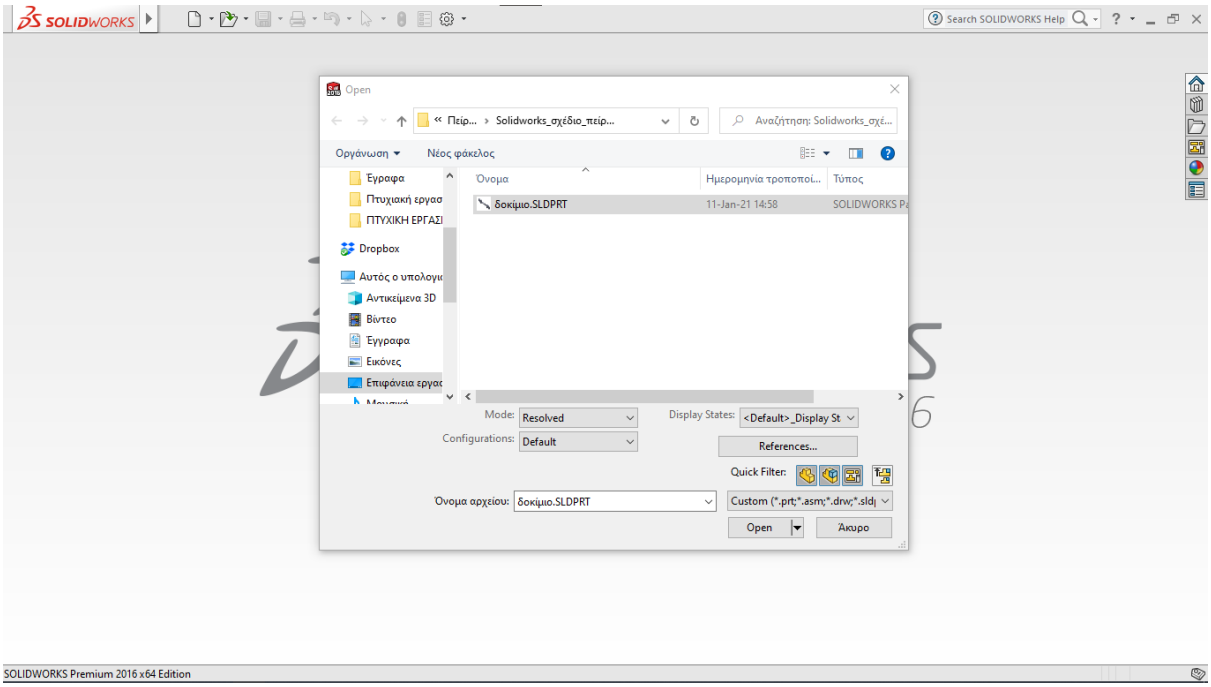


Ενώ παρακάτω παρουσιάζετε το συγκεντρωτικό διάγραμμα όλων των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα του εφελκυσμού εκτός του polypropylene διότι όπως παρατηρείται οι μηχανικές του ιδιότητες δεν είναι προς μελέτη λόγω τις μικρής του αντοχής σε εφελκυστικές τάσεις.

Εικόνα 4.2: Συγκεντρωτικό γράφημα «σ-ε»

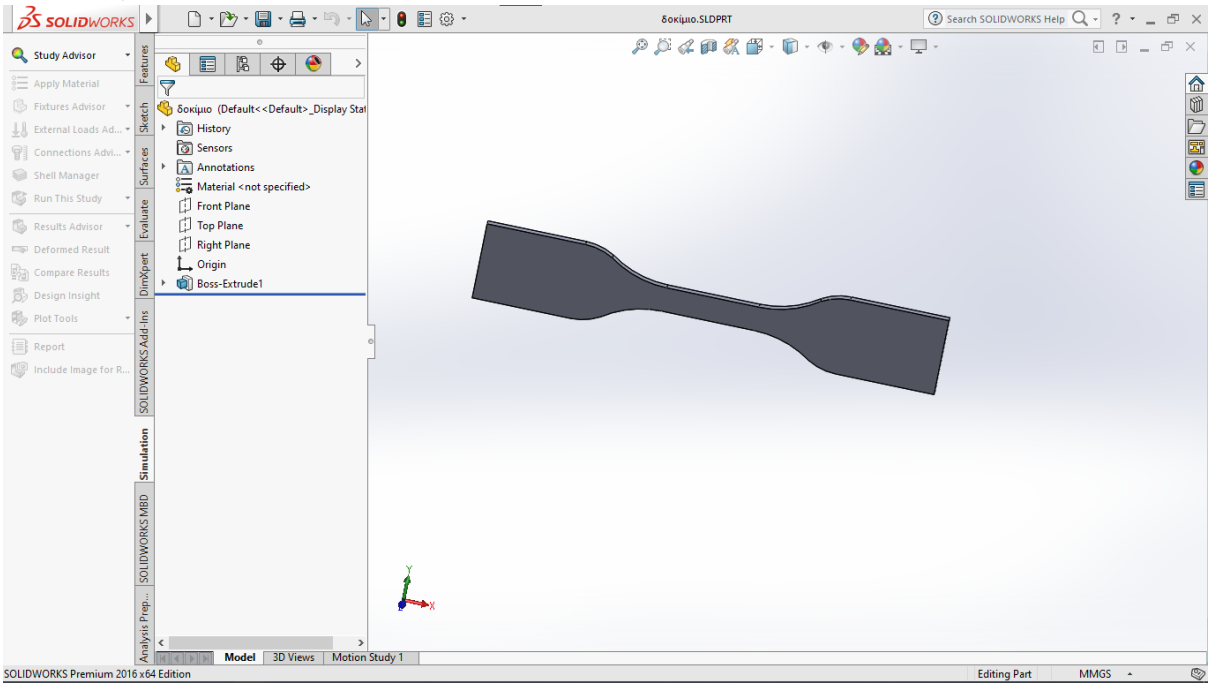


Στην συνέχεια γίνεται η εισαγωγή του σχεδίου του δοκιμίου στο Solidworks (βλ. εικόνα 4.3)



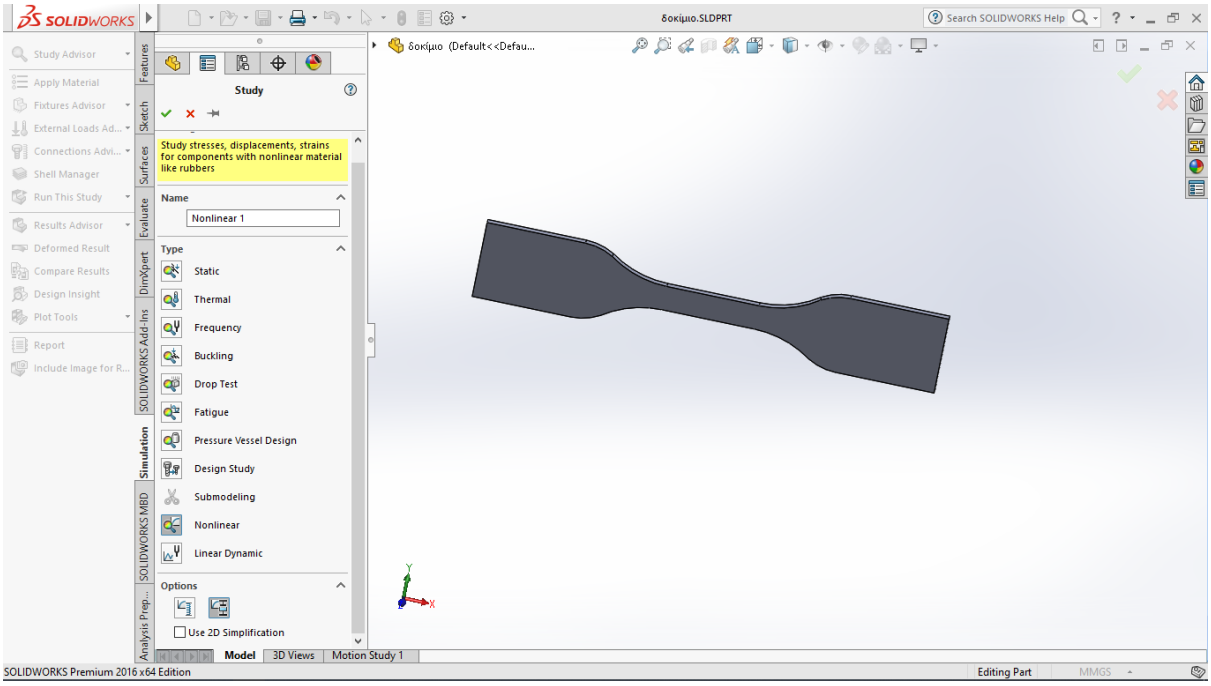
Εικόνα 4.3: Εισαγωγή σχεδίου στο SOLIDWORKS.

και αφού εισαχθεί επιλέγουμε το Simulation για να ξεκινήσει η προσομοίωση του πειράματος (βλ. εικόνα 4.4)



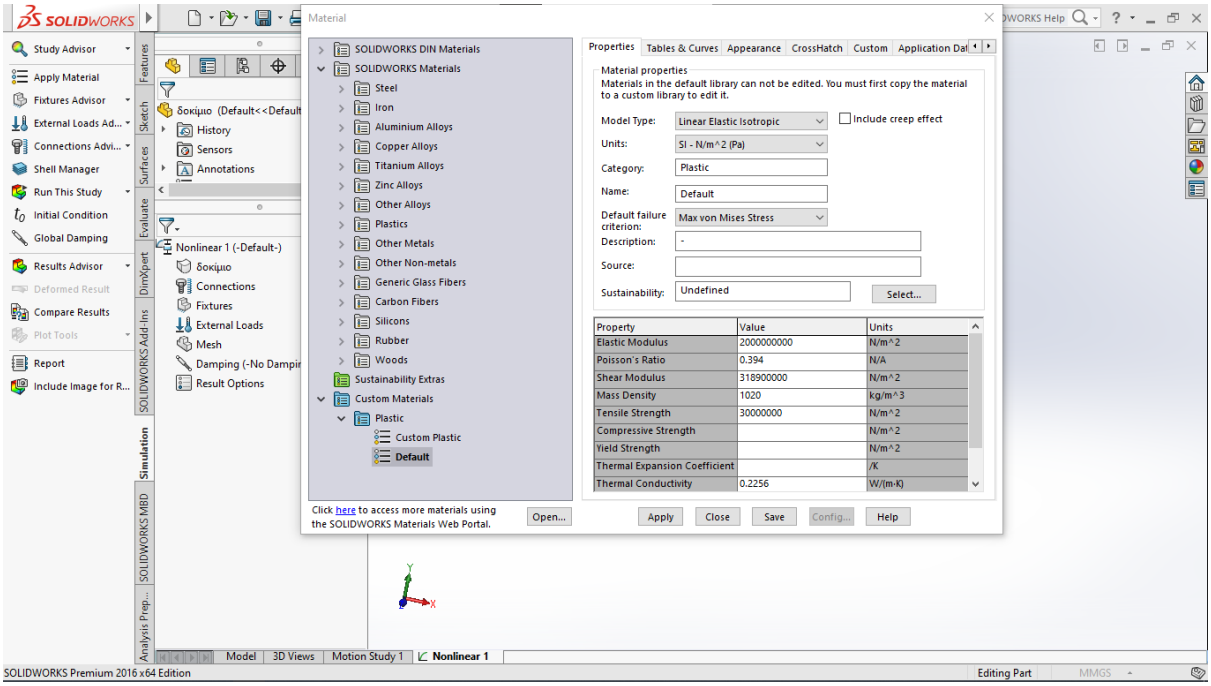
Εικόνα 4.4: Προσομοίωση πειράματος εφελκυσμού στο SOLIDWORKS.

στην συνεχεία γίνεται επιλογή μεθόδου ανάλυσης, στην περίπτωση αυτή επιλέγουμε την μη γραμμική ανάλυση (βλ. εικόνα 4.5)



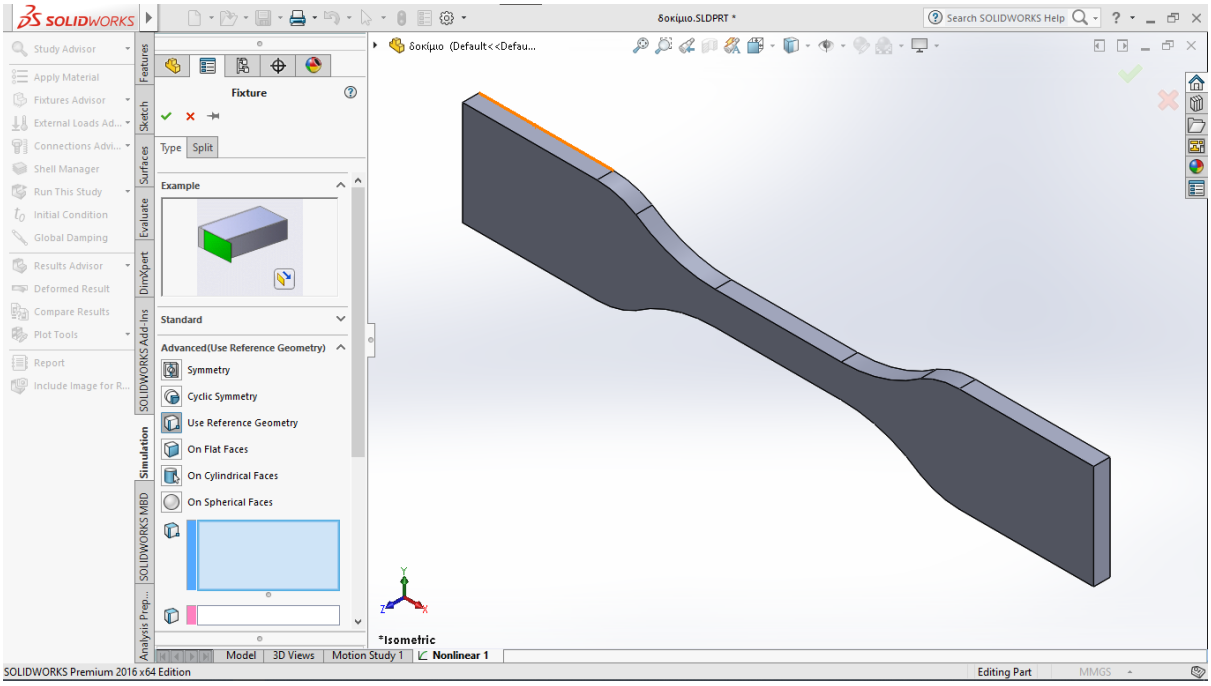
Εικόνα 4.5: Επιλογή γραμμικής ανάλυσης στο SOLIDWORKS.

Αφού γίνει επιλογή της μεθόδου σειρά έχει η εισαγωγή τον δεδομένων από το excel για την δημιουργία των υλικών στην βιβλιοθήκη του Solidworks (βλ. εικόνα 4.6).



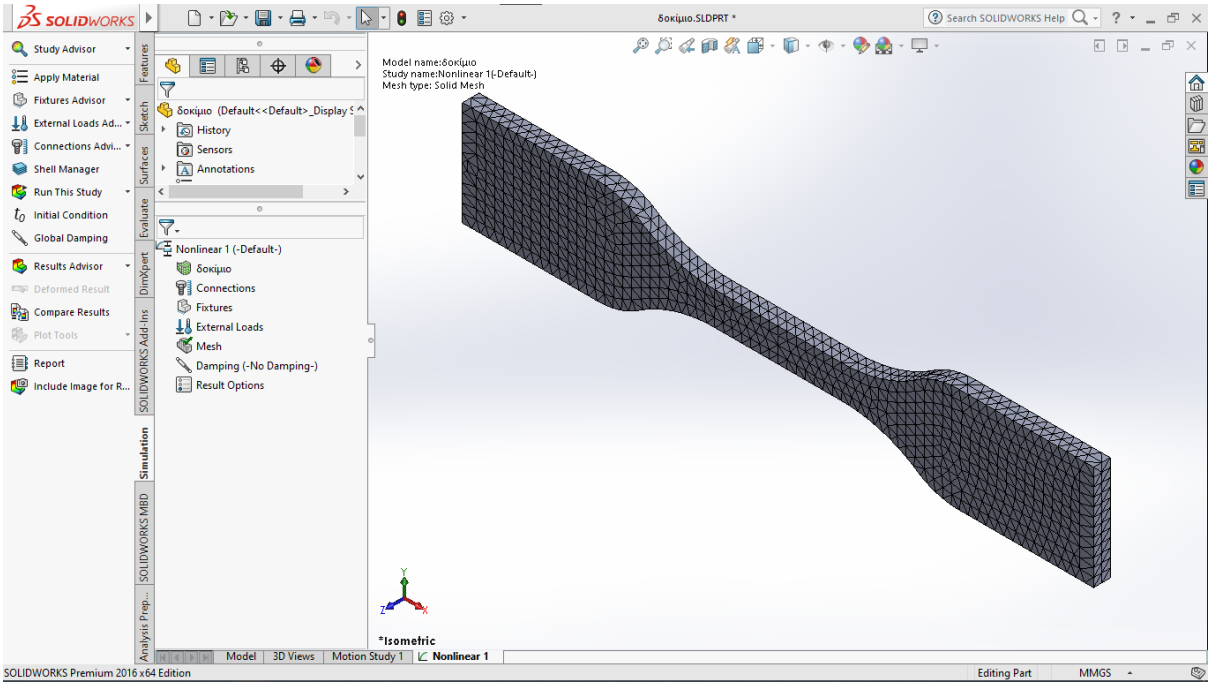
Εικόνα 4.6: Εισαγωγή δεδομένων στην βιβλιοθήκη του SOLIDWORKS.

στην συνέχεια γίνεται εισαγωγή τον παραμέτρων του πειράματος στο simulation του SOLIWORKS (βλ. εικόνα 4.7)



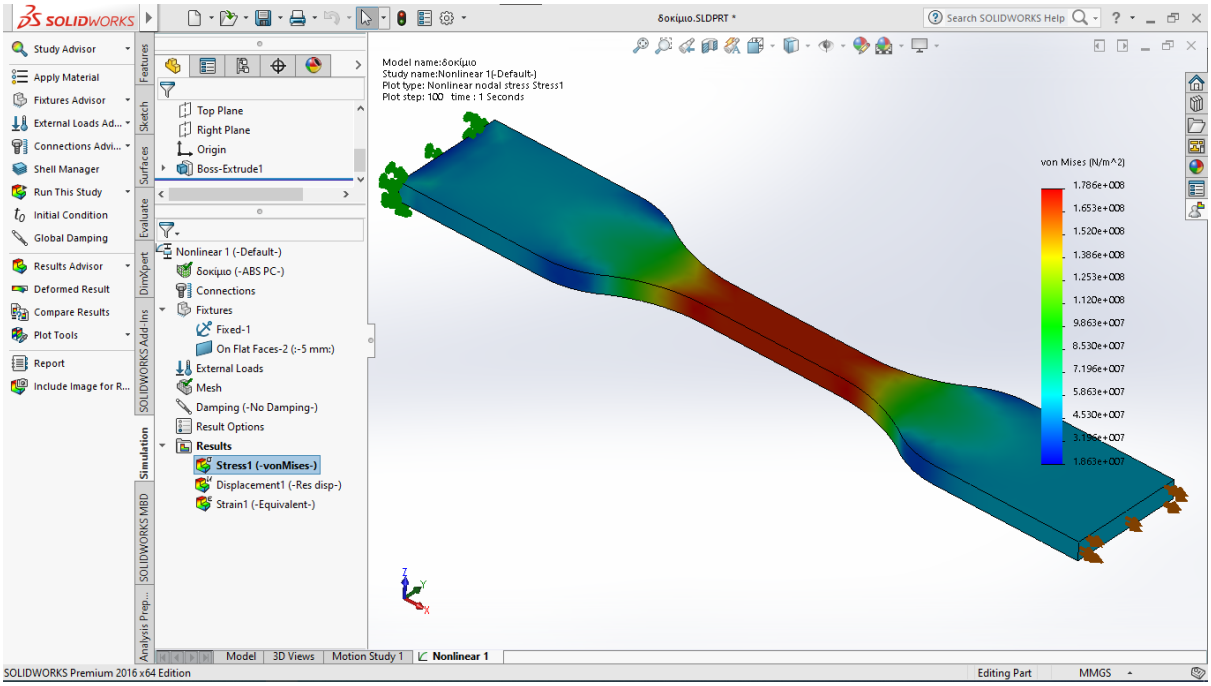
Εικόνα 4.7: Επιλογή παραμέτρων εφελκυσμού στο simulation του SOLIDWORKS.

Τέλος εισάγεται το πλέγμα υπολογισμού για να ξεκινήσει η διαδικασία των πεπερασμένων στοιχείων (βλ. εικόνα 4.8).



Εικόνα 4.8: Εισαγωγή πλέγματος στο simulation του SOLIDWORKS.

Με την ολοκλήρωση των υπολογισμών γίνεται η εξαγωγή των αποτελεσμάτων (βλ. εικόνα 4.9).



Εικόνα 4.9: Εξαγωγή αποτελεσμάτων πειράματος εφελκυσμού στο SOLIDWORKS.

Η συγκεκριμένη διαδικασία χρησιμοποιείται και για τα πέντε υλικά που αναφέρθηκαν παραπάνω για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων και την περεταίρω αξιολόγηση τους.

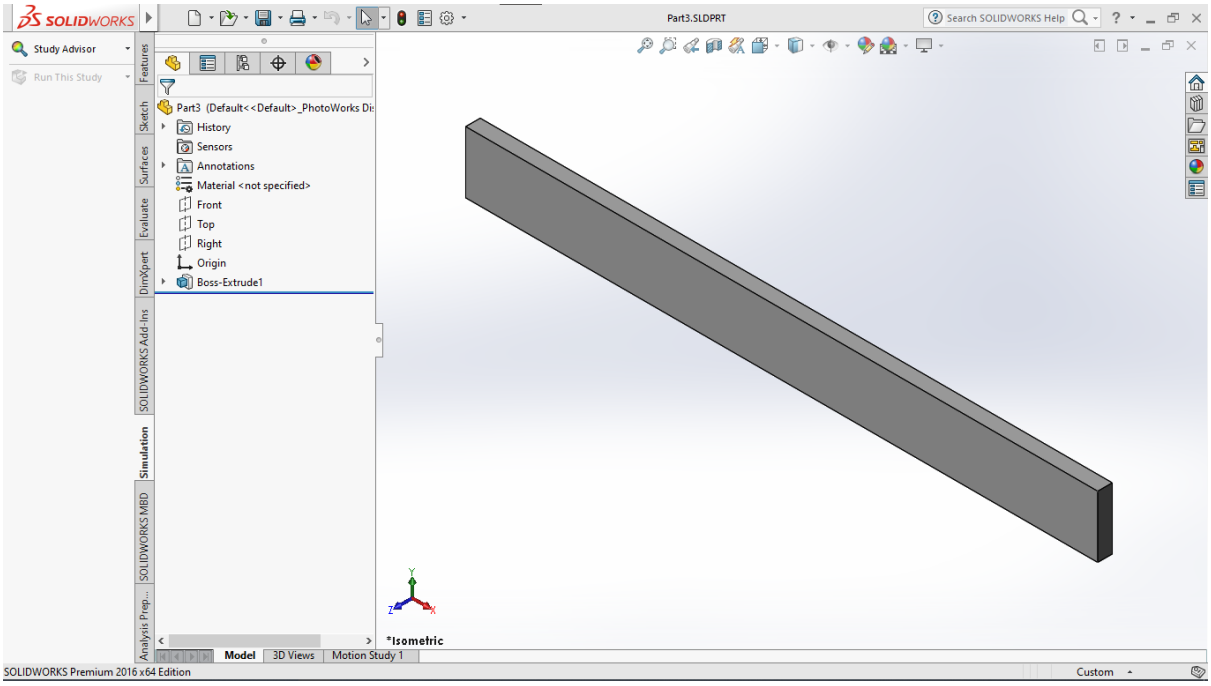
4.3.3) Προσομοίωση κάμψης.

Αυτή η ενότητα έχει σαν σκοπό την παρουσίαση της προσομοίωσης του πειράματος της κάμψης που παρουσιάστηκε στην ενότητα 2 του 3^{ου} κεφαλαίου.

Αρχικά στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία αρχείων στην βιβλιοθήκη του Solidworks:

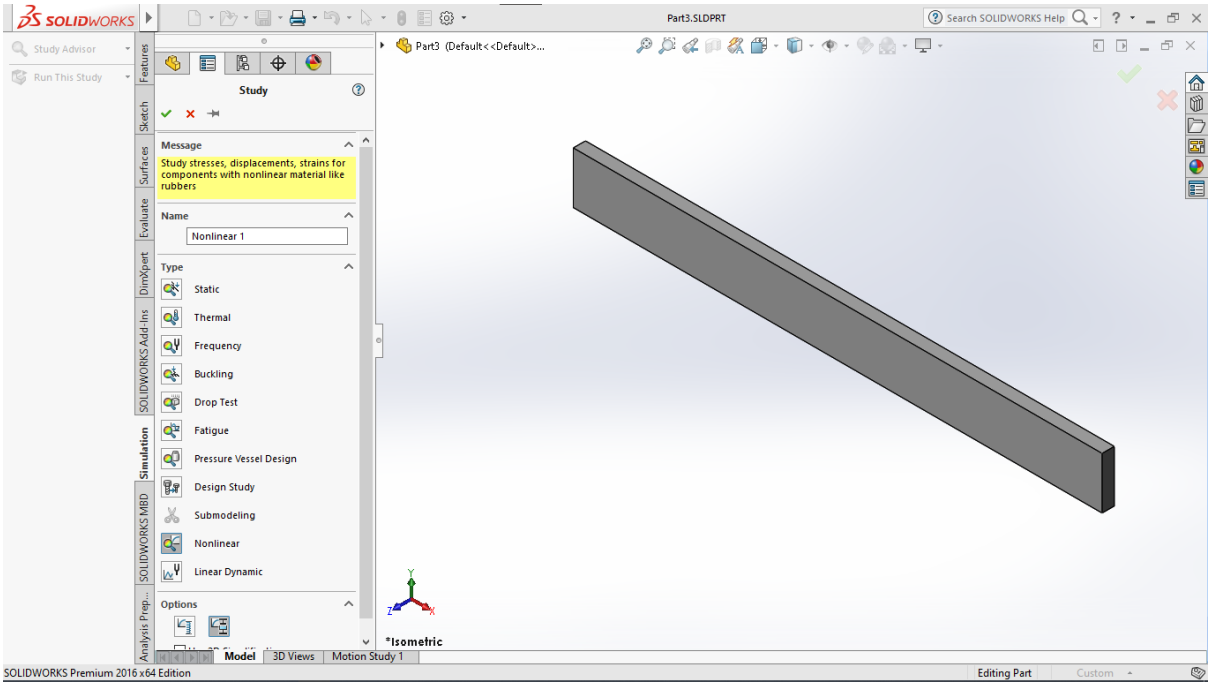
Υλικά 3Δ εκτύπωσης			
Μηχανικές Ιδιότητες			
Περιγραφή	***Τιμές***		
	MG9A-ABC	***PETG***	***PLA-PREMIUM***
Ειδικό βάρος	1.04 g/cm³	1.23 g/cm³	1.24 g/cm³
Αντοχή σε εφελκυσμό	46,4 MPa	50 MPa	64.4 MPa
Επιμήκυνση κατά την θραύση	21.6%	21.5%	15.3%

Στην συνέχεια γίνεται η εισαγωγή του σχεδίου του δοκιμίου στο Solidworks (βλ. εικόνα 4.2) και αφού εισαχθεί επιλέγουμε το Simulation για να ξεκινήσει η προσομοίωση του πειράματος (βλ. εικόνα 4.10).



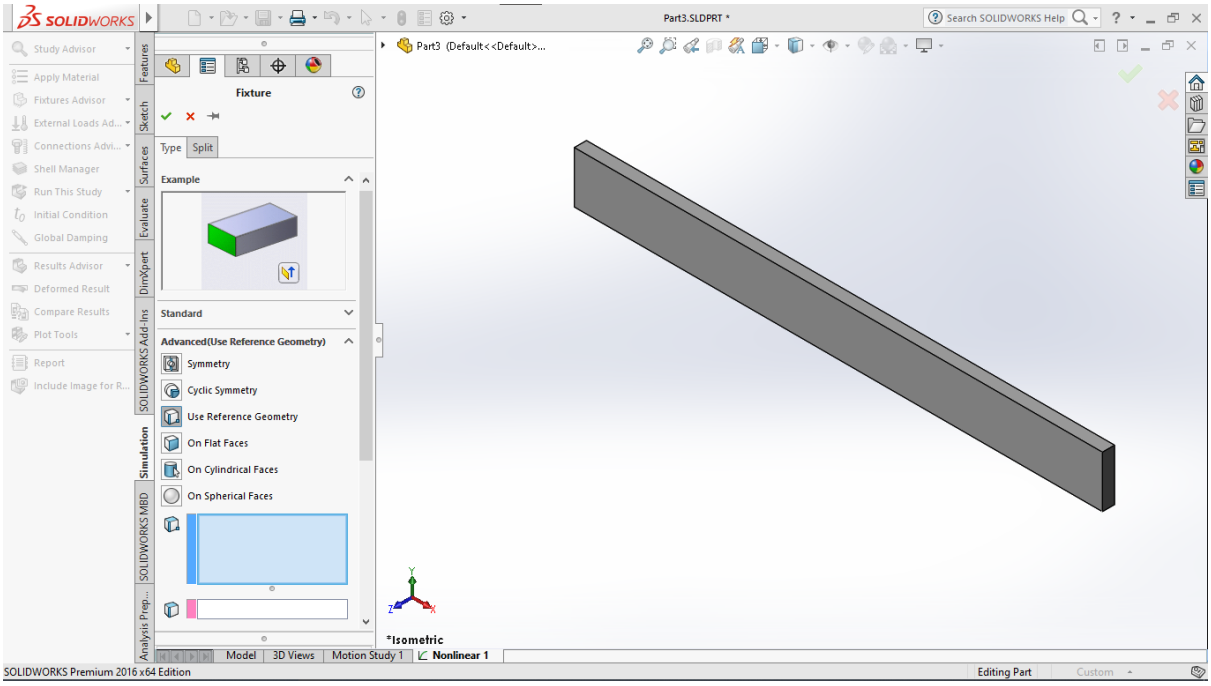
Εικόνα 4.10: Προσομοίωση πειράματος κάμψης στο SOLIDWORKS.

στην συνεχεία γίνεται επιλογή μεθόδου ανάλυσης, στην περίπτωση αυτή επιλέγουμε την στατική ανάλυση (βλ. εικόνα 4.11).



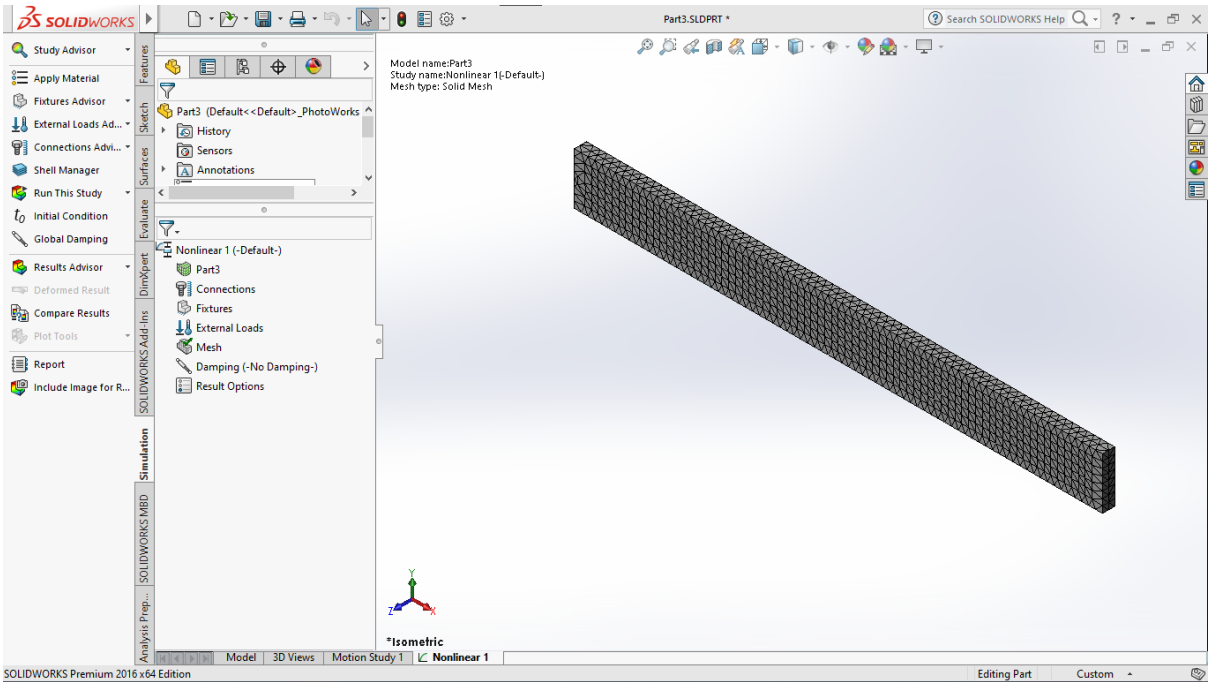
Εικόνα 4.11: γραμμικής ανάλυσης στο SOLIDWORKS.

Αφού γίνει η επιλογή της μεθόδου σειρά έχει η εισαγωγή τον δεδομένων από τον παραπάνω πίνακα για την δημιουργία των υλικών στην βιβλιοθήκη του Solidworks (βλ. εικόνα 4.6) και στην συνέχεια γίνεται εισαγωγή τον παραμέτρων του πειράματος στο simulation του Solidworks (βλ. εικόνα 4.12).



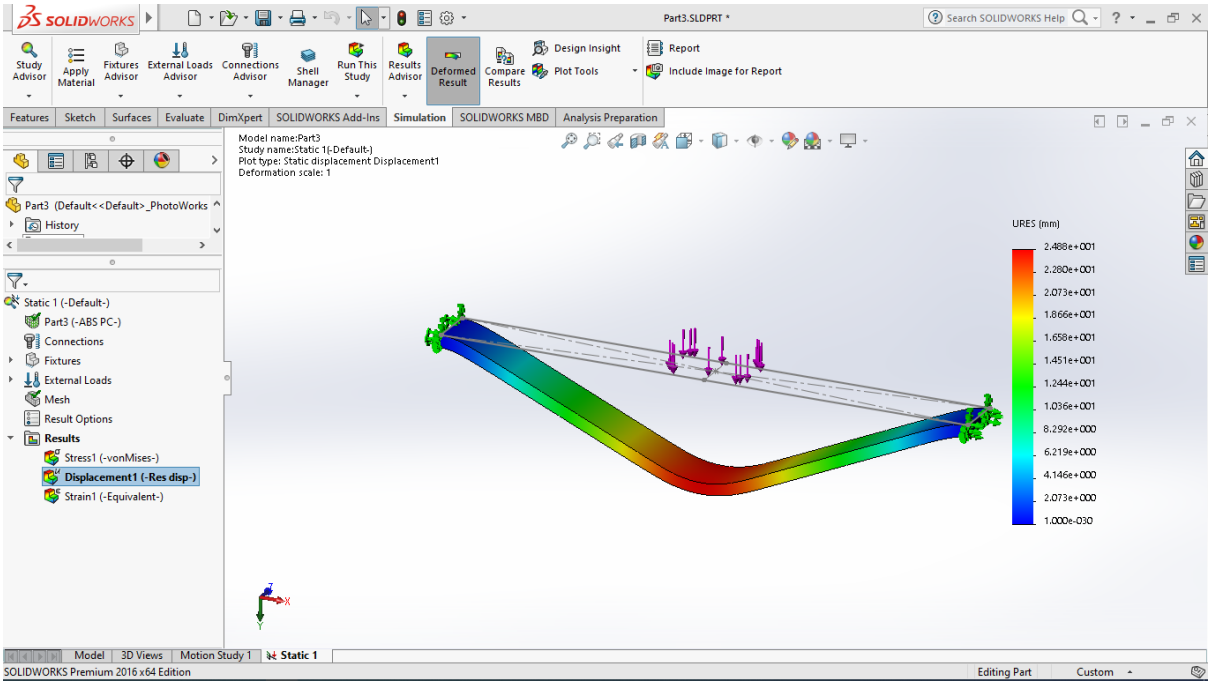
Εικόνα 4.12: Δήλωση παραμέτρων πειράματος κάμψης στο simulation του SOLIDWORKS.

Τέλος εισάγεται το πλέγμα υπολογισμού για να ξεκινήσει η διαδικασία των πεπερασμένων στοιχείων (βλ. εικόνα 4.13).



Εικόνα 4.13: Εισαγωγή πλέγματος στο simulation του SOLIDWORKS.

Με την ολοκλήρωση των υπολογισμών γίνεται η εξαγωγή των αποτελεσμάτων (βλ. εικόνα 4.14)



Εικόνα 4.14: Εξαγωγή αποτελεσμάτων πειράματος κάμψης στο SOLIDWORKS.

Η συγκεκριμένη διαδικασία χρησιμοποιείται και για τα πέντε υλικά που αναφέρθηκαν παραπάνω για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων και την περεταίρω αξιολόγηση τους.

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα και συμπεράσματα.

5.1) Εισαγωγή.

Τα διάφορα υλικά ανάλογα με την σύσταση τους και την κατεργασία που έχουν υποστεί έχουν διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. Η γνώση των ιδιοτήτων αυτών βοηθά στο μηχανολογικό σχεδιασμό διαφόρων κατασκευών. Έτσι τα υλικά υφίσταται διαφορές δοκιμασίες και καταγράφονται οι διάφοροι παράμετροι της μηχανικής τους συμπεριφοράς. Τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται:

- Για την επιλογή υλικού για κάποια εφαρμογή
- Για ποιοτικό έλεγχο
- Για την καταγραφή της συμπεριφοράς του υλικού κάτω από διαφορές καταπονήσεις

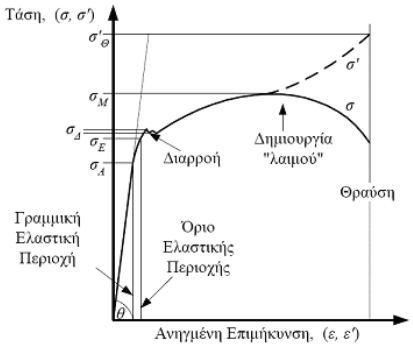
Όταν ασκούνται δυνάμεις σε ένα σώμα το σώμα παραμορφώνεται. Παραμόρφωση είναι η μεταβολή των διαστάσεων και του όγκου του σώματος που μπορεί να συνοδεύεται με αλλαγή του σχήματος του. Το σώμα μπορεί να επιμηκυνθεί, να συμπιεστεί, να υποστεί στρέψη ή να αλλάξει το σχήμα του (διάτμηση).

Ελαστικότητα

Είναι η ιδιότητα που έχει ένα σώμα να επιστρέφει στο αρχικό του μέγεθος και σχήμα όταν οι δυνάμεις που το παραμορφώνουν σταματούν ασκούνται πάνω του. Για να περιγράψουμε τις ελαστικές ιδιότητες γραμμικών αντικειμένων όπως σύρματα, στήλες, δοκοί όταν τεντώνονται(εφελκυσμός) ή συμπιέζονται (συμπίεση ή θλίψη), χρησιμοποιούμε το μέτρο Young.Κάθε υλικό σώμα με την άσκηση τάσης, δηλαδή δύναμης ανά μονάδα διατομής, παραμορφώνεται. Για μικρές τάσεις η παραμόρφωση είναι ανάλογη της τάσης που εφαρμόζεται. Ο λόγος της τάσης προς την παραμόρφωση σε κάθε σώμα είναι σταθερός και ονομάζεται μέτρο ελαστικότητας. Το μέτρο ελαστικότητας εξαρτάται από το υλικό που παραμορφώνεται και την φύση της παραμόρφωσης. Υπάρχουν τρεις διαφορετικές κατηγορίες παραμόρφωσης που χαρακτηρίζονται από διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας. Η γραμμική παραμόρφωση που χαρακτηρίζεται από το μέτρο ελαστικότητας Young, η παραμόρφωση σχήματος που χαρακτηρίζεται από το μέτρο ελαστικότητας σχήματος και η παραμόρφωση όγκου που χαρακτηρίζεται από το μέτρο ελαστικότητας όγκου. [23]

Μέτρο ελαστικότητας Young

Το μέτρο ελαστικότητας Young εκφράζει την παραμόρφωση ενός μονοδιάστατου σώματος, πρακτικά ενός σώματος με μεγάλο μήκος και μικρή διατομή, όπως μία μακριά ράβδος. Το μέτρο ελαστικότητας Young ισούται με την τάση που εφαρμόζεται στο σώμα και το παραμορφώνει κατά μήκος προς την μεταβολή του μήκους του (βλ. εικόνα 5.1)



Εικόνα 5.1: Διάγραμμα σ-ε.

Μέτρο διάτμησης

Το μέτρο διάτμησης χαρακτηρίζει τρισδιάστατα υλικά σώματα που παραμορφώνεται το σχήμα τους χωρίς να μεταβάλλεται ο όγκος του. Ισούται με την τάση που εφαρμόζεται στο σώμα και το παραμορφώνει προς την διατμητική παραμόρφωση, δηλαδή την μεταβολή του μήκους της μίας του πλευράς στην οποία ασκείται η τάση προς το μήκος της πλευράς στην οποία δεν εφαρμόζεται τάση.

Μέτρο ελαστικότητας όγκου

Το μέτρο ελαστικότητας όγκου χαρακτηρίζει τρισδιάστατα υλικά σώματα που κατά την παραμόρφωσή τους μεταβάλλεται ό όγκος τους. Ισούται με την τάση που εφαρμόζεται στο σώμα και το παραμορφώνει προς την μεταβολή του όγκου του σώματος.

5.2)Παρουσίαση αποτελεσμάτων.

5.2.1) Υλικά 3Δ εκτύπωσης.

Η επεξεργασία των δεδομένων από την πειραματική διαδικασία των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν έγινε με την βοήθεια του υπολογιστικού φύλλου του Excel. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν.

1) 910 ALLOY Nylon
2) MG94 ABS (Natural)
3) PETG (Yellow)
4) PLA PREMIUM (Yellow)
5) POLYPROPYLENE

5.2.2) Αποτελέσματα από πειράματα.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών διαδικασιών του εφελκυσμού καθώς και τις κάμψης:

Πίνακας 1: Αποτελέσματα εφελκυσμού

FILAMENT NAME	ΟΡΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ (ULTIMATE STRENGTH)
POLYPROPYLENE	12.8 MPa
MG94 ABS (Natural)	46.4 MPa
910 ALLOY Nylon	47.7 MPa
PETG (Yellow)	50.0 MPa
PLA PREMIUM (Yellow)	64.4 MPa

Πίνακας 2: Αποτελέσματα κάμψης

	2mm/min	
	Maximum applied load (N)	f (mm)
abs	471	23.4
petg	144	6.27
Pla (premium)	626	22.4

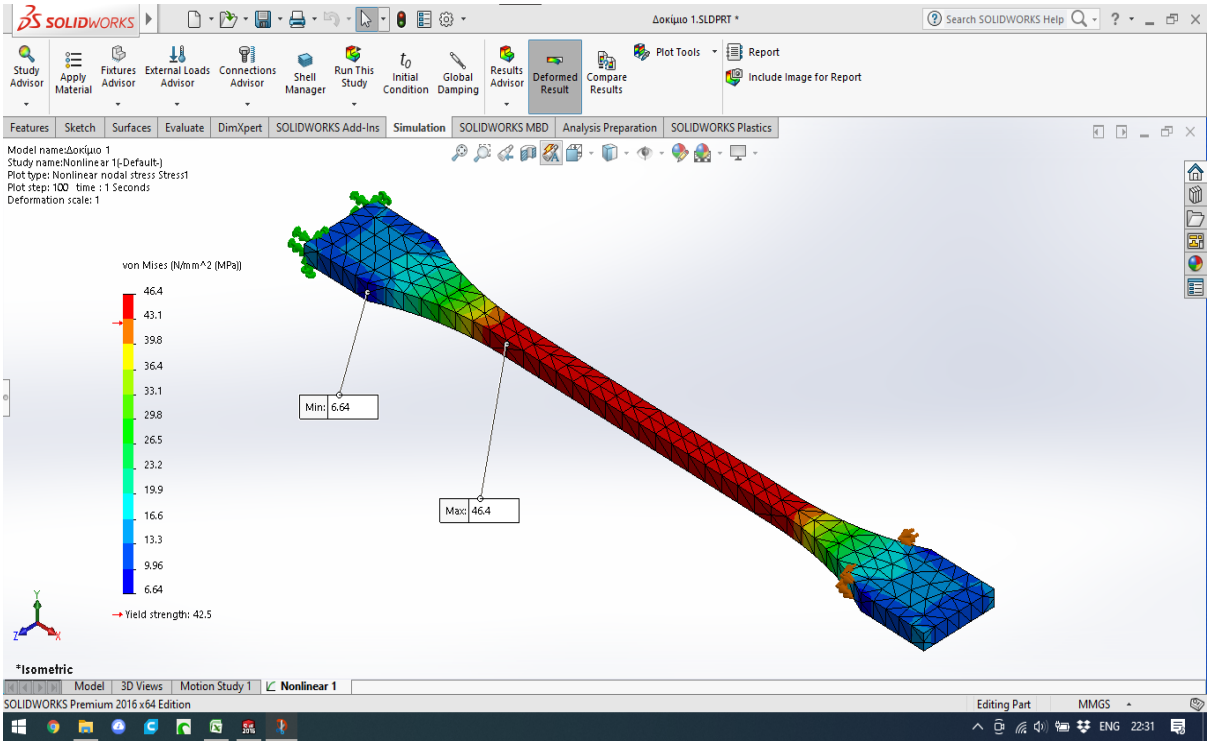
5.2.3) Αποτελέσματα από προσομοίωση πειραμάτων.

Αφού έχουμε ακολουθήσει την διαδικασία όπως την παρουσιάσαμε παραπάνω παίρνουμε τα αποτελέσματα μας από την επίλυση του προβλήματος από το πρόγραμμα.

5.2.3.1 Προσομοίωση εφελκυσμού.

Παρακάτω παραθέτονται τα αποτελέσματα για κάθε υλικό 3Δ εκτύπωσης που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία:

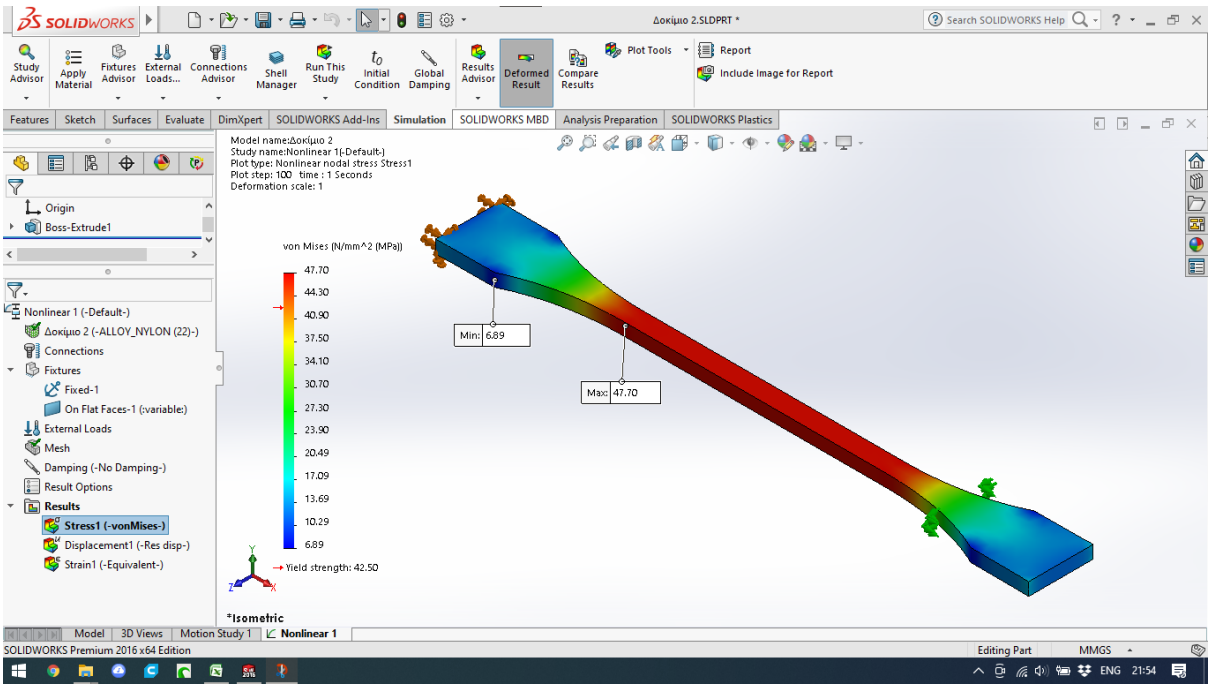
1. **MG94 ABS**



Statistical Data

	Value	
Sum	53	N/mm^2 (MPa)
Avg	26.5	N/mm^2 (MPa)
Max	46.4	N/mm^2 (MPa)
Min	6.64	N/mm^2 (MPa)
RMS	33.1	N/mm^2 (MPa)

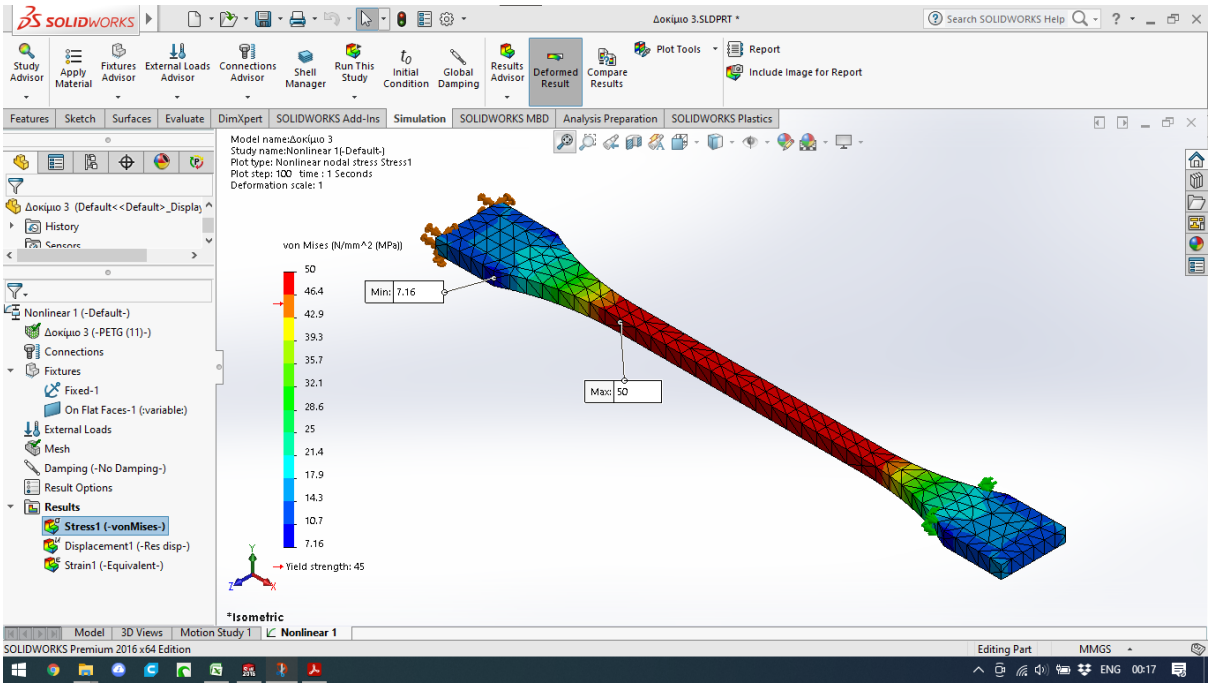
2. Alloy-Nylon



Statistical Data

	Value	
Sum	54.59	N/mm^2 (M
Avg	27.30	N/mm^2 (M
Max	47.70	N/mm^2 (M
Min	6.89	N/mm^2 (M
RMS	34.08	N/mm^2 (M

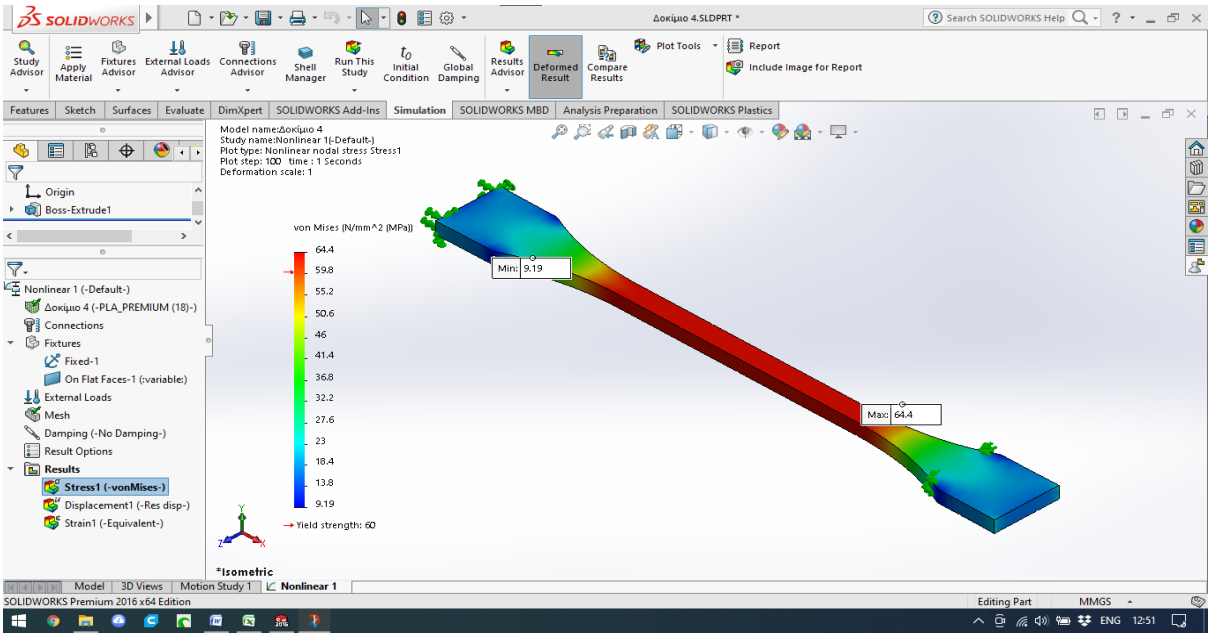
3. PETG



Statistical Data

	Value	
Sum	57.2	N/mm^2 (M
Avg	28.6	N/mm^2 (M
Max	50	N/mm^2 (M
Min	7.16	N/mm^2 (M
RMS	35.7	N/mm^2 (M

4. PLA-PREMIUM



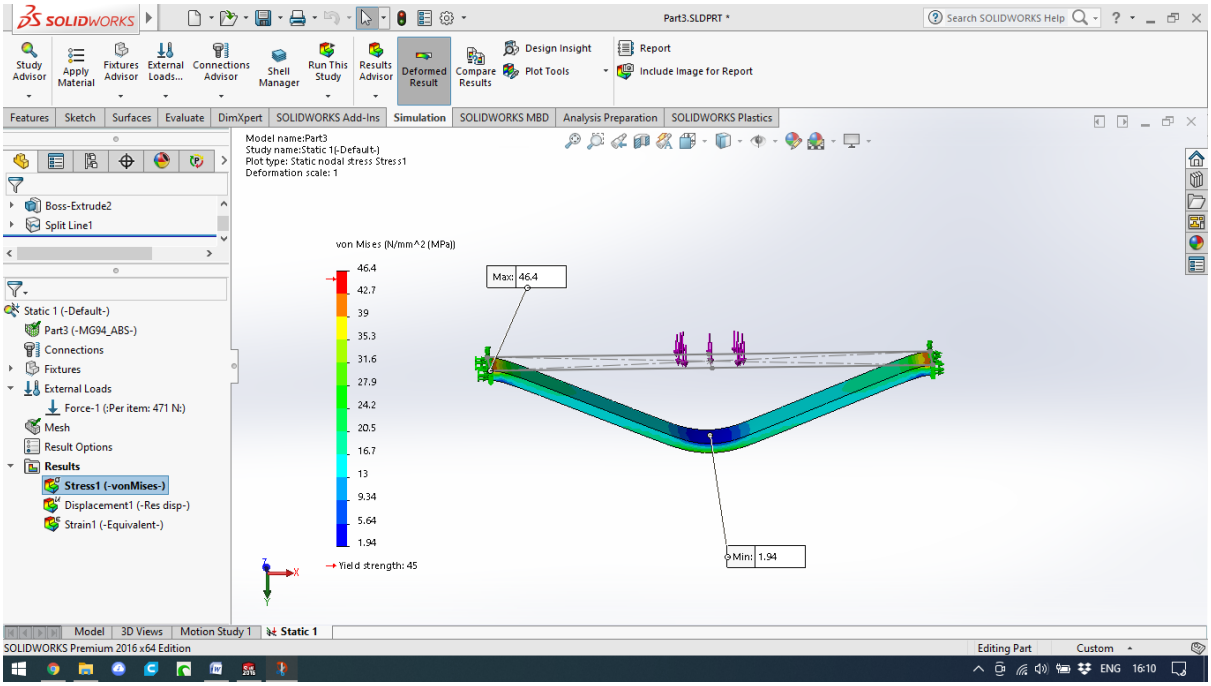
Statistical Data

	Value	
Sum	73.8	N/mm^2 (MPa)
Avg	36.9	N/mm^2 (MPa)
Max	64.4	N/mm^2 (MPa)
Min	9.35	N/mm^2 (MPa)
RMS	46	N/mm^2 (MPa)

5.2.3.2 Προσομοίωση κάμψης

Παρακάτω παραθέτονται τα αποτελέσματα για κάθε υλικό 3Δ εκτυπωτή που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία:

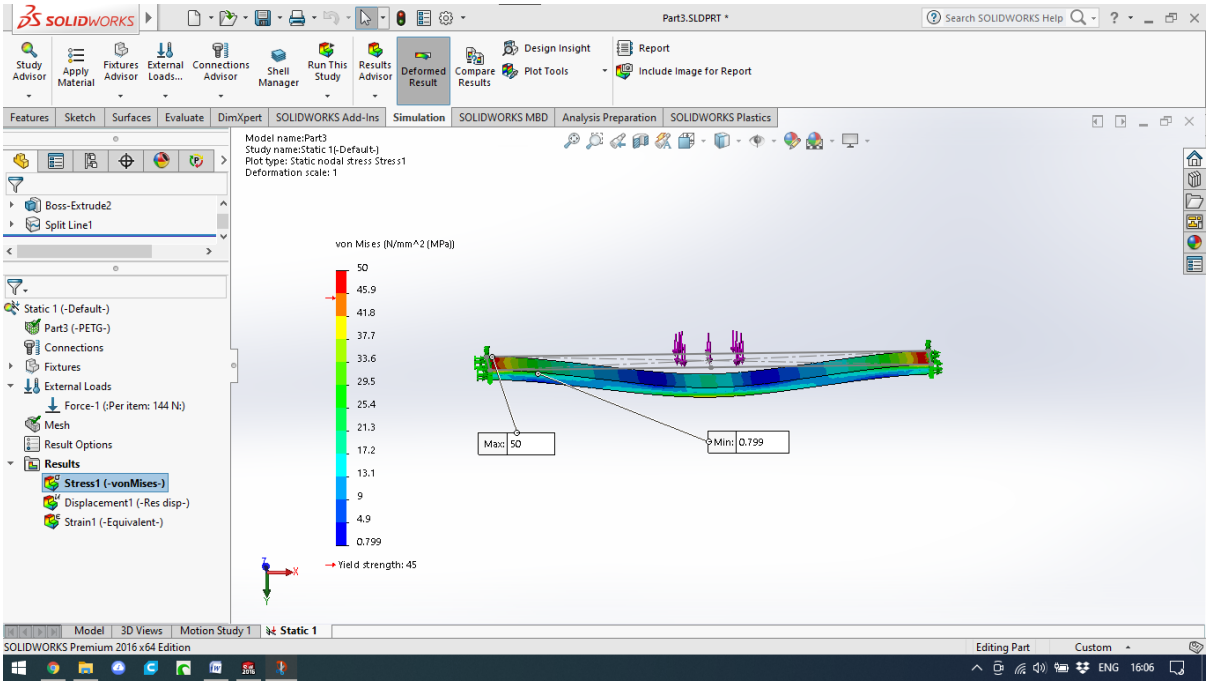
1) **MG94-ABS**



Summary

	Value	
Sum	48.4	N/mm^2 (MPa)
Avg	24.2	N/mm^2 (MPa)
Max	46.4	N/mm^2 (MPa)
Min	2.01	N/mm^2 (MPa)
RMS	32.8	N/mm^2 (MPa)

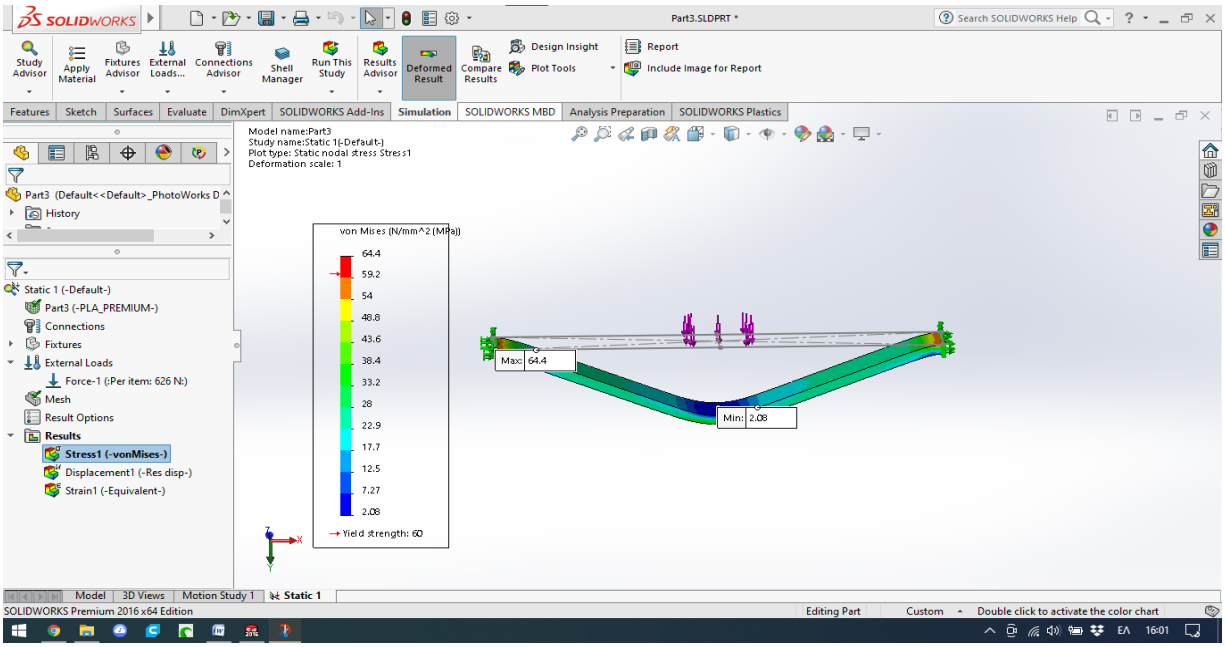
2) **PETG**



Summary

	Value	
Sum	76.5	N/mm^2 (MPa)
Avg	38.3	N/mm^2 (MPa)
Max	50	N/mm^2 (MPa)
Min	26.5	N/mm^2 (MPa)
RMS	40	N/mm^2 (MPa)

3) **PLA-PREMIUM**



Summary

	Value	
Sum	67	N/mm^2 (MPa)
Avg	33.5	N/mm^2 (MPa)
Max	64.4	N/mm^2 (MPa)
Min	2.63	N/mm^2 (MPa)
RMS	45.6	N/mm^2 (MPa)

5.3. Συμπεράσματα.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που απορρέουν από την εργασία που παρουσιάστηκε παραπάνω :

1) Τα αποτελέσματα από τα πείραμα και από τις προσομοιώσεις παρατηρούμε ότι είναι ίδια όσο αφορά τον εφελκυσμό καθώς και την κάμψη.
2) Οι τιμές των μηχανικών παραμέτρων που μετρήθηκαν μεταβάλλονται ανάλογα με τον τρόπο δόμησης των υλικών.
3) Από τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για το πείραμα του εφελκυσμού και της κάμψης, μεγαλύτερο όριο θραύσης όπως παρουσιάζεται και στο πίνακα 1 (βλ σελ.86) έχει το PLA-PREMIUM.
4) Από τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για το πείραμα του εφελκυσμού και της κάμψης, μεγαλύτερη αντοχή στις εφελκυστικές τάσης έχει το ALLOY-NYLON λόγω του ποσοστού επιμήκυνσης του (βλ.σελ.73), ενώ την χειρότερη αντοχή την έχει το PLA-PREMIUM,λόγω του ότι δεν εισέρχεται στην πλαστική περιοχή (βλ.σελ.75).
5) Το PETG αν το συγκινούμε με το ABS παρατηρούμε παρόμοια συμπεριφορά.
6) Αν συγκριθούν συνολικά τα υλικά ,αυτό με τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες είναι το PETG, διότι όπως παρουσιάζεται στο συγκεντρωτικό γράφημα (βλ.σελ.77) ,έχει το μεγαλύτερο όριο θραύση σε σχέση με το ABS και το ALLOY-NYLON.
7) Τα αποτελέσματα μας είναι συμβατά με αυτά της βιβλιογραφίας για άλλα θερμοπλαστικά, όμως οι μεταβολές των παραμέτρων είναι μικρές γιατί οι ταχύτητες που επιλέχτηκαν δεν ήταν μεγάλες. Στη βιβλιογραφία εφαρμόζεται αύξηση της ταχύτητας παραμόρφωσης από 50-500%. Συνεπώς απαιτούνται πειράματα σε ποιο υψηλότερες ταχύτητες για να δώσουν ποιο ξεκάθαρα αποτελέσματα για την επίδραση της ταχύτητας παραμόρφωσης στη μηχανική συμπεριφορά των υλικών που μελετήθηκαν.
8) Η αύξηση των μηχανικών παραμέτρων με την αύξηση της ταχύτητας παραμόρφωσης μπορεί να αποδοθεί στη μικροσκοπική συμπεριφορά της δομής. Συγκεκριμένα τα θερμοπλαστικά παραμορφώνονται ελαστικά και πλαστικά λόγω έκτασης (ευθυγράμμισης) και διολίσθησης των μακρομορίων στη διεύθυνση του εφελκυσμού. Οι αλλαγές αυτές στη δομή απαιτούν απορρόφηση ενέργειας από το υλικό το οποίο είναι ένα φαινόμενο χρονικά εξαρτώμενο. Όταν η ταχύτητα παραμόρφωσης είναι χαμηλή το υλικό έχει τα χρονικά περιθώρια να γίνουν αυτές οι αλλαγές στη δομή του. Όταν η ταχύτητα παραμόρφωσης είναι μεγάλη οι μεταβολές της δομής δεν μπορεί να ακολουθήσουν και το υλικό να συμπεριφέρεται σαν ποιο «άκαμπτη δομή» . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η δομή να συμπεριφέρεται σαν περισσότερο ψαθυροί και άκαμπτη
9) Από τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτύπωση των δοκιμίων, αυτά που μπορούν να χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή εξαρτημάτων όπως χοάνες για την εισαγωγή αέρα του κινητήρα καθώς μπορούν να αντικαταστήσουν τα εξαρτήματα του συστήματος στάθμης πέδησης (χειρόφρενου) είναι το ABS καθώς και το PETG.
10) Η πειραματική διαδικασία πρέπει να εκτελεστεί και για τους άλλους προσανατολισμούς εκτύπωσης (βλ. εικόνα 3.3 σελ.53) για να εξασφαλιστεί καλύτερη εικόνα των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών ,με συνέπεια να γνωρίζουμε ποιος προσανατολισμό να χρησιμοποιείτε κατά την εκτύπωση ενός αντικείμενου.

Βιβλιογραφία

[1] Wikimedia Foundation, Inc., "ΒΙΚΙΠΑΙΔΕΙΑ - Επιστήμη υλικών.," 04 May 2021. [Online]. Available: https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CF%80%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%AE%CE%BC%CE%B7_%CF%85%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CF%8E%CE%BD.

[2] Wikimedia Foundation, Inc., "ΒΙΚΙΠΑΙΔΕΙΑ - Μεταλλουργία.," 16 March 2021. [Online]. Available: https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CE%B5%CF%84%CE%B1%CE%BB%CE%BB%CE%BF%CF%85%CF%81%CE%B3%CE%AF%CE%B1.

[3] Ι.Γιαννατσής, "ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ," 2015. [Online]. Available: https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/4522/1/02_chapter_1.pdf.

[4] Wikimedia Foundation, Inc., "ΒΙΚΙΠΑΙΔΕΙΑ - Τρισδιάστατη εκτύπωση.," 2021 April 01. [Online]. Available: https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A4%CF%81%CE%B9%CF%83%CE%B4%CE%B9%CE%AC%CF%83%CF%84%CE%B1%CF%84%CE%B7_%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%8D%CF%80%CF%89%CF%83%CE%B7.

[5] Wikipedia Foundation, Inc., "WIKIPEDIA - 3D printing," 2021 June 05. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing.

[6] D. D. N. R. D. D. K. S. Vinod G. Gokhare, "International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)," 2017 June 06. [Online]. Available: https://www.ijert.org/research/a-review-paper-on-3d-printing-aspects-and-various-processes-used-in-the-3d-printing-IJERTV6IS060409.pdf.

[7] Σ. Σοκόλη, "Διαδικτυακό μάθημα 3D Lab - 3D εκτυπωτές-Τελειώσεις εκτυπώσεων 3D," [Online]. Available: https://youthart.eu/3dlab/courses/3d-lab-online-course-gr/lessons/12-3d-printers-finishing-3d-printouts-gr/.

[8] 3D Printing Industry, "The Free Beginner's Guide.," 2017. [Online]. Available: https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/#02-history.

[9] Κ. Α. Αν., "Σημειώσεις μαθήματος ΜΣΚ24: Συστήματα ελέγχου/μετρήσεων & ταχείας πρωτυποποίησης.," Ψαχνά Ευβοίας, 2016.

[10] M. Molitch-Hou, "engineering.com - 6 Industris Changed Forever by 3D Printing," 15 November 2016. [Online]. Available: https://www.engineering.com/story/6-industries-changed-forever-by-3d-printing.

[11] L. Carolo, "ALL3DP - 3DPrinted House:20 Most Important Projects," 19 July 2020. [Online]. Available: https://all3dp.com/2/3d-printed-house-3d-printed-building/.

[12] Sculpteo, "sculpteo - 3D printing for construction and architectureQ The Ultimate Guide 2021," 2021.

[13] Athensmagazine, "Athensmagazine - Τι είναι οι 3D εκτυπωτές; Πώς καταφέρνουν να κατασκευάζουν ακόμα και ανθρώπινες καρδιές;," 09 Μάϊος 2014. [Online]. Available: https://www.athensmagazine.gr/article/athens-guide/bestofathens/100267-ti-einai-oi-3d-ektypwtes-pws-katafernoyn-na-kataskeyazoyn-akoma-kai-anthrwpines-kardies-photos-videos.

[14] H. Watkin, "ALL3DP - Scientists 3D Print Human Stem Cells to Create New Ears," 06 January 2017. [Online]. Available: https://all3dp.com/scientists-can-use-3d-printing-and-human-stem-cells-to-create-new-ears/?utm_source=wpn&utm_medium=wpn&utm_campaign=wpn.

[15] H. Watkin, "ALL3DP - Medical Breakthrough with 3D Printed Bone Implants," 08 September 2016. [Online]. Available: https://all3dp.com/3d-printed-bone-

implants/?utm_source=wpn&utm_medium=wpn&utm_campaign=wpn.

[16] H. Segerman, "3D printing in Mathematics," Oklahoma, 2020.

[17] 3DSPOT, "3dspot - Οδηγός υλικών 3D εκτύπωσης.," 2019. [Online]. Available: https://www.3dspot.gr/odigos-ylikon-3d-ektyposis/.

[18] Wikimedia Foundation, Inc., "ΒΙΚΙΠΑΙΔΕΙΑ - Εφελκυσμός," 15 Απρίλιος 2020. [Online]. Available: https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CF%86%CE%B5%CE%BB%CE%BA%CF%85%CF%83%CE%BC%CF%8C%CF%82.

[19] E. Wolf, "AIRWOLF3D - Material Testing Part 1:Tensile Strength ISO 527," 20 Μάρτιος 2018. [Online]. Available: https://airwolf3d.com/2018/03/20/material-strength-testing/.

[20] AIRWOLF 3D PRINTERS, "AW3D AXIOM 3D PRINTER," 2019.

[21] Wikimedia Foundation, Inc, "ΒΙΚΙΠΑΙΔΕΙΑ - Κάμψη," 05 Φεβρουάριος 2020. [Online]. Available: https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CE%AC%CE%BC%CF%88%CE%B7.

[22] Wikimedia Foundation, Inc., "ΒΙΚΙΠΑΙΔΕΙΑ - Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων.," 24 Μάϊος 2021. [Online]. Available: https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CE%AD%CE%B8%CE%BF%CE%B4%CE%BF%CF%82_%CF%80%CE%B5%CF%80%CE%B5%CF%81%CE%B1%CF%83%CE%BC%CE%AD%CE%BD%CF%89%CE%BD_%CF%83%CF%84%CE%BF%CE%B9%CF%87%CE%B5%CE%AF%CF%89%CE%BD.

[23] Wikimedia Foundation, Inc., "ΒΙΚΙΠΑΙΔΕΙΑ - Ελαστικότητα.," 07 Φεβρουάριος 2020. [Online]. Available: https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CE%BB%CE%B1%CF%83%CF%84%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B1.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Παράρτημα Ι

❖ ***910 ALLOY Filament (Nylon Based***

AIRWOLF 3D

Technical Data Sheet

Issued: March 7, 2018

Revised: March 21, 2018

910 ALLOY Filament (Nylon Based)

SECTION 1, IDENTIFICATION

Product Part Number:	AW3D-F21503 AW3D-F21501 AW3D-F21603 AW3D-F21601
Manufacturer:	Taulman 3D

AIRWOLF 3D TESTED PROPERTIES

Ultimate Strength:	47.7 MPa
Elongation at Break:	28.8%

(see "Methodology of Test" for details)

Recommended Use: 3D printing filament

Restrictions on Use: For use with 3D printers

SECTION 2, DESCRIPTION

Description: 910 Alloy is the combined effort of chemical companies, extrusion manufactures and Taulman 3D to specifically develop a single material to meet as many high performance 3D Printing needs as possible. With a combined tensile strength higher than the strongest co-polyesters, the durability of Nylons, a shrinkage factor that rivals our t-glase, a vast range of chemical resistance and a 95C working range, you now have one solution easily printable at 245C.

Applications:

Any industrial parts that are currently being made of other high tensile polymers.
Large motor mounting
Industrial vibration isolators and damping parts
High Pressure Sand Blasting resistant -Sand Blast Masking
Electroplating supports and hangers
Chemical dip and tank supports.
High end gears and cams
Chemical resistant equipment covers
Prosthetics
Pulleys, mounts and brackets for machines

Key Features:

Semi-flexible
Impact Resistant
Fatigue Resistant
Available in White or Black color
Does not shrink as much as traditional nylons
Extrudes at a lower temperature than other nylons

SECTION 3, SPECIFICATIONS (Manufacturer)

EXTRUDER TEMPERATURE	240-250C
BED TEMPERATURE	70-80C
HEATED BED	Required
RECOMMENDED BUILD SURFACE	Wolfbite NITRO
DIAMETER	2.88mm
COLOR	Black, Natural
COMPATIBLE MACHINE	AXIOM, AXIOM 20, AXIOM Dual Extruder, EVO, HD Series
HS Code	3916.9
THERMAL	
Printing Temperature	240-250C
Melting Temperature	210C
Tg Glass Transition	82C
Pyrolysis - Thermal degradation	349C
Non-Destructive Evaluation	YES
Print-Bed Temp	70-80C
Ambient Temp (Enclosure)	30 - 100C
PHYSICAL	
Nominal Diameter (3mm Maximum Dia)	2.85 mm
Weight / spool	1 lb
Nominal Lenght / spool (in feet)	180
Shrinkage - in/in	0.0033
Solvent/glue	ComPlete
MECHANICAL	
Tensile Stress "PSI" when 3D Printed	8100

Ultimate Elongation when 3D Printed	0.32
Modulus "PSI" when 3D Printed	72932
OPTICAL	
Opacity	0.7
Reflectivity	N/A
APPROVALS	
FDA - Direct Food Contact	YES
FDA Direct Drink Contact	YES
UL FLAMMABILITY	
UL 94 HB	YES
UL 94 V2 at 1.5 mm thickness	YES

SECTION 4, ADDITIONAL INFORMATION

Specifications are based on an average of reported values.

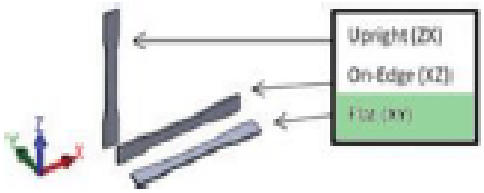
Moisture may play a strong part in shrinkage. Less moisture results less shrinkage.

To adhere nylon to nylon, use ComPlete Glue.

Methodology of tests performed by Airwolf 3D:

Airwolf 3D has tested this material, in its 3d printed form, for the mechanical properties of "Ultimate Strength" and "Elongation at Break" per ISO 527 standards. Specimens were printed on an AXIOM 3D printer with a nozzle (orifice size 0.5). The specimens were "dog bone" shaped with a size of 75mm x 10mm x 2mm and printed with 90 % fill density. Wolfbite Nitro adhesive was used to adhere the part to the heated bed during print cycle. The default "Standard" setting in APEX slicing software was used. Details are as follow:

Layer height: .2mm
Shell thickness: 1mm
Bottom/Top thickness: 1.2mm
Fill density: 90%
Printing temp: 245C
Bed temp: 80C
Flow: 100%
Specimens were printed flat on the XY plane



The equipment used: MODEL 1ST Electromechanical Testing Machine by Tinius Olsen (Crosshead).

A minimum of six specimens were tested. The Ultimate Strength and Elongation at Break values were determined by calculating the average of all specimens tested.

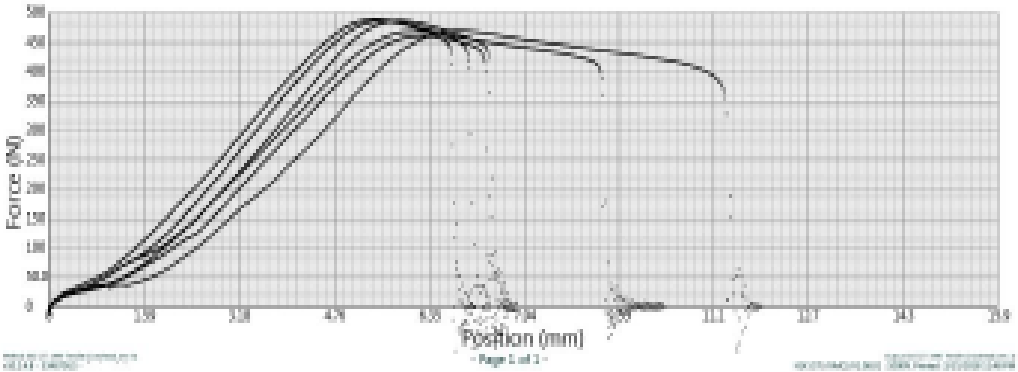
Disclaimer

Any technical information or assistance provided herein is given and accepted at your risk, and neither Airwolf 3D or its affiliates make any warranty relating to it or because of it. Neither Airwolf 3D nor its affiliates shall be responsible for the use of this information, or of any product, method or apparatus mentioned, and you must make your own determination of its suitability and completeness for your own use, for the protection of the environment, and for the health and safety of your employees and purchasers of your products. No warranty is made of the merchantability or fitness of any product; and nothing herein waives any of Airwolf 3D's conditions of sale. Specifications are subject to change without notice.

Version	1.200
Date	03/21/2018

AIRWOLF 3D FILAMENT - 910 ALLOY ISO 527 Tensile (Crosshead)
NYLON

Ultimate Strength MPa	Elongation at Break %	Yield Strength MPa
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
average	[illegible]	[illegible]
SD ±1.1	4.70	[illegible]



❖ *MG94 ABS Filament*

Technical Data Sheet

Issued: March 7, 2018
Revised: March 21, 2018

MG94 ABS Filament

SECTION 1, IDENTIFICATION

Product Part Number: F06103

Manufacturer: Airwolf 3D

Address: 11208 Young River Avenue, Fountain Valley, CA 92708

Phone Number: +1 949-478-2933

Recommended Use: 3D printing filament

Restrictions on Use: For use with 3D printers

AIRWOLF 3D TESTED PROPERTIES

Ultimate Strength:	46.4 MPa
Elongation at Break:	21.6 %

(see "Methodology of Test" for details)

SECTION 2, DESCRIPTION

Description: Acrylonitrile butadiene styrene for functional prototypes or end-use production parts. With superior layer bonding, high printability, and a smooth finish ABS.

Applications:
Concept modeling
Visual and functional prototyping
Manufacturing tools
End use parts
Short run manufacturing
Automotive

Key Features: Excellent mechanical properties and interlayer adhesion, good aesthetics, minimal warping and reliable bed adhesion.

SECTION 3, SPECIFICATIONS (PER MANUFACTURER)

EXTRUDER TEMPERATURE	235C - 260C
BED TEMPERATURE	110C – 130C
HEATED BED	Required

RECOMMENDED BUILD SURFACE	Wolfbite for ABS, PETG, TPU, and TPE
DIAMETER	2.88mm
COLOR	Black, Black 5lbs, Natural, Natural 5lbs, White, White 5lbs
COMPATIBLE MACHINE	AXIOM, AXIOM 20, AXIOM Dual Extruder, EVO, HD Series
COMPATIBLE SUPPORT MATERIAL	HydroFill Water-Soluble Support

GENERAL	
Density ISO 1183	1.04 g/cm³
THERMAL	
HDT, 0.45 MPa, 3.2 mm, unannealed ASTM D 648	95 C
HDT, 1.82 MPa, 3.2mm, unannealed ASTM D 648	82 C
PHYSICAL	
Melt Flow Rate, 230°C/3.8 kgf ASTM D 1238	11.7 g/10 min
Vicat Softening Temp, Rate B/50 ASTM D 1525	98 C
Specific Gravity ASTM D 792	1.05
Shrinkage, flow, 3.2 mm (5)	0.5 – 0.8 %
MECHANICAL	
Ultimate Strength when 3D Printed:	45.4 MPa
Elongation at Break when 3D Printed:	21.6 %
UL FLAMMABILITY	
UL Recognized, 94HB Flame Class Rating (3) 1.52 mm	UL 94

SECTION 4, ADDITIONAL INFORMATION

For challenging prints with complex internal geometry, MG94 ABS is compatible with HydroFill Water-Soluble Support.

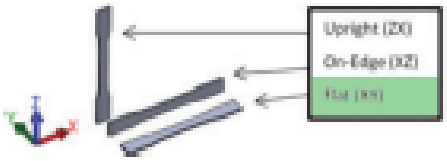
Acetone vapor treatment can minimize layer lines.

Methodology of Tests performed by Airwolf 3D:

Airwolf 3D tested this material, in its 3d printed form, for the mechanical properties of "Ultimate Strength" and "Elongation at Break" per ISO 527 standards. Specimens were printed on an AXIOM 3D printer with a nozzle orifice size 0.5mm. The specimens were "dog bone" shaped with a size of 75mm x 10mm x 2mm and printed with 90% fill density. Wolfbite adhesive was used to adhere the part to the heated bed during print cycle. The default "Standard" setting in APEX slicing software was used. Details are as follows:

Layer height:	0.22mm
Shell thickness:	0.5mm
Bottom/Top thickness:	1.2mm
Fill density:	90%
Printing temp:	250C
Bed temp:	110C
Flow:	100%
Color:	Natural

Specimens were printed flat on the XY plane.



The equipment used: MODEL 1ST Electromechanical Testing Machine by Tinius Olsen (Crosshead).

A minimum of six specimens were tested. The Ultimate Strength and Elongation at Break values were determined by calculating the average of all specimens tested.

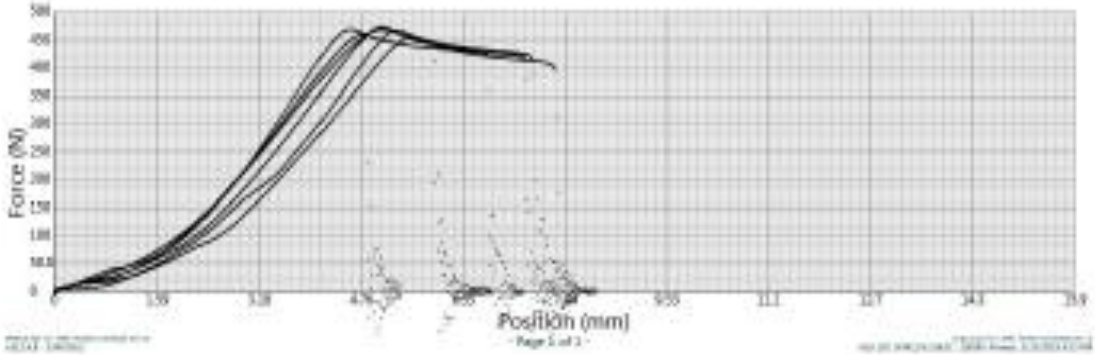
Disclaimer

Any technical information or assistance provided herein is given and accepted at your risk, and neither Airwolf 3D or its affiliates make any warranty relating to it or because of it. Neither Airwolf 3D nor its affiliates shall be responsible for the use of this information, or of any product, method or apparatus mentioned, and you must make your own determination of its suitability and completeness for your own use, for the protection of the environment, and for the health and safety of your employees and purchasers of your products. No warranty is made of the merchantability or fitness of any product; and nothing herein waives any of Airwolf 3D's conditions of sale. Specifications are subject to change without notice.

Version	1.200
Date	03/21/2018

AIRWOLF 3D FILAMENT - MG 94 ISO 527 Tensile (Crosshead)
ABS NATURAL

Ultimate Strength MPa	Elongation at Break %	Yield Strength MPa
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
Average [illegible]	[illegible]	[illegible]
SD	[illegible]	[illegible]



❖ ***NYLON 680 Filament***

Technical Data Sheet

Issued: March 7, 2018

Revised: NA

NYLON 680 Filament

SECTION 1, IDENTIFICATION

Product Part Number:	F14903
Manufacturer:	Taulman 3D
Recommended Use:	3D printing filament
Restrictions on Use:	For use with 3D printers

SECTION 2, DESCRIPTION

Description:	FDA approved for applications requiring contact with food or beverages. Has ability to handle high temperatures inherent with steam, boiling water and dishwasher usage. This Nylon is specifically developed for FFF 3D printing and has a consistent melt viscosity. Nylon 680 is a CAS Reg. No. 51995-62-1 Nylon 6/69.
Applications:	Prosthesis Medical jigs and fixtures Gears
Key Features:	Semi-flexible Impact Resistant Fatigue Resistant Available in White or Black color

SECTION 3, SPECIFICATIONS

EXTRUDER TEMPERATURE	250C – 255C
BED TEMPERATURE	30C – 65C
HEATED BED	Required
RECOMMENDED BUILD SURFACE	Wolfbite NITRO
DIAMETER	2.88mm
COLOR	Black, Natural

COMPATIBLE MACHINE	AXIOM, AXIOM 20, AXIOM Dual Extruder, EVO
HS Code	3916.9

THERMAL	
Printing Temperature	250C-255C
Melting Temperature	210C
Tg Glass Transition	93C
Pyrolysis - Thermal degradation	351C
Non-Destructive Evaluation	YES
Print-Bed Temp	30-65C
Ambient Temp (Enclosure)	30 - 100C

PHYSICAL	
Nominal Diameter (3mm Maximum Dia)	2.85 mm
Weight / spool	1 lb
Nominal Lenght / spool (in feet)	180
Shrinkage - in/in	0.0033
Solvent/glue	ComPlete

MECHANICAL	
Tensile Stress "PSI" when 3D Printed	6900
Ultimate Elongation when 3D Printed	0.34
Modulus "PSI" when 3D Printed	N/A

OPTICAL	
Opacity	0.7
Reflectivity	N/A
Color	Natural

APPROVALS	
FDA - Direct Food Contact	YES
FDA Direct Drink Contact	YES

UL FLAMMABILITY	
UL 94 HB	YES
UL 94 V2 at 1.5 mm thickness	YES

SECTION 4, ADDITIONAL INFORMATION

Specifications are based on an average of reported values.

Moisture may play a strong part in shrinkage. Less moisture results less shrinkage.

To adhere nylon to nylon, use ComPlete Glue.

Testing performed by St Louis Testing Laboratories with the following:

Unit = 5500R Instron with Bluehill Software.
ASTM D412-0a E2
5 specimens printed at rated temperature
Bars .1314" thick
1 perimeter
All surfaces (no fill, only surfaces)
45 degree surfaces

Living hinge is using the material flexible properties as a hinge assuming 2000 90 degree transitions.

Disclaimer

Any technical information or assistance provided herein is given and accepted at your risk, and neither Airwolf 3D or its affiliates make any warranty relating to it or because of it. Neither Airwolf 3D nor its affiliates shall be responsible for the use of this information, or of any product, method or apparatus mentioned, and you must make your own determination of its suitability and completeness for your own use, for the protection of the environment, and for the health and safety of your employees and purchasers of your products. No warranty is made of the merchantability or fitness of any product; and nothing herein waives any of Airwolf 3D's conditions of sale. Specifications are subject to change without notice.

Version	Version 1.000
Date	03/07/2018

❖ ***PETG Filament***

Technical Data Sheet

Issued: March 7, 2018

Revised: June 19, 2018

PETG Filament

SECTION 1, IDENTIFICATION

Product Part Number:
Black AW3D-F14501
Blue (Transparent) AW3D-F14515
Red AW3D-F14504
White AW3D-F14502
Yellow (Transparent) AW3D-F14508

Recommended Use: 3D printing filament

Restrictions on Use: For use with 3D printers

AIRWOLF 3D TESTED PROPERTIES

Ultimate Strength:	50.0 MPa
Elongation at Break:	21.5 %

(see "Methodology of Test" for details)

SECTION 2, DESCRIPTION

Description:

PETGs (or copolyester) are glycol modified PETs; the modification is done by adding a second glycol during polymerization. The resulting molecular structure is irregular and the resin is clear and amorphous with a higher glass transition temperature of 88 C (190 F). PETGs can be processed over a wider processing range than conventional PETs and offer good combination of properties such as toughness, clarity, and stiffness.

Polyethylene Terephthalate Glycol

Applications:

Low shrinkage (minimal warping) is ideal for printing larger prototypes
Prototypes which are shatterproof or translucent
Headlight covers
Mounts, jigs and fixtures
Food and liquid storage

Key Features:

Brilliant Color
Superior Chemical Resistance
BPA Free
Amorphous: Low and near isotropic shrinkage
Low moisture absorption
Very low odor emitted during printing
More flexible than PLA or ABS
Can be printed with lower bed temperatures than ABS
Does not need an enclosure

SECTION 3, SPECIFICATIONS (Manufacturer)

EXTRUDER TEMPERATURE	235C – 255C
BED TEMPERATURE	80C - 120C
HEATED BED	Required
RECOMMENDED BUILD SURFACE	Wolfbite for ABS, PETG, TPU, and TPE
DIAMETER	2.88mm
COLOR	Black, Blue, Red, White, Yellow
COMPATIBLE MACHINE	AXIOM, AXIOM 20, AXIOM Dual Extruder, EVO, HD Series
GENERAL	
Density	1.23 G/CM3
THERMAL	
Heat Distortion Temperature (HDT) @ 0.45MPa ISO 75	64 C
Melt Flow (g/10min)	20 (250 C / 2.16 kg)
MECHANICAL	
Elongation at Break	21.5 %
Tensile Strength	50 MPa
Flexural Modulus	2027 Mpa
Bending Strength	68 Mpa
Impact Strength IZOD	8 KJ/m2
Low moisture absorption	Low

SECTION 4, ADDITIONAL INFORMATION

PETG can jam in the print head if printed too hot. If the printer is enclosed, it is recommended to keep the enclosure door/top open if possible to prevent filament swelling and to maximize print quality.

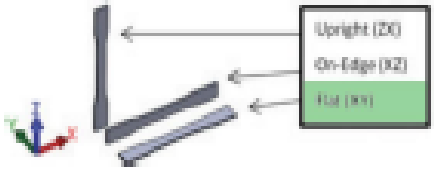
Methodology of Tests performed by Airwolf 3D:

Airwolf 3D tested this material, in its 3d printed form, for the mechanical properties of "Ultimate Strength" and "Elongation at Break" per ISO 527 standards. Specimens were printed on an AXIOM 3D printer with a nozzle orifice size 0.5mm. The specimens were "dog bone" shaped with a size of 75mm x

10mm x 2mm and printed with 90% fill density. Wolfbite adhesive was used to adhere the part to the heated bed during print cycle. The default "Standard" setting in APEX slicing software was used. Details are as follows:

Layer height:	0.25mm
Shell thickness:	1.0mm
Bottom/Top thickness:	1.2mm
Fill density:	90%
Printing temp:	250C
Bed temp:	100C
Flow:	100%
Filament Color:	Yellow

Specimens were printed flat on the XY plane.



The equipment used: MODEL 1ST Electromechanical Testing Machine by Tinius Olsen (Crosshead).

A minimum of six specimens were tested. The Ultimate Strength and Elongation at Break values were determined by calculating the average of all specimens tested.

Disclaimer

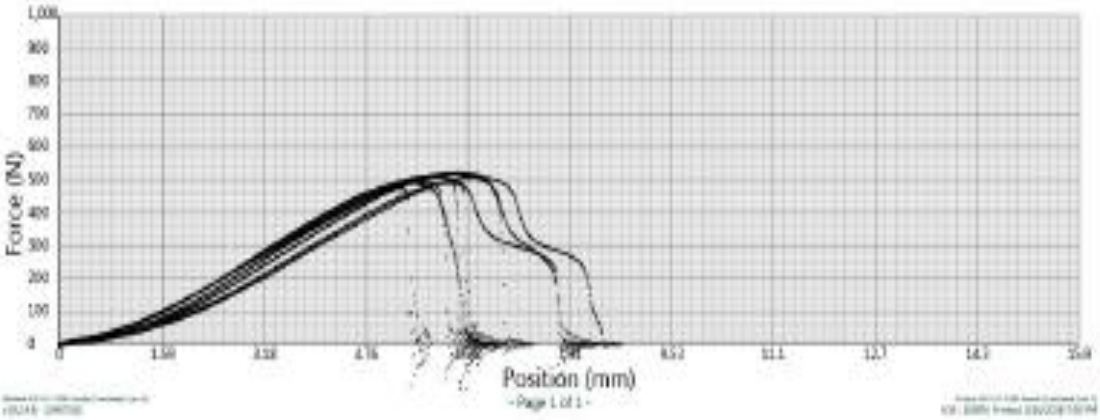
Any technical information or assistance provided herein is given and accepted at your risk, and neither Airwolf 3D or its affiliates make any warranty relating to it or because of it. Neither Airwolf 3D nor its affiliates shall be responsible for the use of this information, or of any product, method or apparatus mentioned, and you must make your own determination of its suitability and completeness for your own use, for the protection of the environment, and for the health and safety of your employees and purchasers of your products. No warranty is made of the merchantability or fitness of any product; and nothing herein waives any of Airwolf 3D's conditions of sale. Specifications are subject to change without notice.

Version	1.300
Date	06/19/2018

AIRWOLF 3D FILAMENT - PETG YELLOW

ISO 527 Tensile (Crosshead)

Ultimate Strength MPa	Elongation at Break %	Yield Strength MPa
52.1	22.8	N/P
47.3	19.1	N/P
50.6	21.3	N/P
48.8	20.0	N/P
46.2	20.0	N/P
51.4	24.0	N/P
48.8	20.0	N/P
50.8	21.9	N/P
50.7	20.9	N/P
Average 50.0	21.5	N/A
SD	1.93	N/A



- Page 1 of 1 -

❖ *PLA Premium Filament*

Technical Data Sheet

Issued: March 7, 2018

Revised: March 21, 2018

PLA Premium Filament

SECTION 1, IDENTIFICATION

Product Part Number:

Black	AW3D-F06601	Magenta	AW3D-F06614
White	AW3D-F06602	Black	AW3D-F89501
Natural	AW3D-F06603	White	AW3D-F41302
Red	AW3D-F06604	Blue	AW3D-F80815
Neon Blue	AW3D-F06610	Red	AW3D-F95604
Light Green	AW3D-F06611	Green	AW3D-F38806
Silver	AW3D-F06607	Yellow	AW3D-F72208
Neon Yellow	AW3D-F06612	Natural	AW3D-F30603
Grape	AW3D-F06609	Silver	AW3D-F63107
Neon Orange	AW3D-F06613		

Recommended Use: 3D printing filament

AIRWOLF 3D TESTED PROPERTIES

Ultimate Strength:	64.4 MPa
Elongation at Break:	15.3%

(see "Methodology of Test" for details)

SECTION 2, DESCRIPTION

Description:

More environmentally friendly than other materials, PLA is biodegradeable, derived from plants, BPA-free, and contains no phthalates or heavy metals

Polylactic Acid

Applications:

3D printing in schools
Prototypes with short shelf life
Toys and promotional items
"Lost Wax" Molds from 3D printed parts

Key Features:

Can be printed on a cold surface -works on heated or unheated beds.
Shiny and smooth appearance compared to ABS
No harmful fumes during printing
Can deform because of heat
Comes in a variety of colors and blends

SECTION 3, SPECIFICATIONS

EXTRUDER TEMPERATURE	195C – 225C
BED TEMPERATURE	60C - 70C
HEATED BED	Optional
RECOMMENDED BUILD SURFACE	WolfBite Nano
DIAMETER	2.88mm
COLOR	Black, Blue, Green, Natural, Red, Silver, White, Yellow
COMPATIBLE MACHINE	AXIOM, AXIOM 20, AXIOM Dual Extruder, EVO, AXIOMe
GENERAL	
Density ISO 1183	1.24 G/CM3
THERMAL	
Melt Temperature DSC	168 C
Glass Transition DSC	58 C
Melt Flow Rate ISO 1133	8.1 g/10min (210 deg)
MECHANICAL	
Tensile Elongation ISO 527	15.3%
Tensile Strength ISO 527	64.4 Mpa
Flexural Modulus ISO 178	3100 Mpa
Flexural Strength ISO 178	85 Mpa
Impact streght (Charpy) ISO 179	3.2 KJ/m2

SECTION 4, ADDITIONAL INFORMATION

Arrives sealed in an airtight bag with moisture-absorber to keep out dust and moisture. Keep PLA in closed bag or container when not in use.

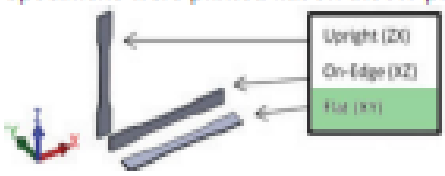
Methodology of tests performed by Airwolf 3D:

Airwolf 3D tested this material, in its 3d printed form, for the mechanical properties of "Ultimate Strength" and "Elongation at Break" per ISO 527 standards. Specimens were printed on an AXIOM 3D printer with a nozzle orifice size 0.5mm. The specimens were "dog bone" shaped with a size of 75mm x 10mm x 2mm and printed with 90% fill density. Wolfbite Nano adhesive was used to adhere the part to the heated bed during print cycle. The default "Standard" setting in APEX slicing software was used.

Details are as follows:

Layer height:	0.25mm
Shell thickness:	1.0mm
Bottom/Top thickness:	1.2mm
Fill density:	90%
Printing temp:	215C
Bed temp:	60C
Flow:	95%
Color:	Yellow

Specimens were printed flat on the XY plane.



The equipment used: MODEL 1ST Electromechanical Testing Machine by Tinius Olsen (Crosshead).

A minimum of six specimens were tested. The Ultimate Strength and Elongation at Break values were determined by calculating the average of all specimens tested.

Disclaimer

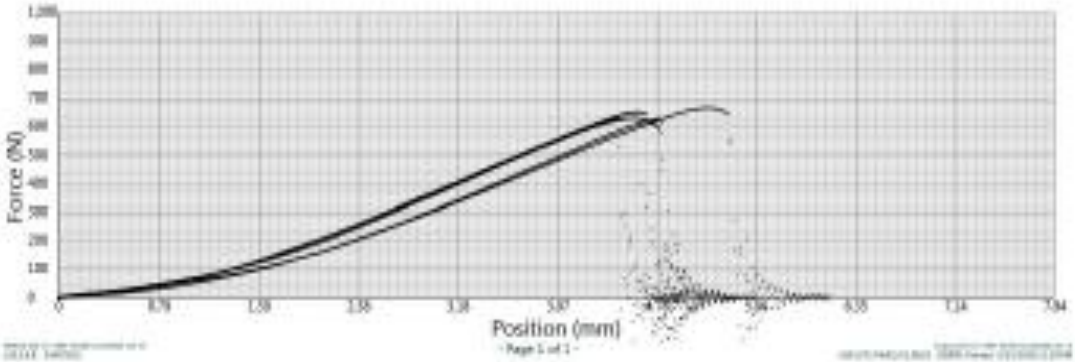
Any technical information or assistance provided herein is given and accepted at your risk, and neither Airwolf 3D or its affiliates make any warranty relating to it or because of it. Neither Airwolf 3D nor its affiliates shall be responsible for the use of this information, or of any product, method or apparatus mentioned, and you must make your own determination of its suitability and completeness for your own use, for the protection of the environment, and for the health and safety of your employees and purchasers of your products. No warranty is made of the merchantability or fitness of any product; and nothing herein waives any of Airwolf 3D's conditions of sale. Specifications are subject to change without notice.

Version	1.200
Date	03/21/2018

AIRWOLF 3D FILAMENT - PLA YELLOW

ISO 527 Tensile (Crosshead)

Ultimate Strength MPa	Elongation at Break %	Yield Strength MPa
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
Average [illegible]	[illegible]	[illegible]
SD	[illegible]	[illegible]



❖ *Polypropylene Filament*

Technical Data Sheet

Issued: March 7, 2018

Revised: March 21, 2018

Polypropylene Filament

SECTION 1, IDENTIFICATION

Product Part Number: F31203

Recommended Use: 3D printing filament

Restrictions on Use: For use with 3D printers

AIRWOLF 3D TESTED PROPERTIES

Ultimate Strength:	12.8 MPa
Elongation at Break:	716 %

(see "Methodology of Test" for details)

SECTION 2, DESCRIPTION

Description: Polypropylene is widely used for automotive and other industrial applications. It is chemically resistant while being almost completely waterproof. In addition, black polypropylene is widely regarded for its superior UV resistance

Applications:
Food packaging
Medical applications
IT equipment
Applications that require softness and heat resistance
Living hinges
Automotive

Key Features:
Very good heat resistance
Chemically resistant
Nearly waterproof
Tear resistant

SECTION 3, SPECIFICATIONS

EXTRUDER TEMPERATURE	210C – 220C
BED TEMPERATURE	80C – 100C
HEATED BED	Required
RECOMMENDED BUILD SURFACE	Wolfbite ULTRA

DIAMETER	2.88mm
COLOR	White
COMPATIBLE MACHINE	AXIOM, AXIOM 20, AXIOM Dual Extruder, EVO
Density ISO 1183	0.89 g/ cm3
Melt Flow Rate ISO 1133	20.0 g/10min
Vicat Softening Temperature ISO 306	115°C
Durometer Hardness ISO 868	Shore D55
Tensile Elongation ISO 527	716 %
Tensile Strength ISO 178	12.8 MPa
Impact Strength (Charpy) ISO 179 (0°C)	10 kJ/m2

SECTION 4, ADDITIONAL INFORMATION

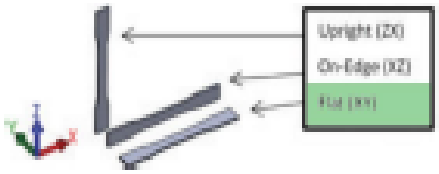
None

Methodology of Tests performed by Airwolf 3D:

Airwolf 3D tested this material, in its 3d printed form, for the mechanical properties of "Ultimate Strength" and "Elongation at Break" per ISO 527 standards. Specimens were printed on an AXIOM 3D printer with a nozzle orifice size 0.5mm. The specimens were "dog bone" shaped with a size of 75mm x 10mm x 2mm and printed with 90% fill density. Wolfbite Ultra adhesive was used to adhere the part to the heated bed during print cycle. The default "Standard" setting in APEX slicing software was used. Details are as follows:

Layer height:	0.5mm
Shell thickness:	0.8mm
Bottom/Top thickness:	1.2mm
Fill density:	90%
Printing temp:	220C
Bed temp:	100C
Flow:	100%
Color:	Natural

Specimens were printed flat on the XY plane.



The equipment used: MODEL 1ST Electromechanical Testing Machine by Tinius Olsen (Crosshead).

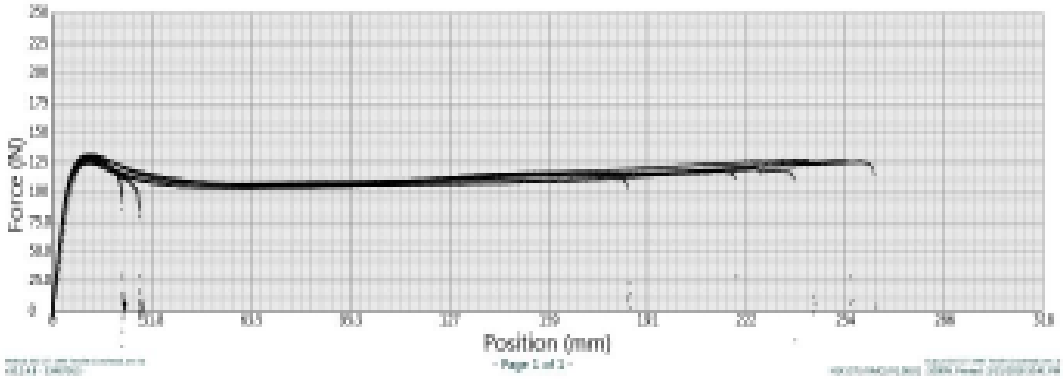
A minimum of six specimens were tested. The Ultimate Strength and Elongation at Break values were determined by calculating the average of all specimens tested.

Disclaimer

Any technical information or assistance provided herein is given and accepted at your risk, and neither Airwolf 3D or its affiliates make any warranty relating to it or because of it. Neither Airwolf 3D nor its affiliates shall be responsible for the use of this information, or of any product, method or apparatus mentioned, and you must make your own determination of its suitability and completeness for your own use, for the protection of the environment, and for the health and safety of your employees and purchasers of your products. No warranty is made of the merchantability or fitness of any product; and nothing herein waives any of Airwolf 3D's conditions of sale. Specifications are subject to change without notice.

Version 1.200
Date 03/21/2018

AIRWOLF 3D FILAMENT - POLYPROPYLENE

ISO 527 Tensile (Crosshead)

Ultimate Strength (MPa)	Elongation at Break (%)	Yield Strength (MPa)
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
average [illegible]	[illegible]	[illegible]
SD	[illegible]	[illegible]