



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

ΘΕΜΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

"ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ 3D ΕΚΤΥΠΩΤΗ ΑΠΟ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΙΜΑ ΥΛΙΚΑ"



ΟΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΩΝ:

ΞΕΝΟΦΩΝ ΤΡΑΠΑΛΗΣ

ΑΝΤΩΝΙΑ ΜΠΑΝΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Δρ. ΜΙΧΑΗΛ ΠΑΠΟΥΤΣΙΔΑΚΗΣ

ΑΙΓΑΛΕΩ, ΜΑΪΟΣ 2019

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Ξενοφών Τράπαλης, του Ετεοκλή, με αριθμό μητρώου 38402, φοιτητής του Τμήματος **Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής**, του **Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής** πριν αναλάβω την εκπόνηση της Πτυχιακής Εργασίας μου, δηλώνω ότι ενημερώθηκα για τα παρακάτω:

«Η Πτυχιακή Εργασία (Π.Ε.) αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο του συγγραφέα, όσο και του Ιδρύματος και θα πρέπει να έχει μοναδικό χαρακτήρα και πρωτότυπο περιεχόμενο.

Απαγορεύεται αυστηρά οποιοδήποτε κομμάτι κειμένου της να εμφανίζεται αυτούσιο ή μεταφρασμένο από κάποια άλλη δημοσιευμένη πηγή. Κάθε τέτοια πράξη αποτελεί προϊόν λογοκλοπής και εγείρει θέμα Ηθικής Τάξης για τα πνευματικά δικαιώματα του άλλου συγγραφέα. Αποκλειστικός υπεύθυνος είναι ο συγγραφέας της Π.Ε., ο οποίος φέρει και την ευθύνη των συνεπειών, ποινικών και άλλων, αυτής της πράξης.

Πέραν των όποιων ποινικών ευθυνών του συγγραφέα σε περίπτωση που το Ίδρυμα του έχει απονεμίσει Πτυχίο, αυτό ανακαλείται με απόφαση της Συνέλευσης του Τμήματος. Η Συνέλευση του Τμήματος με νέα απόφασης της, μετά από αίτηση του ενδιαφερόμενου, του αναθέτει εκ νέου την εκπόνηση της Π.Ε. με άλλο θέμα και διαφορετικό επιβλέποντα καθηγητή. Η εκπόνηση της εν λόγω Π.Ε. πρέπει να ολοκληρωθεί εντός τουλάχιστον ενός ημερολογιακού 6μήνου από την ημερομηνία ανάθεσης της. Κατά τα λοιπά εφαρμόζονται τα προβλεπόμενα στο άρθρο 18, παρ. 5 του ισχύοντος Εσωτερικού Κανονισμού.»

Ο Δηλών

Ημερομηνία



04/07/2019

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Αντωνία Μπάνου, του Θεοδώρου, με αριθμό μητρώου 38055 φοιτήτρια του Τμήματος **Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής**, του **Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής** πριν αναλάβω την εκπόνηση της Πτυχιακής Εργασίας μου, δηλώνω ότι ενημερώθηκα για τα παρακάτω:

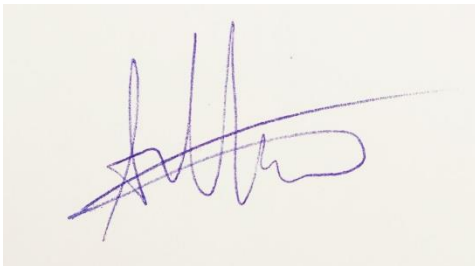
«Η Πτυχιακή Εργασία (Π.Ε.) αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο του συγγραφέα, όσο και του Ιδρύματος και θα πρέπει να έχει μοναδικό χαρακτήρα και πρωτότυπο περιεχόμενο.

Απαγορεύεται αυστηρά οποιοδήποτε κομμάτι κειμένου της να εμφανίζεται αυτούσιο ή μεταφρασμένο από κάποια άλλη δημοσιευμένη πηγή. Κάθε τέτοια πράξη αποτελεί προϊόν λογοκλοπής και εγείρει θέμα Ηθικής Τάξης για τα πνευματικά δικαιώματα του άλλου συγγραφέα. Αποκλειστικός υπεύθυνος είναι ο συγγραφέας της Π.Ε., ο οποίος φέρει και την ευθύνη των συνεπειών, ποινικών και άλλων, αυτής της πράξης.

Πέραν των όποιων ποινικών ευθυνών του συγγραφέα σε περίπτωση που το Ίδρυμα του έχει απονείμει Πτυχίο, αυτό ανακαλείται με απόφαση της Συνέλευσης του Τμήματος. Η Συνέλευση του Τμήματος με νέα απόφασης της, μετά από αίτηση του ενδιαφερόμενου, του αναθέτει εκ νέου την εκπόνηση της Π.Ε. με άλλο θέμα και διαφορετικό επιβλέποντα καθηγητή. Η εκπόνηση της εν λόγω Π.Ε. πρέπει να ολοκληρωθεί εντός τουλάχιστον ενός ημερολογιακού 6μήνου από την ημερομηνία ανάθεσης της. Κατά τα λοιπά εφαρμόζονται τα προβλεπόμενα στο άρθρο 18, παρ. 5 του ισχύοντος Εσωτερικού Κανονισμού.»

Η Δηλούσα

Ημερομηνία



04/07/2019

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ευχαριστίες μας στους καθηγητές κ. Παπουτσιδάκη Μιχαήλ και στον κ. Χατζόπουλο για τα εφόδια και την δυνατότητα που μας έδωσαν να εκπονήσουμε την παρούσα πτυχιακή εργασία με τίτλο "ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ 3D ΕΚΤΥΠΩΤΗ ΑΠΟ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΙΜΑ ΥΛΙΚΑ" αλλά και για την βοήθεια που μας παρείχαν στα πλαίσια αυτής.

Επίσης θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τους γονείς μας για την στήριξη και την υπομονή τους κατά την συγγραφή και την κατασκευή της παρούσας εργασίας.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους που μας παρείχαν τις ιδέες τους, την γνώμη τους και ορισμένα από τα ανακυκλώσιμα υλικά για την υλοποίηση του κατασκευαστικού μέρους.

Περίληψη

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι η κατασκευή ενός 3D εκτυπωτή με χαμηλό κόστος και χρήση ανακυκλώσιμων υλικών με στόχο την εκμάθηση της κατασκευής και χρήσης ενός 3D εκτυπωτή. Για τον λόγο αυτό για την τροφοδοσία του 3D εκτυπωτή θα χρησιμοποιήσουμε το τροφοδοτικό από έναν παλιό Η/Υ (350W) και για τους άξονες θα χρησιμοποιήσουμε τους βηματικούς κινητήρες (3 συνολικά) καθώς επίσης και τους άξονες από παλιά dvd player Η/Υ.

Ο 3D εκτυπωτής θα είναι ένας καρτεσιανός 3D εκτυπωτής με κίνηση της κεφαλής πάνω-κάτω (z άξονας), δεξιά-αριστερά (x άξονας) και κίνηση της βάσης εμπρός-πίσω (y άξονας). Κάθε άξονας θα έχει τερματοδιακόπτες (endstops) για το αυτόματη αρχικοποίηση αυτού. Ο 3D εκτυπωτής θα δουλεύει με την χρήση του μικροελεγκτή Arduino Mega 2560 Rev.3 και με χρήση του ανοικτού λογισμικού Marlin. Για τον έλεγχο της θερμοκρασίας, των endstops και λοιπόν εξαρτημάτων θα χρησιμοποιηθεί το Control Board Ramps 1.4 και για την οδήγηση των βηματικών κινητήρων 4 Driver 4988. Ο τέταρτος driver 4988 θα χρησιμοποιηθεί για την οδήγηση του κινητήρα Nema 17, όπου είναι και ο μόνος κινητήρας που χρειάζεται να αγοράσουμε, και χρειάζεται για την τροφοδότηση του extruder με το υλικό εκτύπωσης (PLA).

Η μελέτη αυτή είναι οδηγός κατασκευής 3D εκτυπωτή κατέχοντας βασικές γνώσεις αυτοματισμού, με υλικά από παλιές υπολογιστικές και ηλεκτρονικές συσκευές με χαμηλό κόστος, εύκολο στην κατασκευή και κατάλληλο για την κατασκευή μικρών διαστάσεων εκτυπώσεων καθώς και για εκπαιδευτικό σκοπό.

Λέξεις κλειδιά

3D printer, Arduino, Ανακυκλώσιμος

Abstract

This study aims on the construction of a low budget 3D printer, made mostly out of recyclable material, in order to learn how to construct and use a 3D printer. For this project there will be used parts of an old table computer, such us the power supply (350W). The axis and the motors will be extracted from 3 old dvd players from old PC units.

The printer of our study will be a Cartesian 3D printer. The z axis will move the head of the extractor (up/down movement). The x and y axis will use to move the base of the printing area (HBP) to the two dimensions (back/forth & left / right respectively). Every axis will be calibrated with the aid of endstops, that will automate the process. The 3D printer will function and connect with the PC with the microcontroller Arduino Mega Rev.3, via Marlin open source software. Control Board Ramps will control the temperature of the mechanical parts and the control of the four drivers, model used Diver 4988. The extra, forth, driver will be used for the motor Nema 17, which we will need to buy extra. The Nema 17 is responsible to feed the extruder with the PLA.

The study is a guide to construct a 3D printer based on basic automation knowledge, with reused components from old PC and electronic devices, all in low cost to purchase if needed. The 3D printer described is easy to create and perfect for small printing projects for hobby or educational reasons.

Keywords

3D printer, Arduino, recycle

Περιεχόμενα

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	ii
ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	iii
Ευχαριστίες.....	iv
Περίληψη.....	v
Λέξεις κλειδιά.....	v
Abstract	vi
Keywords.....	vi
Περιεχόμενα	vii
Πίνακας εικόνων	x
1 Εισαγωγή.....	1
2 Θεωρητικό πλαίσιο	2
2.1 3D Printing Ιστορική Αναδρομή.....	2
2.1.2 Εφαρμογές	5
2.1.3 Είδη 3Dεκτυπωτών.....	6
2.2 Fused Deposition Modeling (FDM)	8
3 Hardware	10
3.1 Εισαγωγή στο Hardware 3D εκτυπωτή.....	10
3.2 Μικροελεγκτής	10
3.3 Control Board	11
3.4 Stepper	12
3.5 Motor Drivers	14
3.6 Extruder.....	16
3.6.1 Cold End.....	16
3.6.2 Hot End	16
3.6.3 Nozzle	17
3.6.4 Bowden VS Direct Extruder	17

3.7	Endstops	20
3.8	Heated Build Platform (HBP)	21
3.9	Power Supply Unit (PSU)	22
3.10	Μηχανική Κατασκευή	24
3.10.1	Εισαγωγή στη Μηχανική Κατασκευή.....	24
3.10.2	Αποσυναρμολόγηση των DVD Players	25
3.10.3	Προετοιμασία των Βηματικών Κινητήρων των αξόνων.....	26
3.10.4	Δημιουργώντας τα πλαίσια του 3D Εκτυπωτή.....	28
3.10.5	Προετοιμασία αξόνων.....	29
3.10.6	Ολοκληρώνοντας το κάθετο πλαίσιο του 3D Εκτυπωτή	30
3.10.7	Ολοκληρώνοντας το οριζόντιο πλαίσιο του 3D Εκτυπωτή	32
3.10.8	Κατασκευή Θερμαινόμενης Βάσης Εκτυπωτή.....	33
3.10.9	Τοποθέτηση του Extruder.....	35
3.10.10	Τοποθέτηση των Endstops.....	36
3.10.11	Ολοκλήρωση Μηχανικής Κατασκευής	37
3.11	Κοστολόγηση	40
4	Software	42
4.1	Εισαγωγή στο Software	42
4.2	ArduinoIDE	42
4.3	Firmware	44
4.4	Cura.....	52
4.5	Pronterface.....	57
5	Αποσφαλμάτωση και Βαθμονόμηση (Debugging and Calibration).....	58
5.1	Γεωμετρική συμμετρία των αξόνων	58
5.2	Έλεγχος κατεύθυνσης των αξόνων	59
5.3	Έλεγχος κατεύθυνσης κινητήρων x, y, z	59
5.4	Βαθμονόμηση βημάτων κινητήρα Extruder (Extrusion)	60

5.5	Έλεγχος Σωστής λειτουργίας Endstops	61
5.6	Βαθμονόμηση των PID ελεγκτών.....	62
5.7	Bed leveling.....	63
5.8	Βαθμονόμηση βημάτων κινητήρων x, y, z	64
6	Επίλογος.....	69
7	Βιβλιογραφία.....	70

Πίνακας εικόνων

Εικόνα 1- Χρήσης 3D εκτυπωτών μέχρι το 2015.....	5
Εικόνα 2- Απεικόνιση Εκτύπωσης FDM 3D Printer	8
Εικόνα 3 - Arduino Mega 2560	10
Εικόνα 4 - ATmega2560 specifications	11
Εικόνα 5- Ramps 1.4.....	11
Εικόνα 6- Αριστερά: άξονας κίνησης Δεξιά: βηματικός κινητήρας Nema 1.7.....	13
Εικόνα 7 - A4988 motor driver.....	14
Εικόνα 8 - Συνδεσμολογία motor driver A4988.....	15
Εικόνα 9 - Microstep Resolution	15
Εικόνα 10 – Cold End	16
Εικόνα 11 – Hot End.....	17
Εικόνα 12 - Αριστερά: Bowden Extruder Δεξιά: Direct Extruder	18
Εικόνα 13 - Endstops	20
Εικόνα 14 – Mechanical endstop and pcb board with led indication	20
Εικόνα 15 – Heated Bed Platform (HBP)	21
Εικόνα 17 - Αποσυναρμολόγηση DVD player.....	25
Εικόνα 18 - Άξονες	26
Εικόνα 19 – Motor pins.....	27
Εικόνα 20 – Κόλληση κινητήρα σε pins	27
Εικόνα 21 – Τοποθέτηση y άξονα σε βάση	28
Εικόνα 22 – Τοποθέτηση x άξονα σε βάση	29
Εικόνα 23 – Ολοκλήρωση τοποθέτησης αξόνων	29
Εικόνα 24 – Κομμάτια ενίσχυσης αξόνων	30
Εικόνα 25 – Απεικόνιση μεταλλικής ενίσχυσης αξόνων	30
Εικόνα 26 – Μέγεθος συνδετικού κομματιού κάθετου πλαισίου	31
Εικόνα 27 - Συνδετικό κομμάτι κάθετου πλαισίου.....	31
Εικόνα 28 – Ετοιμασία σύνδεσης Hot End με ζάξονα.....	31
Εικόνα 29 - Σύνδεση Hot End με ζάξονα.....	32
Εικόνα 30 – Προετοιμασία τοποθέτησης θερμαινόμενης βάσης σε γάξονα	32
Εικόνα 31 – Κατασκευή θερμαινόμενης βάσης	33
Εικόνα 32 – Υλικά κατασκευής θερμαινόμενης βάσης.....	35
Εικόνα 33 – Συναρμολόγηση θερμαινόμενης βάσης.....	35

Εικόνα 34 - Extruder.....	36
Εικόνα 35 – Μεταλλικό πλέγμα στήριξης αξόνων	37
Εικόνα 36– Τοποθέτηση endstops	37
Εικόνα 37 – Συνδεσμολογία Ramps 1.4	38
Εικόνα 38 – Ramps 1.4schematics	39
Εικόνα 39 – Τοποθέτηση των Thermistorsσε Ramps 1.4	39
Εικόνα 40 - Τοποθέτηση των Endstopsσε Ramps 1.4.....	40
Εικόνα 41 – Σύνδεση Arduinoμε υπολογιστή μέσω λογισμικού	43
Εικόνα 42 – Upload κώδικα σε Arduino	44
Εικόνα 43 – Marlin software	45
Εικόνα 45 – Ρύθμιση Baudrate.....	46
Εικόνα 46 – Ορισμός Extruders και τροφοδοτικού	46
Εικόνα 47 – Ορισμός αισθητηρίων θερμοκρασίας.....	47
Εικόνα 48 – Ρύθμιση Extruder	48
Εικόνα 49 – Ρυθμίσεις PID	49
Εικόνα 50 – Ρυθμίσεις PID	49
Εικόνα 51 – Ρύθμιση Endstops.....	49
Εικόνα 52 – Ρύθμιση ελάχιστης ταχύτητας βηματικού κινητήρα	50
Εικόνα 53 – Ρύθμιση κίνησης κινητήρων	51
Εικόνα 54 – Ρύθμιση Home positioning	51
Εικόνα 55 – Cura, δήλωση εκτυπωτή	53
Εικόνα 56 – Cura, ρύθμιση εκτυπωτή.....	53
Εικόνα 57 – Cura, ρύθμιση Extruder	54
Εικόνα 58 – Cura, εύρεση τρεχόντων ρυθμίσεων	55
Εικόνα 60 – Ρύθμιση κατεύθυνσης κινητήρων	59
Εικόνα 62 – Βήματα κινητήρα κώδικα με πραγματικά	60
Εικόνα 63 – Έλεγχος ορθή λειτουργίας Endstop.....	62
Εικόνα 64 – ΒαθμονόμησηPIDελεγκτών.....	63
Εικόνα 65 – Παράθυρο ένδειξης θερμοκρασιών Hotend.....	63
Εικόνα 66 – Εκτύπωση, Βήμα πρώτο	66
Εικόνα 67 – Εκτύπωση, βήμα δεύτερο	66
Εικόνα 68 - Εκτύπωση, βήμα τρίτο	67
Εικόνα 69- Εκτύπωση, βήμα	67
Εικόνα 70 - Οι διαστάσεις του κύβου βαθμονόμησης μετά την εύρεση του ακριβή ρυθμού	

βημάτων του κάθε κινητήρα..... 68

1 Εισαγωγή

Οι 3D εκτυπωτές είναι το μέλλον του Αυτοματισμού όσο αφορά τον σχεδιαστικό και κατασκευαστικό τομέα. Πρόκειται για μία πρόσφατη εφεύρεση, με μέλλον που συνεχώς αναπτύσσεται και εξελίσσεται με διευρυμένες δυνατότητες παραγωγής σε πάρα πολλούς τομείς, από κατασκευή απλών εξαρτημάτων, πολύπλοκων κατασκευών, μέχρι και ζωτικών οργάνων. Παρακολουθώντας τα τελευταία χρόνια την πορεία του, θελήσαμε να μελετήσουμε τις αρχές της κατασκευής ενός βασικού μοντέλου, από οικιακά και ανακυκλώσιμα υλικά. Σκοπός μας είναι η μελέτη και η επιτυχία κατασκευής και λειτουργίας του 3d εκτυπωτή από ανακυκλώσιμα μέρη και άλλα χαμηλού κόστους για τη μελέτη και την διασκέδασή μας παράλληλα.

Από παρακάτω μελέτη, μπορεί κάποιος να αποκομίσει πληροφορίες για την λειτουργία ενός βασικού μοντέλου 3d εκτυπωτή, όπως και να το αναπαράγει. Όπως θα ανακαλύψει ο αναγνώστης, πρόκειται για μία πολύπλοκη κατασκευή, που με βασικές γνώσεις αυτοματισμού είναι κατανοητή και βατή στην κατασκευή και ίσως εξέλιξη αυτού.

2 Θεωρητικό πλαίσιο

Οι 3D εκτυπωτές είναι μηχανήματα που κατασκευάζουν αντικείμενα τριών διαστάσεων σε στρώσεις υλικού μέσω υπολογιστικού ελέγχου. Η λογική του 3D εκτυπωτή, είναι ο σχεδιασμός ενός γεωμετρικού μοντέλου, το οποίο το πρόγραμμα το τέμνει σε στρώσεις (layers), δίνεται η εντολή στον εκτυπωτή και κατασκευάζει το αντικείμενο ανά στρώσεις, ξεκινώντας από τη βάση την οποία ορίζει ο χρήστης. Οι εντολές για την κατασκευή γεωμετρικών αντικειμένων δίνονται μέσω σχεδιαστικών προγραμμάτων, όπως το CAD ή AMF αρχείων. Σε πολλές περιπτώσεις που το τελικό αντικείμενο είναι πολύπλοκο, ο σχεδιαστής εκτυπώνει τμήματα τα οποία στο τέλος ενώνονται και παίρνουν την τελική μορφή.

Τα τελευταία χρόνια, ο 3D εκτυπωτής έχει γίνει γνωστός στο ευρύτερο κοινό, και πλέον τον συναντάμε σε γραφεία φοιτητών, εργαστήρια σχολών, στη βιομηχανία και αποτελεί βασικό εργαλείο για ερασιτέχνες ή και ως χόμπι.

2.1 3D Printing Ιστορική Αναδρομή

Η αρχική προσέγγιση στην ιδεολογία του 3D εκτυπωτή έγινε το 1980 από τον Ιάπωνα Dr Hideo Kodama του Nagoya Industrial Research Institute. Ο Dr Kodama ήταν ο πρώτος που φαντάστηκε και περιέγραψε την κατασκευή 3D μοντέλων μέσω πολλαπλών στρώσεων από φωτοευαίσθητη ρητίνη που πολυμερίζεται από UV φως. Δεν κατάφερε όμως να κατοχυρώσει την πατέντα ευρεσιτεχνίας εγκαίρως (Wikipedia, 2019).

Τον Ιούλιο του 1984, οι Γάλλοι Alain Le Mahaute, Oliverde Witte και Jean Claude Andre, κατοχύρωσαν την πατέντα του κατασκευαστικού συστήματος στερεολιθογραφίας (SLA). Η πατέντα αυτή εγκαταλείφθηκε άμεσα, καθώς δεν θεωρήθηκε ότι υπάρχει προοπτική χρήσης της στην αγορά. Λίγο καιρό αργότερα, ο Charles Hull από την εταιρεία 3D Systems Corporation κατοχύρωσε νέα πατέντα κατασκευαστικού συστήματος στερεολιθογραφίας (SLA – Stereolithographic apparatus), στην οποία στρώσεις υλικού προστίθενται με την έκθεση των πολυμερών υλικών σε υπεριώδεις ακτίνες λέιζερ και στερεοποιούνται. Το 1987 εισήγαγε την SLT μορφή αρχείων στερεολιθογραφίας και την ψηφιακή τομή αντικειμένων, η οποία αποτελεί βάση της σχεδίασης μέχρι και σήμερα στους σύγχρονους 3D εκτυπωτές. Αν και οι εκτυπωτές αυτού του τύπου έχουν τη δυνατότητα να κατασκευάζουν πολύπλοκα αντικείμενα και με ταχύτητα, είναι απαγορευτικά ακριβοί για οικιακή χρήση (Wikipedia,

2019) (wiki).

Επιγραμματικά θα αναφερθούμε στην ιστορία των 3D εκτυπωτών:

1992 – Η 3D Systems εταιρεία κατασκεύασε την πρώτη ολοκληρωμένη SLA μηχανή, που κατασκεύαζε αντικείμενα τριών διαστάσεων σε στρώσεις. Η μηχανή δεν ήταν ακόμα τέλεια, αλλά είχε προοπτικές βελτίωσης.

1999 – Οι 3D εκτυπωτές άρχισαν να χρησιμοποιούνται στην Ιατρική για την κατασκευή μηχανικών οργάνων. Οι επιστήμονες στο Wake Forest Institute for Regenerative Online Pharmacy Medicine σχεδίασαν και κατασκεύασαν το πρώτο όργανο κατασκευασμένο σε εργαστήριο με τη χρήση 3D εκτυπωτή.

2002 – Πάλι στον τομέα της ιατρικής, επιστήμονες κατασκεύασαν τον πρώτο μικρού μεγέθους λειτουργικό νεφρό, που μπορούσε να φιλτράρει αίμα και να παράγει αραιωμένα ούρα σε ζώο. Αυτή ήταν μια επιτυχημένη αρχή της μετέπειτα κατασκευής οργάνων και ιστών.

2005 – Ο Dr. Adrian Bowyer ίδρυσε την RepRap, μια open-source πρωτοβουλία με την οποία δημιουργήθηκε ένας 3D εκτυπωτής που μπορούσε να κατασκευάζει μόνος του τα περισσότερα μηχανικά του μέρη. Σκοπός ήταν να κινηθούν στην αγορά φθηνές RepRap μονάδες, ώστε ο καθένας να δημιουργεί δικά του προϊόντα.

2006 – Κατασκευάζεται η πρώτη μηχανή τύπου SLS (Selective Laser Sintering). Οι SLS μηχανές χρησιμοποιούν laser για να λιώνουν υλικά και να χτίζουν 3D μοντέλα. Τον ίδιο χρόνο, κατασκευάστηκε μια μηχανή που μπορούσε να εκτυπώσει με ποικιλία υλικών, ελαστομερή και πολυμερή αλλά και με υλικά με διαφορετική πυκνότητα.

2008 – Κυκλοφόρησε ο πρώτος εκτυπωτής που κατασκεύαζε αντίγραφο του εαυτού του. Την ίδια χρονιά, δημιουργήθηκε το πρώτο προσθετικό πόδι, φτιαγμένο εξ' ολοκλήρου από 3D εκτυπωτή, μια μοναδική πολύπλοκη κατασκευή (πόδι, γόνατο και βάση) που κατασκευάστηκε σε μία τύπωση/σχεδιασμό.

2009 – DIY 3D εκτυπωτές κυκλοφόρησαν στην αγορά. Την ίδια χρονιά κατασκευάστηκε το πρώτο αγγείο αίματος μέσω 3D bioprinter από τον Dr. Gabor Forgacs.

2010 – Μηχανικοί του University of Southampton σχεδίασαν και πραγματοποίησαν πτήση με το πρώτο εκτυπωμένο αεροσκάφος. Το κατασκεύασαν σε 7 ημέρες, με κόστος £5,000.

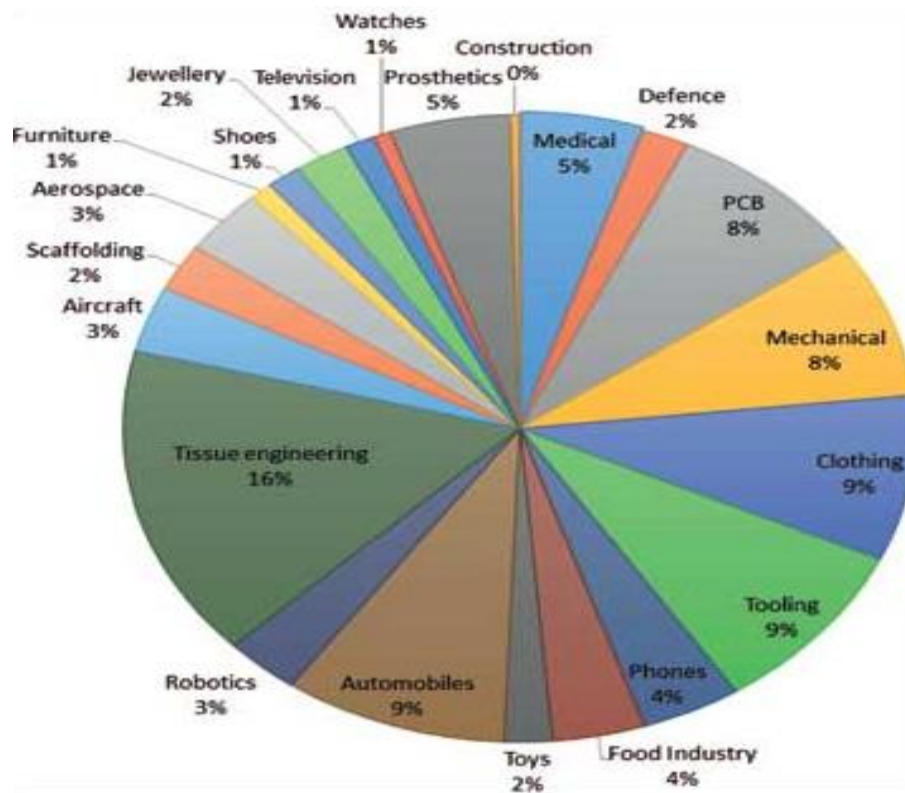
2011 – Κατασκευάστηκε το πρώτο αμάξι, το Urbee. Τον ίδιο χρόνο, δίνεται η δυνατότητα εκτύπωσης με υλικά όπως 14K χρυσό και ασήμι, ως μία οικονομική λύση για κατασκευαστές κοσμημάτων.

2012 – Στην Ολλανδία κατασκευάζεται τριών διαστάσεων προσθετικός κάτω σιαγόνας ως εμφύτευμα για μία 83-άχρονη γυναίκα που έπασχε από χρόνια μόλυνση των οστών.

2017 – Κατασκευάστηκε η πρώτη 3D εκτυπωμένη προπέλα πλοίου. Τα αντικείμενα που μπορεί να εκτυπώσει ένας 3D εκτυπωτής διακυμαίνονται από κάτι τεραστίων διαστάσεων, όπως μια προπέλα πλοίου, μέχρι και εκτύπωση σε πάχος μιας ανθρώπινης τρίχας. Οι 3D εκτυπωτές μηδενικής βαρύτητας της NASA εκτυπώνουν σχεδόν τα πάντα, από φαγητό μέχρι και μέρη κατασκευής πύραυλου.

2.1.2 Εφαρμογές

Οι εφαρμογές των 3D εκτυπωτών είναι πλέον άπειρες. Τα τελευταία χρόνια η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει αναπτυχθεί ραγδαία και σε βαθμό που συμβάλλει στην κατασκευή απείρων αντικειμένων με χαμηλότερο κόστος σε πολλές περιπτώσεις. Επίσης χρησιμοποιείται για ειδικές και πολύπλοκες κατασκευές και είναι κατάλληλη και για αναλώσιμα αντικείμενα χαμηλών προδιαγραφών (όπως διακοσμητικές προσόψεις κ.α.). Αξιοσημείωτη είναι η συμβολή σε σημαντικούς τομείς, όπως η ιατρική, με καινοτόμες κατασκευές που πλέον έχουν αλλάξει το μέλλον. Βασικές εφαρμογές των 3D εκτυπωτών είναι στον κατασκευαστικό τομέα, ιατρική, αρχιτεκτονική και ειδικές κατασκευές τέχνης και διακόσμησης, ακόμα και στην κατασκευή άλλων 3D εκτυπωτών.



Εικόνα 1- Χρήσης 3D εκτυπωτών μέχρι το 2015

- (1) (πηγή: Modern 3D Printing Technologies: Future Trends and Developments των Om P. Singh, Sheikh. M. Ahmed, M Abhilash)

Ακόμα δεν είναι εφικτή η μαζική παραγωγή τρισδιάστατων κατασκευών, λόγω και της χρονοβόρας διαδικασίας, αλλά οι εκτυπωτές είναι ακόμα υπό ανάπτυξη και πρόκειται για ένα τομέα πολλά υποσχόμενο για το άμεσο μέλλον.

2.1.3 Είδη 3Dεκτυπωτών

Μετά από έρευνα, καταγράψαμε 9 βασικά είδη 3D εκτυπωτών:

1. Stereolithography (SLA)

Vat Polymerization (πολυμερισμός δεξαμενής) είναι η διαδικασία όπου το φωτο-πολυμερές υλικό τοποθετείται σε μία δεξαμενή και υφίσταται επιλεκτική σκλήρυνση από μία πηγή φωτός. Η στερεολιθογραφία είναι η πρώτη τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης. Υλικά: Φωτοπολυμερή ρητίνη

2. Digital Light Processing (DLP)

Οι εκτυπωτές DLP είναι σχεδόν πανομοιότυποι με τους SLA. Η βασική διαφορά είναι ότι οι DLP εκτυπωτές είναι πιο γρήγοροι και χρησιμοποιούν ένα ψηφιακό προβολέα φωτός για να απεικονίσουν στιγμιαία μία εικόνα από κάθε στρώση (layer) (ή πολλαπλές για μεγαλύτερα μέρη) και δημιουργεί τις στρώσεις από επιμέρους voxels (μικρά τετραγώνια υλικού λόγω των pixel της απεικόνισης). Υλικά: Φωτοπολυμερή ρητίνη

3. Fused Deposition Modeling (FDM) or Fused Filament Fabrication (FFF)

Οι πιο συνηθισμένες μηχανές εκτύπωσης, και πιο οικονομικές, είναι οι εκτυπωτές εκβολής υλικού. Η εκτύπωση γίνεται με την εκβολή (extrusion) του θερμοπλαστικού υλικού (PLA, ABS, PET, TPU) από τη θερμαινόμενη κεφαλή, η οποία λιώνει το υλικό και το εκβάλλει στη βάση εκτύπωσης. Η κεφαλή κινείται πάνω από τη βάση σύμφωνα με τις συντεταγμένες του σχεδίου και δημιουργεί το μοντέλο σε στρώσεις. Καθώς το υλικό παγώνει, στερεοποιείται και δημιουργείται το μοντέλο.

4. Selective Laser Sintering (SLS)

Οι εκτυπωτές αυτοί δημιουργούν ένα αντικείμενο με την τεχνολογία Power Bed Fusion και πολυμερή σκόνη. Θερμαίνεται ο κάδος με την πολυμερή σκόνη σε θερμοκρασία πριν την τήξη του υλικού και μια λεπίδα τοποθετεί μία πολύ μικρή στρώση υλικού στην πλατφόρμα κατασκευής. Μία ακτίνα laser στερεοποιεί το υλικό στα σημεία σχεδίασης του αντικειμένου. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε στρώση. Οι SLS εκτυπωτές γίνονται ευρέως γνωστοί λόγω του χαμηλού κόστους παραγωγής. – Υλικά: Θερμοπλαστική σκόνη

5. Metal Powder Bed Fusion:

Ανάγεται σε τρία είδη εκτυπωτών: Selective Laser Melting (SLM), Direct Metal Laser Sintering (DMLS) και Electron Beam Melting (EBM)

Πρόκειται για μία διαδικασία εκτύπωσης που παράγει συμπαγή υλικά με τη χρήση θερμικής

πηγής για την σύντηξη μορίων της μεταλλικής σκόνης, ανά στρώση. Υλικά: Μεταλλική σκόνη Αλουμινίου, Ατσαλιού, Τιτανίου

Βασικές Διαφοροποιήσεις εκτυπωτών MPBF:

- Selective Laser Melting (SLM) , εκτύπωση με παρόμοια τεχνική SLS αλλά για μέταλλα.
- Direct Metal Laser Sintering (DMLS), εκτύπωση με παρόμοια τεχνική SLS αλλά για μέταλλα.
- Electronic Beam Melting (EBM), χρήση ακτίνας υψηλής ενέργειας ή ηλεκτρόνια για την σύντηξη των μορίων της μεταλλικής σκόνης.

6. Laminated Object Manufacturing (LOM)

Πρόκειται για ένα ταχύ πρωτότυπο σύστημα τρισδιάστατης εκτύπωσης που συντήκει ή πλαστικοποιεί στρώσεις πλαστικού ή χαρτιού με την παράλληλη χρήση της θερμότητας και της πίεσης. Στο τέλος κάθε εκτύπωσης ανά στρώση, ο εκτυπωτής φέρνει ένα καινούριο φύλλο υλικού πάνω από την προηγούμενη στρώση και εκτυπώνει με τον προαναφερόμενο τρόπο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί το μοντέλο εκτύπωσης. Εκτυπωτής χαμηλού κόστους υλικών. Υλικά: Πλαστικό, χαρτί

7. Binder Jetting (BJ) – metal or sand

Binder Jetting είναι η διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης, κατά την οποία ένα υγρό μέσο συγκόλλησης «δένει» τα σημεία της στρώσης του μοντέλου στην επιφάνεια της βάσης που περιέχει τη σκόνη υλικού εκτύπωσης. Υλικά: Σκόνη μετάλλου ή άμμου

8. Material Jetting (MJ)

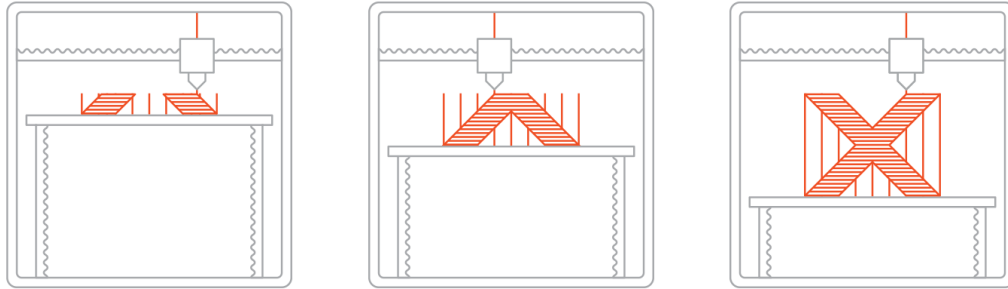
Οι MJ εκτυπωτές λειτουργούν όπως ένας κλασικός inject εκτυπωτής, με τη διαφορά ότι αντί για μία στρώση μελανιού, χτίζονται πολλαπλές στρώσεις από εκατοντάδες σταγονίδια φωτοπολυμερούς υλικού, η μία πάνω στην άλλη, και στερεοποιούνται με υπεριώδες (UV) φως. Οι MJ εκτυπωτές μπορούν να κατασκευάσουν πολλαπλά υλικά ταυτόχρονα, χωρίς να επηρεαστεί η ταχύτητα εκτύπωσης. Υλικά: Φωτοπολυμερή ρητίνη

9. Drop on Demand (DOD)

DOD εκτυπωτές λειτουργούν με τη χρήση ενός ζεύγους κεφαλών εκτόξευσης μελανιών. Η μία αποθηκεύει τα δομικά υλικά κέρινης μορφής, και η δεύτερη χρησιμοποιείται για το διαλυτικό υλικό υποστήριξης. Όπως όλοι οι εκτυπωτές, ο DOD printer εκτυπώνει σε στρώσεις το μοντέλο, αλλά χρησιμοποιεί και ένα πριτσίνι που ελέγχει την εκτυπωμένη περιοχή για ανωμαλίες, πριν από κάθε νέα στρώση. Υλικά: Φωτοπολυμερή ρητίνη

2.2 Fused Deposition Modeling (FDM)

Στην παρακάτω εργασία θα αναλυθεί η κατασκευή και λειτουργία ενός οικιακού FDM 3D εκτυπωτή, από οικονομικά υλικά και υλικά από παλιούς υπολογιστές.



Εικόνα 2- Απεικόνιση Εκτύπωσης FDM 3D Printer

Η βασική λειτουργία των εκτυπωτών εκβολής υλικού είναι ότι λιώνουν και προάγουν το θερμοπλαστικό υλικό στη βάση εκτύπωσης και τυπώνουν layer-upon-layer σε τρεις διαστάσεις (μήκος x , πλάτος y , ύψος z). Η εκτύπωση τριών διαστάσεων επιτυγχάνεται με την κίνηση της κεφαλής εκτύπωσης (όπως οι παραδοσιακοί inkjet εκτυπωτές, αλλά με μία επιπλέον διάσταση z), με την κίνηση της κεφαλής και της βάσης εκτύπωσης, και θεωρητικά με την κίνηση μόνο της βάσης (αλλά πρακτικά ανεβαίνει ο χρόνος και το κόστος κατασκευής κατά πολύ σε αυτή τη περίπτωση). Η κίνηση της κεφαλής ή/και της βάσης επιτυγχάνεται με την χρήση αξόνων, στην περίπτωσή μας άξονες από παλιά dvd players αφού χρησιμοποιούμε υλικά από παλιά μέρη υπολογιστών. Όλα αυτά στηρίζονται σε ειδικά διαμορφωμένες βάσεις, από τις υπάρχουσες βάσεις των dvd players που ήδη χρησιμοποιούμε. Καλώδια συνδεδεμένα στα μηχανικά μέρη του εκτυπωτή μεταφέρουν πληροφορίες και ρεύμα μέσω του μικροελεγκτή, του εγκεφάλου της κατασκευής από τον συνδεδεμένο υπολογιστή. Μέσω κατάλληλων προγραμμάτων στον υπολογιστή όπου είναι συνδεδεμένος ο μικροελεγκτής, γίνεται η διαχείριση και μεταφορά πληροφοριών εκτύπωσης, οι μετρήσεις, κατανομή ρεύματος, παραμετροποίηση, βαθμονόμηση και όλες οι υπόλοιπες σημαντικές λειτουργίες.

Λειτουργία

Οι 3D εκτυπωτές εκβολής υλικού είναι οι πιο οικονομικοί από την οικογένεια τρισδιάστατων

εκτυπωτών, και οι πιο κοινοί στην αγορά και εύκολοι στην κατασκευή. Για την εκτύπωση ενός δείγματος/μοντέλου, αρχικά φορτώνεται το σχέδιο εκτύπωσης από το εκάστοτε πρόγραμμα, εφόσον έχουν γίνει οι απαραίτητες παραμετροποιήσεις και έλεγχοι προηγουμένως, στον μικροελεγκτή του εκτυπωτή (μέσω usb, δικτύου κτλ.). Από τον μικροελεγκτή δίνεται σήμα στους άξονες να τοποθετήσουν την κεφαλή (ή και τη βάση ανάλογα την κατασκευή) στο σημείο εκκίνησης της εκτύπωσης. Η κεφαλή πλέον προάγει το θερμοπλαστικό υλικό, στο οποίο έχει ήδη τοποθετηθεί κατά την προετοιμασία του εκτυπωτή στην κεφαλή, extrusion head, προς το nozzle. Το nozzle θερμαίνεται στην επιθυμητή θερμοκρασία ώστε να λιώσει το υλικό και να δημιουργήσει το πρώτο layer, καθώς κινείται πάνω από τη βάση. Καθώς λιώνει και προωθείται (extrusion) το υλικό, ο εκτυπωτής μετακινεί μέσω των αξόνων την κεφαλή (ή και τη βάση) σύμφωνα με τις συντεταγμένες του σχεδίου που έχουμε φορτώσει νωρίτερα μέσω προγράμματος στον μικροελεγκτή του εκτυπωτή. Αυτό επαναλαμβάνεται ανά στρώση (layer-upon-layer) μέχρι να ολοκληρωθεί το τρισδιάστατο αντικείμενο εκτύπωσης. Ανάλογα με τη γεωμετρία του αντικειμένου μπορεί να χρειαστεί δομές στήριξης, τα οποία θα αφαιρεθούν μετά το πέρας της εκτύπωσης και εφόσον έχει παγώσει και στερεοποιηθεί το υλικό μας. Το μέγεθος εκτύπωσης είναι ανάλογο με τις δυνατότητες του εκάστοτε εκτυπωτή, και συγκεκριμένα από την εμβέλεια των αξόνων και το μέγεθος της βάσης εκτύπωσης. Επίσης, υπάρχει πληθώρα επιλογής χρωμάτων του εκτυπώσιμου υλικού.

3 Hardware

3.1 Εισαγωγή στο Hardware 3D εκτυπωτή

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει αναφορά στο hardware του 3D εκτυπωτή. Θα αναλυθούν όλα τα μέρη από τα οποία αποτελείται ο εκτυπωτής και τον σκοπό που επιτελεί το καθένα. Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί ο τρόπος κατασκευής ενός 3D εκτυπωτή, βήμα προς βήμα, καθώς και η συνδεσμολογία των επιμέρους εξαρτημάτων. Σκοπός του κεφαλαίου είναι η κατανόηση της χρησιμότητας και της λειτουργίας των επιμέρους εξαρτημάτων και η εκμάθηση κατασκευής ενός 3D εκτυπωτή.

3.2 Μικροελεγκτής

Ο μικροελεγκτής είναι ο εγκέφαλος του εκτυπωτή. Μέσω αυτού τρέχει ο κώδικας (firmware) για την λειτουργία του 3D εκτυπωτή. Είναι το πιο βασικό κομμάτι για την λειτουργία του εκτυπωτή, καθώς χωρίς αυτόν όλα τα υπόλοιπα εξαρτήματα δεν θα μπορούσαν να συνεργαστούν και να δουλέψουν σαν ένα ολοκληρωμένο σύστημα. Το firmware που εκτελείται μέσω του μικροελεγκτή είναι αυτό που συγχρονίζει όλα τα εξαρτήματα για την σωστή ολοκληρωμένη λειτουργία τους.



Εικόνα 3 - Arduino Mega 2560

Στην εργασία αυτή σαν μικροελεγκτής θα χρησιμοποιηθεί το Arduino Mega 2560. Όπως αναφέρεται και από το επίσημο site, έχει συνολικά 54 ψηφιακές εισόδους/εξόδους και παρέχει δύο τρόπους τροφοδοσίας, είτε μέσω usb (5V) σε σύνδεση με Η/Υ είτε μέσω ενός προσαρμογέα από εναλλασσόμενη σε συνεχή τάση (7V – 12V) για stand-alone λειτουργία.

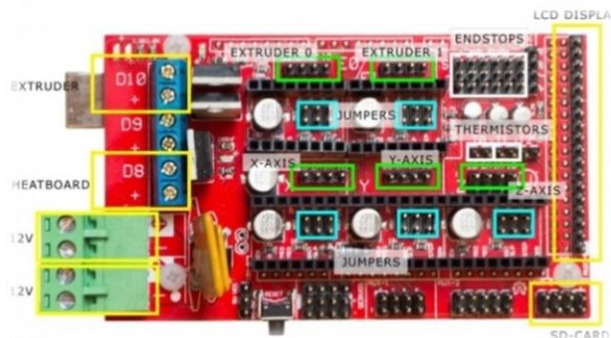
Στην περίπτωση που εξετάζουμε δεν χρειάζεται επιπλέον τροφοδοσία καθώς το συνδέουμε κατευθείαν στον υπολογιστή και παίρνει την τροφοδοσία που χρειάζεται για την λειτουργία του μέσω του usb (5V) του Η/Υ.

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 15 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	20 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
LED_BUILTIN	13
Length	101.52 mm
Width	53.3 mm
Weight	37 g

Εικόνα 4 - ATmega2560 specifications

3.3 Control Board

Για την κατασκευή του 3D εκτυπωτή θα χρειαστεί να συνδεθούν πολλά ηλεκτρονικά εξαρτήματα μεταξύ τους όπως motor drivers, κάποια thermistors, ορισμένα endstops κλπ. Για να επιτευχθεί αυτό, χωρίς να χρειαστεί να κατασκευάσουμε κάποια δική μας πλακέτα από την αρχή, θα χρησιμοποιηθεί ένα έτοιμο Control Board και πιο συγκεκριμένα το Ramps 1.4 καθώς είναι πλήρως συμβατό με το Arduino Mega 2560.

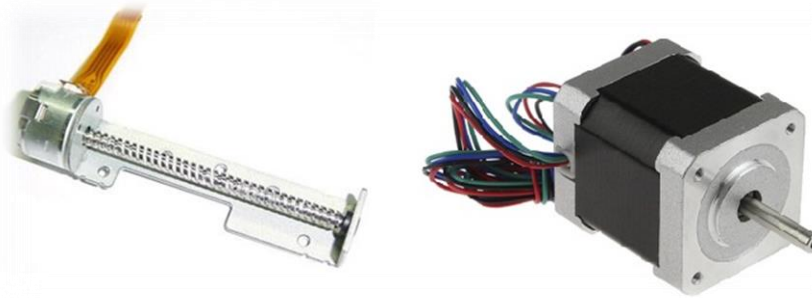


Εικόνα 5- Ramps 1.4

Το ramps 1.4 είναι ένα κύκλωμα, μια πλακέτα ελέγχου που προσαρμόζεται σαν επέκταση πάνω στο Arduino φτιαγμένη ειδικά για την κατασκευή 3D εκτυπωτών. Σκοπός της είναι η τροφοδοσία των επιμέρους εξαρτημάτων του εκτυπωτή και έχει ξεχωριστή τροφοδοσία από το Arduino. Το ramps 1.4 έχει δύο εισόδους τροφοδοσίας, μία είσοδος τροφοδοτείται από τάση 12V και μπορεί να παρέχει ρεύμα πάνω από 5A, όπου παρέχει τροφοδοσία στους κινητήρες στον extruder αλλά και στα υπόλοιπα εξαρτήματα του εκτυπωτή, και μία δεύτερη τροφοδοσία τάσεως 12V που μπορεί να παρέχει ρεύμα πάνω από 11A (δευτερεύουσα) όπου παρέχει τροφοδοσία στη θερμαινόμενη βάση (heat bed) αν αυτή υπάρχει. Το ramps 1.4 μπορεί να δουλέψει ικανοποιητικά με μια τροφοδοσία 12V αν δεν υπάρχει θερμαινόμενη βάση στον εκτυπωτή και χρειάζεται διπλή τροφοδοσία αν αυτή υπάρχει. Μπορεί να υποστηρίξει μέχρι 5 motor drivers και έως 6 βηματικούς κινητήρες. Έναν για τον x άξονα, έναν για τον y άξονα, 2 για τον z άξονα οι οποίοι δουλεύουν παράλληλα καθώς προσαρμόζονται σε έναν κοινό motor driver (οδηγό κινητήρα), και 2 για τους extruder, με αποτέλεσμα ο εκτυπωτής να μπορεί να υποστηρίξει μέχρι δύο κεφαλές εκτύπωσης. Επίσης υπάρχουν έτοιμες υποδοχές για τα endstops που θα μπουν σε κάθε άξονα (μέχρι και έξι, τρία το λιγότερο). Υπάρχουν υποδοχές για να μπορεί να υποστηρίξει οθόνη και sd-card για stand-alone χρήση του εκτυπωτή, χωρίς να είναι απαραίτητη η δέσμευση του υπολογιστή (στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να υπολογιστεί μία επιπλέον τροφοδοσία 7 – 12V για το Arduino). Επιπλέον υπάρχουν Pins για την προσάρτηση fans (ανεμιστηράκια) για την ψύξη των κινητήρων του εκτυπωτή ή και του μοντέλου που εκτυπώνεται όποτε χρειάζεται. Επίσης περιλαμβάνει μέχρι 3 pins για αισθητήρια θερμοκρασίας και επιπλέον ελεύθερα pins για άλλες προσθήκες.

3.4 Stepper

Οι βηματικοί κινητήρες είναι αυτοί που προσδίδουν την κίνηση στους άξονες του εκτυπωτή. Υπάρχουν πολλοί τύποι βηματικών κινητήρων στην αγορά αλλά στην προκειμένη περίπτωση θα χρησιμοποιηθούν οι δύο παραπάνω όπως παρουσιάζονται στην εικόνα. Στα αριστερά απεικονίζονται οι βηματικοί κινητήρες που υπάρχουν μέσα στα dvd players και στα δεξιά ένας Nema 17.



Εικόνα 6- Αριστερά: άξονας κίνησης Δεξιά: βηματικός κινητήρας Nema 1.7

Για την κατασκευή του 3D εκτυπωτή θα χρειαστούν συνολικά 4 βηματικοί κινητήρες, 3 για την λειτουργία των αξόνων και ένας για την λειτουργία του extruder. Για τους άξονες θα χρησιμοποιηθούν οι βηματικοί κινητήρες που υπάρχουν στα dvd players των desktop υπολογιστών. Για τον extruder θα χρειαστεί να γίνει αγορά ενός κινητήρα Nema 17. Το 17 παραπέμπει στο μέγεθος του βηματικού κινητήρα μήκος x πλάτος (1.7 inchx 1.7 inch). Γενικά ο βηματικός κινητήρας που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να έχει κατά προσέγγιση τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- ✓ 1.5A to 1.8A current per phase
- ✓ 1-4 volts
- ✓ to 8 mH inductance per phase
- ✓ 44 N·cm (62oz·in, 4.5kg·cm) or more holding torque
- ✓ 1.8 or 0.9 degrees per step (200/400 steps/rev respectively)

Είναι απαραίτητοι τουλάχιστον 5 dvd player τεχνολογίας SATA (Τα dvd players τεχνολογίας IDE δεν δουλεύουν με βηματικούς κινητήρες αλλά με dc κινητήρες) τα οποία μπορούν να βρεθούν σε παλιούς υπολογιστές είτε να αγοραστούν μέσω ebay αν βρεθεί μια καλή προσφορά είτε από κάποιο κατάστημα της περιοχής μας που πουλάει εξαρτήματα υπολογιστών. Πολύ βασικό είναι ότι τα dvd players δεν είναι απαραίτητο να είναι πλήρως λειτουργικά καθώς ο εσωτερικός μηχανισμός laser που διαβάζει τα dvd δεν μας χρειάζεται. Το μόνο που είναι απαραίτητο είναι να ανοίγει το πορτάκι. Μόνο ο βηματικός κινητήρας θα φανεί χρήσιμος και ο σκελετός που θα είναι προσαρτημένος πάνω, οπότε και να μην είναι λειτουργικά είναι δυνατή η αγορά τους και σε πιο προσιτή τιμή. Ωστόσο στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί πως ο λόγος για τον οποίο γίνεται αναφορά για 5 dvd players είναι καθαρά για λόγους ασφαλείας καθώς είναι πιθανό στη συνέχεια κάποιος από τους κινητήρες που χρησιμοποιούνται να χαλάσει.

3.5 Motor Drivers

Για να μπορέσουν να μπουν σε λειτουργία οι κινητήρες θα χρειαστούν μερικοί motordrivers και πιο συγκεκριμένα ένας motordriver για κάθε κινητήρα.

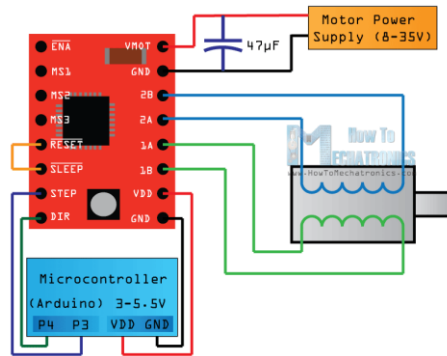
Οι motor drivers επί της ουσίας είναι μικροί ενισχυτές ρεύματος που στόχος τους είναι να λαμβάνουν ένα χαμηλού σήματος ρεύμα και να το μετατρέπουν σε ένα υψηλότερο σήμα ρεύματος που να μπορεί να οδηγήσει τον κινητήρα. Χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με κάποιον μικροελεγκτή που τους παρέχει το χαμηλού σήματος ρεύμα και με τη χρήση του Firmware μπορούμε να καθορίσουμε την φορά αλλά και τον χρόνο που κινείται ο κινητήρας.

Υπάρχουν διάφοροι motor drivers στην αγορά, στην περίπτωση μας όμως θα χρησιμοποιήσουμε τους A4988 motor drivers καθώς τοποθετούνται κατευθείαν πάνω στο Ramps 1.4



Εικόνα 7 - A4988 motor driver

Στο διάγραμμα (βλ. Εικόνα 8) φαίνεται η γενική συνδεσμολογία του A4988 motor driver. Αποτελείται από 16 Pins συνολικά και το καθένα έχει τον σκοπό του. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα παραπάνω μπορεί να οδηγήσει κινητήρες τάσης 8 – 35V συνδέοντας την τροφοδοσία στα Pins VMOT και GND. Οι φάσεις του κινητήρα συνδέονται στα Pins 2A, 2B και 1A, 1B και μπορούν να συνδεθούν κινητήρες 4, 6 και 8 καλωδίων με την σωστή συνδεσμολογία. Τα Pins VDD, GND, DIR και STEP συνδέονται με τον μικροελεγκτή όπως φαίνεται στο διάγραμμα. Επίσης υπάρχουν τα Pins Enable, Reset, Sleep και τέλος τα Pins MS1, MS2, MS3 τα οποία καθορίζουν το microstepping.



Εικόνα 8 - Συνδεσμολογία motor driver A4988

Με τον κατάλληλο συνδιασμό των τριών αυτών Pinso motor driver μπορεί να πετύχει έως και 1/16 microstepping του αρχικού βηματισμού.

MS1	MS2	MS3	Microstep Resolution
Low	Low	Low	Full step
High	Low	Low	Half step
Low	High	Low	Quarter step
High	High	Low	Eighth step
High	High	High	Sixteenth step

Εικόνα 9 - Microstep Resolution

Επιπλέον υπάρχει ένα ποτενσιόμετρο για την ρύθμιση του ρεύματος για κάθε κινητήρα. Είναι μια πολύ βασική λειτουργία καθώς θα χρειαστεί να ρυθμιστεί το ρεύμα που θα διαρρέει τους βηματικούς κινητήρες. Πιο συγκεκριμένα για τους βηματικούς κινητήρες των dvd players θα πρέπει να ρυθμιστεί το ρεύμα στα 0,5A ενώ για τον Nema 17 στο 1A καθώς δεν χρησιμοποιείται κάποιο μέσο ψύξης στους κινητήρες. Αν προστεθεί κάποια ψύκτρα, είτε αυτή είναι παθητική είτε αερόψυκτη, τότε μπορεί να αυξηθεί η ροή του ρεύματος.

Ένας τρόπος για να υπολογιστεί το ρεύμα που διαρρέει τους βηματικούς κινητήρες είναι υπολογίζοντας την τάση που αντιστοιχεί στο ρεύμα που είναι επιθυμητό να οριστεί, δηλαδή υπολογίζοντας το V_{Ref} . Ο υπολογισμός του V_{Ref} γίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$V_{Ref} = 8 * I_{Max} * R_{CS}$$

Όπου R_{cs} ισούται με 0.05 Ω ή 0.068Ω ανάλογα το μοντέλο του A4988 που χρησιμοποιείται.

3.6 Extruder

Ο extruder ή στα ελληνικά εκβολέας είναι το σύστημα που τροφοδοτεί το υλικό (ABS, PLA, HIPS, PVA, WOOD κλπ), το επεξεργάζεται (στην περίπτωση μας το θερμαίνει) και τέλος εκβάλλει το επεξεργασμένο υλικό μέσω του nozzle (μύτη εκτύπωσης), που καθορίζει το πλάτος της εκτύπωσης (0.2mm, 0.4mmκλπ)στην βάση.

Για τον λόγο αυτό ο extruder αποτελείται από δύο βασικά μέρη. Το Cold end και το Hot end.

3.6.1 Cold End

Ως cold end ορίζεται το σύνολο του κινητήρα (Nema 17) και του συστήματος τροφοδοσίας που αποτελείται από ένα γρανάζι που προσαρμόζεται πάνω στον κινητήρα και ένα σύστημα πίεσης συνήθως με ρουλεμάν προς το γρανάζι που βοηθάει στην σωστή τροφοδοσία του υλικού. Σκοπός του cold end είναι να τραβάει το υλικό και να το ωθεί προς το hot end. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ένα κλασικό σύστημα τροφοδοσίας με ρουλεμάν (αριστερά). Προσαρμόζεται πάνω στον κινητήρα, ασκεί πίεση πάνω στο γρανάζι και μέσω των εγχοπών περνάει το υλικό (δεξιά).

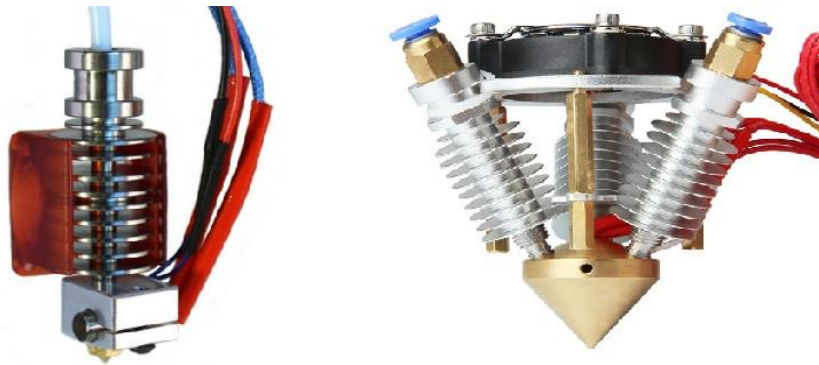


Εικόνα 10 – Cold End

3.6.2 Hot End

Ως hot end ορίζεται το σύστημα επεξεργασίας του υλικού δηλαδή της θέρμανσης του υλικού μας στην κατάλληλη θερμοκρασία ανάλογα το υλικό που χρησιμοποιείται. Αποτελείται από το heater block, το μέσο θέρμανσης, το αισθητήριο θερμοκρασίας (χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της θερμοκρασίας) και το σύστημα ψύξης (συνήθως ψύκτρα και ανεμιστήρα) για να αποφεύγεται η μετάδοση της θερμότητας και η παραμόρφωση του υλικού πριν την διαδικασία της επεξεργασίας και τέλος αλλά πολύ βασικό το nozzle (μύτη εκτύπωσης). Στην παρακάτω

φωτογραφία (βλ.Εικόνα 11) παρουσιάζονται δύο διαφορετικά είδη hot end. Στα αριστερά απεικονίζεται ένα κλασικό hot end με ένα μόνο σύστημα τροφοδοσίας ενώ στα δεξιά της εικόνας ένα hot end με τριπλό σύστημα τροφοδοσίας. Η αρχή λειτουργίας και των δύο hot end παρόλο που φαίνονται τελείως διαφορετικοί είναι η ίδια. Το υλικό περνάει από το σύστημα ψύξης έπειτα από το heater block που θερμαίνεται με την βοήθεια του μέσου θέρμανσης και τέλος καταλήγει στο nozzle που εκβάλλεται πάνω στην βάση εκτύπωσης του 3D εκτυπώτη.



Εικόνα 11 – Hot End

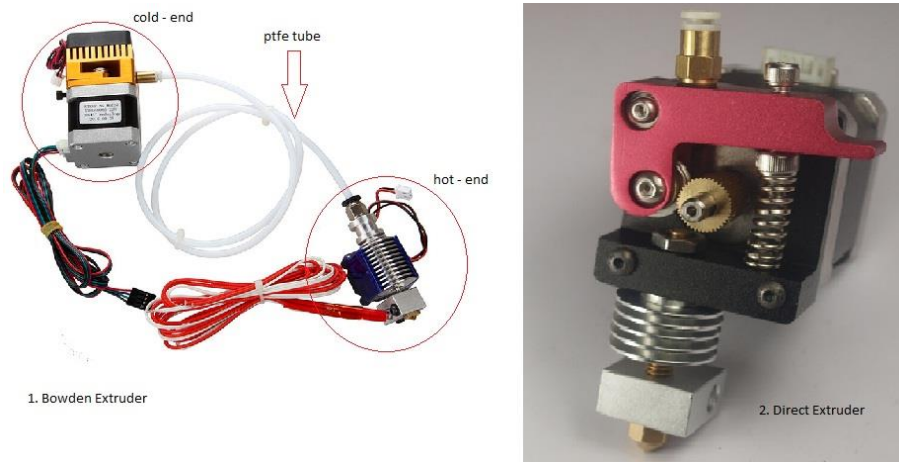
3.6.3 Nozzle

Το nozzle, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, είναι κομμάτι του extruder και πιο συγκεκριμένα ανήκει στο κομμάτι του Hot end. Μέσω του nozzle το υλικό μας μετά την επεξεργασία του εκβάλλεται στην βάση εκτύπωσής μας. Είναι το εξάρτημα που καθορίζει το ελάχιστο αλλά και το μέγιστο της ανάλυσης μιας εκτύπωσης. Υπάρχουν διάφοροι τύποι και μεγέθη αλλά χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, στα nozzle κατάλληλα για υλικά πάχους 1.75 mm και αυτά που είναι κατάλληλα για υλικά πάχους 3.00 mm. Τα συνήθη μεγέθη που συναντώνται είναι από 0.25 mm έως 0.5 mm ωστόσο υπάρχουν και μικρότερα μεγέθη όπως 0.15 mm αλλά και μεγαλύτερα όπως 0.8 mm. Είναι ένα πολύ βασικό κομμάτι της εκτύπωσης καθώς μπορεί να καθορίσει την ποιότητα αυτής αλλά και την ταχύτητα.

3.6.4 Bowden VS Direct Extruder

Υπάρχουν δύο είδη extruder ο direct και ο bowden. Bowden ονομάζεται ο extruder όπου το cold end τοποθετείται σε διαφορετικό σημείο του εκτυπωτή και η μετάδοση του υλικού προς το hot end, που βρίσκεται πάνω στον z άξονα, γίνεται έμμεσα μέσω ενός πλαστικού σωλήνα

(Ptfetube). Direct ονομάζεται ο extruder που το coldend και το hotend είναι ένα κοινό σύστημα πάνω στον z άξονα και η μετάδοση του υλικού γίνεται άμεσα χωρίς να μεσολαβεί κάποιο άλλο σύστημα ανάμεσα τους.



Εικόνα 12 - Αριστερά: Bowden Extruder

Δεξιά: Direct Extruder

Το κάθε είδος extruder έχει τα θετικά του και τα αρνητικά του. Χρησιμοποιώντας έναν Bowden Extruder αυτομάτως σημαίνει ότι το βάρος στον άξονα είναι ελάχιστο οπότε επιτρέπει εκτυπώσεις με μεγαλύτερες ταχύτητες, μεγαλύτερη επιτάχυνση και μεγαλύτερη ακρίβεια καθώς το μικρό βάρος το καθιστά πιο δύσκολο να χάσει την θέση του λόγω της ροπής. Ωστόσο επειδή η μετάδοση του υλικού γίνεται έμμεσα είναι πιθανό να υπάρχει πιθανότητα καθυστέρησης στην χρονική απόκριση του συστήματος. Εν αντιθέσει, χρησιμοποιώντας έναν Direct Extruder σημαίνει ότι το βάρος στον άξονα είναι πολύ μεγαλύτερο οπότε οι εκτυπώσεις θα πρέπει να γίνονται σε χαμηλότερη ταχύτητα και επιτάχυνση και το μεγάλο βάρος του τον καθιστά πιο επιρρεπή στο να χάσει την θέση του λόγω της ροπής. Ωστόσο λόγω της άμεσης τροφοδοσίας του υλικού δεν υπάρχει καθυστέρηση στην χρονική απόκριση του συστήματος.

Βέβαια όλα τα παραπάνω αρνητικά του κάθε είδους extruder μπορούν να ελαχιστοποιηθούν ή και να αντιμετωπιστούν πλήρως μέσω του software ή και του Firmware αλλά και από τις δυνατότητες του εκτυπωτή. Έτσι, είναι κατανοητό ότι υπάρχει μεγάλη διαφορά στο τεχνικό κομμάτι αλλά και στο κόστος του εκτυπωτή.

Ένας Bowden Extruder, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, είναι πολύ πιο ελαφρύς από ότι ένας Direct Extruder καθώς ο βηματικός κινητήρας βρίσκεται σε κάποιο άλλο σημείο του εκτυπωτή χωρίς να επιβαρύνει τους άξονες του εκτυπωτή. Κατασκευαστικά αυτό τον κάνει πιο οικονομικό καθώς δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν δύο βηματικοί κινητήρες για τον z άξονα όπως θα συνέβαινε αν είχε χρησιμοποιηθεί ένας Direct Extruder. Επίσης για τον

κινητήρα του z άξονα αλλά και του x άξονα, αν ο z βρίσκεται προσαρτημένος πάνω σε αυτόν μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποιος κινητήρας χαμηλότερων δυνατοτήτων καθώς το βάρος περιορίζεται σε μερικά γραμμάρια πλέον μειώνοντας έτσι κατά πολύ το κόστος ενός 3D εκτυπωτή.

Τέλος η χρήση Bowden Extruder κάνει την χρήση διπλής κεφαλής μία οικονομική επιλογή αλλά και κατασκευαστικά πιο εφικτή.

3.7 Endstops



Εικόνα 13 - Endstops

Τα endstops είναι μικροί διακόπτες που τοποθετούνται στα άκρα των αξόνων και δηλώνουν την θέση του κάθε άξονα. Κύριος σκοπός τους είναι να ορίζουν την αρχή των αξόνων και να συμβάλλουν στην επίτευξη της αυτόματης βαθμονόμησης. Συνήθως χρησιμοποιείται ένα endstop στην αρχή του κάθε άξονα (τρία στο σύνολο) όπου το καθένα ορίζει το σημείο μηδέν του αντίστοιχου άξονα. Επίσης χρησιμοποιούνται πολλές φορές και για να ορίζουν τα όρια του κάθε άξονα ώστε να αποφευχθούν τυχόν ζημιές στο σύστημα σε περίπτωση βλάβης. Γι' αυτό και μπορούν να τοποθετηθούν μέχρι έξι στο σύνολο, δύο για κάθε άξονα.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι endstop όπως φαίνεται στην Εικόνα 13 ξεκινώντας από τα αριστερά, τα mechanical endstop, τα optical endstop, τα magnetic endstop. Το πιο οικονομικό και εύκολο στην χρήση είναι το mechanical endstop το οποίο είναι ένας διακόπτης NO ή NC ο οποίος όταν δεχτεί πίεση είτε κλείνει είτε ανοίγει το κύκλωμα αντίστοιχα. Παρακάτω απεικονίζεται ένα μηχανικό endstop στην πιο απλή μορφή του, ωστόσο υπάρχουν έτοιμες προς χρήση πλακέτες (pcb) με led ένδειξης σωστής λειτουργίας σαν αυτή της ακόλουθης εικόνας.



Εικόνα 14 – Mechanical endstop and pcb board with led indication

3.8 Heated Build Platform (HBP)

Η χρήση μιας θερμαινόμενης βάσης εκτύπωσης μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα της εκτύπωσης αποτρέποντας την στρέβλωση - κύρτωση του μοντέλου που εκτυπώνεται. Όταν το μοντέλο ψύχεται, συρρικνώνεται ελάχιστα. Όταν αυτή η συρρίκνωση δεν γίνεται ομοιόμορφα το αποτέλεσμα είναι ένα στρεβλωμένο μοντέλο. Κατά κύριο λόγο η στρέβλωση του αντικειμένου παρατηρείται στις γωνίες αυτού.



Εικόνα 15 – Heated Bed Platform (HBP)

Με την χρήση της θερμαινόμενης βάσης επιτυγχάνουμε να κρατάμε το μοντέλο εκτύπωσης θερμό και σε μια σταθερή θερμοκρασία καθ'όλη την διάρκεια εκτύπωσης. Επίσης βοηθάει στην επίτευξη μιας πιο ομοιόμορφης συρρίκνωσης του μοντέλου.

Πέρα από την στρέβλωση - κύρτωση του μοντέλου μας στα άκρα, υπάρχουν και άλλα προβλήματα που μπορεί να παρουσιαστούν, όπως η αποκόλληση του υπό εκτύπωση μοντέλου από την βάση ή η αποκόλληση των στρωμάτων εκτύπωσης μεταξύ τους καθώς και πολλά άλλα προβλήματα ανάλογα την περίπτωση. Βέβαια όλα τα παραπάνω προβλήματα μπορούν να αντιμετωπιστούν με διάφορες τεχνικές ή ρυθμίσεις από το software. Ωστόσο, κάθε ένα από αυτά μπορούν να είναι καταστροφικά για το τελικό αποστέλεσμα.

3.9 Power Supply Unit (PSU)

Η σωστή τροφοδοσία του εκτυπωτή είναι ένα πολύ σημαντικό κομμάτι. Αν η τροφοδοσία που θα επιλέξουμε δεν είναι σωστή ή δεν επαρκεί μπορεί να καταλήξουμε είτε να κάψουμε το ramps 1.4 είτε να έχουμε έναν μη λειτουργικό εκτυπωτή. Το Ramps 1.4, όπως αναφέραμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, λειτουργεί με τάση εισόδου 12V. Η πλακέτα ωστόσο αποτελείται από δύο διαφορετικά κυκλώματα, το ένα αφορά την τροφοδοσία των κινητήρων και όλων των επιμέρους εξαρτημάτων του εκτυπωτή και το άλλο την τροφοδοσία της θερμαινόμενης βάσης εκτύπωσης (HBP). Γι' αυτό και υπάρχουν δύο διαφορετικές εισοδοί τάσης πάνω στο Ramps 1.4.

Προκειμένου να υπολογίσουμε την ελάχιστη ισχύ που χρειαζόμαστε για το τροφοδοτικό, αρκεί να αθροίσουμε το ρεύμα (A) που καταναλώνει το κάθε εξάρτημα που έχουμε τοποθετήσει πάνω στο Ramps 1.4 και να εφαρμόσουμε τον τύπο:

$$\text{Power (W)} = \text{Voltage (V)} \times \text{Current (A)}$$

Αφού υπολογίσουμε την ελάχιστη ισχύ κατανάλωσης θα πρέπει να προσθέσουμε και ένα 30% περίπου στην ισχύ που βρήκαμε για λόγους ασφαλείας.

Ωστόσο για μεγαλύτερη ευκολία μπορούμε να κοιτάξουμε τα χαρακτηριστικά των ασφαλειών (fuses) που υπάρχουν πάνω στην πλακέτα και να υπολογίσουμε την ισχύ. Πιο συγκεκριμένα στο Ramps 1.4 υπάρχουν δύο ασφάλειες. Μία ασφάλεια στα 5A για το κυρίως κύκλωμα και μία ασφάλεια στα 11A για την θερμαινόμενη βάση εκτύπωσης. Επομένως, με βάση αυτά τα στοιχεία και γνωρίζοντας ότι η τάση τροφοδοσίας είναι στα 12V, μπορούμε να υπολογίσουμε την μέγιστη ισχύ της πλακέτας:

$$\text{Power (W)} = 12V \times (5+11)A \Rightarrow \text{Power} = 192 \text{ W}$$

Αυτή είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να διαχειριστεί το Ramps 1.4, ωστόσο για λόγους ασφαλείας και για να αποφύγουμε τις υπερθερμάνσεις θα προσθέσουμε και ένα 30%, οπότε και θα καταλήξουμε ως ελάχιστη ισχύ για το τροφοδοτικό τα 250W. Οποιαδήποτε τροφοδοσία που πληρούν τις προϋποθέσεις που προαναφέραμε και είναι μεγαλύτερη από 250W θα είναι κατάλληλη και ασφαλής για τον εκτυπωτή.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι τροφοδοτικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όπως τροφοδοτικά από H/Y, κάποια τροφοδοτικά από xbox όπως και από server τα οποία μπορεί να

βρίσκονται ήδη στην κατοχή μας αλλά χρειάζονται παραμετροποίηση για να τα προσαρμόσουμε στις προδιαγραφές μας και να μπορέσουμε να τα χρησιμοποιήσουμε, είτε να αγοράσουμε κάποιο έτοιμο τροφοδοτικό του εμπορίου. (βλ. βιβλιογραφία *3)



Εικόνα16 – Power Supply Unit (PSU)

3.10 Μηχανική Κατασκευή

3.10.1 Εισαγωγή στη Μηχανική Κατασκευή

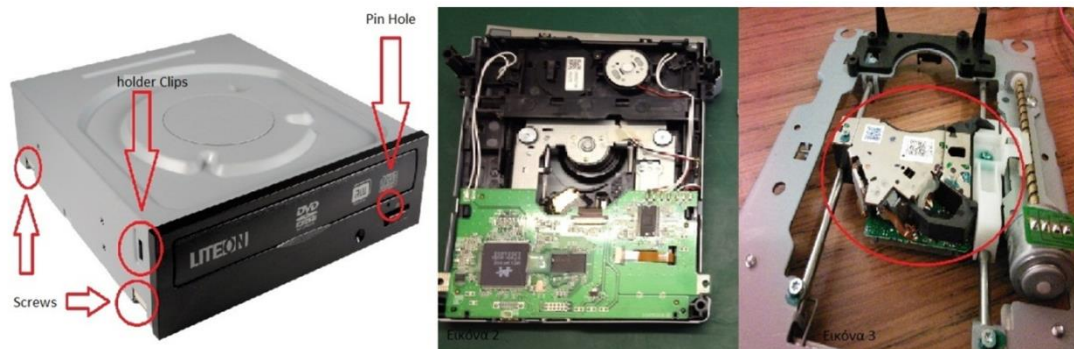
Στο κεφάλαιο αυτό θα δούμε την μηχανική κατασκευή ενός 3D εκτυπωτή με χρήση των βηματικών κινητήρων από τα dvd players. Ο 3D εκτυπωτής που θα κατασκευαστεί αποτελείται από τους άξονες x, y και z. Ιδανικά, ο συγκεκριμένος 3D εκτυπωτής θα μπορούσε να έχει ένα εύρος εκτύπωσης 40 mm x 40 mm x 40 mm. Ωστόσο, λόγω μηχανικών απωλειών οι τιμές αυτές θα κυμαίνονται από 33 mm έως 37 mm περίπου, ανάλογα πόσο ακριβής είναι η κατασκευή που θα πραγματοποιήσουμε. Ο y άξονας θα τοποθετηθεί απευθείας πάνω στο οριζόντιο πλαίσιο (βάση) του 3D εκτυπωτή και πάνω σε αυτόν θα προσαρμοστεί η θερμαινόμενη βάση εκτύπωσης (HBP). Ο x άξονας θα τοποθετηθεί απευθείας πάνω στο κάθετο πλαίσιο (πλάτη) του 3D εκτυπωτή και πάνω σε αυτόν θα προσαρμοστεί ο z άξονας. Ενώ πάνω στον z άξονα θα προσαρμοστεί το hot end του extruder. Επιπλέον, πάνω στο κάθετο πλαίσιο του 3D εκτυπωτή θα προσαρμοστεί το cold end του Extruder σε σημείο όπου να μην επηρεάζει τους υπόλοιπους άξονες. Σε κάθε άξονα x, y και z θα τοποθετηθούν από δύο endstops, ένα για να ορίζει την αρχική θέση και ένα για την τελική θέση του κάθε άξονα. Για την θερμαινόμενη βάση εκτύπωσης όπως και για το hot end θα χρησιμοποιηθεί από ένα αισθητήριο θερμότητας όπως και από ένα μέσο θέρμανσης (Ceramic Cartridge Wire Heater 12V/40W). Για το hot end θα χρησιμοποιηθεί επιπλέον ένας ανεμιστήρας. Τέλος, θα γίνουν οι απαραίτητες συνδέσεις με το Ramps 1.4 και το ArduinoMega 2560 όπου και θα ολοκληρωθεί η μηχανική κατασκευή του 3D εκτυπωτή.

Για την μηχανική κατασκευή θα χρειαστεί να αγοραστούν ένα πλήθος εξαρτημάτων, όπως μερικά καλώδια 24 awg διαφόρων χρωμάτων, ένα κομμάτι αλουμινίου, βίδες διαφόρων μεγεθών και μήκους, τα αντίστοιχα παξιμάδια και ροδέλες και μερικοί αποστάτες που να προσαρμοζόνται στα μεγέθη των βιδών. Οι τελευταίοι θα φανούν χρήσιμοι για την στήριξη των πλακετών στον εκτυπωτή. Επιπλέον για την κατασκευή της θερμαινόμενης βάσης και τοποθέτησής της θα χρειαστούν ένα φύλλο ορείχαλκου καθώς και ένας heater. Τέλος, θα χρειαστούν ορισμένα εργαλεία, όπως κατσαβίδια, μια πένσα, ένα κοφτάκι για τα καλώδια, ένα κολλητήρι για κάποιες κολλήσεις που θα πραγματοποιηθούν στους βηματικούς κινητήρες, ένα τρυπάνι και μία σέγα ή ένας τροχός. Πιο αναλυτικά τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν θα αναφερθούν κατά την ανάλυση της μηχανικής κατασκευής αλλά και

στο τέλος του κεφαλαίου όπου αναφέρεται και η συνολική κοστολόγηση.

3.10.2 Αποσυναρμολόγηση των DVD Players

Ξεκινώντας την μηχανική κατασκευή, το πρώτο που θα κάνουμε είναι να αφαιρέσουμε από τα dvdplayers τους βηματικούς κινητήρες μαζί με το σύστημα των αξόνων και το πλαίσιο που αυτοί στηρίζονται. Μέσα σε κάθε dvdplayer υπάρχει ένας βηματικός κινητήρας μαζί με το σύστημα των αξόνων του και το πλαίσιο που αυτοί στηρίζονται έτοιμο και έτσι θα χρησιμοποιήσουμε απόφιο το κομμάτι αυτό. Πριν ξεκινήσουμε την αποσυναρμολόγηση καλό είναι να έχει γίνει πρώτα ένας έλεγχος των dvd players σε έναν Η/Υ για να εξακριβώσουμε ότι είναι λειτουργικά τα μέρη που χρειαζόμαστε και ο βηματικός κινητήρας δουλεύει σωστά: αν διαπιστώσουμε ότι το πορτάκι του κάθε dvd player ανοίγει κανονικά τότε μπορούμε να ξεκινήσουμε την διαδικασία της αποσυναρμολόγησης.



Εικόνα 16 - Αποσυναρμολόγηση DVD player

Με μια καρφίτσα ή μια παραμάνα ανοίγουμε χειροκίνητα το πορτάκι του dvdplayer ασκώντας πίεση στο pinhole, όπως φαίνεται στην Εικόνα 16. Έπειτα με ένα κατσαβίδι ασκούμε πίεση στα holderclips που βρίσκονται περιμετρικά του πλαστικού καλύμματος ώστε να το αφαιρέσουμε, και τέλος ξεβιδώνουμε τις βίδες (4 – 6 συνήθως) που βρίσκονται στο κάτω μέρος του dvd player, έτσι ώστε να καταλήξουμε με μια συσκευή που θα μοιάζει όπως η 2^η εικόνα. Στην συνέχεια, αφαιρούμε ό,τι πλακέτα και καλώδιο μοιάζει αχρείαστο εώς ότου μπορέσουμε να απομονώσουμε τον βηματικό κινητήρα μαζί με τους άξονες και το πλαίσιο όπου αυτοί στηρίζονται και να καταλήξουμε με τον μηχανισμό όπως αυτός φαίνεται στην 3^η εικόνα. Μεγάλη προσοχή χρειάζεται για να αφαιρέσουμε όλο τον εσωτερικό μηχανισμό απόφιο, μαζί και το πλαστικό ή μεταλλικό κομμάτι που συνδέει τους δύο άξονες, αφού πάνω εκεί θα στηριχθούν επιμέρους εξαρτήματα του 3D εκτυπωτή. Αφού έχουμε στα χέρια μας όλο

τον μηχανισμό με την βοήθεια της πένσας και του κόφτη, αφαιρούμε από το συνδετικό κομμάτι των αξόνων που φαίνεται στην 3^η εικόνα ό,τι μοιάζει να είναι περιττό όπως μικροκυκλώματα, μεταλλικά προστατευτικά κομμάτια και κομμάτια γυαλιού που υπάρχουν έως ότου μείνουμε με ένα όσο γίνεται καθαρό κομμάτι (βλ. Εικόνα 17).

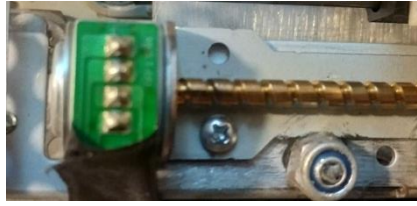


Εικόνα 17 - Άξονες

Στο στάδιο αυτό και ενώ έχουμε αποσυναρμολογήσει όλους τους μηχανισμούς από τα dvd players καλό είναι να γίνει μια οπτική σύγκριση των οδηγών των αξόνων για να εξακριβώσουμε κατά πόσο είναι πανομοιότυποι. Δυστυχώς δεν είναι δυνατό να βρεθούν τα datasheet για τους μηχανισμούς αυτούς. Αυτό που θα πρέπει να κοιτάζουμε είναι οι οδηγοί που είναι προσαρμοσμένοι πάνω στους κινητήρες να είναι πανομοιότυποι. Αν παρατηρήσουμε τεράστιες διαφορές στο πλήθος των στροφών του οδηγού του βηματικού κινητήρα θα πρέπει να αντικαταστήσουμε τον ανόμοιο μηχανισμό με κάποιον άλλον συμβατό. Αυτός ο πρόχειρος έλεγχος θα μας βοηθήσει να γλιτώσουμε πολλά προβλήματα που μπορούν να εμφανιστούν αργότερα από την ανομοιογένεια και μηχανικά αλλά και σχεδιαστικά κατά την εκτύπωση. Ιδανικά αν τα dvd players που έχουμε στην κατοχή μας είναι το ίδιο μοντέλο ή τουλάχιστον της ίδιας χρονολογικής περιόδου θα υπάρχουν ελάχιστες διαφορές έως και καθόλου.

3.10.3 Προετοιμασία των Βηματικών Κινητήρων των αξόνων

Επόμενο στάδιο είναι η προετοιμασία των βηματικών κινητήρων. Στην Εικόνα 18, φαίνονται τα 4 pins των φάσεων του κινητήρα.



Εικόνα 18 – Motor pins

Σε αυτά τα 4 pins θα πρέπει να τραβήξουμε επεκτάσεις καλωδίων για να μπορούμε να τα συνδέσουμε αργότερα στο ramps. Πριν αρχίσουμε να κάνουμε την οποιαδήποτε κόλληση καλό είναι να εντοπίσουμε τις φάσεις του κινητήρα έτσι ώστε ανά φάση να έχουν την ίδια χρωματική καλωδίωση (θα είναι πολύ πιο εύκολο για αργότερα και για την διαδικασία του debugging να μπορούμε να ξεχωρίζουμε τις φάσεις). Για να εντοπίσουμε τις φάσεις με ένα πολύμετρο στο beep-mode τσεκάρουμε ποια pins ανά δυάδες έχουν συνδεσιμότητα μεταξύ τους.

Η διαδικασία της κόλλησης μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Ένας τρόπος είναι να αφαιρέσουμε το flex-cable και να κάνουμε την κόλληση κατευθείαν πάνω στον κινητήρα (δεν θα το συνιστούσαμε για κάποιον αρχάριο στις κολλήσεις καθώς υπάρχει κίνδυνος να χαλάσουμε τον κινητήρα), ένας άλλος είναι η κόλληση να γίνει στην άκρη του flex-cable για μεγαλύτερη ασφάλεια ότι δεν θα χαλάσουμε τον κινητήρα μας και ένας τρίτος είναι να γίνει η κόλληση σε ένα κλιπ των 4 pins συμβατό σε μέγεθος με το flex-cable και έπειτα να προσαρμόσουμε πάνω το flex-cable (τέτοια κλιπ μπορούν εύκολα να βρεθούν πάνω στις πλακέτες των ήδη αποσυναρμολογημένων dvd players). Ο τρίτος τρόπος είναι ο πιο ασφαλής επειδή μας εγγυάται ότι δεν θα καταστρέψουμε τον κινητήρα μας κατά την κόλληση. Αφού έχουμε ολοκληρώσει τις κολλήσεις με ένα πολύμετρο βεβαιωνόμαστε ότι δεν έχουμε δημιουργήσει κάποιο βραχυκύκλωμα μεταξύ των φάσεων.



Εικόνα 1. Κόλληση απευθείας πάνω στις φάσεις του κινητήρα



Εικόνα 2. Κόλληση σε κλιπ των τεσσάρων pins



Εικόνα 3. Κόλληση απευθείας πάνω στο flex cable χωρίς χρήση επιπλέον κλιπ

Εικόνα 19 – Κόλληση κινητήρα σε pins

3.10.4 Δημιουργώντας τα πλαίσια του 3D Εκτυπωτή

Για να μπορέσουμε να στηρίξουμε το σύστημα των αξόνων θα πρέπει να δημιουργήσουμε το πλαίσιο του 3D εκτυπωτή. Για τον σκοπό αυτό θα χρησιμοποιήσουμε τα μεταλλικά πλαίσια από τα dvd players που έχουμε ήδη στην κατοχή μας. Θα χρειαστούμε συνολικά δύο, ένα για το οριζόντιο πλαίσιο (βάση) και ένα για το κάθετο πλαίσιο (πλάτη) του 3D εκτυπωτή. Ωστόσο για να μπορέσουμε να τα χρησιμοποιήσουμε για τον σκοπό που θέλουμε θα πρέπει να τους κάνουμε ορισμένες μετατροπές.

Ξεκινώντας με την βάση του 3D εκτυπωτή τοποθετούμε το μεταλλικό πλαίσιο που έχουμε αποφασίσει πως θα είναι η βάση μας μπροστά μας. Φροντίζουμε το μπροστινό μέρος του μεταλλικού πλαισίου να βρίσκεται προς το μέρος μας. Έπειτα τοποθετούμε τον γάξονα, αφού αυτός θα τοποθετηθεί απευθείας πάνω στην βάση όπως έχουμε ήδη αναφέρει στην εισαγωγή του κεφαλαίου. Ο τρόπος τοποθέτησης φαίνεται στην Εικόνα 20. Στην συνέχεια σημειώνουμε τα σημεία στήριξης πάνω στην βάση και το κενό που πρέπει να δημιουργήσουμε ώστε ο άξονας να μπορεί να κινηθεί ελεύθερα.



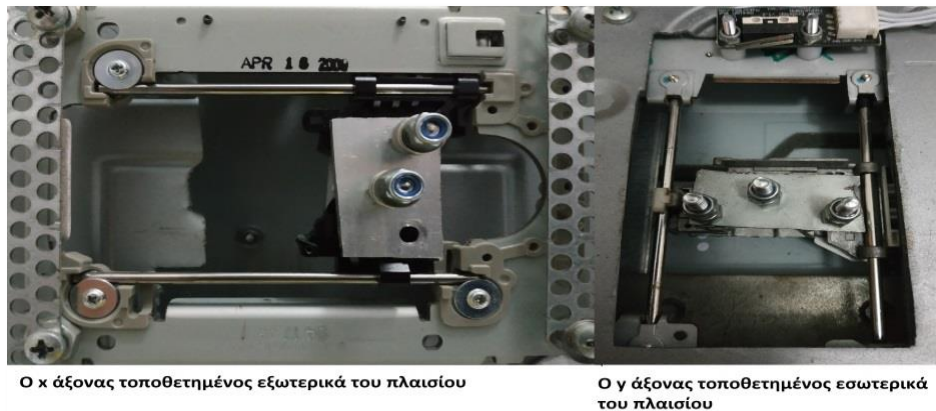
Εικόνα 20 – Τοποθέτηση γ άξονα σε βάση

Συνεχίζοντας με την πλάτη του 3D εκτυπωτή τοποθετούμε το μεταλλικό πλαίσιο μπροστά μας, αυτή τη φορά όμως το τοποθετούμε αντίστροφα και τον x άξονα πάνω σε αυτό, αφού αυτός θα τοποθετηθεί απευθείας πάνω στην πλάτη του 3D εκτυπωτή, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Αντίστοιχα σημειώνουμε τα σημεία στήριξης του άξονα αλλά και το κενό που θα πρέπει να δημιουργηθεί για να μπορεί ο άξονας να κινείται ελεύθερα.



Εικόνα 21 – Τοποθέτηση x άξονα σε βάση

Οι ακριβείς διαστάσεις του κομματιού που θα αφαιρεθεί, όπως και η διάμετρος των οπών, εξαρτώνται καθαρά από τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν. Αν για παράδειγμα χρησιμοποιηθούν βίδες διαμέτρου 3 mm καλό είναι να χρησιμοποιηθεί ένα τρυπάνι διαμέτρου 5 – 6 mm για να υπάρχει περιθώριο για την ακριβή τοποθέτηση. Επίσης το κενό που θα δημιουργηθεί εξαρτάται από το μέγεθος του κάθε συστήματος αξόνων. Σκοπός είναι το συνδετικό κομμάτι του συστήματος των αξόνων να μπορεί να κινείται ελεύθερα χωρίς να αντιμετωπίζει κάποιο εμπόδιο οπότε καλό είναι το κομμάτι που θα αφαιρεθεί από το μεταλλικό πλαίσιο να είναι λίγο μεγαλύτερο από το πλάτος και το μήκος των αξόνων.



Ο x άξονας τοποθετημένος εξωτερικά του πλαισίου

Ο y άξονας τοποθετημένος εσωτερικά του πλαισίου

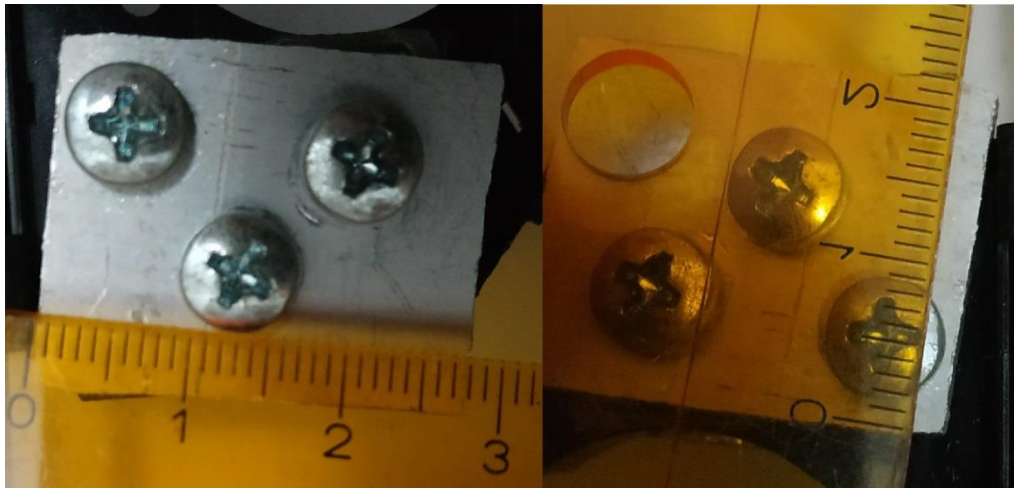
Εικόνα 22 – Ολοκλήρωση τοποθέτησης αξόνων

3.10.5 Προετοιμασία αξόνων

Στα προηγούμενα βήματα αποσυναρμολογήσαμε αυτούς τους άξονες από τα dvd players και προετοιμάσαμε τους κινητήρες για να συνδεθούν με το Ramp. Επίσης ετοιμάσαμε τα πλαίσια του 3D εκτυπωτή. Στο στάδιο αυτό θα προετοιμάσουμε τους άξονες για να μπορέσουμε στη συνέχεια να συνδέσουμε τα επιμέρους εξαρτήματα πάνω σε αυτούς.

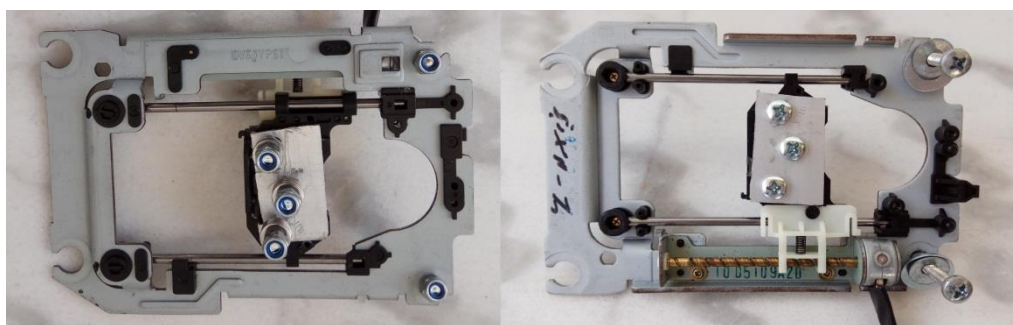
Κάθε έτοιμο σύστημα αξόνων που έχουμε αποσυναρμολογήσει από τα dvd players έχει ένα συνδετικό κομμάτι ανάμεσα στους δύο άξονές του. Αυτό μπορεί να είναι είτε μεταλλικό είτε

πλαστικό. Πάνω στο συνδετικό κομμάτι του κάθε άξονα θα τοποθετηθούν τα επιμέρους εξαρτήματα του 3D εκτυπωτή. Για τον λόγο αυτό θα δημιουργήσουμε τρεις οπές στο καθένα σε τριγωνική διάταξη για να είναι εύκολο στην συνέχεια να τα στηρίξουμε και να μπορέσουμε να κάνουμε την απαραίτητη βαθμονόμηση. Επίσης θα τα ενισχύσουμε με δύο μεταλλικά κομμάτια στο καθένα, ένα από την κάθε πλευρά. Για να το επιτύχουμε αυτό θα πάρουμε το κομμάτι αλουμινίου που έχουμε και θα κόψουμε έξι συνολικά κομμάτια με διαστάσεις περίπου 20 mm x 30mm.



Εικόνα 23 – Κομμάτια ενίσχυσης αξόνων

Οι διαστάσεις σε κάθε συνδετικό κομμάτι μπορεί να διαφέρουν. Στόχος είναι τα μεταλλικά κομμάτια να καλύπτουν όσο γίνεται μεγαλύτερη επιφάνεια των συνδετικών κομματιών. Τέλος θα τα στερεώσουμε με τις τρεις βίδες μήκους 30mm, με φορά από μέσα προς τα έξω όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.

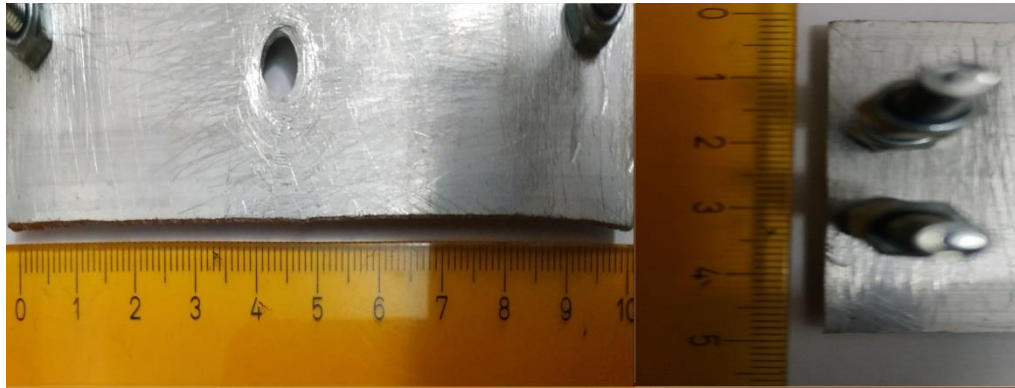


Εικόνα 24 – Απεικόνιση μεταλλικής ενίσχυσης αξόνων

3.10.6 Ολοκληρώνοντας το κάθετο πλαίσιο του 3D Εκτυπωτή

Όπως προαναφέρεται, ο x άξονας θα τοποθετηθεί απευθείας πάνω στο κάθετο πλαίσιο του 3D εκτυπωτή, ωστόσο πάνω στον x άξονα θα πρέπει να προσαρμόσουμε τον z άξονα. Για να το

επιτύχουμε αυτό θα χρησιμοποιήσουμε ένα ενδιάμεσο κομμάτι αλουμινίου περίπου 50 mm x 100 mm, όπου θα τοποθετηθεί πάνω στον x άξονα και πάνω σε αυτό θα τοποθετηθεί ο z άξονας.



Εικόνα 25 – Μέγεθος συνδετικού κομματιού κάθετου πλαισίου

Αφού έχουμε το κομμάτι αλουμινίου που χρειαζόμαστε, θα το κεντράρουμε και θα το τρυπήσουμε στα τρία αντίστοιχα σημεία για να προσαρμοστεί πάνω στο συνδετικό κομμάτι του έτοιμου συστήματος του x άξονα και τέλος θα τρυπήσουμε στις τέσσερις γωνίες ώστε να προσαρμοστεί πάνω ο z άξονας.



Εικόνα 26 - Συνδετικό κομμάτι κάθετου πλαισίου

Αντίστοιχα θα μετρήσουμε και θα τρυπήσουμε τον σκελετό του z άξονα ώστε να μπορέσει να προσαρμοστεί πάνω στο συνδετικό κομμάτι αλουμινίου.



Εικόνα 27 – Ετοιμασία σύνδεσης Hot End με z άξονα

Κατά παρόμοιο τρόπο θα συνδεθεί και το hot end πάνω στον z άξονα. Θα χρειαστεί να

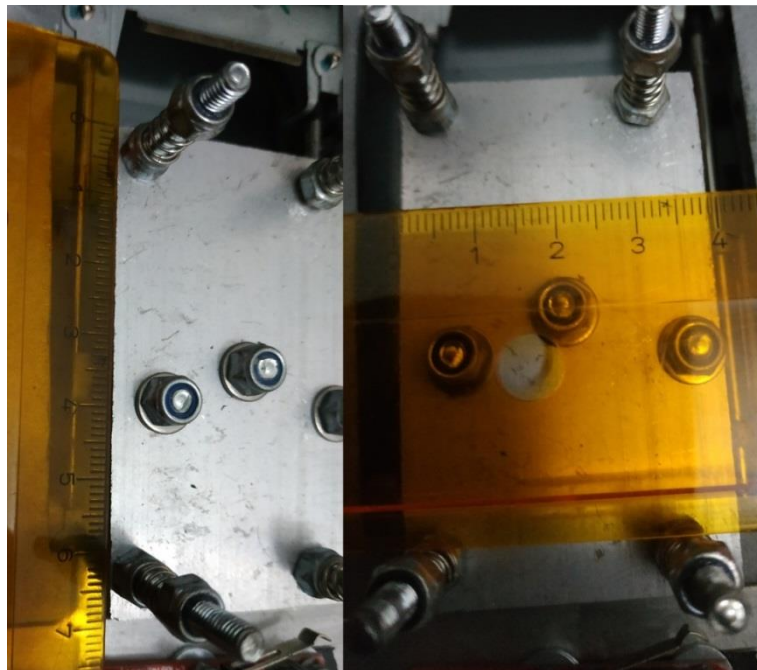
κόψουμε επίσης ένα κομμάτι 40 mm x 70 mm περίπου και να το προσαρμόσουμε πάνω στο συνδετικό κομμάτι του συστήματος του z άξονα αυτή τη φορά. Για την σύνδεση του hot end χρησιμοποιήθηκε μία μεταλλική γωνία όπου η μία πλευρά της συνδέθηκε πάνω στο κομμάτι αλουμινίου και πάνω στην άλλη πλευρά το hot end.



Εικόνα 28 - Σύνδεση Hot End με z άξονα

3.10.7 Ολοκληρώνοντας το οριζόντιο πλαίσιο του 3D Εκτυπωτή

Ο y άξονας είναι αυτός που θα τοποθετηθεί απευθείας στο οριζόντιο πλαίσιο του 3D εκτυπωτή. Ωστόσο πάνω στο y άξονα θα πρέπει να τοποθετηθεί η θερμαινόμενη βάση εκτύπωσης του 3D εκτυπωτή. Αυτό θα γίνει με τον ίδιο τρόπο που αναφέραμε παραπάνω για την σύνδεση των δύο αξόνων. Θα πρέπει αντίστοιχα να κοπεί ένα κομμάτι αλουμινίου 40 mm x 70 mm και αυτό να τοποθετηθεί πάνω στο συνδετικό κομμάτι του συστήματος του y άξονα και να δημιουργηθούν τρύπες στις τέσσερις γωνίες του κομματιού για να μπορέσει να τοποθετηθεί η θερμαινόμενη βάση εκτύπωσης.



Εικόνα 29 – Προετοιμασία τοποθέτησης θερμαινόμενης βάσης σε y άξονα

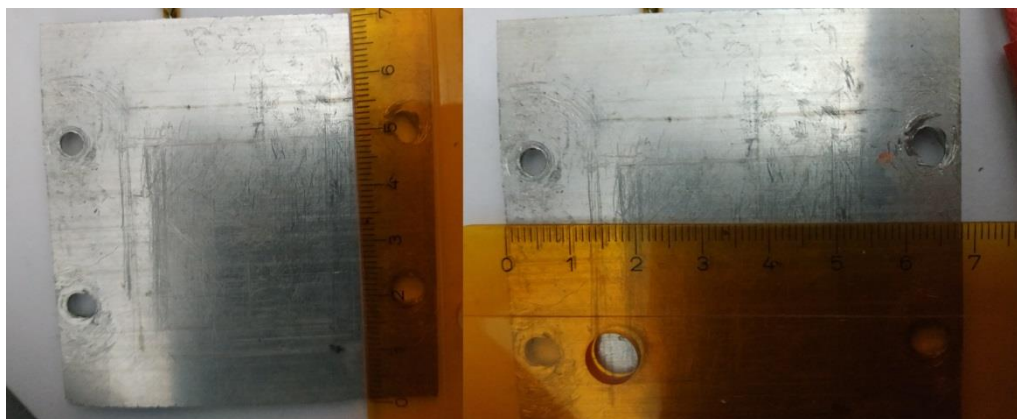
Τέλος, προκειμένου να ελαττωθούν οι κραδασμοί που υπήρχαν κατά τις δοκιμαστικές εκτυπώσεις προσθέσαμε επιπλέον βάρος εσωτερικά στην βάση του εκτυπωτή ώστε να μένει σταθερός.

3.10.8 Κατασκευή Θερμαινόμενης Βάσης Εκτυπωτή

Σε προηγούμενο κεφάλαιο καταλήξαμε ότι μια θερμαινόμενη βάση είναι η καλύτερη δυνατή λύση για να έχουμε όσο το δυνατόν μια καλύτερη εκτύπωση και από τεχνικής αλλά και από οπτικής άποψης. Αποτρέπει ή μειώνει κατά πολύ την εμφάνιση σφαλμάτων κατά την εκτύπωση και αυξάνει την ποιότητα της. Οπότε μένει να επιλέξουμε ποιο είναι το καλύτερο δυνατόν υλικό για την δημιουργία της βάσης.

Κάνοντας μια έρευνα στο internet υπάρχουν αρκετές επιλογές για την αγορά μιας έτοιμης βάσης όπως είναι τα PCB Heat beds. Ωστόσο τα μεγέθη που υπάρχουν (214 x 214 mm ή 300 x 300 mm) είναι πολύ μεγάλα για τον δικό μας εκτυπωτή. Για τον λόγο αυτό θα κατασκευάσουμε την δικιά μας θερμαινόμενη βάση. Έπειτα από αρκετή έρευνα καταλήξαμε ότι ένα πολύ καλό υλικό για την δημιουργία μιας θερμαινόμενης βάσης είναι το αλουμίνιο καθώς είναι ανθεκτικό στις υψηλές θερμοκρασίες, δεν στρεβλώνεται, δεν χαλάει, δεν σπάει. Παρουσιάζει καλές κολλητικές ικανότητες ώστε να μην έχουμε πρόβλημα με την αποκόλληση του μοντέλου μας και δεν παρουσιάζει οξειδώσεις από την θερμοκρασία. Ωστόσο έχει ένα μειονέκτημα ότι είναι ανεκτικό στην μετάδοση της θερμοκρασίας δηλαδή αργεί να ανεβάσει την επιθυμητή θερμοκρασία.

Για την κατασκευή της θερμαινόμενης βάσης εκτύπωσης θα χρειαστεί να κόψουμε ένα κομμάτι αλουμίνιο 70 mm x 70 mm.



Εικόνα 30 – Κατασκευή θερμαινόμενης βάσης

Σαν μέσο θέρμανσης θα χρησιμοποιήσουμε ένα Ceramic Cartridge Wire Heater 12V/40W

που χρησιμοποιείται και στο hot end. Τέλος θα προσαρμόσουμε ένα αισθητήριο θερμοκρασίας στο κάτω μέρος της θερμαινόμενης βάσης εκτύπωσης όσο γίνεται πιο άκρη για να έχουμε μια καλύτερη εικόνα για την θερμοκρασία. Ωστόσο, επειδή ο heater που θα χρησιμοποιήσουμε είναι κυλινδρικός η επιφάνεια επαφής του είναι πολύ μικρή. Για να μπορεί να έχει την καλύτερη δυνατή επαφή με την βάση για την καλύτερη δυνατή μετάδοση της θερμοκρασίας θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε κάποιο άλλο συνδετικό υλικό, έτσι ώστε να τοποθετηθεί σωστά και να μην αποκολλάται από την θέση του και να μπορεί η θερμοκρασία να μεταδίδεται σωστά.

Η πρώτη απόπειρα που έγινε ήταν χρησιμοποιώντας karton tape (ειδική ταινία ανθεκτική σε υψηλές θερμοκρασίες που υπάρχει σε διάφορα μεγέθη και μοιάζει αρκετά με το κλασικό sellotape που όλοι ξέρουμε). Ωστόσο η πρώτη προσπάθεια απέτυχε καθώς αν και η ταινία κράταγε αρκετά σταθερό τον heater ωστόσο δεν βοήθησε καθόλου στην μετάδοση της θερμοκρασίας και ο heater μετά από ένα μικρό χρονικό διάστημα άρχισε να κοκκινίζει καθώς η επιφάνεια επαφής ήταν πολύ με το αλουμίνιο ήταν πολύ μικρή και δεν είχε κάποιο μέσο να εκτονωθεί όλη αυτή η θερμοκρασία που παραγόταν.

Σαν δεύτερη προσπάθεια δοκιμάσαμε brackets σιδερένια τα οποία ακουμπούσαν τον heater σε ένα μεγάλο μέρος της επιφανείας του και είχαν αρκετά καλή επαφή με την βάση με αποτέλεσμα να υπάρχει μια αρκετά ικανοποιητική μετάδοση της θερμοκρασίας σε όλη την αλουμινένια επιφάνεια. Ωστόσο ο χρόνος που χρειαζόταν να φτάσει την επιθυμητή θερμοκρασία ήταν αρκετά μεγάλος (20-30 λεπτά). Επειδή λοιπόν έπρεπε να μειώσουμε τον χρόνο κατά πολύ αποφασίσαμε να δοκιμάσουμε άλλα υλικά καλύτερους μεταδότες τις θερμοκρασίας.

Η επόμενη δοκιμή που κάναμε ήταν να τοποθετήσουμε κάτω απ' την αλουμινένια βάση ένα φύλλο χαλκού και ανάμεσα να τοποθετήσουμε τον heater. Ωστόσο παρόλο που ο χαλκός είναι ένας πολύ καλός μεταδότης της θερμοκρασίας, καιγόταν στα σημεία επαφής με τον Heater.

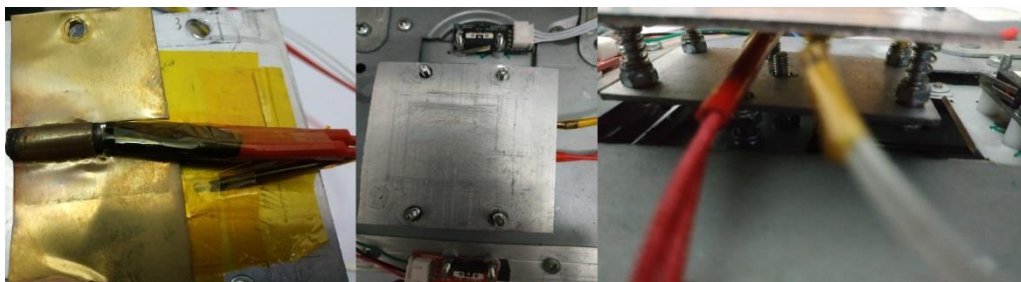
Τέλος αντικαταστήσαμε το φύλλο χαλκού με φύλλο ορείχαλκου. Εξίσου πολύ καλός μεταδότης της θερμοκρασίας και πολύ πιο ανθεκτικός στις υψηλές θερμοκρασίες. Με την χρήση του ορείχαλκου ο χρόνος απόκτησης της θεμιτής θερμοκρασίας μειώθηκε σχεδόν στο μισό και με την παραμετροποίηση του ελεγκτή (PID) μέσω του Firmware ο χρόνος έφτασε περίπου τα 2 λεπτά. Ένας χρόνος πολύ ικανοποιητικός καθώς εντός 5λεπτών χρειάζεται επιπλέον χρόνος για το hot end να φτάσει και αυτό την επιθυμητή θερμοκρασία, (πρώτα θερμαίνεται η βάση φτάνει τον στόχο της και έπειτα ξεκινάει να θερμαίνεται το hot end) και

μετά την εντολή εκτύπωσης ξεκινάει κανονικά. Οι χρόνοι προθέρμανσης ακόμα και των πιο ακριβών εκτυπωτών είναι περίπου 4-5 λεπτά, άρα ένας χρόνος προθέρμανσης 5 λεπτά είναι θεωρητικά πολύ καλός.



Εικόνα 31 – Υλικά κατασκευής θερμαινόμενης βάσης

Για την κατασκευή της βάσης θα χρειαστεί να κόψουμε ένα κομμάτι στο μισό μέγεθος περίπου του μεγέθους της βάσης, να καλύψουμε με το φύλλο του ορείχαλκου τον heater όσο πιο καλά μπορούμε και τέλος να το δέσουμε μαζί με την βάση πάνω στον χάξονα. Επίσης θα πρέπει στην άλλη μεριά από αυτή που έχουμε τον heater να προσαρμόσουμε το αισθητήριο θερμοκρασίας. Για το αισθητήριο θερμοκρασίας μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την kapton tape που ήδη έχουμε και είναι ανθεκτική στις υψηλές θερμοκρασίες. Στα άκρα του αλουμινίου θα πρέπει να δημιουργηθούν τέσσερις οπές ώστε να μπορέσει να προσαρμοστεί στον y άξονα, καθώς επίσης οπές θα πρέπει να δημιουργηθούν και στα άκρα του ορειχάλκου. Τέλος, ανάμεσα στο συνδετικό κομμάτι αλουμινίου και της βάσης θα χρησιμοποιηθούν ελατήρια για την εύκολη βαθμονόμηση της βάσης.

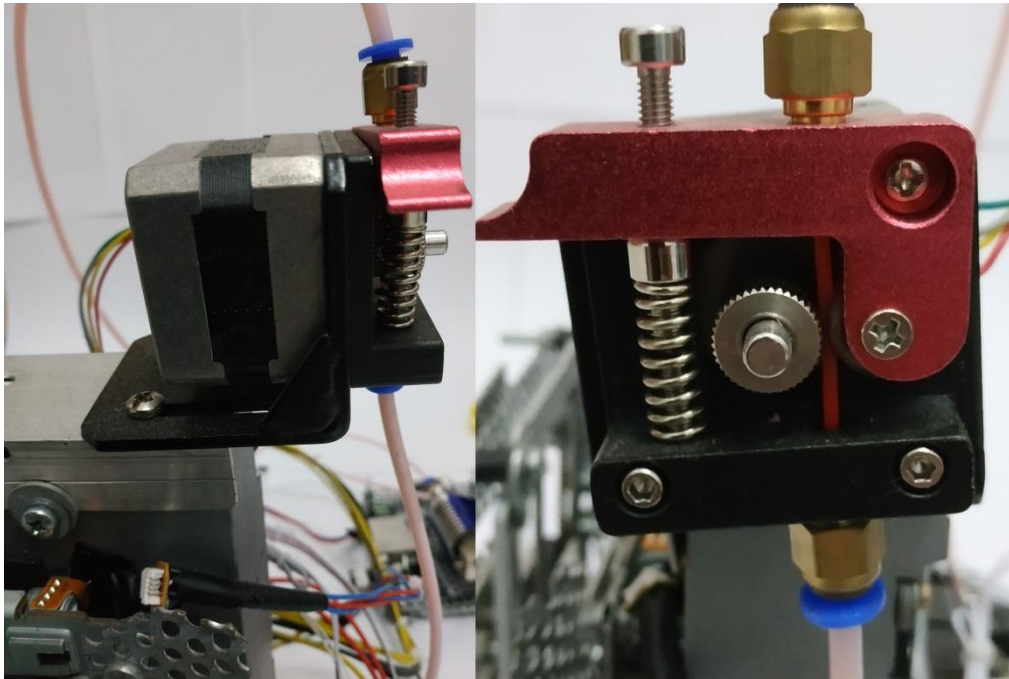


Εικόνα 32 – Συναρμολόγηση θερμαινόμενης βάσης

3.10.9 Τοποθέτηση του Extruder

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει ο extruder αποτελείται από δύο βασικά μέρη, το hot end και το cold end. Το hot end του Extruder έχει ήδη τοποθετηθεί στον z άξονα. Επειδή όμως έχει χρησιμοποιηθεί Bowden Extruder, το cold end του extruder θα πρέπει να τοποθετηθεί σε κάποιο άλλο σημείο για λόγους λειτουργικότητας. Μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιοδήποτε

σημείο εφόσον δεν εμποδίζει την λειτουργία του 3D εκτυπωτή. Εμείς επιλέξαμε να το τοποθετήσουμε στο επάνω μέρος του εκτυπωτή όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Τέλος, μέσω ενός ptfetube ωθείται το υλικό στο hot end.

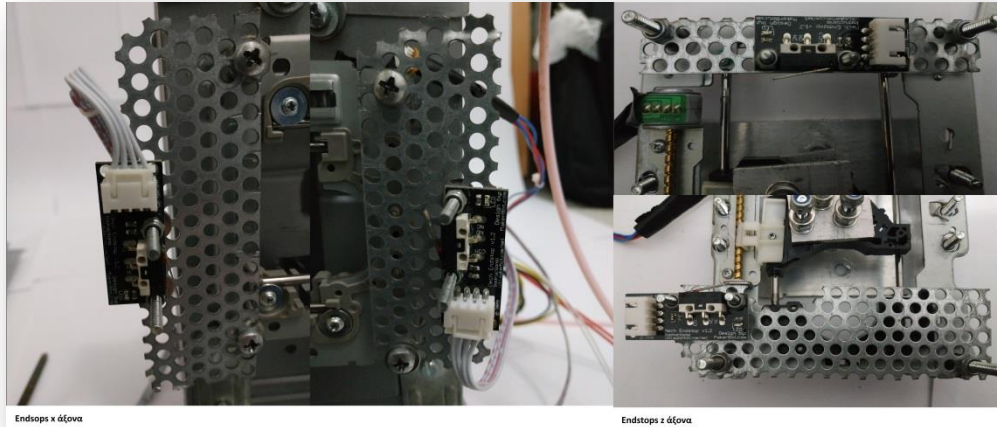


Εικόνα 33 - Extruder

3.10.10 Τοποθέτηση των Endstops

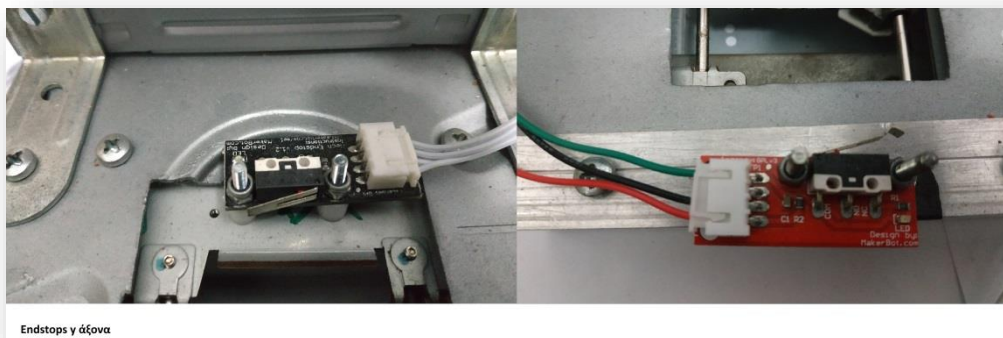
Αφού έχουμε τοποθετήσει όλους τους άξονες όπως πρέπει στον εκτυπωτή μένει να τοποθετήσουμε τα Endstops του κάθε άξονα. Σε κάθε άξονα, όπως ήδη έχουμε αναφέρει, θα τοποθετηθούν από δύο endstops, ένα στην αρχή του κάθε άξονα και ένα στο τέλος κάθε άξονα. Τα endstops θα πρέπει να τοποθετηθούν έτσι ώστε όταν ένας άξονας φτάνει στην αρχή ή στο τέλος του να ενεργοποιεί το αντίστοιχο endstop.

Για τον x και z άξονα χρησιμοποιήθηκε μεταλλικό πλέγμα ώστε να μπορέσουμε να τα στηρίξουμε σωστά στα άκρα των αξόνων όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 34 – Μεταλλικό πλέγμα στήριξης αξόνων

Για τον y άξονα χρειάστηκε να δημιουργήσουμε επιπλέον οπές στο πλαίσιο της βάσης του εκτυπωτή για να τοποθετηθούν σωστά.



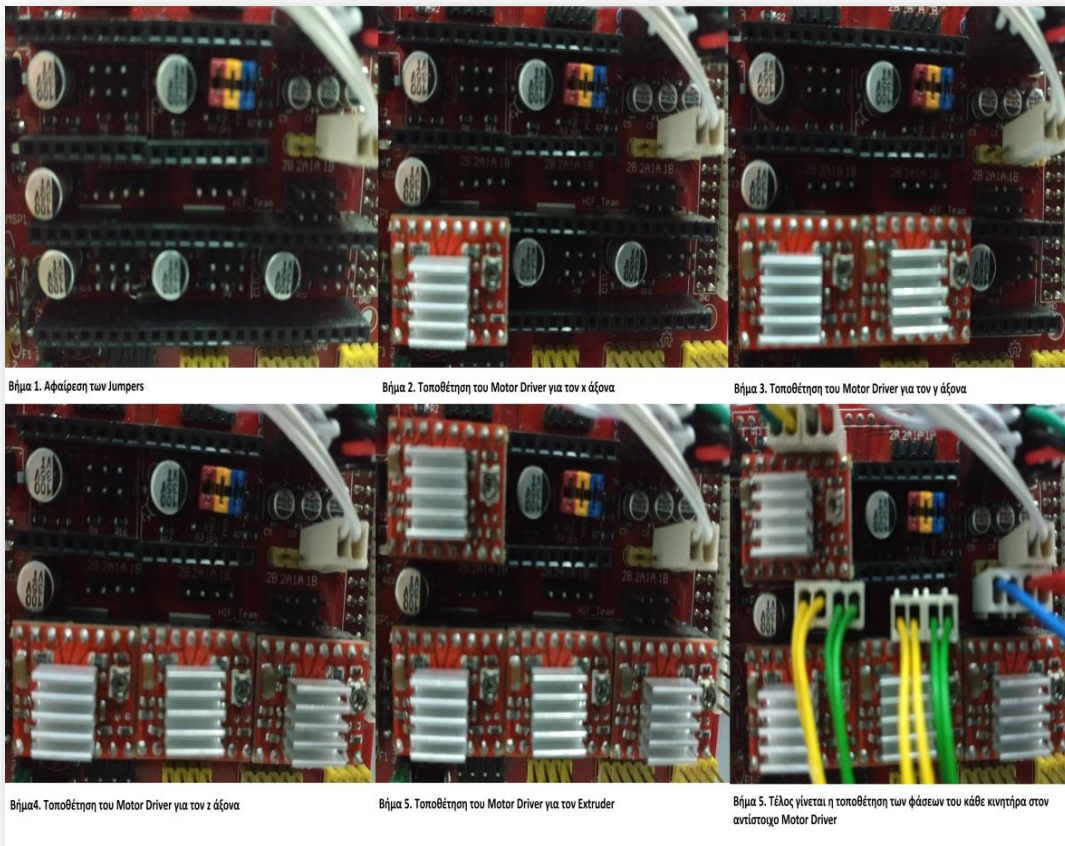
Εικόνα 35– Τοποθέτηση endstops

3.10.11 Ολοκλήρωση Μηχανικής Κατασκευής

Αφού έχουμε ετοιμάσει όλα τα επιμέρους κομμάτια του 3D εκτυπωτή το τελευταίο που έχουμε να κάνουμε για να ολοκληρώσουμε την μηχανική κατασκευή είναι να συνδέσουμε όλα τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα.

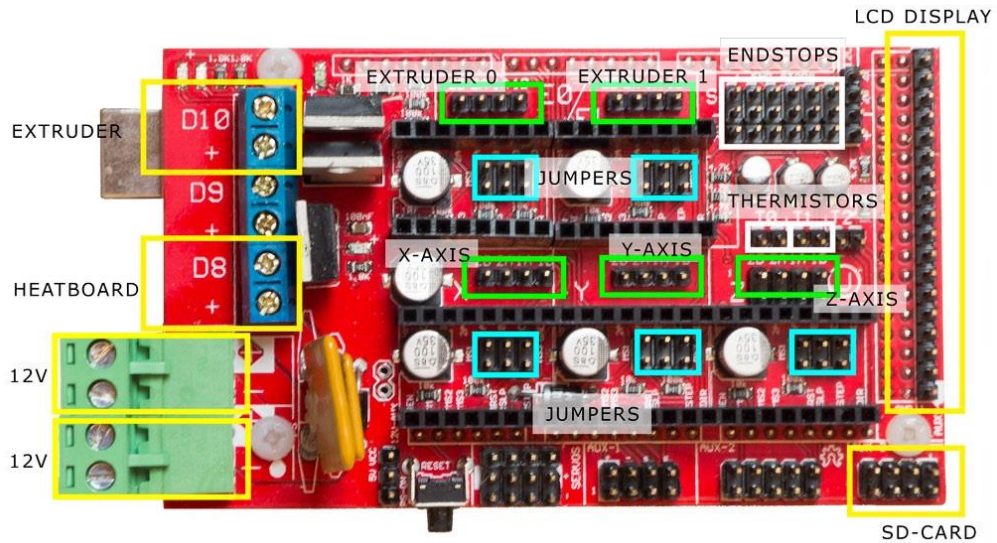
Αρχικά προσαρμόζουμε το Ramps 1.4 πάνω στο Arduino 2560 με προσοχή για να μην στραβώσει ή σπάσει κάποιο από τα pins. Αφαιρούμε τα jumpers αν αυτά είναι ήδη τοποθετημένα. Έπειτα τοποθετούμε τους motor drivers, έναν για κάθε άξονα. Οι motor drivers τοποθετούνται ακριβώς πάνω από τα jumpers στις έτοιμες υποδοχές που υπάρχουν ανά 8 pins με το ποτενσιόμετρο να βρίσκεται στα δεξιά μας όπως το κοιτάμε. Έπειτα

συνδέουμε τις φάσεις κάθε κινητήρα.



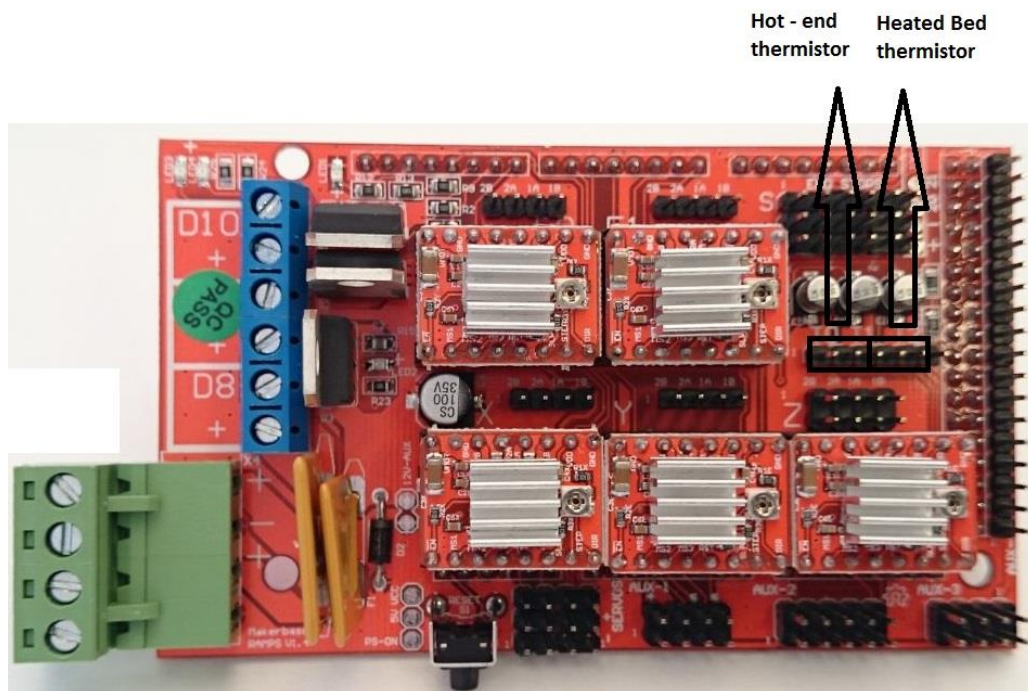
Εικόνα 36 – Συνδεσμολογία Ramps 1.4

Οι φάσεις του κάθε κινητήρα τοποθετούνται στον αντίστοιχο motor driver όπως φαίνεται στην εικόνα και ανά φάση, στο 1A – 1B η μία φάση και στο 2A – 2B η δεύτερη φάση. Το ίδιο ακριβώς ισχύει και για τον κινητήρα του extruder.



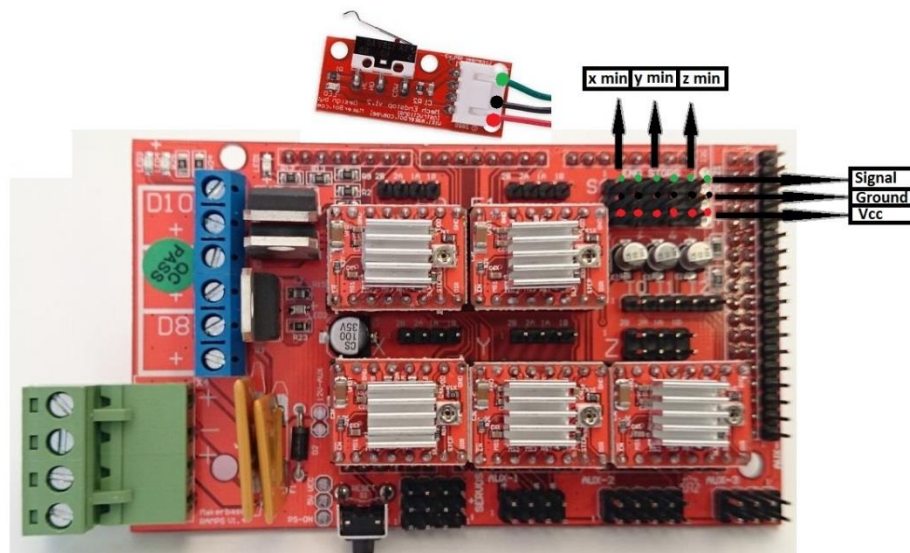
Εικόνα 37 – Ramps 1.4schematics

Στην συνέχεια τοποθετούμε τα αισθητήρια θερμοκρασίας στην ένδειξη thermistors. Στα πρώτα δύο pins τοποθετείται το αισθητήριο για το hot end και στα δύο μεσαία το αισθητήριο για την θερμαινόμενη βάση.



Εικόνα 38 – Τοποθέτηση των Thermistors σε Ramps 1.4

Τέλος γίνεται η τοποθέτηση των endstops. Το ελάχιστο πλήθος endstops που μπορούν να τοποθετηθούν είναι τρία, ένα στην αρχή κάθε άξονα. Η τοποθέτησή τους γίνεται όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 39 - Τοποθέτηση των Endstops σε Ramps 1.4

Στην επαφή D8 θα τοποθετηθεί το μέσω θέρμανσης της βάσης εκτύπωσης και στο D10 το μέσω θέρμανσης του hot end. Η επαφή D9 υπάρχει για την περίπτωση που υπάρχει δεύτερο hot end. Εναλλακτικά μπορεί να τοποθετηθεί ο ανεμιστήρας για την ψύξη του μοντέλου εκτύπωσης αν αυτός υπάρχει και όχι ο ανεμιστήρας του hot end.

Στις υποδοχές που υπάρχει η σήμανση 5A και 11A θα τοποθετηθεί η τροφοδοσία του εκτυπωτή μας. Η υποδοχή των 11 Ampers χρησιμοποιείται στην περίπτωση που υπάρχει θερμαινόμενη βάση στον εκτυπωτή. Επίσης στην των 12V/5A θα τοποθετήσουμε και τον ανεμιστήρα του hot end έτσι ώστε να έχουμε μόνιμη ψύξη στο hot end και να μην αντιμετωπίσουμε προβλήματα κατά την διάρκεια της εκτύπωσης.

3.11 Κοστολόγηση

Για την μείωση του κόστους της κατασκευής όλα τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα αγοράστηκαν μέσω ebay (ebay). Τα απαραίτητα εξαρτήματα για την λειτουργία του εκτυπωτή μαζί με τα κόστη τους είναι:

ΠΙΝΑΚΑΣ ΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗΣ 1

	Εξαρτήματα	Ποσότητα	Κόστος
1.	Arduino Mega 2560 rev3 + usb cable for PC	1	8,22 €
2.	Ramps 1.4 (x1) + A4988 motordrivers μεενσωματωμένεςψύκτρες (x5)	1+5	11,71 €
3.	J-Head Hot end with fan για Bowden Extruder + ptfe	1*1	7,44 €

	σωλήναγιαυλικόπάχους 1.75mm		
4.	Nema 17 βηματικόςκινητήραςμε filament Extruder feeder kit + driver gear	1	28,20 €
5.	NTC Thermistor 100k	6	10,39 €
6.	Mechendstop Switch	6	10,39 €
7.	3D printer filament 1,75 pla (x 400m)	1x 400mm	30,27 €
8.	Καλώδια 24 awg (ποικιλία χρωμάτων)	1 πακέτο	3,00 €
	Μερικό σύνολο		101,24 €

Επιπλέον για την μηχανική κατασκευή αγοράστηκαν τα παρακάτω είδη με τα εξής κόστη:

ΠΙΝΑΚΑΣ ΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗΣ 2

	Εξαρτήματα	Ποσότητα	Κόστος
1.	Βίδες m4 30mm	100	4,92 €
2.	Ροδέλες m4	100	1,00 €
3.	Παξιμάδια m4 ασφαλείας	100	1,81 €
4.	Βίδες m3 20mm	20	0,50 €
5.	Ροδέλες m3	20	0,50 €
6.	Παξιμάδια m3ασφαλείας	20	0,50 €
7.	Πλαστικοί αποστάτες 7mm	20	1,00 €
8.	Θερμοσυστελόμενο (x 1,6m)	1 x 1,6m	0,40 €
9.	Ελατήρια	5	1,00 €
	Μερικόσύνολο		11,60 €

Για την θερμαινόμενη βάση (heatbed) χρειάστηκαν τα παρακάτω υλικά με κόστη:

ΠΙΝΑΚΑΣ ΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗΣ 3

	Εξαρτήματα	Ποσότητα	Κόστος
1.	Φύλλο ορείχαλκου	1	4,00 €
2.	Ceramic Cartridge heater 12V/40W	1	3,20 €
	Μερικόσύνολο		7,20 €

4 Software

4.1 Εισαγωγή στο Software

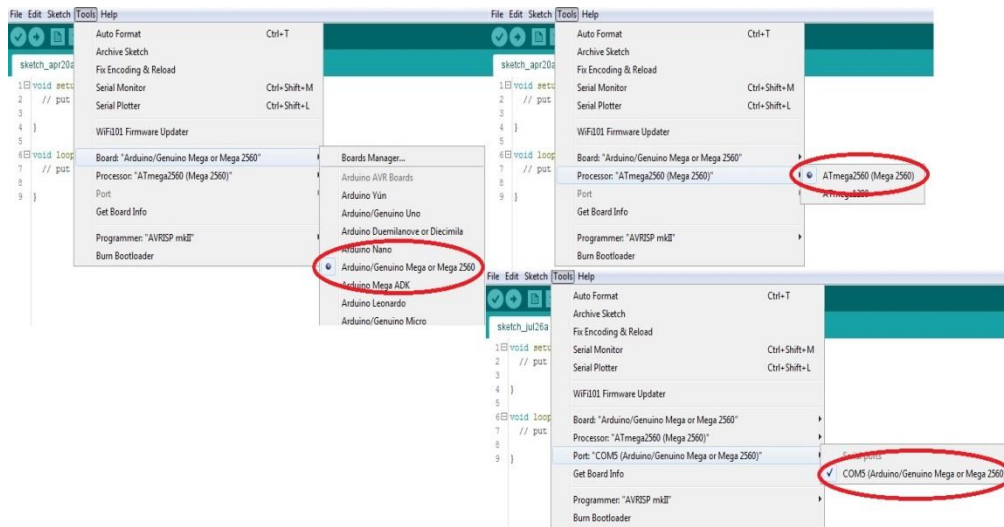
Για την λειτουργία του 3D εκτυπωτή, εκτός από το hardware, είναι σημαντικό και το λογισμικό (software). Για την επικοινωνία του Arduino με τον υπολογιστή θα χρησιμοποιηθεί το ArduinoIDE από το επίσημο site της Arduino, για τον κώδικα (Firmware) θα χρησιμοποιηθεί το marlin (έτοιμος κώδικας Arduino για την λειτουργία 3D εκτυπωτών), για τον έλεγχο και το καλιμπράρισμα του hardware του 3D εκτυπωτή θα γίνει χρήση της εφαρμογής pronterface και για την προετοιμασία και εκτύπωση του 3D μοντέλου θα χρησιμοποιηθεί η εφαρμογή Cura. Όλοι οι κώδικες και οι εφαρμογές είναι δωρεάν και opensource και μπορούν εύκολα να βρεθούν στο διαδίκτυο.

4.2 ArduinoIDE

Για την επικοινωνία του ArduinoMega 2560 rev.3 με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή θα χρειαστεί να κατεβάσουμε το ArduinoIDE από το επίσημο site της Arduino (Arduino, 2017) . Το ArduinoIDE είναι συμβατό με όλους τους μικροελεγκτες της Arduino και με τα περισσότερα Windows, Mac και LinuxOS (operating systems). Για τα Windows είναι συμβατό με WindowsXP και μεταγενέστερες εκδόσεις. Για τα Mac είναι συμβατό με MacOSX 10.7 Lion και μεταγενέστερες εκδόσεις και για τα Linux με Linux 32bit, Linux 64bit και Linux ARM, όπως αναφέρει και το site της Arduino.

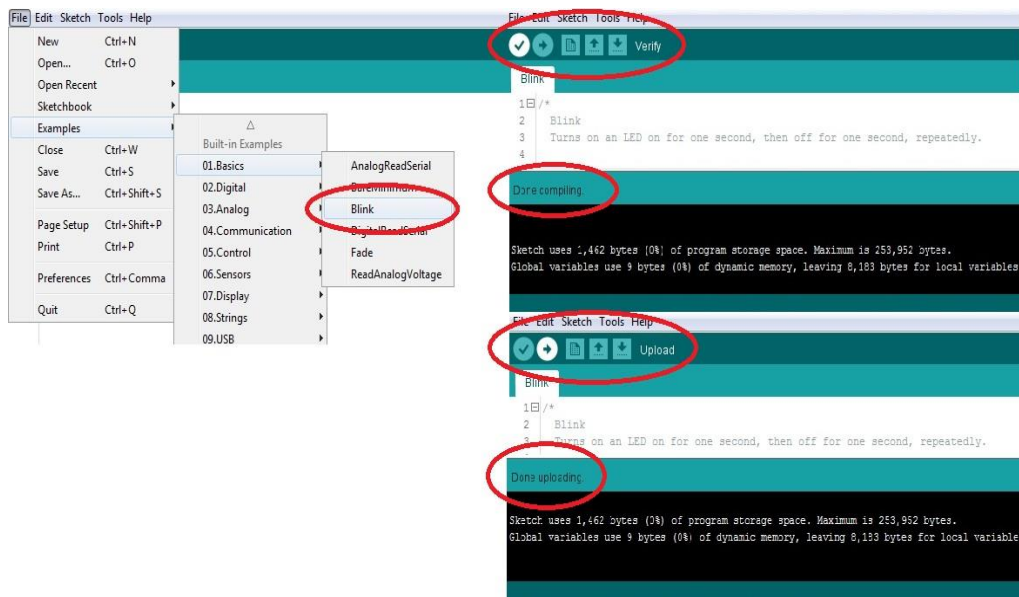
Αφού έχουμε κατεβάσει την κατάλληλη έκδοση για το λειτουργικό σύστημα του υπολογιστή μας και ολοκληρώσουμε την εγκατάσταση ακολουθώντας τα βήματα της εγκαταστάσης πρέπει να επιτύχουμε την επικοινωνία του υπολογιστή με το ArduinoMega 2560. Αφού έχουμε ανοίξει την εφαρμογή του ArduinoIDE αυτό που πρέπει να ελέγξουμε και να παραμετροποιήσουμε αν χρειάζεται είναι τρεις παράμετροι στην καρτέλα με την ονομασία Tools. Οι παράμετροι που μας ενδιαφέρουν ώστε να επιτύχουμε την επικοινωνία με το ArduinoMega 2560 είναι οι εξής τρεις: Η πρώτη είναι η παράμετρος με την ονομασία board. Επιλέγοντάς την ανοίγει μια λίστα με όλα τα διαθέσιμα board της Arduino. Εμείς επιλέγουμε το στοιχείο Arduino/Genuino Mega or Mega 2560. Η δεύτερη είναι η παράμετρος με την ονομασία Processor. Στην λίστα που μας εμφανίζει επιλέγοντας της, διαλέγουμε τον επεξεργαστή ATmega2560 (Mega 2560). Τέλος επιλέγουμε το Port του υπολογιστή μας όπου

έχουμε συνδεδεμένο το usb.



Εικόνα 40 – Σύνδεση Arduino με υπολογιστή μέσω λογισμικού

Για να εξακριβώσουμε ότι έχει επιτευχθεί η επικοινωνία με το Arduino μπορούμε να επιλέξουμε και να φορτώσουμε κάποιο από τα έτοιμα παραδείγματα κώδικα που υπάρχουν στην εφαρμογή. Αυτά μπορούν να βρεθούν στην καρτέλα File στην επιλογή Examples θα εμφανιστεί μία λίστα με όλα τα διαθέσιμα παραδείγματα κώδικα. Το καταλληλότερο για τον έλεγχο αυτό είναι το παράδειγμα με την ονομασία Blink, το οποίο βρίσκεται στην επιλογή Basics. Επιλέγοντας το μας ανοίγει ένα νέο παράθυρο με τον κώδικα για να αναβοσβήσει το Led που βρίσκεται ενσωματωμένο πάνω στο board του Arduino Mega 2560. Για να ανέβασουμε τον κώδικα στο Arduino πρώτα διαλέγουμε την επιλογή Verify και αφού επιτευχθεί το compiling του κώδικα και βεβαιωθούμε ότι είναι σωστός, επιλέγουμε να κάνουμε το upload του κώδικα στο Arduino. Αν δεν μας εμφανίσει οποιοδήποτε λάθος κατά το ανέβασμα του κώδικα θα πρέπει να παρατηρήσουμε το led στην πλακέτα του Arduino να αναβοσβήνει με συχνότητα ενός δευτερολέπτου.



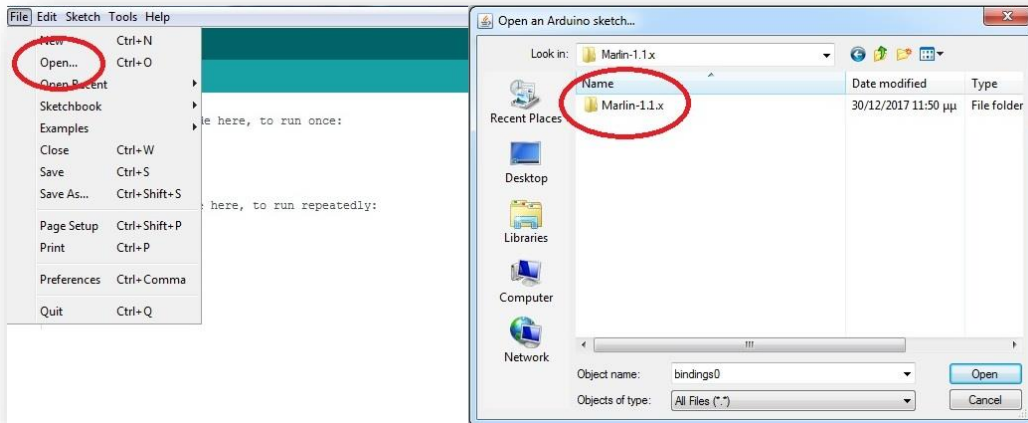
Εικόνα 41 – Upload κώδικα σε Arduino

4.3 Firmware

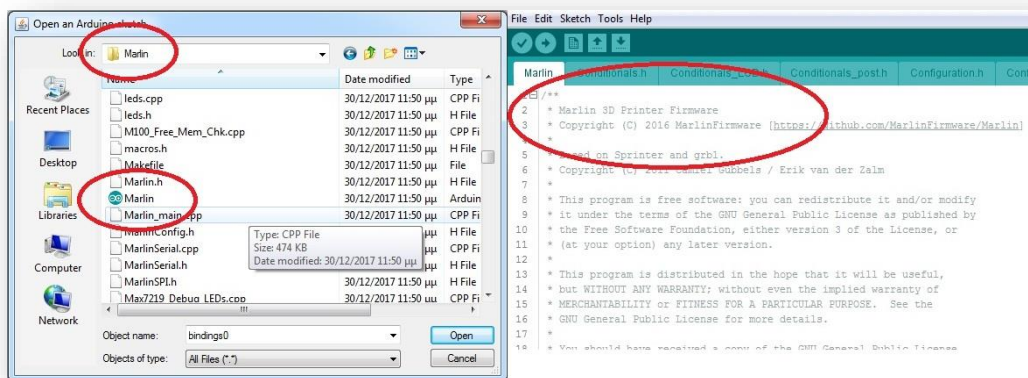
Ο κώδικας που θα χρησιμοποιήσουμε για τον 3D εκτυπωτή είναι έτοιμος κώδικας opensource και ονομάζεται Marlin. Ο κώδικας μπορεί να βρεθεί μέσω των site:

- (marlinfw.org)
- (GitHub)

Αφού κατεβάσουμε το zip αρχείο με το Firmware με ένα πρόγραμμα σαν το winzip ή το winrar αποσυμπιέζουμε το αρχείο στην τοποθεσία που θέλουμε και ανοίγουμε τον κώδικα μέσω του ArduinoIDE. Για να το κάνουμε αυτό ανοίγουμε το software του Arduino (ArduinoIDE) πάμε στο FILE → Open → κατευθυνόμαστε στην τοποθεσία που έχουμε αποθηκεύσει το αποσυμπιεσμένο αρχείο → μπαίνουμε στην έκδοση του marlin που έχουμε κατεβάσει (έστω Marlin 1.1.x) → ανοίγουμε τον φάκελο Marlin → και ανοίγουμε το Arduinofile Marlin.



Εικόνα 42 – Marlin software



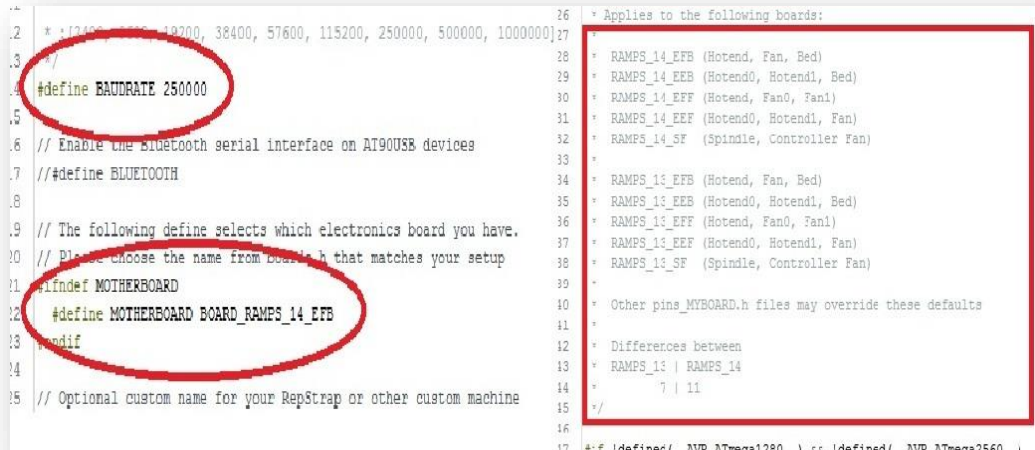
Εικόνα44 – Άνοιγμα Marlin μέσω Arduino software

Το Marlin, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, είναι έτοιμος κώδικας opensource για το Arduino. Ωστόσο για να δουλέψει με τον εκάστοτε εκτυπωτή χρειάζεται παραμετροποίηση.

Αφού έχουμε ανοίξει το Firmware μέσω του arduino κατευθυνόμαστε στην καρτέλα με την ονομασία configuration.h. Το πρώτο που πρέπει να κάνουμε είναι να ορίσουμε το baudrate σύμφωνα με τα δεδομένα μας. Το baudrate είναι ο ρυθμός μετάδοσης συμβόλων και χρησιμοποιείται στην μετάδοση αναλογικών διαμορφωμένων σημάτων. Ως ρυθμός μετάδοσης συμβόλων ορίζεται το πλήθος των συμβόλων που διέρχονται από ένα σημείο του καναλιού σε ένα χρονικό διάστημα. Το baudrate που έχουμε εμείς ορίσει είναι 250.000. Το baudrate που χρησιμοποιούμε είναι 250.000 γιατί ο ρυθμός μετάδοσης προέρχεται άμεσα από την ταχύτητα του επεξεργαστή του Arduino Mega που είναι 16 MHz. Παρουσιάζει λιγότερα λάθη από ότι η συνηθισμένη ταχύτητα 115.200 αλλά ορισμένες φορές δεν υποστηρίζεται από το hardware του υπολογιστή. Στην περιπτωσή μας δεν παρουσιάζεται κάποιο πρόβλημα εφαρμόζοντας αυτόν τον ρυθμό μετάδοσης (250.000). Έπειτα ορίζουμε την πλακέτα μας. Αν κατευθυνθούμε

στην καρτέλα με ονομασία pins_Ramps.h θα βρούμε την λίστα με όλα τα διαθέσιμα boards. Απο εκεί επιλέγουμε το δικό μας (ramps 1.4, ramps 1.3 κλπ) και την λειτουργία τους (EFB, EEB, EFF κλπ).

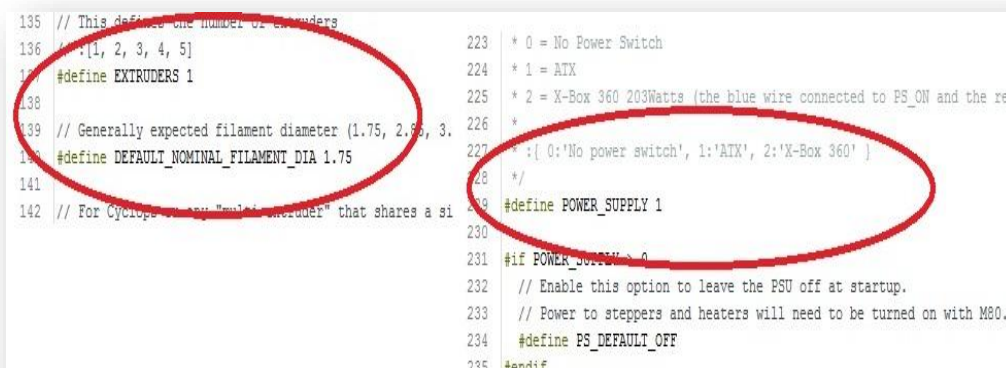
(Βλ. links *4.3)



```
2 * [12100, 19200, 38400, 57600, 115200, 250000, 500000, 1000000]
3 //
4 #define BAUDRATE 250000
5
6 // Enable the Bluetooth serial interface on AT90USB devices
7 // #define BLUETOOTH
8
9 // The following define selects which electronics board you have.
10 // Please choose the name from boards.h that matches your setup
11 #ifndef MOTHERBOARD
12 #define MOTHERBOARD BOARD_RAMPS_14_EFB
13 #endif
14
15 // Optional custom name for your RepStrap or other custom machine
16
17 #if !defined( AVR_ATmega1280 ) && !defined( AVR_ATmega2560 )
26 * Applies to the following boards:
27
28 * RAMPS_14_EFB (Hotend, Fan, Bed)
29 * RAMPS_14_EEB (Hotend0, Hotend1, Bed)
30 * RAMPS_14_EFF (Hotend, Fan0, Fan1)
31 * RAMPS_14_EEF (Hotend0, Hotend1, Fan)
32 * RAMPS_14_SF (Spindle, Controller Fan)
33 *
34 * RAMPS_13_EFB (Hotend, Fan, Bed)
35 * RAMPS_13_EEB (Hotend0, Hotend1, Bed)
36 * RAMPS_13_EFF (Hotend, Fan0, Fan1)
37 * RAMPS_13_EEF (Hotend0, Hotend1, Fan)
38 * RAMPS_13_SF (Spindle, Controller Fan)
39 *
40 * Other pins_MYBOARD.h files may override these defaults
41 *
42 * Differences between
43 * RAMPS_13 | RAMPS_14
44 * 7 | 11
45 */
46 #endif
47 #endif
```

Εικόνα 43 – Ρύθμιση Baudrate

Στην συνέχεια ορίζουμε τον αριθμό των extruders (1, 2, 3...) για την παροχή του υλικού και σε κάποιες εκδόσεις του Firmware και την διαμετρο του υλικού (1.75, 3.00,). Εδώ έχουμε επιλέξει έναν extruder και υλικό διαμέτρου 1.75 mm. Έπειτα ορίζουμε την τροφοδοσία του 3D εκτυπωτή επιλέγοντας 0 αν δεν έχει συνδεθεί το PS_ON_PIN, 1 αν το τροφοδοτικό είναι ATX και 2 αν η τροφοδοσία προέρχεται από τροφοδοτικό X-Box.



```
135 // This defines the number of extruders
136 #define EXTRUDERS {1, 2, 3, 4, 5}
137 #define EXTRUDERS 1
138
139 // Generally expected filament diameter (1.75, 2.85, 3.00)
140 #define DEFAULT_NOMINAL_FILAMENT_DIA 1.75
141
142 // For Cyclops-style "Dual-Extruder" that shares a single
143 // extruder, set this to 1.
144
145 // Power supply type (0: No power switch, 1: ATX, 2: X-Box 360)
146 #define POWER_SUPPLY 1
147
148 // Enable this option to leave the PSU off at startup.
149 // Power to steppers and heaters will need to be turned on with M80.
150 #define PS_DEFAULT_OFF
151 #endif
```

Εικόνα 44 – Ορισμός Extruders και τροφοδοτικού

Προχωρώντας κατευθυνόμαστε στο τμήμα των θερμικών ρυθμίσεων (Thermal Settings).

Αρχικά ορίζουμε τα αισθητήρια θερμοκρασίας. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει έχουμε συνολικά δύο αισθητήρια, το ένα βρίσκεται στο hot end και το δεύτερο στη θερμαινόμενη βάση εκτύπωσης (HBP). Ο κώδικας παρέχει μια λίστα όλων των διαθέσιμων τύπων αισθητηρίων θερμοκρασίας με έναν κωδικό για τον καθένα. Από την λίστα αυτή επιλέγουμε τον τύπο που χρησιμοποιούμε όπου στην περίπτωση μας είναι δύο αισθητήρια 100 k thermistor με κωδικό I σύμφωνα με την λίστα. Οπότε στην συνέχεια ορίζουμε το $Temp_Sensor+_{0} = I$ και το $Temp_Sensor_Bed = I$. Όλα τα υπόλοιπα τα αφήνουμε 0 ως έχουν.

```

-3 : thermocouple with MAX31855 (only for sensor 0)
-2 : thermocouple with MAX6675 (only for sensor 0)
-1 : thermocouple with AD595
0 : not used
1 : 100k thermistor - best choice for EPCOS 100k (4.7k pullup)
2 : 200k thermistor - ATC Semitec 204GT-2 (4.7k pullup)
3 : Mendel parts thermistor (4.7k pullup)
4 : 10k thermistor !! do not use it for a hotend. It gives bad resolution at high temp. !!
5 : 100k thermistor - ATC Semitec 104GT-2 (Used in Parcan & J-Head) (4.7k pullup)
6 : 100k EPCOS - Not as accurate as table 1 (created using a fluke thermocouple) (4.7k pullup)
7 : 100k Honeywell thermistor 135-104LAG-301 (4.7k pullup)
71 : 100k Honeywell thermistor 135-104LAF-301 (4.7k pullup)
8 : 100k 0603 SMD Vishay NTC50603E3104FXT (4.7k pullup)
9 : 100k GE Sensing AL03006-58.2K-97-G1 (4.7k pullup)
10 : 100k RS thermistor 198-961 (4.7k pullup)
11 : 100k beta 3950 1% thermistor (4.7k pullup)
12 : 100k 0603 SMD Vishay NTC50603E3104FXT (4.7k pullup) (calibrated for Makibox hot bed)
13 : 100k Hisens 3950 1% up to 300°C for hotend "simple ONE" & "Hotend "All In One"
20 : the PT100 circuit found in the Ultimainboard v2.x
60 : 100k Maker's Tool Works Kapton Bed Thermistor beta=3950
66 : 4.7M High Temperature thermistor from Dyze Design
287 * : { '0': "Not used", '1': "100k / 4.7k - EPCOS", '2': "200k / 4.7k - ATC Semitec"
288
289 #define TEMP_SENSOR_0 1
290 #define TEMP_SENSOR_1 0
291 #define TEMP_SENSOR_2 0
292 #define TEMP_SENSOR_3 0
293 #define TEMP_SENSOR_4 0
294 #define TEMP_SENSOR_BED 1
295
296 // Dummy thermistor constant temperature readings, for use with 998 and 999
297 #define DUMMY_THERMISTOR_998_VALUE 25
298 #define DUMMY_THERMISTOR_999_VALUE 100
299
300

```

Εικόνα 45 – Ορισμός αισθητηρίων θερμοκρασίας

Στην συνέχεια υπάρχουν ορισμένες μεταβλητές δικλιδες ασφαλείας που ελέγχουν την σταθερότητα της θερμοκρασίας. Αυτές είναι οι $Temp_Residency_time$, $Temp_Hysteresys$ και $Temp_Window$ για το hot end, και οι $Temp_Bed_Residency_Time$, $Temp_Bed_Hysteresis$ και $Temp_Bed_Window$ αντίστοιχα για την θερμαινόμενη βάση. Η $Temp_residency$ καθορίζει τον χρόνο που πρέπει να παραμείνει σταθερή η θερμοκρασία πριν ξεκινήσει η εκτύπωση, ενώ οι άλλες δύο καθορίζουν το τι σημαίνει σταθερή θερμοκρασία για το σύστημα. Υπάρχουν κάποιες μεταβλητές που ενημέρωνουν αν υπάρχει βλάβη στο σύστημα θερμοκρασίας. Αυτές είναι οι $Heater_Mintemp$ και $Bed_Mintemp$ που καθορίζουν την ελάχιστη θερμοκρασία που χρειάζεται για να ενεργοποιηθεί ο heater και χρησιμοποιείται για να ελεγχθεί ότι δεν υπάρχει κάποιο βραχυκύκλωμα στα αισθητήρια θερμοκρασίας. Επίσης υπάρχουν οι μεταβλητές $Heater_Maxtemp$ και $Bed_Maxtemp$ που καθορίζουν την μέγιστη θερμοκρασία του μέσου θέρμανσης. Αυτές οι μεταβλητές πρέπει να τεθούν $10^\circ - 20^\circ$ βαθμούς κελσίου πάνω από τον επιθυμητό στόχο έτσι ώστε σε περίπτωση βλάβης του θερμαινόμενου μέσου να κλείσει το σύστημα και να σταματήσει η εκτύπωση για να αποφευχθεί περαιτέρω βλάβη.

Τέλος έχουμε την μεταβλητή `Extrude_Mintemp` όπου καθορίζει την ελάχιστη θερμοκρασία που πρέπει να επιτευχθεί για να ξεκινήσει η εκβολή του υλικού. Η μεταβλητή αυτή βρίσκεται στο τμήμα των ρυθμίσεων του extruder (section extruder).

```
255 // Extruder temperature must be close to target for this long 267 // Otherwise this would lead to the heater being po
256 #define TEMP_RESIDENCY_TIME 10 // (seconds) 268 #define HEATER_0_MINTEMP 5
257 #define TEMP_HYSTERESIS 3 // (degC) range of +/- tempe 269 // #define HEATER_1_MINTEMP 5
258 #define TEMP_WINDOW 1 // (degC) Window around targ 270 // #define HEATER_2_MINTEMP 5
259 // #define HEATER_3_MINTEMP 5
260 // Bed temperature must be close to target for this long bef 272 #define BED_MINTEMP 5
261 #define TEMP_BED_RESIDENCY_TIME 10 // (seconds) 273
262 #define TEMP_BED_HYSTERESIS 3 // (degC) range of +/- τ 274 // When temperature exceeds max temp, your heater w
263 #define TEMP_BED_WINDOW 1 // (degC) Window around 275 // This feature exists to protect your hotend from ov
264 // You should use MINTEMP for thermistor short/failur
265 // The minimal temperature defines the temperature below whi 277 #define HEATER_0_MAXTEMP 275
278 // #define HEATER_1_MAXTEMP 275
279 // #define HEATER_2_MAXTEMP 275
280 // #define HEATER_3_MAXTEMP 275
281 #define BED_MAXTEMP 150
282
283
284 // This option prevents a single extrusion longer
```

Εικόνα 46 – Ρύθμιση Extruder

Έπειτα συνεχίζουμε στο τμήμα των ρυθμίσεων του PID (PID settings). Υπάρχουν δύο ελεγκτές, ένας για το hot end και ένας για την θερμαινόμενη βάση εκτύπωσης. Σκοπός τους είναι να ρυθμίσουν την ταχύτητα την ομαλότητα και την επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας. Ρυθμίζοντας τους ελεγκτές αυτούς κατάλληλα για το σύστημα μας θα έχουμε το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα στον μικρότερο δυνατό χρόνο. Για αρχή ενεργοποιούμε το PID TEMP, αν δεν είναι ήδη ενεργοποιημένο, και την επιλογή του PID_AUTOTUNE_MENU. Επίσης ελέγχουμε αν είναι ορισμένες οι σταθερές `default_Kp`, `default_Ki` και `default_Kd`. Στην συνέχεια ελέγχουμε αν είναι ενεργοποιημένο το PID TEMP BED και αν είναι ορισμένες οι σταθερές `default_bed_Kp`, `default_bed_Ki` και `default_bed_Kd`. Για την ώρα δεν θα κάνουμε κάποια άλλη αλλαγή στο τμήμα του PID αλλά αργότερα όταν θα αναλύσουμε το λογισμικό του Pronterface και θα χρησιμοποιήσουμε το PID_AUTOTUNE_MENU που ενεργοποιήσαμε για να συμπληρώσουμε τις σταθερές των PID που είναι κατάλληλες για το σύστημα μας.

σχεδόν όλες οι ρυθμίσεις που αφορούν την κίνηση των βηματικών κινητήρων, όπως τα βήματα του κάθε κινητήρα (`default_axis_steps_per_unit`), η ταχύτητα (`feed rate`), η επιτάχυνση (`acceleration`). Υπάρχει επίσης μία ακόμα μεταβλητή που ορίζεται μέσα στον κώδικα ως `JERK`, η οποία ορίζει την ελάχιστη αλλαγή ταχύτητας που χρειάζεται για να επιταχύνει ο βηματικός κινητήρας. Όταν ο κινητήρας αλλάζει ταχύτητα ή κατεύθυνση, αν η διαφορά είναι μικρότερη από την ορισμένη τιμή, τότε η αλλαγή αυτή θα γίνει ακαριαία. Στις παρακάτω φωτογραφίες παρουσιάζονται οι τιμές που έχουμε επιλέξει για τον εκτυπωτή που έχουμε κατασκευάσει, ωστόσο αυτές οι τιμές διαφέρουν από εκτυπωτή σε εκτυπωτή. Για την εύρεση των κατάλληλων τιμών ξεκινήσαμε από τις χαμηλότερες δυνατές τιμές και ύστερα από δοκιμαστικές εκτυπώσεις καταλήξαμε σε αυτές που φαίνονται παρακάτω. Την επιλογή των συγκεκριμένων βημάτων για κάθε κινητήρα θα την αναλύσουμε εκτενέστερα όταν θα έχουμε αναφερθεί και στο λογισμικό `pronterface`.

```

17 // #define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT { 80, 80, 4000, 500 }
18 #define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT { 105.5, 105.5, 109, 88.22 }
19
20 // #define DEFAULT_MAX_FEEDRATE { 300, 300, 5, 25 }
21 #define DEFAULT_MAX_FEEDRATE { 100, 100, 5, 25 }
22
23 // #define DEFAULT_MAX_ACCELERATION { 3000, 3000, 100, 10000 }
24 #define DEFAULT_MAX_ACCELERATION { 1000, 1000, 100, 5000 }
25
26 #define DEFAULT_ACCELERATION 100//3000 // X
27 #define DEFAULT_RETRACT_ACCELERATION 100//3000 // E
28 #define DEFAULT_TRAVEL_ACCELERATION 100//3000 // X
29
30 #define DEFAULT_XJERK 10.0
31 #define DEFAULT_YJERK 10.0
32 #define DEFAULT_ZJERK 0.3
33 #define DEFAULT_EJERK 5.0

```

Εικόνα 50 – Ρύθμιση ελάχιστης ταχύτητας βηματικού κινητήρα

Μία ακόμα επιλογή που υπάρχει για την κίνηση των κινητήρων είναι και η αλλαγή κατεύθυνσης. Έτσι εάν κάποιος από τους κινητήρες κινείται αντίθετα από την επιθυμητή φορά, αντί να αλλάξουμε χειροκίνητα τις φάσεις του κινητήρα, μπορούμε να αλλάξουμε την κατεύθυνση μέσα από τον κώδικα θέτοντας `TRUE` or `FALSE` τις παρακάτω εντολές που φαίνονται στην Εικόνα 51.

```
// Invert the stepper direction // For direct drive extruder v1
#define INVERT_X_DIR false
#define INVERT_Y_DIR false
#define INVERT_Z_DIR false
#define INVERT_E0_DIR true
#define INVERT_E1_DIR false
#define INVERT_E2_DIR false
#define INVERT_E3_DIR false
```

Εικόνα 51 – Ρύθμιση κίνησης κινητήρων

Επιπλέον υπάρχει η επιλογή να ορίσουμε την αρχική θέση των κινητήρων (homing position). Η πιο συνηθισμένη αρχική θέση των κινητήρων είναι ο κινητήρας του x άξονα να βρίσκεται τέρμα αριστερά, ο κινητήρας του y άξονα να βρίσκεται τέρμα πίσω και ο z άξονας να βρίσκεται όσο πιο κοντά γίνεται στην βάση. Ωστόσο, αν για κάποιο λόγο θέλουμε να αλλάξουμε την αρχική θέση μπορούμε να αλλάξουμε τις τιμές στις Home_Dir μεταβλητές. Οι τιμές που μπορούμε να ορίσουμε είναι $[-1, 1]$ όπου το $-1 = MIN$ και το $1 = Max$. Επίσης πρέπει να ορίσουμε τις μεταβλητές `min_software_endstops = TRUE` και `max_software_endstops = TRUE`, αν δεν είναι ήδη ορισμένες. Ορίζοντας αυτές ως αληθή, οι άξονες δεν θα φεύγουν εκτός των ορισμένων ορίων όπως φαίνονται παρακάτω. Τα όρια των αξόνων είναι το μήκος που μπορεί να ταξιδέψει κάθε άξονας. Ορίζουμε ως (0, 0, 0) τα MIN_POS και ως MAX_POS το μήκος του κάθε άξονα. Ιδανικά όλοι οι άξονες θα έπρεπε να έχουν ακριβώς το ίδιο μήκος.

```
// [-1, 1]
#define X_HOME_DIR -1
#define Y_HOME_DIR -1
#define Z_HOME_DIR -1
#define min_software_endstops true
#define max_software_endstops true
// Travel limits based on GCODE
#define X_MIN_POS 0
#define Y_MIN_POS 0
#define Z_MIN_POS 0
#define X_MAX_POS 42.00
#define Y_MAX_POS 37.00
#define Z_MAX_POS 35.70
```

Εικόνα 52 – Ρύθμιση Home positioning

Αυτή είναι η βασική παραμετροποίηση που πρέπει να γίνει ώστε να έχουμε έναν λειτουργικό εκτυπωτή. Ο κώδικας μόνο στην καρτέλα configuration.ηπου παραμετροποιήσαμε για τον δικό μας εκτυπωτή είναι περίπου 1500 γραμμές, επιπλέον υπάρχει μια καρτέλα

configuration_adv.h με περίπου άλλες 1000 γραμμές κώδικα. Ενδεικτικά κάποια από τα επιπλέον τμήματα του κώδικα είναι το Filament_runout_sensor αν υπάρχει ανάλογο αισθητήριο στον εκτυπωτή, το Auto Bed Leveling αν έχουμε εγκαταστήσει κάποιον proximity sensor στον z άξονα, επιπλέον επιλογή για την εγκατάσταση LCD οθόνης στον εκτυπωτή και πολλά ακόμα.

4.4 Cura

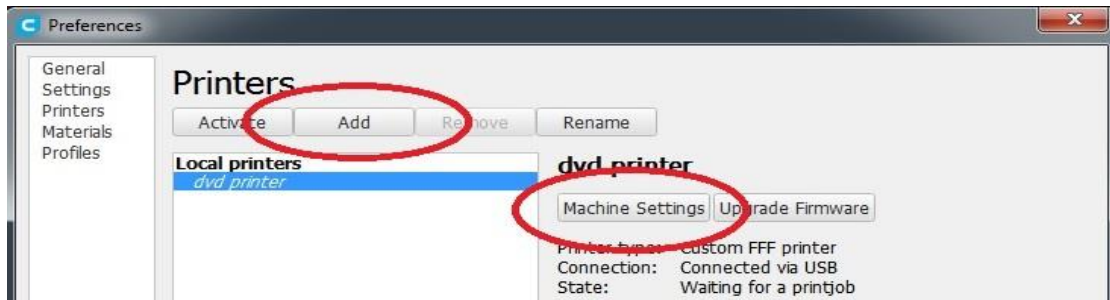
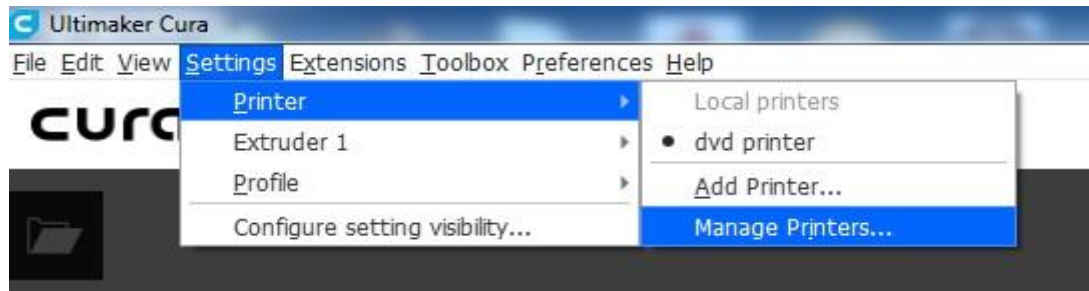
Το πρόγραμμα Cura είναι και αυτό ένα ακόμα open source λογισμικό, που μπορεί να βρεθεί χωρίς χρέωση από το επίσημο site της Ultimaker (UltimakerB.V., 2011-2019):

Είναι το επίσημο πρόγραμμα των εκτυπωτών Ultimaker και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα άλλων εκτυπωτών, όπως και στον εκτυπωτή που κατασκευάζουμε. Είναι ένα αρκετά σταθερό και αξιόπιστο πρόγραμμα, εύκολο προς τον χρήστη και με πλήθος ρυθμίσεων για την καλύτερη δυνατή εκτύπωση.

Με την εκκίνηση του προγράμματος εκτελείται και ο οδηγός εγκατάστασης του εκτυπωτή όπου γίνεται η κατάχωρηση του τύπου του εκτυπωτή και των βασικών μερών του hardware αυτού όπως η διάμετρος της μύτης εκτύπωσης (nozzle), οι διαστάσεις της βάσης εκτύπωσης κ.α. Τα στοιχεία αυτά μπορούν να αλλάξουν αργότερα μέσα από το πρόγραμμα. Το Cura μπορεί να επεξεργαστεί αρχεία STL, OBJ και 3MF. Κατά κύριο λόγο τα σχέδια που κυκλοφορούν στο διαδίκτυο είναι τύπου STL, ωστόσο για κάποιον που θέλει να κάνει τα δικά του σχέδια χρησιμοποιώντας προγράμματα όπως το Autocad, τα αρχεία OBJ μπορεί να του είναι πιο βολικά. Υπάρχουν πολλά site με έτοιμα σχέδια για 3D εκτυπώσεις όπως τα:

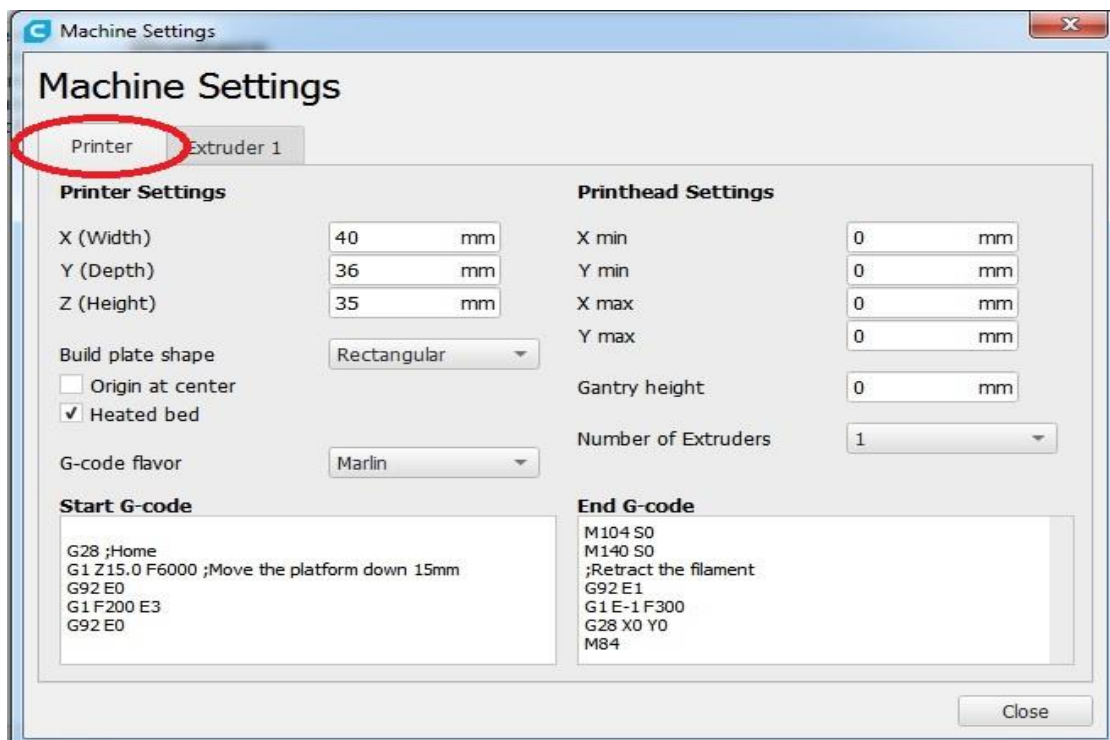
- (Pinshape)
- (Thingiverse)
- (youmagine)

Χρησιμοποιώντας για πρώτη φορά το Cura θα πρέπει να ελέγξουμε να έχουν δηλωθεί σωστά τα χαρακτηριστικά του εκτυπωτή. Αυτό μπορούμε να το ελεγχουμε από την καρτέλα Settings, ακολουθώντας την διαδρομή Settings → Printer → Manage Printers. Όπως επίσης αν θέλουμε να κάνουμε κάποια αλλαγή στο hardware του εκτυπωτή (π.χ. να κάνουμε αλλαγή στην διάμετρο της μύτης του εκτυπωτή). Στο παράθυρο που ανοίγει επιλέγουμε το προφίλ του εκτυπωτή που έχουμε ήδη δημιουργήσει κατά την εγκατάσταση του προγράμματος ή αν δεν υπάρχει κάνουμε Add και δημιουργούμε έναν καινούργιο προφίλ. Έπειτα επιλέγουμε το προφίλ του εκτυπωτή μας και πατάμε το Machine Settings.

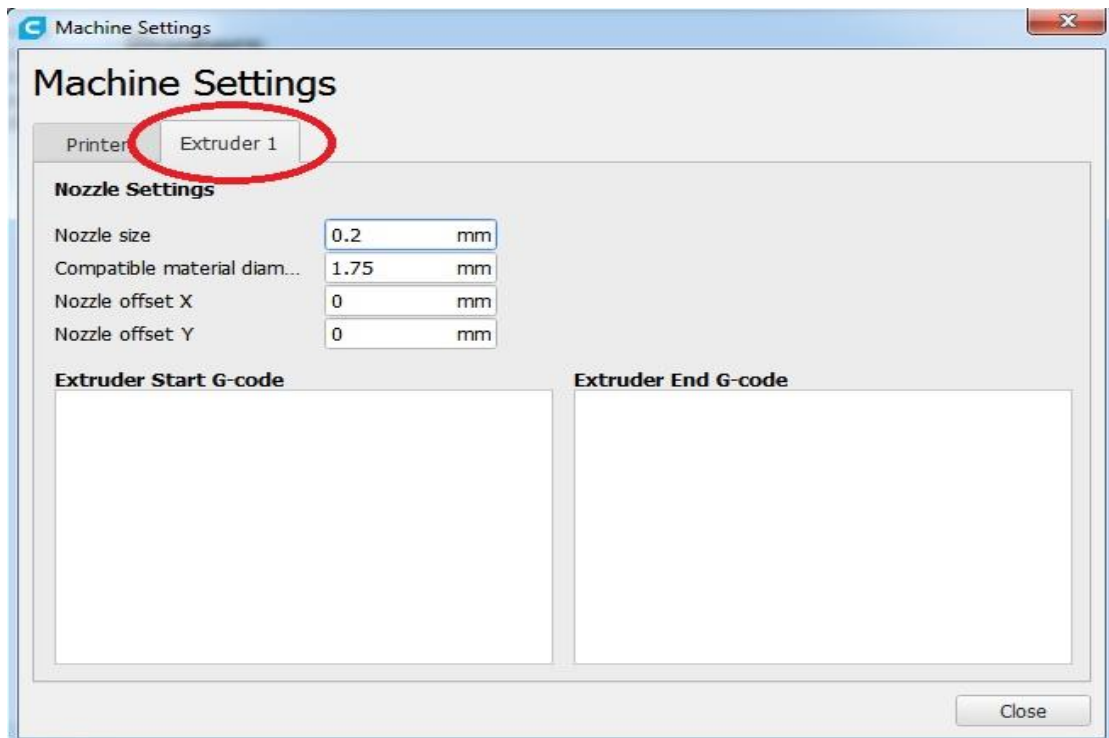


Εικόνα 53 – Cura, δήλωση εκτυπωτή

Στο νέο παράθυρο που μας ανοίγει υπάρχουν δύο καρτέλες. Η πρώτη καρτέλα αφορά τις ρυθμίσεις του εκτυπωτή όπως το μέγεθος και το σχήμα της βάσης εκτύπωσης, το κατά πόσο η βάση είναι θερμαινόμενη ή όχι, το πλήθος των κεφαλών εκτύπωσης κ.α. Ενώ στην δεύτερη καρτέλα υπάρχουν οι ρυθμίσεις που αφορούν την κεφαλή εκτύπωσης, όπως η διάμετρος της μύτης εκτύπωσης, η διάμετρος του υλικού εκτύπωσης κ.α. Όλες αυτές οι ρυθμίσεις θα πρέπει να συμπληρωθούν κατά το δοκούν.

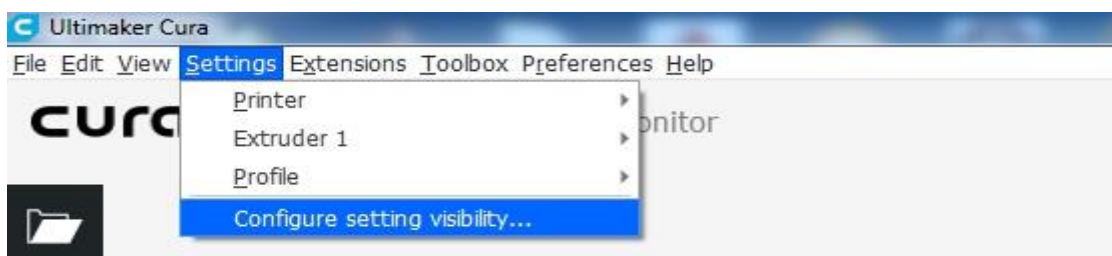


Εικόνα 54 – Cura, ρύθμιση εκτυπωτή

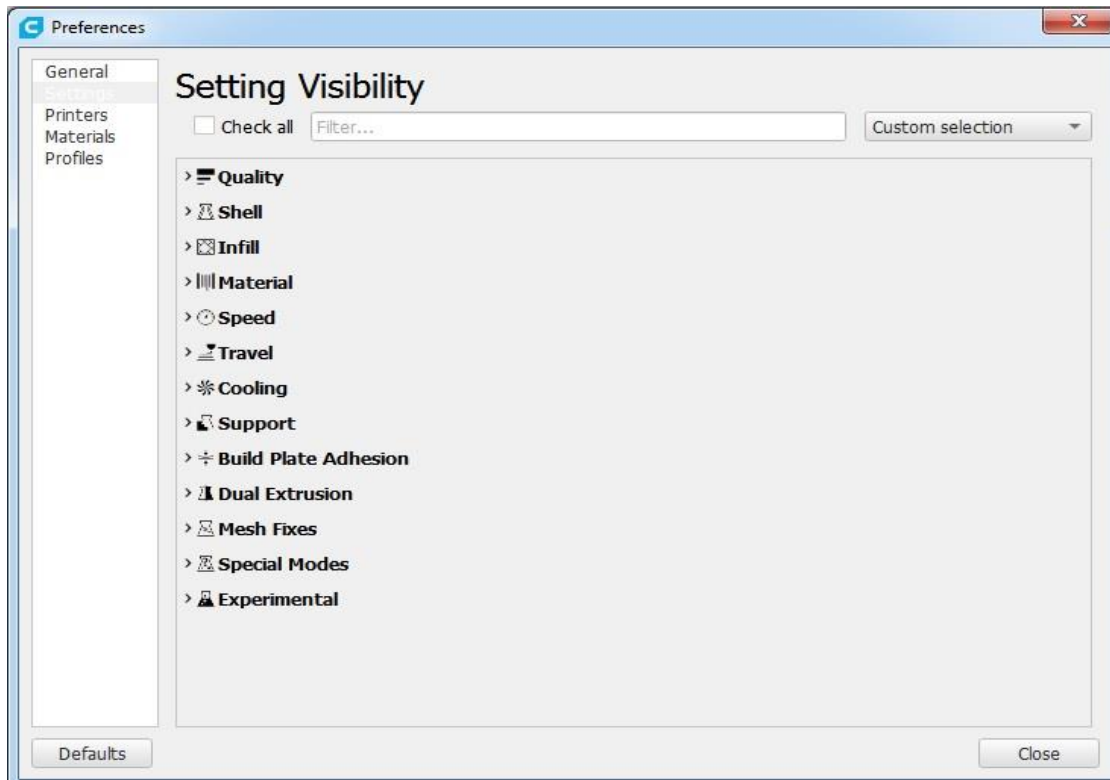


Εικόνα 55 – Cura, ρύθμιση Extruder

Στην συνέχεια αφού έχουμε δηλώσει και ρυθμίσει τον εκτυπωτή μας στην αρχική οθόνη του προγράμματος στα δεξιά θα δούμε ότι υπάρχει μια λίστα από πλήθος ρυθμίσεων Quality, Shell, Infill, Material, Speedκ.α., που αφορούν την ποιότητα της εκτύπωσης. Το Cura μας δίνει την επιλογή είτε να χρησιμοποιήσουμε το έτοιμο προφίλ εκτύπωσης με τις βασικές ρυθμίσεις ενεργές, είτε να δημιουργήσουμε το δικό μας προφίλ εκτύπωσης με τις δικές μας ρυθμίσεις. Για έναν casual χρήστη συνήθως οι βασικές ρυθμίσεις είναι αρκετές για να έχει μια αρκετά καλή ποιότητα εκτύπωσης. Επιπλέον ρυθμίσεις για την παραμετροποίηση της εκτύπωσης πέρα των όσων υπάρχουν ήδη ενεργοποιημένες στην αρχική οθόνη, μπορούν να βρεθούν στην καρτέλα Settings→Configure setting visibility.



Εικόνα 4.4.iv



Εικόνα 56 – Cura, εύρεση τρεχόντων ρυθμίσεων

- **Quality:** Η πρώτη ρύθμιση στην λίστα είναι η επιλογή της ποιότητας της εκτύπωσης (Quality). Ενδεικτικά μερικές από τις επιλογές ρύθμισης είναι τα Layer Height, Line Width, Wall Line Width, Infill Line Width κ.α. Γενικά σε αυτή την κατηγορία ρυθμίζουμε την ανάλυση και την ποιότητα της εκτύπωσης.
- **Shell:** Έπειτα ακολουθούν οι ρυθμίσεις για το κέλυφος της εκτύπωσης (Shell), που αφορά το πάχος των τοιχωμάτων (Wall Thickness) και το πάχος της αρχής και του τέλους της εκτύπωσης (Top/Bottom Thickness). Αν για παραδειγμα επιλέξουμε τα τοιχώματα των εκτυπώσεων μας να έχουν πάχος 0.8 mm (Wall Thickness) και το πάχος της γραμμής εκτύπωσης για τα τοιχώματα του μοντέλου να είναι 0.2 mm (Wall Line Width), τότε ο εκτυπωτής θα κάνει 4 συνολικά περάσματα για να τυπώσει το κέλυφος του μοντέλου. Μία ακόμα επιλογή που υπάρχει στις ρυθμίσεις για το κέλυφος του μοντέλου είναι το Print Thin Walls και αφορά την εκτύπωση σημείων του μοντέλου εκτύπωσης όπου το πάχοςμέρους του μοντέλου είναι μικρότερο από την διάμετρο της μύτης εκτύπωσης. Γενικά η κατηγορία αυτή ρυθμίσεων αφορά τις ρυθμίσεις της εξωτερικής εκτύπωσης του κάθε μοντέλου και κατ' επέκταση της εμφάνισής του.
- **Infill:** Στην συνέχεια υπάρχουν οι ρυθμίσεις για την εκτύπωση του εσωτερικού του μοντέλου (Infill). Στην κατηγορία αυτή θα συναντίσουμε ρυθμίσεις όπως Infill Density, Infill Overlap Percentage κ.α. που αφορούν την ρύθμιση της εκτύπωσης του

εσωτερικού μέρους ενός μοντέλου. Για παράδειγμα αν θέλαμε να τυπώσουμε έναν κουμπαρά θα έπρεπε να έχουμε ρυθμίσει έτσι το προφίλ εκτύπωσης ώστε να έχουμε ένα αρκετά γερό κέλυφος για να μπορεί να αντέξει το βάρος των κερμάτων. Ας πούμε 1 – 1.5 mm Wall Thickness ενώ το Infill Density θα έπρεπε να το ρυθμίσουμε ώστε να είναι 0% για να έχουμε μία τελείως κούφια εκτύπωση.

- **Material:** Στην κατηγορία Material θα βρούμε ρυθμίσεις που αφορούν το υλικό εκτύπωσης όπως την θερμοκρασία εκτύπωσης, την θερμοκρασία της θερμαινόμενης βάσης αν αυτή υπάρχει, την ροή του υλικού κ.α.
- **Speed:** Έπειτα υπάρχει η κατηγορία Speed. Μέσω αυτής μπορούμε να προσαρμόσουμε την ταχύτητα εκτύπωσης ανάλογα με τις ανάγκες μας και τις δυνατότητες του εκτυπώτη.
- **Travel:** Η κατηγορία Travel αφορά την κίνηση της κεφαλής κατά την εκτύπωση όπως για παράδειγμα για την αποφυγή εμποδίων, την προτεραιότητα εκτύπωσης κ.α.
- **Cooling:** Στην κατηγορία Cooling μπορούμε να ενεργοποιήσουμε τους ανεμιστήρες για την ψύξη του μοντέλου κατά την εκτύπωση αν αυτοί υπάρχουν. Κατ'επέκταση υπάρχουν διάφορες ρυθμίσεις για την ταχύτητα του ανεμιστήρα στην διάρκεια της εκτύπωσης.
- **Support:** Η επόμενη κατηγορία ρυθμίσεων είναι πολύ σημαντική καθώς χωρίς αυτήν πολλά από τα μοντέλα που εκτυπώνονται απλά θα κατέρρεαν πριν καλά καλά ολοκληρωθούν και αφορά την στήριξη (Support). Τα στηρίγματα κατά την εκτύπωση είναι πολλές φορές σωτήρια και πολύ βασικά για να ολοκληρωθεί σωστά μια εκτύπωση.
- **Build Plate Adhesion:** Στην διάρκεια μιας εκτύπωσης πολλές φορές παρατηρούμε είτε το μοντέλο να ξεκολλάει από την βάση επειδή έχει μικρή επιφάνεια επαφής με την βάση, είτε μετά το τέλος της εκτύπωσης και αφού κρυώσει η βάση της εκτύπωσης να παραμορφώνεται (warping). Για αυτές τις περιπτώσεις υπάρχει αυτή η κατηγορία ρυθμίσεων. Εδώ μπορούμε να ρυθμίσουμε την εκτύπωσή μας ώστε να δημιουργήσει μια επιπλέον βάση για την καλύτερη επαφή του εκτυπώμενου μοντέλου μας με την βάση του εκτυπώτη. Με αυτόν τον τρόπο κρατάμε το μοντέλο εκτύπωσης σταθερό στην θέση του. Ανάλογα το μοντέλο που θέλουμε να εκτυπώσουμε υπάρχουν διάφορες επιλογές και ρυθμίσεις για την δημιουργία της επιπλέον αυτής βάσης.

- Dual Extrusion: Η κατηγορία αυτή αφορά εκτυπωτές που έχουν διπλή κεφαλή εκτύπωσης.
- Mesh Fixes, Special Modes, Experimental
- Οι τρεις αυτές κατηγορίες αφορούν ρυθμίσεις ειδικών περιπτώσεων ή έσχατης λύσης. Για παράδειγμα, αν γίνεται εκτύπωση πολλαπλών μοντέλων μπορούμε να επιλέξουμε αν θα τυπωθούν όλα μαζί ή το καθένα με την σειρά του. Επίσης αν υπάρχει πρόβλημα με κενά στα στρώματα της εκτύπωσης και δεν μπορεί να λυθεί με οποιοδήποτε άλλο τρόπο τότε μπορεί να ενεργοποιηθεί η ρύθμιση Ignore All Holes, αλλά σαν αντίκτυπο έχει ότι αφαιρούνται όλα τα κενά ακόμα και από τα εξωτερικά στρώματα εκτύπωσης. Τέλος, στην κατηγορία Experimental υπάρχουν πλήθος πειραματικών ρυθμίσεων για πιο εξειδικευμένες εκτυπώσεις.

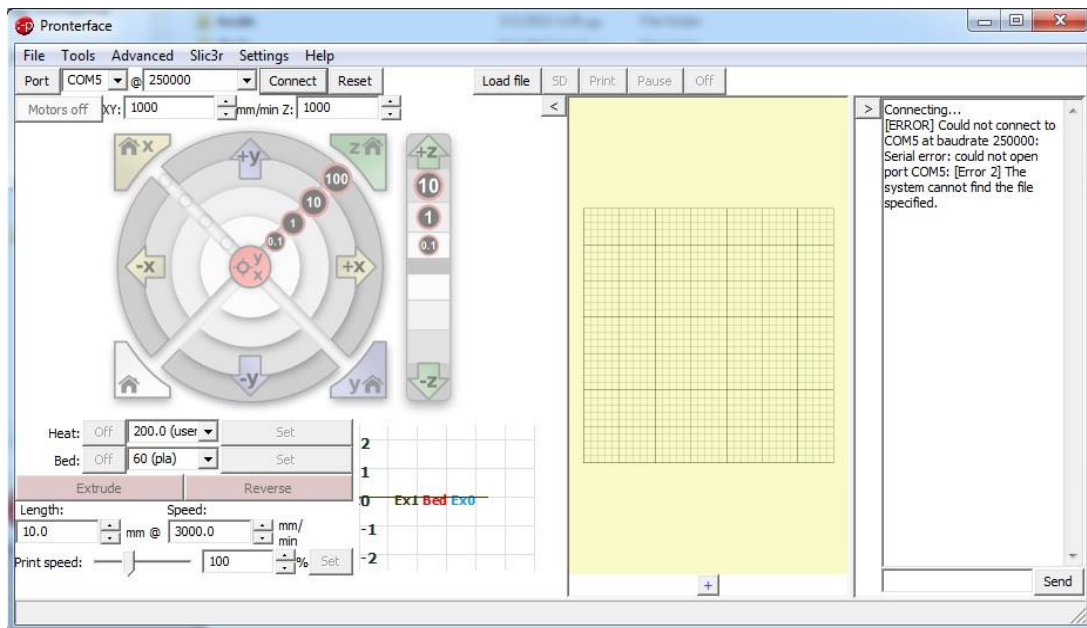
(βλ. (ALL3DP, 2019), (Ultimaker B.V., 2011-2019), (CREATE Education, 2018))

4.5 Pronterface

Το Pronterface είναι ένα δωρεάν και opensource πρόγραμμα, πλήρως εξοπλισμένο για 3D εκτύπωση και μπορούμε να το κατεβάσουμε από την επίσημη σελίδα (Pronterface, 2019). Ωστόσο στην περίπτωσή μας, επειδή είναι κάπως πιο δυσανάγνωστο και το παραθυρικό του περιβάλλον δεν είναι τόσο φιλικό προς τον απλό χρήστη, θα το χρησιμοποιήσουμε μόνο σαν όργανο για να κάνουμε ορισμένους ελέγχους για τον εκτυπωτή μας κατά την διάρκεια της κατασκευής του και για να καλιμπράρουμε σωστά τους άξονες και τα αισθητήρια.

Το περιβάλλον του Pronterface αποτελείται από τρία βασικά πάνελ. Στα αριστερά βρίσκεται το πάνελ όπου μπορούμε χειροκίνητα να ελέγξουμε οποιοδήποτε μέρος του 3D εκτυπωτή, όπως τους άξονες, τον extruder, τις θερμοκρασίες κ.α. Στο κέντρο βρίσκεται το γράφημα όπου φορτώνουμε το σχέδιο που θέλουμε να τυπώσουμε και έχοντας θέσει τις κατάλληλες ρυθμίσεις στο πρώτο πάνελ εκτελούμε την εκτύπωση που επιθυμούμε. Και στα δεξιά βρίσκεται ένας κειμενογράφος όπου αποτυπώνει την οποιαδήποτε κίνηση εκτελούμε, μας ενημερώνει για οποιοδήποτε σφάλμα και μας δίνει την δυνατότητα να δώσουμε εντολές σε κώδικα G-code. Ο κώδικας G είναι κώδικας που χρησιμοποιείται στις CNC μηχανές και έχει ενσωματωθεί και στο Firmware των 3D εκτυπωτών. Στην παρακάτω φωτογραφία φαίνονται τα τρία βασικά μέρη του Pronterface, όπως είπαμε παραπάνω, καθώς και το σφάλμα που έχει εμφανίσει στον κειμενογράφο αφού έχουμε προσπαθήσει να κάνουμε σύνδεση με τον εκτυπωτή ενώ δεν τον έχουμε συνδεδεμένο. Το Pronterface θα το χρησιμοποιήσουμε σαν

εργαλείο αποσφαλμάτωσης και βαθμονόμησης του εκτυπωτή. Για τον λόγο αυτό δεν θα επεκταθούμε πολύ στην λειτουργία του προγράμματος, παρά μόνο στις βασικές λειτουργίες ώστε να κάνουμε τους ελέγχους που χρειάζονται.



Εικόνα59 - ΠεριβάλλονPronterface

5 Αποσφαλμάτωση και Βαθμονόμηση (Debugging and Calibration)

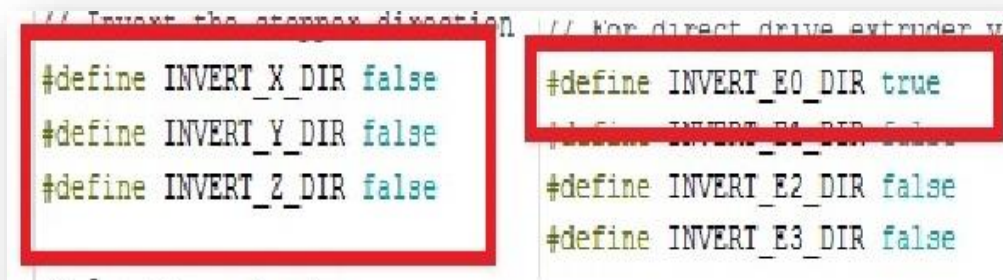
Αφού έχουμε κατασκευάσει τον εκτυπωτή, έχουμε παραμετροποιήσει το Firmware και έχουμε εγκαταστήσει όλα τα απαραίτητα προγράμματα, πριν ξεκινήσουμε να εκτυπώνουμε τα 3Dμοντέλα θα πρέπει να κάνουμε την αποσφαλμάτωση και την βαθμονόμηση του εκτυπωτή μας. Πρακτικά σημαίνει να προβούμε σε ορισμένες δοκιμές και ελέγχους ώστε να βεβαιωθούμε ότι όλα δουλεύουν και θα δουλέψουν κατά το δοκούν. Για τις δοκιμές και τους ελέγχους αυτούς θα χρησιμοποιήσουμε το Pronterface.

5.1 Γεωμετρική συμμετρία των αξόνων

Ο πιο βασικός έλεγχος που θα πρέπει να γίνει είναι ο οπτικός έλεγχος ώστε να βεβαιωθούμε ότι οι άξονες είναι γεωμετρικά συμμετρικοί. Επιπλέον μπορούν να χρησιμοποιηθούν ορισμένα όργανα μέτρησης. Αν υπάρχουν τυχόν αποκλίσεις θα πρέπει να κάνουμε σωστή βαθμονόμηση των αξόνων. Αν δεν υπάρχει σωστή συμμετρία των αξόνων τότε ούτε το εκτυπώμενο μοντέλο θα είναι γεωμετρικά σωστό.

5.2 Έλεγχος κατεύθυνσης των αξόνων

Ο επόμενος έλεγχος που θα πρέπει να γίνει είναι η σωστή κατεύθυνση των κινητήρων. Για τον έλεγχο αυτό θα χρησιμοποιήσουμε το Pronterface. Έχοντας συνδεδεμένο τον εκτυπωτή στον υπολογιστή και αφού ανάψουμε και την εξωτερική τροφοδοσία του εκτυπωτή, τρέχουμε το πρόγραμμα στο παραθυρικό μας περιβάλλον. Επιλέγοντας το Connect, το Pronterface αποκτά σύνδεση με τον εκτυπωτή και είμαστε έτοιμοι για να ελέγξουμε την κατεύθυνση των κινητήρων. Στο αριστερό πάνελ του Pronterface υπάρχει το γράφημα με τις κατευθύνσεις του κάθε κινητήρα. Ελέγχουμε έναν προς έναν τους κινητήρες ώστε να βεβαιωθούμε ότι η κατεύθυνση τους είναι ίδια με αυτή που μας δείχνει το πρόγραμμα. Στην περίπτωση που κάποιος από τους κινητήρες δεν κινείται στην σωστή κατεύθυνση υπάρχουν δύο τρόποι για να το διορθώσουμε. Ο πρώτος είναι από το hardware, αλλάζοντας την σειρά των φάσεων των κινητήρων στο Ramps 1.4. Να σημειωθεί ότι απαιτείται να έχει σβήσει πρώτα οποιαδήποτε πηγή τροφοδοσίας του εκτυπωτή και μετά να γίνει η οποιαδήποτε αλλαγή στην συνδεσιμότητα. Ο δεύτερος τρόπος είναι μέσα από το Firmware, αλλάζοντας την κατεύθυνση των κινητήρων ορίζοντας True or False. Μετά την αλλαγή θα πρέπει να κάνουμε εκ νέου upload το Firmware στο Arduino.



```
// Invert the stepper direction // For direct drive extruder v1
#define INVERT_X_DIR false
#define INVERT_Y_DIR false
#define INVERT_Z_DIR false

// For direct drive extruder v1
#define INVERT_E0_DIR true
#define INVERT_E1_DIR false
#define INVERT_E2_DIR false
#define INVERT_E3_DIR false
```

Εικόνα 57 – Ρύθμιση κατεύθυνσης κινητήρων

5.3 Έλεγχος κατεύθυνσης κινητήρων x, y, z

Για τα επόμενα δύο τμήματα που αφορούν τον έλεγχο και την βαθμονόμηση του κινητήρα του extruder θα πρέπει πρώτα να παραμετροποιήσουμε προσωρινά μια εντολή του Firmware. Θα πρέπει να ορίσουμε το *Extrude_Mintemp 0* έτσι ώστε να μπορέσει ο extruder να λειτουργήσει χωρίς να χρειαστεί να θέσουμε σε λειτουργία το hot end. Αφού ορίσουμε την εντολή αυτή ίση με το μηδέν και κάνουμε upload τον νέο κώδικα στο Arduino, δοκιμάζουμε αν ο extruder δουλεύει σωστά. Πατώντας το Extrude στο πάνελ του pronterface θα πρέπει ο

extruder να ωθεί το υλικό προς τα έξω ενώ πατώντας το Reverse θα πρέπει να τραβάει το υλικό προς τα μέσα. Αν ο extruder δεν λειτουργεί όπως θα έπρεπε μπορεί να διορθωθεί αντίστοιχα όπως και οι υπόλοιποι κινητήρες.

```
219 // The minimal temperature defines the temperature below which
220 // it is highly recommended to leave this option disabled.
221 #define PREVENT_COLD_EXTRUSION
222 #define EXTRUDE_MINTEMP 170
223
224 // This option prevents a single extrusion longer
```

Εικόνα 61 – Ρύθμιση κατεύθυνσης κινητήρα Extruder

5.4 Βαθμονόμηση βημάτων κινητήρα Extruder (Extrusion)

Πρωτού προχωρήσουμε με την βαθμονόμηση των βημάτων των κινητήρων x, y, z, θα πρέπει πρώτα να προχωρήσουμε σε ορισμένους άλλους ελέγχους ξεκινώντας από την βαθμονόμηση των βημάτων του κινητήρα του extruder που ως αποτέλεσμα θα έχει την βαθμονόμηση της ώθησης του υλικού ή, όπως ονομάζεται η διαδικασία, το Extrusion.

Από το κεφάλαιο του Firmware που είδαμε παραπάνω έχουμε ήδη ορίσει κάποια βήματα για τον κάθε κινητήρα όπως και για τον extruder, τα οποία έχουν βρεθεί έπειτα από την βαθμονόμηση του εκτυπωτή. Ωστόσο τα προκαθορισμένα βήματα του κώδικα διαφέρουν κατά πολύ από τα ορισμένα όπως φαίνεται και από την Εικόνα 58.

```
//#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT { 80, 80, 4000, 500 }
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT { 105.5, 105.5, 109, 88.22 }
```

Εικόνα 58 – Βήματα κινητήρα κώδικα με πραγματικά

Για τον extruder τα προκαθορισμένα βήματα ήταν 500 ενώ μετά από την βαθμονόμηση καταλήξαμε ότι ο κατάλληλος ρυθμός βημάτων για τον κινητήρα extruder που χρησιμοποιούμε είναι 88,22. Για να πετύχουμε μια σωστή βαθμονόμηση για τον εκτυπωτή μας θα πρέπει να ακολουθήσουμε τα παρακάτω βήματα. Η μη σωστή βαθμονόμηση μπορεί να οδηγήσει είτε σε over extruding ή σε under extruding.

Το υλικό μας από τον κινητήρα ως το hot end οδηγείται μέσω ενός σωλήνα διαμέτρου 1.75 mm. Για να μπορέσουμε να βαθμονομήσουμε τον extruder ή αλλιώς την ροή του υλικού μας, θα πρέπει πρώτα να αποδεσμεύσουμε το σωληνάκι από το hot end και να ευθυγραμμίσουμε την άκρη του υλικού μας με το τέλος του σωλήνα. Έπειτα στο πάνελ του Pronterface ορίζουμε το τμήμα length ίσο με 100 mm και κάνουμε extrude το υλικό μας. Στην συνέχεια μετράμε το πραγματικό μήκος του υλικού μας που ωθήθηκε από τον extruder και από τον παρακάτω τύπο βρίσκουμε το νέο ρυθμό βημάτων του κινητήρα.

$$\text{Νέος ρυθμός βημάτων} = \text{υπάρχων ρυθμός βημάτων} * \frac{\text{Επιθυμητό μήκος mm}}{\text{Μετρήσιμο μήκος mm}}$$

Για παράδειγμα αν ο υπάρχων ρυθμός βημάτων του κινητήρα ήταν 500, ορίζαμε το επιθυμητό μήκος 100 mm, αλλά μετράγαμε 230 mm, τότε ο τύπος θα γινόταν

$$\text{Νέος ρυθμός βημάτων} = 500 * \frac{100 \text{ mm}}{230 \text{ mm}} \Rightarrow \text{Νέος ρυθμός βημάτων} = 217.39$$

Η διαδικασία αυτή πρέπει να επαναληφθεί έως ότου είμαστε σίγουροι ότι οι μετρήσεις μας είναι σωστές.

Μετά τον έλεγχο κατεύθυνσης και την βαθμονόμηση του κινητήρα του Extruder θα πρέπει να επαναφέρουμε το EXTRUDE_MINTEMP στην αρχική του μορφή και να κάνουμε upload στο arduino τον διορθωμένο κώδικα.

5.5 Έλεγχος Σωστής λειτουργίας Endstops

Έχοντας συνδέσει τα endstops στην πλακέτα ελέγχου και αφού τα έχουμε τοποθετήσει κατάλληλα στην αρχή και στο τέλος των αξόνων, μένει να εξακριβώσουμε την σωστή λειτουργία τους. Για να το πετύχουμε όπως και παραπάνω θα χρησιμοποιήσουμε το Pronterface όμως αυτή την φορά θα στείλουμε μια εντολή από τον κώδικα G χρησιμοποιώντας την γραμμή εντολών όπου θα μας επιστρέψει την κατάσταση λειτουργίας των endstops. Πριν από αυτό όμως θα πρέπει να απομακρύνουμε τους άξονες από τα endstops έτσι ώστε να είναι όλα ανενεργά. Αφού είμαστε σίγουροι ότι όλα τα endstops δεν έχουν καμία επαφή με τους άξονες μας στέλνουμε την εντολή M119 όπου θα μας επιστρέψει την κατάσταση λειτουργίας όλων των endstops. Υπό κανονικές συνθήκες θα πρέπει όλα τα endstops να επιστρέψουν ως κατάσταση λειτουργίας την απάντηση OPEN. Αν κάποιο endstop επιστρέψει σαν κατάσταση λειτουργίας την απάντηση TRIGGERED και είμαστε σίγουροι ότι κανένα από τα endstop δεν είναι ενεργοποιημένα θα πρέπει να παραμετροποιήσουμε εκ νέου

τα endstops_Settings στο Firmware. Πρακτικά αυτό σημαίνει να εντοπίσουμε το endstop που μας επιστρέφει λανθασμένη τιμή και στον κώδικα να το μετρέψουμε από TRUE→FALSE ή από FALSE→TRUE, ανάλογα την αρχική του καταχώρηση.

```
438
439 // Mechanical endstop with COM to ground and NC to 5V
440 #define X_MIN_ENDSTOP_INVERTING true // set to true
441 #define Y_MIN_ENDSTOP_INVERTING true // set to true
442 #define Z_MIN_ENDSTOP_INVERTING true // set to true
443 #define X_MAX_ENDSTOP_INVERTING true // set to true
444 #define Y_MAX_ENDSTOP_INVERTING true // set to true
445 #define Z_MAX_ENDSTOP_INVERTING true // set to true
446 #define Z_MIN_PROBE_ENDSTOP_INVERTING true // set to true
447
448
```

Εικόνα 59 – Έλεγχος ορθή λειτουργίας Endstop

Έπειτα κάνουμε Re-upload των κώδικα στο Arduino και επαναλαμβάνουμε την διαδικασία ώστε να επαληθεύσουμε την σωστή λειτουργία των endstops.

5.6 Βαθμονόμηση των PID ελεγκτών

Μία ακόμα λειτουργία που υπάρχει στο Firmware του 3D εκτυπωτή είναι η χρήση PID ελεγκτή για την επίτευξη του στόχου της θερμοκρασίας στο hotend και στην βάση εκτύπωσης. Αφού έχουμε κάνει την βασική παραμετροποίηση του κώδικα για την χρήση των ελεγκτών αυτών και έχουμε ορίσει το PID_AUTOTUNE_MENU, μπορούμε να κάνουμε χρήση του μενού αυτού μέσω του Pronterface ώστε να έχουμε το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα στον καλύτερο δυνατό χρόνο. Οπότε μέσω της γραμμής εντολών του Pronterface στέλνουμε την εντολή κώδικα G, M303 E0 S200 C8 για να ρυθμίσουμε τον PID ελεγκτή για το hot end. Με την εντολή M303 εκκινείται το Autotune Menu, με το E0 ορίζουμε το hot end, με το S200 ορίζουμε την θερμοκρασία στους 200 βαθμούς (αυτή η τιμή μπορεί να ορισθεί ανάλογα την θερμοκρασία που θέλουμε να πετυχαίνει το hot end), και τέλος με την εντολή C8 ορίζουμε τους κύκλους εκτέλεσης, δηλαδή πόσες φορές θέλουμε να εκτελεσθεί η διαδικασία ώστε να έχουμε τις καλύτερες δυνατές τιμές. Αφού εκτελεσθεί 8 φορές, ο κύκλος αυτός μας εμφανίζει τις τελικές τιμές του ελεγκτή Kp, Ki και Kd. Αντίστοιχα για την ρύθμιση του PID ελεγκτή για την βάση του εκτυπωτή στέλνουμε την εντολή M303 E-1 S65 C8, όπου S65 είναι η επιθυμητή θερμοκρασία των 65 βαθμών κελσίου που θέλουμε να έχει η βάση του εκτυπωτή μας. Αφού έχουμε καταγράψει τις τελικές τιμές των ελεγκτών, τις συμπληρώνουμε

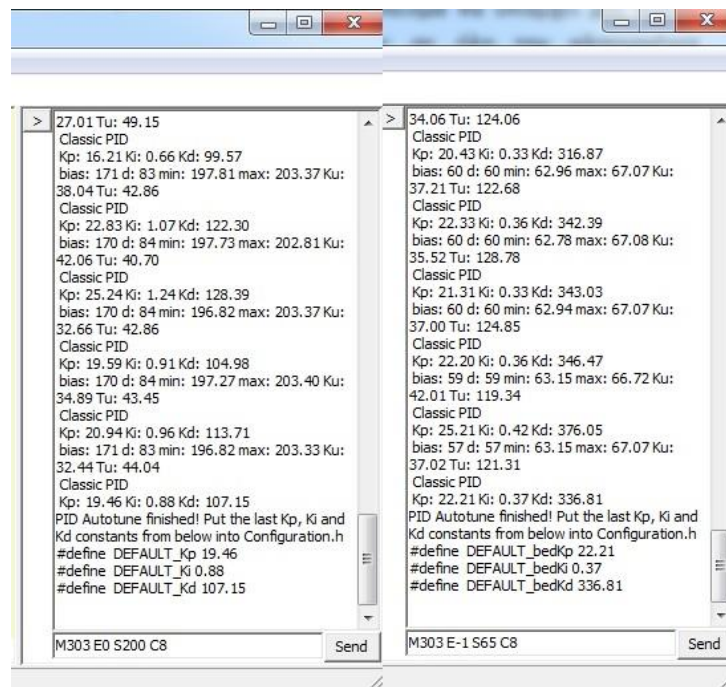
στον κώδικα στα αντίστοιχα σημεία.

```
// Ultimaker
#define DEFAULT_Kp 19.46
#define DEFAULT_Ki 0.88
#define DEFAULT_Kd 107.15

//120W 250W silicone heater into 4w
//from FOPDT model - kp=.39 Tp=405
#define DEFAULT_bedKp 22.21
#define DEFAULT_bedKi 0.37
#define DEFAULT_bedKd 336.81
```

Εικόνα 60 – Βαθμονόμηση PID ελεγκτών

Κατά την διάρκεια της διαδικασίας της ρύθμισης των PID ελεγκτών, το Hotend όπως και η βάση του εκτυπωτή ανεβάζουν θερμοκρασίες ανάλογες με αυτές που τους έχουμε ορίσει μέχρι να σταθεροποιηθούν στην επιθυμητή θερμοκρασία.



Εικόνα 61 – Παράθυρο ένδειξης θερμοκρασιών Hotend

5.7 Bed leveling

Στα πλαίσια του οπτικού ελέγχου μπορεί να ενταχθεί και η βαθμονόμηση της βάσης ως προς τον άξονα ή αλλιώς γνωστό ως Bed Leveling. Η σωστή βαθμονόμηση της βάσης εκτύπωσης από την πρώτη κιόλας στιγμή θα οδηγήσει σε μια πρώτη αρκετά ικανοποιητική εκτύπωση. Η μη σωστή βαθμονόμηση της βάσης μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα:

- το υλικό να μην έχει πολύ καλή επαφή στην βάση αν υπάρχει μεγάλο κενό μεταξύ της βάσης και της μύτης εκτύπωσης του hot end.

- το υλικό να μην έχει καθόλου επαφή με την βάση εκτύπωσης, αν το κενό αυτό είναι πάρα πολύ μεγάλο και η εκτύπωση να γίνεται στον αέρα.
- Το υλικό να ωθείται με πίεση από την μύτη εκτύπωσης του hot end, δημιουργώντας ένα πολύ λεπτό πρώτο στρώμα εκτύπωσης σχεδόν διάφανο.
- ακόμα και στο να μην έχουμε καθόλου ώθηση του υλικού μέσα από την μύτη εκτύπωσης αν δεν υπάρχει καθόλου κενό μεταξύ της βάσης και της μύτης εκτύπωσης του Hotend.

Όσο καλύτερα είναι ρυθμισμένη η βάση ως προς τον άξονα τόσο πιο σωστό πρώτο στρώμα εκτύπωσης θα έχουμε και κατ'επέκταση σωστή εκτύπωση. Για να το πετύχουμε αυτό υπάρχουν δύο τρόποι, είτε κάνοντας χρήση του Auto Bed Leveling, το οποίο όμως απαιτεί επιπλέον hardware που δεν διαθέτει ο συγκεκριμένος εκτυπωτής, είτε κάνοντας την ρύθμιση αυτή χειροκίνητα.

Για να ρυθμίσουμε χειροκίνητα το επίπεδο της βάσης μας ως προς τον άξονα θα χρειαστούμε ένα κομμάτι κόλλας A4 (70mmx40mm), το Pronterface, πολύ υπομονή και να επαναλάβουμε την παρακάτω διαδικασία αρκετές φορές έως ότου είμαστε σίγουροι για το αποτέλεσμα.

Κάνοντας χρήση του Pronterface θέτουμε όλους τους άξονες στην αρχική τους θέση (home position). Έπειτα παίρνουμε το κομμάτι της κόλλας A4 και το τοποθετούμε μεταξύ της βάσης και της μύτης εκτύπωσης του Hotend. Θέλουμε έλκοντας το φύλλο χαρτί προς το μέρος μας να νιώθουμε ελάχιστη αντίσταση. Αν δεν υπάρχει καμία αντίσταση τότε βιδώνουμε ελάχιστα την βίδα βαθμονόμησης της εκάστοτε γωνίας. Αν η αντίσταση είναι πολύ μεγάλη τότε ξεβιδώνουμε την βίδα βαθμονόμησης. Στην συνέχεια μέσω του Pronterface θέτουμε τον άξονα στην τελική του θέση και επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία για αυτή την γωνία και προσαρμόζουμε ανάλογα την βάση εκτύπωσης. Επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία και για τις τέσσερις γωνίες της βάσης εκτύπωσης τόσες φορές όσες είναι απαραίτητες ώστε να έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα.

5.8 Βαθμονόμηση βημάτων κινητήρων x, y, z

Τέλος αλλά πολύ σημαντικό είναι η βαθμονόμηση των βημάτων των υπολοίπων βηματικών κινητήρων x, y, z. Ο λόγος που το αφήσαμε για το τέλος είναι ότι για την σωστή βαθμονόμηση θα πρέπει να κάνουμε την πρώτη μας εκτύπωση οπότε έπρεπε να είμαστε σίγουροι ότι όλα τα υπόλοιπα μέρη του εκτυπωτή είναι σωστά ρυθμισμένα. Ο λόγος που για

να βαθμονομήσουμε σωστά τα βήματα των κινητήρων μας πρέπει να προβούμε σε εκτύπωση είναι ότι δεν διαθέτουμε φυλλάδιο με τα χαρακτηριστικά των κινητήρων.

Πρωτού προχωρήσουμε με την ακριβή βαθμονόμηση των βημάτων των κινητήρων μπορούμε με την βοήθεια του Pronterface, σε πρώτο επίπεδο να ορίσουμε πού στο περίπου κοντά θα βρίσκονται οι τιμές μας έτσι ώστε να μπορέσουμε σε δεύτερο επίπεδο να κάνουμε μια πιο ακριβή μέτρηση.

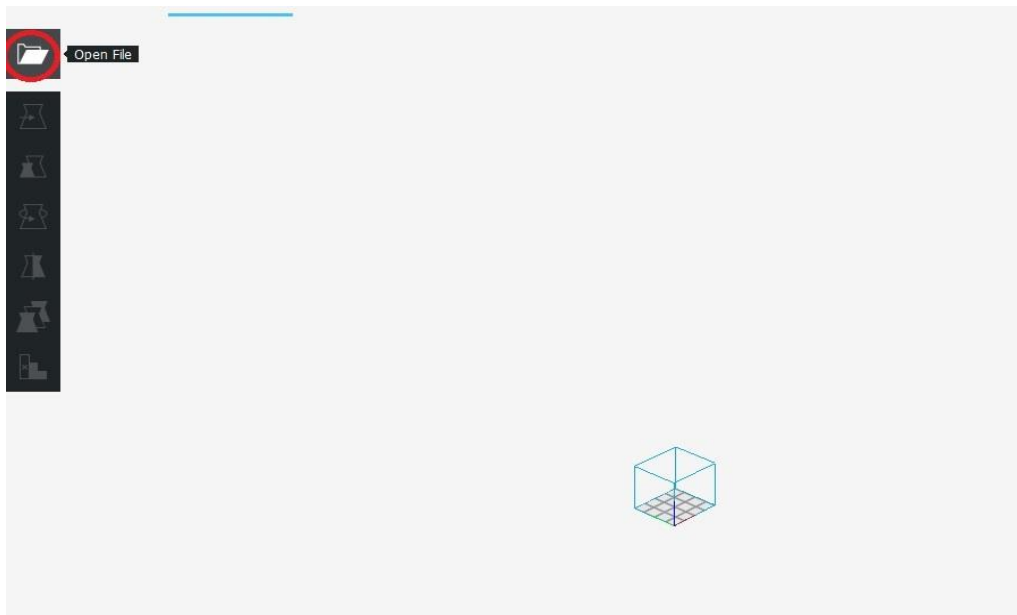
Για να το πετύχουμε αυτό θα πρέπει να θέσουμε τον κάθε άξονα στην αρχική του θέση (homing position). Έπειτα μέσω του Pronterface θα οδηγήσουμε κάθε άξονα, έναν προς έναν, στην τελική του θέση. Κάθε φορά που κάποιος κινητήρας φτάνει στην τελική του θέση, και έρχεται σε επαφή με το endstop, στη γραμμή εντολών εμφανίζεται η απόσταση που έχει διανύσει. Αυτό μας βοηθάει επειδή ξέρουμε ήδη ότι οι άξονες μας είναι σε θέση να διανύσουν μέχρι 40 mm. Επομένως, μέσω του παρακάτω τύπου μπορούμε κατά προσέγγιση να υπολογίσουμε τον νέο ρυθμό βημάτων των κινητήρων.

$$\text{Νέος ρυθμός βημάτων} = \text{υπάρχων ρυθμός βημάτων} * \frac{\text{Επιθυμητή απόστασηmm}}{\text{Μετρήσιμη απόστασηmm}}$$

Αφού έχουμε ορίσει στο Firmware τις κατά προσέγγιση τιμές των βημάτων του κάθε κινητήρα και έχουμε κάνει upload τον νέο κώδικα, θα χρησιμοποιήσουμε έναν κύβο βαθμονόμησης (Calibration cube), διαστάσεων 20 mm x 20 mm x 20 mm, ώστε να υπολογίσουμε ακριβώς τα βήματα του κάθε κινητήρα. Ο λόγος που χρειαζόμαστε επιπλέον βαθμονόμηση για τα βήματα των κινητήρων είναι επειδή σίγουρα θα έχουν υπάρξει κατασκευαστικές αστοχίες. Μπορούμε να βρούμε έτοιμους κύβους στα site που έχουν προαναφερθεί.

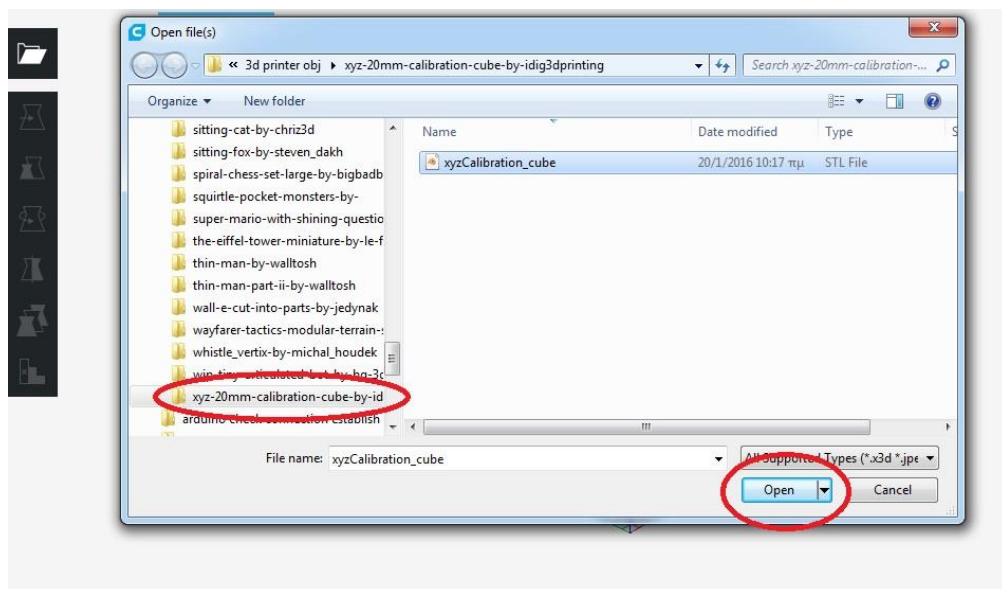
Για να εκτυπώσουμε ανοίγουμε το Cura και επιλέγουμε να ανοίξουμε τον φάκελο με τον κύβο βαθμονόμησης που έχουμε κάνει ήδη download από κάποιο από τα site που έχουν αναφερθεί. Έπειτα επιλέγουμε το προφίλ εκτύπωσης που επιθυμούμε και επιλέγουμε να κάνει εκτύπωση μέσω USB.

Βήμα 1^ο: Επιλέγουμε το εικονίδιο Open File



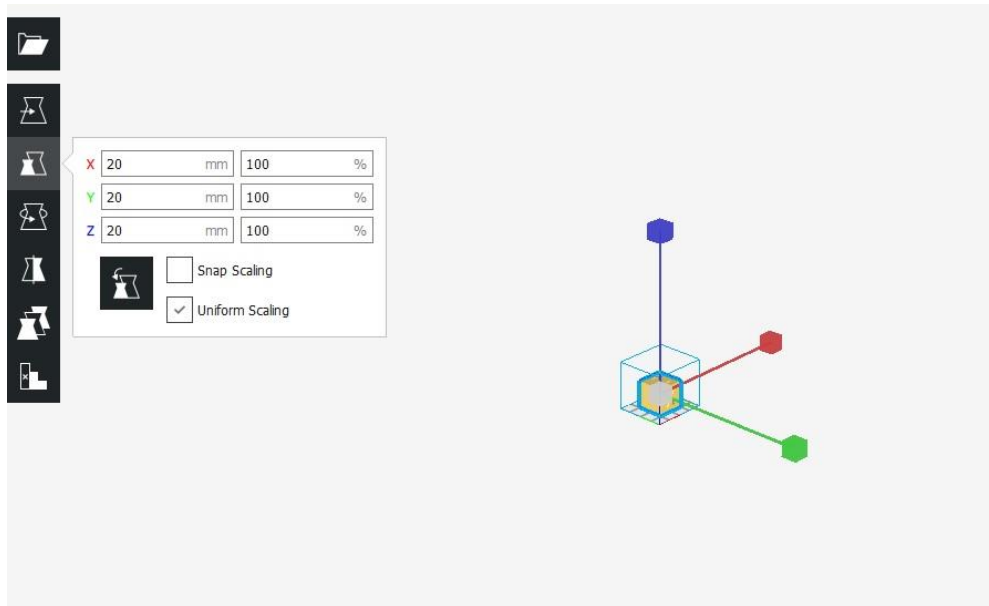
Εικόνα 62 – Εκτύπωση, Βήμα πρώτο

Βήμα 2^ο: Επιλέγουμε το Μοντέλο που θέλουμε να τυπώσουμε και επιλέγουμε το Open



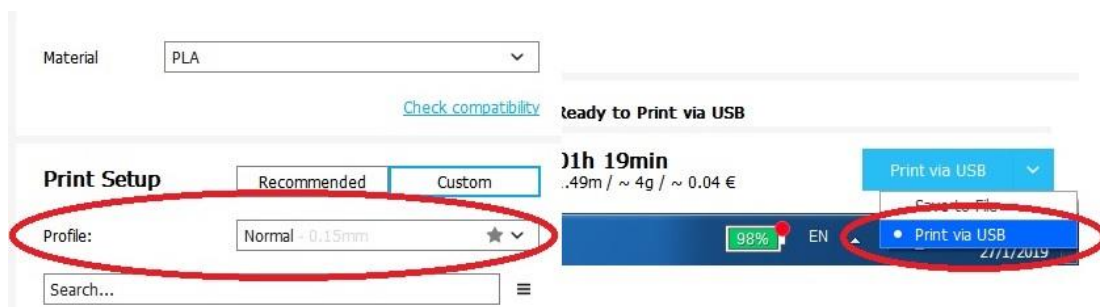
Εικόνα 63 – Εκτύπωση, βήμα δεύτερο

Βήμα 3^ο: Παρατηρούμε ότι οι διαστάσεις το αντικειμένου είναι οι επιθυμητές



Εικόνα 64 - Εκτύπωση, βήμα τρίτο

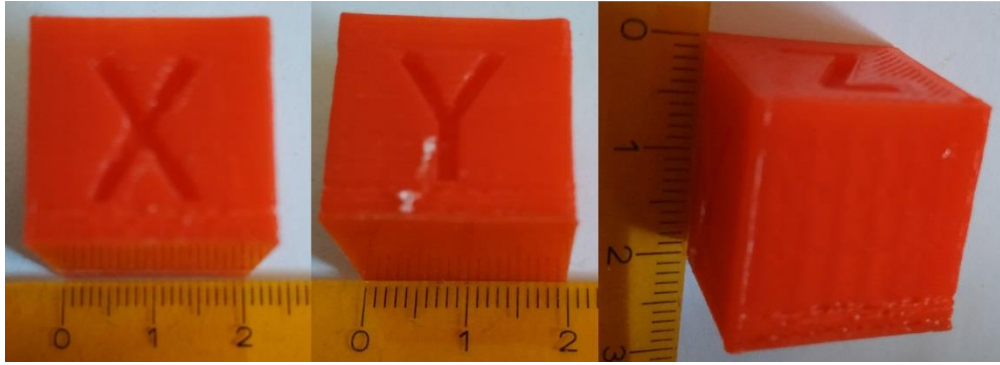
Βήμα 4^ο: Διαλέγουμε το προφίλ εκτύπωσης και επιλέγουμε να κάνει εκτύπωση μέσω του USB



Εικόνα 65- Εκτύπωση, βήμα

Μετά το τέλος της εκτύπωσης μετράμε το μήκος της κάθε πλευράς και με τη χρήση του παρακάτω τύπου βρίσκουμε τον ακριβή ρυθμό των βημάτων του κάθε κινητήρα.

$$\text{Νέος ρυθμός βημάτων} = \text{υπάρχον ρυθμός βημάτων} * \frac{\text{Επιθυμητό μήκος mm}}{\text{Μετρήσιμο μήκος mm}}$$



Εικόνα 66 - Οι διαστάσεις του κύβου βαθμονόμησης μετά την εύρεση του ακριβή ρυθμού βημάτων του κάθε κινητήρα

6 Επίλογος

Κατά την ολοκλήρωση της εργασίας και της κατασκευής του μοντέλου μας μπορούμε πλέον να παρατηρήσουμε την επιτυχία αυτής. Στόχος της εργασίας είναι η μελέτη και κατασκευή 3Dεκτυπωτή χαμηλού κόστους από ανακυκλώσιμα και οικονομικά υλικά. Με τη χρήση υλικών από παλιό ή παλιούς υπολογιστές και την αγορά άλλων εξαρτημάτων και υλικών από διαδικτυακά μαγαζιά, open source και δωρεάν προγράμματα που υπάρχουν στο διαδίκτυο, καταφέραμε στην πραγματικότητα να κρατήσουμε χαμηλό το κόστος κατασκευής, ώστε να μπορεί ο καθένας να κατασκευάσει έναν οικιακό 3Dεκτυπωτή. Κάποια από τα βασικά μέρη του εκτυπωτή μας τα είχαμε ήδη σε κάποια αποθήκη μας, καθώς όλοι πλέον έχουμε κάποιο παλιό υπολογιστή (ή μέρη αυτού) που δεν μπορέσαμε να πετάξουμε.

Ως προς το τελικό αποτέλεσμα, το οποίο κρίνεται επιπροσθέτως και από την τελική εκτύπωση, μπορούμε να αναφέρουμε πως ήταν και το επιθυμητό. Η κατασκευή και λειτουργία του 3Dεκτυπωτή ήταν επιτυχημένη και πληρούσε και τα παραπάνω κριτήρια. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η εργασία ήταν και ερευνητικού σκοπού, επομένως, ξεκινώντας από την αρχική ιδέα μέχρι το τελικό αποτέλεσμα όπως παρουσιάζεται στην εργασία, συναντήθηκαν πολλά σφάλματα, κατασκευαστικά και προγραμματιστικά, και έγιναν πολλές διορθώσεις και αλλαγές. Οι εν λόγω αλλαγές αφορούσαν είτε την απαλοιφή σφαλμάτων της κατασκευής και της εκτέλεσης των προγραμμάτων που έπρεπε να παραμετροποιηθούν στην δικιά μας κατασκευή, είτε την βελτίωση του αρχικού θεωρητικού πλάνου της κατασκευής μας. Σημαντικά σφάλματα στον προγραμματισμό δεν συναντήθηκαν, καθώς τα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν έχουν σαφείς οδηγίες λειτουργίας και προσφέρουν και πιλοτικό κώδικα.

Το μοντέλο μας είναι αρκετά βασικό και επιδέχεται βελτιώσεων καθώς και αναβαθμίσεις. Κάποιες από τις δικές μας προτάσεις είναι η χρήση proximity sensor για να γίνεται auto-calibration και όχι χειροκίνητα μέσω του Pronterface. Για την κατάργηση του καλωδίου, μπορεί η επικοινωνία με τον υπολογιστή να γίνεται μέσω Bluetooth ή wifi. Για αυτόνομη εκτύπωση μπορεί να τοποθετηθεί LCD οθόνη και SD card slot, με τα οποία φορτώνεται μία φορά ο κωδικός στην κάρτα και εκτυπώνουμε κατά βούληση. Επειδή ο εκτυπωτής μπορεί να εκτυπώνει πολλές ώρες και ανεβάζει θερμοκρασία, προαιρετικά μπορεί να μπει ανεμιστηράκι ή και ψύκτρες για την ψύξη των κινητήρων, και ίσως ένα επιπλέον ανεμιστηράκι για την ψύξη του μοντέλου.

7 Βιβλιογραφία

- 3D Modular Systems. (2015, May 15). *ATX Power supply conversion for 3D printer*. Ανάκτηση 2018, από doc.3dmodularsystems.com: <http://doc.3dmodularsystems.com/atx-power-supply-conversion-for-3d-printer-usage/>
- 3DINSIDER. (2018). *3dinsiders*. Ανάκτηση 2018, από 3dinsider.com/3d-printer-types: <https://3dinsider.com/3d-printer-types/>
- 3DPRINT.WIKI. (2018, 12 30). *Understanding the heat bed*. Ανάκτηση 2018, από 3dprint.wiki/reprap: https://3dprint.wiki/reprap/anet/a8/improvements/understanding_my_heatbed
- ALL3DP. (2019, January 15). *all3dp*. Ανάκτηση 2019, από all3dp.com/types-of-3d-printers-3d-printing-technology: <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/>
- ALLTHAT3D. (unknown). *allthat3d.com*. Ανάκτηση April 30, 2018, από allthat3d.com: <https://www.allthat3d.com/3d-printing-history/#>
- ARDUINO. (2019). *arduino Mega 2560 Rev3*. Ανάκτηση 2019, από store.arduino.cc: <https://store.arduino.cc/mega-2560-r3>
- Arduino. (2017, 01 11). *Getting Started with Arduino and Genuino MEGA2560*. Ανάκτηση 2018, από arduino.cc: <https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoMega2560>
- By dintid in 3D Printing, instructables. (2016). *Configuring Endstops on Ramps 1.4 With Marlin Firmware - @section Homing*. Ανάκτηση 2018, από instructables.com: <https://www.instructables.com/id/Configuring-Endstops-on-Ramps-14-with-Marlin-firmw/>
- Chakravorty, D. (2019, February 27). *2019 Cura Tutorial – Deep Inside the Cura 3D Slicer Software*. Ανάκτηση 2019, από all3dp.com: <https://all3dp.com/1/cura-tutorial-software-slicer-cura-3d/>
- CREATE Education. (2018). *Learn Cura 3 – Video Tutorial Series*. Ανάκτηση 2018, από createeducation.com: <https://www.createeducation.com/resource/learn-cura-3-video-series/>
- David Roberson, Ultimaker. (2018, July 12). *ultimaker.com*. Ανάκτηση August 30, 2018, από ultimaker.com/blog: <https://ultimaker.com/en/blog/52652-the-five-key-3d-printing-applications>
- Dennis P, foosel / Octoprint. (2018, March 24). *Control your printer's ATX PSU through a*

RAMPS board using OctoPrint. Ανάκτηση 2018, από [github.com: https://github.com/foosel/OctoPrint/wiki/Control-your-printer%27s-ATX-PSU-through-a-RAMPS-board-using-OctoPrint](https://github.com/foosel/OctoPrint/wiki/Control-your-printer%27s-ATX-PSU-through-a-RAMPS-board-using-OctoPrint)

ebay. (n.d.). *ebay*. Ανάκτηση από [ebay.com: https://www.ebay.com/](https://www.ebay.com/)

Future Electronics. (2019). *Motor Drivers*. Ανάκτηση 2019, από [futureelectronics.com: https://www.futureelectronics.com/c/semiconductors/analog--drivers--motor-drivers/products/](https://www.futureelectronics.com/c/semiconductors/analog--drivers--motor-drivers/products/)

GitHub. (n.d.). *Marlin*. Ανάκτηση 2018, από [github.com/MarlinFirmware: https://github.com/MarlinFirmware/Marlin](https://github.com/MarlinFirmware)

Italo Soares, PRINTER CHAT.COM. (2017, September 29). *DIY 3D Printer from scratch – Bowden vs Direct Drive*. Ανάκτηση 2018, από [3dprinterchat.com: https://3dprinterchat.com/bowden-vs-direct-drive/](https://3dprinterchat.com/bowden-vs-direct-drive/)

Jean Le Bouthillier, Boots Industries. (2016, March 13). *Heat Beds in 3D Printing – Advantages and Equipment*. Ανάκτηση 2018, από [bootsindustries.com: http://bootsindustries.com/heat-bed-3d-printing/](http://bootsindustries.com/heat-bed-3d-printing/)

JIMBLOM,sparkfun. (n.d.). *Serial Communication* . Ανάκτηση 2018, από [learn.sparkfun.com: https://learn.sparkfun.com/tutorials/serial-communication/rules-of-serial](https://learn.sparkfun.com/tutorials/serial-communication/rules-of-serial)

Margaret Rouse, Contributor: Matthew Haughn, WhatIs.com. (2017, December). *heat bed* . Ανάκτηση 2018, από [whatis.techtarget.com: https://whatis.techtarget.com/definition/Heat-bed](https://whatis.techtarget.com/definition/Heat-bed)

Marlin.org. (2019). *Configuring Marlin 1.1*. Ανάκτηση 2018, από [marlinfw.org: http://marlinfw.org/docs/configuration/configuration.html](http://marlinfw.org/docs/configuration/configuration.html)

marlinfw.org. (n.d.). *Marlin Firmware*. Ανάκτηση από [marlinfw.org: http://marlinfw.org/](http://marlinfw.org/)

MwttterHackers. (2017, May 3). *3D Printer Nozzle Comparison Guide*. Ανάκτηση 2018, από [matterhackers.com: https://www.matterhackers.com/news/3d-printer-nozzle-comparison-guide](https://www.matterhackers.com/news/3d-printer-nozzle-comparison-guide)

Nathan Cox, PRINTER CHAT.COM. (2017, October 20). *The best 3d print bed material*. Ανάκτηση 2018, από [3dprinterchat.com: https://3dprinterchat.com/the-best-3d-print-bed-material/](https://3dprinterchat.com/the-best-3d-print-bed-material/)

Nomikos, B3D. (2018). *b3d.gr*. Ανάκτηση 2018, από [b3d.gr: https://b3d.gr/3d-printing-how/](https://b3d.gr/3d-printing-how/)

Om P. Singh, S. M. (2015). *eurekaselect.com*. Ανάκτηση April 30, 2018, από [eurekaselect.com: http://www.eurekaselect.com/128441](http://www.eurekaselect.com/128441)

pinshape Blog. (2016, 06 15). *4 3D Printer Bed Surface Materials for Better Adhesion!* Ανάκτηση 2018, από pinshape.com/blog: <https://pinshape.com/blog/4-3d-printer-bed-surface-materials-for-better-adhesion/>

pinshape Blog. (2016, 07 28). *Direct Drive vs Bowden Extruder Guide and Calibration Tips.* Ανάκτηση 2018, από pinshape.com/blog: <https://pinshape.com/blog/direct-drive-vs-bowden-extruder-guide/>

Pinshape. (n.d.). *Pinshape.* Ανάκτηση από pinshape.com: <https://pinshape.com/>

pinshape. (n.d.). *pinshape.com.* Ανάκτηση από pinshape.com: <https://pinshape.com/>

Pololu. (2019). *A4988 Stepper Motor Driver Carrier.* Ανάκτηση 2019, από [pololu.com](http://www.pololu.com): <https://www.pololu.com/product/1182>

Pronterface. (2019). *Printrun.* Ανάκτηση 2018, από [pronterface.com](http://www.pronterface.com): <http://www.pronterface.com/index.html>

Redshift by Autodesk. (2018, April 11). *autodesk.com.* Ανάκτηση April 30, 2018, από [autodesk.com](https://www.autodesk.com): <https://www.autodesk.com/redshift/3d-printing-timeline/>

RepRap. (2016, April 16). *Bed material.* Ανάκτηση 2018, από reprap.org/wiki: https://reprap.org/wiki/Bed_material

RepRap. (2014, August 11). *Category:Hot End.* Ανάκτηση 2018, από reprap.org/wiki: https://reprap.org/wiki/Category:Hot_End

RepRap. (2015, December 26). *Choosing a Power Supply for your RepRap.* Ανάκτηση 2018, από reprap.org/wiki: https://reprap.org/wiki/Choosing_a_Power_Supply_for_your_RepRap

RepRap. (2015, May 16). *Endstop.* Ανάκτηση 2018, από reprap.org/wiki: <https://reprap.org/wiki/Endstop>

RepRap. (2018, November 11). *Heated Bed.* Ανάκτηση 2018, από reprap.org/wiki: https://reprap.org/wiki/Heated_Bed

RepRap. (2015, February 17). *Hot End Design Theory.* Ανάκτηση 2018, από reprap.org/wiki: https://reprap.org/wiki/Hot_End_Design_Theory

RepRap. (2018, August 8). *Marlin.* Ανάκτηση 2018, από reprap.org/wiki: <https://reprap.org/wiki/Marlin>

RepRap. (2014, December 27). *Mechanical Endstop.* Ανάκτηση 2018, από reprap.org/wiki: https://reprap.org/wiki/Mechanical_Endstop

RepRap. (2017, July 20). *Power Supply*. Ανάκτηση 2018, από [reprap.org/wiki: https://reprap.org/wiki/Power_Supply](https://reprap.org/wiki/Power_Supply)

RepRap. (2016, August 1). *RAMPS 1.4*. Ανάκτηση 2018, από [reprap.org/wiki: https://reprap.org/wiki/RAMPS_1.4#Power_Supply](https://reprap.org/wiki/RAMPS_1.4#Power_Supply)

RERAP. (2019, March 15). *NEMA 17*. Ανάκτηση 2019, από [rerap.org/wiki: https://reprap.org/wiki/NEMA_17_Stepper_motor](https://reprap.org/wiki/NEMA_17_Stepper_motor)

ReRap. (2019, February 23). *PCB Heatbed*. Ανάκτηση 2019, από [reprap.org/wiki: https://reprap.org/wiki/PCB_Heatbed](https://reprap.org/wiki/PCB_Heatbed)

RERAP. (2019, March 7). *RAMPS 1.4*. Ανάκτηση 2019, από [rerap.org/wiki: https://reprap.org/wiki/RAMPS_1.4](https://reprap.org/wiki/RAMPS_1.4)

sculpteo. (2016, 12 14). *sculpteo.com*. Ανάκτηση 1 1, 2018, από [sculpteo.com: https://www.sculpteo.com/blog/2016/12/14/the-history-of-3d-printing-3d-printing-technologies-from-the-80s-to-today/](https://www.sculpteo.com/blog/2016/12/14/the-history-of-3d-printing-3d-printing-technologies-from-the-80s-to-today/)

smoothieware.org. (2018, October). *smoothieware.org*. Ανάκτηση 2018, από [smoothieware.org: http://smoothieware.org/endstops](http://smoothieware.org/endstops)

Solid Utopia. (n.d.). *Marlin firmware user guide for beginners*. Ανάκτηση 2018, από [solidutopia.com: https://solidutopia.com/marlin-firmware-user-guide-basic/](https://solidutopia.com/marlin-firmware-user-guide-basic/)

Taylor Landry, MatterHackers. (2016, March 15). *Extruders 101: A crash course on an essential component of your 3D printer*. Ανάκτηση 2018, από [matterhackers.com: https://www.matterhackers.com/articles/extruders-101:-a-crash-course-on-an-essential-component-of-your-3d-printer](https://www.matterhackers.com/articles/extruders-101:-a-crash-course-on-an-essential-component-of-your-3d-printer)

Thingiverse. (n.d.). *Thingiverse*. Ανάκτηση από [thingiverse.com: https://www.thingiverse.com/](https://www.thingiverse.com/)

Thingiverse, MakerBot. (2019). *thingiverse.com*. Ανάκτηση 2018, από [thingiverse.com: https://www.thingiverse.com/](https://www.thingiverse.com/)

tom's. (2014, 12 21). *3D printing guides: Everything about heated beds!* Ανάκτηση 2018, από [toms3d.org: https://toms3d.org/2014/12/21/3d-printing-guides-everything-about-heated-beds/](https://toms3d.org/2014/12/21/3d-printing-guides-everything-about-heated-beds/)

Tyler Anderson, MatterHackers. (2016, October 7). *Choosing the Best 3D Printing Bed Surface*. Ανάκτηση 2018, από [matterhackers.com: https://www.matterhackers.com/news/choosing-the-right-3d-print-bed-surface](https://www.matterhackers.com/news/choosing-the-right-3d-print-bed-surface)

Ultimaker B.V. (2011-2019). *Ultimaker Cura software*. Ανάκτηση 2018, από [ultimaker.com](https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-cura-software):
<https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-cura-software>

wiki. (n.d.). Ανάκτηση από [tet](https://en.wikipedia.org/wiki/3D_Printing)

Wikipedia. (2019, 1 21). *3D Printing*. Ανάκτηση 1 22, 2019, από [Wikipedia.org](https://en.wikipedia.org):
<https://en.wikipedia.org>

Wikipedia. (2019, March 25). *Stereolithography*. Ανάκτηση March 25, 2019, από [Wikipedia.org](https://en.wikipedia.org/wiki/Stereolithography): <https://en.wikipedia.org/wiki/Stereolithography>

Wikipedia. (2019, April 8). *Wiki/Applications_of_3D_Printing*. Ανάκτηση April 30, 2018, από [Wikipedia.org](https://en.wikipedia.org/wiki/Applications_of_3D_printing): https://en.wikipedia.org/wiki/Applications_of_3D_printing

Wikipedia.org. (2018, November 30). *Wiki/Bowden_extruder*. Ανάκτηση 2018, από [wikipedia.org](https://en.wikipedia.org/wiki/Bowden_extruder): https://en.wikipedia.org/wiki/Bowden_extruder

Wikipedia.org. (2016, June 27). *Ρυθμός μετάδοσης*. Ανάκτηση 2018, από el.wikipedia.org/wiki:

https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A1%CF%85%CE%B8%CE%BC%CF%8C%CF%82_%CE%BC%CE%B5%CF%84%CE%AC%CE%B4%CE%BF%CF%83%CE%B7%CF%82

youmagine. (n.d.). *youmagine*. Ανάκτηση από [youmagine.com](https://www.youmagine.com/): <https://www.youmagine.com/>

youmagine, Additive Content B.V. (2018). *youmagine.com*. Ανάκτηση 2018, από [youmagine.com](https://www.youmagine.com/): <https://www.youmagine.com/>

