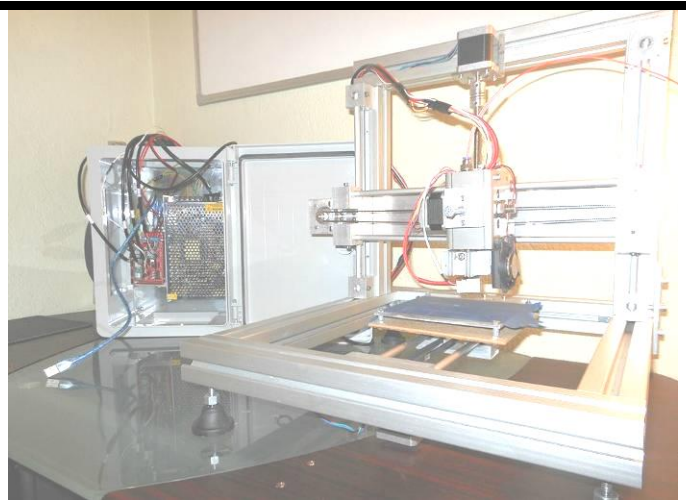
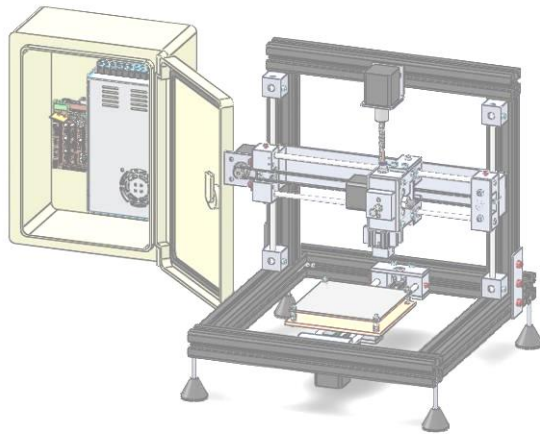


**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

# ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

---

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ  
ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ (3D PRINTER)**



**ΕΚΠΟΝΗΤΗΣ: ΤΣΙΠΗΣ ΣΩΚΡΑΤΗΣ (ΑΜ: 5988)**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΣΑΓΡΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ (Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός)**

**ΣΕΡΡΕΣ**  
**ΜΑΡΤΙΟΣ 2017**

---

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ...**

Με την ολοκλήρωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωσή της.

Ευχαριστώ ιδιαίτερω τον Καθηγητή κ. Σαγρή Δημήτριο, για την εμπιστοσύνη, την υποστήριξη και την καθοδήγηση του σε ένα τέτοιο δύσκολο θέμα εργασίας, όπως επίσης για την στήριξη του με γνώσεις και ελπίδα σε όλη την διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών.

Επίσης, ευχαριστώ τον κύριο Αθανασιάδη Γεώργιο, διπλωματούχο Ηλεκτρολόγο Μηχανικό, ο οποίος στα πλαίσια της πρακτικής μου άσκησης στην εταιρεία του, μου παρείχε πολύτιμες επιστημονικές γνώσεις στο πεδίο των ρομποτικών εφαρμογών αλλά και το εργαστήριο του για την υλοποίηση του κατασκευαστικού μέρους της εργασίας. Πάνω απ' όλα τον ευχαριστώ για την καλή διάθεση και την στήριξη του σε όλο το χρονικό διάστημα που συνεργαστήκαμε.

Φυσικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά, τους γονείς μου Σιδέρη και Σταματία και τα αδέρφια μου Χρήστο και Μαρία, για την ενδελεχή αγάπη και συμπαράσταση τους όλα αυτά τα χρόνια, που αποτέλεσαν καθοριστικό ρόλο για την ολοκλήρωση των σπουδών μου και της παρούσας εργασίας. Τέλος τους ευχαριστώ γιατί χωρίς αυτούς ίσως να μην βρισκόμουν σήμερα σε αυτή την ευχάριστη θέση.

Τις πιο θερμές μου ευχαριστίες θέλω να εκφράσω στην κοπέλα και συνοδοιπόρο μου Ναταλία Τσιώλα, για την απέραντη υπομονή και την ενθάρρυνση της όλα τα χρόνια των σπουδών μου και κυρίως για το διάστημα που διήρκησε η πτυχιακή μου εργασία.

Σέρρες, Μάρτιος 2017

**Τσίπης Σωκράτης**

**Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητών:**

Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι φοιτητές, έχοντας επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής, δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχουμε δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από βιβλία, άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο επακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Οι φοιτητές: (Ονοματεπώνυμο - Υπογραφή)

Τσίπης Σωκράτης

## **English Summary**

### **DESIGN AND CONSTRUCTION OF THREE-DIMENSIONAL PRINTING DEVICE (3D PRINTER)**

#### **Abstract**

The present Thesis deals with the field of rapid prototyping and especially with the design and construction of a fused deposition modeling machine (3d printer), using standard mechanical and electronic equipment. The aim of this thesis, besides the design and the construction of 3d printer, is to introduce the reader to rapid prototyping technologies and specifically to fused deposition modeling (FDM).

Extensive reference is made in theoretical background of FDM, which is required for the proper use and application of this technology and steady state thermal analysis of 3d printer's head extruder is approximately performed, using SOLIDWORKS simulation tool. Furthermore, the appropriate adjustments of the electronics are calculated and imported into the firmware settings and a profile of slicer software settings for PLA is organized which are used for the three dimensional printing of the Manufacturing Technology & Machine Tools Laboratory logo of Technological Educational Institute of Central Macedonia.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.Εισαγωγή.....	6
Σκοπός της εργασίας.....	8
2. Ταχεία προτυποποίηση (Rapid Prototyping) .....	9
2.1. Τεχνολογίες ταχείας προτυποποίησης.....	10
2.1.1 Στερεολιθογραφία (Stereolithography-SLA).....	10
2.1.2. Σκλήρυνση στερεού εδάφους (solid ground curing-SGC).....	11
2.1.3. Επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (selective laser sintering-SLS).....	12
2.1.4. Τρισδιάστατη εκτύπωση (3d printing).....	14
2.1.5. Βιομηχανική παραγωγή στρωσιγενούς αντικειμένου (laminated-object manufacturing- LOM).....	15
2.1.6. Μοντελοποίηση με απόθεση σε κατάσταση τήξης(fused-deposition modeling-FDM).....	17
2.1.6.1. Υλικά της FDM.....	18
2.1.6.2. Θεωρητικά στοιχεία της FDM.....	23
2.1.7 Σύγκριση των μεθόδων ταχείας προτυποποίησης.....	28
2.1.8. Εφαρμογές της τεχνολογίας ταχείας προτυποποίησης.....	29
2.2 Η διαδικασία της ταχείας προτυποποίησης.....	32
2.2.1. Αρχεία AMF.....	33
2.2.2. Αρχεία STL.....	33
2.2.3. Εισαγωγή Γεωμετρίας.....	34
2.2.4. Στηρίγματα.....	36
3. Σχεδιομελέτη και κατασκευή του 3D εκτυπωτή.....	37
3.1. Υπολογιστική μελέτη.....	37
3.1.1. Στατική ανάλυση.....	37
3.1.2. Θερμική ανάλυση.....	41
3.2. Σχεδίαση και κατασκευή.....	46
3.2.1. Μηχανολογικό μέρος.....	47
3.2.2. Ηλεκτρολογικό μέρος.....	53
4. Ρύθμιση ηλεκτρονικών και προγραμματισμός του 3D εκτυπωτή.....	59
4.1. Υπολογισμοί ηλεκτρονικών.....	59
4.2. Firmware.....	61
4.3. Software.....	65
5. Παράδειγμα τρισδιάστατης εκτύπωσης και έλεγχος επιτευχθείσας ακρίβειας.....	73
6. Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης.....	80
Βιβλιογραφία.....	83
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	85
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	90

---

## **1.Εισαγωγή**

Οι κατασκευαστικές τεχνολογίες αποδείχθηκαν στην πάροδο του χρόνου σημαντικές για την επιβίωση και την ύπαρξη του ανθρώπινου γένους. Στην εποχή του λίθου (20.000 π.Χ. έως το 10.000 π.Χ.) ο πρωτόγονος τότε άνθρωπος επεξεργαζόταν γούνες για ζεστασιά, μικρά εργαλεία για το κυνήγι και απλό εξοπλισμό για το μαγείρεμα. Τα πρώτα εργαλεία και όπλα που είχε κατασκευάσει ο άνθρωπος, ήταν είτε από ξύλα, είτε από πέτρες (λίθους), είτε από κόκκαλα, ενώ για να προστατεύεται από το κρύο ντυνόταν με δέρματα ζώων. Τα εργαλεία από πέτρα, που έδωσαν και το όνομα στην εποχή, προέρχονταν από ειδικά πετρώματα και σχηματίστηκαν είτε με την κρούση (λεπίδες, φολίδες, ξύστρα, αιχμές, δρεπάνια κ.λπ.) είτε με λείανση (αξίνες, πελέκειες, σκερπάνια, σμίλες κ.λπ.). [1]

Τα μέταλλα ανακαλύφθηκαν πολύ αργότερα. Μια από τις επικρατέστερες θεωρίες σχετικά με την ανακάλυψη των μετάλλων υποστηρίζει ότι μετά από μεγάλες πυρκαγιές έλιωναν τα μέταλλα που υπήρχαν μέσα στα διάφορα πετρώματα και έτσι γινόταν δυνατή η εξόρυξή τους. Πιθανότατα με αυτό τον τρόπο ανακαλύφθηκε ο χαλκός (περίπου 5000π.Χ.) και ο μπρούντζος (περίπου το 3000π.Χ.). Το σίδηρο ο άνθρωπος τον ανακάλυψε περίπου το 1000π.Χ. πιθανότατα από τους διάφορους μετεωρίτες που έπεφταν στη γη. Με τη διεύρυνση των προσπαθειών του ανθρώπου γύρω από την έρευνα αρχίζει η ιστορία της μηχανοποίησης. Έτσι, κατά τον 12 μ.Χ. εμφανίζεται η μηχανή με τα υδραυλικά σφυριά. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται η μηχανή με τα 'κατερχόμενα σφυριά' ο όγκος των οποίων υψώνεται μεταξύ δύο ράβδων ολισθήσεως και αφήνεται στη συνέχεια να πέσει πάνω στο υλικό που θα σφυρηλατηθεί. Με αυτόν τον τρόπο το 1346 κατασκευάζονται στη Φλωρεντία πυροβόλα από ορείχαλκο που χρησιμοποιούσαν σφαίρες από σφυρήλατο σίδηρο. Το 15 μ.Χ. αιώνα κατασκευάζονται βόμβες από σίδηρο και σφαίρες από χυτοσίδηρο. Η έλαση ξεκινά τον 16 μ.Χ. αιώνα με αρχικό σκοπό την κατασκευή χαλυβδόφυλλων που προορίζονταν για νομισματοκοπή. Αργότερα γενικεύεται η χρήση της και στην κατασκευή ράβδων για μεταλλικές κατασκευές. Το 1784 μ.Χ. ο WATT δοκιμάζει τη σφύρα κρούσεως, η οποία όμως αρχίζει να κατασκευάζεται για χρήση στην παραγωγή, κατά το 1842 μ.Χ. Το 1861 μ.Χ. κάνει την εμφάνισή της η πρώτη υδραυλική πρέσα. [2] Ο 19ος αιώνας χαρακτηρίζεται από μεγάλη πρόοδο της μεταλλουργίας. Σημαντικότερες ανακαλύψεις αυτής της περιόδου ήταν η παραγωγή χάλυβα με τη μέθοδο Bessemer και κατά τα τέλη του 19ου αιώνα η ανακάλυψη του ελαφρού μετάλλου αλουμινίου (Al), του οποίου τα κράματα αποτέλεσαν τη βάση της Αεροναυπηγικής και της Αυτοκινητοβιομηχανίας. [3]

Επίσης, τον 19<sup>ο</sup> αιώνα, η ανάγκη για μεγαλύτερη ακρίβεια, παραγωγικότητα και επαναληψιμότητα στην κατασκευή εξαρτημάτων και γενικά κατασκευών, οδήγησαν τους μαθητές του Maudslay σε νέες ανακαλύψεις. Ο Richard Roberts ευφήμρε την πλάνη, ο Joseph Whitworth την εργαλειομηχανή κοπής γρναζιών και ο Nasmyth τη λείανση με λειαντικό δίσκο.

Την πατρότητα της εφεύρεσης της ενσωμάτωσης στον τόρνο του πύργου για τα κοπτικά εργαλεία, μοιράζονται οι: Fich, Robbins, Laurence και ο Stone γύρω στο 1854 στην Αμερική. Σε αντίθεση με τον τόρνο που είχε ιστορικά μεγάλη διαδρομή, η φραιζα εφευρέθηκε το 1818 από τον Whitney και τελειοποιήθηκε το 1830. Ο εικοστός αιώνας ταυτίστηκε με την ανάπτυξη της αυτοκινητοβιομηχανίας από το 1908 και μετά, όταν η Ford άρχισε μαζικά να κατασκευάζει αυτοκίνητα. Ο νέος αυτός τρόπος μαζικής παραγωγής, συνυφασμένος με υψηλές απαιτήσεις για διαστατική ακρίβεια και ακρίβεια μορφής, οδήγησε σε σημαντικές βελτιώσεις στις εργαλειομηχανές ακόμα και μέχρι το τέλος του προηγούμενου αιώνα. [1]

Ο αριθμητικός έλεγχος των εργαλειομηχανών ξεκίνησε, όταν κατά τη διάρκεια του πολέμου με τους Ιάπωνες στον Ειρηνικό Ωκεανό, η Αμερικανική πολεμική αεροπορία είχε εξαιρετικά μεγάλες απώλειες. Το 1948 ο J.Parson, Μηχανικός της Bendix Corporation, ανέπτυξε έναν αυτοματισμό για τον έλεγχο κατεργασιών σε τρεις διαστάσεις, διαδικασία που τα επόμενα τρία χρόνια βελτιώθηκε από το MIT. Η πραγματική βέβαια διείσδυση του αριθμητικού ελέγχου έγινε τη δεκαετία 1970 έως 1980, όταν ο μικροεπεξεργαστής έγινε ο εγκέφαλος του μηχανισμού ελέγχου και έτσι αναπτύχθηκε πλήρως η έννοια CNC (Computer Numerical Control). Με την είσοδο πλέον ακόμα και σε μικρά μηχανουργεία της ψηφιακής καθοδήγησης, σήμερα, από την απλή διάτρηση, έως την πολύπλοκη επεξεργασία ανάγλυφων επιφανειών, χρησιμοποιούνται απλές και φθηνές ή σύνθετες και ακριβές εργαλειομηχανές CNC. Η συνεργασία των μηχανουργικών κατεργασιών με NC,CNC, και DNC μηχανές με άλλες λειτουργίες που υποστηρίζονται από ηλεκτρονικό υπολογιστή, οδήγησαν στη δημιουργία των ολοκληρωμένων με υπολογιστή συστημάτων παραγωγής (CIM). Τέλος, τα σύγχρονα μηχανουργεία εντάσσουν τις NC,CNC, και DNC εργαλειομηχανές σε ακόμα πιο σύνθετες δομές, που ονομάζονται ευέλικτα συστήματα παραγωγής (FMS). Τα συστήματα αυτά ενσωματώνουν ηλεκτρονικό σχεδιασμό της παραγωγής, αυτόματες μεταφορικές διατάξεις και αποθήκες, βιομηχανικά ρομπότ και διατάξεις ποιοτικού ελέγχου. [1]

Η ταχεία κατασκευή πρωτοτύπου είναι ένας διαφορετικός τρόπος χρήσης ενός γεωμετρικού μοντέλου στη βιομηχανική παραγωγή. Υπάρχουν διαθέσιμες αρκετές διεργασίες ταχείας κατασκευής πρωτοτύπου, αλλά όλες παράγουν ένα πρωτότυπο μέσω της εναπόθεσης διαδοχικών στρώσεων ενός σύνθετου υλικού. Το βασικό πλεονέκτημα των διεργασιών ταχεία κατασκευής πρωτοτύπου είναι ότι δημιουργούν ένα πρωτότυπο με ένα βήμα, απευθείας από το γεωμετρικό μοντέλο του προς παραγωγή εξαρτήματος. Πάντως, σε σύγκριση με τη μηχανική κατεργασία NC, ένα μεγάλο μειονέκτημα αυτών των διεργασιών είναι ότι προς το παρόν περιορίζονται σε συγκεκριμένα υλικά. Επειδή μια εργαλειομηχανή NC μπορεί να χειριστεί τα περισσότερα από τα διαθέσιμα βιομηχανικά υλικά, μεταξύ των οποίων και μέταλλα, τα φυσικά αντικείμενα που δημιουργούνται με τις διεργασίες ταχείας κατασκευής πρωτοτύπου χρησιμοποιούνται κυρίως ως πρωτότυπα ή πρότυπα για άλλες διεργασίες βιομηχανικής παραγωγής. [4]

## **Σκοπός της εργασίας**

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η κατασκευή διάταξης εκτύπωσης με πλαστικό σε τρεις διαστάσεις. Στα πλαίσια της εργασίας θα πραγματοποιηθεί τρισδιάστατη σχεδίαση της διάταξης του εκτυπωτή με χρήση κατάλληλου λογισμικού (3D-CAD). Η διάταξη θα επιτυγχάνει κίνηση σε τρεις άξονες και θα λειτουργεί με βηματικούς κινητήρες, με ιμάντες που θα μεταφέρουν την κίνηση στην κεφαλή εκτύπωσης. Η κεφαλή θα λειτουργεί με αντίσταση θέρμανσης του πλαστικού υλικού το οποίο θα τροφοδοτείται με χρήση κατάλληλου κινητήρα και γранаζιών.

Η κατασκευή της διάταξης θα γίνει με χρήση τυποποιημένων εξαρτημάτων εμπορίου (κινητήρων, γранаζιών, τροχαλιών, ελεγκτή, κτλ). Ο έλεγχος θα πραγματοποιείται με χρήση controller τύπου Arduino και τα λογισμικά που θα χρησιμοποιηθούν για τον προγραμματισμό θα είναι ανοιχτού κώδικα (open source).

Θα πραγματοποιηθεί θερμική ανάλυση της κεφαλής εκτύπωσης, καθώς και υπολογισμός της επιτευχθείσας ακρίβειας εκτύπωσης της διάταξης.



## **2. Ταχεία προτυποποίηση (Rapid Prototyping)**

Από τη δεκαετία του 1970 έγιναν προσπάθειες κατασκευής φυσικών αντικειμένων απευθείας από τα γεωμετρικά δεδομένα χωρίς παραδοσιακά εργαλεία. Η νεά αυτή τεχνολογία ονομάστηκε ταχεία κατασκευή πρωτοτύπου ή ταχεία προτυποποίηση (rapid prototyping-RP) ή, εναλλακτικά, διαστρωματωμένη βιομηχανική παραγωγή (layered manufacturing), τρισδιάστατη εκτύπωση (3d printing), βιομηχανική παραγωγή γραφείου (desktop manufacturing), και βιομηχανική παραγωγή στερεών ελεύθερης μορφής (solid freeform manufacturing). Έτσι, τώρα φαίνεται ότι ο όρος ταχεία προτυποποίηση και βιομηχανική παραγωγή (rapid prototyping and manufacturing-RP&M) περιγράφει καλύτερα την κατάσταση.

Οι διεργασίες για την ταχεία προτυποποίηση και τη βιομηχανική παραγωγή βασικά αποτελούνται από τρία βήματα: σχηματισμός των διατομών του προς παραγωγή αντικείμενου, συσώρευση των διατομών σε διαδοχικές στρώσεις, και συνδυασμός των στρώσεων. Επομένως οι διεργασίες RP&M απαιτούν μόνο δεδομένα διατομών για την κατασκευή ενός φυσικού αντικείμενου, και εξαλείφουν τα παρακάτω προβλήματα τα οποία συναντώνται συχνά σε άλλες διεργασίες βιομηχανικής παραγωγής.

- Δεν είναι αναγκαία η μετατροπή των σχεδιαστικών χαρακτηριστικών σε κατασκευαστικά χαρακτηριστικά. Είναι αρκετή μια τρισδιάστατη επιφάνεια ή ένα στερεό μοντέλο του εξαρτήματος, από το οποίο παράγονται τα δεδομένα των διατομών.
- Δεν είναι αναγκαίος ο ορισμός διαφορετικών διευθετήσεων ή σύνθετων ακολουθιών χειρισμού υλικών, επειδή το εξάρτημα κατασκευάζεται απευθείας.
- Δεν είναι αναγκαία η δημιουργία διατάξεων στήριξης και οδήγησης . (Κάποιες διεργασίες μπορεί να απαιτήσουν την κατασκευή δομών στήριξης μαζί με το υπό καταργασία αντικείμενο.)
- Δεν χρειάζεται να σχεδιαστούν και να κατασκευαστούν καλούπια και μήτρες επειδή οι διεργασίες RP&M είναι διεργασίες χωρίς εργαλεία (tool-less).

Έτσι, επειδή οι διεργασίες RP&M δημιουργούν ένα φυσικό αντικείμενο χωρίς εργαλεία, είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για την ολοκλήρωση της σχεδίασης με τη βιομηχανική παραγωγή χωρίς την παρέμβαση του προγραμματισμού διεργασιών.

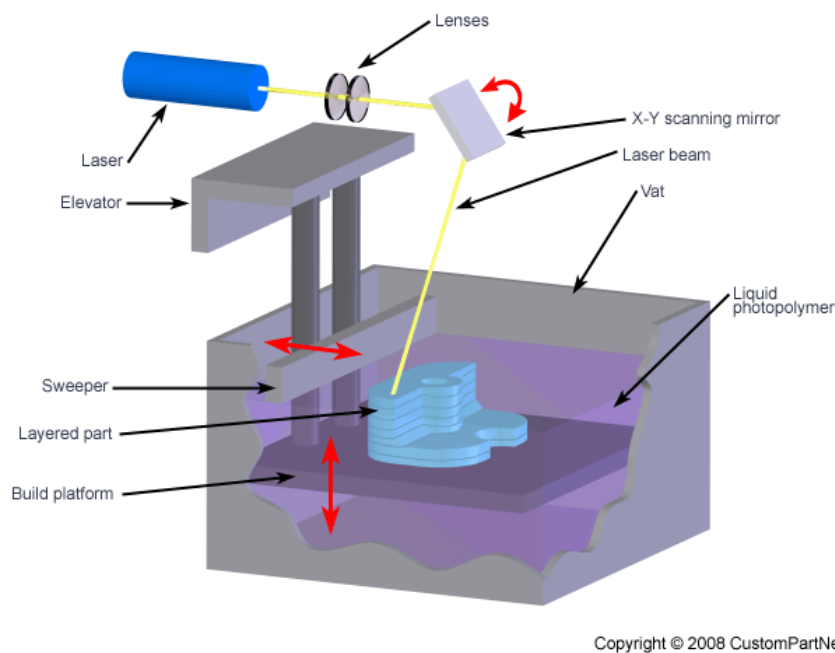
Από τα συστήματα στερεάς μοντελοποίησης παίρνουμε ένα αρχείο τύπου STL. Αυτό τροφοδοτείται στο σύστημα ΤΠ που κόβει λεπτές οριζόντιες διατομές διαμέσου του αρχείου STL, στο επιθυμητό πάχος (πχ. 0.2mm). Το εξάρτημα δημιουργείται σε στρώματα. Το σύστημα RP χειρίζεται τη στοίβα των ψηφιακών διατομών για να παράγει το κάθε επίπεδο υλικού, το έναν πάνω από το άλλο. [4]

## 2.1. Τεχνολογίες ταχείας προτυποποίησης

### 2.1.1 Στερεολιθογραφία (Stereolithography-SLA)

Ο όρος *στερεολιθογραφία* επινοήθηκε από τον C.Hull, ο οποίος ίδρυσε την εταιρεία 3D Systems, Inc το 1986 και ξεκίνησε την παραγωγή μηχανών Stereo Lithography Apparatus (SLA).

Η διεργασία της στερεολιθογραφίας παράγει ένα εξάρτημα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1, με τον εξής τρόπο.



Σχήμα 2.1: Διεργασία στερεολιθογραφίας [5]

Βήμα 1: Ένα φωτοευαίσθητο πολυμερές, το οποίο στερεοποιείται όταν εκτίθεται σε μια φωτεινή πηγή, διατηρείται σε υγρή κατάσταση.

Βήμα 2: Μια πλατφόρμα με δυνατότητα ανύψωσης βρίσκεται ακριβώς μία στρώση πάχους κάτω από την επιφάνεια του υγρού πολυμερούς.

Βήμα 3: Το υπεριώδες λέιζερ σαρώνει τη στρώση του πολυμερούς επάνω από την πλατφόρμα για να στερεοποιήσει το πολυμερές και να του δώσει το σχήμα της αντίστοιχης διατομής. Αυτό το βήμα ξεκινάει από τη διατομή της βάσης του εξαρτήματος.

Βήμα 4: Η πλατφόρμα κατεβαίνει μέσα στο υγρό πολυμερές κατά το πάχος της στρώσης, ώστε να επιτρέψει στο υγρό πολυμερές να καλύψει το εξάρτημα για να ξεκινήσει η νέα στρώση.

Βήμα 5: Επαναλαμβάνονται το Βήμα 3 και το Βήμα 4 μέχρι να δημιουργηθεί η κορυφαία στρώση του εξαρτήματος.

Βήμα 6: Εφαρμόζεται εκ των υστέρων σκλήρυνση ώστε το εξάρτημα να στερεοποιηθεί πλήρως. Το βήμα αυτό απαιτείται επειδή μπορεί να έχουν παραμείνει κάποιες υγρές ή σάρωση κάθε στρώσης είναι ανάλογη με το χρωματισμό ενός σχήματος με ένα λεπτό έγχρωμο μαρκαδόρο.



*Σχήμα 2.2: 3D Systems iPro 9000 Stereolithography system από τις τελευταίες SLA μηχανές της 3D Systems Inc.*

### **2.1.2. Σκλήρυνση στερεού εδάφους (solid ground curing-SGC)**

Στις διεργασίες σκλήρυνσης στερεού εδάφους, η σκλήρυνση κάθε στρώσης γίνεται μέσω έκθεσής της σε μια λάμπα αντί για μια δέσμη λέιζερ που σαρώνει. Έτσι, στερεοποιούνται ταυτόχρονα όλες οι θέσεις μιας στρώσης και δε χρειάζεται εκ των υστέρων σκλήρυνση. Ένα τυπικό παράδειγμα της διεργασίας σκλήρυνσης στερεού εδάφους είναι το σύστημα Solider (Στερεοποιητής) της Ισραηλινής Cubital, το οποίο δουλεύει με τον εξής τρόπο.

Βήμα 1: Υπολογίζεται η διατομή κάθε στρώσης από το γεωμετρικό μοντέλο του εξαρτήματος, καθώς και το επιθυμητό πάχος στρώσης.

Βήμα 2: Παράγεται η οπτική μάσκα που ταιριάζει σε κάθε διατομή.

Βήμα 3: Αφού οριζοντιωθεί, η πλατφόρμα καλύπτεται με μια λεπτή στρώση υγρού φωτοπολυμερούς.

Βήμα 4: Η μάσκα που αντιστοιχεί στην τρέχουσα στρώση τοποθετείται επάνω στην επιφάνεια της υγρής ρητίνης και η ρητίνη εκτίθεται στο φως μια ισχυρής λάμπας υπεριώδους φωτός.

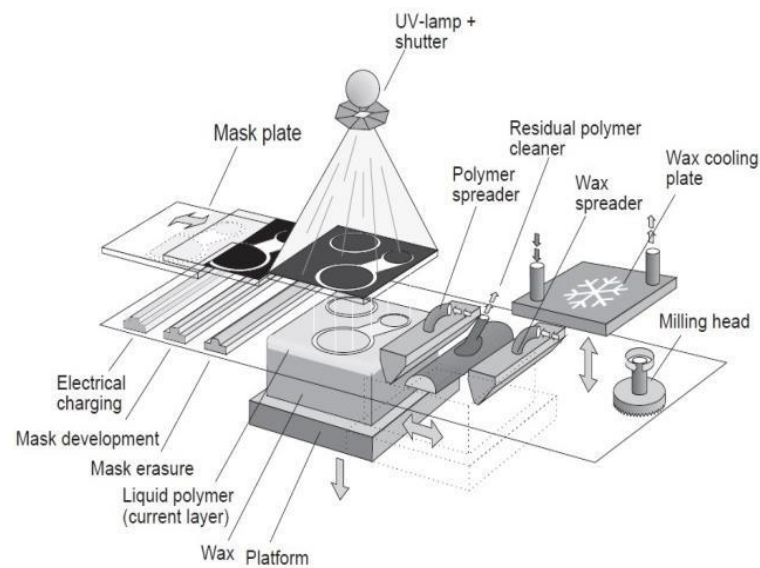
Βήμα 5: Αφαιρείται η περίσσεια του υγρού από το υπό κατεργασία αντικείμενο με ένα αεροδυναμικό μάκτρο.

Βήμα 6: Επάνω στο υπό κατεργασία αντικείμενο απλώνεται μια στρώση λειωμένου κεριού για να γεμίσουν τα κενά. Στη συνέχεια το κεριό στερεοποιείται με την εφαρμογή μιας ψυχρής πλάκας σε αυτό.

Βήμα 7: Η επιφάνεια της στρώσης περικλύπεται στο επιθυμητό πάχος με τη χρήση ενός δίσκου τριβής.

Βήμα 8: Το τρέχον υπό κατεργασία αντικείμενο καλύπτεται με μια λεπτή στρώση υγρού πολυμερούς και επαναλαμβάνονται τα βήματα 4-7 για κάθε επόμενη στρώση μέχρι να φτάσουμε στην κορυφαία στρώση.

Βήμα 9: Μετά από την ολοκλήρωση του εξαρτήματος, απομακρύνεται από αυτό το κερί με τήξη. Το κυριο πλεονέκτημα του συστήματος του στερεοποιητή σε σχέση με τη μέθοδο SLA είναι ότι δεν απαιτεί κάποια δομή υποστήριξης. Ο λόγος γι' αυτό είναι η χρήση του κεριού για την πλήρωση των κενών. Επιπλέον, το σύστημα του στερεοποιητή εξαλείφει το βήμα της εκ των υστέρων σκλήρυνσης, λόγω της χρήσης λάμπας αντί για δέσμη λέιζερ. Παρόλο που μπορεί να δημιουργήσει πιο ακριβή εξάρτημα από τη διεργασία SLA, είναι μια εξαιρετικά πολύπλοκη διεργασία. [4]

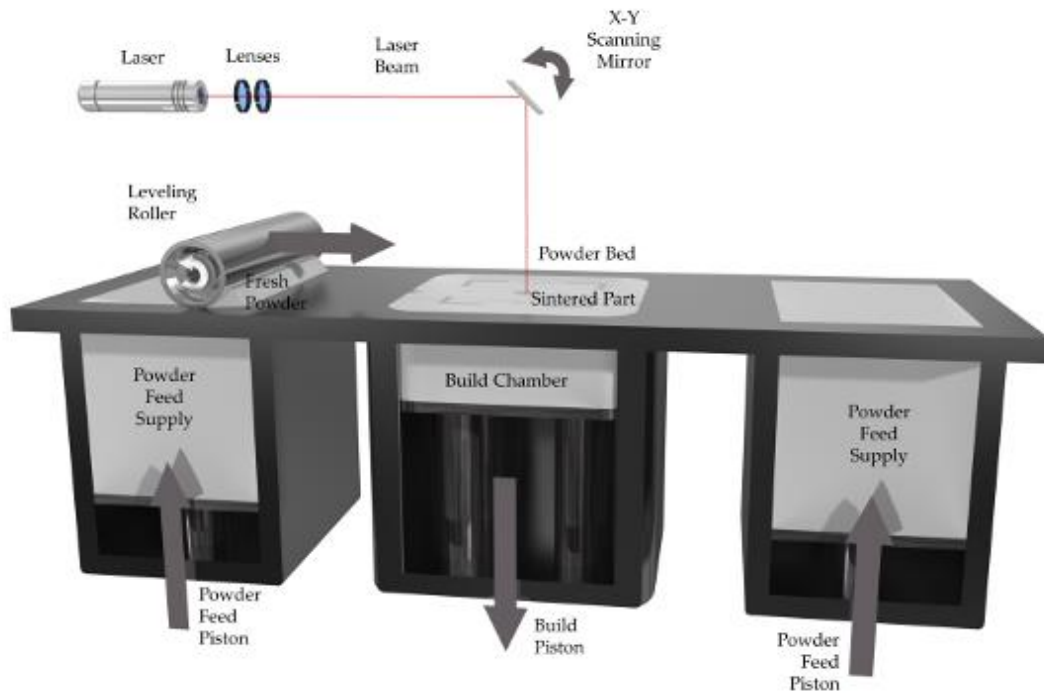


Σχήμα 2.3: Η διαδικασία Solid Ground Curing [6]

### **2.1.3. Επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (selective laser sintering-SLS)**

Η διεργασία επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης με λέιζερ (SLS) που ανέπτυξε η DTM στην Ηνωμένες Πολιτείες παράγει ένα εξάρτημα με τον εξής τρόπο:

Βήμα 1: Ένας κύλινδρος εξαρτήματος τοποθετείται στο απαραίτητο ύψος ώστε να μπορεί να αποθεθεί σε αυτόν μια στρώση υλικού σε σκόνη με το κατάλληλο πάχος. Το υλικό σε σκόνη που θα χρησιμοποιηθεί για το πρωτότυπο εφαρμόζεται από τον κύλινδρο τροφοδοσίας μέσω του κυλίνδρου λείανσης όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4: Επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (SLS) [7]

Βήμα 2: Η στρώση της σκόνης σαρώνεται και θερμαίνεται επιλεκτικά με ένα λέιζερ, με αποτέλεσμα την προσκόλληση των σωματιδίων μεταξύ τους. Η σάρωση με το λέιζερ δίνει στη σκόνη του υλικού το σχήμα της απαιτούμενης διατομής. Το βήμα αυτό ξεκινάει από τη στρώση της βάσης.

Βήμα 3: Ο κύλινδρος εξαρτήματος κατεβαίνει κατά το πάχος της στρώσης ώστε να μπορεί να αποτεθεί σε αυτόν μια νέα στρώση σκόνης.

Βήμα 4: Σαρώνεται η νέα στρώση, σύμφωνα με το σχήμα της επόμενης προς τα άνω διατομής και προσκολλάται στην προηγούμενη στρώση.

Βήμα 5: Επαναλαμβάνονται τα Βήματα 3 και 4 μέχρι να παραχθεί η κορυφαία στρώση του εξαρτήματος.

Βήμα 6: Για κάποια υλικά μπορεί να απαιτηθεί εκ των υστέρων σκλήρυνση.

Δεν απαιτείται δομή υποστήριξης επειδή τα κενά κάθε στρώσης γεμίζουν με ανεπεξέργαστη σκόνη. Επιπλέον η διεργασία της επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης με λέιζερ μπορεί να χρησιμοποιηθεί με οποιαδήποτε τήξιμη σκόνη, ακόμη και με μεταλλικές σκόνες αν το λέιζερ είναι αρκετά ισχυρό. Στην πράξη, για μεταλλικές σκόνες οι οποίες διαθέτουν επικάλυψη με θερμοπλαστικό υλικό χρησιμοποιείται μια διαδικασία έμμεσης πυροσυσσωμάτωσης. Όταν εφαρμόζεται η δέσμη λέιζερ, το συνδετικό υλικό λειώνει και συνδέει χαλαρά τα σωματίδια της μεταλλικής σκόνης ώστε να σχηματιστεί το επιθυμητό σχήμα, που ονομάζεται *πράσινο εξάρτημα* (green part). Στην περίπτωση αυτή, το λέιζερ πρέπει να έχει αρκετή ισχύ ώστε να λειώσει μόνο το συνδετικό υλικό. Στη συνέχεια, το πράσινο εξάρτημα υφίσταται επεξεργασία σε ένα φούρνο όπου το συνδετικό υλικό καίγεται, και η μεταλλική σκόνη συγκολλάται με το γνωστό

μηχανισμό της πυροσυσσωμάτωσης. Το εξάρτημα που προκύπτει ονομάζεται *καφέ εξάρτημα* (brown part). Αν δεν υποστεί κάποια πρόσθετη επεξεργασία, το εξάρτημα θα είναι αρκετά πορώδες λόγω του χώρου που καταλάμβανε προηγουμένως το συνδετικό υλικό. Για να μειωθεί το πορώδες, μέσα στο φούρνο προστίθεται ένα δεύτερο υλικό, ο διηθητής (infiltrant). Αυτό το μέταλλο υγροποιείται υπό την υψηλή θερμοκρασία του φουρνου και διηθείται μέσα στο καφέ εξάρτημα λόγω τριχοειδών δράσεων. Η διεργασία αυτή χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ενός καλούπιου έγχυσης απευθείας από το αντίστοιχο μοντέλο CAD. Το καλούπι που προκύπτει επαρκεί για παραγωγή 2500 έως 10000 πρωτοτύπων. [4]

#### 2.1.4. Τρισδιάστατη εκτύπωση (3d printing)

Η διεργασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης αναπτύχθηκε στο MIT και πήρε το όνομά της από την ομοιότητα που παρουσιάζει με την εκτύπωση ψεκασμού (inkjet). Στην τρισδιάστατη εκτύπωση, αντί για μελάνη εγχύεται ένα υγρό συνδετικό υλικό. Η διεργασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η εξής:



Σχήμα 2.5: Ο εκτυπωτής object 1000 της Stratasys. [8]



Σχήμα 2.6: Τραπέζι εκτύπωσης με κεραμική σκόνη.

Βήμα 1: Μια πλατφόρμα τοποθετείται στο απαραίτητο ύψος ώστε να αποθεθεί σε αυτή μια κεραμική σκόνη με το κατάλληλο πάχος.

Βήμα 2: Η στρώση της κεραμικής σκόνης σαρώνεται επιλεκτικά με μια κεφαλή εκτύπωσης η οποία ψεκάζει ένα υγρό συνδετικό υλικό που προσκολλά τα σωματίδια το ένα στο άλλο. Η σάρωση από την κεφαλή εκτύπωσης μεταμορφώνει τη σκόνη στο απαιτούμενο σχήμα διατομής. Αυτό το βήμα ξεκινάει από την κατώτερη στρώση.

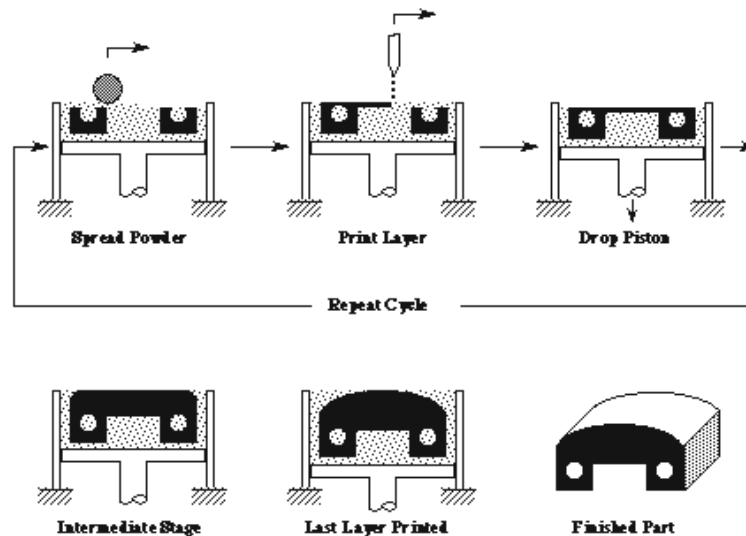
Βήμα 3: Η πλατφόρμα κατεβαίνει κατά το πάχος της στρώσης ώστε να μπορεί να αποθεθεί μια νέα στρώση σκόνης σε αυτή.

Βήμα 4: Σαρώνεται η νέα στρώση, σύμφωνα με το σχήμα της επόμενης προς τα άνω διατομής, και προσκολλάται στην προηγούμενη στρώση.

Βήμα 5: Επαναλαμβάνονται τα Βήματα 3 και 4 μέχρι να παραχθεί η κορυφαία στρώση του εξαρτήματος.

Βήμα 6: Στη συνέχεια εφαρμόζεται θερμική κατεργασία για τη στερεοποίηση του εξαρτήματος.

Η κατασκευή ενός καλουπιού χύτευσης με τη διεργασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης θα ήταν βολική, επειδή το καλούπι παράγεται ως ενιαία μονάδα, αποτελούμενη από ένα κέλυφος και πυρήνες, και η τοποθέτηση των πυρήνων σε σχέση με το κέλυφος θα ήταν ακριβής. Όμως, τα καλούπια χύτευσης που παράγονται με την τρέχουσα διεργασία τρισδιάστατης εκτύπωσης δεν έχουν αρκετά ικανοποιητικές επιφάνειες όσο αφορά το φινιρίσμά τους. [4]

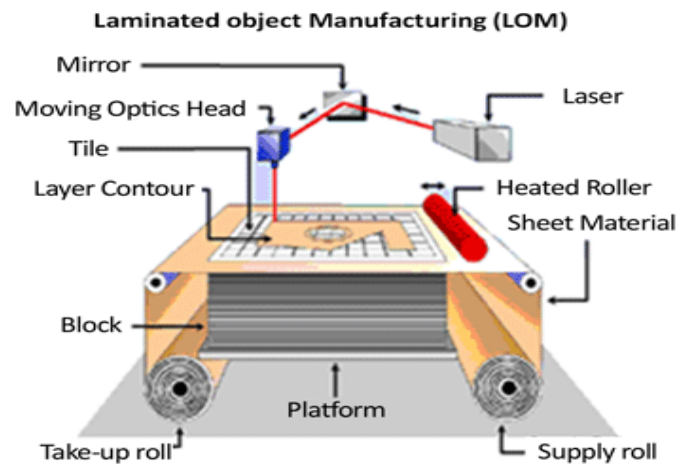


Σχήμα 2.7: Τρισδιάστατη εκτύπωση [9]

### 2.1.5. Βιομηχανική παραγωγή στρωσιγενούς αντικειμένου (laminated-object manufacturing- LOM)

Η διεργασία βιομηχανικής παραγωγής στρωσιγενούς αντικειμένου, η οποία διατέθηκε στο εμπόριο από τη Helisys, Inc., παράγει ένα εξάρτημα συγκολλώντας και περικόπτοντας με λέιζερ επάλληλες στρώσεις υλικών που παραδίδονται σε μορφή φύλλων. Τα φύλλα συγκολλώνται σε ένα στερεό μπλοκ με μια επικάλυψη θερμικής κόλλας. Η διεργασία λειτουργεί ως εξής:

Βήμα 1: Κάθε φύλλο προσκολλάται στο μπλοκ, με τη χρήση θερμότητας και πίεσης ώστε να σχηματιστεί μια νέα στρώση. Τα φύλλα του υλικού τροφοδοτεί ένα συνεχές ρολό στη μια πλευρά της μηχανής και παραλαμβάνονται από την άλλη πλευρά, όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.8](#). Ο θερμός κύλινδρος παρέχει την πίεση και τη θερμότητα που είναι αναγκαίες για τη συγκόλληση. Η πλατφόρμα κατεβαίνει κατά το πάχος του φύλλου όποτε προστίθεται ένα φύλλο υλικού στη στοίβα.



Σχήμα 2.8: Μηχανή βιομηχανικής παραγωγής στρωσιγενούς αντικείμενου [10]

Βήμα 2: Μετά από την απόθεση μιας στρώσης (φύλλου), ένα λέιζερ ακολουθεί τις ισοϋψείς της στρώσης που αντιστοιχούν στην τρέχουσα διατομή. Συνήθως, χρησιμοποιείται ένα λέιζερ 25 ή 50 watt CO<sub>2</sub>. Όπως και στις άλλες διεργασίες, το βήμα αυτό ξεκινάει από τη διατομή της βάσης. Στη διεργασία αυτή το λέιζερ σαρώνει μόνο τις ισοϋψείς. Αυτό κάνει τη διεργασία πιο αποδοτική από τις διεργασίες RP&M που απαιτούν πλήρη σάρωση της διατομής.

Βήμα 3: Οι περιοχές της στρώσης που βρίσκονται έξω από τις ισοϋψείς διαγραμμίζονται από το λέιζερ (δηλαδή, κόβονται σε μικρά κομμάτια που ονομάζονται πλακίδια και αφαιρούνται στο τέλος)

Βήμα 4: Επαναλαμβάνονται τα Βήματα 1-3 μέχρι να συγκολληθεί και να κοπεί η ανώτατη στρώση του εξαρτήματος.

Βήμα 5: Αφού συγκολληθούν και κοπούν όλες οι στρώσεις, το αποτέλεσμα είναι ένα εξάρτημα εγκιβωτισμένο σε ένα μπλοκ υλικού υποστήριξης. Το υλικό αυτό στη συνέχεια κόβεται σε κομμάτια κατά μήκος των ευθειών της διαγράμμισης.

Βήμα 6: Το εξάρτημα που προκύπτει μπορεί κατόπιν να επενδυθεί με ένα στεγανωτικό ώστε να μην κινδυνεύει από την υγρασία.

Η διεργασία LOM έχει τις εξής ιδιότητες:

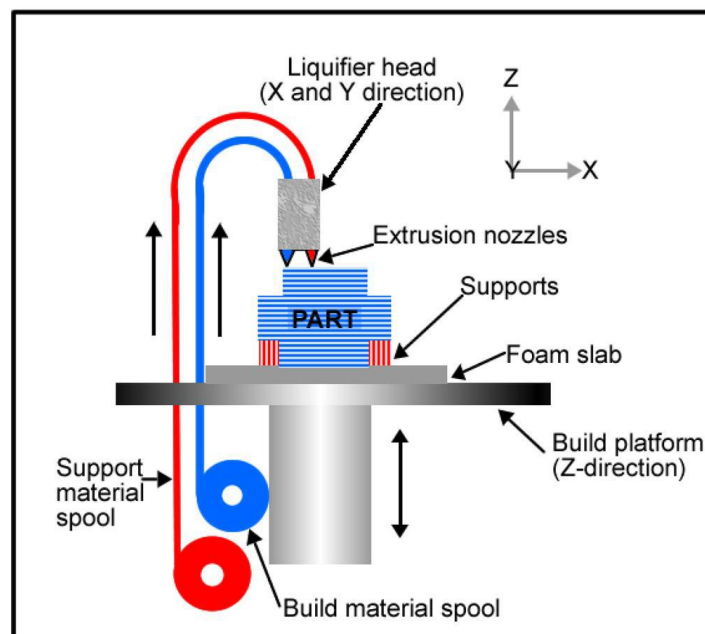
- Χρησιμοποιεί μια αφαιρετική διαδικασία (δηλαδή, αφαιρείται υλικό για να δημιουργηθεί μια στρώση με την απαιτούμενη διατομή). Όλες οι άλλες διεργασίες RP&M δημιουργούν στρώσεις μέσω της προσθήκης υλικού. Έτσι, η διεργασία LOM είναι πιθανόν η ταχύτερη τεχνολογία για τη δημιουργία εξαρτημάτων με υψηλό λόγο όγκου προς επιφανειακό εμβαδόν.
- Τα εξαρτήματα δημιουργούνται από εναλλασσόμενες στρώσεις υλικού και κόλλας. Έτσι, πολλές από τις φυσικές τους ιδιότητες είναι μη ομογενείς και ανισότροπες.



- Η δυνατή ακρίβεια της διεργασίας LOM είναι υψηλή. Επειδή στη διεργασία αυτή μπορούν να χρησιμοποιηθούν οσοδήποτε λεπτά φύλλα υλικού, προκύπτει καλή ανάλυση κατά τη διεύθυνση δημιουργίας του εξαρτήματος. Για την ακρίβεια, η βιομηχανική παραγωγή λεπτών, ομοιόμορφων υλικών σε φύλλα δεν είναι δύσκολη, και η συστολή κατά τη συγκόλληση δεν αποτελεί πρόβλημα επειδή οι ισοϋψείς κόβονται αφού ολοκληρωθεί η συστολή.
- Παρόλο που η διεργασία μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλά υλικά, μεταξύ των οποίων πλαστικά, συνθετικά, και μέταλλα, τα φύλλα χαρτιού είναι προς το παρόν το πιο δημοφιλέ υλικό. [4]

### 2.1.6. Μοντελοποίηση με απόθεση σε κατάσταση τήξης (*fused-deposition modeling-FDM*)

FDM ή αλλιώς Fused Filament Fabrication (FFF) βασίζεται στην τήξη και την επιλεκτική εναπόθεση μιας λεπτής ίνας θερμοπλαστικού για τον σχηματισμό αλλητάλληλων στρώσεων οι οποίες και θα δημιουργήσουν το τελικό αντικείμενο. Χαρακτηρίζεται από υψηλή σχέση απόδοσης/τιμής συγκριτικά με άλλες μεθόδους ταχείας πρωτοτυποποίησης ή συμβατικής παραγωγής. Τα παραγόμενα αντικείμενα είναι ανθεκτικά και συνήθως έτοιμα προς χρήση χωρίς να απαιτείται κάποια πρόσθετη επεξεργασία. Υστερεί στο σχηματισμό πολύ λεπτών χαρακτηριστικών και στο βαθμό λεπτομέρειας που μπορεί να αποτυπώσει. Λόγω του ότι είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία αναπτύσσονται συνεχώς νέα υλικά που προσδίδουν στα αντικείμενα ειδικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά. [4]



Σχήμα 2.9: Μοντελοποίηση με απόθεση σε κατάσταση τήξης (FDM) [11]

### 2.1.6.1. Υλικά της FDM

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην FDM τρισδιάστατη εκτύπωση είναι θερμοπλαστικά σε μορφή νήματος. Τα δύο βασικά υλικά είναι τα, PLA (Poly Lactic Acid) και ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene). Τα τελευταία χρόνια, λόγω της μεγάλης διάδοσης και χρηστικότητας της FDM εκτύπωσης, έχει σημειωθεί μεγάλη ανάπτυξη στα υλικά που χρησιμοποιούνται με σπουδαίες ιδιότητες το κάθε ένα από αυτά.



Σχήμα 2.10: Θερμοπλαστικά σε μορφή νήματος [12]

Τα υλικά σε μορφή νήματος (filaments) τα οποία υπάρχουν για την FDM εκτύπωση είναι τα εξής: PLA, ABS, PETG, Nylon, TPU, Laywoo-D3, HIPS, PVA, PET, Metal, Carbon-fiber, Lignin-bioFila, Polycarbonate (PC), Conductive, MOLDLAY, PETT, ASA, PP, POM, PMMA, Laybrick, Glow-in the dark, Cleaning, PC-ABS, Magnetic, Colour changing, ngen, TPC, iglide-filament.

Παρακάτω, θα γίνει αναφορά σε αυτά τα υλικά που χρησιμοποιούνται περισσότερο και σε αυτά που παρουσιάζουν τα πιο ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και ιδιότητες. Για πληροφορίες για τα υπόλοιπα υλικά, μπορεί ο αναγνώστης να ανατρέξει στην κατάλληλη βιβλιογραφία. .

#### **PLA**

Το PLA (Poly Lactic Acid) είναι ένα βιοδιασπώμενο θερμοπλαστικό προερχόμενο κυρίως από φυτικές ανανεώσιμες πηγές το οποίο το κατατάσσει από τα πρώτα στη λίστα με τα πιο φιλικά προς το περιβάλλον πλαστικά υλικά. Το PLA είναι σκληρό, ανθεκτικό και παρουσιάζει μεγαλύτερη ακαμψία σε σύγκριση με το ABS. Η θερμοκρασία στην οποία αρχίζει να μαλακώνει είναι περίπου οι 65 βαθμοί Κελσίου. Σε ένα αντικείμενο φτιαγμένο από PLA μπορεί να γίνει επεξεργασία με γυαλόχαρτο αλλά και μηχανουργική κατεργασία όπως τρύπημα, τόννευση και φρεζάρισμα. Επίσης μπορεί να βαφεί με ακρυλικά και άλλα χρώματα. Είναι το πιο κοινά 3D εκτυπώσιμο υλικό, ιδανικό για όλες τις εφαρμογές που δεν υφίστανται υψηλές θερμοκρασίες. [13]

Πυκνότητα	1.3 g/cm <sup>3</sup>
Μέτρο ελαστικότητας	3.5 GPa
Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης	60 °C
Θερμοκρασία τήξης	150-160 °C
Θερμική αγωγιμότητα	0.13 W/m-K
Αντοχή σε εφελκυσμό (UTS)	50 MPa

Πίνακας 1: Βασικές μηχανικές ιδιότητες του PLA [14]

## **ABS**

Το ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) είναι ένα από τα πιο κοινά είδη πλαστικών στη βιομηχανία κατασκευής προϊόντων. Τα γνωστά σε όλους μας τουβλάκια LEGO® είναι ένα τέτοιο παράδειγμα. Το ABS έχει πετρελαϊκή προέλευση κάτι που το κάνει λιγότερο "πράσινο" από το PLA. Είναι πολύ ανθεκτικό, σκληρό και σε μικρό βαθμό εύκαμπτο ώστε υπό περιορισμένη πίεση να λυγίζει αντί σπάει. Διατηρεί τη στιβαρότητα του έως τους 105 βαθμούς Κελσίου, άρα είναι ιδανικό για εφαρμογές όπου απαιτείται αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες. Όπως και το PLA μπορεί να τρυπηθεί αλλά και να λειανθεί με τρίψιμο χωρίς πρόβλημα. [13] Τέλος, παραλλαγές του ABS αποτελούν τα ABSplus, ABSi, ABS-M30, ABS-M30i και ABS-ESD7.

Πυκνότητα	1.02 g/cm <sup>3</sup>
Μέτρο ελαστικότητας	2 GPa
Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης	105 °C
Θερμοκρασία τήξης	Άμορφο. Εργάζεται στους 230 °C
Θερμική αγωγιμότητα	0.22 W/m-K
Αντοχή σε εφελκυσμό (UTS)	30 MPa

**Πίνακας 2:** Βασικές μηχανικές ιδιότητες του ABS [15]

Επίσης, έχουν αναπτυχθεί και τα εξής υλικά σε μορφή νήματος (filament):

## **PETG**

Το PETG είναι ένα πολυεστερικό υλικό, το οποίο προέρχεται από την χημική ανάμιξη δυο υλικών, το τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET) και τη γλυκερόλη (Glycerol). Έχει δημιουργηθεί ειδικά για την τρισδιάστατη εκτύπωση.

Τα κύρια πλεονεκτήματα του είναι η καλή αντοχή και η ευκαμψία του. Είναι ιδανικό για κατασκευή μηχανολογικών εξαρτημάτων λόγω της υψηλής αντοχής στην κρούση. Επίσης, έχει εγκριθεί από τον αμερικανικό οργανισμό τροφίμων FDA για επαφή με τρόφιμα. Τέλος, είναι ένα ανακυκλώσιμο υλικό. [16]



**Σχήμα 2.11:** Εκτυπωμένα αντικείμενα από PETG [16]

### **Nylon**

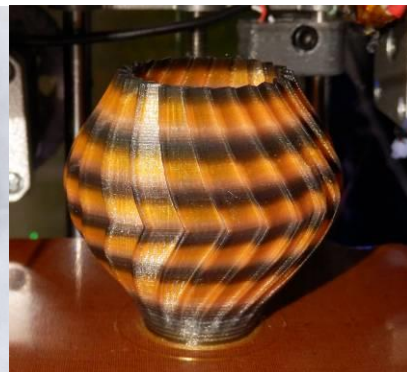
Το πολυαμίδιο, γνωστό και ως Nylon, είναι ένα συνθετικό πολυμερές που χρησιμοποιείται σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές. Το nylon αποτελεί ένα αποδοτικό πλαστικό, το οποίο είναι σκληρό, ελαφρύ, εύκαμπτο, ανθεκτικό στη φθορά και ανακυκλωσιμο. Επίσης, είναι πιο σκληρό και ανθεκτικό και λιγότερο ψαθυρό σε σχέση με τα PLA και ABS.

Είναι ιδανικό για την κατασκευή γραναζιών, κουζινέτων, δομικών στοιχείων και γενικά μηχανολογικών εξαρτημάτων. Το φινίρισμα προσδίδει μια γυαλάδα στην επιφάνεια του.

Μια ιδιότητα του που συναρπάζει πολύ τους χρήστες της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι ότι μπορεί να βαφεί, με αποτέλεσμα την παραγωγή πολύχρωμων αντικειμένων. [16]



*Σχήμα 2.12: Nylon filament [17]*

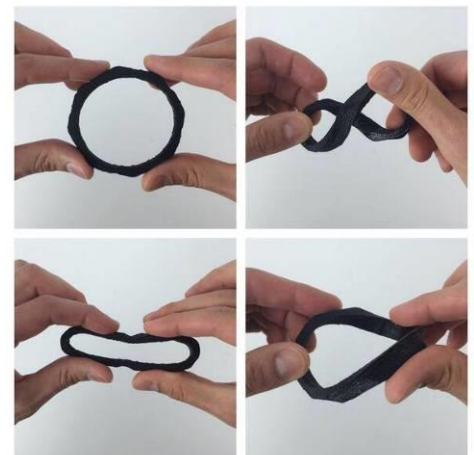


*Σχήμα 2.13: Εκτύπωση από Nylon [17]*

### **Flexible, TPE, TPU**

Με τα θερμοπλαστικά ελαστομερή, ειδικά την πολυουρεθάνη (TPU), μπορούν να κατασκευαστούν πάρα πολύ ελαστικά αντικείμενα, τα οποία αντέχουν σε καταπονήσεις μεγαλύτερες σε σχέση με τα ABS και PLA. Η 3D εκτύπωση με TPU είναι δύσκολη, διότι το υλικό έχει την τάση να βρίσκει διαφυγή από σημεία της κεφαλής συνήθως πριν φτάσει στο ακροφύσιο (nozzle). Για την αποφυγή τέτοιου είδους προβλημάτων απαιτείται ακριβής ρύθμιση της θερμοκρασίας στο ακροφύσιο και της ταχύτητας εκροής (flow rate).

Η πολυουρεθάνη είναι ιδανική για την κατασκευή παιχνιδιών, για wearables, θήκες κινητών τηλεφώνων κ.ά. Δεν είναι ασφαλές υλικό για τρόφιμα. [16]



*Σχήμα 2.14: Αντικείμενο από TPU [18]*

### **Laywoo-D3**

Το Laywoo-D3 είναι ένα υλικό σε μορφή νήματος με βάση το ξύλο, το οποίο επινοήθηκε από τον Kai Parthy και σχεδιάστηκε για μηχανές τύπου RepRap. Είναι σύνθετο υλικό, αποτελείται σε ποσοστό 40% από ανακυκλώσιμο ξύλο και στο υπόλοιπό του από αβλαβή πολυμερή.

Παρουσιάζει παρόμοια θερμική αντοχή με το PLA και εργάζεται μεταξύ 175°C και 250°C. Προσκολλάται εύκολα στο τραπέζι εκτύπωσης, μπορεί επίσης να τροχιστεί, να κατεργαστεί με γυαλόχαρτο και να βαφτεί. Το χρώμα του μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την θερμοκρασία. Για παράδειγμα στους 180°C είναι ανοιχτόχρωμο ενώ στους 245°C γίνεται πιο σκούρο. [19]



Σχήμα 2.15: Laywoo-D3 [20]



Σχήμα 2.16: Ρολόι από Laywoo-D3 [21]

### **Metal-PLA**

Αυτό το υλικό ουσιαστικά, είναι PLA συνδυασμένο με λεπτή μεταλλική σκόνη. Τα αντικείμενα που παράγονται από αυτό το υλικό μοιάζουν με σαν να είναι φτιαγμένα από μπρούντζο, ορείχαλκο, χαλκό, αλουμίνιο και ανοξείδωτο χάλυβα και μπορούν να γυαλιστούν, να διαβρωθούν και να χάσουν τη λάμψη τους όπως όλα τα μέταλλα. Το metal-PLA έχει πολλαπλάσια πυκνότητα συγκριτικά με το κλασσικό PLA κι έτσι τα αντικείμενα μοιάζουν περισσότερο με μεταλλικά παρά με πλαστικά.

Εργάζεται στους 195°C – 220°C και δεν χρειάζεται θερμαινόμενο τραπέζι, παρ' όλα αυτά η εκτύπωση με αυτό το υλικό είναι δύσκολη και γι' αυτό απαιτεί καλή ρύθμιση της θερμοκρασίας του nozzle και της ταχύτητας τροφοδοσίας (flow rate). [16]



Σχήμα 2.17: Metal-PLA [16]

### **Carbon Fiber**

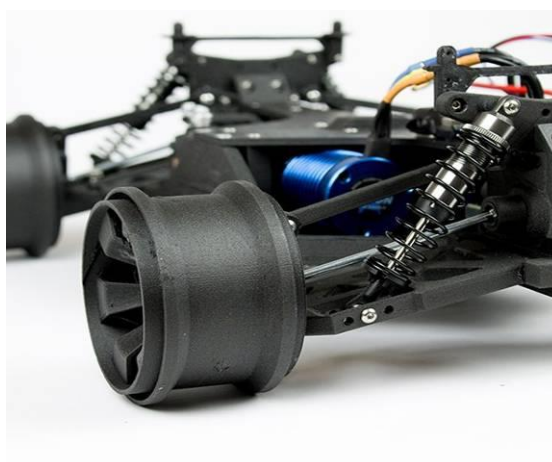
Το Carbon Fiber (ανθρακόνημα), είναι ίσως από τα πιο σημαντικά υλικά της τεχνολογίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης, το οποίο προσφέρει απίστευτη ακαμψία, μηχανική αντοχή και υπέροχη προσκόλληση στην επιφάνεια εκτύπωσης. Το κόστος αυξάνεται κατά πολύ, όχι μόνο λόγω της τιμής του υλικού, αλλά και λόγω των λειαντικών από τα οποία αποτελείται, τα οποία προκαλούν φθορά και αύξηση της διαμέτρου του nozzle ειδικά αν είναι κατασκευασμένο από κάποιο μαλακό μέταλλο όπως ο ορείχαλκος.

Εργάζεται στους 195°C – 220°C και δεν απαιτεί θερμαινόμενη επιφάνεια. Ο βαθμός δυσκολίας της εκτύπωσης είναι μέτριος και απαιτεί ένα nozzle από σκληρό υλικό.

Είναι ιδανικό για την κατασκευή μηχανικών μερών, προστατευτικά περιβλήματα και για εφαρμογές υψηλής αντοχής αλλά δεν είναι ασφαλές για χρήση με τρόφιμα. [16]



*Σχήμα 2.19: Carbon Fiber filament [22]*



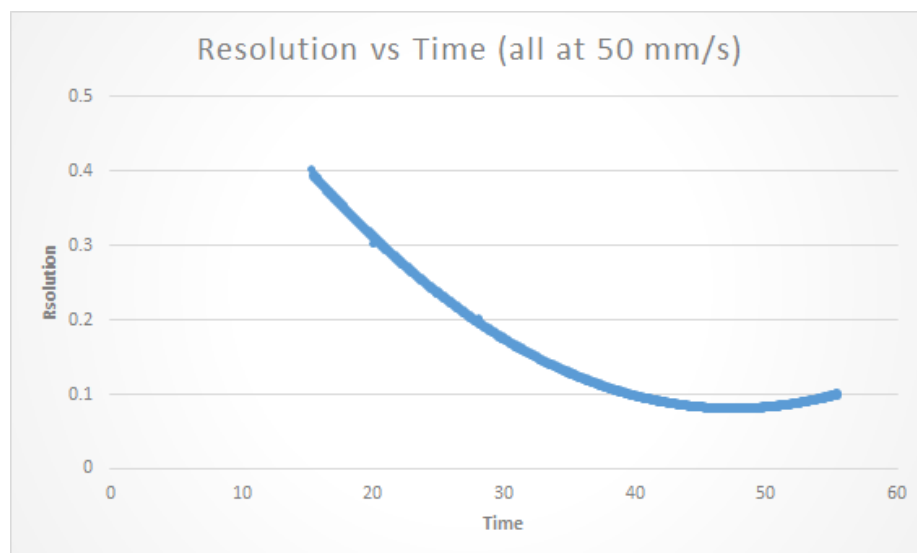
*Σχήμα 2.18: Αυτοκινητάκι μικρών διαστάσεων από ανθρακόνημα. [22]*

### 2.1.6.2. Θεωρητικά στοιχεία της FDM

Η εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης απαιτεί καλή γνώση των θεωρητικών στοιχείων που την διέπουν και των παραμέτρων που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα. Με καλή γνώση του θεωρητικού υπόβαθρου ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει αντικείμενα σύμφωνα με τις απαιτήσεις του, θέτοντας τις κατάλληλες ρυθμίσεις.

- Ανάλυση (Resolution) και ποιότητα (Quality)

Η ανάλυση της εκτύπωσης καθορίζεται από το ύψος της στρώσης. Η σχέση μεταξύ του χρόνου και της ανάλυσης της εκτύπωσης (resolution) παριστάνεται με μία λογαριθμική καμπύλη, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.19.



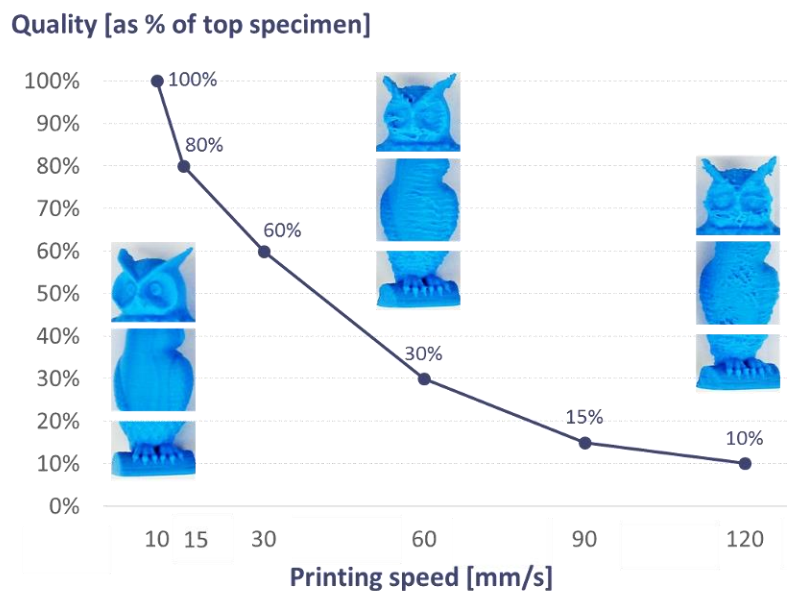
Σχήμα 2.19.: Καμπύλη εξάρτησης μεταξύ χρόνου και ανάλυσης εκτύπωσης [23]

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω γράφημα, ο χρόνος της εκτύπωσης μπορεί να αυξηθεί αρκετά όσο βελτιστοποιείται η ανάλυση της εκτύπωσης. Η βέλτιστη ποιότητα επιτυγχάνεται με την μείωση του ύψους της στρώσης, δηλαδή με τη μεγιστοποίηση της ανάλυσης. Στο σχήμα 2.20 φαίνεται η διαφορά στην ποιότητα και στον χρόνο της εκτύπωσης, με συγκεκριμένη ταχύτητα, για διαφορετική ανάλυση ανά περίπτωση. Η καλύτερη ποιότητα σημειώνεται με ύψος στρώσης 0,1mm με μεγάλη διαφορά χρόνου σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις.



Σχήμα 2.20.: Ανάλυση και χρόνος εκτύπωσης [24]

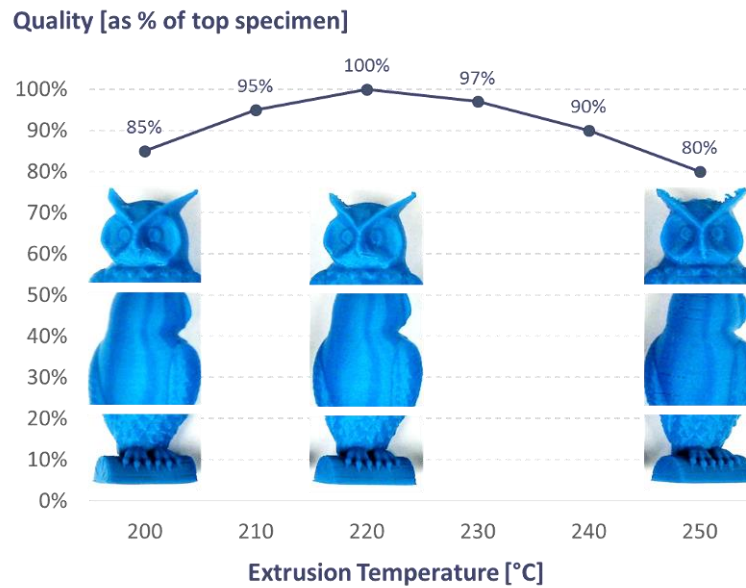
Η ποιότητα της εκτύπωσης επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Οι κυριότεροι είναι η ανάλυση δηλαδή το ύψος της στρώσης, η ταχύτητα εκτύπωσης, η θερμοκρασία εξώθησης του υλικού, η διάμετρος του ακροφυσίου (nozzle), η προσκόλληση στο τραπέζι εκτύπωσης και το αν ψύχεται το σημείο εκτύπωσης κατά την διάρκεια της. Παρακάτω βλέπουμε αποτελέσματα από πειράματα και μετρήσεις που έγιναν από την εταιρεία 3d Matter.



Σχήμα 2.21.: Ποιότητα σε συνάρτηση με την ταχύτητα εκτύπωσης [25]

Η ταχύτητα εκτύπωσης έχει μεγάλη επίδραση στην ποιότητα. Στα 10mm/s, η ποιότητα είναι πολύ καλή, αλλά στα 30mm/s έχει μειωθεί σημαντικά. Εξακολουθεί να μειώνεται όσο η ταχύτητα αυξάνεται και στα 120mm/s, η ποιότητα είναι πολύ χαμηλή. Παρόλα αυτά, τα 120mm/s δεν είναι ασυνήθιστη ταχύτητα για τρισδιάστατη εκτύπωση, αλλά σε ένα μικρό αντικείμενο οδηγεί σε κακή ποιότητα. [25]





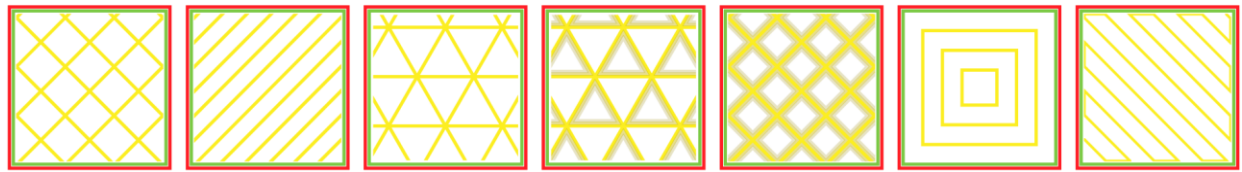
Σχήμα 2.22: Ποιότητα σε συνάρτηση με την θερμοκρασία εξώθησης [25]

Στο σχήμα 2.22 φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας εξώθησης στην ποιότητα του δοκιμίου από PLA. Η βέλτιστη ποιότητα σημειώνεται στους 220°C. Τα νήματα που χρησιμοποιούνται διαφέρουν μεταξύ τους. Οι κατασκευαστές δίνουν ένα εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας αλλά προτείνεται στους χρήστες να πειραματιστούν για να εντοπίσουν την θερμοκρασία που αποδίδει την βέλτιστη ποιότητα.

- Πυκνότητα πλήρωσης (Infill density), πρότυπο πλήρωσης (Infill pattern)

Η πυκνότητα γεμίσματος προσδιορίζει το ποσό πλαστικού που χρησιμοποιείται για το εσωτερικό μέρος της εκτύπωσης. Υψηλότερη πυκνότητα πλήρωσης σημαίνει περισσότερο πλαστικό μέσα στην εκτύπωση, το οποίο οδηγεί σε δυνατότερο αντικείμενο. [ultimaker.com] Μη λειτουργικά μέρη (όπως καλλιτεχνικά μέρη, φιγούρες, κλπ...) συνήθως κυμαίνονται μεταξύ 5-20% και τα λειτουργικά μέρη (όπως είναι τα εργαλεία) κυμαίνονται μεταξύ 30-70%. [23]

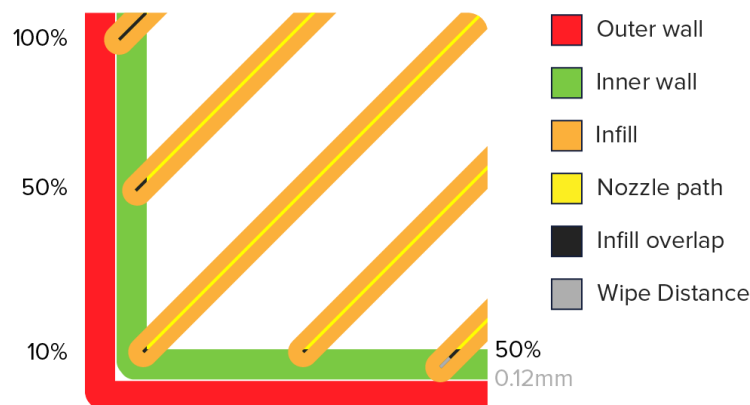
Τα πρότυπα πλήρωσης που υπάρχουν φαίνονται στο σχήμα 2.23 και είναι τα εξής με σειρά από αριστερά προς τα δεξιά της εικόνας: Grid, Lines, Triangles, Cubic, Tetrahedral, Concentric και Zig Zag.



Σχήμα 2.23: Πρότυπα πλήρωσης (Infill patterns) [26]

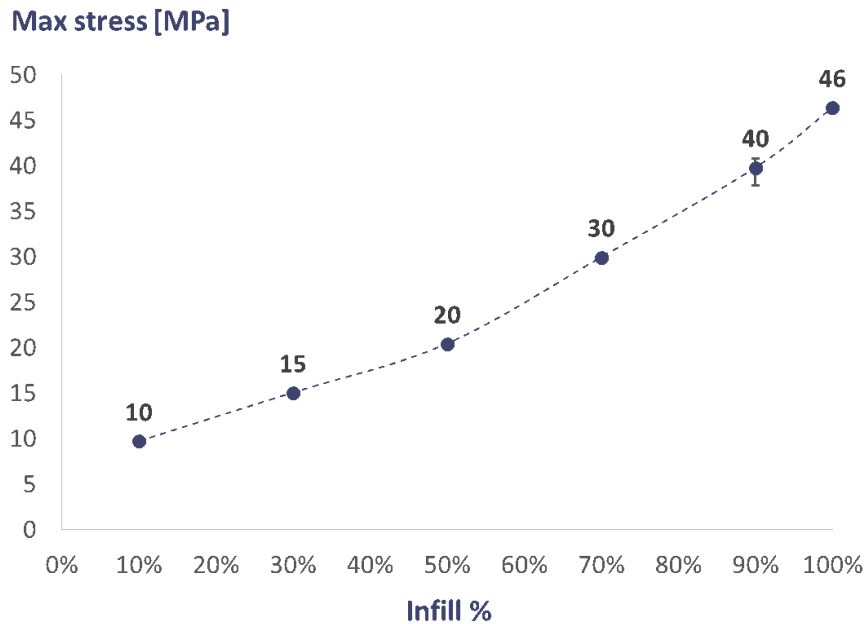
### **Infill overlap**

Με αυτή την ρύθμιση ελέγχεται το ποσό επικάλυψης μεταξύ της πλήρωσης (infill) και των τοιχωμάτων (walls). Μια υψηλή τιμή συνήθως έχει αποτέλεσμα καλύτερη σύνδεση μεταξύ πλήρωσης και τοιχωμάτων. Από την άλλη, θα μπορούσε επίσης να μειώσει την (οπτική) ποιότητα της εκτύπωσης, γιατί μια υψηλή τιμή θα μπορούσε να οδηγήσει σε υπερτροφοδοσία (over extrusion). [26]

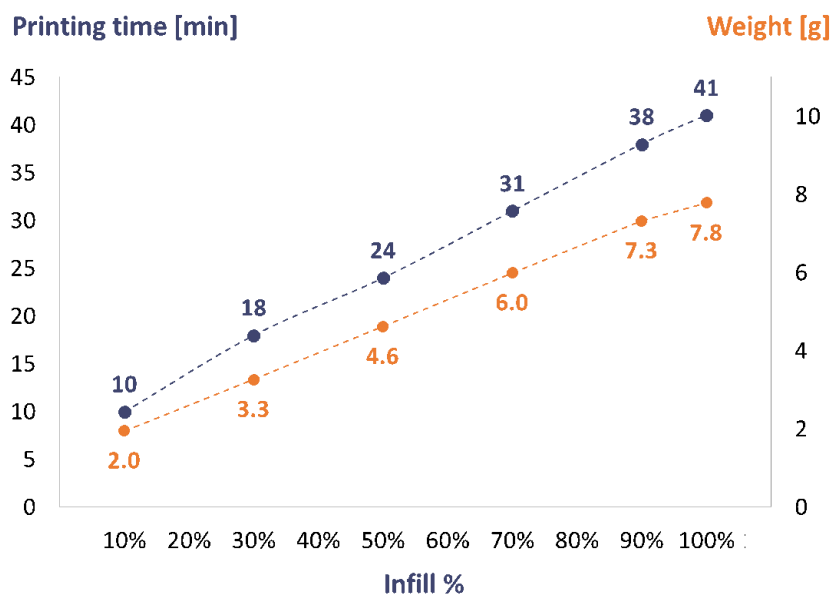


Σχήμα 2.24: Infill overlap [26]

Αντικείμενο από PLA εκτυπωμένο στην ίδια ταχύτητα αλλά με διαφορετική infill density κάθε φορά στην εξέταση των μηχανικών του ιδιοτήτων, έδειξε τα αποτελέσματα που φαίνονται στο σχήμα 2.25:



Σχήμα 2.25: Μέγιστη τάση PLA σε συνάρτηση με το ποσοστό της πυκνότητα πλήρωσης (infill %) [27]



Σχήμα 2.26: Χρόνος εκτύπωσης και βάρος συναρτήσει του Infill% [27]

Στο σχήμα 2.27 φαίνονται τέσσερις πίνακες, οι οποίοι δίνουν όλους τους δυνατούς συνδυασμούς που μπορεί να εφαρμόσει ο χρήστης αναλόγως με τις απαιτήσεις της εφαρμογής του. Με τον όρο “speed” εννοείται το πόσο γρήγορα έγινε η εκτύπωση και μετράται σε λεπτά (min).



Σχήμα 2.27: Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων εκτύπωσης σε διαφορετικές συνθήκες [27]

### 2.1.7 Σύγκριση των μεθόδων ταχείας προτυποποίησης

Στον πίνακα 3 βλέπουμε την σύγκριση των έξι τεχνολογιών ταχείας προτυποποίησης που είναι ευρέως διαδεδομένες. Κάθε είδος χρησιμοποιεί διαφορετικά υλικά και χρησιμοποιείται σε διαφορετικές εφαρμογές. Ωστόσο, την μεγαλύτερη επίτευξη ακρίβειας την σημείωνει η επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (SLS), όπου η συγκεκριμένη μέθοδος δημιουργεί αντικείμενα υψηλής αντοχής αλλά είναι πολύ χρονοβόρα και ακριβή και δεν ενδείκνυται για οικιακή χρήση.

Πολλά πλεονετήματα παρουσιάζει επίσης και η FDM μέθοδος, όπως είναι η καλή ακρίβεια, είναι μια οικονομική μέθοδος και είναι ιδανική για οικιακή χρήση ή χρήση στο γραφείο. Επίσης, μπορεί να κατεργαστεί μεγάλη γκάμα υλικών από τα οποία χτίζει κομμάτια με πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες και σε διάφορα χρώματα πχ. εκτυπωτής με 2 κεφαλές. Υστερεί ως προς την ποιότητα της επιφάνειας της και στον χρόνο που απαιτεί, συγκριτικά πχ. με την στερεολιθογραφία, γι αυτό τα αντικείμενα που παράγονται με την FDM μέθοδο χρειάζονται φινίρισμα.

	Ακρίβεια (μm)	Πάχος στρώσης (μm)	Ανάλυση (μm)	Υλικό
<b>SLA</b>	± 100	50	200-225	Epoxy, acrylin resin
<b>SGC</b>	± 500	100-200	100	Resin
<b>SLS</b>	± 51	76	250	Nylon, Metals, polycarbonate
<b>3DP</b>	± 127	177	508	ceramic, metal
<b>LOM</b>	± 127	76-203	203-254	paper, plastic, ceramic
<b>FDM</b>	± 127	50-762	254	PLA, ABS, Nylon, other thermoplastic elastomers

**Πίνακας 3: Σύγκριση τεχνολογιών ταχείας προτυποποίησης**

### 2.1.8. Εφαρμογές της τεχνολογίας ταχείας προτυποποίησης

Η εφαρμογή της τεχνολογίας RP που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από την εφικτή ακρίβεια του τελικού εξαρτήματος και από τις μηχανικές ιδιότητες του χρησιμοποιούμενου υλικού, όπως η επιμήκυνση, η σκληρότητα, και η αντοχή σε εφελκυσμό. Οι εφαρμογές μπορούν να διαιρεθούν σε τρεις κύριους τομείς:

- πρωτότυπα για την αξιολόγηση της σχεδίασης
- πρωτότυπα για την επαλήθευση της λειτουργίας, και
- μοντέλα για τις επόμενες διεργασίες της βιομηχανικής παραγωγής.

Όταν εμφανίστηκαν για πρώτη φορά οι διεργασίες RP, χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για την οπτική αναπαράσταση της σχεδίασης ενός αντικειμένου ή για τη γεφύρωση του χάσματος επικοινωνίας μέσω της διάθεσης μοντέλων σε φυσικό μέγεθος τα οποία κάποιος μπορούσε να αγγίξει και να κρατήσει στα χέρια. Η δυναμικότητα αυτή έφερε επανάσταση στις συσκέψεις εξέτασης της σχεδίασης: ο εποικοδομητικός διάλογος μεταξύ των μελών της ομάδας σχεδίασης, καθώς ο ένας έδινε τα μοντέλα στον άλλο, ξαφνικά επέτρεψε σε όλους να εκφράζουν προβληματισμούς και προτάσεις με ένα κοινό υπόβαθρο οπτικοποιημένης αντίληψης. Σε κάποιες περιπτώσεις, αυτή η υποστήριξη για τους σχεδιαστές αποτελούσε από μόνη της τη βασική δικαίωση της επένδυσης σε μηχανές RP. Σήμερα, η μεγάλη επέκταση των διεργασιών RP στη βιομηχανική παραγωγή έχει γίνει η κινητήρια δύναμη για την περαιτέρω ανάπτυξή τους.

- **Πρωτότυπα για αξιολόγηση της σχεδίασης**

Τα τρέχοντα συστήματα μοντελοποίησης στερεού διευκολύνουν την αξιολόγηση της σχεδίασης, παρέχοντας δυνατότητες όπως απεικόνιση, σκίαση, περιστροφή, και μεγέθυνση. Παρόλα αυτά,

δεν υπάρχει αμφιβολία ότι η αξιολόγηση της σχεδίασης είναι πιο αποτελεσματική όταν ο σχεδιαστής μπορεί να αγγίξει και να κρατήσει στα χέρια του το πρωτότυπο της σχεδίασης. Ανεξάρτητα από την πείρα που μπορεί να έχει κάποιος στην ανάγνωση τεχνικών σχεδίων ή στην εξέταση εικόνων CAD ενός πολύπλοκου αντικειμένου, ο σχηματισμός μιας ακριβούς νοερούς εικόνας του πραγματικού εξαρτήματος είναι πολύ δύσκολος. Γνωρίσματα όπως οι τυφλές οπές, οι πολύπλοκοι εσωτερικοί διάδρομοι και οι σύνθετες καμπύλες επιφάνειες συχνά προκαλούν δυσκολίες ερμηνείας. Η μείωση των σφαλμάτων μέσω της βελτιωμένης εικόνας του αντικειμένου μπορεί να είναι σημαντική. Δεν υπάρχει ο καλύτερος τρόπος να βεβαιωθούμε ότι ένα πολύπλοκο εξάρτημα θα διαθέτει ακριβώς εκείνα τα γνωρίσματα που θέλουμε να διαθέτει, από το να το κρατήσουμε στα χέρια μας, να το περιστρέψουμε μερικές φορές και να το κοιτάξουμε από όλες τις πλευρές του. Πιο συγκεκριμένα, η αισθητική αξιολόγηση σχεδίασης απαιτεί ένα φυσικό αντικείμενο.

- **Πρωτότυπα για την επαλήθευση της λειτουργίας**

Αφού ολοκληρωθεί μια σχεδίαση, ο σχεδιαστής πρέπει να επαληθεύσει ότι αυτή πληροί τις απαιτήσεις λειτουργικότητας που είχαν τεθεί. Η απλή επαλήθευση της λειτουργικότητας μπορεί να περιλαμβάνει τον έλεγχο της πρακτικότητας του συγκροτήματος, την κινηματική απόδοση και την αεροδυναμική απόδοση.

Συχνά, είναι αναγκαίο να επαληθεύσουμε ότι ένα προϊόν μπορεί να συναρμολογηθεί εύκολα από τα συστατικά του ή να αποσυναρμολογηθεί εύκολα για λόγους συντήρησης. Πολλές φορές, ένα προϊόν μπορεί να συναρμολογηθεί μόνο με μεγάλη δυσκολία ή και καθόλου. Για απλά συγκροτήματα (assemblies), η δυνατότητα ευκολίας συναρμολόγησης μπορεί να ελεγχθεί από τα σχέδια. Συνήθως όμως, για τον έλεγχο εκτελείται η πραγματική συναρμολόγηση. Στην περίπτωση αυτή, τα πρωτότυπα που φτιάχνονται με διεργασίες RP είναι πολύ χρήσιμα επειδή, για την εργασία της συναρμολόγησης, συστατικά που αποτελούνται από διαφορετικά υλικά είναι αρκετά ικανοποιητικά. Η χρήση των πρωτοτύπων αντί για πραγματικά συστατικά έχει ως αποτέλεσμα σημαντικό κέρδος σε χρόνο και χρήμα.

- **Διεργασίες ταχείας κατασκευής καλουπιών**

Η *ταχεία κατασκευή καλουπιών* (rapid tooling-RT) είναι ένας όρος ο οποίος δεν έχει ακόμη οριστεί πλήρως. Αρχικά χρησιμοποιούνταν μόνο σε σχέση με την ταχεία κατασκευή πρωτοτύπου αλλά τώρα χρησιμοποιείται και για την περιγραφή οποιασδήποτε διαδικασίας οδηγεί στη γρήγορη διαθεσιμότητα καλουπιών. Αυτό περιλαμβάνει διεργασίες μηχανικής κατεργασίας όπως η κοπή υψηλής ταχύτητας (high speed cutting- HSC) και οι διεργασίες RP.

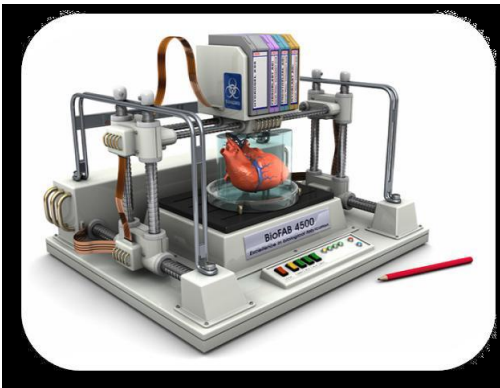
Όσο αφορά τις διεργασίες RP, η τεχνολογία RT αποτελείται από τέσσερις διακριτούς τύπους μεθόδων με βάση τον αριθμό των αναστροφών του προτύπου: άμεση κατασκευή καλουπιών (direct tooling), κατασκευή καλουπιών απλής αναστροφής (single-reverse tooling), κατασκευή καλουπιών διπλής αναστροφής (double-reverse tooling) και κατασκευή καλουπιών τριπλής αναστροφής (triple-reverse tooling). Όσο αυξάνεται ο αριθμός των αναστροφών, βελτιώνεται η ανθεκτικότητα του προϊόντος αλλά αυξάνεται το κόστος του και μειώνεται η ακρίβειά του.

Η ταχεία προτυποποίηση βρίσκει εφαρμογή στη βιομηχανία σε πολλούς τομείς. Για παράδειγμα στην αεροδιαστημική και άμυνα, στην αρχιτεκτονική κατασκευάζοντας όμορφα μοντέλα, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην κοσμηματοποιία, στην παραγωγή ηλεκτρονικών συσκευών, είδη αθλητισμού και παιχνιδιών, και τέλος στην ιατρική.

Το 2002, το Ινστιτούτο Αναγεννητικής Ιατρικής της Ιατρικής Σχολής του Wake Forest University στο Σάλεμ της Βόρειας Καρολίνας αρχίζει να σχεδιάζει έναν εκτυπωτή που θα έχει τη δυνατότητα να εκτυπώνει κύτταρα όμοια με εκείνα του νεφρού για να δημιουργεί μέλλον ολόκληρο το όργανο, [29]

Το 2014, ο Richard Arm (MSc Smart Design, ερευνητής στο πανεπιστήμιο του Νοτινγκχαμ της Μεγάλης Βρετανίας) δημιουργεί την πρώτη καρδιά με τρισδιάστατα εκτυπωμένα μέρη, προκειμένου να ενισχύσει τη δυνατότητα έρευνας και την πειραματική χειρουργική.

Το 2014, ο πρώτος 3D printer με το όνομα made in space προσγειώθηκε στη διαστημική βάση της NASA και θα εκτυπώνει υπό συνθήκες μηδενικής βαρύτητας.

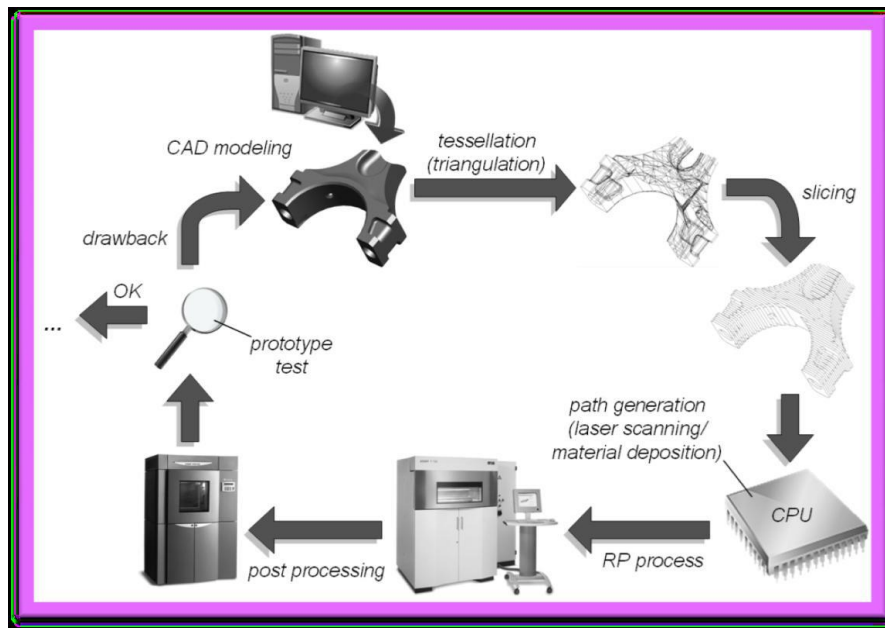


Σχήμα 2.20: Εκτύπωση καρδιάς [28]



Σχήμα 2.21: Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής της Nasa [28]

### 2.2 Η διαδικασία της ταχείας προτυποποίησης



Σχήμα 2.22: Γενικευμένη διαδικασία ΤΠ [28]



Σχήμα 2.23: Γενικευμένη διαδικασία προσθήκης υλικού. [28]



### 2.2.1. Αρχεία AMF

AMF ή Additive Manufacturing File Format, είναι μία 3D μορφή αρχείου που χρησιμοποιείται για αποθήκευση και περιγραφή αντικειμένων τα οποία θα κατασκευαστούν μέσω 3D εκτύπωσης/Προσθετικής μηχανικής. Εισήχθη το 2011, ως πρότυπη μορφή αρχείου της ASTM για 3D εκτύπωση ως εναλλακτική της STL μορφής. Η AMF είναι σε XML μορφή, σχεδιασμένη για να παρέχει εγγενή υποστήριξη για χαρακτηριστικά αρχείου όπως είναι η γεωμετρία, κλίμακα, χρώμα, υλικό, πλέγματα, αντίγραφα και προσανατολισμός.

Τα αρχεία STL δεν υποστηρίζουν χαρακτηριστικά όπως το χρώμα, το υλικό και τον προσανατολισμό. Επιπλέον, τα STL βασίζονται στην τριγωνική υποδιαίρεση για την έκφραση της καμπυλότητας. Όταν το STL αρχείο, κλιμακώνεται στο μέγεθος, διατηρεί την ανάλυση του εισάγοντας περισσότερα τρίγωνα. Το AMF επιδιώκει να αντιμετωπίσει τέτοια ζητήματα με το επανασχεδιασμό του τρόπου, με τον οποίο ένα 3D αντικείμενο αποθηκεύεται ψηφιακά. [29]

Προκειμένου να βελτιωθεί η γεωμετρική πιστότητα, η AMF μορφή επιτρέπει την καμπύλωση των ακμών των τριγώνων. Από προεπιλογή, όλα τα τρίγωνα υποτίθεται ότι είναι επίπεδα και οι ακμές του υποτίθεται ότι είναι ευθείες γραμμές που συνδέουν δύο κορυφές τους. Ωστόσο, τα καμπυλόγραμμα τρίγωνα και οι καμπύλες ακμές μπορούν προαιρετικά να καθοριστούν ώστε να μειωθεί ο αριθμός των στοιχείων του πλέγματος που απαιτείται για την περιγραφή μια καμπύλης επιφάνειας. Η πληροφορία της καμπυλότητας έχει αποδειχθεί ότι μειώνει το σφάλμα στις σφαιρικές επιφάνειες κατά ένα συντελεστή 1000, σε σύγκριση με μια επιφάνεια η οποία περιγράφεται από τον ίδιο αριθμό επιπέδων τριγώνων. [30]

### 2.2.2. Αρχεία STL

Απαιτείται μοντέλο στερεών ή μοντέλο επιφανειών. Τα δεδομένα που δέχονται οι μηχανές είναι τύπου STL. (STL, αρχικά Stereo Lithography, σήμερα ως Surface Tessellation Language, γνωστή και ως Standard Triangulation Language). Αρχικά αυτή η μορφή αναπτύχθηκε το 1987 για την εταιρεία 3D Systems για τη μεταφορά δεδομένων CAD για εφαρμογές στερεολιθογραφίας. Τα stl αρχεία διαδοθήκαν γρήγορα σε όλους τους τομείς του rapid technology αρχικά λόγω της εύκολης μαθηματικής περιγραφής μιας πολύπλευρης επιφάνειας και λόγω της δημοσίευσης του STL format σε πρώιμο στάδιο. Η ταχεία εξάπλωση αυτής της μορφής αρχείου επισπεύσθηκε, έτσι ώστε σχεδόν κάθε σύστημα CAD και κάθε λογισμικό ΤΠ υποστηρίζει το STL format. Καθώς όμως οι απαιτήσεις για μορφές διεπαφής (interface format) για σκοπούς (ΤΠ) έχουν αυξηθεί, η μορφή .STL δεν έχει αναπτυχθεί ή μόνο ελάχιστα 1. Έτσι προέκυψαν τα ακόλουθα μειονεκτήματα της μορφής .STL:

Τα μειονεκτήματα του αρχείου STL είναι:

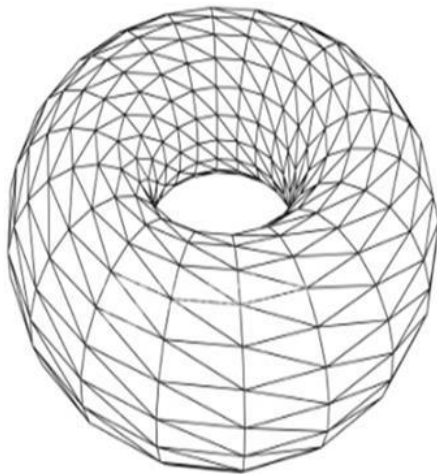
- Λόγω της πολυγωνικής αναπαράστασης η μορφή STL είναι απλά μια προσέγγιση της αρχικής γεωμετρίας. Οι δυνατότητες για το φινίρισμα των τμημάτων STL είναι περιορισμένες λόγω της απόκλισης από το αρχικό μοντέλο.
- Σφάλματα μετατροπής και συντακτικά λάθη κατά την αναπαράσταση (κενά , αλληλεπικάλυψη τριγώνων, εσφαλμένος προσανατολισμός των διανυσμάτων, κλπ.) συχνά συμβαίνουν.
- Πληθώρα και περίσσεια δεδομένων (Κάθετο διάνυσμα, πολλές φορές η ίδια κορυφή
- Σφάλμα προσέγγισης καμπυλών
- Σφάλματα στρογγυλοποίησης
- Έλλειψη πληροφόρησης, ως προς το είδος του κάθε γεωμετρικού στοιχείου δηλ. κύκλος, ευθεία, κλπ.

Τα προτερήματα του αρχείου STL είναι:

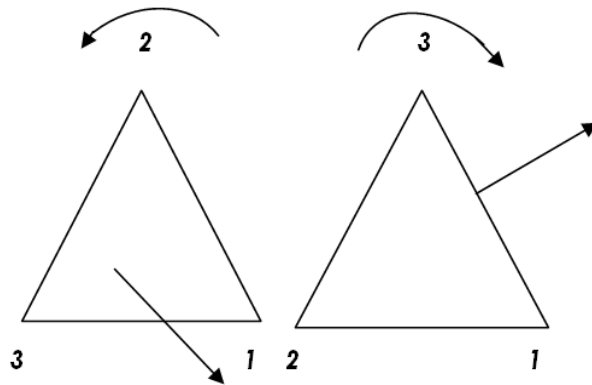
- Απλή μετατροπή. Οι αλγόριθμοι είναι γνωστοί. Η ακρίβεια ελέγχεται με ευκολία.
- Μεγάλο εύρος εφαρμογών.
- Οι αλγόριθμοι τομής του μοντέλου, για τη λειτουργία της μηχανής είναι απλοί.
- Ευκολία στη διαίρεση του μοντέλου σε τμήματα [28]

### **2.2.3. Εισαγωγή Γεωμετρίας**

Το αντικείμενο αναπαρίσταται ως πλέγμα συνδεδεμένων τριγώνων, (tessellated object ή faceted object), σχήμα 2.24. Η φορά περιγραφής των κορυφών κάθε τριγώνου μας προσδιορίζει και τη γεμάτη πλευρά του μοντέλου. Το κάθετο διάνυσμα κατευθύνεται προς τα έξω του εξαρτήματος, σχήμα 2.25. Το STL αρχείο είναι σε ASCII, ή σε Binary format.



Σχήμα 2.24: Πλέγμα συνδεδεμένων τριγώνων [28]

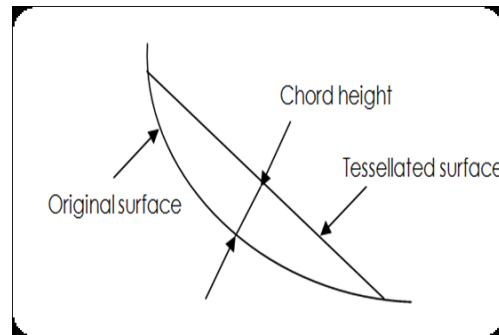


Σχήμα 2.25: Κάθετο διάνυσμα [28]

Η διαίρεση του μοντέλου σε τρίγωνα μπορεί να έχει προβλήματα όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.26](#) η διαίρεση αφήνει ένα κενό, που μας δίνει μια μη έγκυρη διατομή.

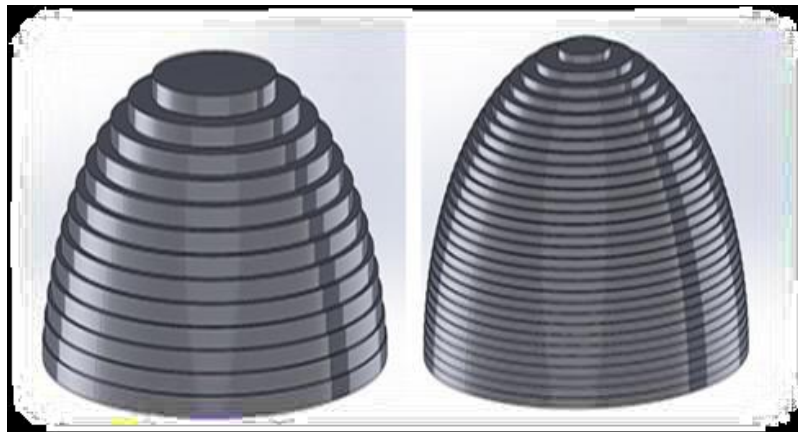


Σχήμα 2.26: Προβλήματα που προκαλούνται από την τριγωνοποίηση μοντέλου. [28]



Σχήμα 2.27: Έλεγχος ακριβείας μοντέλου STL [28]

Το μέγεθος και η ακρίβεια της διαίρεσης (και του αντικειμένου) μπορεί να ελεγχθεί από τον χρήστη, [σχήμα 2.27](#). Ένας δεύτερος παράγοντας είναι και το βήμα που δίνουμε για κάθε στρώμα υλικού. Προφανώς, καμπύλες επιφάνειες βγαίνουν βηματικά, [σχήμα 2.28](#).



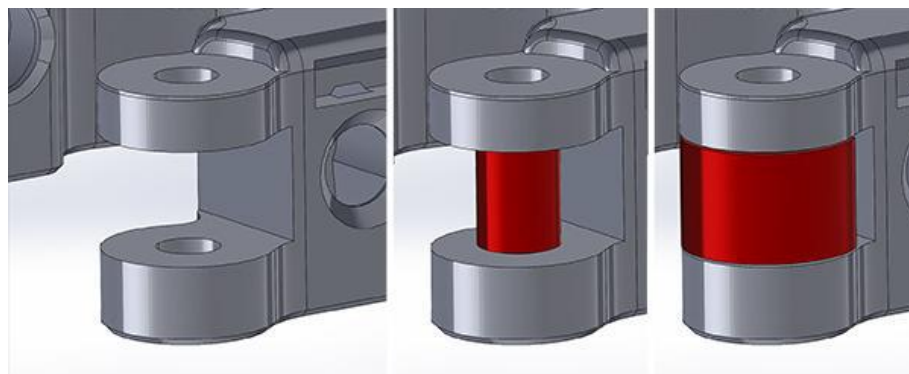
Σχήμα 2.28: Η βηματική απόδοση των καμπύλων επιφανειών. [28]

Το μέγεθος του βήματος εξαρτάται από την επιλεγείσα ακρίβεια, καθώς και ο χρόνος παραγωγής του πρωτότυπου. [28]

#### 2.2.4. Στηρίγματα

Υποστηρίζουν τη διαδικασία με πολλούς τρόπους. Στηρίγματα απαιτούνται για περιπτώσεις που η άνω επιφάνεια που δημιουργείται είναι μεγαλύτερη από τη βάση, και για την αρχική στήριξη του αντικειμένου.

Η μορφή τους επηρεάζει σημαντικά το τελικό πρωτότυπο και καλό θα είναι ο χρήστης να μοντελοποιεί αυτά τα στηρίγματα. [28]



Σχήμα 2.29: Στήριξη αντικειμένου προς κατασκευή [28]

### **3. Σχεδιομελέτη και κατασκευή του 3D εκτυπωτή**

Η κατασκευή ενός ρομποτικού μηχανήματος προαπαιτεί πολύ καλή μελέτη του μηχανολογικού και ηλεκτρολογικού εξοπλισμού του. Αφού ολοκληρωθεί η μελέτη, το επόμενο στάδιο είναι η λεπτομερής σχεδίαση.

Η σχεδίαση του τρισδιάστατου εκτυπωτή και των επιμέρους τμημάτων έγινε στο λογισμικό SOLIDWORKS 2015. Η θερμική και η στατική ανάλυση έγινε με τη χρήση του εργαλείου Solidworks Simulation.

Η επεξεργασία των αλουμινίων που χρησιμοποιούνται έγινε σε συμβατικές εργαλειομηχανές (φρέζα και τόρνος) εκτός από τα μέρη με αριθμό σχεδίου 100-01-029 και 100-02-010 τα οποία κατασκευάστηκαν με laser κοπή και στραντζάρισμα. Τα κατασκευαστικά τους σχέδια παρατίθενται στο Παράρτημα Β. Τα υπόλοιπα μέρη του 3D εκτυπωτή είναι τυποποιημένα του εμπορίου.

#### **3.1. Υπολογιστική μελέτη**

Στη μοντελοποίηση με απόθεση σε κατάσταση τήξης (FDM) το σημαντικότερο μέρος για αποτελεσματικότητα και παραγωγικότητα, εκτός από την ακριβή και σταθερή κίνηση στους τρεις άξονες XYZ, είναι η σωστή λειτουργία της κεφαλής εκτύπωσης. Αυτό απαιτεί την ακριβή εξώθηση/τροφοδοσία του υλικού από το άνω μέρος προς το κάτω μέρος/hot end και τη σωστή κατανομή της θερμοκρασίας στο hot end.

Για την επιλογή της διατομής των οδηγών ράβδων για την κίνηση της κεφαλής στον άξονα X, έγινε στατική ανάλυση με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων για να προσδιοριστεί η συμπεριφορά τους λόγω των φορτίων κάμψης που δέχονται από το βάρος της κεφαλής.

Επίσης, έγινε προσεγγιστικά η θερμική ανάλυση του κάτω μέρους της κεφαλής (hot end) για να δούμε την κατανομή της θερμοκρασίας με στόχο την συγκέντρωση των υψηλότερων τιμών όσο πιο κοντά στο σημείο θέρμανσης.

Η στατική και η θερμική ανάλυση βασίζονται στις παραδοχές της ελαστικής, ισότροπης και γραμμικής συμπεριφοράς των υλικών.

##### **3.1.1. Στατική ανάλυση**

###### **➤ Θεωρητικό μέρος**

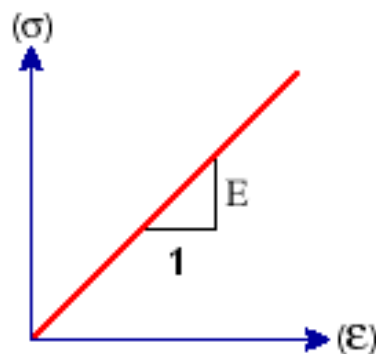
Η σχέση που συνδέει την τάση-παραμόρφωση λέγεται νόμος του Hooke ή εξίσωση ελαστικότητας και δίνεται από τη σχέση

$$\sigma = E \varepsilon$$

## Στο χώρο

$$\underbrace{\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix}}_{\sigma} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \underbrace{\begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5-\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5-\nu \end{bmatrix}}_{\mathbf{E}} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix}_{\varepsilon}$$

Το  $\mathbf{E}$  λέγεται το μητρώο των υλικών (material matrix) είναι διαστάσεων  $6 \times 6$  και είναι συμμετρικό μητρώο. Στο  $\mathbf{E}$ , υπάρχουν 2 μόνον ανεξάρτητοι ελαστικοί συντελεστές, το  $E$  (μέτρο ελαστικότητας) και το  $\nu$  (λόγος του Poisson). [31]

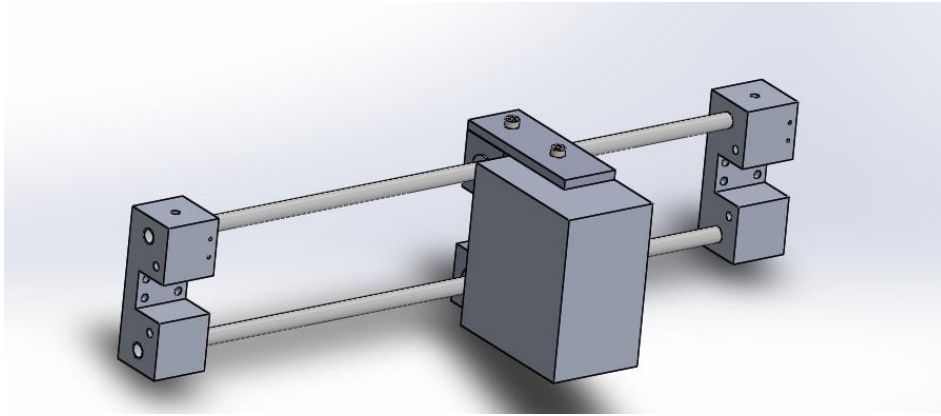


Σχήμα 3.1: Γραμμική σχέση τάσης-ειδικής παραμόρφωσης [32]

➤ Πρακτικό μέρος

Για την απλοποίηση της στατικής ανάλυσης και για την ευκολότερη δημιουργία του πλέγματος (mesh) έγινε αντικατάσταση της κεφαλής εκτύπωσης με ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο, περίπου ίδιας μάζας και όγκου. Το βάρος της κεφαλής εκτύπωσης σύμφωνα με το Solidworks είναι 793,79g, τιμή η οποία είναι πολύ κοντά στην πραγματική 820g.

Για την στατική ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα μέρη τα οποία θέλουμε να εξετάσουμε και όχι ολόκληρο το σχέδιο του 3D εκτυπωτή, για λόγους όπως είναι, η μείωση των πιθανοτήτων της αποτυχίας δημιουργίας του πλέγματος (mesh), η ταχύτερη επίλυση του προβλήματος και η μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

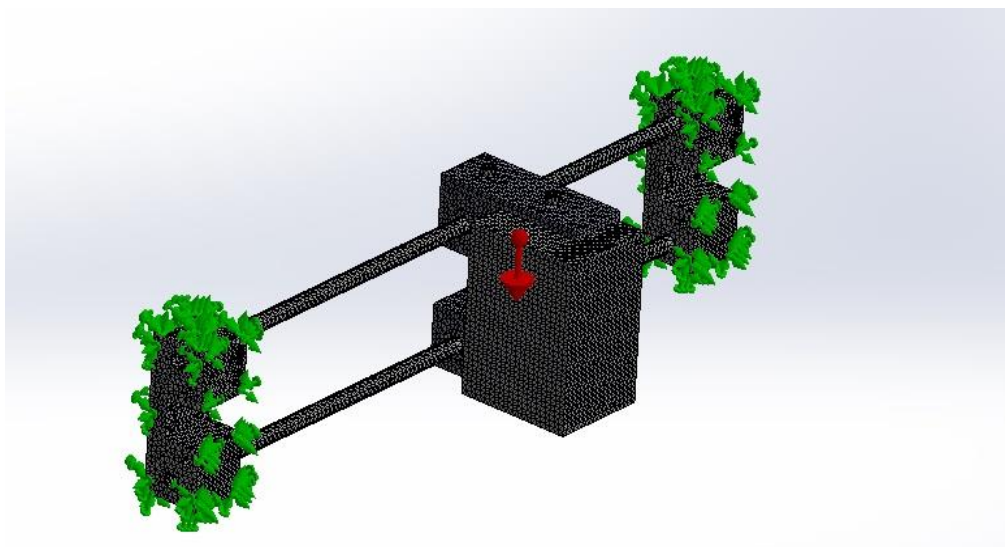


*Σχήμα 3.2: Assembly που χρησιμοποιήθηκε για την στατική ανάλυση*

Ορίζουμε τα υλικά των κομματιών (parts) που απαρτίζουν το assembly από τη βιβλιοθήκη του λογισμικού. Δηλώνουμε τις οριακές συνθήκες (boundary conditions). Αυτές είναι, η σύνδεση των μερών που είναι σε επαφή (contact sets) και η πάκτωση (fix) των στηρίξεων των οδηγών ράβδων.

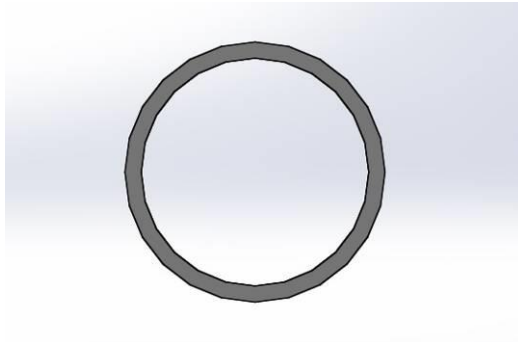
Έπειτα, ορίζουμε τα εξωτερικά φορτία (external loads). Στην περίπτωση μας θέλουμε να εξετάσουμε τη συμπεριφορά των ράβδων υπό την επίδραση του βάρους της κεφαλής, οπότε σαν εξωτερικό φορτίο δηλώνουμε τη βαρύτητα (gravity) με κέντρο βάρους το κέντρο του ορθογωνίου.

Στη συνέχεια, δημιουργούμε το πλέγμα με τα μικρότερα στοιχεία (mesh density: fine) για μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται η πάκτωση στα σημεία στήριξης, το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων και το βέλος της βαρύτητας.



*Σχήμα 3.3: Πάκτωση, πλέγμα, βαρύτητα*

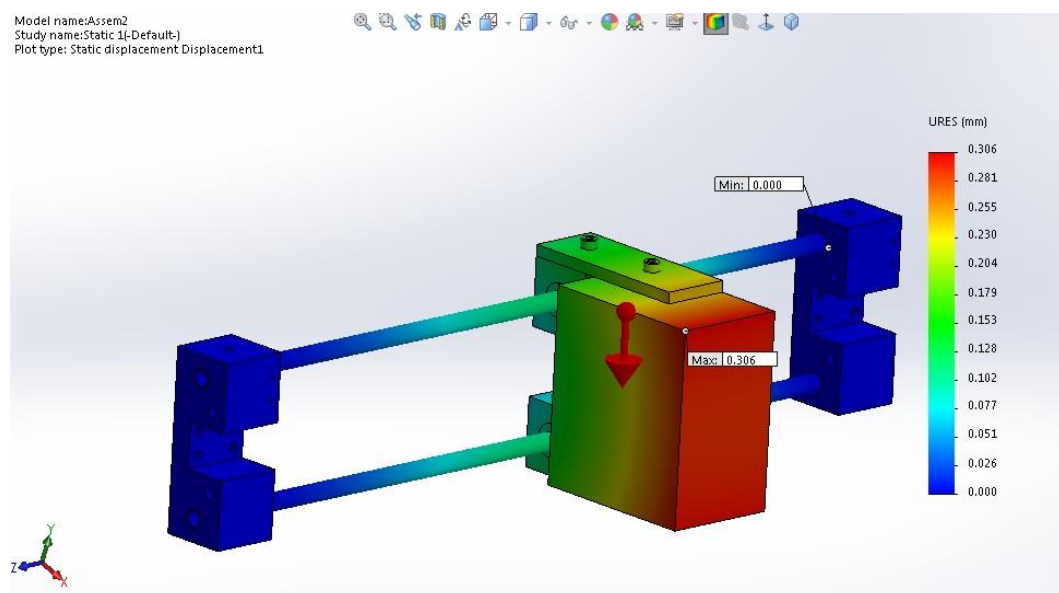
Χαρακτηριστικά οδηγού ράβδου: Στρόγγυλος σωλήνα, από ανοδιωμένο αλουμίνιο, διαστάσεων  $\Phi 8 \times 1 \text{mm}$ .



Σχήμα 3.4: Οδηγός ράβδος

Τα αποτελέσματα που μας ενδιαφέρουν είναι αυτά της μετατόπισης (displacement) και της κατανομής της τάσης (stress).

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι τιμές της μετατόπισης με την μέγιστη(max) να είναι 0,306mm και να παρατηρείται στο άκρο του ορθογωνίου. Η τιμή θεωρείται αποδεκτή διότι δεν προκαλεί κάποιο σφάλμα στην λειτουργία του εκτυπωτή.

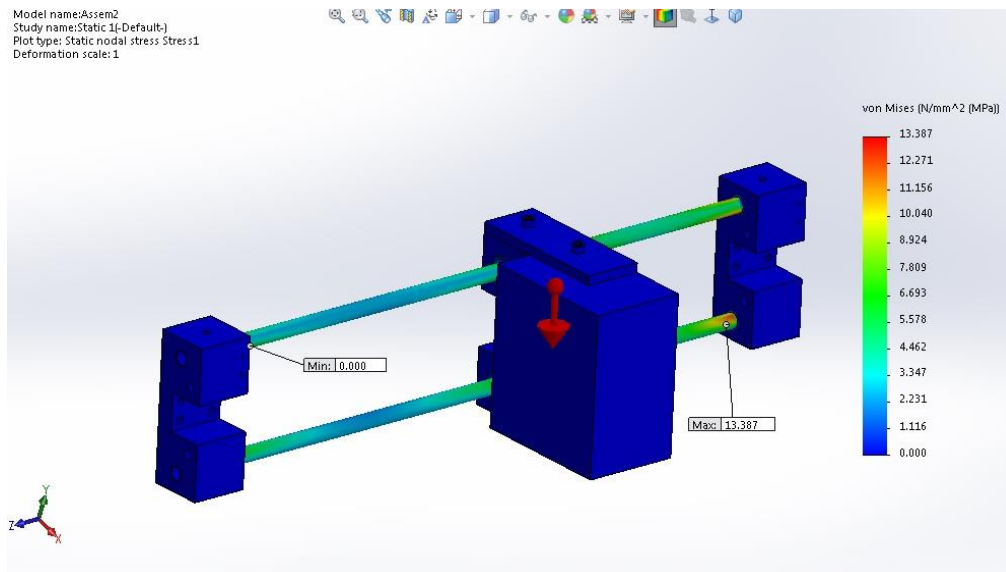


Σχήμα 3.5: Μετατόπιση κεφαλής εκτύπωσης

Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε τα αποτελέσματα της κατανομής της τάσης στους οδηγούς ράβδους λόγω του φορτίου της κεφαλής εκτύπωσης. Η μέγιστη τάση είναι ίση με  $13,387 \text{ N/mm}^2$  και παρατηρείται στα σημεία στήριξης των ράβδων στις βάσεις τους, όπως ήταν αναμενόμενο.



Η τιμή αυτή θεωρείται πολύ μικρή συγκριτικά με το όριο αντοχής σε εφελκυσμό του υλικού των ράβδων, δηλαδή του Aluminium 1060 Alloy το οποίο είναι  $68,93 \text{ N/mm}^2$ .



Σχήμα 3.6: Τάσεις κατά von Mises

#### 3.1.2. Θερμική ανάλυση

##### ➤ Θεωρητικό μέρος

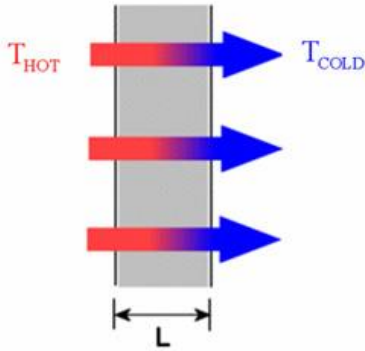
Υπάρχουν τρεις διακεκριμένοι μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας:

- 1) Μετάδοση θερμότητας με αγωγή,
- 2) Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή,
- 3) Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία.

Στις τεχνικές εφαρμογές μας ενδιαφέρει κυρίως το ποσό της θερμότητας η οποία μεταφέρεται ανά μονάδα χρόνου από ένα μέσο σε ένα άλλο.

Στο πρόβλημα της παρούσας εργασίας αντιμετωπίζουμε το φαινόμενο της μετάδοσης θερμότητας με αγωγή και με συναγωγή, γι' αυτό το λόγο θα δούμε νόμους που διέπουν μόνο αυτούς τους δυο μηχανισμούς και όχι την μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία.

- 1) Έτσι, για τη μετάδοση θερμότητας με αγωγή, η οποία συμβαίνει κυρίως στα στερεά ισχύει ο νόμος του Fourier (Σχήμα 3.7)



$$Q_{\text{CONDUCTION}} = K A (T_{\text{HOT}} - T_{\text{COLD}}) / L$$

Όπου

L: πάχος τοιχώματος

( $T_{\text{HOT}} - T_{\text{COLD}}$ ): θερμοκρασιακή διαφορά

A: εμβαδό επιφάνειας τοιχώματος

K: συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

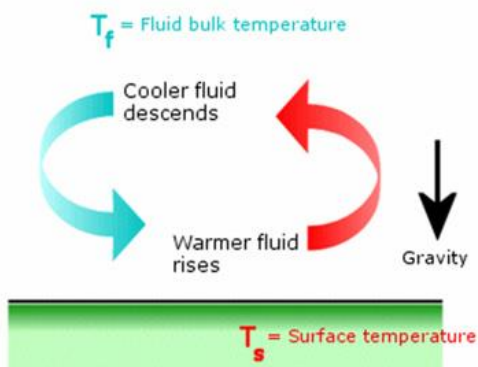
Q: το ποσό της θερμότητας, το οποίο ανά μονάδα χρόνου διαπερνά την επιφάνεια εμβαδού

A του τοιχώματος λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς. [W]

Σχήμα 3.7: Νόμος του Fourier για την περίπτωση μετάδοσης θερμότητας με αγωγή [33]

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας έχει διαστάσεις W/mK. Το μέγεθος του, εξαρτάται από τη φύση του υλικού και από τη θερμοκρασία του. [34]

- 2) Για τον υπολογισμό της θερμορροής από το ρευστό προς το τοίχωμα με συναγωγή χρησιμοποιείται η εξίσωση του Newton, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8.



Όπου

$T_s$ = θερμοκρασία στερεού

$T_f$ = θερμοκρασία ρευστού

A= εμβαδό επιφάνειας τοιχώματος

h=συντελεστής συναγωγής [W/m<sup>2</sup>K]

$$Q_{\text{CONVECTION}} = h A (T_s - T_f)$$

Σχήμα 3.8: Εξίσωση του Newton για την περίπτωση μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή [33]

Ο συντελεστής συναγωγής, εκτός από τις φυσικές ιδιότητες του ρευστού (αγωγιμότητα, θερμοχωρητικότητα, πυκνότητα), εξαρτάται από το είδος του πεδίου ροής, τη μορφή του τοιχώματος, την ποιότητα της επιφάνειας του και άλλα παρόμοια. Αναλυτικός υπολογισμός του γίνεται μόνο σε λίγες απλές περιπτώσεις, ενώ τις περισσότερες φορές προσδιορίζεται πειραματικά. Οι τιμές του συντελεστή συναγωγής καλύπτουν ένα ευρύ πεδίο. Αναφέρουμε ενδεικτικά ότι ο συντελεστής συναγωγής του αέρα μέσα σε ένα σπίτι δίνεται (από τον κανονισμό θερμομόνωσης)  $8 \text{ W/m}^2\text{K}$ . [34]. Στο σχήμα 3.9 φαίνεται ένας πίνακας από την Solidworks Corporation, στον οποίο υπάρχουν πειραματικές τιμές του συντελεστή συναγωγής για διάφορα ρευστά για διαφορετικούς τύπους συναγωγής.

Medium	Heat Transfer Coefficient h ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ )
Air (natural convection)	5-25
Air/superheated steam (forced convection)	20-300
Oil (forced convection)	60-1800
Water (forced convection)	300-6000
Water (boiling)	3000-60,000
Steam (condensing)	6000-120,000

Σχήμα 3.9: Πειραματικές τιμές του συντελεστή συναγωγής [33]

Το περύγιο είναι περίπτωση σύζευξης αγωγής και συναγωγής: Η θερμότητα μεταφέρεται από το βασικό σώμα (πλάκα, σωλήνας κ.λ.π.) με αγωγή στο περύγιο και αποδίδεται από το περύγιο με συναγωγή στο ρευστό. Ο συντελεστής συναγωγής θα λαμβάνεται γνωστός, σταθερός σε όλη την επιφάνεια του περυγίου. Στην πραγματικότητα η σταθερότητα δεν ισχύει, όπως έχει αποδειχθεί πειραματικά. Έτσι, ο υπολογισμός μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικός. [34]

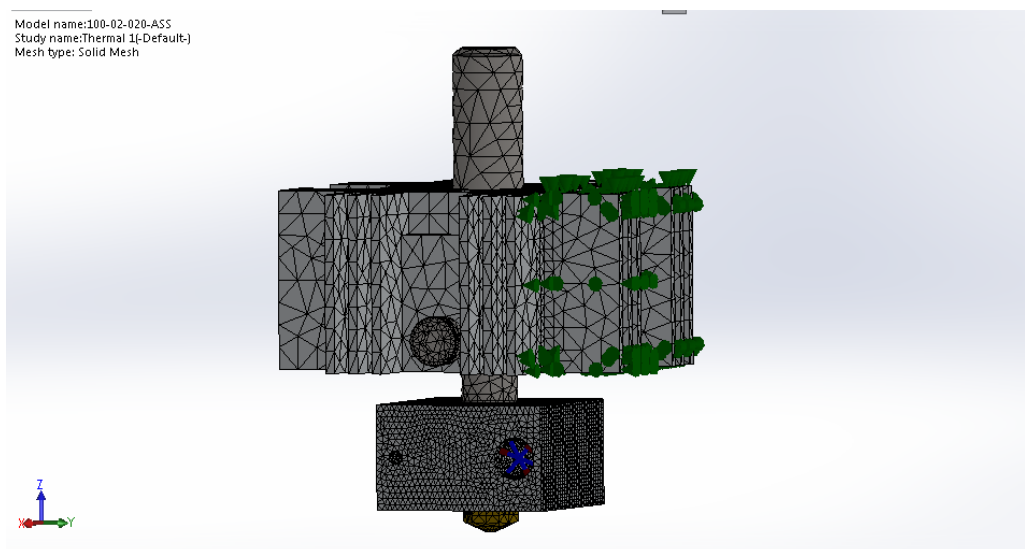
➤ Πρακτικό μέρος

Στην περίπτωση της κεφαλής εκτύπωσης συναντούμε δύο μηχανισμούς μετάδοσης θερμότητας: με αγωγή και με συναγωγή.

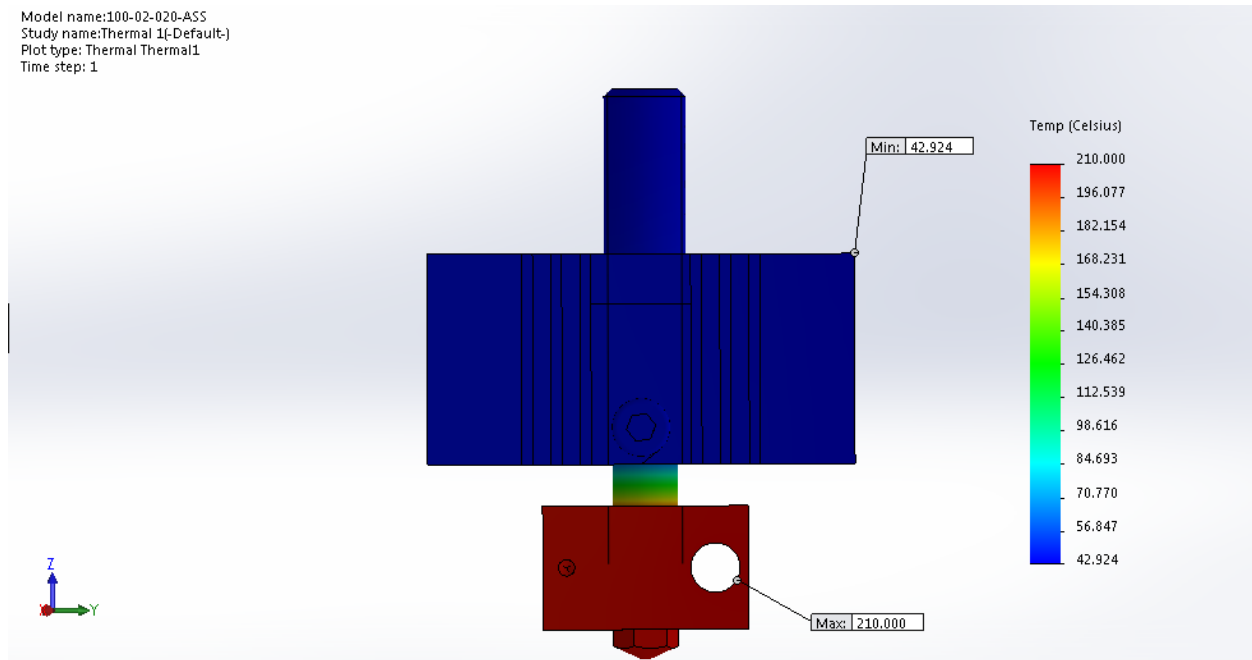
Μετάδοση θερμότητας με αγωγή υπάρχει στα στερεά μέρη που βρίσκονται σε επαφή ενώ μετάδοση θερμότητας με συναγωγή υπάρχει λόγω της επαφής των στερεών μερών με τον αέρα που τα περιβάλλει. Στην περίπτωση της μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή διακρίνονται δύο περιπτώσεις, η φυσική συναγωγή και η εξαναγκασμένη συναγωγή.

Με φυσική συναγωγή μεταδίδεται η θερμότητα σε όλα τα μέρη που εκτίθενται στον αέρα που περικλείει την κεφαλή εκτός από αυτά που ψύχονται από το ανεμιστηράκι. Στα μέρη που ψύχονται από το ανεμιστηράκι συνταντάται η μετάδοση θερμότητας με εξαναγκασμένη συναγωγή. Όπως είδαμε και στο θεωρητικό μέρος, ο συντελεστής συναγωγής για τον αέρα μέσα σε ένα σπίτι δίνεται  $8 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Για την εξαναγκασμένη συναγωγή σύμφωνα με πειραματικούς πίνακες ο συντελεστής συναγωγής για μέτρια ταχύτητα ροής του αέρα δίνεται  $100 \text{ W/m}^2\text{K}$ . [35]

Η θερμική ανάλυση πραγματοποιείται με την παραδοχή της μόνιμης κατάστασης (steady state) δηλαδή οι μεταβλητές της είναι ανεξάρτητες από τον χρόνο. Η κεφαλή εκτύπωσης λειτουργεί σε συνθήκες δωματίου, δηλαδή η θερμοκρασία περιβάλλοντος (ambient temperature) θεωρείται  $20^\circ\text{C}$ , ενώ η θερμοκρασία λειτουργίας στην οποία επιτυγχάνεται σταθεροποίηση είναι  $210^\circ\text{C}$ . Αφού δηλωθούν τα υλικά των στερεών και η σύνδεση με επαφή μεταξύ τους (Global contact:bonded), δηλώνουμε τα θερμικά φορτία. Αυτά είναι η θερμοκρασία στο κάτω μέρος της κεφαλής (μπλε βέλη), η φυσική συναγωγή στις επιφάνειες που είναι εκτεθειμένες στον αέρα και η εξαναγκασμένη συναγωγή (πράσινα βέλη) στα πτερύγια της των ψυκτρών τα οποία ψύχει το ανεμιστηράκι. Έπειτα, δημιουργήθηκε το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων (mesh density: fine) όπως φαίνεται στο [σχήμα 3.10](#) και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η επίλυση της θερμικού προβλήματος ([σχήμα 3.11](#)).



*Σχήμα 3.10: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων, εξαναγκασμένη συναγωγή και θερμοκρασία.*



*Σχήμα 3.11: Αποτελέσματα θερμικής ανάλυσης-κατανομή θερμοκρασίας*

Τα αποτελέσματα δείχνουν πως η συγκέντρωση των υψηλών θερμοκρασιών γίνεται γύρω από το σημείο θέρμανσης και δεν αναπτύσσονται σε υψηλότερα σημεία, γεγονός θετικό διότι έτσι επιτυγχάνεται η καλή εξώθηση του υλικού. Σημαντικότερο ρόλο στην επίτευξη των χαμηλών θερμοκρασιών στα υψηλότερα σημεία, έπαιξε η ψύξη από το ανεμιστηράκι.

### 3.2. Σχεδίαση και κατασκευή

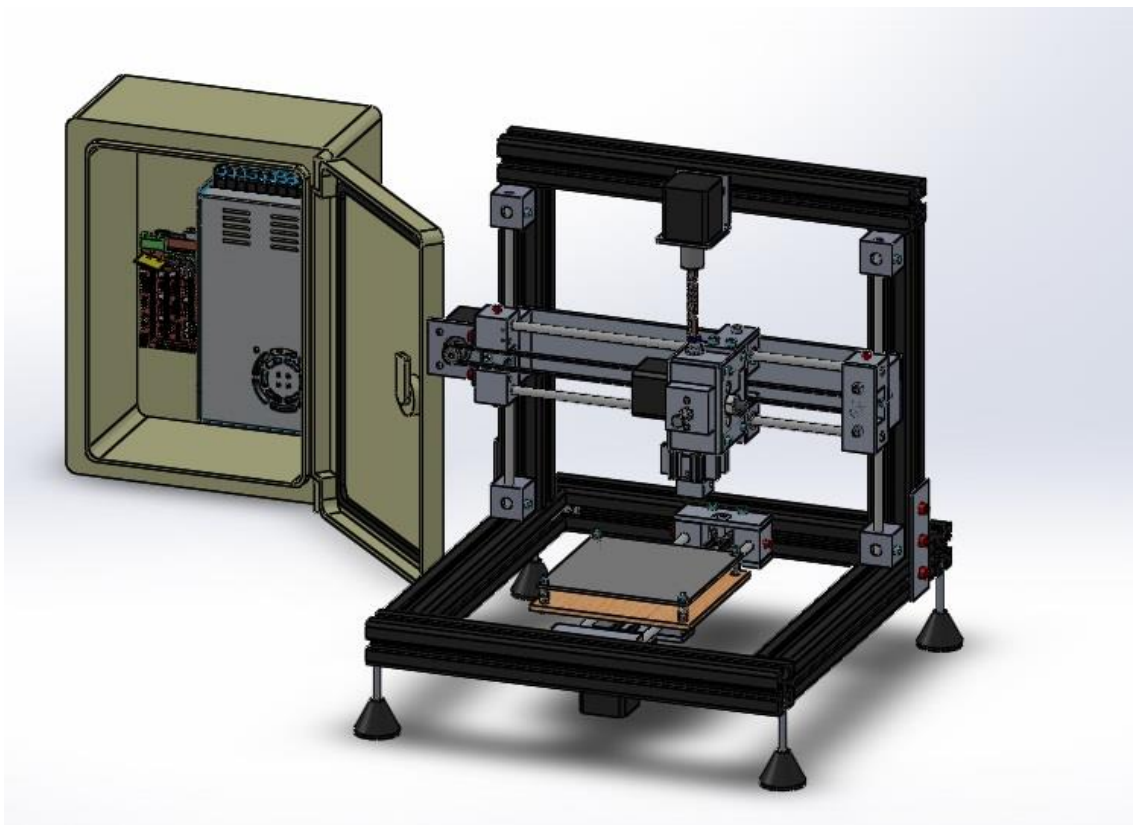
Η σχεδίαση του τρισδιάστατου εκτυπωτή ήταν από τα δυσκολότερα μέρη της παρούσας εργασίας, διότι απαιτήθηκε αρκετός χρόνος πρώτα από όλα για την επιλογή και την εύρεση των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν και δεύτερον για την αποφυγή λαθών που σαν συνέπεια θα είχαν την μη λειτουργικότητα του εκτυπωτή ή την δυσκολία του μονταρίσματος.

Η κατασκευή των αντικειμένων συγκριτικά με την σχεδίαση παρουσιάζει μικρές αποκλίσεις όπως είναι φυσιολογικό οι οποίες δεν παρουσίασαν προβλήματα κατά την διάρκεια του μονταρίσματος.

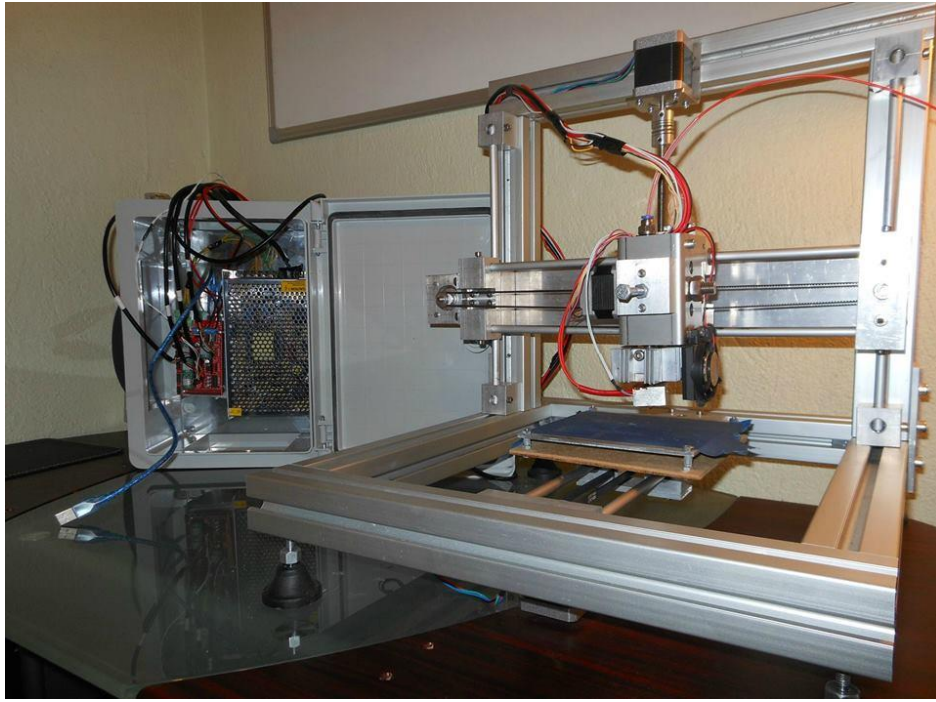
Για λόγους συντομίας ο τρισδιάστατος εκτυπωτής θα αναφέρεται ως FDM-100.

Αναλυτικά στοιχεία σχετικά με τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν υπάρχουν στο Παράρτημα Α.

Στις παρακάτω εικόνες βλέπουμε το ολοκληρωμένο σχέδιο του FDM-100 και την αντίστοιχη φωτογραφία.



Σχήμα 3.12: FDM-100 (full assembly)



*Σχήμα 3.13: FDM-100*

### 3.2.1. Μηχανολογικό μέρος

Αρχικά, σχεδιάστηκε το πλαίσιο του FDM-100, από προφίλ αλουμινίου τετραγωνικής διατομής 40X40mm, με αυλάκια στα οποία τοποθετούνται ειδικά περικόχλια τα οποία εξυπηρετούν στο να προσαρμοστούν επάνω στα προφίλ διάφορα αντικείμενα. Η σύνδεση των προφίλ αλουμινίου μεταξύ τους, έγινε χρησιμοποιώντας γωνίες κρυφής σύνδεσης.



*Σχήμα 3.14: Προφίλ 40X40mm*



*Σχήμα 3.15: Γωνία κρυφής σύνδεσης*



*Σχήμα 3.16: Σχέδιο πλαισίου*

Για την κίνηση στους άξονες X και Y επιλέχθηκε ιμαντοκίνηση λόγω της ανάγκης της μεγάλης ταχύτητας. Χρησιμοποιήθηκαν οι ιμάντες χρονισμού “Gates PowerGrip GT-2 Belt Drives”. Συγκεκριμένα για τον άξονα X χρησιμοποιήθηκε ο GT2 με μήκος 810mm και για τον άξονα Y ο GT2 με μήκος 600mm. Επίσης χρησιμοποιήθηκε τροχαλία GT2 με 20 δόντια.

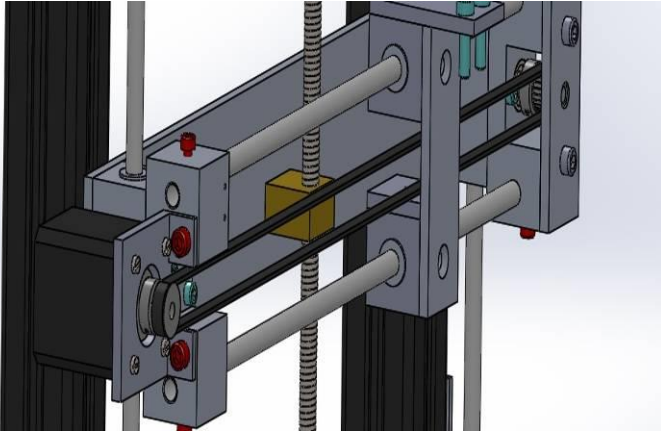
Οι ιμάντες χρονισμού είναι ικανοί για μεταφορά μεγάλων ροπών και αντέχουν σε μεγάλες επιταχύνσεις. Αυτό που κάνει ιδιαίτερους τους GT2 είναι το ιδιαίτερο καμπυλόγραμμο σχήμα του δοντιού τους, το οποίο προσδίδει μεγαλύτερη ακρίβεια κίνησης και καλύτερη επαναληψιμότητα συγκριτικά με τους συμβατικούς τραπεζοειδείς ιμάντες. Επίσης, λόγω του σχήματος του δοντιού τους αποφεύγεται η συγκέντρωση τάσεων με ως αποτέλεσμα την αύξηση της διάρκειας ζωής τους. [36]

Σε κάθε άξονα υπάρχουν δύο τροχαλίες, η μία είναι βιδωμένη πάνω στον άξονα του βηματικού κινητήρα και η άλλη σε έναν άξονα Φ6mm, ο οποίος συγρτείται στα άκρα του από δύο ένσφαιρα ρουλεμάν με τύπο 625ZZ, τα οποία διαθέτουν εξωτερικά καλύμματα για την προστασία από την σκόνη.

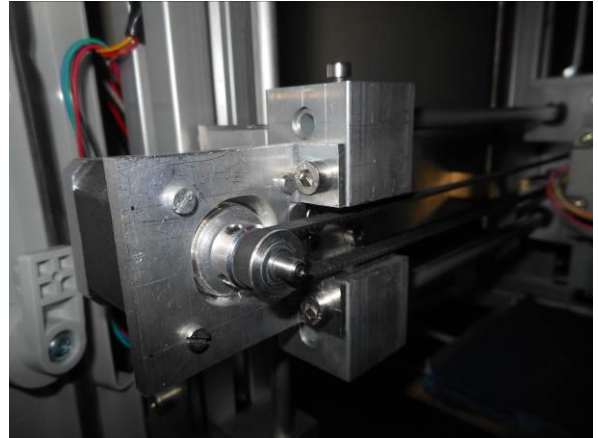
Οι οδηγόι ράβδοι που χρησιμοποιήθηκαν είναι σωλήνες στρογγυλής διατομής Φ8X1 από ανοδιωμένο αλουμίνιο. Τα κουζινέτα που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτολίπαντα δαχτυλίδια με ειδική επίστρωση PTFE στην εσωτερική τους επιφάνεια.

Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται σχέδια και φωτογραφίες από τις διατάξεις των αξόνων X και Y.





. Σχήμα 3.17: Διάταξη άξονα X

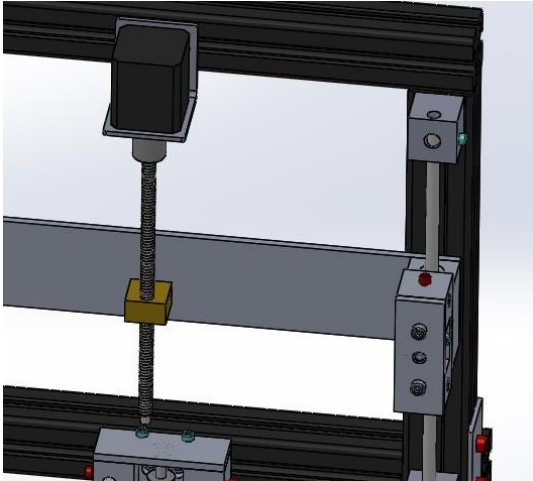


Σχήμα 3.18 : Κινητήρας-τροχαλία άξονα X

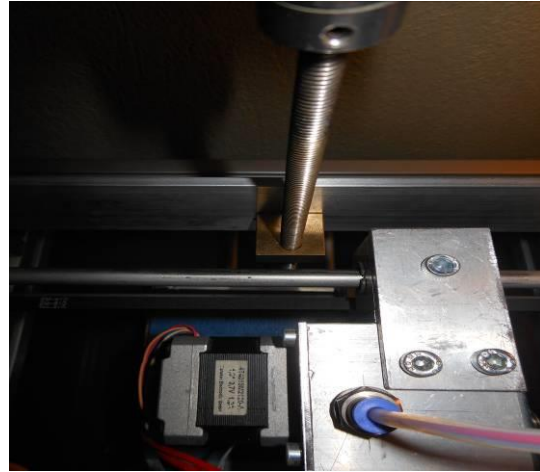


Σχήμα 3.19: Άξονας Y, οδηγοί ράβδοι, κουζινέτα

Ο άξονας Z είναι ο σημαντικότερος άξονας καθώς επηρεάζει άμεσα και καθοριστικά την ανάλυση και την ποιότητα εκτύπωσης του 3D εκτυπωτή. Δεν απαιτεί μεγάλη ταχύτητα καθώς κατά την διάρκεια της διεργασίας εκτελεί πολλές μικρές κινήσεις. Συνήθως αυτές οι κινήσεις είναι της τάξης από 0,1-0,3mm. Γι' αυτό το λόγο, χρησιμοποιήθηκε μετρικός κοχλία M8 και κατασκευάστηκε περικόχλιο από ορείχαλκο λόγω των καλών μηχανικών ιδιοτήτων του. Το ένα άκρο του κοχλία συνδέεται μέσω coupler με τον άξονα του βηματικού κινητήρα ενώ το άλλο είναι ελεύθερο. Ο coupler έχει ειδική κόψη ελατηρίου έτσι ώστε να είναι ελαστικός και να συνεργάζεται με τους άξονες ακόμα και αν δεν είναι ευθυγραμμισμένοι με ακρίβεια. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται το σχέδιο και η φωτογραφία από την κατασκευή του άξονα Z.



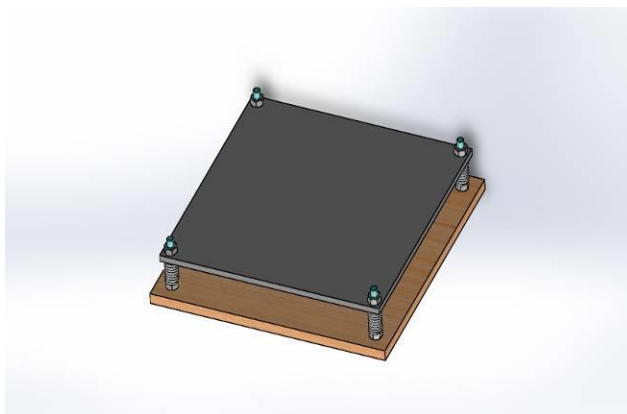
Σχήμα 3.20: Σχέδιο διάταξης άξονα Z



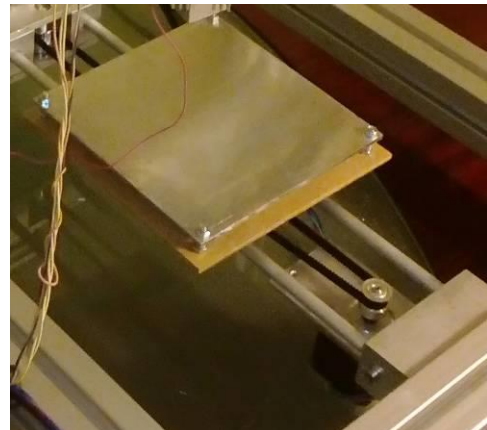
Σχήμα 3.21: Άξονας Z

Ένα από τα σημαντικότερα μέρη του 3D εκτυπωτή είναι το τραπέζι εκτύπωσης, το οποίο πρέπει να είναι «καλιμπραρισμένο» δηλαδή οριζόντιο. Κατασκευάστηκε με σύστημα ελατηρίων πίεσεως έτσι ώστε να ρυθμίζεται το ύψος των πλευρών του με σκοπό την οριζοντίωση του. Ξεσφίγγοντας τα πάνω περικόχλια, λόγω της πίεσης των ελατηρίων η μεταλλική πλάκα σηκώνεται, οπότε με την χρήση ενός αλφαδιού μπορούμε να πετύχουμε την οριζοντίωση του τραπεζιού.

Η κάτω επιφάνεια του τραπεζιού εκτύπωσης αποτελείται από MDF πάχους 5mm τετραγωνικού σχήματος διαστάσεων 140mmX140mm, ως πρόβλεψη για την περίπτωση μετατροπής του τραπεζιού από απλό σε θερμαινόμενο. Το MDF είναι κακός αγωγός της θερμότητας, οπότε είναι κατάλληλο για την προστασία των μηχανικών μερών που βρίσκονται κάτω από το τραπέζι εκτύπωσης, όπως για παράδειγμα είναι ο ιμάντας χρονισμού.



Σχήμα 3.22 : Σχέδιο τραπέζι εκτύπωσης



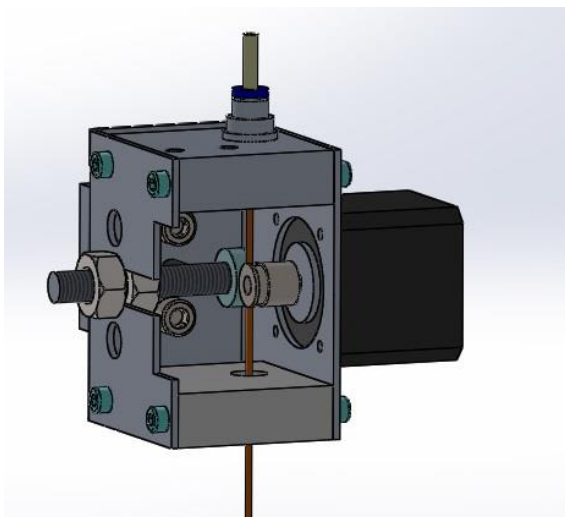
Σχήμα 3.23: Τραπέζι εκτύπωσης

Την πρώτη θέση στην λειτουργία του 3D εκτυπωτή κατέχει η κεφαλή εκτύπωσης, της οποίας η λειτουργία καθορίζει και την ποιότητα της εκτύπωσης. Ο συνδυασμός της ακριβούς τροφοδοσίας του υλικού και της σωστής κατανομής της θερμοκρασίας θα φέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Αποτελείται από δύο μέρη: το πάνω μέρος η αλλιώς τον εξωθητή (extruder) και το κάτω μέρος ή καυτό μέρος (hot end).

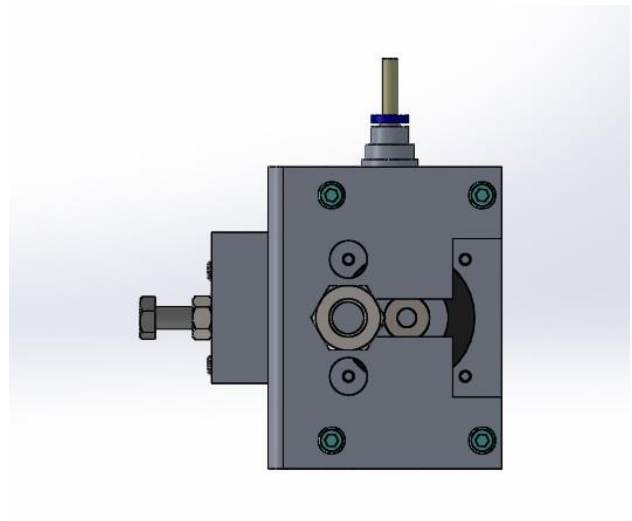
➤ Extruder

Η κύρια λειτουργία του extruder είναι να εξωθεί το νήμα του θερμοπλαστικού μέσα στον κορμό του hot end, με ακρίβεια. Για την επίτευξη της ζητούμενης ακρίβειας πρέπει να ρυθμίσουμε τα βήματα ανά χιλιοστό (steps per mm) του βηματικού κινητήρα. Ο υπολογισμός των steps per mm γίνεται στο κεφάλαιο 4.

Πάνω στον άξονα του βηματικού κινητήρα, βιδώνεται ένα ειδικά διαμορφωμένο γρανάζι, με το οποίο και σε συνδυασμό με ένα ρουλεμάν το οποίο πιέζει το νήμα πάνω στο οδοντωτό μέρος του γραναζιού, επιτυγχάνεται η εξώθηση. Η υπερβολική άσκηση πίεσης πάνω στο γρανάζι θα έχει ως αποτέλεσμα την δυσκολία της εξώθησης με συνέπεια την εμφάνιση ενός γνωστού προβλήματος του underfeeding, δηλαδή εισέρχεται μικρή έως καθόλου ποσότητα υλικού στο hot end. Με μια βίδα M6X45 ελέγχεται η πίεση που ασκείται στο νήμα. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται το μηχανολογικό σύστημα του extruder.



*Σχήμα 3.24: Ισομετρική όψη του extruder*

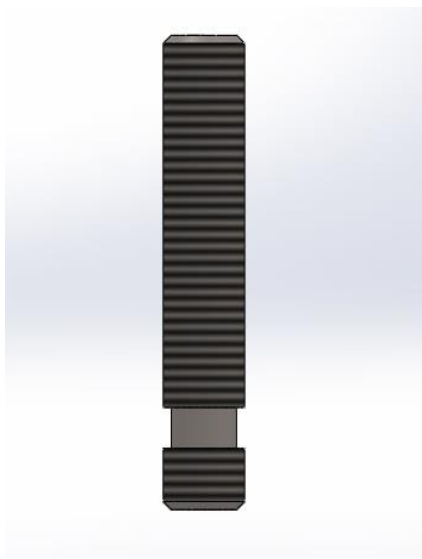


*Σχήμα 3.25: Πρόοψη του extruder*

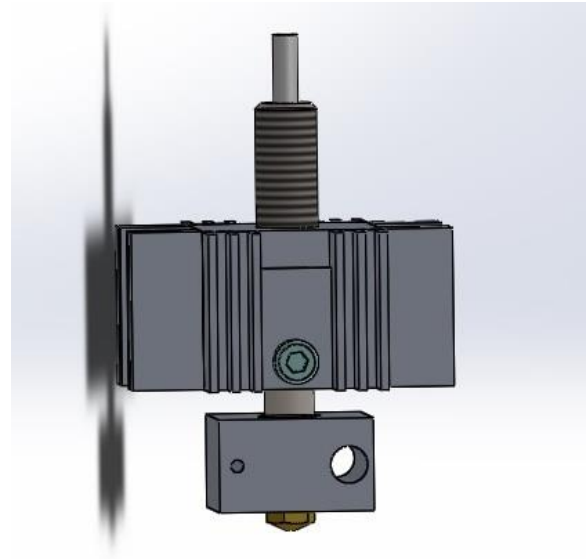
➤ Hot end

Το κάτω μέρος της κεφαλής (hot end), είναι το μέρος της κεφαλής εκτύπωσης το οποίο απαιτεί λεπτομερή μελέτη. Η γεωμετρία και τα υλικά από τα οποία αποτελείται καθορίζουν την λειτουργία του hot end. Αποτελείται από τον κορμό ο οποίος είναι μια ντίζα M10 απο ανοξείδωτο χάλυβα με διαμετρής οπή  $\Phi 4$ , εντός της οποίας τοποθετείται σωληνάκι PTFE εξωτερικής διαμέτρου  $\Phi 4$  και εσωτερικής  $\Phi 2$ . Το σωληνάκι από τεφλόν, χρησιμοποιείται για την αποτροπή της φραγής του αγωγού του κορμού, λόγω της ιδιότητας του PLA όταν βρίσκεται σε κατάσταση τήξης να προσκολλάται στον ανοξείδωτο χάλυβα. Έτσι, το νήμα του υλικού ολισθαίνει χωρίς μεγάλη αντίσταση διότι το PTFE έχει μικρό συντελεστή τριβής. Επιπλέον, ο κορμός έχει τριβιστεί, μειώνοντας την διάμετρο του σε ένα σημείο, δημιουργώντας ένα φρένο μεταφοράς της θερμότητας.

Όπως φαίνεται και στα σχέδια παρακάτω το χαμηλό μέρος του κορμού βιδώνεται σε ένα αλουμινένιο τετράγωνο (heater block), το οποίο φέρει την κεραμική αντίσταση, το αισθητήριο μέτρησης θερμοκρασίας (thermistor) και το ορειχάλκινο ακροφύσιο (nozzle). Στο επάνω μέρος του κορμού βιδώνεται σύστημα ψυκτρών από αλουμίνιο για να μεταδίδεται ευκολότερα η θερμοκρασία στον αέρα, έτσι ώστε να διατηρείται η μέγιστη θερμοκρασία όσο πιο κοντά γίνεται στο heater block που είναι και ο στόχος της μελέτης της κεφαλής εκτύπωσης, βλέπε κεφάλαιο 3.1.

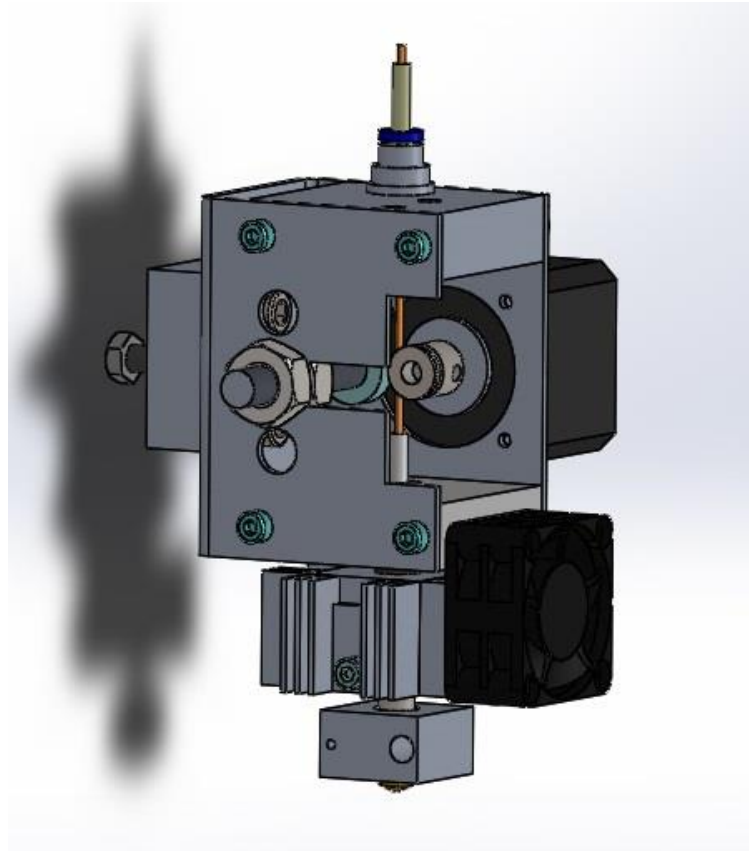


Σχήμα 3.26: Κορμός hot end



Σχήμα 3.27: Hot end

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το ολοκληρωμένο σχέδιο της κεφαλής αποτελούμενο και από δύο παραπάνω μέρη.



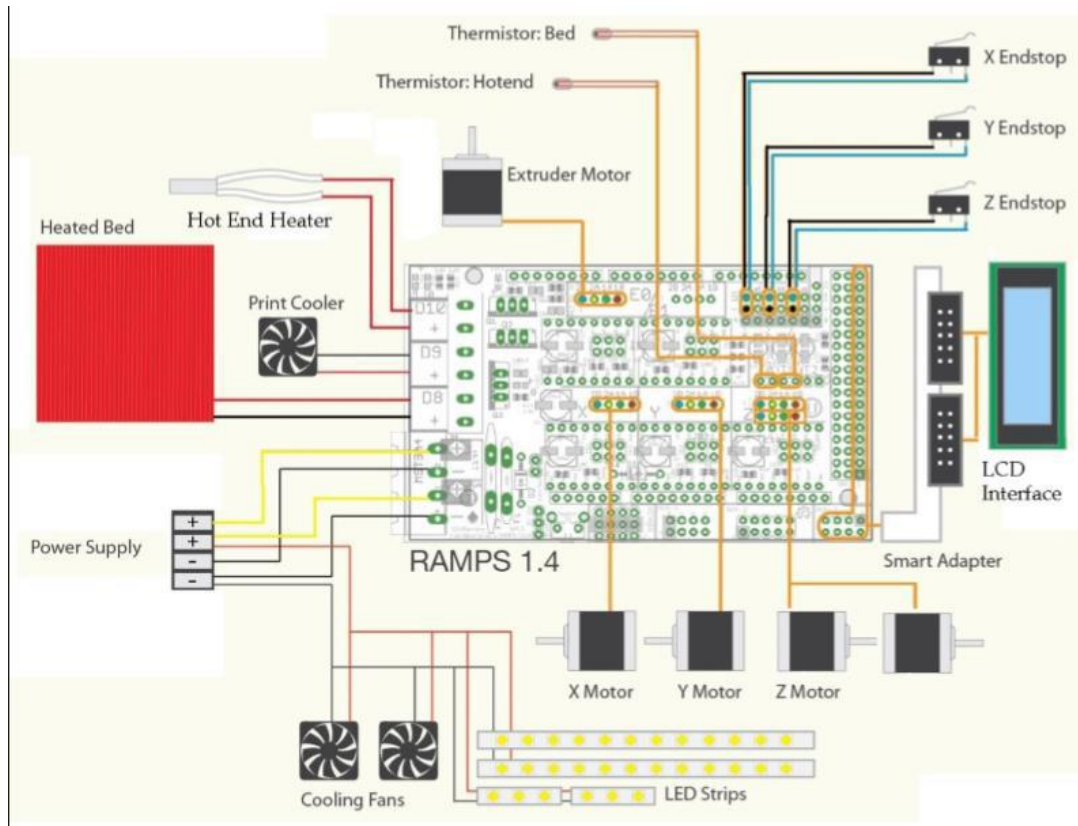
*Σχήμα 3.29: Κεφαλή εκτύπωσης*

### **3.2.2. Ηλεκτρολογικό μέρος**

Η σχεδίαση και η δημιουργία του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού έγινε με την χρήση ηλεκτρονικών «ανοιχτού κώδικα», συγκεκριμένα της ηλεκτρονικής πλακέτας arduino mega 2560,. Το Arduino, μπορεί να αλληλεπιδρά με το περιβάλλον, κάνοντας λήψη σημάτων μέσα από μια ποικιλία αισθητήρων. Τα έργα που βασίζονται σε αυτόν τον μικροελεγκτή, μπορούν να είναι αυτόνομα ή μπορούν να επικοινωνούν με το λογισμικό που τρέχει σε έναν υπολογιστή. [37] Η μονάδα ελέγχου που χρησιμοποιήθηκε για αυτόν τον εκτυπωτή είναι η RAMPS. Το όνομα RAMPS είναι τα αρχικά από τις λέξεις (RepRap Arduino Mega Pololu Shield). Η RAMPS είναι σχεδιασμένη για να ταιριάζει στο σύνολο των ηλεκτρονικών που απαιτούνται για έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή RepRap σε ένα μικρό πακέτο για χαμηλό κόστος. Για να πάρει η πλακέτα την τελική της μορφή τοποθετείται πάνω στην πλακέτα του Arduino mega.

- Συνδεσμολογία RAMPS

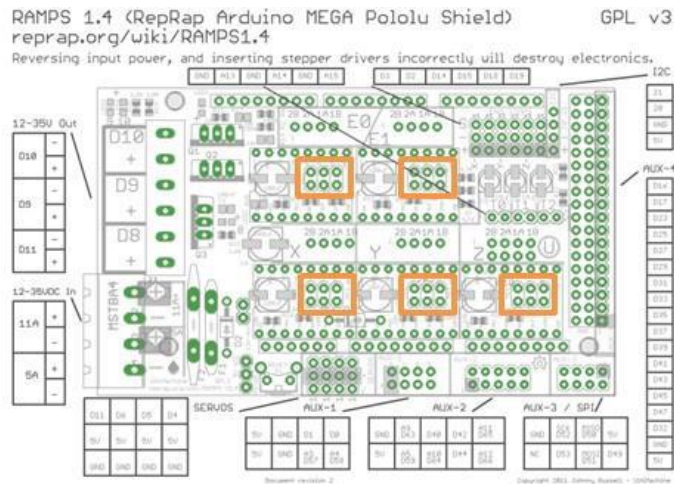
Το γενικό σχέδιο συνδεσμολογίας είναι αυτό που φαίνεται στο σχήμα 3.30



Σχήμα 3.30: Συνδεσμολογία της RAMPS [38]

- Jumpers

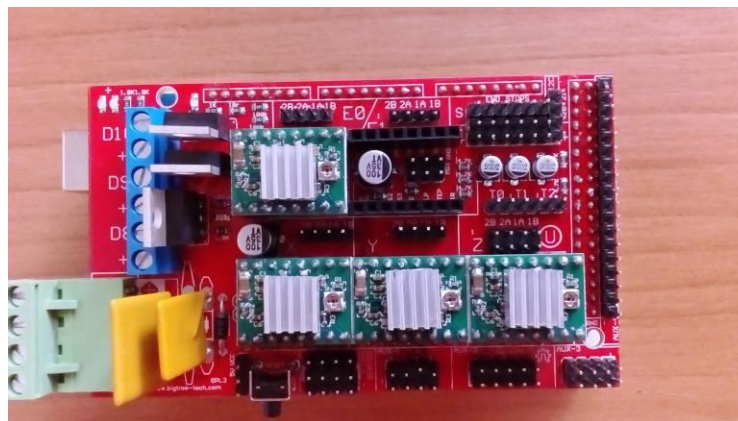
Στην ηλεκτρονική και συγκεκριμένα στα ηλεκτρονικά υπολογιστών, jumper είναι ένας αγωγός μικρού μήκους που χρησιμοποιείται για να κλείσει, να ανοίξει ή να παρακάμψει τμήμα ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος. [39] Στο ηλεκτρονικό μέρος του FDM-100, χρησιμοποιούνται ώστε να ρυθμίσουμε τον μικρόβηματισμό (micro stepping) των οδηγών (drivers) των βηματικών κινητήρων. Για τη μέγιστη ακρίβεια κίνησης των βηματικών κινητήρων, δηλαδή μικροβηματισμός (1/16), τοποθετούνται 3 jumpers σε κάθε περιοχή που φαίνεται παρακάτω στο σχήμα 3.31.



Σχήμα 3.31: Τοποθέτηση jumper [38]

- Οδηγοί κινητήρων (drivers)

Την οδήγηση των βηματικών κινητήρων αναλαμβάνουν οι οδηγοί rololu A4988, οι οποίοι τοποθετούνται στις ειδικές υποδοχές της RAMPS και πάνω στο chip τους, κολλούνται με ειδική αγωγιμη κόλλα τετράγωνες ψύκτρες για την απαγωγή της θερμότητας στο περιβάλλον, όπως φαίνεται στο [σχήμα 3.32](#). Περισσότερα στοιχεία σχετικά με τους drivers, υπάρχουν στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α'.



Σχήμα 3.32: Drivers και ψύκτρες

- Βηματικοί κινητήρες (stepper motors)

Οι βηματικοί κινητήρες είναι υπεύθυνοι για την κίνηση στους τρεις άξονες X,Y και Z και για την εξώθηση του υλικού. Διαθέτουν τέσσερα καλώδια, δηλαδή δύο ζεύγη τα οποία μπορούμε να τα βρούμε είτε με την βοήθεια του πολυμέτρου είτε αν ενώσουμε δυο καλώδια μεταξύ τους και αυτά δυσκολεύουν την περιστροφή του άξονα του κινητήρα. Για την αποφυγή συγκολλήσεων με καλάι, χρησιμοποιήθηκαν ειδικά συνδετικά που κάνουν την συνδεσμολογία ευκολότερη και ασφαλέστερη. ([σχήμα 3.33](#))



Σχήμα 3.33: Σύνδεση βηματικών κινητήρων στην RAMPS με τα ειδικά συνδετικά.

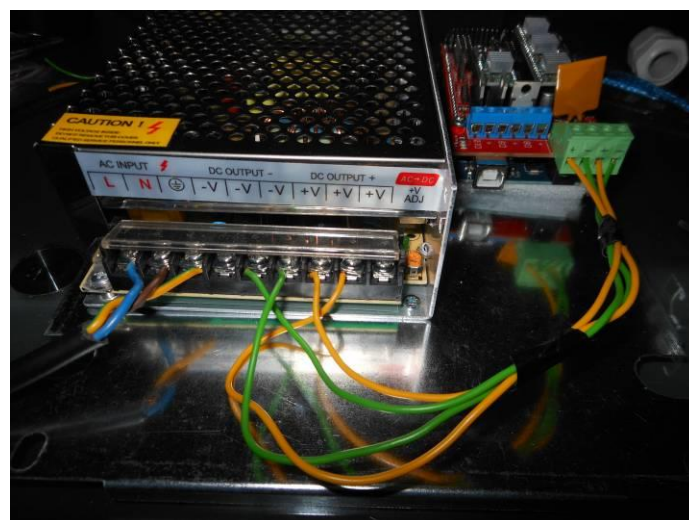
- Αντίσταση, αισθητήριο θερμοκρασίας και ανεμιστήρας ψύξης.

Η αντίσταση της κεφαλής (hot end heater), το αισθητήριο θερμοκρασίας (thermistor) και ο ανεμιστήρας ψύξης (cooling fan), συνδέονται όπως φαίνεται στο σχήμα 3.30.

- Τροφοδοσία

Η τροφοδοσία της arduino γίνεται από το καλώδιο usb που συνδέεται στη θύρα του υπολογιστή. Η εξωτερική τροφοδοσία της πλακέτας δεν χρησιμοποιείται.

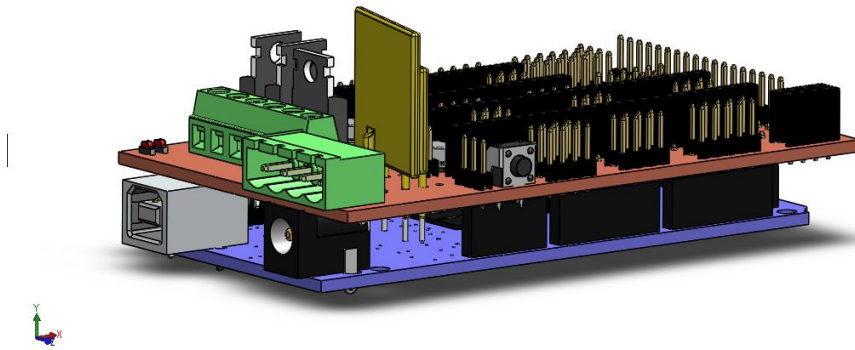
Για την τροφοδοσία της RAMPS, επίσης, χρησιμοποιήθηκε τροφοδοτικό τάσης εξόδου 12V και ρεύματος 20A. Στην παρακάτω φαίνεται η συνδεσμολογία τροφοδοτικού-RAMPS.



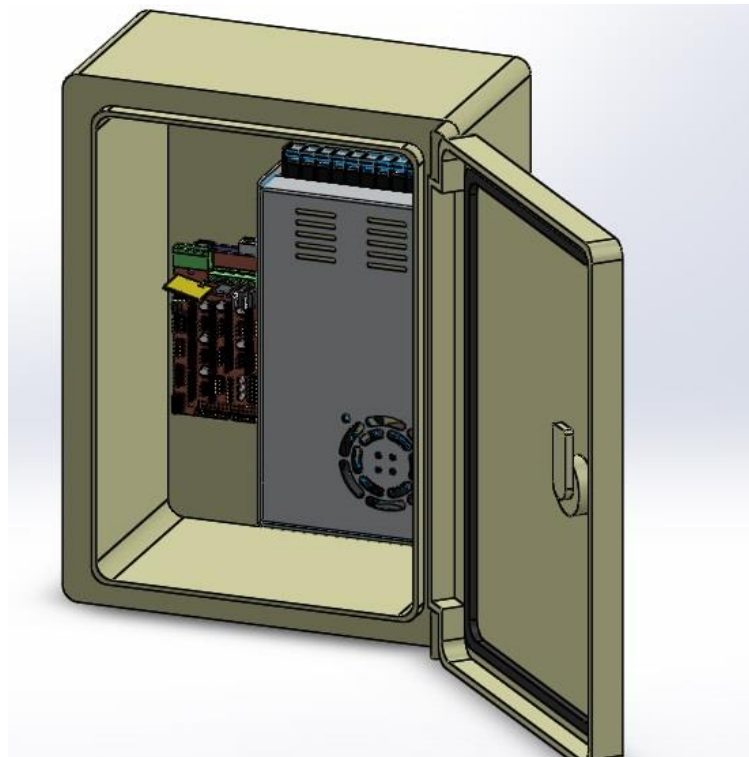
Σχήμα 3.34: Συνδεσμολογία τροφοδοτικού-RAMPS



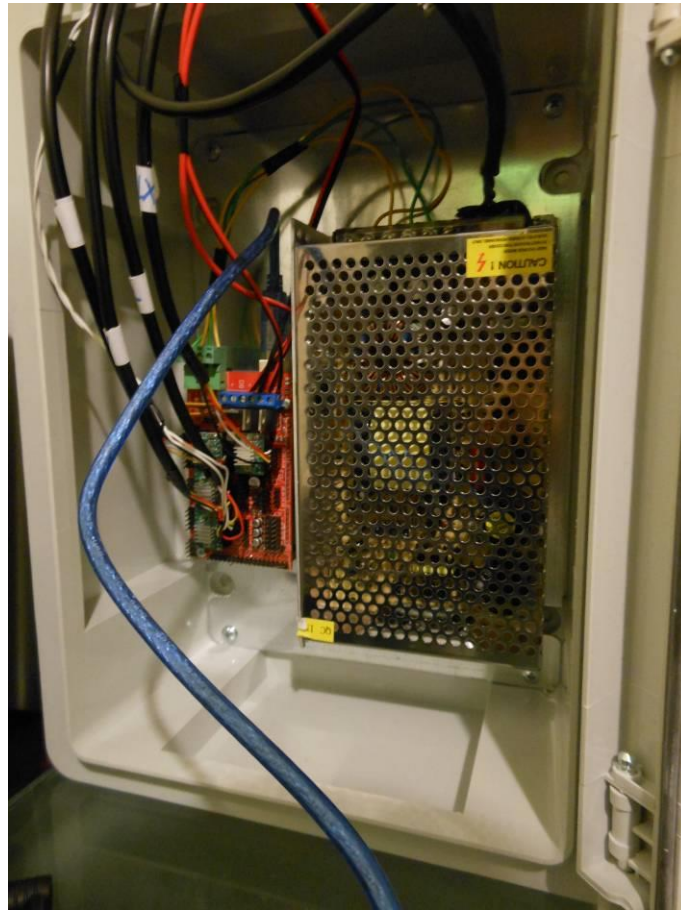
Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζονται τα τρισιδιάστατα σχέδια των ηλεκτρονικών πλακετών (σχήμα 3.35), του συνοπτικού σχεδίου του ηλεκτρολογικού πίνακα (σχήμα 3.36) και η φωτογραφία του (σχήμα 3.37).



*Σχήμα 3.35: Assembly Arduino και RAMPS*



*Σχήμα 3.36: Assembly ηλεκτρολογικού πίνακα*



Σχήμα 3.37: Ηλεκτρολογικός πίνακας του FDM-100

#### **4. Ρύθμιση ηλεκτρονικών και προγραμματισμός του 3D εκτυπωτή**

Την εύρυθμη λειτουργία ενός ρομποτικού συστήματος όπου απαιτούνται ακριβής κίνηση και έλεγχος διάφορων παραμέτρων όπως για παράδειγμα είναι η θερμοκρασία, την εξασφαλίζει η σωστή ρύθμιση του ηλεκτρονικού εξοπλισμού δηλαδή των βηματικών ή σερβοκινητήρων, των διάφορων αισθητηρίων που υπάρχουν, και ο κατάλληλος προγραμματισμός του επεξεργαστή του συστήματος.

Στην περίπτωση του τρισδιάστατου εκτυπωτή FDM-100 ρυθμίστηκαν οι βηματικοί κινητήρες με γωνία βήματος  $1,8^\circ$  και ο αισθητήρας θερμοκρασίας για την σταθεροποίηση της τιμής της θερμοκρασίας στην επιθυμητή.

Ο υπολογισμός που απαιτείται για κίνηση με ακρίβεια είναι των βημάτων/χιλιοστό δηλαδή των steps/mm του κινητήρα. Αυτός ο υπολογισμός λαμβάνει υπόψιν του, τον τρόπο μετάδοσης της κίνησης και τα στοιχεία μηχανών που συμμετέχουν, τα βήματα ανα μία πλήρους περιστροφή του κινητήρα (steps/revolution) και το microstepping των drivers των κινητήρων.

##### **4.1. Υπολογισμοί ηλεκτρονικών**

- Για τους άξονες X και Y οι οποίοι κινούν την κεφαλή και το τραπέζι εκτύπωσης αντίστοιχα, χρησιμοποιείται ιμαντοκίνηση.

Ο τύπος για τον υπολογισμό των steps/mm είναι:

$$\frac{\text{steps}}{\text{mm}} = \frac{\text{motor steps per revolution} \times \text{driver microstepping}}{\text{belt pitch} \times \text{pulley number of teeth}}$$

- Τα βήματα του κινητήρα για μια πλήρης περιστροφή είναι:

Ένα βήμα του κινητήρα περιστρέφει τον άξονα του κατά  $1,8^\circ$ . Άρα, για μια περιστροφή  $360^\circ$ , τα βήματα είναι 200.

- Ο stepper driver A4988 κάθε βήμα το διαιρεί σε 16. Δηλαδή driver microstepping=1/16.
- Το βήμα του ιμάντα χρονισμού είναι 2.
- Ο αριθμός των δοντιών της τροχαλίας είναι 20.

Άρα τα βήματα που απαιτούνται για κίνηση 1 χιλιοστού είναι

$$\frac{\text{steps}}{\text{mm}} = \frac{200 \times 16}{2 \times 20} = 80$$

- Για την κίνηση στον άξονα Z χρησιμοποιήθηκε άμεση μετάδοση κίνησης από τον κινητήρα σε έναν κοχλία M8X1,25.

Ο τύπος για τον υπολογισμό των steps/mm είναι:

$$\frac{\text{steps}}{\text{mm}} = \frac{\text{motor steps per revolution} \times \text{driver microstepping}}{\text{gear ratio} \times \text{leadscrew pitch}}$$

- Τα βήματα του κινητήρα για μια πλήρης περιστροφή είναι ίδια με των άλλων κινητήρων δηλαδή 200.
- Driver microstepping=1/16
- Σχέση μετάδοσης (gear ratio)=1/1
- Βήμα μετρικού κοχλία M8=1,25

Άρα για κίνηση ενός χιλιοστού τα βήματα που απαιτούνται είναι

$$\frac{\text{steps}}{\text{mm}} = \frac{200 \times 16}{1 \times 1,25} = 2560$$

- Για την τροφοδοσία του νήματος από τον τροφοδότη (extruder) στο κάτω μέρος της κεφαλής (hot end) χρησιμοποιήθηκε άμεση μετάδοση κίνησης μέσω του συστήματος που εξετάστηκε στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο.

Ο τύπος για τον υπολογισμό των steps/mm είναι:

$$\frac{\text{steps}}{\text{mm}} = \frac{\text{motor steps per revolution} \times \text{driver microstepping}}{\text{gear ratio} \times \text{hob effective diameter} \times \pi}$$

- Τα βήματα του κινητήρα για μια πλήρης περιστροφή είναι 200.
- Driver microstepping=1/16.
- Gear ratio=1/1
- Hob effective diameter=10,5mm ([www.reprap.org/wiki/Drive-gear](http://www.reprap.org/wiki/Drive-gear)) είναι η διάμετρος του γραναζωτού της τροχαλίας MK7 που είναι πάνω στον άξονα του κινητήρα.

Άρα, για τροφοδοσία 1 χιλιοστού του νήματος τα βήματα που απαιτούνται είναι

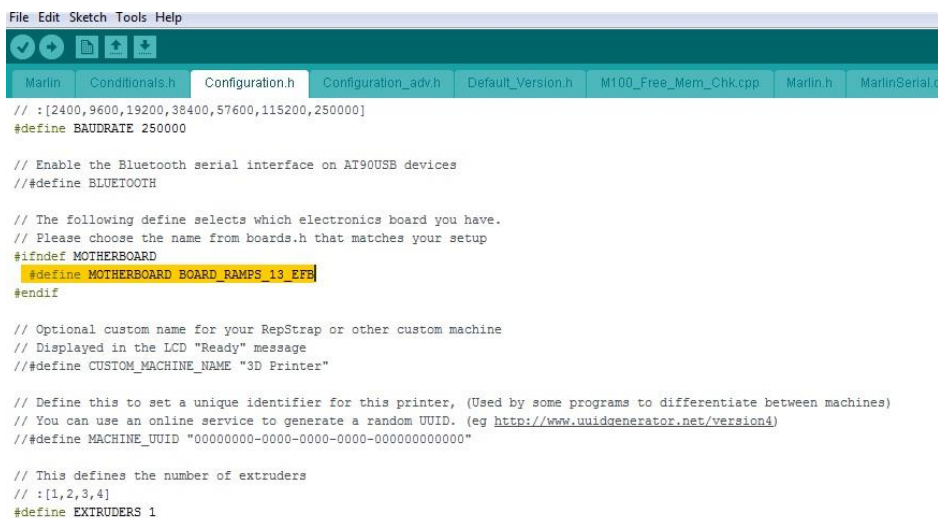
$$\frac{\text{steps}}{\text{mm}} = \frac{200 \times 16}{1 \times 10,5 \times \pi} = 97$$

## 4.2. Firmware

Με τον όρο firmware νοείται το λογισμικό που έχει μια ηλεκτρονική συσκευή, το οποίο δημιουργείται από τον κατασκευαστή και δεν μπορεί να έχει πρόσβαση ο χρήστης σε αυτό, εκτός από τις συσκευές τύπου arduino που είναι συσκευές ανοιχτού κώδικα (open source).

Το firmware του FDM-100 ονομάζεται “Marlin” και η λήψη του έγινε από την ιστοσελίδα [www.github.com](http://www.github.com). Για την πρόσβαση σε αυτό και για την επεξεργασία του απαιτείται το ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης “Arduino IDE”. Μόλις ολοκληρωθεί η λήψη και η εγκατάσταση του “Arduino IDE”, πρέπει να γίνουν οι πρώτες και βασικές ρυθμίσεις, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η επικοινωνία μεταξύ firmware και hardware.

- Στην καρτέλα “Tools” στο πεδίο “Board” επιλέγεται η “Arduino/Genuino Mega or Mega 2560”, στο πεδίο “Processor” επιλέγεται ο “ATmega2560” και στο πεδίο “Port” επιλέγεται η θύρα COM στην οποία έχει συνδεθεί το καλώδιο usb της arduino.
- Ανοίγουμε το “Marlin” με το Arduino IDE για να ρυθμίσουμε τις σημαντικότερες παραμέτρους. Όλες οι ρυθμίσεις θα γίνουν στην καρτέλα “Configuration.h”. Αρχικά ρυθμίζουμε το “BAUDRATE” σε 250000 ή 115200. Η τιμή αυτή καθορίζει την ταχύτητα επικοινωνίας μεταξύ του host software κα του 3D εκτυπωτή. Πρέπει η τιμή αυτή να είναι ίδια και στις ρυθμίσεις του host software.
- Από την λίστα στην καρτέλα “boards.h”, διαλέγουμε την motherboard και την δηλώνουμε στο “configuration.h” (Σχήμα 4.1)



```

File Edit Sketch Tools Help
Marlin Conditionals.h Configuration.h Configuration_adv.h Default_Version.h M100_Free_Mem_Chk.cpp Marlin.h MarlinSerial.h
// :[2400,9600,19200,38400,57600,115200,250000]
#define BAUDRATE 250000

// Enable the Bluetooth serial interface on AT90USB devices
// #define BLUETOOTH

// The following define selects which electronics board you have.
// Please choose the name from boards.h that matches your setup
#ifndef MOTHERBOARD
  #define MOTHERBOARD BOARD_RAMPS_13_EFB
#endif

// Optional custom name for your RepStrap or other custom machine
// Displayed in the LCD "Ready" message
// #define CUSTOM_MACHINE_NAME "3D Printer"

// Define this to set a unique identifier for this printer, (Used by some programs to differentiate between machines)
// You can use an online service to generate a random UUID. (eg http://www.uuidgenerator.net/version4)
// #define MACHINE_UUID "00000000-0000-0000-0000-000000000000"

// This defines the number of extruders
// :[1,2,3,4]
#define EXTRUDERS 1

```

Σχήμα 4.1: Επιλογή motherboard

- Δηλώνουμε τον αριθμό των κεφαλών εκτύπωσης. (Σχήμα 4.2)

```
// This defines the number of extruders
// :[1,2,3,4]
#define EXTRUDERS 1

// Offset of the extruders (uncomment if using more than one and relying on firmware to position when changing).
// The offset has to be X=0, Y=0 for the extruder 0 hotend (default extruder).
// For the other hotends it is their distance from the extruder 0 hotend.
// #define EXTRUDER_OFFSET_X {0.0, 20.00} // (in mm) for each extruder, offset of the hotend on the X axis
// #define EXTRUDER_OFFSET_Y {0.0, 5.00} // (in mm) for each extruder, offset of the hotend on the Y axis
```

Σχήμα 4.2: Δήλωση αριθμού κεφαλών

- Επιλογή του αισθητήρα θερμοκρασίας NTC3950 από την λίστα, η οποία βρίσκεται πάνω από τη σειρά ρύθμισης και δηλώνουμε τον αριθμό που του αντιστοιχεί δηλαδή το 1. (Σχήμα 4.3)

```
Marlin | Conditionals.h | Configuration.h | Configuration_adv.h | Default_Version.h | M100_Free_Mem_Chk.cpp
// 110 is Pt100 with 1k pullup (non standard)
// 998 and 999 are Dummy Tables. They will ALWAYS read 25°C or the temperature defined below.
// Use it for Testing or Development purposes. NEVER for production machine.
// #define DUMMY_THERMISTOR_998_VALUE 25
// #define DUMMY_THERMISTOR_999_VALUE 100
// :{ '0': "Not used", '4': "10k !! do not use for a hotend. Bad resolution at high temp. !!", '1': "1
#define TEMP_SENSOR_0 1
#define TEMP_SENSOR_1 0
#define TEMP_SENSOR_2 0
#define TEMP_SENSOR_3 0
#define TEMP_SENSOR_BED 0

// This makes temp sensor 1 a redundant sensor for sensor 0. If the temperatures difference between t1
// #define TEMP_SENSOR_1_AS_REDUNDANT
#define MAX_REDUNDANT_TEMP_SENSOR_DIFF 10

// Actual temperature must be close to target for this long before M109 returns success
```

Σχήμα 4.3: Επιλογή αισθητήρα θερμοκρασίας

- Ελάχιστη θερμοκρασία: Είναι η ελάχιστη θερμοκρασία μέχρι την οποία είναι ενεργοποιημένος ο αισθητήρας. Την αφήνουμε όπως είναι δηλαδή 5°C. (Σχήμα 4.4)

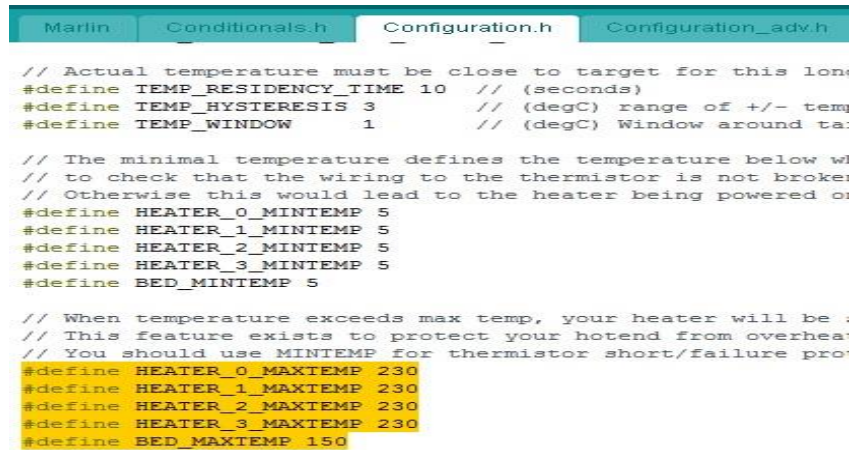
```
Marlin | Conditionals.h | Configuration.h | Configuration_adv.h | Default
// Actual temperature must be close to target for this long before
#define TEMP_RESIDENCY_TIME 10 // (seconds)
#define TEMP_HYSTERESIS 3 // (degC) range of +/- temperature:
#define TEMP_WINDOW 1 // (degC) Window around target to :

// The minimal temperature defines the temperature below which the
// to check that the wiring to the thermistor is not broken.
// Otherwise this would lead to the heater being powered on all th
#define HEATER_0_MINTEMP 5
#define HEATER_1_MINTEMP 5
#define HEATER_2_MINTEMP 5
#define HEATER_3_MINTEMP 5
#define BED_MINTEMP 5

// When temperature exceeds max temp, your heater will be switched
// This feature exists to protect your hotend from overheating acc
// You should use MINTEMP for thermistor short/failure protection.
#define HEATER_0_MAXTEMP 275
#define HEATER_1_MAXTEMP 275
#define HEATER_2_MAXTEMP 275
#define HEATER_3_MAXTEMP 275
#define BED_MAXTEMP 150
```

Σχήμα 4.4: Ρύθμιση ελάχιστης θερμοκρασίας

- Μέγιστη θερμοκρασία: Από 275°C την αλλάζουμε σε 230°C, έτσι ώστε να προστατευτεί το σωληνάκι από PTFE που βρίσκεται στον κορμό του hot end.(Σχήμα 4.5)



```

Marlin | Conditionals.h | Configuration.h | Configuration_adv.h
// Actual temperature must be close to target for this long
#define TEMP_RESIDENCY_TIME 10 // (seconds)
#define TEMP_HYSTERESIS 3 // (degC) range of +/- temp
#define TEMP_WINDOW 1 // (degC) Window around target

// The minimal temperature defines the temperature below which
// to check that the wiring to the thermistor is not broken
// Otherwise this would lead to the heater being powered on!
#define HEATER_0_MINTEMP 5
#define HEATER_1_MINTEMP 5
#define HEATER_2_MINTEMP 5
#define HEATER_3_MINTEMP 5
#define BED_MINTEMP 5

// When temperature exceeds max temp, your heater will be
// This feature exists to protect your hotend from overheating
// You should use MINTEMP for thermistor short/failure protection
#define HEATER_0_MAXTEMP 230
#define HEATER_1_MAXTEMP 230
#define HEATER_2_MAXTEMP 230
#define HEATER_3_MAXTEMP 230
#define BED_MAXTEMP 150

```

Σχήμα 4.5: Ρύθμιση μέγιστης θερμοκρασίας

- Πρόληψη επικίνδυνης εξώθησης (extruding): (Σχήμα 4.6)
  1. Για να μην εξωθήσει υλικό ο extruder προς το θερμαινόμενο μέρος (hot end) πριν το υλικό να πιάσει την θερμοκρασία τήξης του, διότι έτσι υπάρχει περίπτωση να σπάσει το υλικό, αφήνουμε ενεργοποιημένη την εντολή

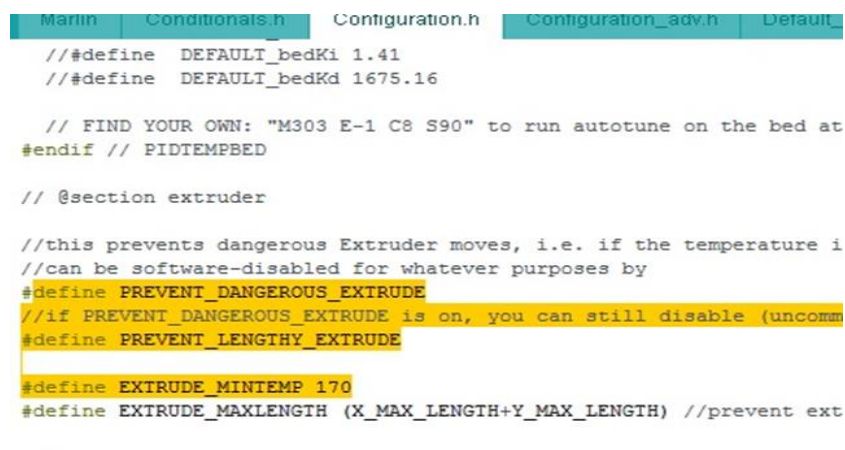
```
#define PREVENT_DANGEROUS_EXTRUDE
```

2. Για πρόληψη μεγάλης εξώθησης από την κεφαλή λόγω κάποιου σφάλματος στο πρόγραμμα (firmware) αφήνουμε ενεργοποιημένη την εντολή:

```
#define PREVENT_LENGTHY_EXTRUDE
```

3. Ρυθμίζουμε την ελάχιστη θερμοκρασία που θα έχει η κεφαλή για την εξώθηση:

```
#define EXTRUDE_MINTEMP 170
```



```

Marlin | Conditionals.h | Configuration.h | Configuration_adv.h | Default
// #define DEFAULT_bedKi 1.41
// #define DEFAULT_bedKd 1675.16

// FIND YOUR OWN: "M303 E-1 C8 S90" to run autotune on the bed at
#endif // PIDTEMPBED

// @section extruder

//this prevents dangerous Extruder moves, i.e. if the temperature is
//can be software-disabled for whatever purposes by
#define PREVENT_DANGEROUS_EXTRUDE
//if PREVENT_DANGEROUS_EXTRUDE is on, you can still disable (uncomment)
#define PREVENT_LENGTHY_EXTRUDE

#define EXTRUDE_MINTEMP 170
#define EXTRUDE_MAXLENGTH (X_MAX_LENGTH+Y_MAX_LENGTH) //prevent ext

```

Σχήμα 4.6: Πρόληψη επικίνδυνης εξώθησης

- Τερματικοί διακόπτες (endstops): Για απενεργοποίηση τους ενεργοποιούμε τις παρακάτω εντολές

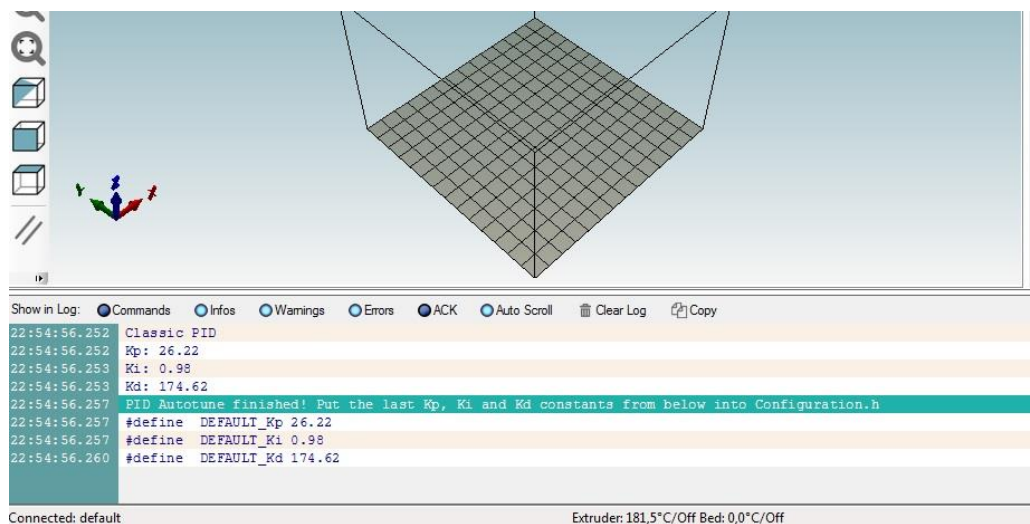
```
#define DISABLE_MAX_ENDSTOPS  
#define DISABLE_MIN_ENDSTOPS
```

- Ρύθμιση PID ελεγκτή

Ο ελεγκτής PID, είναι ένας ελεγκτής κλειστών συστημάτων αυτόματου ελέγχου που συνήθως χρησιμοποιείται σε βιομηχανικά συστήματα ελέγχου. Ο PID ελεγκτής συνεχώς μετράει το σφάλμα μεταξύ της επιθυμητής τιμής (θεωρητικής) και της μετρούμενης (πραγματική τιμή) και προσπαθεί να το μειώσει. Ο υπολογισμός έχει ως αποτέλεσμα τον καθορισμό των  $k_p$ ,  $k_i$  και  $k_d$  όρων όπου  $k_p$ : αναλογικός όρος (Proportional),  $k_i$ : ολοκληρωτικός όρος (Integral) και  $k_d$ : διαφορικός όρος (Derivative).

Για τις περισσότερες σύγχρονες βιομηχανικές εφαρμογές έχουν αναπτυχθεί λογισμικά που κάνουν τον υπολογισμό και καθορίζουν τις τιμες των  $k_p$ ,  $k_i$  και  $k_d$  με μεγάλη ακρίβεια.

Έτσι, στο Host Software που χρησιμοποιούμε το “ Repetier Host” στο πεδίο του Gcode δίνουμε την εντολή **M303 E0 S200 C10** για να πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός, για την σταθεροποίηση της θερμοκρασίας στους 200°C. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.7 είναι  $k_p= 26.22$ ,  $k_i= 0.98$  και  $k_d= 174.62$ .



```
Show in Log: ● Commands ● Infos ● Warnings ● Errors ● ACK ● Auto Scroll ● Clear Log ● Copy  
22:54:56.252 Classic PID  
22:54:56.252 Kp: 26.22  
22:54:56.253 Ki: 0.98  
22:54:56.253 Kd: 174.62  
22:54:56.257 PID Autotune finished! Put the last Kp, Ki and Kd constants from below into Configuration.h  
22:54:56.257 #define DEFAULT_Kp 26.22  
22:54:56.257 #define DEFAULT_Ki 0.98  
22:54:56.260 #define DEFAULT_Kd 174.62  
Connected: default  
Extruder: 181,5°C/Off Bed: 0,0°C/Off
```

Σχήμα 4.7: Αποτελέσματα  $k_p$ ,  $k_i$  και  $k_d$



Τις τιμές των αποτελεσμάτων τις μεταφέρουμε στο “Marlin” όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8.

```
... // Set/get with g...
#define PID_FUNCTIONAL_RANGE 10 // If the temperatur...
// is more then PID_...
#define PID_INTEGRAL_DRIVE_MAX PID_MAX //limit for...
#define K1 0.95 //smoothing factor within the PID...

// If you are using a pre-configured hotend then you...
// Ultimaker
#define DEFAULT_Kp 26.22
#define DEFAULT_Ki 0.98
#define DEFAULT_Kd 174.62

// MakerGear
//#define DEFAULT_Kp 7.0
//#define DEFAULT_Ki 0.1
//#define DEFAULT_Kd 12
...

```

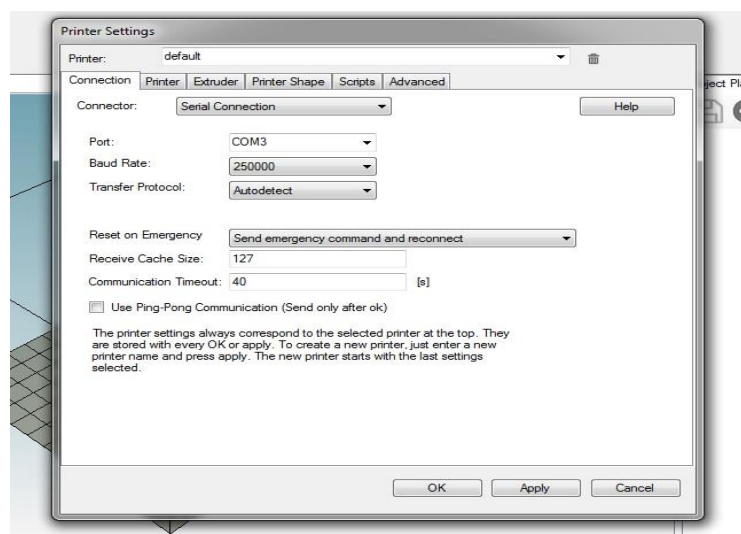
Σχήμα 4.8: Εισαγωγή τιμών  $k_p$ ,  $k_i$  και  $k_d$  στο marlin.

Αυτές είναι οι βασικές ρυθμίσεις του Firmware για να είναι σε θέση να λειτουργήσει με ακρίβεια ο 3D εκτυπωτής.

### 4.3. Software

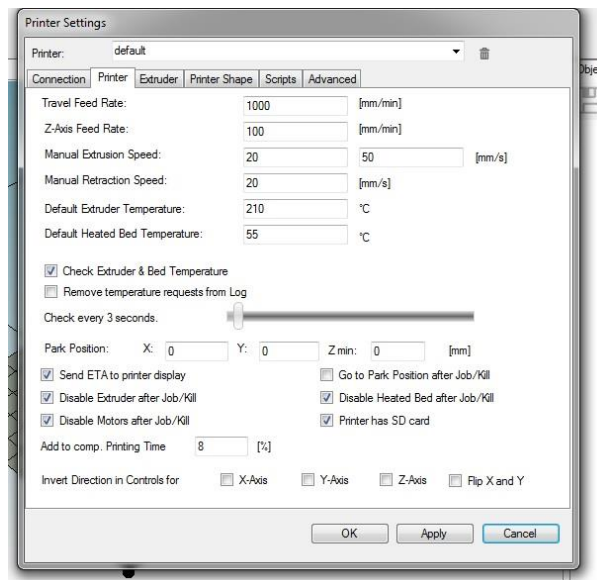
Τα λογισμικά που χρησιμοποιούνται για να λειτουργήσει ο FDM-100 είναι δύο ελεύθερα λογισμικά και είναι τα Cura και Repetier Host. Το Cura χρησιμοποιείται σαν slicer και με το Repetier Host συνδεόμαστε στον 3D εκτυπωτή. Έτσι, οι πρώτες ρυθμίσεις πρέπει να γίνουν στο Repetier Host και αυτές είναι οι εξής:

- Στην καρτέλα “Config” επιλέγουμε “Printer settings” και στο πεδίο “Connection” επιλέγουμε το είδος σύνδεσης με τον 3D εκτυπωτή, συνήθως είναι σειριακή, και την COM στην οποία συνδέθηκε το καλώδιο usb της arduino. Έπειτα, δηλώνουμε την τιμή Baudrate η οποία πρέπει να είναι ίδια με αυτή που δηλώθηκε στο firmware (Σχήμα 4.9)



Σχήμα 4.9: Ρυθμίσεις σύνδεσης

- Στο πεδίο “ Printer” ρυθμίζονται η ταχύτητα (feedrate) με την οποία θα κινείται η κεφαλή εκτύπωσης στους άξονες X,Y και Z κατά τον χειροκίνητο έλεγχο (manual control), η ταχύτητα εξώθησης (extrusion speed) και η αντίστροφη (retraction speed) του υλικού και η προεπιλεγμένη θερμοκρασία της κεφαλής και του τραπέζιου εκτύπωσης, εφόσον υπάρχει θερμαινόμενο τραπέζι, στην οποία θα γίνεται η εκτύπωση. Στο σχήμα 4.10, βλέπουμε τις ρυθμίσεις για τον FDM-100.

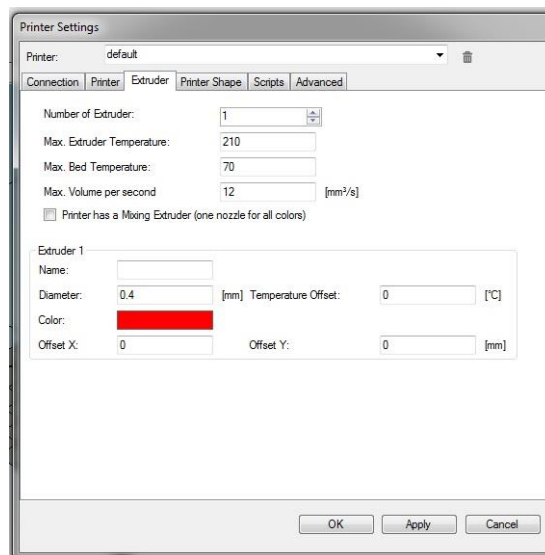


Σχήμα 4.10: Ρυθμίσεις εκτυπωτή

- Στο πεδίο “Extruder” βρίσκονται από τις σημαντικότερες ρυθμίσεις του τρισδιάστατου εκτυπωτή. Δηλώνουμε τον αριθμό κεφαλών (number of Extruder), την μέγιστη θερμοκρασία κεφαλής και τραπέζιου (Max,Extruder temperature, Max.Bed temperature),την διάμετρο του ακροφυσίου (nozzle diameter) και το χρώμα του νήματος. Τέλος, η πιο κρίσιμη ρύθμιση είναι αυτή του μέγιστου όγκου ανά δευτερόλεπτο (Max. Volume per second) εκροής υλικού από το ακροφύσιο. Για τον υπολογισμό του ογκομετρικού ρυθμού εκροής (volumetric flowrate) υπάρχει ο παρακάτω τύπος

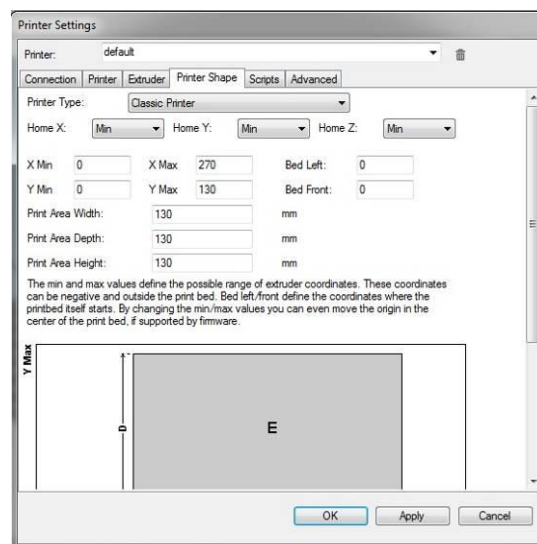
$$\text{Volumetric flowrate} = \text{nozzle diameter} \times \text{layer height} \times \text{print speed} \text{ (mm}^3\text{/sec)}$$

Στο σχήμα 4.11, φαίνονται οι ρυθμίσεις για τον FDM-100



Σχήμα 4.11: Ρυθμίσεις κεφαλής εκτύπωσης

- Στο πεδίο “Printer shape” ρυθμίστηκαν οι ελάχιστες και μέγιστες αποστάσεις του εκτυπωτή και ο χώρος εργασίας του (Σχήμα 4.12)



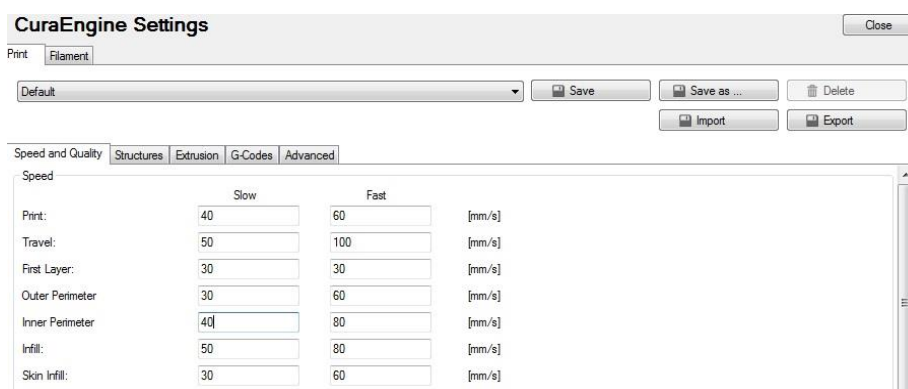
Σχήμα 4.12: Ρύθμιση διαστάσεων εκτυπωτή

Αυτές είναι οι βασικές ρυθμίσεις που απαιτούνται για την καλή επικοινωνία του FDM-100 με το λογισμικό, έτσι ώστε να υπάρχει ακριβής κίνηση μέσα στον χώρο εργασίας του και προστασία από υψηλές ταχύτητες και θερμοκρασίες.

Συνηθίζεται η δημιουργία ενός πλάνου ρυθμίσεων οι οποίες αφορούν την διεργασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης μέσα στο slicer λογισμικό δηλαδή το “Cura”, έτσι ώστε να μην πρέπει ο χρήστης να ρυθμίζει όλες τις παραμέτρους για κάθε εκτύπωση.

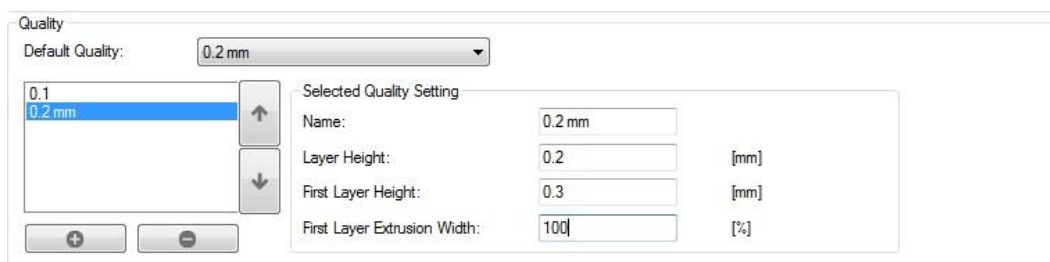
Έτσι, στο “Repetier Host” δίπλα από την αναπαράσταση του χώρου εργασίας επιλέγουμε την καρτέλα “slicer” και έπειτα το πεδίο “configurations”. Ανοίγει ένα νέο παράθυρο το “CuraEngineSettings” και στην καρτέλα “Print” επιλέγουμε “Speed and Quality”.

- Πρώτα ρυθμίζουμε τις ταχύτητες των διάφορων κατηγοριών. Ο γενικός κανόνας αναφέρει πως όσο πιο αργή η εκτύπωση τόσο καλύτερη η ποιότητα. Έτσι, ταχύτητες από 20-50 mm/sec θεωρούνται χαμηλές. Η πρώτη στρώση (first layer) πρέπει να πραγματοποιείται σε πολύ χαμηλή ταχύτητα για καλύτερη προσκόλληση στην επιφάνεια εκτύπωσης. Επίσης, ιδιαίτερα σημαντική είναι η επιλογή της ταχύτητας γεμίσματος του αντικειμένου (Infill) η οποία μπορεί να είναι υψηλή με αποτέλεσμα τη μικρότερη διάρκεια της διεργασίας αλλά την κακή ποιότητα της επιφάνειας. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί επιλέγοντας χαμηλή ταχύτητα για το γέμισμα της τελευταίας στρώσης (skin infill). Στο [σχήμα 4.13](#) φαίνονται οι ρυθμίσεις των διάφορων ταχυτήτων που επιλέχθηκαν για το πλάνο του FDM-100.



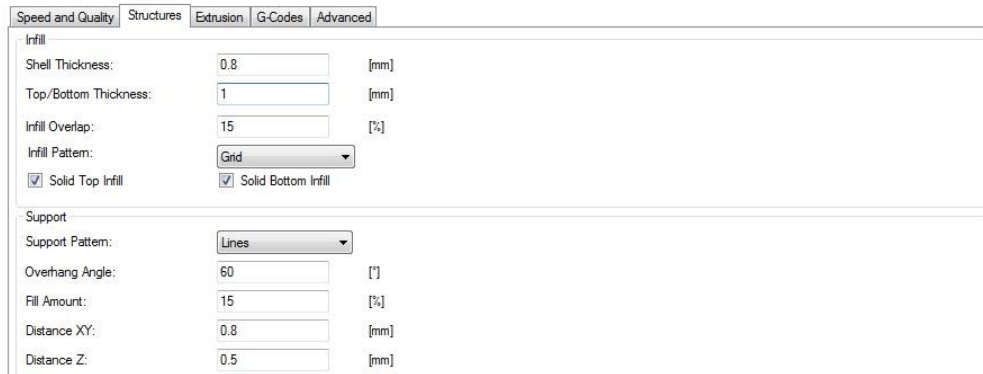
**Σχήμα 4.13:** Ρύθμιση ταχυτήτων

- Ρύθμιση της ανάλυσης της εκτύπωσης.  
Όσο, μικρότερο είναι το ύψος της στρώσης (layer height) τόσο μεγαλύτερη η ανάλυση δηλαδή λιγότερο έντονες οι στρώσεις και ομαλότερη επιφάνεια. Αυτό συνεπάγεται και μεγαλύτερη διάρκεια εκτύπωσης.  
Η πρώτη στρώσή είναι σημαντικό να έχει χαμηλό ύψος γιατί έτσι αντισταθμίζει τυχόν ανωμαλίες που συναντώνται πάνω στην επιφάνεια εκτύπωσης. Με layer height=0,2mm επιτυγχάνεται μια καλή ποιότητα εκτύπωσης ([Σχήμα 4.14](#))



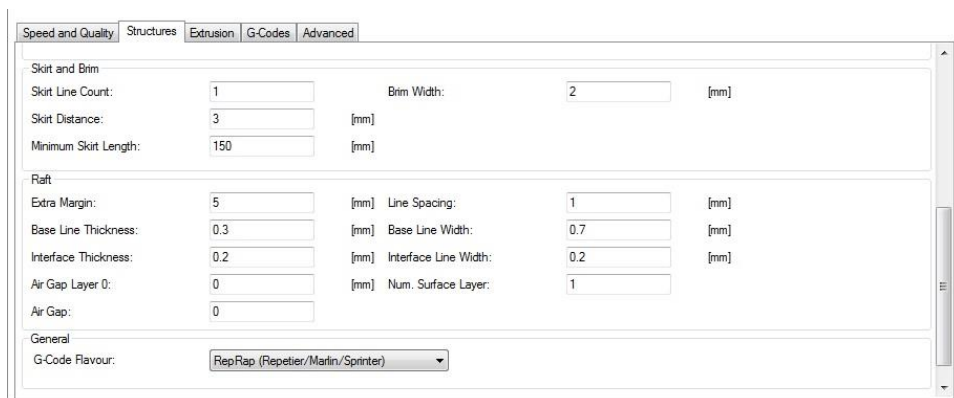
**Σχήμα 4.14:** Ρύθμιση ανάλυσης της εκτύπωσης

- Στο πεδίο “structures” υπάρχουν οι ρυθμίσεις για την πλήρωση (infill), για τα στηρίγματα (support) και για τον τρόπο δημιουργίας της πρώτης βοηθητικής στρώσης (skirt and brim, raft). Η επιλογή των ρυθμίσεων έγινε σύμφωνα με το πλάνο ρυθμίσεων για pla, της εταιρείας “SD3D”. Στο [σχήμα 4.15](#) φαίνονται οι ρυθμίσεις για την πληρωση και για τα στηρίγματα και στο [σχήμα 4.16](#) για τα είδη πρώτης βοηθητικής στρώσης.



*Σχήμα 4.15: Ρυθμίσεις Infill και Support*

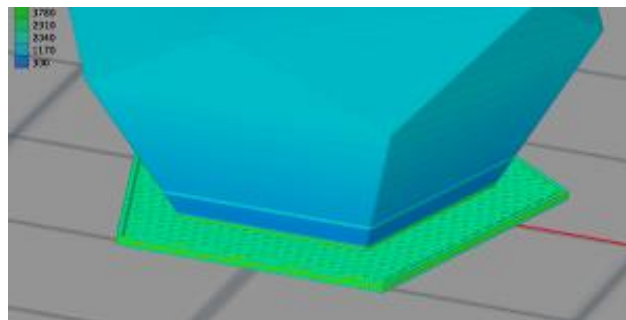
- Shell thickness: Το πάχος των εξωτερικών τοιχωμάτων του αντικειμένου
- Infill Overlap: Ποσοστό επικάλυψης (overlap) μεταξύ στρώσεων πλήρωσης (infill) και τοιχωμάτων (walls).
- Infill Pattern: Τρόπος γεμίσματος του αντικειμένου.
- Support Pattern: Τρόπος δημιουργίας στηριγμάτων κατά την εκτύπωση, όταν αυτό απαιτείται.
- Overhang angle: Η ελάχιστη γωνία κατά την οποία χρειάζεται στήριξη το αντικείμενο κατά την εκτύπωση.
- Fill Amount: Πυκνότητα γεμίσματος των στηριγμάτων.



*Σχήμα 4.16: Ρυθμίσεις Skirt and Brim και Raft*

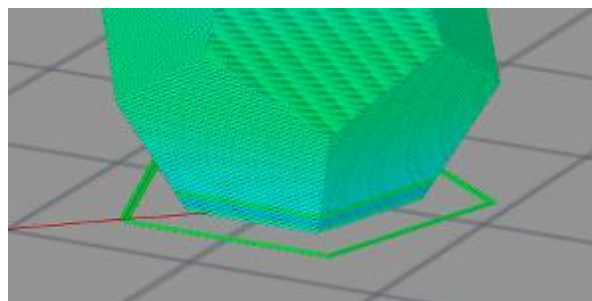
Οι τεχνικές δημιουργίας της πρώτης βοηθητικής στρώσης είναι πολύ σημαντικές και εφαρμόζονται σε ξεχωριστές περιπτώσεις.

- Η τεχνική **Raft** (Σχήμα 4.17), δημιουργεί ένα οριζόντιο συρματόπλεγμα υλικού κάτω από το αντικείμενο. Χρησιμοποιείται κυρίως με ABS για να βοηθήσει στην προσκόλληση στην επιφάνεια εκτύπωσης. Επίσης, χρησιμοποιείται για να βοηθήσει στη σταθεροποίηση μοντέλων που έχουν μικρή επιφάνεια πατήματος, ή για να δημιουργήσει ένα ισχυρό θεμέλιο, επάνω στο οποίο θα χτιστούν οι ανώτερες στρώσεις του αντικειμένου. Αν η μόνη ανησυχία είναι η προσκόλληση στο κρεβάτι, προτείνεται η χρήση της τεχνικής Brim, διότι αυτή μπορεί να εκπληρώσει τους ίδιους στόχους με την raft και δημιουργείται πολύ πιο γρήγορα. [40]



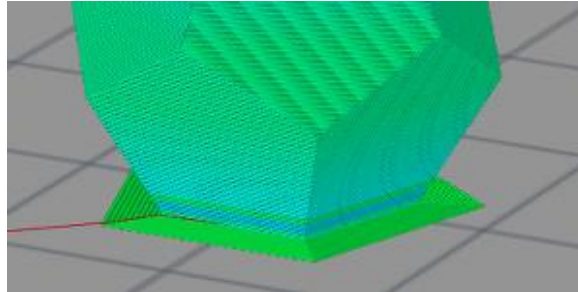
Σχήμα 4.17: Τεχνική Raft [40]

- Η **Skirt** (Σχήμα 4.18), είναι ένα περίγραμμα όπου περιβάλλει το αντικείμενο χωρίς να το αγγίζει. Η skirt, εξωθείται στο τραπέζι εκτύπωσης πριν αρχίσει η εκτύπωση του αντικειμένου. Επιτρέπει την διάγνωση οποιουδήποτε προβλήματος εκτύπωσης ή επιπεδότητας πριν αρχίσει η εκτύπωση του αντικειμένου. [40]



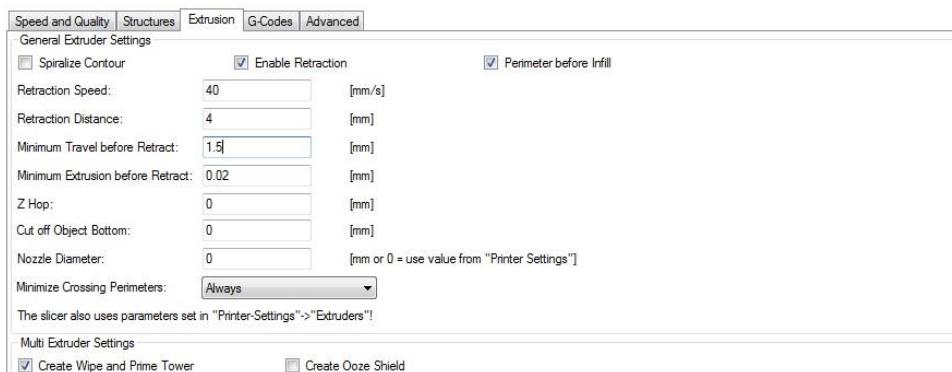
Σχήμα 4.18: Τεχνική Skirt [40]

Αντιθέτως με την Skirt, η Brim (Σχήμα 4.19) δεν απέχει καθόλου από το αντικείμενο (offset=0.00mm). Η Brim, επισυνάπτεται στο αντικείμενο και εκτείνεται προς τα έξω, όμοια με το χείλος του καπέλου. Αποτελείται από πολλά περιγράμματα και από 1-2 στρώσεις στο ύψος. Χρησιμοποιείται συχνά για την σταθεροποίηση μικρών αντικειμένων, επειδή βοηθάει τις μικρές τους επιφάνειες να μείνουν συνδεδεμένες με την επιφάνεια εκτύπωσης. [40]



Σχήμα 4.19: Η τεχνική Brim [40]

- Στο πεδίο “Extrusion” ρυθμίζονται οι παράμετροι που αφορούν την κεφαλή εκτύπωσης, κυρίως την εξώθηση και την ψύξη της. Στο [σχήμα 4.20](#) φαίνεται το πλάνο ρυθμίσεων για τον εξωθητή (extruder) και στο [σχήμα 4.21](#) οι ρυθμίσεις για την ψύξη (cooling) της κεφαλής.



Σχήμα 4.20: Ρυθμίσεις extruder



Σχήμα 4.21: Ρυθμίσεις Cooling

Στην καρτέλα “filament” θέτουμε τις ρυθμίσεις που αφορούν το υλικό της εκτύπωσης, όπως είναι θερμοκρασία κεφαλής, διάμετρος νήματος, ροή νήματος κα ταχύτητες ψύξης, Στο σχήμα 4.22 φαίνονται οι ρυθμίσεις για τον FDM-100.

Print Filament

Default Save Save as ... Delete Import Export

Filament

Filament Diameter: 1.75 [mm]

Flow: 100 [%]

Temperature

Print Temperature: 210 [°C]

Bed Temperature: 50 [°C]

Cooling

Min. Fan Speed: 30 [%]

Max. Fan Speed: 50 [%]

Minimum Layer Time: 5 [s]

CuraEngine only supports one extruder diameter and flow value, because it assumes identical extruders. If you have a multi-extruder setup with different values, the values from the first extruder are used for all. Print temperatures are set in the start g-code, so using different temperatures for different materials is no problem. For cooling the highest values of all extruders are used.

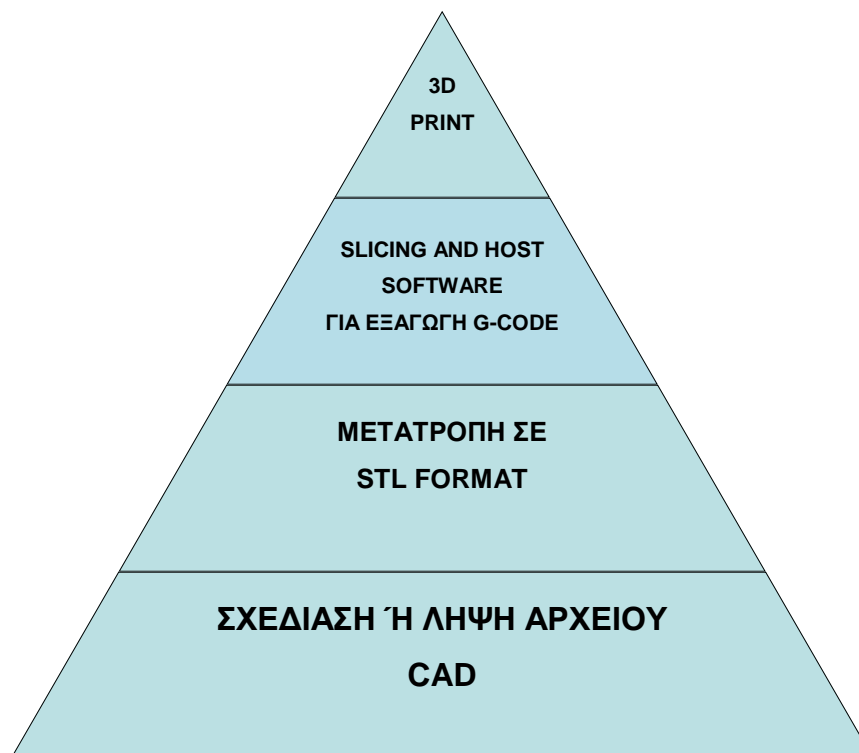
**Σχήμα 4.22:** Ρυθμίσεις filament



## **5. Παράδειγμα τρισδιάστατης εκτύπωσης και έλεγχος επιτευχθείσας ακρίβειας**

Η τρισδιάστατη εκτύπωση (FDM) μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα είτε σαν χόμπι είτε για βιομηχανική χρήση. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει η δυνατότητα από τον χρήστη, να σχεδιάσει ένα αντικείμενο σε λογισμικό τρισδιάστατης σχεδίασης CAD, ακόμα και για κάποιον που έχει την δυνατότητα, για λόγους συντόμευσης, υπάρχουν οι εξής ιστότοποι [www.grabcad.com](http://www.grabcad.com) και [www.thingiverse.com](http://www.thingiverse.com), όπου υπάρχει μια μεγάλη γκάμα αρχείων CAD και .stl διαθέσιμα για λήψη.

Όπως, αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2.2 τα βήματα για την διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι τα εξής, όπως παρουσιάζονται στο σχήμα 5.1.



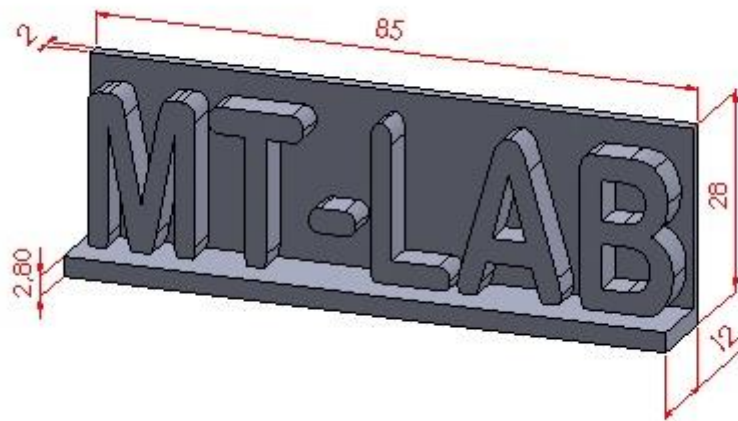
*Σχήμα 5.1: Βήματα διαδικασίας 3d-printing*

Για την παρούσα εργασία στόχος είναι να εκτυπωθεί το λογότυπο του εργαστηρίου μηχανουργικής τεχνολογίας & συστημάτων παραγωγής, της σχολής τεχνολογικών εφαρμογών του ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας, το οποίο παρουσιάζεται στο σχήμα 5.2.

The logo consists of the text 'MT-LAB' in a large, bold, blue, sans-serif font. The letters are closely spaced, and the overall appearance is clean and modern.

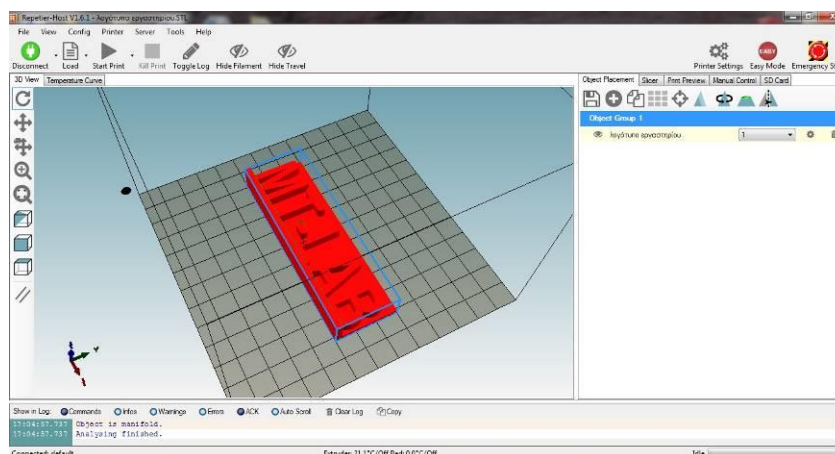
*Σχήμα 5.2: Λογότυπο του εργαστηρίου*

Το λογότυπο σχεδιάστηκε στο λογισμικό 3D σχεδίασης SOLIDWORKS 2015, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.3, με βάση στήριξης έτσι ώστε τα γράμματα να διατηρήσουν τις αποστάσεις του και το εκτυπωμένο αντικείμενο να μπορεί να κρατηθεί όρθιο.



Σχήμα 5.3: Μορφή CAD του λογότυπου του εργαστηρίου

Η διαδικασία της μετατροπής του αρχείου CAD σε .stl είναι πολύ απλή καθώς πραγματοποιείται μέσω του SOLIDWORKS εκτελώντας τα επόμενα βήματα.: 1) Save as: .stl, 2) Yes στο επόμενο παράθυρο. Αφού γίνει η μετατροπή, φορτώνεται το .stl αρχείο στο Repetier Host επιλέγοντας Load και μετά το αρχείο. Μετακινούμε το προς εκτύπωση σχέδιο στην κατάλληλη θέση μέσα στον εικονικό χώρο εργασίας, όσο πιο κοντά γίνεται στο σημείο μηδέν του τραπεζιού. Στο σχήμα 5.4, παρουσιάζεται η θέση του λογότυπου μέσα στο χώρο εργασίας.

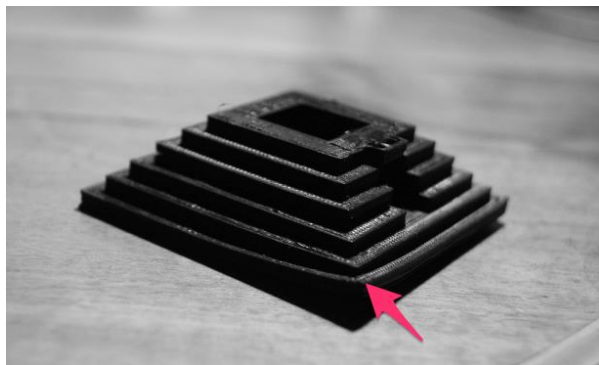


Σχήμα 5.4: Το προς εκτύπωση λογότυπο στον χώρο εργασίας

Μετά την τοποθέτηση του σχεδίου στο χώρο εργασίας, το επόμενο βήμα είναι να προσδιοριστούν οι ρυθμίσεις στο slicer software, όπου στην περίπτωση μας είναι το “Cura”. Συνήθως, χρησιμοποιείται ένα γενικό προφίλ ρυθμίσεων του slicer και επιλέγουμε μόνο την ταχύτητα εκτύπωσης (print speed), την ταχύτητα δημιουργίας του περιγράμματος (outer perimeter speed), την ταχύτητα γεμίσματος (infill speed), την πυκνότητα γεμίσματος (infill density) και την ενεργοποίηση/απενεργοποίηση της ψύξης (enable cooling).

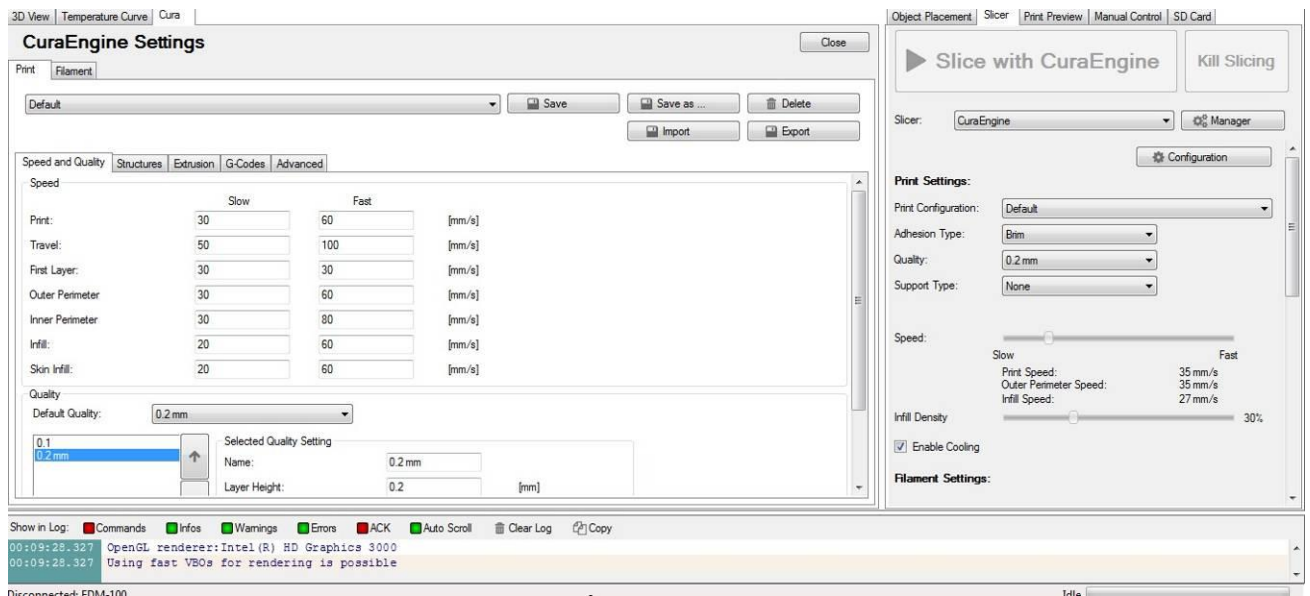
Επίσης, επιλέγουμε το είδος των στηριγμάτων (support type) σε περίπτωση που απαιτούνται και τον τρόπο με τον οποίο η κεφαλή θα δημιουργήσει την πρώτη στρώση (adhesion type). Αυτή η στρώση είναι πολύ χρήσιμη για τις περιπτώσεις όπου το υλικό δεν βρίσκεται αρκετά χαμηλά στο ακροφύσιο και έτσι αποφεύγεται η ύπαρξη κενών διαστημάτων που θα μπορούσε να επιφέρει η καθυστέρηση μέχρι την εξώθηση του υλικού.

Υπάρχουν δύο τύποι προσκόλλησης διαθέσιμοι από το “Cura”, οι οποίοι είναι “Raft” και “Brim”. Στο παράδειγμα μας εφαρμόστηκε ο τύπος “Brim”. Έτσι, οι πρώτες γραμμές που εκτυπώνονται είναι περιμετρικές και έπειτα δημιουργεί την πρώτη στρώση του δοκιμίου. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στην αποφυγή της στρέβλωσης (warping) στις ακμές του δοκιμίου κατά την εκτύπωση. Στο [σχήμα 5.5](#) φαίνεται το σύνηθες πρόβλημα στην τρισδιάσταση εκτύπωση, η στρέβλωση (warping). Στο [σχήμα 5.6](#) φαίνονται οι ρυθμίσεις που επιλέχθηκαν για το παράδειγμα μας.



Σχήμα 5.5: Στρέβλωση (warping) [41]

## 5. Παράδειγμα τρισδιάστατης εκτύπωσης και έλεγχος επιτευχθείσας ακρίβειας

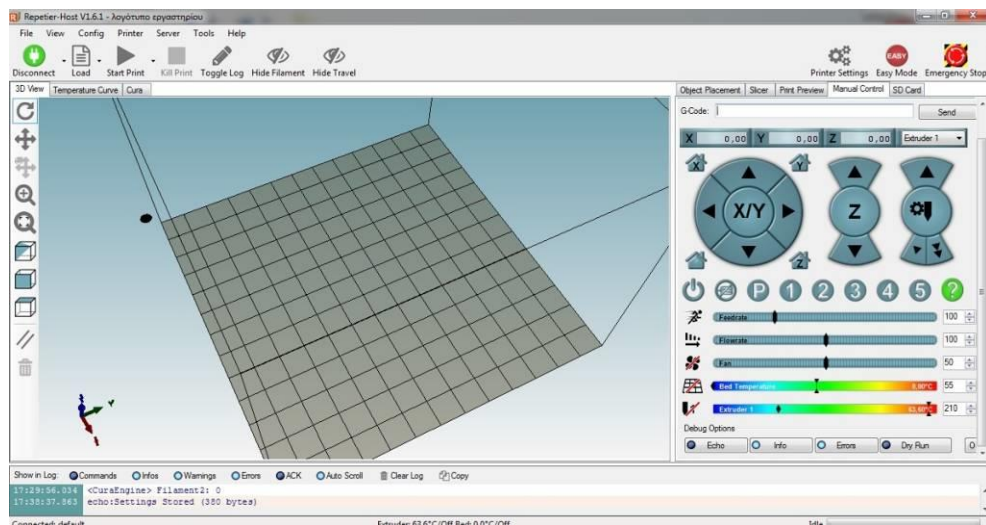


Σχήμα 5.6: Ρυθμίσεις slicer

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.6, η ποιότητα εκτύπωσης του δοκιμίου που επιλέχθηκε είναι 0.2mm. Σε συνδυασμό με την χαμηλή ταχύτητα εκτύπωσης 35mm/sec και την ψύξη της κεφαλής αναμένεται ένα δοκίμιο με καλή ποιότητα επιφάνειας και με σχετικά μεγάλη διαστατική ακρίβεια.

Αφού ολοκληρωθούν οι ρυθμίσεις του slicer, επόμενο βήμα είναι ο μηδενισμός του τρισδιάστατου εκτυπωτή. Στην περίπτωση του FDM-100, λόγω της απουσίας κατάλληλων αισθητηρίων, ο μηδενισμός στους τρεις άξονες γίνεται χειροκίνητα.

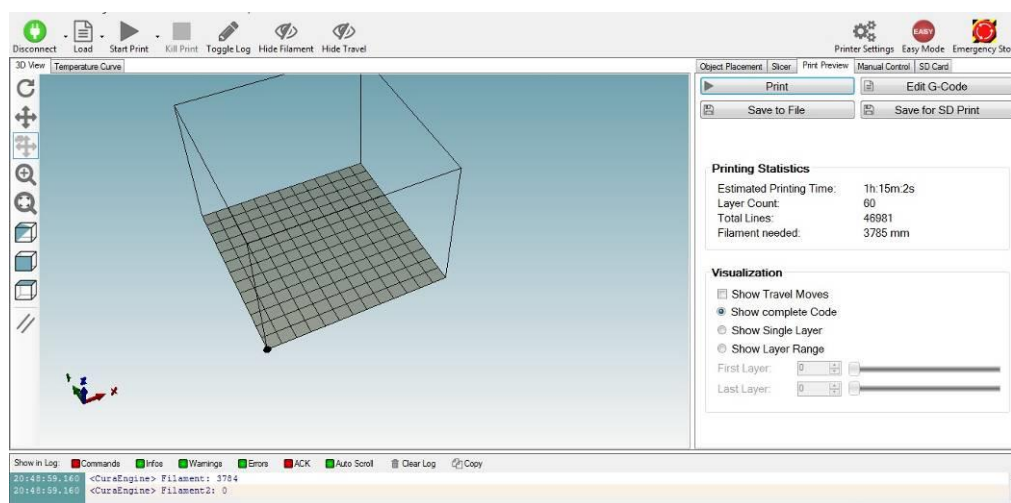
Αφού, οδηγηθεί η κεφαλή στη σωστή θέση επιλέγουμε μέσα από το Repetier Host, στο πεδίο 'manual control' την ένδειξη 'Home' για τον κάθε άξονα, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.7 και έπειτα στο πεδίο 'G-code' γράφουμε την εντολή "M500" ώστε να αποθηκευτούν οι αλλαγές στο firmware.



Σχήμα 5.7: Μηδενισμός αξόνων X, Y, και Z.

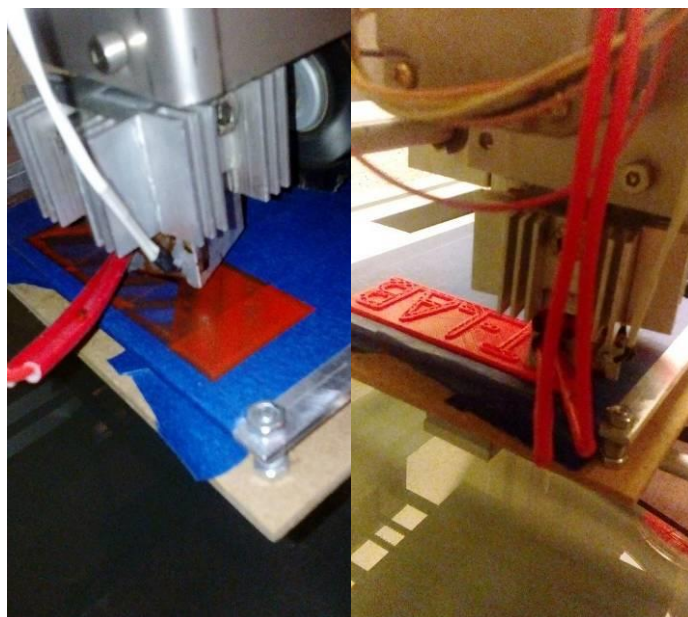
Πρέπει να δωθεί ιδιαίτερη προσοχή ώστε το τραπέζι εκτύπωσης να είναι οριζόντιο. Αυτό το ρυθμίζουμε με τα περικόχλια που υπάρχουν στην επιφάνεια του και με την βοήθεια ενός αλφαδιού.

Αφού ολοκληρωθεί η προεπεξεργασία (preprocessing), στο πεδίο “print preview”, επιλέγουμε την εντολή “Print” για να ξεκινήσει η διεργασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Στο σχήμα 5.8 φαίνονται ο χρόνος της εκτύπωσης (estimated printing time), το μήκος του υλικού (filament needed) που απαιτείται, ο αριθμός των στρώσεων (layer count) και το σύνολο των γραμμών (total lines).



Σχήμα 5.8: Στοιχεία διεργασίας

Η διάρκεια της εκτύπωσης όπως φαίνεται παραπάνω είναι 1 ώρα και 15 λεπτά. Στο σχήμα 5.9 στα αριστερά, φαίνεται η εκτέλεση της πρώτης στρώσης της εκτύπωσης και στα δεξιά ο σχηματισμός των γραμμάτων του λογότυπου.



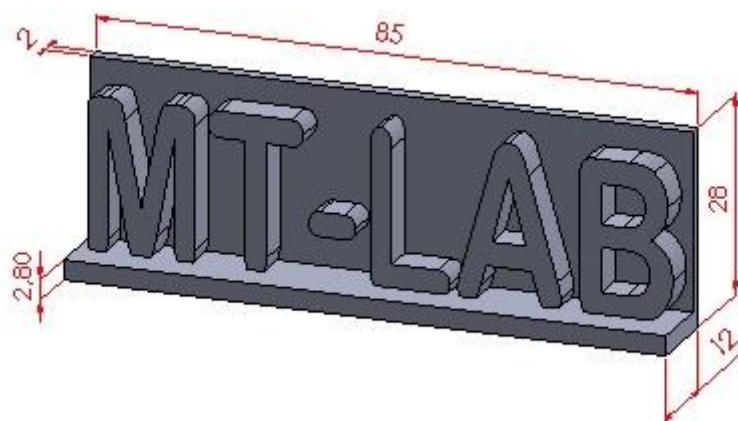
Σχήμα 5.9: Στιγμιότυπα κατά την διάρκεια της εκτύπωσης

Το τελικό αποτέλεσμα ([σχήμα 5.10](#)) της διεργασίας είναι το επιθυμητό, σύμφωνα με τις ρυθμίσεις που εφαρμόστηκαν.



*Σχήμα 5.10: Το τρισδιάστατα εκτυπωμένο λογότυπο του εργαστηρίου από PLA*

- Στο τέλος της εκτύπωσης έγινε έλεγχος της επιτευχθείσας ακρίβειας με ηλεκτρονικό παχύμετρο. Η μεγαλύτερη ακρίβεια παρατηρήθηκε κατά το μήκος του δοκιμίου ενώ οι μετρήσεις στα υπόλοιπα σημεία όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα ([σχήμα 5.12](#) και [σχήμα 5.13](#)), δεν παρουσιάζουν μεγάλη ακρίβεια, παρ' όλα αυτά είναι μέσα στα αποδεκτά όρια. Στο [σχήμα 5.11](#) φαίνεται το πρότυπο τρισδιάστατο σχέδιο με τις διαστάσεις του για την άμεση σύγκριση με το αποτέλεσμα.



*Σχήμα 5.11: Πρότυπο σχέδιο λογότυπου*



*Σχήμα 5.12: Μέτρηση μήκους και ύψους δοκιμίου*



*Σχήμα 5.13: Μέτρηση τοιχωμάτων*

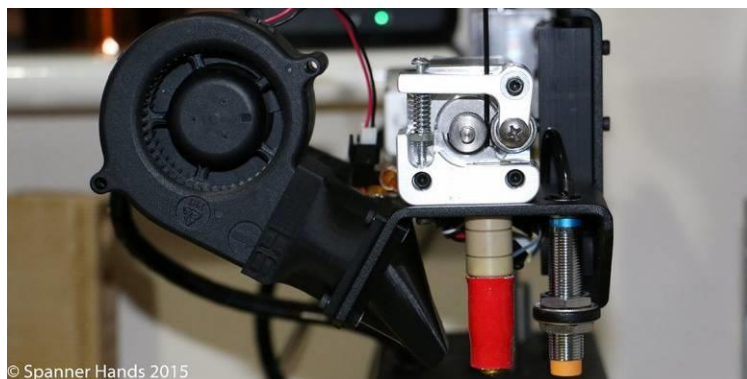
## **6. Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης**

Η καλή σχεδίαση του FDM-100, αποτέλεσε σημαντικό παράγοντα για την εύκολη κατασκευή και το γρήγορο μοντάρισμα του. Ωστόσο, θα μπορούσε να είναι διαφορετικού τύπου, έτσι ώστε να έχουμε μια ελαφρύτερη και στιβαρότερη κατασκευή με ως συνέπεια το αρκετά μεγαλύτερο κόστος.

Συγκεκριμένα, θα μπορούσε να σχεδιαστεί μια κεφαλή ελαφρύτερη και μικρότερη σε όγκο και να σχεδιαστεί η διάταξη έτσι ώστε να μην υπάρχει εκκεντρότητα της κεφαλής ως προς την έδραση της. Παρ' όλα αυτά, η εκκεντρότητα ως προς την έδραση της έχει σταθερές ροπές και δεν επηρεάζει την φυσιολογική λειτουργία του εκτυπωτή. Επίσης, θα μπορούσε να γίνει λεπτομερής θερμική ανάλυση της κεφαλής για την βελτίωση του ρυθμού ψύξης, αν και αυτό θα αποτελούσε από μόνο του ένα θέμα πτυχιακής εργασίας, λόγω της πολυπλοκότητας και της δυσκολίας της. Αξίζει να σημειωθεί, η διαφορά που παρατηρήθηκε στην λειτουργία της κεφαλής με την χρήση του ανεμιστήρα, έτσι ώστε να ψύχει την επιφάνεια που βρίσκονται οι ψύκτρες. Το γεγονός αυτό, σταματάει την συνεχή αύξηση θερμοκρασίας και μειώνει το ρυθμό μετάδοσης θερμότητας σε αυτά τα σημεία, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η εξώθηση υλικού ανεξάρτητα από τον χρόνο εκτύπωσης. Αυτό συμβαίνει διότι διατηρείται πάντα κρύο το πάνω μέρος του κορμού, άρα και το υλικό είναι στερεό κι έτσι μπορεί να πιέσει την ποσότητα λιωμένου υλικού που βρίσκεται κοντά στο σημείο θέρμανσης, ώστε να γίνει η εξώθηση από το ακροφύσιο.

Επιπροσθέτως, η σχεδίαση έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχουν περιθώρια για την χρήση ενός τραpezιού εκτύπωσης μεγαλύτερων διαστάσεων, όσο και για την μετατροπή του σε θερμαινόμενο, γεγονός που βελτιώνει συνήθως την ποιότητα εκτύπωσης και βοηθάει στο να αυξηθεί η ποσότητα των υλικών που μπορεί να χρησιμοποιήσει ο FDM-100. Για παράδειγμα, για την εκτύπωση με ABS είναι απαραίτητο το θερμαινόμενο τραπέζι.

Σημαντική, επίσης, βελτίωση στην ποιότητα θα προκαλούσε η χρήση ανεμιστήρα για την ψύξη της εκτύπωσης, όπως φαίνεται στο [σχήμα 6.1](#).



*Σχήμα 6.1: Ψύξη της εκτύπωσης [42]*



Επιπλέον, θα ήταν καλό να εγκατασταθούν τερματικοί διακόπτες (endstop), για την αποφυγή απότομων ανεξέλεγκτων συγκρούσεων στις τερματικές θέσεις του εκτυπωτή, σε περίπτωση λανθασμένης εντολής ή απορρύθμισης των ηλεκτρονικών.

Τέλος, στο εκτυπωμένο λογότυπο παρουσιάστηκε στρέβλωση της επιφάνειας που ήταν προσκολλημένη στο τραπέζι και ο λόγος είναι η κακή οριζοντίωση του τραπεζιού εκτύπωσης,



## **Βιβλιογραφία**

1. **Αντωνιάδης Θ.Αριστομένης** , Μηχανουργική τεχνολογία Τόμος Β' Κατεργασίες κοπής, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ , 2011.
2. **Καρούζος Στέφανος** , Κατασκευαστικές τεχνολογίες, ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ ,Ηράκλειο, 2003.
3. **Μηλιάρáκης Εμμανουήλ**, Μηχανουργική τεχνολογία χθες σήμερα και αύριο, Πτυχιακή Εργασία, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ, ΤΕΙ ΚΑΒΑΛΑΣ, 2012.
4. **Kunwoo Lee** , Principles of CAD/CAM/CAE systems, Prentice Hall ,Seoul, 1999.
5. **www.custompartnet.com**, stereolithography,2008.
6. **www.wikipedia.org**, Solid Ground Curing, 2016.
7. **www.me.vt.edu**, Laser Sintering, 2017.
8. **www.smg3d.co.uk**, Object 1000 3D Printer, 2016.
9. **www.mit.edu**, What is the 3DP Process, 2000.
10. **www.compositesworld.com**, Three new 3D printing technologies for composites, 2016
11. **www.mdpi.com**, Biocompatibility of Advanced Manufactured Titanium Implants-A Review, 2014.
12. **www.3dprint.com**, FormFutura Releases Food-Safe Transparent HD glass 3d Printing Filament, 2015.
13. **Βασίλας Α. Άγγελος**, Αξιολόγηση παραγωγής χρησιμοποιώντας κατανεμημένα συστήματα 3dprinting-Cloud Manufacturing, Διπλωματική εργασία, Μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών στη Βιομηχανική Διοίκηση και τεχνολογία, Πανεπιστήμιο Πειραιώς, 2015.
14. **www.makeitfrom.com**, Polylactic Acid, 2016.
15. **www.makeitfrom.com**, Acrylonitrile Butadiene Styrene, 2016.
16. **www.all3dp.com**, 30 Types of 3d Printer Filament-Guide & Comparison Chart, 2016.
17. **www.richrap.com**, 3d Printing with Nylon 618 Filament in Tie-Dye Colours, 2013.
18. **www.3dprint.com**, Sculptify's 3D Printer, Including Flex Pellet Printing Technology, Launches on Kickstarter Soon, 2014.
19. **www.3ders.org**, Wood Filament LAYWOO-D3 suppliers and price compare, 2013.
20. **www.3dprintingforbeginners.com**, What material Should I use for 3d Printing-Advanced Materials Review #1-BendLay, Laywoo-D3 suppliers and price compare, 2013.
21. **www.3ders.org**, Jelwek launches 3D printed, wood filament collection, 2014.
22. **www.stacker3d.com**, colorFabb XT CF20 Carbon Fiber 3D Printer Filament, 2017.

23. [www.skmurphy.com](http://www.skmurphy.com), 3D Printing Tradeoffs and Optimization, 2015.
24. [www.tobuya3dprinter.com](http://www.tobuya3dprinter.com), 3D Printer Resolution Effects Strength, 2014.
25. [www.my3dmatter.com](http://www.my3dmatter.com), What is the influence of the color, printing speed, extrusion temperature and ageing on my 3D prints, 2015.
26. [www.ultimaker.com](http://www.ultimaker.com), Infill, 2017.
27. [www.my3dmatter.com](http://www.my3dmatter.com), What is the influence of infill %, layer height and infill pattern on my 3D prints, 2015.
28. **Μιχαλοδημητράκη Νικολέτα**, Διερεύνηση Παραμέτρων Ταχείας Πρωτοτυποποίησης και Συναρμολόγηση Τρισδιάστατου Εκτυπωτή, Διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2015.
29. [www.sculpteo.com](http://www.sculpteo.com), AMF File Format for 3D Printing, 2017.
30. [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org), Additive Manufacturing File Format, 2016.
31. **Δρ. Γκότσης Πασχάλης**, Πεπερασμένα στοιχεία, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 2013.
32. [www.help.solidworks.com](http://www.help.solidworks.com), Linear Static Analysis, 2016.
33. [www.solidworks.com](http://www.solidworks.com), Thermal Analysis, White Paper, 2010.
34. **Πασπαλάς Γ. Κωνσταντίνος**, Μετάδοση Θερμότητας, Σύλλογος Μηχανολόγων-Ηλεκτρολόγων Βορείου Ελλάδος, 2007.
35. [www.engineeredge.com](http://www.engineeredge.com), Convective Heat Transfer Coefficients Table Chart, 2017.
36. [www.sdp-si.com](http://www.sdp-si.com), Handbook of timing belts and pulleys, Catalog D-265, 2007.
37. **Ζακυνθινός Γεώργιος**, Σχεδίαση και Υλοποίηση Συστήματος Ελέγχου Τρισδιάστατου Εκτυπωτή χαμηλού κόστους, Πτυχιακή εργασία, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ, ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ, 2015.
38. [www.reprap.org](http://www.reprap.org), RAMPS 1.4, Assembly Guide, 2016.
39. [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org), Jumper (computing), 2016.
40. [www.simplify3d.com](http://www.simplify3d.com), Rafts, Skirts and Brims, 2017.
41. [www.b3d.gr](http://www.b3d.gr), 3d printing troubleshooting, 2016.
42. [www.pinshape.com](http://www.pinshape.com), Printrobot Simple Metal Improved High Flow Fan Blower Upgrade, 2015.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

### Τεχνικά χαρακτηριστικά ηλεκτρονικού και μηχανολογικού εξοπλισμού

➤ Ηλεκτρονικός εξοπλισμός

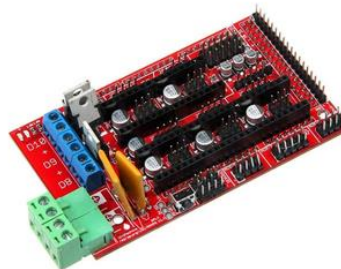
1	Arduino Mega 2560
2	RAMPS 1.4 shield board
3	Βηματικός κινητήρας NEMA 17
4	A4988 stepper motor driver
5	Τροφοδοτικό 240W 12V
6	Κεραμική αντίσταση 12V 40W
7	Thermistor 100kOhm
8	Ανεμιστήρας ψύξης SUNON

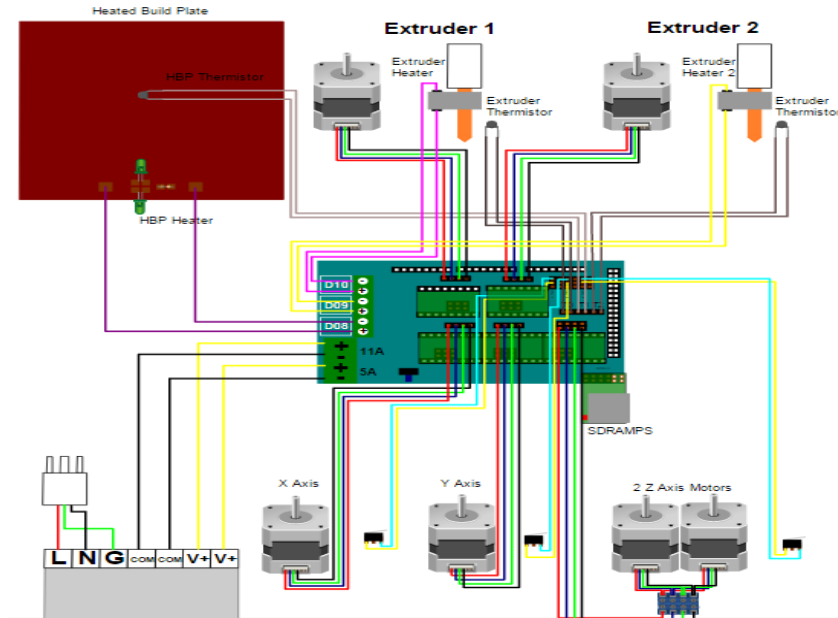
#### 1) Arduino Mega 2560

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 15 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz



#### 2) RAMPS 1.4 shield board



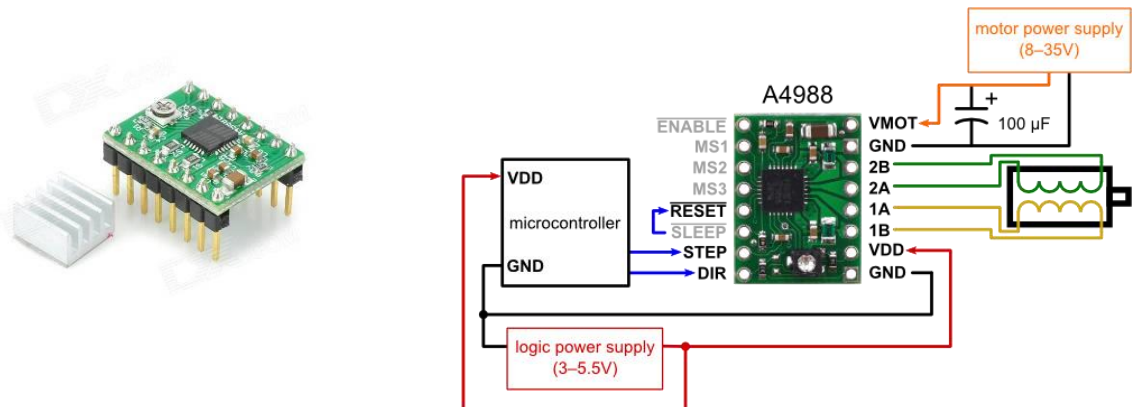


### 3) Βηματικός Κινητήρας 42BYGHW804

Γωνία βήματος (μοίρες)	1,8
Ονομαστική τάση	3,6 V
Ονομαστικό ρεύμα	1,2A/φάση
Διάμετρος άξονα κινητήρα	5mm
Ροπή	48 N.cm
Διφασικός	



### 4) A4988 stepper motor driver



### 5) Τροφοδοτικό 240W 12V

Ισχύς	240W
Τάση εξόδου	12V
Ρεύμα	20A
Τάση εισόδου	230V/115V



### 6) Κεραμική αντίσταση 12V 40W

Ρεύμα	12V
Ισχύς	40W
Διάμετρος	6mm
Μήκος	20mm



### 7) Thermistor NTC 100kOhm

Αντίσταση	100 kΩ
Ακρίβεια	±1%
Εύρος θερμοκρασιων	-40 - 270° C
Διάμετρος αντίστασης	1,8mm



### 8) Ανεμιστήρας Ψύξης SUNON 40X40X20

Τάση	12V DC
Ισχύς	1,38W
Ονομαστικό φορτίο	0,115A
Αποδοτικότητα	18,3 m3/h
Επίπεδο θορύβου	27,5 dBA



➤ Μηχανολογικός εξοπλισμός

**1) Aluminum Pulley 20-tooth GT2 5mm**

Αριθμός δοντιών	20
Εσωτερική διάμετρος	5mm
Οδόντωση	2mm (GT2)



**2) Ιμάντας Χρονισμού GT2**

Πλάτος	6mm
Βήμα	2mm
Δόντια	300



**3) MK8 Hobbed Extruder Gear 1.75mm**

Μήκος	11mm
Εξωτερική διάμετρος	9mm
Εσωτερική διάμετρος	5mm
Βίδα σύσφιξης	M3



**4) Ελατήριο για τραπέζι εκτύπωσης**

Ύψος	20mm
Εσωτερική διάμετρος	4.5mm
Εξωτερική διάμετρος	6.1mm
Σύρμα	0.8mm
Σπείρες	10
Σκληρότητα	Μέτρια
Υλικό	inox





### 5) Spring Coupler 5mm x 5mm

Τύπος	Εύκαμπτο
Υλικό	Αλουμίνιο
Μέγεθος	5mmx5mm
Εξωτερική διάμετρος	19mm
Μήκος	25mm



### 6) Ball Bearing 625ZZ

Εσωτερική διάμετρος	5mm
Εξωτερική διάμετρος	16mm
Πάχος	5mm



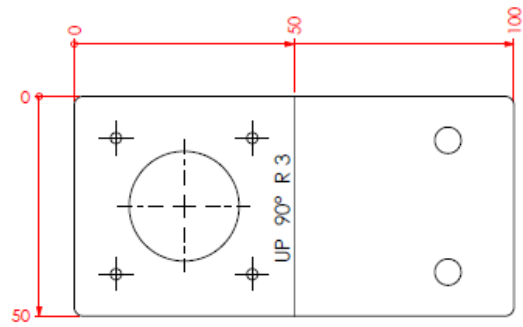
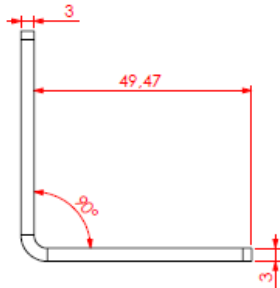
### 7) 3D Printing Nozzle 1.75mm 0.4mm

Διάμετρος ακροφυσίου	0.4mm
Υλικό	Ορείχαλκος
Διάμετρος σπειρώματος	6mm

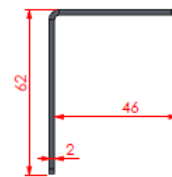
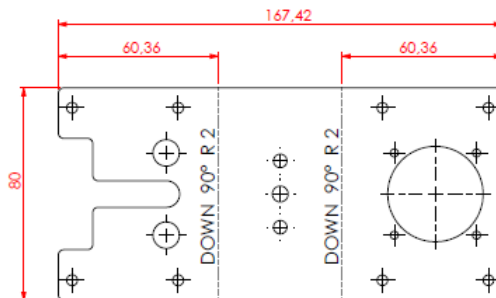
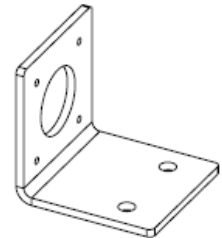


## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

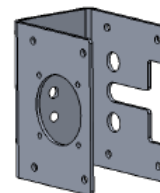
### Κατασκευαστικά σχέδια αντικειμένων που έγιναν με laser κοπή και στραντζάρισμα



ΜΗΧΑΝΗΜΑ: FDM 100
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ: ΓΩΝΙΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ Z
ΥΛΙΚΟ: INOX 304 ΠΑΧΟΣ 3mm ΤΕΜ.1
ΑΡ/ΣΧΕΔ.: 100-01-029



ΜΗΧΑΝΗΜΑ: FDM-100
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ: ΣΩΜΑ EXTRUDR
ΥΛΙΚΟ: INOX 304 ΠΑΧΟΣ: 2mm ΤΕΜ.1
ΑΡ/ΣΧΕΔ.: 100-02-010



## Σύντομο Βιογραφικό Σημείωμα

Προσωπικά στοιχεία:	Τσίπης Σωκράτης Του Σιδέρη και της Σταματίας, Γεννηθείς στις 21 Απριλίου του 1992 στην Βέροια
Βασική εκπαίδευση:	Από 1999-2004 Στοιχειώσης εκπαίδευση στο Δημοτικό Σχολείο Καβασίων  Από 2004-2007 Γυμνάσιο Καβασίων  Από 2007-2010 5 <sup>ο</sup> Γενικό Λύκειο Βέροιας
Σπουδές:	Από Οκτώβριο 2010 Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ του ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας
Επαγγελματική δραστηριότητα:	Από 04.2015-10.2015 Πρακτική άσκηση στην εταιρεία Athanasiadis-cnc Από 10.2015-05.2016 Μηχανολόγος Μηχανικός ΤΕ στην εταιρεία Athanasiadis-cnc Από 05.2016 Μηχανολόγος Μηχανικός ΤΕ στο τμήμα σχεδιασμού στην εταιρεία NOURIS

---



**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
& ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΕ  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ  
ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

**Διευθυντής: Καθηγητής Dr.-Ing. Κ. Δαυίδ  
ΤΕΡΜΑ ΜΑΓΝΗΣΙΑΣ, 62124, ΣΕΡΡΕΣ  
Τηλ. +30 23210 49157**