



«Σχολή Θετικών Επιστημών & Τεχνολογίας»
«Μεταπτυχιακή Εξειδίκευση στα Πληροφοριακά
Συστήματα»

Διπλωματική Εργασία

Κατασκευή τρισδιάστατου εκτυπωτή (3d printer) με χρήση
υλικών από αποσυρθείσες ηλεκτρονικές συσκευές

Γεώργιος Κεχαΐδης

Επιβλέπων καθηγητής: Φώτιος Λαζαρίνης

Πάτρα, Ιούλιος 2021

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

Κατασκευή τρισδιάστατου εκτυπωτή (3d printer) με χρήση
υλικών από αποσυρθείσες ηλεκτρονικές συσκευές

Γεώργιος Κεχαΐδης

Επιτροπή Επίβλεψης Πτυχιακής / Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Φώτιος Λαζαρίνης

ΣΕΠ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Βασίλειος Γερογιάννης

ΣΕΠ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Πάτρα, Ιούλιος 2021

**«Αφιερώνεται σε όλους αυτούς που με κόπου και θυσίες
συντελούν στην εξέλιξη του ανθρώπινου πολιτισμού»**

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η διαδικασία κατασκευής ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή (3d printer) από συσκευές οι οποίες έχουν τεθεί σε αχρηστία και προορίζονται είτε για απόρριψη είτε για ανακύκλωση.

Στο πρώτο μέρος παρατίθεται το ιστορικό της ανάπτυξης των τρισδιάστατων εκτυπωτών και το επίπεδο στο οποίο έχουν πλέον φτάσει.

Στο δεύτερο μέρος γίνεται αρχικά η περιγραφή των μερών που αποτελείται ένας τέτοιος εκτυπωτής και στη συνέχεια αναφέρονται τα χαρακτηριστικά του και εξάγονται οι απαιτήσεις της κατασκευής.

Στο τρίτο μέρος περιγράφονται οι συσκευές από τις οποίες θα εξαχθούν τα εξαρτήματα για την κατασκευή του εκτυπωτή, οι λόγοι για τους οποίους επιλέχθηκαν κάποιες συγκεκριμένες συσκευές και ο τρόπος εξαγωγής των εξαρτημάτων από αυτές.

Στο τέταρτο μέρος παρουσιάζεται ο τρόπος κατασκευής του εκτυπωτή και οι ρυθμίσεις όλων των παραμέτρων που απαιτούνται για την εύρυθμη λειτουργία του.

Στο πέμπτο και τελευταίο μέρος παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας του εκτυπωτή, τα αποτελέσματα από το τελικό προϊόν και γίνεται μία σύγκριση με αντίστοιχη συσκευή του εμπορίου.

Λέξεις – Κλειδιά

Τρισδιάστατη εκτύπωση, ανακυκλώσιμες συσκευές, εξαγωγή χρήσιμων εξαρτημάτων, Arduino, ελεγκτής PID

Abstract

This paper presents the process of making a 3D printer from devices that have been discarded and are intended for either disposal or recycling.

The first part lists the development history of 3D printers and the level they have reached.

The second part first describes the parts that make up such a printer and then lists its features and outlines the manufacturing requirements.

The third part describes the devices from which the components for the printer will be extracted, the reasons why certain devices were selected and how to extract the components from them.

The fourth part shows how to build the printer and the settings of all the parameters required for its smooth operation.

The fifth and last part presents the mode of operation of the printer, the results from the final product and a comparison is made with a corresponding device of the trade.

Keywords

3D printing, recyclable devices, export of useful components, Arduino, PID controller

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα

Περίληψη	v
Abstract	vi
Περιεχόμενα.....	vii
Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων	ix
Κατάλογος Πινάκων	xii
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια	xiii
1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Αντικείμενο εργασίας.....	2
1.2 Στόχος εργασίας	2
1.3 Διάρθρωση εργασίας	3
2 Τρισδιάστατη εκτύπωση	4
2.1 Ιστορικό	4
2.2 Παρουσίαση του τρισδιάστατου εκτυπωτή.....	4
2.2.1 Είδη τρισδιάστατων εκτυπωτών	5
2.2.2 Υλικό δημιουργίας	7
2.2.3 Τύποι FDM εκτυπωτών	9
2.3 Πεδίο εφαρμογών	13
2.3.1 Ιατρική	13
2.3.2 Αυτοκινητοβιομηχανία	14
2.3.3 Πολεμική βιομηχανία.....	15
2.3.4 Διατροφή.....	16
2.3.5 Καλές τέχνες.....	17
2.4 Συμπεράσματα	18
3 Καταγραφή και ανάλυση απαιτήσεων	20
3.1 Περιγραφή 3d printer.....	20
3.1.1 Κινητήρες	20
3.1.2 Σύστημα μετάδοσης.....	22
3.1.3 Σκελετός	23
3.1.4 Extruder/Hot end	23
3.1.5 Ελεγκτής	26
3.1.6 Βάση εκτύπωσης.....	27
3.2 Χαρακτηριστικά	27
3.3 Καθορισμός απαιτήσεων	28
4 Επιλογή εξαρτημάτων	30
4.1 Περιγραφή συσκευών	30
4.1.1 Εκτυπωτές	30
4.1.2 Scanner.....	31
4.1.3 Πολυμηχάνημα	32
4.1.4 CD/DVD-ROM	32
4.2 Επιλογή συσκευών	33
4.3 Εξαγωγή εξαρτημάτων	33
4.3.1 Scanner.....	33

4.3.2	Printer.....	35
4.3.3	DVD-ROM	38
4.4	Λοιπά εξαρτήματα.....	39
5	Κατασκευή του τρισδιάστατου εκτυπωτή.....	43
5.1	Software	43
5.1.1	Arduino IDE	43
5.1.2	Marlin	44
5.1.3	CURA.....	46
5.1.4	Pronterface.....	48
5.1.5	Marlin 3d Printer Tool	49
5.1.6	G-code	52
5.2	Ρύθμιση αξόνων	54
5.2.1	Stepper motors	54
5.2.2	Dc motor.....	58
5.3	Συναρμολόγηση.....	71
5.3.1	Τοποθέτηση του hot end	71
5.3.2	Συναρμολόγηση αξόνων X και Z	72
5.3.3	Κατασκευή της πλατφόρμας εκτύπωσης	74
5.3.4	Συναρμολόγηση Αξόνων XZ και Y	76
5.3.5	Τοποθέτηση των endstop switches	78
5.3.6	Τοποθέτηση ηλεκτρονικών	82
5.3.7	Δρομολόγηση καλωδιώσεων	82
5.3.8	Extruder and filament placement	83
5.3.9	Ρύθμιση hot end και heated bed PID	84
6	Λειτουργία και σύγκριση	86
6.1	Διαδικασία εκτύπωσης.....	86
6.2	Σύγκριση	88
6.2.1	Τεχνικά χαρακτηριστικά.....	89
6.2.2	Μέγεθος	90
6.2.3	Κόστος	90
6.2.4	Τελικό προϊόν	91
6.3	Περιθώρια βελτίωσης	92
7	Επίλογος	94
	Βιβλιογραφία	95

Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

Εικόνα 1: Παρωχημένες ηλεκτρονικές συσκευές προς απόρριψη.....	2
Εικόνα 2: Εκτυπωτής Creality 3D Ender-3 Pro.....	10
Εικόνα 3: Εκτυπωτής TRONXY X5SA- PRO.....	10
Εικόνα 4: Εκτυπωτής Anet A4.....	11
Εικόνα 5: Εκτυπωτής τύπου SCARA.....	12
Εικόνα 6: Ρομποτικός βραχίονας ως 3d printer.....	12
Εικόνα 7: Εκτυπωτής Sculpto PRO2.....	13
Εικόνα 8: Δημιουργία τεχνητής καρδιάς με 3d printing.....	14
Εικόνα 9: Προσθετικό χέρι.....	14
Εικόνα 10: Ανταλλακτικά αυτοκινήτου.....	15
Εικόνα 11: Κατασκευή αυτοκινήτου σε 3d printer.....	15
Εικόνα 12: Τρισδιάστατα εκτυπωμένο όπλο.....	16
Εικόνα 13: Κατευθυνόμενη βόμβα laser.....	16
Εικόνα 14: Τρισδιάστατη εκτύπωση πίτσας.....	17
Εικόνα 15: Εκτύπωση σοκολατένιου χταποδιού.....	17
Εικόνα 16: Καλλιτεχνική αναπαράσταση ανθρώπινου κρανίου.....	18
Εικόνα 17: Τρισδιάστατη εκτύπωση της φωνής του πρώην Προέδρου των ΗΠΑ Barack Obama από τον Gilles Azzaro.....	18
Εικόνα 18: Διάφορα είδη stepper motors.....	21
Εικόνα 19: Διάφορα είδη ηλεκτρικών κινητήρων.....	22
Εικόνα 20: Μετάδοση κίνησης μέσω timing belt σε CNC.....	22
Εικόνα 21: Εκτυπωτής Geeetech A20T με τριπλή κεφαλή εκτύπωσης.....	24
Εικόνα 22: Μηχανικός endstop switch.....	25
Εικόνα 23: Τρόπος λειτουργίας οπτικού limit switch.....	25
Εικόνα 24: Η πλακέτα Duet 2 Wifi με ενσωματωμένους stepper drivers και λειτουργία WiFi και ανάγνωσης Micro SD κάρτας.....	26
Εικόνα 25: Αποσπώμενη μαγνητική επιφάνεια.....	27
Εικόνα 26: Εκτυπωτής επαγγελματικής χρήσης και stepper motor 4A με τον stepper motor driver που χρησιμοποιεί.....	31
Εικόνα 27: Οικιακό πολυμηχάνημα Hp.....	32
Εικόνα 28: Αποσυναρμολόγηση scanner.....	34
Εικόνα 29: Τα κύρια μέρη του scanner.....	35
Εικόνα 30: Αποσυναρμολόγηση εκτυπωτή.....	36
Εικόνα 31: Τα κύρια μέρη του εκτυπωτή.....	36
Εικόνα 32: Γέφυρα κίνησης κεφαλής.....	37
Εικόνα 33: DC motor, Optical encoder και steel rods.....	38
Εικόνα 34: Διαδικασία ανοίγματος του DVD-Rom.....	38
Εικόνα 35: Η κεφαλή ανάγνωσης.....	39
Εικόνα 36: Το pinout της πλακέτα Ramps 1.4.....	40
Εικόνα 37: Πλακέτα L298N.....	40
Εικόνα 38: Nema 17 με extruder bracket.....	41
Εικόνα 39: J-head V6 Hotend.....	41
Εικόνα 40: Thermistor 10K 1% 3950.....	42

Εικόνα 41: Το τροφοδοτικό ATX	42
Εικόνα 42: Το Arduino IDE.....	43
Εικόνα 43: Το λογισμικό Cura	47
Εικόνα 44: Το παράθυρο ρυθμίσεων	48
Εικόνα 45: Το λογισμικό PronterFace	49
Εικόνα 46: Το λογισμικό Marlin 3d Printer Tool.....	50
Εικόνα 47: Το tab με το status των endstop.....	50
Εικόνα 48: Το tab Calculations.....	51
Εικόνα 49: Το tab Parameters.....	52
Εικόνα 50: Ζεύγος καλωδίων με ωμική αντίσταση.....	55
Εικόνα 51: Microstepping jumpers.....	56
Εικόνα 52: Μέτρηση κίνησης άξονα του scanner	57
Εικόνα 53: Quadrature optical encoder επί της πλακέτας	62
Εικόνα 54: Optical encoder pinout.....	62
Εικόνα 55: Linear encoder επί παχύμετρου.....	69
Εικόνα 56: Μέτρηση κίνησης της κεφαλής απόστασης 1cm	71
Εικόνα 57: Πλατφόρμα στήριξης του hot end	72
Εικόνα 58: Σύνδεση αξόνων X και Z	73
Εικόνα 59: Clearance του nozzle με τη βάση στήριξης.....	73
Εικόνα 60: Τοποθέτηση του Plexiglas επί της κεφαλής του scanner.....	74
Εικόνα 61: Τοποθέτηση thermistor.....	75
Εικόνα 62: Σύνδεση του heated bed με το Plexiglas	75
Εικόνα 63: Τοποθέτηση του scanner επί της μοριοσανίδας.....	76
Εικόνα 64: Η γέφυρα του άξονα X	77
Εικόνα 65: Η τελική συναρμολόγηση και των τριών αξόνων.....	78
Εικόνα 66: Μηχανικός Endstop switch του άξονα Y	78
Εικόνα 67: Οπτικός Endstop switch του άξονα X.....	79
Εικόνα 68: Μηχανικός Endstop switch του άξονα Z	80
Εικόνα 69: Optical encoder pinout.....	81
Εικόνα 70: Tab ένδειξης των endstop switches status στο Marlin 3d Printer Tool.....	81
Εικόνα 71: Τοποθέτηση ελεγκτών επί της μοριοσανίδας.....	82
Εικόνα 72: Δρομολόγηση καλωδίων κεφαλής εκτύπωσης.....	83
Εικόνα 73: Hot end PID autotune	84
Εικόνα 74: Το μοντέλο 20mm calibration cube.....	86
Εικόνα 75: Διαδικασία του bed leveling	87
Εικόνα 76: Διαδικασία εκτύπωσης.....	88

Σχήμα 1: Η φιλοσοφία λειτουργίας Selective Binding.....	5
Σχήμα 2: Ο τρόπος λειτουργίας ενός Selective Solidification	6
Σχήμα 3: Ο τρόπος εναπόθεσης υλικού στο Selective Deposition	7
Σχήμα 4: Διατάξεις κεφαλής εκτύπωσης.....	23
Σχήμα 5: Αναπαράσταση λειτουργίας του PID controller.....	59
Σχήμα 6: Το closed loop του άξονα X	59
Σχήμα 7: Encoding με μονή μέτρηση στην άνοδο.....	60
Σχήμα 8: Encoding με μονή μέτρηση στην άνοδο και στην κάθοδο.....	61
Σχήμα 9: Encoding με διπλή μέτρηση στην άνοδο και στην κάθοδο	61

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Ιδιότητες των διαφόρων υλικών εκτύπωσης	9
Πίνακας 2: G-commands	53
Πίνακας 3: M-commands.....	54
Πίνακας 4: Σύγκριση τεχνικών χαρακτηριστικών.....	89
Πίνακας 5: Bill Of Materials	91

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

CNC	Computerized Numerical Control
PID	Proportional, Integral, and Derivative
SLS	Selective Laser Sintering
FFF	Fused Deposition Modeling
FDM	Fused Filament Fabrication
SLA	Stereolithography Apparatus
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
ATX	Advanced Technology eXtended
IDE	Integrated Development Environment
EEPROM	Electrically erasable programmable read-only memory
PTFE	Polytetrafluoroethylene

1 Εισαγωγή

Με τη βιομηχανική επανάσταση ο άνθρωπος κατάλαβε τη σημασία που θα έπαιζαν οι μηχανές στη ζωή του και το βαθμό στον οποίο θα τον βοηθούσαν στη διευκόλυνση της καθημερινής ζωής του, αλλά και στη έκφραση της εφευρετικότητάς τους. Από τότε πολλά έχουν αλλάξει όσων αφορά το μέγεθος της επίδρασης των μηχανών στη ζωή του, ωστόσο, αυτό που παραμένει σταθερό, είναι η ολοένα και αυξανόμενη εξάρτησή του από αυτές.

Για να ικανοποιηθούν οι ανωτέρω ανάγκες, δημιουργούνται διαρκώς νέες συσκευές για χρήση στο οικιακό περιβάλλον. Αυτές συνεχώς εξελίσσονται ώστε να συμβαδίζουν με τις νέες τεχνολογίες να γίνονται πιο αποδοτικές, αλλά και λιγότερο ενεργοβόρες, ακολουθώντας την αναγκαιότητα της μείωσης της κατανάλωσης πόρων και ενέργειας, ώστε να αντιμετωπιστεί η απειλητικά αυξανόμενη κλιματική αλλαγή. Με τον τρόπο αυτό, συσκευές παλαιότερης τεχνολογίας καθίστανται παροχυμένες, με αποτέλεσμα να μην χρησιμοποιούνται πλέον και να πέφτουν σε αχρηστία.

Η ενσωμάτωση των αυτοματοποιημένων διαδικασιών στις οικιακές συσκευές απαιτούν την ύπαρξη πολλών αισθητήρων, οι οποίοι συχνά αστοχούν, με αποτέλεσμα να τίθεται ολόκληρη η συσκευή εκτός ενεργείας. Επίσης, η ύπαρξη εξιδεικευμένων εξαρτημάτων σε αυτές, καθιστούν την πιθανή επιδιόρθωσή τους ασύμφορη ή και, πολλές φορές, αδύνατη.

Οι ανωτέρω λόγοι έχουν ως αποτέλεσμα τις τελευταίες δεκαετίες να αυξάνεται ραγδαία ο αριθμός των ηλεκτρονικών συσκευών οι οποίες καταλήγουν στα απορρίμματα. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την ύπαρξη μη ανακυκλώσιμων ή και επικίνδυνων υλικών εντός τους, επιβαρύνει το περιβάλλον, ενώ η κατασκευή νέων ελαττώνει τους διαθέσιμους πόρους του πλανήτη.



Εικόνα 1: Παρωχημένες ηλεκτρονικές συσκευές προς απόρριψη

Τα τελευταία χρόνια, για να αντιμετωπιστεί η συσσώρευση άχρηστων συσκευών οι οποίες καταλήγουν στο περιβάλλον, έχουν δημιουργηθεί μονάδες ανακύκλωσης ηλεκτρικών συσκευών, από τις οποίες όμως επαναχρησιμοποιούνται μόνο οι πρώτες ύλες, όπως ο χαλκός των καλωδίων ή ο σίδηρος του σκελετού, ενώ τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα, όπως οι πλακέτες, οι αισθητήρες, οι κινητήρες, τα πλαστικά μεγάλου πάχους κ.α. καταλήγουν στις χωματερές.

1.1 Αντικείμενο εργασίας

Στην παρούσα εργασία θα παρουσιαστεί ένας τρόπος επαναχρησιμοποίησης των λειτουργικών μερών αυτών των συσκευών για τη δημιουργία μίας άλλης συσκευής, η οποία επιτελεί τελείως διαφορετική λειτουργία από τις αρχικές. Για το σκοπό αυτό θα κατασκευαστεί ένας τρισδιάστατος εκτυπωτής από μέρη παλαιών ή βεβλαμένων ηλεκτρονικών συσκευών οι οποίες έχουν πέσει σε αχρηστία.

1.2 Στόχος εργασίας

Στόχος της εργασίας είναι να δείξει την ύπαρξη τρόπων αξιοποίησης έστω τμημάτων των συσκευών αυτών, ώστε να μην καταλήγουν στα απορρίμματα και κατ' επέκταση επιβαρύνεται το περιβάλλον με όγκο μη ανακυκλώσιμων υλικών.

1.3 Διάρθρωση εργασίας

Στο 2^ο Κεφάλαιο αναφέρονται κάποια ιστορικά στοιχεία και παρατίθενται οι αρχές λειτουργίας του τρισδιάστατου εκτυπωτή, καθώς και οι τομείς χρήσεις του.

Στο 3^ο Κεφάλαιο απαριθμούνται τα μέρη από το οποία αποτελείται ένας τρισδιάστατος εκτυπωτής, αναφέρονται τα χαρακτηριστικά του και καταγράφονται οι απαιτήσεις για την κατασκευή. Στο 4^ο Κεφάλαιο αναφέρονται οι συσκευές από τις οποίες μπορούν να εξαχθούν τα απαραίτητα εξαρτήματα και περιγράφεται ο τρόπος εξαγωγής αυτών.

Στο 5^ο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία κατασκευής του τρισδιάστατου εκτυπωτή, ενώ στο 6^ο Κεφάλαιο επιδεικνύεται ο τρόπος λειτουργίας του και γίνεται μία σύγκριση αυτού με άλλα μοντέλα εμπορικού τύπου που κυκλοφορούν στην αγορά.

Στο τελευταίο Κεφάλαιο εξάγονται κάποια χρήσιμα συμπεράσματα.

2 Τρισδιάστατη εκτύπωση

2.1 Ιστορικό

Η απαρχή των τρισδιάστατων εκτυπωτών βρίσκεται στις αρχές τις δεκαετίας του '80. Πρώτος ο Charles W. (Chuck) Hull ανέπτυξε έναν ρομποτικό 3d printer το 1984, ο οποίος χρησιμοποιούσε την αρχή της στερεολιθογραφίας. Η συγκεκριμένη είχε εφευρεθεί από τον Hideo Kodama το 1980. Αργότερα, το 1989, οι S. Scott και Lisa Crump πατεντάρισαν την τεχνική εναπόθεσης υλικού και έθεσαν τα θεμέλια για τη χρήση των επιτραπέζιων εκτυπωτών.

Τη δεκαετία του '90 πολλές πατέντες ακολούθησαν, επινοώντας διάφορους τρόπους βασιζόμενες στην αρχή δημιουργίας αντικειμένων κατά στρώση. Όταν το 2009 τα δικαιώματα για την πατέντα των S. Scott και Lisa Crump έληξαν, ο Adrian Bowyer, λέκτορας του πανεπιστημίου του Bath του Ηνωμένου Βασιλείου, εξέδωσε τα σχέδια τα οποία μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν, ώστε να παρέχουν τη δυνατότητα να δημιουργήσει κάποιος τον δικό του τρισδιάστατο εκτυπωτή, ενώ ταυτόχρονα παρότρυνε άλλους να βελτιώσουν αυτά τα σχέδια. Ο όρος του RepRap printer είχε γεννηθεί.

Από το 2010 και έπειτα, μετά και την κυκλοφορία του Arduino το 2005, παρουσιάστηκε μία απότομη αύξηση στη διαφοροποίηση των εκτυπωτών, ενώ με τη διάδοση ιστοσελίδων online πωλήσεων, όπως το ebay και το amazon, η προμήθεια των απαραίτητων εξαρτημάτων για την κατασκευή τους έγινε εύκολη αλλά και πολύ οικονομική.

Με αυτόν τον τρόπο οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές έγιναν άμεσα προσβάσιμοι από το ευρύ καταναλωτικό κοινό και, πλέον, μπορούν να βρεθούν σε οποιοδήποτε σπίτι να εκτυπώνουν εξαρτήματα για οτιδήποτε δημιουργεί η εφευρετικότητα του ανθρώπου.

2.2 Παρουσίαση του τρισδιάστατου εκτυπωτή

Από την πρώτη εμφάνισή τους οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές έχουν αλλάξει και εξελιχθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό. Νέες τεχνολογίες και καινούργια υλικά εμφανίζονται συνεχώς, καθιστώντας τις πιθανές επιλογές πολλές φορές δύσκολα

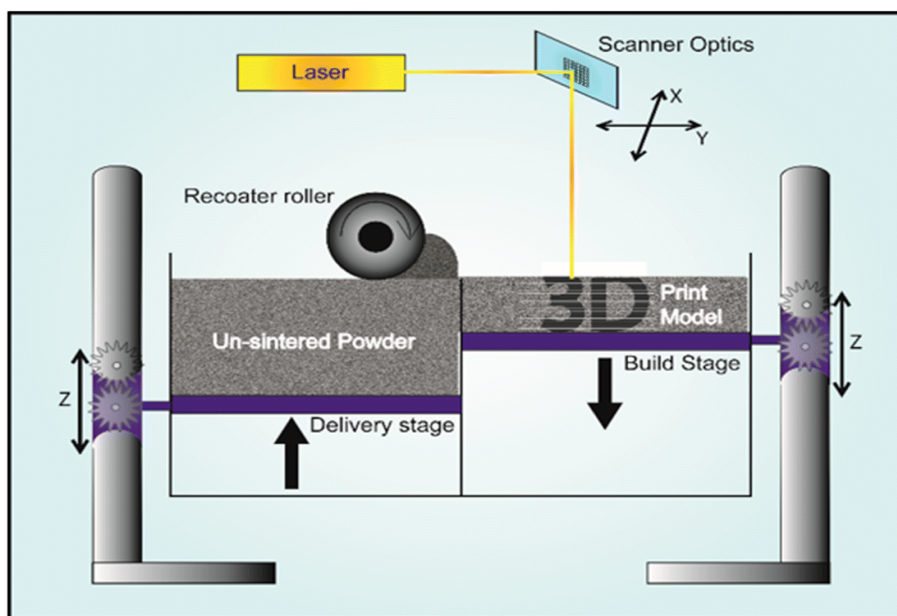
διακριτές. Οι διαφοροποιήσεις αναφέρονται κυρίως στον τρόπο δημιουργίας του αντικειμένου, στο υλικό που χρησιμοποιείται αλλά και στον τρόπο που επιτυγχάνεται η κίνηση των αξόνων της συσκευής.

2.2.1 Είδη τρισδιάστατων εκτυπωτών

Οι 3d printer που απευθύνονται στο καταναλωτικό κοινό δημιουργούν τα αντικείμενα κατά στρώσεις, ή αλλιώς αποκαλούμενη προσθετική κατασκευή, σε αντίθεση με την παραδοσιακή βιομηχανική τεχνική κατά την οποία το υλικό χύνεται μέσα σε καλούπια. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές και υλικά με τα οποία επιτυγχάνεται η συγκεκριμένη μέθοδος.

2.2.1.1 Selective Binding

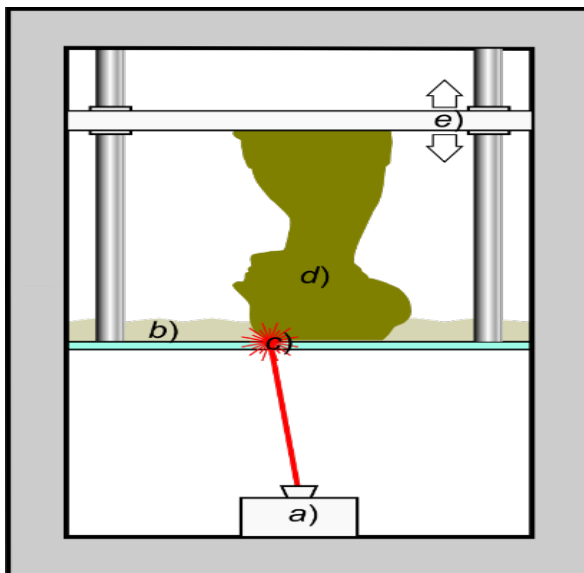
Με την τεχνολογία της επιλεκτικής δέσμευσης εφαρμόζεται θερμότητα ώστε τα σωματίδια του υλικού, συνήθως μέταλλο ή γύψος, να ενωθούν μεταξύ τους, σχηματίζοντας ένα στρώμα του αντικειμένου. Στη συνέχεια, εναποτίθεται νέα στρώση του υλικού πάνω από το προηγούμενο και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Ο πιο κοινός τρόπος σύνδεσης των σωματιδίων είναι μέσω laser, η λεγόμενη επιλεκτική σύντηξη με laser (Selective Laser Sintering - SLS).



Σχήμα 1: Η φιλοσοφία λειτουργίας Selective Binding

2.2.1.2 Selective Solidification

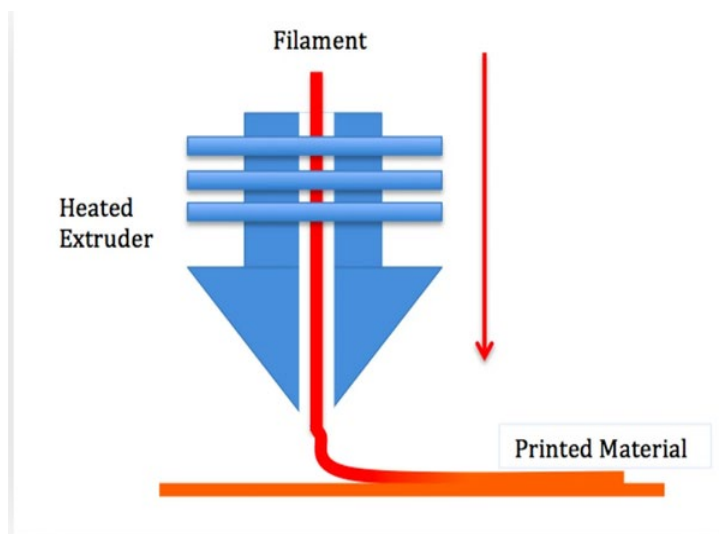
Η επιλεκτική στερεοποίηση δημιουργεί το αντικείμενο στερεοποιώντας κατά στρώσεις ένα υγρό υλικό. Η πιο γνωστή διαδικασία είναι η στερεολιθογραφία (Stereolithography Apparatus - SLA), κατά την οποία το υγρό στερεοποιείται μέσω UV ακτινοβολίας. Το υλικό βρίσκεται μέσα σε μια δεξαμενή, στην οποία υπάρχει μία κινούμενη πλατφόρμα. Η στερεοποίηση επιτυγχάνεται στην επιφάνεια του υγρού και στη συνέχεια η πλατφόρμα κινείται προς τα κάτω ώστε να δημιουργηθεί το επόμενο layer. Άλλος ένας τρόπος στερεοποίησης είναι με την εφαρμογή ψηφιακού προβολικού (DLP).



Σχήμα 2: Ο τρόπος λειτουργίας ενός Selective Solidification

2.2.1.3 Selective deposition

Η πιο διαδεδομένη τεχνολογία στους επιτραπέζιους τρισδιάστατους εκτυπωτές είναι η επιλεκτική εναπόθεση υλικού (Fused Deposition Modeling – FDM ή Fused Filament Fabrication - FFF). Η κεφαλή εκτύπωσης κινείται πάνω από μία πλατφόρμα στην οποία εναποθέτει το υλικό. Αφού δημιουργηθεί η μία στρώση, είτε η πλατφόρμα κατεβαίνει, είτε η κεφαλή ανεβαίνει, εναποθέτοντας το επόμενο στρώμα.



Σχήμα 3: Ο τρόπος εναπόθεσης υλικού στο Selective Deposition

2.2.2 Υλικό δημιουργίας

Κάθε τύπος εκτυπωτή χρησιμοποιεί και τη δική του γκάμα υλικών. Αρχικά η τεχνολογία απευθυνόταν κυρίως σε πολυμερή υλικά. Με την όλο και μεγαλύτερη εφαρμογή των τρισδιάστατων εκτυπωτών στην καθημερινότητα, αλλά και λόγω του γρήγορου prototyping που προσφέρουν, περισσότερα είδη υλικών άρχισαν να χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία αντικειμένων, όπως μέταλλο, ελαστικό αλλά και τρόφιμα.

2.2.2.1 Προσδιδόμενες ιδιότητες

Το καθένα από τα χρησιμοποιούμενα υλικά προσφέρει και διαφορετικές ιδιότητες στο τελικό προϊόν ενώ έχει και διαφορετική συμπεριφορά κατά της διάρκειας της εκτύπωσης. Αυτές είναι οι κάτωθι:

- Easy of printing: κατά πόσο εύκολα εκτυπώνεται το υλικό. Αφορά κυρίως το δέσιμο του υλικού με την επιφάνεια εκτύπωσης (printing bed), τη μέγιστη ταχύτητα εκτύπωσης, τη συχνότητα των αποτυχημένων εκτυπώσεων κ.τ.λ.
- Visual quality: το πόσο καλό φαίνεται το τελικό προϊόν.
- Max stress: η μέγιστη αντοχή που έχει το αντικείμενο κατά το τέντωμα, πριν διαλυθεί.
- Impact resistance: η ενέργεια που απαιτείται για να σπάσει το αντικείμενο μετά από βίαιο χτύπημα.

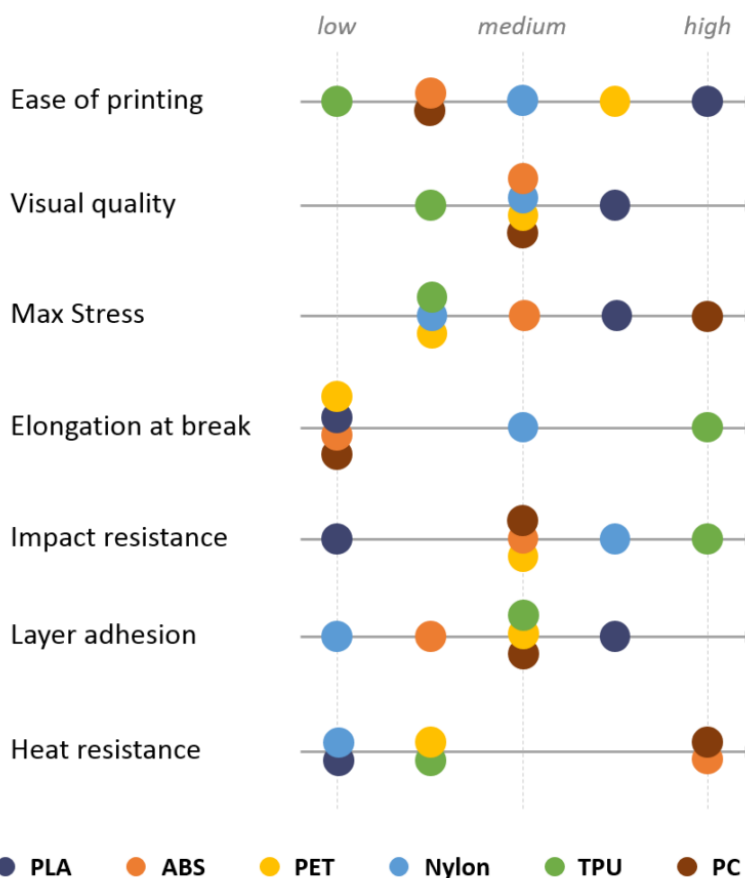
- Layer adhesion: κατά πόσο καλά κολλάνε οι στρώσεις του υλικού μεταξύ τους.
- Heat resistance: αναφέρεται στη μέγιστη θερμοκρασία στην οποία το αντικείμενο θα εκτεθεί χωρίς να παραμορφωθεί.

2.2.2.2 Τύποι υλικών

Τα βασικότερα υλικά που χρησιμοποιούνται στους FDM εκτυπωτές είναι τα κάτωθι:

- PLA: το ευκολότερο και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο πολυμερές. Είναι αρκετά άκαμπτο και δυνατό, ωστόσο είναι εύθραυστο.
- ABS: προτιμάται όταν απαιτείται μεγαλύτερη θερμοκρασία εξαγωγής και μεγαλύτερη αντοχή από το PLA.
- PET: πολυμερές με ιδιαίτερες ιδιότητες, έχει μεγαλύτερη αντοχή στην υγρασία και στην επαφή με χημικά, αλλά είναι πιο βαρύ από τα δύο προηγούμενα
- Nylon: κατέχει πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες και έχει τη μεγαλύτερη αντοχή σε χτυπήματα. Ωστόσο, η ένωση μεταξύ των στρώσεων δεν είναι και τόσο καλή.
- TPU: χρησιμοποιείται για τη δημιουργία εύκαμπτων αντικειμένων.

Το κάθε υλικό έχει και το δικό του ποσοστό των ιδιοτήτων που αναφέρθηκαν παραπάνω.



Πίνακας 1: Ιδιότητες των διαφόρων υλικών εκτύπωσης

2.2.3 Τύποι FDM εκτυπωτών

Με τη διάδοση του RepRap αλλά και της πλακέτας του Arduino, εμφανίστηκαν νέοι τρόποι μετακίνησης της κεφαλής εξαγωγής ως προς την πλατφόρμα της βάσης. Οι δύο βασικές κατηγορίες είναι οι Cartesian, στους οποίους η κίνηση πραγματοποιείται με υπολογισμό της απόστασης επί των τριών βασικών αξόνων του καρτεσιανού συστήματος στην οποία πρέπει να κινηθεί η κεφαλή, και οι Polar, όπου η βάση βρίσκεται επί περιστροφικά κινούμενης πλατφόρμας, με την κεφαλή να κινείται μόνο επί του άξονα Z.

2.2.3.1 Cartesian

Στον κλασικό καρτεσιανό εκτυπωτή η κεφαλή κινείται επί των αξόνων X και Z, ενώ η πλατφόρμα εκτύπωσης επί του άξονα Y. Καθώς το υλικό εναποθέτεται στις διάφορες στρώσεις, η κεφαλή κινείται προς τα πάνω ώστε να συνεχίσει στις επόμενες στρώσεις (layers).



Εικόνα 2: Εκτυπωτής Creality 3D Ender-3 Pro

2.2.3.2 H-Bot / CORE XY

Παραλλαγές του καρτεσιανού, με τη διαφορά ότι η κεφαλή κινείται επί των αξόνων X και Y και η πλατφόρμα, ξεκινώντας από το ύψος της κεφαλής κινείται προς τα κάτω επί του άξονα Z. Η διαφορά μεταξύ των δύο σχεδίων έγκειται στο γεγονός πως στους μεν H-Bot η πλατφόρμα κινείται μέσω ζώνης (timing belt), στους δε CORE XY μέσω άξονα βίδας (threaded rod), επιτρέποντας έτσι λιγότερους κραδασμούς, καλύτερη ποιότητα εκτύπωσης και μεγαλύτερη ροπή στρέψης.



Εικόνα 3: Εκτυπωτής TRONXY X5SA- PRO

2.2.3.3 Delta

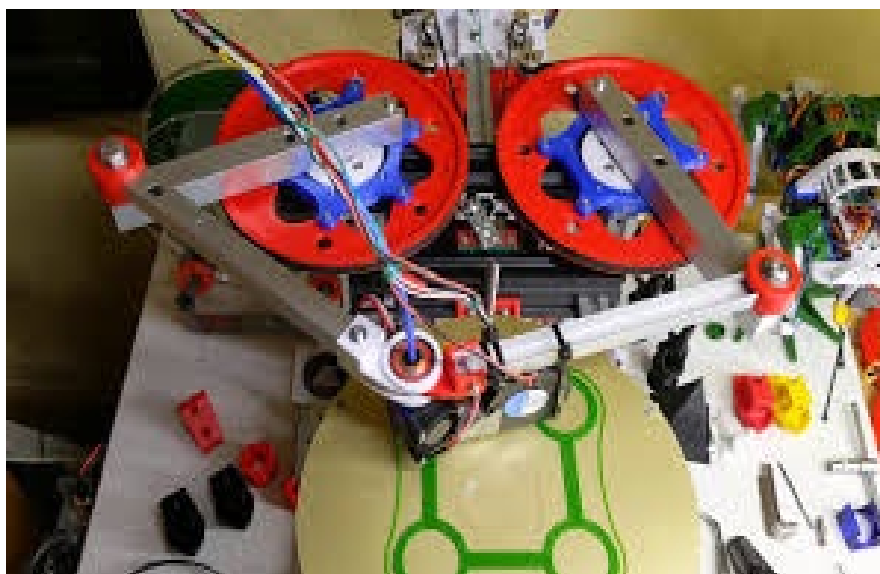
Χρησιμοποιούν το καρτεσιανό σύστημα για να υπολογίσουν την κίνηση της κεφαλής, ωστόσο αυτή είναι συνδεδεμένη σε τρεις μηχανικούς βραχίονες οι οποίοι με τη σειρά τους συνδέονται το καθένα με έναν κάθετης κίνησης άξονα. Η θέση της κεφαλής υπολογίζεται από την απόσταση την οποία πρέπει να κινηθεί ο κάθε άξονας πάνω ή κάτω, επιτυγχάνοντας έτσι τη θέση της ως προς το X και Y αλλά και ως προς το Z.



Εικόνα 4: Εκτυπωτής Anet A4

2.2.3.4 SCARA

Από τα αρχικά Selective Compliance Assembly Robot Arm, η κεφαλή είναι συνδεδεμένη με ένα μηχανικό βραχίονα κινούμενο από δύο κινητήρες για να τοποθετηθεί στους άξονες X και Y, ενώ ένας τρίτος κινητήρας ανεβοκατεβάζει είτε τη διάταξη βραχίονα-κεφαλή είτε την πλατφόρμα εκτύπωσης. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν και τα ρομποτικά χέρια τα οποία χρησιμοποιούνται για τρισδιάστατη εκτύπωση.



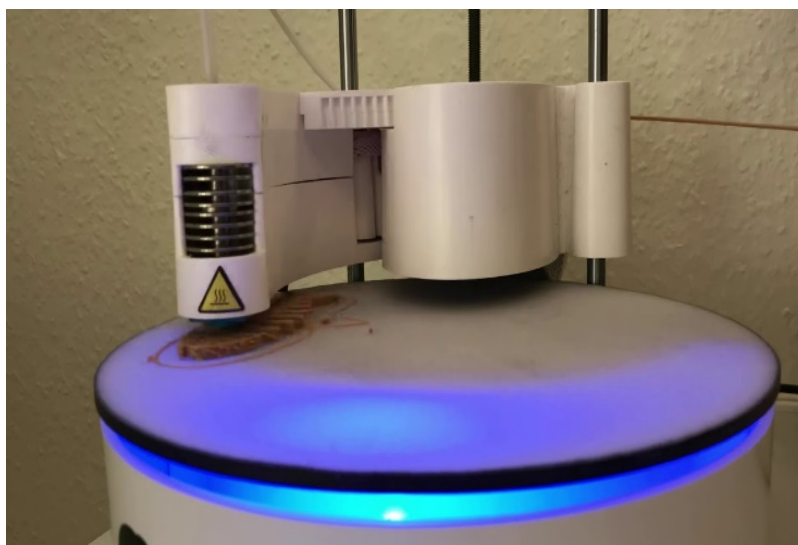
Εικόνα 5: Εκτυπωτής τύπου SCARA



Εικόνα 6: Ρομπωτικός βραχίονας ως 3d printer

2.2.3.5 Polar

Ενώ όλοι οι καρτεσιανοί εκτυπωτές χρησιμοποιούν ένα τετραγωνισμένο σύστημα συντεταγμένων, οι Polar εκτυπώνουν σημεία πάνω σε κυκλικό πλέγμα, υπολογίζοντας την γωνία και την απόσταση του σημείου από το κέντρο, στο οποίο θα πρέπει να κινηθεί η κεφαλή. Στη συγκεκριμένη διάταξη η πλατφόρμα κινείται κυκλικά υπολογίζοντας τη γωνία, ενώ η κεφαλή τοποθετείται πάνω της μέσω ενός βραχίονα που υπολογίζει την απαιτούμενη απόσταση.



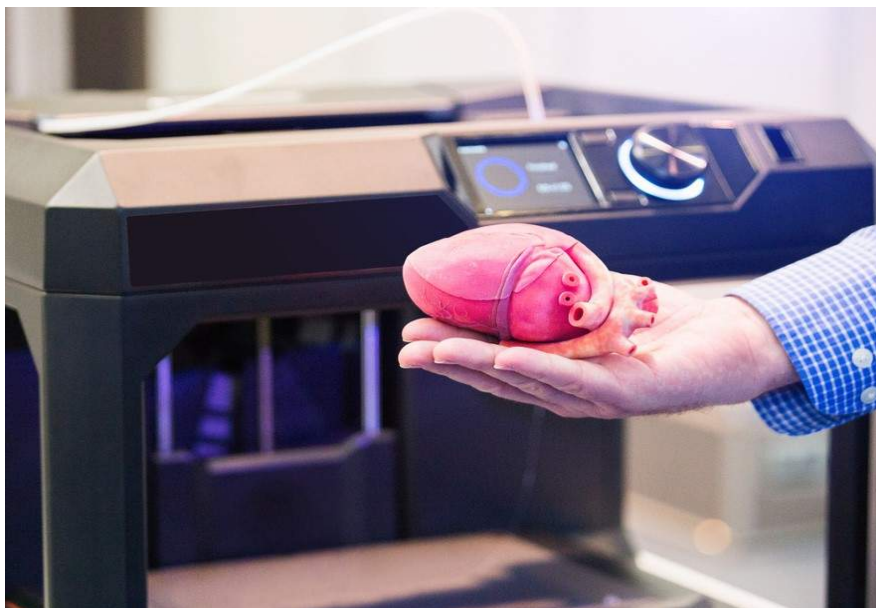
Εικόνα 7: Εκτυπωτής Sculpto PRO2

2.3 Πεδίο εφαρμογών

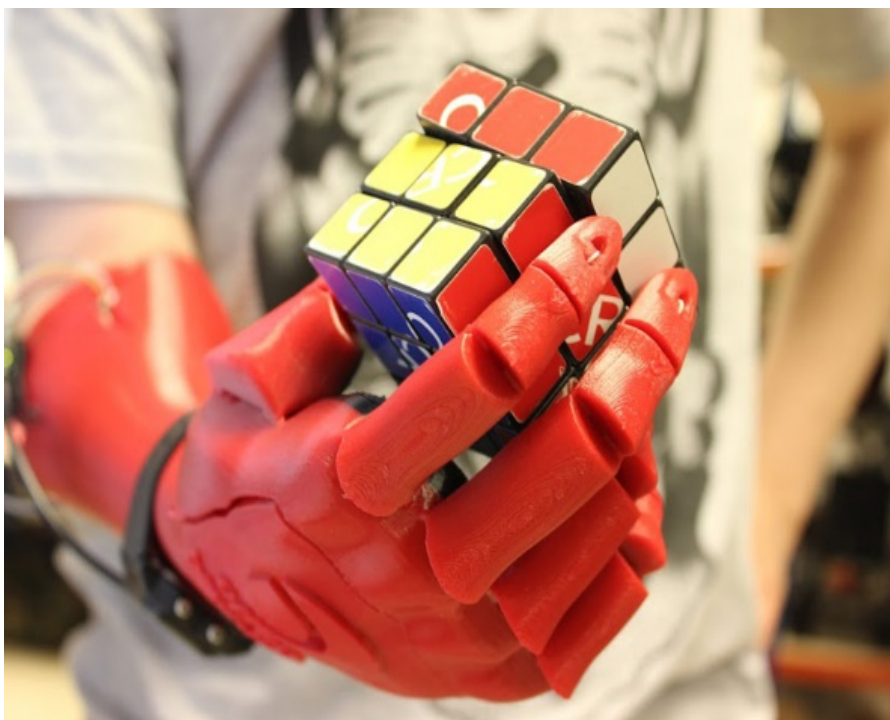
Αρχικά οι 3d printers δημιουργήθηκαν ώστε να εξυπηρετήσουν τους σκοπούς του γρήγορου prototyping, κυρίως σε επαγγελματικές εφαρμογές, οι οποίες αργότερα θα περνούσαν σε βιομηχανικό επίπεδο παραγωγής για να κυκλοφορήσουν στην αγορά. Τις τελευταίες δύο δεκαετίες ωστόσο, η χρήση τους έχει εξαπλωθεί σε πολλούς περισσότερους τομείς, τόσο στον επαγγελματικό τομέα, όσο και στον οικιακό. Παρακάτω θα αναφερθούν ορισμένοι από αυτούς τους τομείς.

2.3.1 Ιατρική

Η χρήση των τρισδιάστατων εκτυπωτών στην ιατρική έχει βρει πολύ μεγάλη απήχηση, εφευρίσκοντας συνεχώς νέους τρόπους χρήσης τους. Από την κατασκευή προσθετικών μελών και τη δημιουργία βαλβίδων της καρδιάς από πολυμερή, στην εκτύπωση τρισδιάστατου κυτταρικού ιστού και ορθοδοντικών εκμαγείων, σε συνεργασία με την τεχνολογία της τρισδιάστατης σάρωσης, αποτελούν τις νέες επαναστατικές μεθόδους αντιμετώπισης γεννητικών ανωμαλιών και της πλαστικής χειρουργικής.



Εικόνα 8: Δημιουργία τεχνητής καρδιάς με 3d printing



Εικόνα 9: Προσθετικό χέρι

2.3.2 Αυτοκινητοβιομηχανία

Η 3d εκτύπωση έχει φέρει ένα νέου είδους επανάστασης στη σχεδίαση και την παραγωγή αυτοκινήτων. Η χρήση της στην γρήγορη κατασκευή μερών πρωτοτύπων και στην κατασκευή τόσο μηχανικών όσο και άλλων μερών της

τελικής κατασκευής, προσφέρουν μικρότερο χρόνο και κόστος κατασκευής, ενώ η ευχέρεια εφαρμογής νέων τεχνολογιών αυξάνει την ποιότητα των προϊόντων αλλά και την ασφάλεια.



Εικόνα 10: Ανταλλακτικά αυτοκίνητου



Εικόνα 11: Κατασκευή αυτοκινήτου σε 3d printer

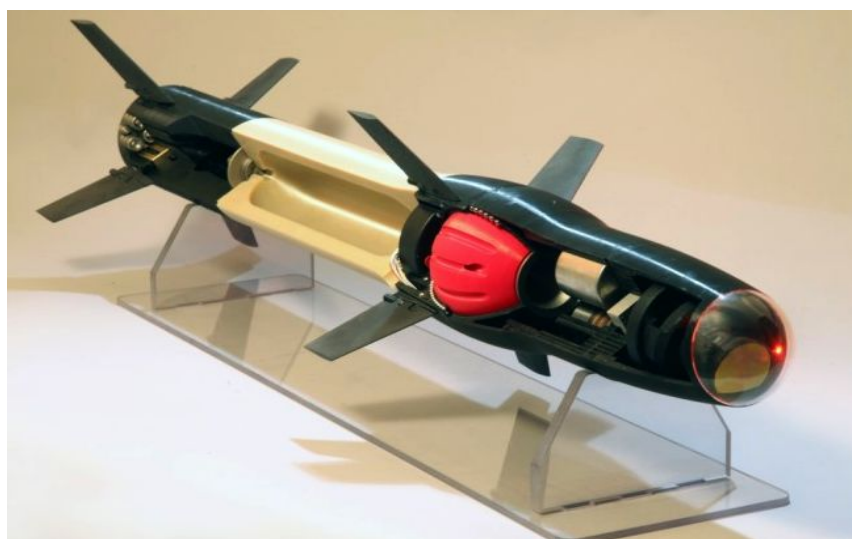
2.3.3 Πολεμική βιομηχανία

Άλλος ένας τομέας βιομηχανικής χρήσης των 3d printers είναι αυτός της άμυνας. Χρησιμοποιείται στην κατασκευή εξαρτημάτων όπλων, αεροσκαφών, μηχανοκίνητων τεθωρακισμένων και, όπως πρόσφατα έγινε γνωστό, στην εξ

ολοκλήρου κατασκευή βομβών. Ειδικά υλικά και τεχνολογίες δίνουν μεγάλη αντοχή και μειωμένο κόστος.



Εικόνα 12: Τρισδιάστατα εκτυπωμένο όπλο



Εικόνα 13: Κατευθυνόμενη βόμβα laser

2.3.4 Διατροφή

Η βιομηχανία τροφίμων εκμεταλλεύεται την τρισδιάστατη εκτύπωση, κυρίως στον κλάδο της ζαχαροπλαστικής, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν μαλακά κατά βάση υλικά. Μέσω ειδικά σχεδιασμένων λογισμικών μπορούν να δημιουργηθούν εδέσματα με συγκεκριμένα υλικά αλλά και με συγκεκριμένη διατροφική αξία, προσδίδοντας μεγάλη ελευθερία στη δημιουργικότητα και στον πειραματισμό.



Εικόνα 14: Τρισδιάστατη εκτύπωση πίτσας



Εικόνα 15: Εκτύπωση σοκολατένιου χταποδιού

2.3.5 Καλές τέχνες

Η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει αρχίσει και χρησιμοποιείται και στον κλάδο ο οποίος κατεξοχήν βασίζεται στην ανθρώπινη δημιουργικότητα και φαντασία. Με έναν 3d printer ο καλλιτέχνης μπορεί στην κυριολεξία να δημιουργήσει οτιδήποτε

και έτσι η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει διαδοθεί σε όλους τους κλάδους των καλών τεχνών.



Εικόνα 16: Καλλιτεχνική αναπαράσταση ανθρώπινου κρανίου



Εικόνα 17: Τρισδιάστατη εκτύπωση της φωνής του πρώην Προέδρου των ΗΠΑ Barack Obama από τον Gilles Azzaro

2.4 Συμπεράσματα

Από τα ανωτέρω φαίνεται πως η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει εδραιωθεί για τα καλά σε όλους τους τομείς της δημιουργικότητας του ανθρώπου, δίνοντας πλέον τη δυνατότητα σε ένα μεγαλύτερο κοινό από αυτό του κατασκευαστικού και βιομηχανικού κλάδου να τη χρησιμοποιήσει. Η χαμηλή πλέον τιμή απόκτησης των

εκτυπωτών αλλά και των χρησιμοποιούμενων υλικών τους έχει καταστήσει ευρέως χρησιμοποιούμενους από ένα πολύ μεγάλο κοινό, όχι μόνο του επαγγελματικού χώρου. Τέλος, δίνουν ένα μέσο έκφρασης της αστείρευτης δημιουργικότητας και φαντασίας του ανθρώπου.

3 Καταγραφή και ανάλυση απαιτήσεων

Όπως κάθε συσκευή, έτσι και για την κατασκευή του 3d printer από άλλες, θα πρέπει να καθορισθούν οι απαιτήσεις, ώστε να είναι δυνατή η επιλογή των κατάλληλων εξαρτημάτων. Για να οριστούν όμως αυτές οι απαιτήσεις που θα καθορίσουν τα υλικά, αρχικά απαιτείται να γίνει περιγραφή των επιμέρους εξαρτημάτων που τον αποτελούν και αναφορά των κύριων χαρακτηριστικών του.

3.1 Περιγραφή 3d printer

Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής αποτελείται από μία πληθώρα εξαρτημάτων, είτε απαραίτητα είτε υποβοηθητικά για τη λειτουργία του. Όλα μαζί ενορχηστρώνονται ώστε να επιτύχουν το τελικό επιθυμητό αποτέλεσμα.

3.1.1 Κινητήρες

Το κατεξοχήν χαρακτηριστικό του τρισδιάστατου εκτυπωτή είναι πως λειτουργεί με κίνηση μερών ώστε να φέρει την κεφαλή εκτύπωσης στην κατάλληλη θέση ώστε να εξαχθεί το υλικό και να δημιουργηθεί το αντικείμενο. Για την κίνηση των αξόνων χρησιμοποιούνται κινητήρες, οι οποίοι θα πρέπει να είναι εφοδιασμένοι με σύστημα αναγνώρισης θέσης ή ποσού και κατεύθυνσης κίνησης, ώστε να γνωρίζει η συσκευή ανά πάσα στιγμή την ακριβή θέση της κεφαλής ως προς την πλατφόρμα εκτύπωσης. Οι κυριότερες δύο κατηγορίες είναι τα stepper motors και τα dc brushed motors.

3.1.1.1 Stepper motors

Γνωστοί και ως κινητήρες βήματος, διαιρούν μία πλήρη περιστροφή σε ισόποσο αριθμό βημάτων. Το κάθε βήμα αντιστοιχεί και σε μία συγκεκριμένη γωνία που έχει κινηθεί ο άξονας. Μετατρέποντας τον απαιτούμενο αριθμό βημάτων σε γραμμική απόσταση, η εφαρμογή γνωρίζει το μέγεθος και την κατεύθυνση που έχει κινηθεί. Με αυτό τον τρόπο δεν απαιτείται να υπάρχει ανατροφοδότηση ως προς την πραγματική θέση της κεφαλής (open loop controller). Για τη λειτουργία τους λαμβάνουν δύο σήματα ένα για την κατεύθυνση και ένα για τον αριθμό των βημάτων τα οποία απαιτούνται για να διανύσει την απαιτούμενη απόσταση. Τα stepper motors χρησιμοποιούνται σχεδόν κατά αποκλειστικότητα στους οικιακούς 3d printers του εμπορίου.

Υπάρχουν δύο είδη stepper motor, οι διπολικοί (bipolar) και οι μονοπολικοί (unipolar). Οι bipolar διαθέτουν 4 αγωγούς, οι οποίοι τροφοδοτούν ανά 2 ζεύγη 4 ηλεκτρομαγνήτες εναλλάσσοντας κατάλληλα την πολικότητα της τάσης και για αυτό το λόγο δεν απαιτείται να έχουν κοινό πόλο γείωσης. Οι μονοπολικοί διαθέτουν 5 ή 6 αγωγούς σύνδεσης των τεσσάρων ηλεκτρομαγνητών. Τα 2 από τα 6 καλώδια τροφοδοσίας συνδέονται μόνιμα με τη γείωση, ενώ η θετική τάση τροφοδοσίας τοποθετείται διαδοχικά σε ένα από τα 4 καλώδια για εκτέλεση των βημάτων.



Εικόνα 18: Διάφορα είδη stepper motors

Οι συγκεκριμένοι κινητήρες παρέχουν ακριβής κίνηση, έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής και ροπή σε χαμηλές στροφές, οπότε και αποτελούν μια καλή επιλογή για εφαρμογές που απαιτούν χαμηλή ταχύτητα με μεγάλη ακρίβεια. Το μεγαλύτερο μειονέκτημά τους είναι πως δεν παρέχουν κάποιας μορφής ανάδραση (feedback) για το ακριβές μέγεθος της κίνησης που εκτέλεσαν.

3.1.1.2 DC brushed motors

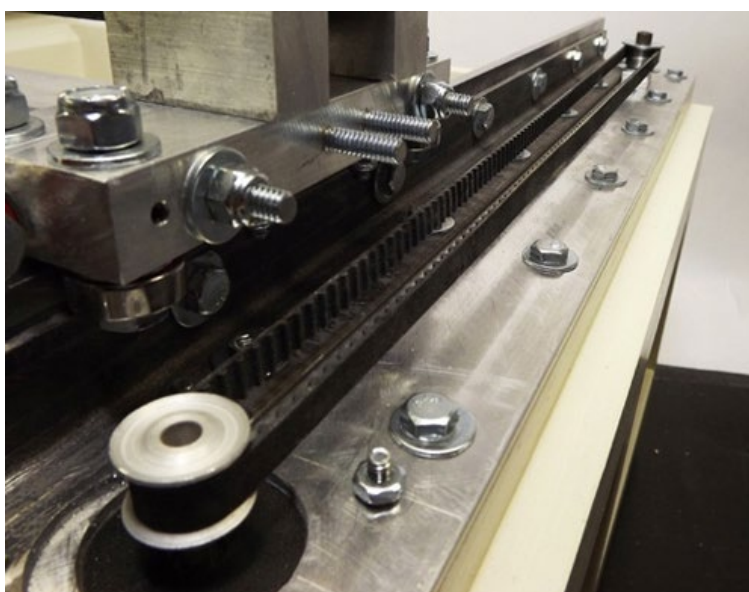
Οι γνωστοί ηλεκτρικοί κινητήρες μετατρέπουν το ηλεκτρικό ρεύμα σε περιστροφική κίνηση. Η ταχύτητα περιστροφής εξαρτάται από τα volt του ρεύματος που θα τροφοδοτηθούν. Στους συγκεκριμένους απαιτείται να υπάρχει κάποια μορφή ανατροφοδότησης, όπως για παράδειγμα τα optical encoders, ούτως ώστε η εφαρμογή να γνωρίζει προς ποια κατεύθυνση έχει κινηθεί και για πόση απόσταση.



Εικόνα 19: Διάφορα είδη ηλεκτρικών κινητήρων

3.1.2 Σύστημα μετάδοσης

Για τη μετάδοση της κίνησης από τον κινητήρα στην πλατφόρμα ή στην κεφαλή εξαγωγής χρησιμοποιούνται δύο κυρίως τρόποι, μέσω timing belt, μια μικρογραφία των ιμάντων χρονισμού των αυτοκινήτων, ή με τη χρήση threaded bolts. Με τον πρώτο επιτυγχάνονται μεγαλύτερες ταχύτητες εκτύπωσης ωστόσο απαιτούν πιο πολύπλοκες δομές και δεν έχουν μπορούν να μεταδώσουν μεγάλη ισχύ. Αντίθετα, με τον δεύτερο, μειώνονται οι κραδασμοί προς τις επιφάνειες κίνησης, είναι πιο απλή η κατασκευή τους αλλά η ταχύτητα εκτύπωσης μειώνεται αισθητά.



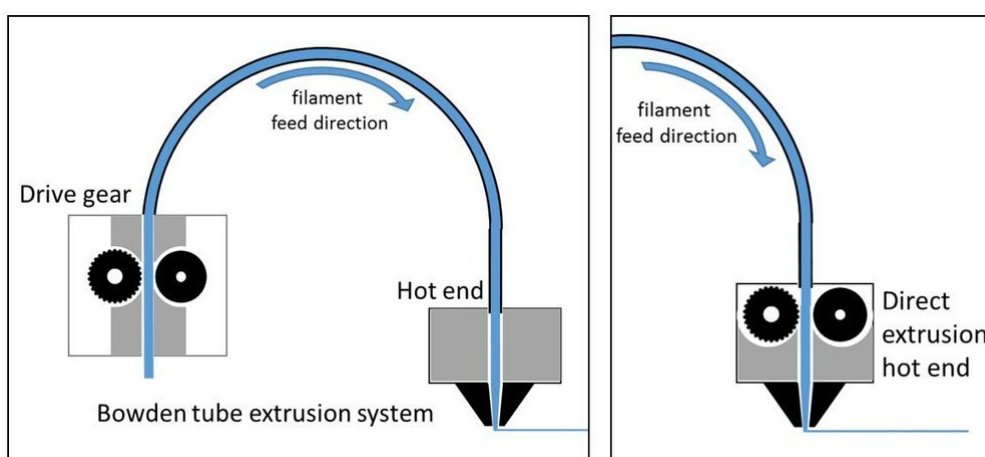
Εικόνα 20: Μετάδοση κίνησης μέσω timing belt σε CNC

3.1.3 Σκελετός

Για την στήριξη όλων των εξαρτημάτων, αρχικά χρησιμοποιήθηκαν πολύπλοκες κατασκευές από σιδερένιες ράβδους οι οποίες ενώνονταν μεταξύ τους για να σχηματίσουν τον σκελετό. Με την πάροδο του χρόνου διάφορα υλικά χρησιμοποιήθηκαν για το σκοπό αυτό. Σε αυτά περιλαμβάνονται το κόντρα πλακέ, το ξύλο, οι σιδερένιες ράβδοι κ.α. Οποιοδήποτε υλικό ή μέρος έχει τη δυνατότητα να ενωθεί σε ορθές γωνίες, ώστε να δημιουργηθούν οι κάθετοι άξονες κίνησης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη κατασκευή του σκελετού.

3.1.4 Extruder/Hot end

Το σύστημα εναπόθεσης του υλικού κατασκευής αποτελεί μια πολύπλοκη διάταξη, η οποία συναντάται σε διάφορες μορφές. Κυρίως αποτελείται από τον εξαγωγέα (extruder), ο οποίος σπρώχνει το υλικό προς την κεφαλή και το ακροφύσιο (hot end nozzle), το οποίο ζεσταίνει το υλικό στην κατάλληλη θερμοκρασία ώστε να λιώσει και να εξαχθεί από διατομή, συνήθως μικρότερη από τη διάμετρο του υλικού (0,3 – 0,6 mm). Αυτά τα δύο μπορεί να βρίσκονται είτε πάνω στην ίδια διάταξη επί της κεφαλής και ονομάζεται Direct extrusion, είτε ξεχωριστά, με τον extruder σταθερό πάνω στη βάση ή στον σκελετό του εκτυπωτή και το nozzle επί της κεφαλής, οπότε και καλείται Bowden extrusion. Με τον δεύτερο τρόπο επιτυγχάνεται μείωση του βάρους της κεφαλής το οποίο οδηγεί σε χρήση μικρότερων κινητήρων κίνησης.



Σχήμα 4: Διατάξεις κεφαλής εκτύπωσης

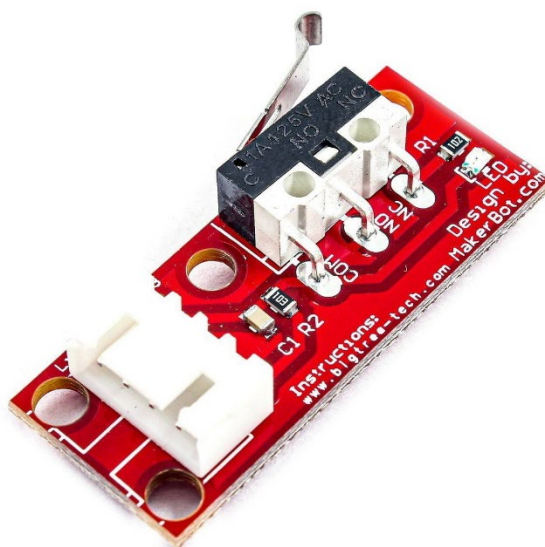
Η απαίτηση χρήσης πολλών υλικών είτε διαφορετικού χρώματος είτε ακόμη και είδους, οδήγησαν στη δημιουργία διατάξεων οι οποίες χρησιμοποιούν περισσότερα του ενός nozzles. Έτσι δημιουργήθηκαν κεφαλές με διπλά ή με πολλαπλά ακροφύσια και κεφαλές οι οποίες εναλλάσσουν τα ακροφύσια με τη χρήση ηλεκτρομαγνήτη.



**Εικόνα 21: Εκτυπωτής Geeetech A20T με τριπλή κεφαλή εκτύπωσης
Limit/Endstop switches**

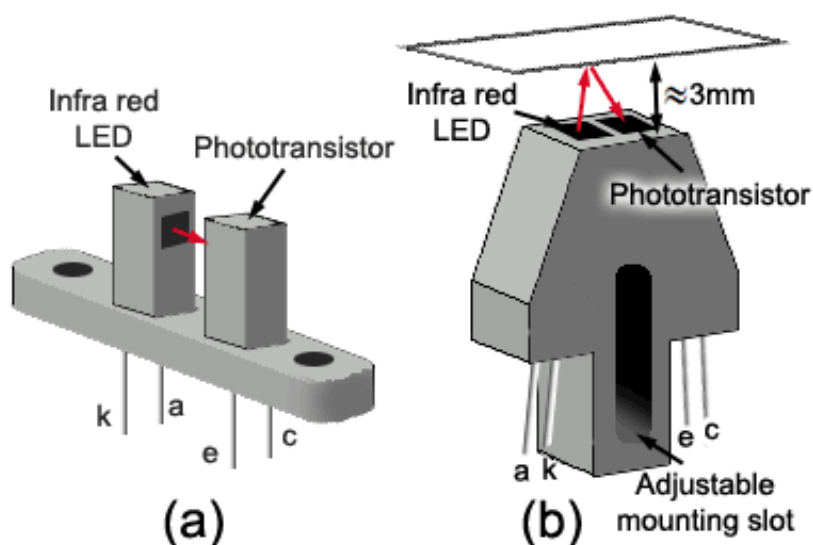
Για να γνωρίζει το λογισμικό ελέγχου τα όρια κίνησης των αξόνων, αλλά και για τη διενέργεια της λειτουργίας homing, χρησιμοποιούνται διακόπτες αναστολής. Αυτοί είναι είτε μηχανικοί είτε οπτικοί. Δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξή τους, ωστόσο με τη χρήση τους επιτυγχάνεται αποφυγή φυσικής ζημιάς στον εκτυπωτή και καλύτερη ποιότητα εκτύπωσης.

Τα είδη που χρησιμοποιούνται είναι δύο, οι μηχανικοί και οι οπτικοί. Οι μηχανικοί αποτελούνται από ένα κινούμενο μέρος, το οποίο, αφού έρθει σε επαφή με την επιφάνεια κίνησης, πλήττει έναν εσωτερικό διακόπτη κλείνοντας το κύκλωμα και με τον τρόπο αυτό στέλνει σήμα (signal), το οποίο αναγνωρίζεται από τον ελεγκτή. Χωρίζονται σε δύο τρόπου λειτουργίας, τον normal open (NO), όπου στέλνει σήμα μόλις ο διακόπτης πληχθεί, και τον normal close (NC), όπου στέλνει σήμα όσο ο διακόπτης δεν πλήττεται.



Εικόνα 22: Μηχανικός endstop switch

Οι οπτικοί διακόπτες αποτελούνται από μία διάταξη ενός led IR emitter και ενός IR receiver. Ο διακόπτης θεωρείται ανοιχτός όσο ο receiver λαμβάνει το φως του emitter. Μόλις διακοπεί αυτή η επικοινωνία μεταξύ τους, συνήθως με την εισαγωγή ενός αδιαφανούς υλικού ανάμεσά τους, στέλνει σήμα πως ο διακόπτης έχει κλείσει.



Εικόνα 23: Τρόπος λειτουργίας οπτικού limit switch

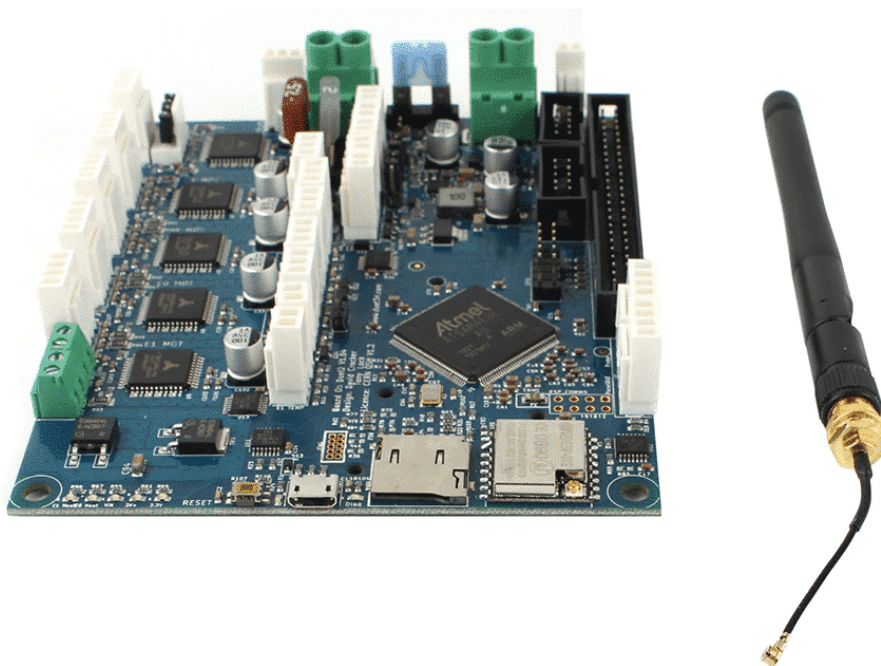
Τα τελευταία χρόνια έχουν κάνει την εμφάνισή τους και οι μαγνητικοί διακόπτες, εκμεταλλευόμενοι το φαινόμενο του Hall. Μέσω ενός Hall sensor

αντιλαμβάνονται την παρουσία του μαγνητικού πεδίου και παράγουν το κατάλληλο σήμα προς τον ελεγκτή.

3.1.5 Ελεγκτής

Αποτελεί τον εγκέφαλο του εκτυπωτή. Η κύρια λειτουργία του είναι να μεταφράζει τις εντολές από το λογισμικό εκτύπωσης σε κίνηση των αξόνων. Επίσης, ελέγχει όλα τα υπόλοιπα εξαρτήματα του εκτυπωτή, όπως τα extruder, hot end, heating bed κ.α. Σε αυτόν συνδέονται τα κυκλώματα ελέγχου των κινητήρων (stepper drivers), των σημάτων από τους limit switches, των αισθητήρων θερμοκρασίας του hot end και του heating bed.

Στους οικιακούς εκτυπωτές χρησιμοποιείται κυρίως η πλακέτα Arduino. Πάνω σε αυτήν συνδέονται επιπλέον πλακέτες (shields) για τον έλεγχο όλων των επιμέρους εξαρτημάτων. Για να εκπληρωθεί η απαίτηση για όλο και μικρότερο όγκο των εκτυπωτών, αναπτύχθηκαν πλακέτες οι οποίες περιλαμβάνουν όλα τα απαραίτητα στοιχεία για την ολοκληρωτική λειτουργία του. Επίσης προστέθηκαν και κυκλώματα συνδεσιμότητας όπως Bluetooth και Wifi για εξ' αποστάσεως έλεγχο, ενώ παρέχεται και η δυνατότητα ανάγνωσης καρτών μνήμης (TF cards), για την εκτέλεση της εκτύπωσης χωρίς να είναι απαραίτητη η σύνδεση με τον υπολογιστή.



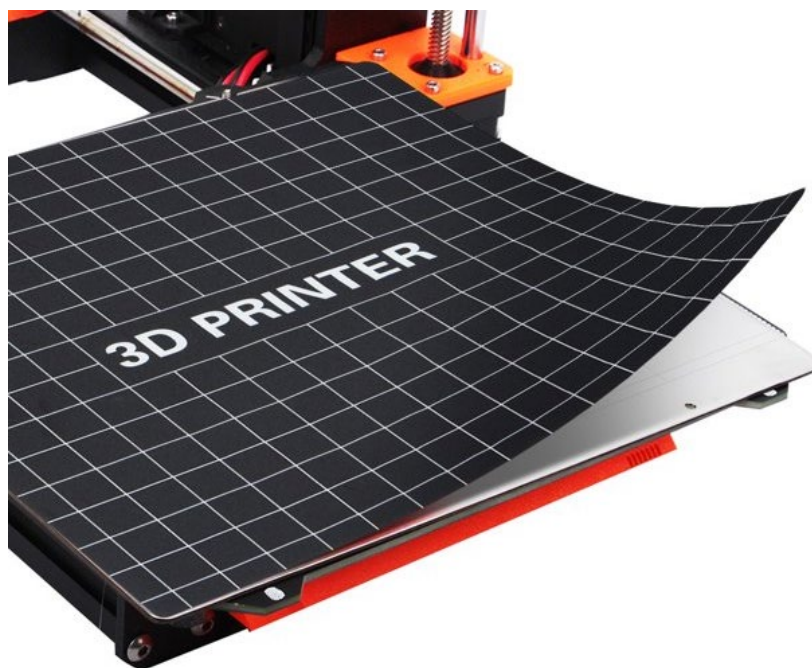
Εικόνα 24: Η πλακέτα Duet 2 Wifi με ενσωματωμένους stepper drivers και λειτουργία WiFi και ανάγνωσης Micro SD κάρτας

3.1.6 Βάση εκτύπωσης

Η βάση (bed) στην οποία θα εκτυπωθεί το τελικό προϊόν, πρέπει να είναι επίπεδη και να έχει γίνει διαδικασία του bed leveling πριν από κάθε εκτύπωση, ώστε να αποφευχθούν οποιεσδήποτε αποκλίσεις. Το υλικό της πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να επιτρέπει την αφαίρεση του αντικειμένου με ευκολία. Για αυτό τον λόγο το πιο κοινό υλικό που χρησιμοποιείται είναι το γυαλί.

Η επαφή του ζεστού υλικού με την κρύα επιφάνεια της βάσης μπορεί να δημιουργήσει δυσμορφία στην εκτύπωση. Για την αποφυγή αυτού του φαινομένου χρησιμοποιούνται θερμαινόμενες βάσεις (heated bed), οι οποίες ελέγχονται από τον ελεγκτή του εκτυπωτή ώστε να κρατούν την κατάλληλη θερμοκρασία. Η μέτρηση της θερμοκρασίας επιτυγχάνεται μέσω ενός thermistor που είναι προσαρμοσμένο πάνω του.

Πάνω από το heated bed προσαρμόζεται διπλή αποσπώμενη μαγνητική επιφάνεια για ευκολότερη απομάκρυνση του εκτυπωμένου αντικειμένου.



Εικόνα 25: Αποσπώμενη μαγνητική επιφάνεια

3.2 Χαρακτηριστικά

Το κυριότερο χαρακτηριστικό που προσδιορίζει τους τρισδιάστατους εκτυπωτές είναι οι διαστάσεις εκτύπωσης, τόσο σε μήκος και πλάτος, όσο και σε ύψος. Αυτά είναι που καθορίζουν το μέγιστο μέγεθος του τελικού προϊόντος άρα και

το είδος των εφαρμογών στο οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Οι διαστάσεις της βάσης στους οικιακούς εκτυπωτές μπορεί να ξεκινούν από τα 4 x 4 εκ. και να φτάνουν μέχρι και τα 50 x 50 εκ. Η συνήθης διάσταση που χρησιμοποιείται από τις εταιρίες κατασκευής των εκτυπωτών αυτών κυμαίνεται μεταξύ 20 και 30 εκ. Όσον αφορά το ύψος, και εδώ συναντάται μεγάλη ποικιλία, αναλόγως των προδιαγραφών, όπου μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 4 και 45 εκ.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι η ισχύς των κινητήρων. Αυτή εξαρτάται από τον συνδυασμό της απόστασης στην οποία πρέπει να μετακινήσουν τους τρεις άξονες και του βάρους που αυτοί φέρουν. Το βάρος αυτό αναφέρεται κυρίως στους άξονες οι οποίοι φέρουν την κεφαλή εκτύπωσης. Συγκεκριμένα εξαρτάται από το αν ο extruder και το hot end είναι πάνω στην κεφαλή, αν η κεφαλή έχει περισσότερα του ενός nozzle ή απαιτείται η ύπαρξη ηλεκτρομαγνήτη για την εναλλαγή διαφόρων τύπων κεφαλής. Στους οικιακούς εκτυπωτές των διαστάσεων που αναφέρθηκαν η απαίτηση σε ισχύ δεν είναι μεγάλη. Έτσι συνήθως χρησιμοποιούνται κινητήρες βήματος τύπου NEMA 14 ή 17.

Σημαντική είναι και η χρήση του εκτυπωτή για άλλες εφαρμογές πέραν της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Καθώς χρησιμοποιείται το καρτεσιανό σύστημα, η συσκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης και ως CNC, laser engraver ή plotter. Αυτό θα καθορίσει το σύστημα μετάδοσης της κίνησης στους άξονες. Για την περίπτωση των laser engraver και plotter αυτό μπορεί να επιτευχθεί με όλους τους τρόπους που αναφέρθηκαν ανωτέρω. Αντιθέτως, στην περίπτωση του CNC δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν timing belts, καθώς είναι ελαστικές και λόγω του τρόπου μετάδοσης της κίνησης μέσω γραναζιών υπάρχει η πιθανότητα να γλιστρήσουν πάνω στα δόντια και να απωλέσουν βήματα. Αυτό συμβαίνει διότι, κατά τη διάρκεια του engraving δημιουργείται ισχυρή αντίσταση μεταξύ του σκαπτικού εργαλείου και του υλικού χάραξης, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ποιότητα του τελικού προϊόντος. Σε αυτήν την περίπτωση η σύνηθες πρακτική είναι η χρησιμοποίηση των threaded bolts.

3.3 Καθορισμός απαιτήσεων

Καθώς ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να δώσει στον καθένα τις γνώσεις και την τεχνογνωσία ώστε να δημιουργήσει τον δικό του τρισδιάστατο εκτυπωτή από παλιές συσκευές, οι απαιτήσεις θα τεθούν ώστε να πλησιάζει τις

προδιαγραφές των οικιακών εκτυπωτών. Αυτό θα συμβάλει και στην σύγκριση μεταξύ του τελικού αποτελέσματος με αντίστοιχες συσκευές του εμπορίου, ώστε να εξαχθούν και τα τελικά συμπεράσματα.

Αρχικά, για να λειτουργήσει στο οικιακό περιβάλλον, αλλά και για να κρατηθεί μικρός σε μέγεθος, η τάση λειτουργίας θα είναι έως 24V. Με τον τρόπο αυτό θα αποφευχθεί η χρήση μεγάλων εξαρτημάτων των ηλεκτρονικών. Αυτό καθορίζει στη συνέχεια και τις συσκευές οι οποίες θα επιλεγθούν για την εξαγωγή των εξαρτημάτων, άρα και τις διαστάσεις εκτύπωσης.

Επειδή οι οικιακές συσκευές προορίζονται κυρίως για χρήση χαρτιού μεγέθους A4, οι διαστάσεις οι οποίες θα είναι διαθέσιμες θα κυμαίνονται περίπου από 20cm έως 35cm. Όπως αναφέρθηκε οι οικιακοί 3d printers έχουν συνήθως επιφάνεια εκτύπωσης 20x20cm, οπότε και σε αυτές τις διαστάσεις θα τεθούν οι απαιτήσεις για την κατασκευή. Όσον αφορά το διαθέσιμο ύψος, αυτό θα εξαρτηθεί από τα διαθέσιμα εξαρτήματα που θα εξαχθούν, ωστόσο, για σκοπούς αναφοράς, το ελάχιστο θα πρέπει να είναι στα 3cm.

Το συνολικό μέγεθος της κατασκευής θα πρέπει να μπορεί να τοποθετηθεί επάνω σε επίπελο γραφείου, οπότε και οι μέγιστες διαστάσεις θα τεθούν στα 120cm μήκος και στα 80cm πλάτος.

Η συσκευή θα χρησιμοποιηθεί μόνο ως 3d printer, οπότε, επειδή οι κεφαλές εκτύπωσης δεν έχουν ιδιαίτερα μεγάλο βάρος, οι κινητήρες που θα χρησιμοποιηθούν δεν απαιτείται να έχουν μεγάλη ισχύ. Επίσης, για το σύστημα μετάδοσης μπορεί να χρησιμοποιηθούν είτε timing belts είτε threaded bolts. Θα χρησιμοποιηθεί μία κεφαλή εκτύπωσης, η οποία θα έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί filament διατομής 1.75mm και εξαγωγής 0.4mm.

Ο ελεγκτής θα πρέπει να παρέχει τη δυνατότητα να συνδεθούν οι κινητήρες κίνησης των τριών αξόνων και του extruder, τρεις endstop switches κατ' ελάχιστο, ώστε να υποστηρίζεται η λειτουργία homing και να ελέγξει τη θερμοκρασία του hot end. Προαιρετικά, να παρέχει τη δυνατότητα σύνδεσης ακόμη τριών endstop switches, οθόνης LCD, έλεγχο θερμοκρασίας του heated bed, σύνδεση μέσω WiFi και ανάγνωση κάρτας SD.

4 Επιλογή εξαρτημάτων

Το στάδιο μετά τον καθορισμό των απαιτήσεων, είναι η συγκέντρωση των εξαρτημάτων τα οποία θα απαρτίζουν τον εκτυπωτή. Για τις ανάγκες αυτής της εργασίας, μέρος αυτών θα προέλθει από αποσυρθείσες ηλεκτρονικές συσκευές. Κυρίως θα χρησιμοποιηθούν αυτές που είναι παρωχημένης τεχνολογίας και είτε δεν χρησιμοποιούνται πλέον, είτε η επισκευή τους είναι ασύμφορη ή αδύνατη λόγω παλαιότητας ανταλλακτικών και όχι σύγχρονες, οι οποίες έχουν υποστεί βλάβη και θα μπορούσαν απλώς να επισκευασθούν.

Επίσης, θα γίνει προσπάθεια να μην επιλεγούν εξαρτήματα από ήδη αποσυρθέντες 3d printers, ώστε να αναδειχθεί το ποσοστό αυτών που είναι δυνατόν να εξαχθούν κυρίως από παλιές συσκευές. Από αυτές θα πρέπει να επιλεγθούν όποιες πληρούν τις απαιτήσεις της κατασκευής και να εξαχθούν τα εξαρτήματα, ώστε να ολοκληρωθεί η κατασκευή.

4.1 Περιγραφή συσκευών

Οι συσκευές οι οποίες θα περιέχουν εξαρτήματα παραπλήσια με τον 3d printer είναι αυτές οι οποίες εκτελούν παρόμοια λειτουργία ή κίνηση για να εκτελέσουν τη διεργασία τους. Θα πρέπει λοιπόν να περιλαμβάνουν γραμμική κίνηση των μερών τους με συγκεκριμένα όρια κίνησης και όχι συνεχόμενες, κυκλικές ή επαναλαμβανόμενες κινήσεις. Τέτοιες συσκευές ευρείας καταναλωτικής χρήσης είναι οι εκτυπωτές (printers), τα scanners και τα cd/dvd-roms. Αντίθετα ηλεκτρονικές συσκευές όπως φωτογραφικές μηχανές, βιντεοκάμερες, routers κ.α. δεν περιέχουν εξαρτήματα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σκοπό αυτό.

4.1.1 Εκτυπωτές

Οι εκτυπωτές είναι συσκευές οι οποίες εμφανίστηκαν μαζί με τους πρώτους ηλεκτρονικούς υπολογιστές, καθώς σε αυτούς γινόταν η εξαγωγή των δεδομένων, πριν την εμφάνιση των οθονών. Inkjet, laser ή dot matrix εκτυπωτές, όλοι λειτουργούν με την ίδια φιλοσοφία, όσων αφορά την κίνηση της κεφαλής εκτύπωσης και τροφοδοσίας του χαρτιού. Καθώς στην κατασκευή του τρισδιάστατου εκτυπωτή δεν θα χρησιμοποιηθεί η διάταξη εκτύπωσης του μελανιού, όλα τα είδη είναι συμβατά για τη συλλογή εξαρτημάτων.

Οι οικιακής χρήσης εκτυπωτές χρησιμοποιούν εξαρτήματα μικρότερου μεγέθους και δύναμης και λειτουργούν με μικρή τάση ρεύματος, λόγω του μεγέθους τους, της συχνότητας λειτουργίας τους και της απαίτησης χαμηλής κατανάλωσης ρεύματος. Τα μεγάλα σε μέγεθος επαγγελματικά μηχανήματα περιέχουν βαρύ εξοπλισμό, βγάζουν μεγαλύτερη ισχύ και ροπή και καταναλώνουν περισσότερο ρεύμα.

Έτσι στις οικιακές συσκευές βρίσκονται stepper motors και dc motors με τάση λειτουργίας 5-12 Volt και έως 1 Amp έντασης, μικρής κλίμακας ακραίους διακόπτες διακοπής και μεταλλικές ράβδους κίνησης με μέγεθος ίσο με το πλάτος μίας σελίδας A4. Αντίθετα στις επαγγελματικές, οι κινητήρες λειτουργούν με 110-220 Volt και απαιτούν ένταση μεγαλύτερη από τα 2 Amp για να βγάζουν και μεγαλύτερη ισχύ. Αυτό τους κάνει μεγαλύτερους σε μέγεθος και απαιτούν ειδικό εξοπλισμό (stepper drivers) για να επιτευχθεί ο έλεγχός τους.



Εικόνα 26: Εκτυπωτής επαγγελματικής χρήσης και stepper motor 4A με τον stepper motor driver που χρησιμοποιεί

4.1.2 Scanner

Οι ηλεκτρονικοί σαρωτές εγγράφων αποτελούν ιδανική επιλογή για την εύρεση εξαρτημάτων καθώς είναι στο μέγεθος του χαρτιού A4 και εκτελούν γραμμική κίνηση του άξονα για τη σάρωση του εγγράφου, είτε όλου του μήκους του, είτε συγκεκριμένου τμήματος. Εντός τους βρίσκονται συνήθως stepper motors με

τάση λειτουργίας 5-12 Volt, κεφαλή σάρωσης κινούμενη επί μεταλλικής ράβδου και οπτικοί ακραίοι διακόπτες. Σε παλαιότερης τεχνολογίας scanners υπάρχει η περίπτωση η κίνηση του άξονα να επιτυγχάνεται με dc motor και optical encoder, ωστόσο αυτές οι περιπτώσεις σπανίζουν. Επίσης, η επίπεδη επιφάνεια σάρωσης και η οριζόντια θέση εγκατάστασης τους βοηθάει ώστε η βάση τους να επιλεγεί για την δημιουργία ενός εκ των αξόνων X ή Y.

4.1.3 Πολυμηχάνημα

Η ανάγκη για μείωση του απαιτούμενου χώρου στο οικιακό περιβάλλον των ηλεκτρονικών συσκευών γραφείου οδήγησε στη δημιουργία All-in-one λύσεων που περιλαμβάνουν printer και scanner στην ίδια συσκευή. Η συνύπαρξη αυτή ωστόσο επιβάλλει και τον διαμοιρασμό των δομικών στοιχείων στα διάφορα εξαρτήματα, καθιστώντας δύσκολη την επιλογή τμημάτων από αυτές που θα περιέχουν ταυτόχρονα σκελετό, κινητήρα και σύστημα μετάδοσης. Για το λόγο αυτό οι συγκεκριμένες συσκευές είναι καλό να αποφεύγονται. Ωστόσο, εφόσον είναι διαθέσιμες, αποτελούν μία καλή πηγή μεμονωμένων εξαρτημάτων, όπως stepper motors, limit switches, steel rods κ.α.



Εικόνα 27: Οικιακό πολυμηχάνημα Hp

4.1.4 CD/DVD-ROM

Οι συσκευές ανάγνωσης οπτικών δίσκων χρησιμοποιούν stepper motor ώστε να κινήσουν την κεφαλή ανάγνωσης στο σημείο του δίσκου που απαιτείται. Οι συγκεκριμένες συσκευές πλέον βρίσκονται σε πληθώρα, καθώς υπάρχει η τάση κατάργησης αυτών από τους προσωπικούς υπολογιστές, λόγω της ύπαρξης των usb drives αλλά και του διαδικτύου (cloud).

Οι πιο συμβατές είναι αυτές που τοποθετούνται εσωτερικά στο κουτί του υπολογιστή, αλλά και οι εξωτερικής χρήσης, καθώς προσφέρουν και τα δομικά τους στοιχεία για την κατασκευή. Επίσης, εξαρτήματα μπορούν να βρεθούν και στα dvd-rom των home cinemas. Αντιθέτως, ακατάλληλα είναι αυτά των laptops διότι, λόγω του μικρού τους μεγέθους, χρησιμοποιούν εξαρτήματα πολύ μικρής διατομής και ισχύος, με αποτέλεσμα να μην προσφέρουν δομικά στοιχεία αλλά και την απαραίτητη ροπή ώστε να κινηθεί το βάρος των αξόνων.

Αντίστοιχης φιλοσοφίας λειτουργίας είναι και τα drive των δισκετών 1.44, ωστόσο το μήκος του άξονα κίνησης είναι κατά πολύ μικρότερο των DVD λόγω διαμέτρου.

4.2 Επιλογή συσκευών

Όπως αναφέρθηκε στην ανάλυση των απαιτήσεων, οι συσκευές που θα χρησιμοποιηθούν θα είναι οικιακής χρήσης. Επίσης, σύμφωνα με τις απαιτούμενες διαστάσεις που τέθηκαν, αυτές θα επιλεγθούν κυρίως από scanners και printers που χρησιμοποιούν χαρτί με μέγιστο μέγεθος την A4.,

Για την δημιουργία των αξόνων X και Y, οι οποίοι είναι και αυτοί που καθορίζουν τη συνολική οριζόντια επιφάνεια εκτύπωσης, θα επιλεγθούν inkjet printer και scanner. Για το πρώτο, βρέθηκε διαθέσιμος ο εκτυπωτής iP7250 της εταιρίας Canon. Για το δεύτερο επιλέχθηκε το Scanjet 3500c της εταιρίας Hewlett Packard.

Όσον αφορά τον άξονα του Z, που καθορίζει το μέγιστο ύψος της εκτύπωσης, αποκλειστικά για σκοπούς επίδειξης, επιλέχθηκε

4.3 Εξαγωγή εξαρτημάτων

Οι συσκευές που επιλέχθηκαν για την κατασκευή του 3d printer δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως έχουν, καθώς η κάθε μία έχει κατασκευαστεί για να εκτελεί συγκεκριμένη λειτουργία. Για αυτό το λόγο πρέπει να εξαχθούν τα εξαρτήματα τα οποία θα χρησιμεύσουν στον σκοπό αυτό.

4.3.1 Scanner

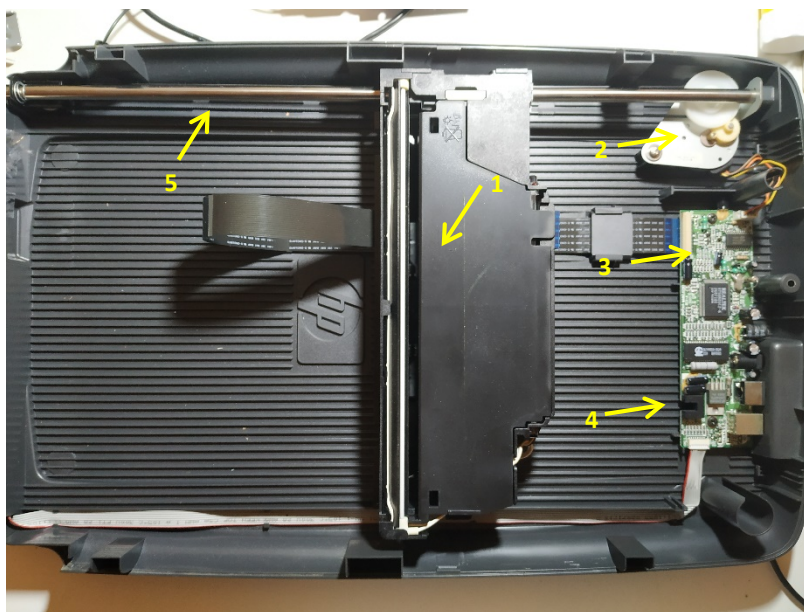
Η πλειονότητα των οικιακών scanner έχει τις ίδιες διαστάσεις και την ίδια φιλοσοφία κατασκευής και λειτουργίας. Αφού αφαιρεθεί το καπάκι κάλυψης

εγγράφων συρταρωτά, αφαιρούνται οι βίδες που συγκρατούν το άνω μέρος με τη γυάλινη επιφάνεια, η οποία ξεκουμπώνει από το κάτω μέρος. Αφού αφαιρεθεί και το πλαστικό κάλυμμα που περιέχει τα κουμπιά λειτουργιών, γίνεται αναγνώριση των εξαρτημάτων τα οποία μπορούν να εξαχθούν.



Εικόνα 28: Αποσυναρμολόγηση scanner

Το σκάφος μαζί με όλο το μηχανισμό κίνησης της κεφαλής ανάγνωσης θα χρησιμοποιηθεί ως ο άξονας Y του εκτυπωτή. Επίσης, στην πλακέτα των ηλεκτρονικών υπάρχει ένας limit switch, συνήθως optical, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως limit switch για την κίνηση του άξονα και η πλακέτα που περιέχει τους διακόπτες λειτουργιών μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για την κατασκευή του εκτυπωτή, είτε μελλοντικά.



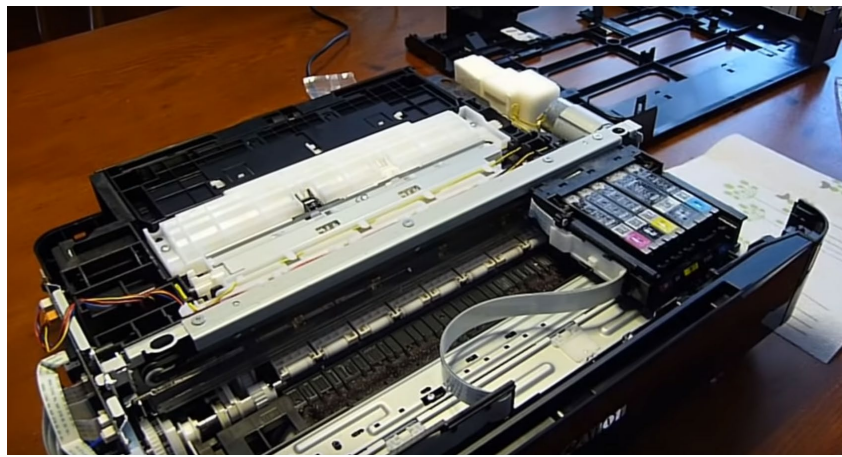
Εικόνα 29: Τα κύρια μέρη του scanner

- Υπόμνημα: 1 - Κεφαλής ανάγνωσης
2 - Stepper motor
3 - Πλακέτα ηλεκτρονικών
4 – Optical limit switch
5 - Steel rod

4.3.2 Printer

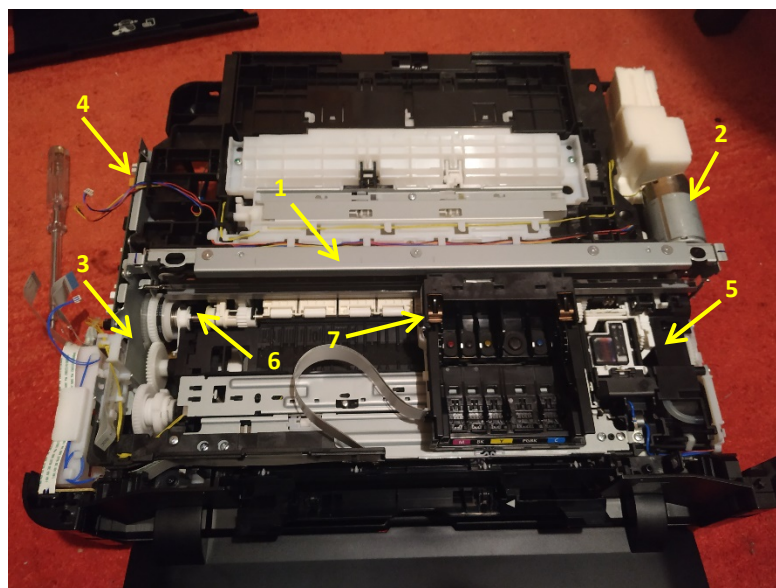
Οι περισσότεροι εκτυπωτές έχουν εξωτερικό περίβλημα που αποτελείται από κομμάτια κατασκευασμένα από σκληρό πλαστικό που συνήθως κουμπώνουν μεταξύ για να ενωθούν, ενώ σταθεροποιούνται στον κυρίως σκελετό μέσω βιδών. Στο εσωτερικό τους έχουν αρκετά εξαρτήματα τα οποία εκτελούν και διαφορετική λειτουργία. Για τη συγκεκριμένη κατασκευή δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλα. Χρήσιμα μπορούν να φανούν dc motors, limit switches, steel rods, timing belts, rotary ή linear encoders και switches, ενώ η γέφυρα πάνω στην οποία είναι τοποθετημένη η κεφαλή εκτύπωσης χρησιμεύει αυτούσια για τη δημιουργία του ενός άξονα.

Για να ανοιχθεί ο iP7250 που επιλέχθηκε, αρχικά ξεκουμπώνουν τα εξωτερικά πλαστικά καπάκια με τη βοήθεια ενός κατσαβιδιού.



Εικόνα 30: Αποσυναρμολόγηση εκτυπωτή

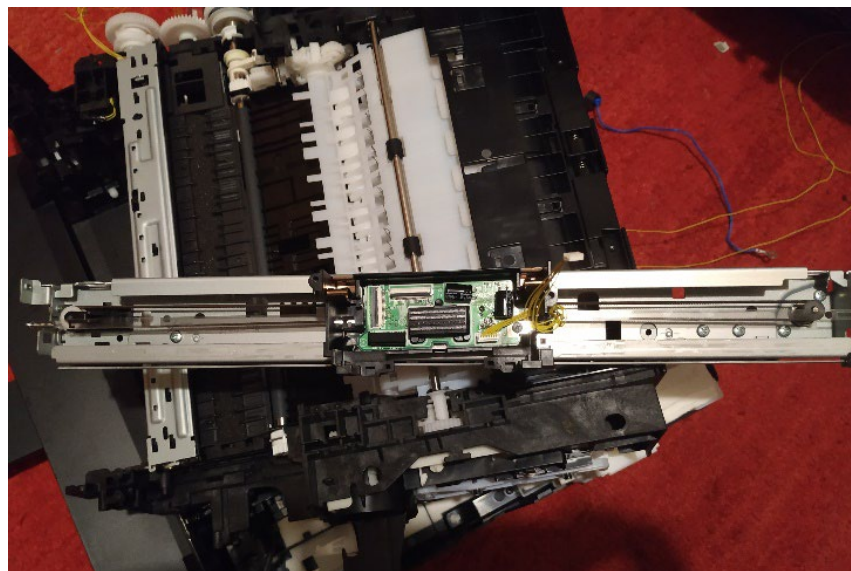
Στη συνέχεια αφαιρούνται τα μελάνια από την κεφαλή εκτύπωσης και γίνεται αναγνώριση των εξαρτημάτων τα οποία μπορούν να εξαχθούν.



Εικόνα 31: Τα κύρια μέρη του εκτυπωτή

- Υπόμνημα:
- 1 - Γέφυρα κίνησης κεφαλής εκτύπωσης
 - 2 - DC motor
 - 3 - Μηχανισμός τροφοδότησης χαρτιού
 - 4 - Πλακέτα ηλεκτρονικών
 - 5 - Μηχανισμός τροφοδότησης μελανιού
 - 6 - Steel rod
 - 7 – Κεφαλή μελανιών

Αρχικά ξεμοντάρονται όλοι οι σύνδεσμοι των καλωδίων από την πλακέτα των ηλεκτρονικών και αφαιρούνται από τις βάσεις στήριξής τους. Η γέφυρα κίνησης της κεφαλής ξεβιδώνεται από τη βάση της και αφαιρείται.



Εικόνα 32: Γέφυρα κίνησης κεφαλής

Αφού αφαιρεθεί ο μηχανισμός μεταφοράς του χαρτιού και το συγκρότημα τροφοδότησης του μελανιού, μπορούν να εξαχθούν ο DC motor και τα steel rods (το ένα από αυτά συνήθως έχει και έναν rotary optical encoder) που κινούν τα ανωτέρω για μελλοντική χρήση.



Εικόνα 33: DC motor, Optical encoder και steel rods

Τέλος, σε κάποια σημεία στήριξης υπάρχουν και limit switches οι οποίοι αφαιρούνται είτε από τις βίδες στήριξης είτε ξεκουμπώνοντάς τους.

4.3.3 DVD-ROM

Εσωτερικής ή εξωτερικής σύνδεσης, με συρτάρι ή αναρρόφηση, όλα τα DVD-ROM είναι συμβατά για τη χρήση τους ως εξαρτήματα για τον 3d printer, καθώς αυτό που θα χρησιμοποιηθεί είναι ο μηχανισμός κίνησης του αισθητήρα laser ανάγνωσης του οπτικού δίσκου.

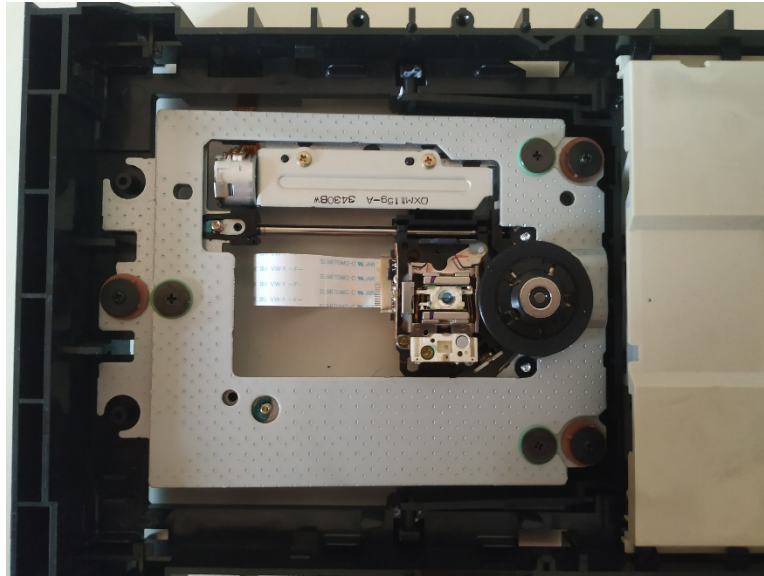
Αρχικά ξεκουμπώνει το κάλυμμα της πρόσοψης, συνήθως από δύο πλευρικά αυτάκια. Στη συνέχεια αφαιρούνται οι βίδες στήριξης του σιδερένιου άνω καλύμματος, τα οποία αφαιρείται με συρταρωτή κίνηση.



Εικόνα 34: Διαδικασία ανοίγματος του DVD-Rom

Για να εξαχθεί ο μηχανισμός κίνησης της κεφαλής ανάγνωσης πρέπει να αφαιρεθούν οι πλακέτες των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και στη συνέχεια οι βίδες

που τον συγκρατούν στο σκελετό. Τα λαστιχένια dampeners είναι για να την απορρόφηση των κραδασμών κατά την περιστροφή του οπτικού δίσκου. Δεν θα χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή οπότε και αφαιρούνται.

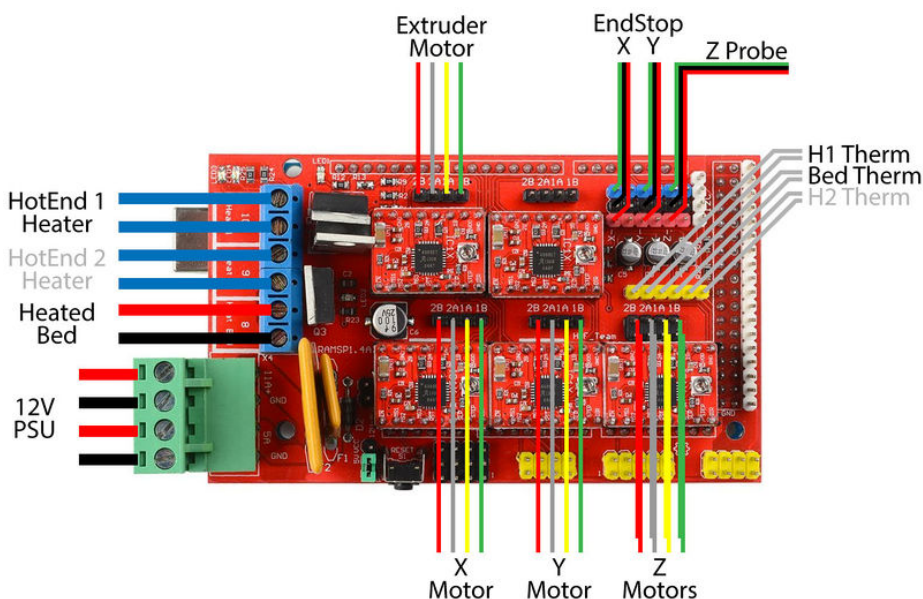


Εικόνα 35: Η κεφαλή ανάγνωσης

4.4 Λοιπά εξαρτήματα

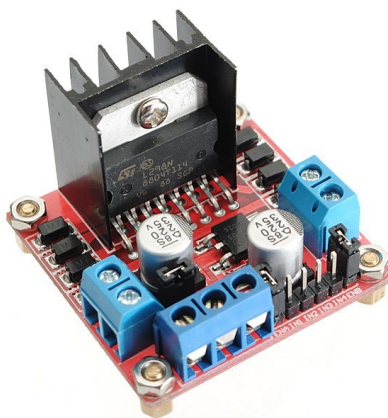
Επειδή ο τρισδιάστατος εκτυπωτής χρησιμοποιεί εξαρτήματα τα οποία εκτελούν εξειδικευμένες διεργασίες και δεν υπάρχει η δυνατότητα να εξαχθούν από άλλου είδους συσκευές, ορισμένα από αυτά θα πρέπει να προμηθευτούν από το εμπόριο.

Για τον ελεγκτή επιλέχθηκε το Arduino Mega λόγω κόστους, μεγέθους μνήμης και κυρίως αριθμού I/O pins, συνοδευόμενο από την πλακέτα RAMPS 1.4, η οποία παρέχει δρομολόγηση των σημάτων προς όλους τους stepper motors και τους αισθητήρες που απαιτούνται για τη λειτουργία του εκτυπωτή. Επίσης δίνει τη δυνατότητα επιλογής microstepping προς τα stepper motors για μεγαλύτερη ακρίβεια της κίνησης. Στις θέσεις των stepper motors drivers μπήκαν οι A4988 για μετατροπή των σημάτων STEP και DIR.



Εικόνα 36: Το pinout της πλακέτα Ramps 1.4

Για τον έλεγχο του DC motor της κεφαλής του printer αρχικά έγινε προσπάθεια εκμετάλλευσης της πλακέτας του ελεγκτή του εκτυπωτή iP7250, ωστόσο στάθηκε αδύνατο να βρεθεί βιβλιογραφία (spreadsheet) του συγκεκριμένου chip (TB62267FTG). Για αυτό επιλέχθηκε το Arduino Uno, καθώς δεν απαιτείται μεγάλο μέγεθος μνήμης για την φόρτωση του κώδικα και αριθμός I/O pins, ενώ για τη μεταφορά των σημάτων κίνησης στο DC motor πλακέτα με το chip L298N.



Εικόνα 37: Πλακέτα L298N

Για την κίνηση του extruder επιλέχθηκε ο stepper motor NEMA17 ο οποίος δίνει κίνηση στο Extruder Bracket για την τροφοδότηση του filament προς την κεφαλή εκτύπωσης.



Εικόνα 38: Nema 17 με extruder bracket

Για την κεφαλή εκτύπωσης επιλέχθηκε η J-head V6 Hotend με διάμετρο nozzle 0.4mm και μηχανισμό ψύξης. Επάνω στην κεφαλή του nozzle διαθέτει thermistor για τη μέτρηση και διατήρηση της σωστής θερμοκρασίας χρήσης του υλικού εναπόθεσης



Εικόνα 39: J-head V6 Hotend

Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του heated bed επιλέχθηκε thermistor 10K 1% 3950. Η κεφαλή του συγκεκριμένου αισθητήρα δεν δύναται να εισαχθεί στην οπή του heated bed που επιλέχθηκε, ωστόσο, η θερμοκρασία μπορεί να μετρηθεί και με επιφανειακή τοποθέτηση.



Εικόνα 40: Thermistor 10K 1% 3950

Για την τροφοδοσία της συσκευής με το απαραίτητο ρεύμα χρησιμοποιήθηκε τροφοδοτικό υπολογιστή ATX, το οποίο είναι εφοδιασμένο με εξόδους 5, 9 και 12V. Ο τρόπος κατασκευής του οποίου είναι εκτός του θέματος της παρούσας εργασίας.



Εικόνα 41: Το τροφοδοτικό ATX

Τέλος, απαιτήθηκε η προμήθεια διαφόρων υλικών όπως ξύλινα καδρόνια, βίδες, παξιμάδια, σιδερένιες γωνίες, καλώδια dupont κ.α., τα οποία είναι υποβοηθητικά για τη σύνδεση της κατασκευής.

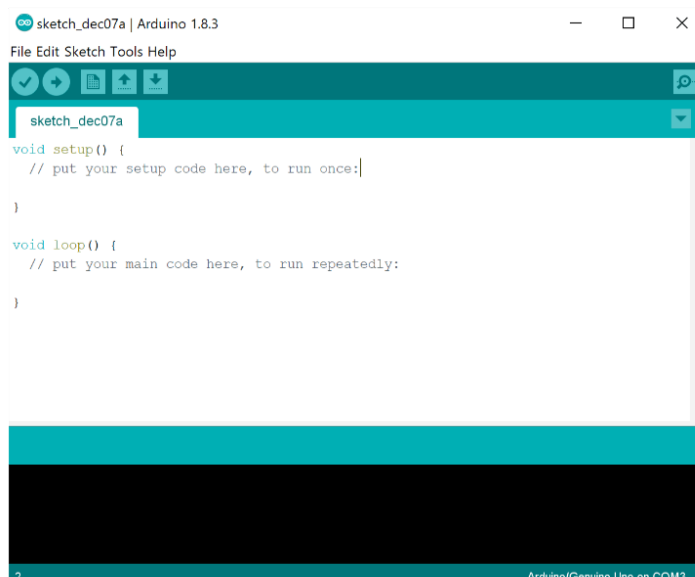
5 Κατασκευή του τρισδιάστατου εκτυπωτή

5.1 Software

Για να επικοινωνήσει ο controller του εκτυπωτή με τον υπολογιστή και να λάβει τις κατάλληλες εντολές παρεμβάλλεται το κατάλληλο λογισμικό. Ωστόσο, η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μια περίπλοκη διαδικασία. Αρχικά πρέπει να δημιουργηθεί το αντικείμενο που είναι προς εκτύπωση σε τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο. Στη συνέχεια, για να μετατραπεί αυτό σε εντολές γραμμικής κίνησης των αξόνων, πρέπει να περάσει από μια διαδικασία που ονομάζεται slicing, κατά την οποία το αντικείμενο χωρίζεται στα στρώματα (layers) που το αποτελούν. Τέλος, θα πρέπει να εξαχθούν οι γραμμές κώδικα σε εντολές g-code ώστε το λογισμικό του ελεγκτή να στείλει τις κατάλληλες εντολές στους κινητήρες.

5.1.1 Arduino IDE

Αποτελεί το ολοκληρωμένο λογισμικό της εταιρίας του Arduino που προσφέρει περιβάλλον συγγραφής κώδικα, σύνδεσης με την πλακέτα, φόρτωση του κώδικα σε αυτήν και προβολή των σημάτων των digital pin του σε serial monitor στον υπολογιστή.



Εικόνα 42: Το Arduino IDE

Αφού γίνει η συγγραφή του κώδικα, επιλέγοντας το κουμπί Verify, ελέγχεται η σύνταξη του και αν περιέχει σφάλματα. Επιλέγοντας το κουμπί Upload, και αφού

πρώτα έχουν επιλεγεί από το menu Tools οι ρυθμίσεις Board, όπου επιλέγεται το είδος του ελεγκτή, και Port, όπου επιλέγεται το νούμερο της θύρας στην οποία έχει συνδεθεί, ο κώδικας φορτώνεται στη μνήμη του ελεγκτή.

5.1.2 Marlin

Είναι το πιο ευρέως διαδομένο λογισμικό ανοιχτού κώδικα για χρήση σε controllers των 3d printers. Χρησιμοποιείται ακόμη και από τις εταιρίες κατασκευής τέτοιου είδους εκτυπωτών, όπως η Creality. Ξεκίνησε αρχικά για την υποστήριξη των Reprap, ωστόσο, μέσα από την σταδιακή εξέλιξή του γιγαντώθηκε σε χιλιάδες γραμμές κώδικα.

Αποτελείται από παραμετροποίηση κομμάτια, ώστε να ανταποκρίνεται σε διαφόρων ειδών εκτυπωτές με διαφοροποίηση στο είδος του εξοπλισμού. Παρέχει υποστήριξη για τα περισσότερα είδη controller και motherboard που υπάρχουν στο εμπόριο, διαβάζει τις εντολές g-code και τις μετατρέπει σε εντολές κίνησης των motors και έχει τη δυνατότητα να προβάλλει μέσω οθόνης lcd την κατάσταση του εκτυπωτή.

Φορτώνεται στο Arduino Mega μέσω του Arduino IDE, αφού πρώτα ελεγχθούν οι ρυθμίσεις του και επιλεχθούν αυτές που αρμόζουν. Για την κατασκευή του τρισδιάστατου εκτυπωτή πρέπει να γίνουν οι παρακάτω αλλαγές στο αρχείο Configuration.h:

```
123. #define BAUDRATE 250000
```

Καθορίζεται το baudrate επικοινωνίας με το Arduino.

```
129. #ifndef MOTHERBOARD
130. #define MOTHERBOARD BOARD_RAMPS_14_EFB
131. #endif
```

Ορίζεται το είδος της motherboard που ενώνονται οι κινητήρες και τα υπόλοιπα παρελκόμενα.

```
144. #define EXTRUDERS 1
```

Ορίζεται ο αριθμός των extruder που διαθέτει ο εκτυπωτής.


```
145. #define DEFAULT_NOMINAL_FILAMENT_DIA 1.75
```

Ορίζεται η διατομή του filament.

```
418. #define TEMP_SENSOR_0 1
```

Ορίζεται το είδος του thermistor του hot end.

```
568. #define EXTRUDE_MINTEMP 170
```

Ορίζεται η κατώτερη θερμοκρασία του hot end ώστε κάτω από αυτήν να σταματάει η εκτύπωση. Αυτή χρησιμεύει ώστε το υλικό να μην κρυώνει στο nozzle και δημιουργείται εμπλοκή στην κεφαλή.

```
623. #define USE_XMIN_PLUG
624. #define USE_YMIN_PLUG
625. #define USE_ZMIN_PLUG
626. // #define USE_XMAX_PLUG
627. // #define USE_YMAX_PLUG
628. // #define USE_ZMAX_PLUG
```

Ορίζονται τα endstop switches τα οποία είναι συνδεδεμένα.

```
657. #define X_MIN_ENDSTOP_INVERTING false // Set to true to invert the logic of the end
stop.
658. #define Y_MIN_ENDSTOP_INVERTING true // Set to true to invert the logic of the ends
top.
659. #define Z_MIN_ENDSTOP_INVERTING true // Set to true to invert the logic of the ends
top.
660. #define X_MAX_ENDSTOP_INVERTING false // Set to true to invert the logic of the end
stop.
661. #define Y_MAX_ENDSTOP_INVERTING false // Set to true to invert the logic of the end
stop.
662. #define Z_MAX_ENDSTOP_INVERTING false // Set to true to invert the logic of the end
stop.
```

Δίνεται η δυνατότητα αντιστροφής της λειτουργίας των endstop switches. Σε περίπτωση που ο διακόπτης δίνει το αντίθετο σήμα από το επιθυμητό, π.χ. χωρίς να πλήττεται δίνει σήμα πως είναι κλειστός, τότε αν τεθεί false αντιστρέφεται το σήμα του.

```
681. #define X_DRIVER_TYPE A4988
682. #define Y_DRIVER_TYPE A4988
683. #define Z_DRIVER_TYPE A4988
```

Ορίζεται το είδος των drivers των stepper motors.


```
744. #define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT { 23.6, 755, 106.5, 95 }
```

Ορίζεται η τιμή steps/mm για κάθε stepper motor (X, Y, Z, Extruder). Αναλόγως αυτής της τιμής καθορίζεται το ποσό των βημάτων τα οποία θα εκτελεσθούν ώστε να δοθεί κίνηση στους άξονες κατά 1mm.

```
751. #define DEFAULT_MAX_FEEDRATE { 300, 300, 5, 25 }
```

Ορίζεται η μέγιστη ταχύτητα κίνησης των αξόνων για μετακίνηση χωρίς εκτύπωση. Πάνω από αυτήν οι κινητήρες αρχίζουν να χάνουν βήματα με αποτέλεσμα να δημιουργούνται αστοχίες στην εκτύπωση.

```
1089. #define INVERT_X_DIR false
1090. #define INVERT_Y_DIR true
1091. #define INVERT_Z_DIR false
```

Δίνεται η δυνατότητα αντιστροφής της κίνησης των stepper motors, σε περίπτωση που με την υπάρχουσα συνδεσμολογία κινείται ανάποδα από την απαιτούμενη. Όταν δοθεί η τιμή true, τότε η κίνησή του αντιστρέφεται.

```
1125. #define X_BED_SIZE 200
1126. #define Y_BED_SIZE 200
```

Ορίζεται το μέγεθος του μήκους και του πλάτους της πλατφόρμας εκτύπωσης.

Υπάρχει η δυνατότητα να γίνουν και άλλες ρυθμίσεις όπως η ύπαρξη περισσότερων του ενός extruder, η δυνατότητα εναλλαγής κεφαλών με ηλεκτρομαγνήτη, η ύπαρξη probe για το auto leveling της επιφάνειας εκτύπωσης κ.α. τα οποία δεν αναλύονται στην παρούσα εργασία.

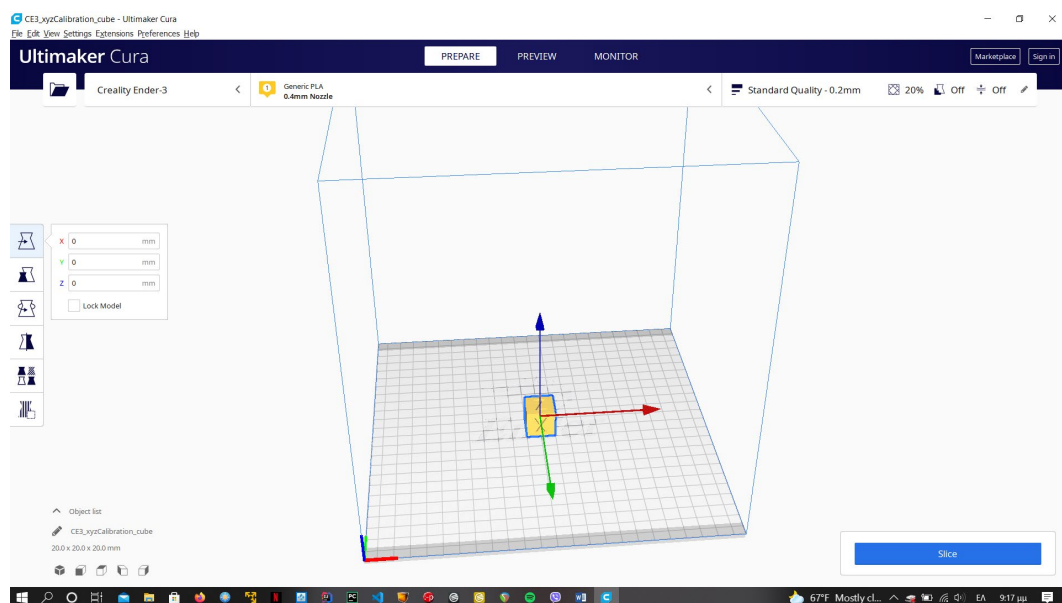
Οι περισσότερες από τις μεταβλητές παραμένουν στη μνήμη του controller, ωστόσο για ορισμένες από αυτές, κυρίως όσες αφορούν τις παραμέτρους των κινητήρων, του hot end και του heated bed, υπάρχει η δυνατότητα να αλλάξουν μέσω των g-commands.

5.1.3 CURA

Αφού το αντικείμενο προς εκτύπωση δημιουργηθεί σε κάποιο σχεδιαστικό 3d πρόγραμμα, πρέπει να περάσει από τη διαδικασία του slicing. Κατά τη διάρκεια

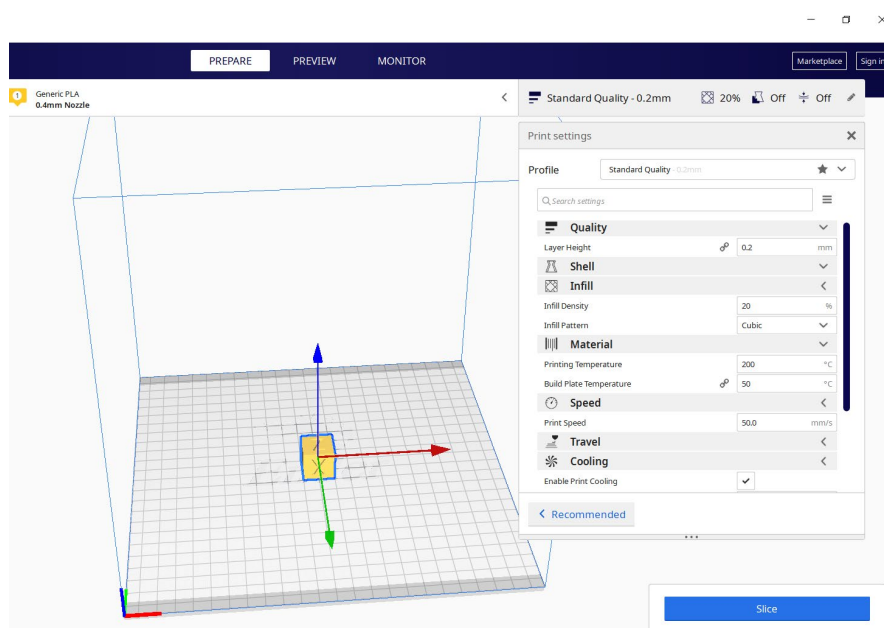
της το αντικείμενο χωρίζεται στα στρώματα που το αποτελούν (layers). Το Cura, προσφέρει πλήρη έλεγχο των απαραίτητων ρυθμίσεων που απαιτούνται για τη διαδικασία.

Το αντικείμενο εισάγεται στο πρόγραμμα και υπάρχει η δυνατότητα προβολής του και στις τρεις διαστάσεις.



Εικόνα 43: Το λογισμικό Cura

Στο επάνω μέρος υπάρχει η μπάρα των επιλογών. Αριστερά επιλέγεται ο τύπος του εκτυπωτή, εφόσον είναι του εμπορίου. Στη μέση επιλέγεται το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί και η διάμετρος του nozzle. Στο αριστερό μέρος παρατίθεται μία πληθώρα άλλων ρυθμίσεων όπως το ύψος των layers, το ποσοστό πλήρωσης του εσωτερικού, η θερμοκρασία του hot end και του heated bed, η ταχύτητα εκτύπωσης και αν θα εκτυπωθούν κομμάτια στήριξης των μερών που δεν ακουμπάνε στη βάση.



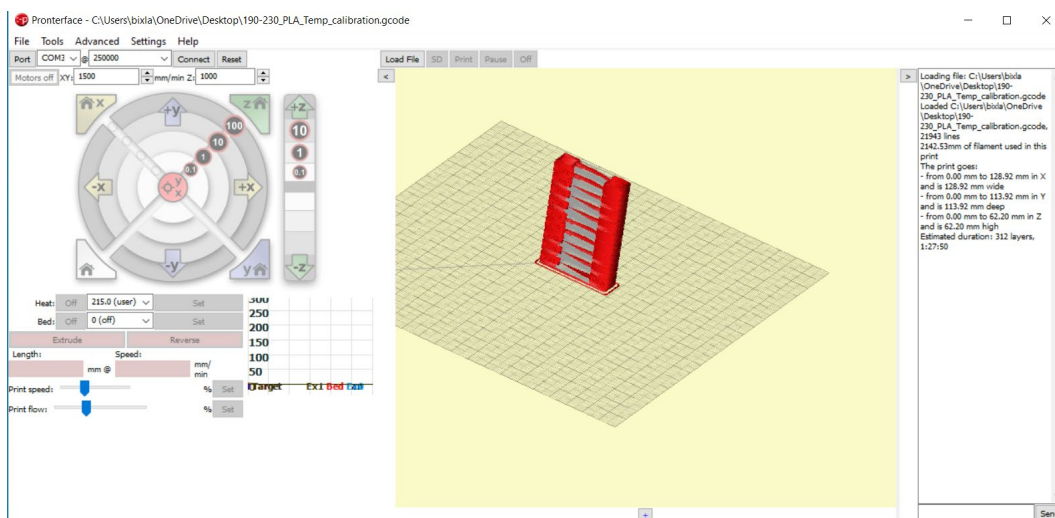
Εικόνα 44: Το παράθυρο ρυθμίσεων

Αφού επιλεχθούν όλες οι κατάλληλες ρυθμίσεις, επιλέγεται το κουμπί Slice και εκτελείται το slicing, ενώ το αρχείο που εξάγεται είναι ήδη σε μορφή g code commands.

5.1.4 Pronterface

Το σχέδιο του αντικειμένου που προορίζεται για εκτύπωση αποστέλλεται στον τρισδιάστατο εκτυπωτή μέσω της θύρας USB. Αυτή τη λειτουργία εκτελεί το PronterFace, το οποίο προσφέρει, εκτός της ανωτέρω λειτουργίας, έλεγχο επί των μερών του εκτυπωτή. Δίνει τη δυνατότητα αποστολής εντολών τύπου g-code για την κίνηση των αξόνων, εξαγωγή υλικού από τον extruder και ρύθμισης των PID controller για την επίτευξη της σωστής θερμοκρασίας του hot end και του heating bed. Επίσης, παρέχει τη δυνατότητα παραμετροποίησης ορισμένων ρυθμίσεων του Marlin που αποθηκεύονται στην EEPROM μνήμη του Arduino.

Αφού το σχέδιο του αντικειμένου σχεδιαστεί και μετατραπεί σε g-code format, φορτώνεται στο PronterFace και αυτό στέλνει τις εντολές ώστε να εκτυπωθεί στον 3d printer.



Εικόνα 45: Το λογισμικό PronterFace

Στο αριστερό μέρος της οθόνης περιλαμβάνονται οι ρυθμίσεις σύνδεσης με τον ελεγκτή, εντολές κίνησης και λειτουργίας homing του κάθε άξονα, ρυθμίσεις της θερμοκρασίας του hot end και του heated bed, καθώς και προβολή των μετρήσεων θερμοκρασίας από τα διάφορα thermistors. Στο κεντρικό μέρος αποτυπώνεται το σχέδιο που προορίζεται για εκτύπωση, ενώ στο δεξί μέρος υπάρχει το παράθυρο στο οποίο προβάλλονται τα μηνύματα του ελεγκτή, οι εντολές που αποστέλλονται σε αυτόν και η γραμμή αποστολής εντολών g-code.

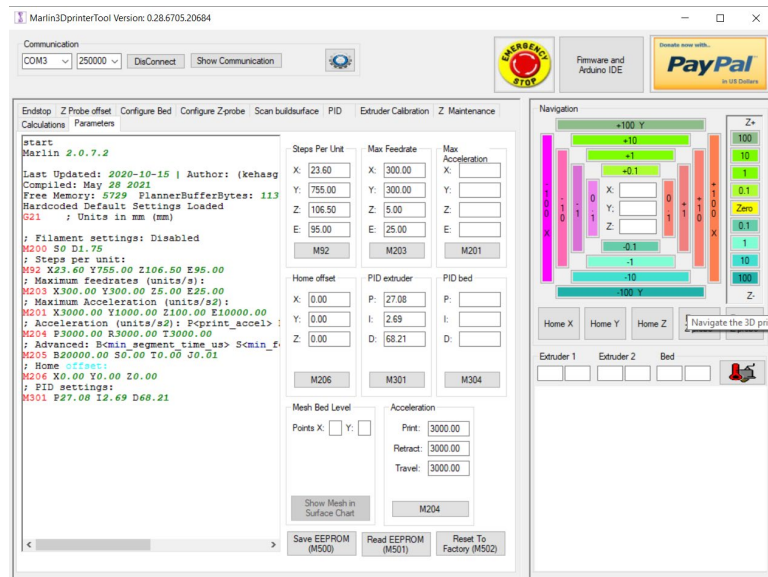
5.1.5 Marlin 3d Printer Tool

Με τη δυνατότητα που δίνουν οι stepper motors για κίνηση απόλυτης ακρίβειας, ειδικά και με τη ρύθμιση διαίρεσης του βήματος σε λόγο 1/16, γίνεται άμεσα κατανοητό πως οι ρυθμίσεις των κινούμενων, και όχι μόνο, μερών του πρέπει απόλυτα σωστές. Για να επιτευχθεί αυτό, θα πρέπει, όταν ξεκινήσει η διαδικασία ρύθμισης, να υπάρχει real time προβολή όλων των παραμέτρων που το αποτελούν.

Την απαίτηση αυτή καλύπτει το Marlin 3d Printer Tool. Παρέχει πρόσβαση σε όλες τις ρυθμίσεις που φορτώνονται στην EEPROM του Arduino, real time προβολή των endstop switches και ρύθμιση των hot end και heated bed.

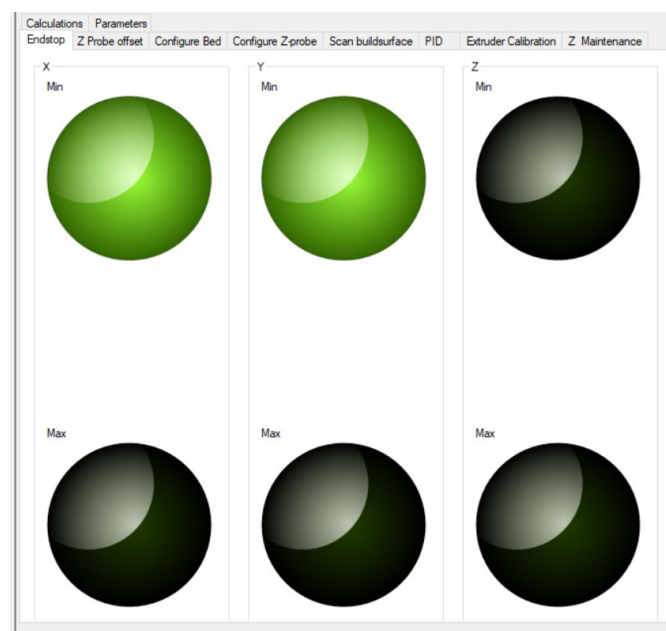
Αναλυτικότερα, στο επάνω μέρος βρίσκονται οι ρυθμίσεις σύνδεσης με τον ελεγκτή. Αφού επιλεγεί η θύρα που είναι συνδεδεμένος και το baudrate, πατώντας Connect γίνεται η σύνδεση. Μετά την επιτυχή σύνδεση, στο αριστερό μέρος

ενεργοποιούνται όλα τα tabs με τις διαθέσιμες ρυθμίσεις και στο δεξί μέρος εμφανίζεται το panel ελέγχου των αξόνων.



Εικόνα 46: Το λογισμικό Marlin 3d Printer Tool

Στο tab Endstop προβάλλεται το status όλων των διακοπών. Μόλις ένας διακόπτης ενεργοποιηθεί, τότε ο αντίστοιχος κύκλος γίνεται πράσινος.

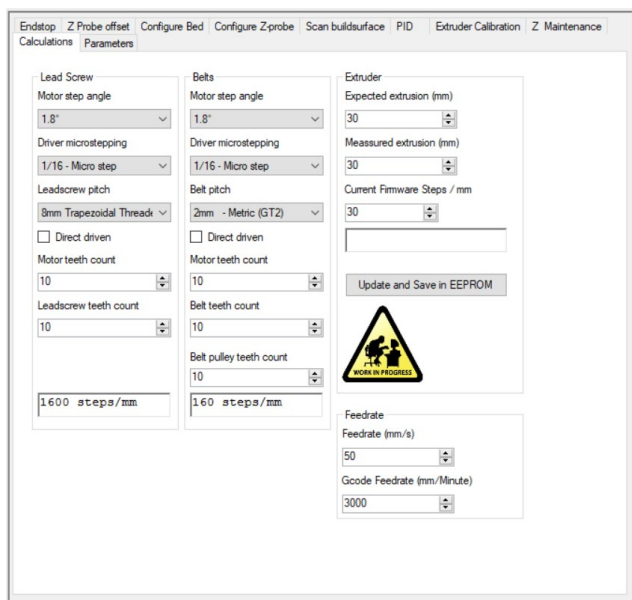


Εικόνα 47: Το tab με το status των endstop

Τα επόμενα τέσσερα tab έχουν να κάνουν με τη διαδικασία του bed leveling, εφόσον ο εκτυπωτής είναι εξοπλισμένος με probe αποστασιομέτρησης. Στο tab PID

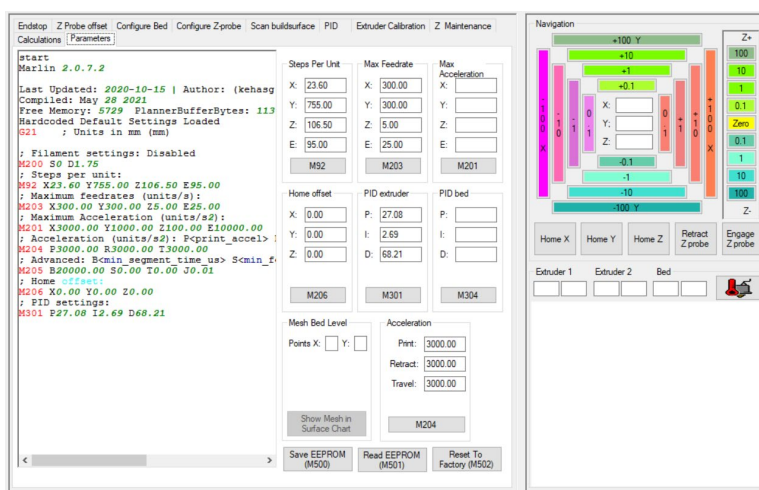
ρυθμίζεται ο PID controller του hot end και του heated bed, ώστε αυτά να κρατούν σταθερή τη θερμοκρασία τους στη επιθυμητή. Αφού οριστεί η επιθυμητή θερμοκρασία και το πλήθος των κύκλων ελέγχου, επιλέγεται το PID autotune για το καθένα και υπολογίζονται αυτόματα οι ρυθμίσεις, οι οποίες εμφανίζονται στο result. Εδώ δίνεται η δυνατότητα αποθήκευσης αυτών στην EEPROM μνήμη από το κουμπί Update and Save EEPROM.

Στο tab Extruder Calibration ρυθμίζονται οι παράμετροι του extruder, ενώ στο Z Maintenance η κίνηση του άξονα Z. Στο tab Calculations δίνεται η δυνατότητα υπολογισμού των τιμών steps/mm των stepper motors και ρύθμισης του βήματος του stepper motor του extruder ώστε να εξάγει τη σωστή ποσότητα filament.



Εικόνα 48: Το tab Calculations

Τέλος, στο tab Parameters στο αριστερό μέρος προβάλλονται οι G code commands που αποστέλλονται στον ελεγκτή, ενώ στο δεξί προβάλλονται όλες οι ρυθμίσεις των stepper motors, του hot end και του heated bed που είναι φορτωμένες στην EEPROM μνήμη και δίνεται η δυνατότητα αλλαγής τους και αποθήκευσης των νέων τιμών.



Εικόνα 49: To tab Parameters

5.1.6 G-code

Οι εντολές αυτού του τύπου ανήκουν στη γενική γλώσσα προγραμματισμού Computer Numerical Control (CNC), η οποία χρησιμοποιείται κατά κόρον για τον έλεγχο και τη λειτουργία μηχανημάτων όπως ο τόρνος, το CNC, οι 3d printers κ.α. Το αρχικό γράμμα υποδηλώνει την κατηγορία General commands, οι οποίες έχουν αρίθμηση από 00 έως 99 και γενικά περιλαμβάνουν εντολές κίνησης. Αποτελούνται από το γράμμα G, συνοδευόμενο από το νούμερο της εντολής και στη συνέχεια μπορούν να οριστούν οι παράμετροι.

Οι κυριότερες εντολές που χρησιμοποιούνται στους 3d printers φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

No	Εντολή
G00	Rapid positioning
G01	Linear interpolation
G10	Retract filament
G11	Unretract filament
G28	Return to home position
G29	Bed Leveling
G30	Single Z-Probe

G53	Move in Machine Coordinates
G60	Save Current Position
G92	Set position

Πίνακας 2: G-commands

Ένα παράδειγμα G command είναι η ακόλουθη:

```
1. G1 X50 Y45 Z1.5 F1500 E1
```

η οποία δίνει εντολή για κίνηση του άξονα X κατά 50mm, του Y κατά 45mm και του Z κατά 1.5mm με ρυθμό 1500mm/min, καθώς εκτελεί εξαγωγή υλικού μήκους 1mm.

Για τον πλήρη έλεγχο του εκτυπωτή απαιτείται η χρήση και μιας δεύτερης κατηγορίας CNC εντολών, οι M-commands. Από τη λέξη Miscellaneous, αποτελούνται από εντολές που δεν περιλαμβάνουν κίνηση μερών. Τέτοιες είναι η θερμοκρασία του hot end και του heated bed, η ταχύτητα του ανεμιστήρα της κεφαλής κ.α. Έχουν αρίθμηση από 00 έως 999 και αποτελούνται από το γράμμα M, συνοδευόμενο από το νούμερο της εντολής και στη συνέχεια, αν απαιτείται, μπορούν να οριστούν οι παράμετροι.

Οι κυριότερες εντολές που χρησιμοποιούνται στους 3d printers φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

No	Εντολή
M17	Enable Steppers
M18	Disable steppers
M24	Start or resume SD print
M104	Set hotend temperature
M106	Set fan speed
M112	Emergency stop

M119	Endstop states
M120	Enable endstops
M121	Disable endstops
M140	Set bed temperature
M404	Set filament diameter
M500	Save settings

Πίνακας 3: M-commands

Ένα παράδειγμα M command είναι η ακόλουθη:

1. M104 S180

η οποία θέτει την θερμοκρασία του hot end στους 180°C.

Αφού εκτελεστεί η διαδικασία του slicing από το κατάλληλο πρόγραμμα, δημιουργείται το αρχείο με τις G commands. Αυτό αποτελείται από μια σειρά από γραμμές εντολών, οι οποίες εκτελούνται σειριακά.

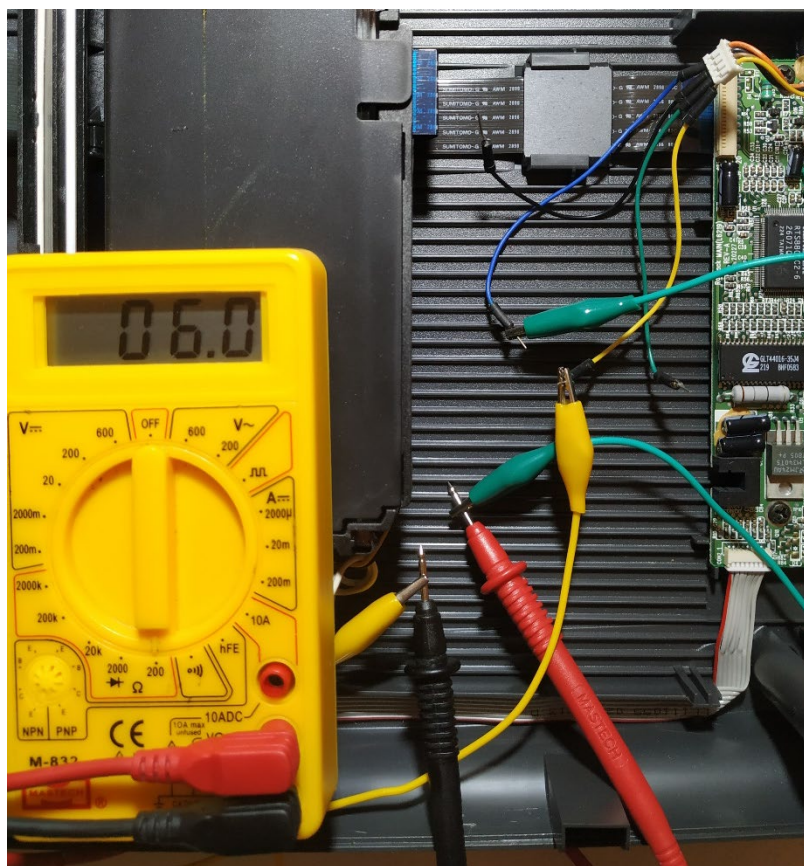
5.2 Ρύθμιση αξόνων

Πριν τη συναρμολόγηση του εκτυπωτή απαραίτητο βήμα είναι η ρύθμιση των αξόνων, ώστε η κίνησή τους να εκτελείται με ακρίβεια.

5.2.1 Stepper motors

Τα stepper motors, όπως αναφέρθηκε, είναι διαφόρων ειδών και έτσι διαθέτουν και διαφορετικό αριθμός καλωδίων. Οι οικιακές συσκευές που διαθέτουν τέτοιους κινητήρες χρησιμοποιούν συνήθως bipolar steppers με 4 καλώδια επαφών.

Για την αναγνώριση των επαφών, εφόσον δεν διατίθεται το σχεδιάγραμμα του κινητήρα, χρησιμοποιείται το πολύμετρο. Σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας τους, για επιτευχθεί η κίνηση στον άξονα περνάει ρεύμα από δύο πηνία τοποθετημένα σε γωνία 90°. Αρκεί λοιπόν με το πολύμετρο να βρεθεί το ζεύγος των καλωδίων που είτε βραχυκυκλώνουν είτε εμφανίζουν ωμική αντίσταση μεταξύ τους.



Εικόνα 50: Ζεύγος καλωδίων με ωμική αντίσταση

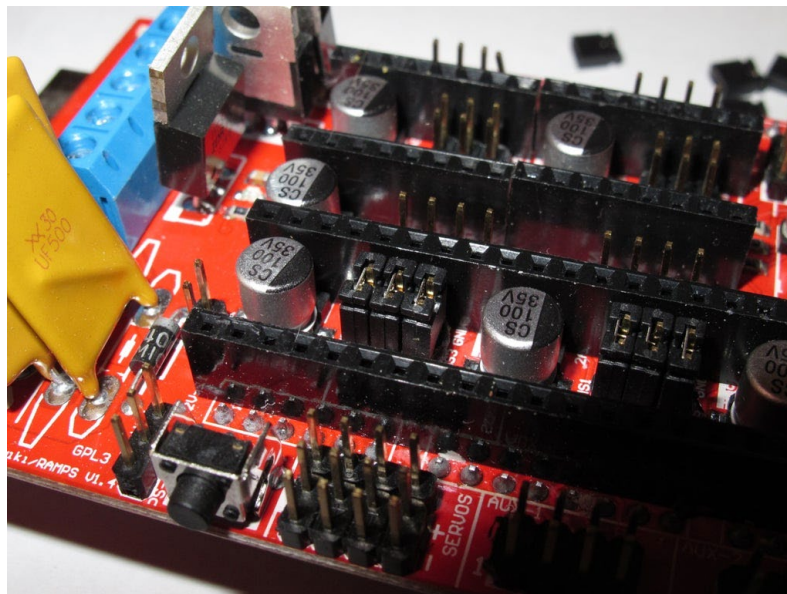
Αφού βρεθούν τα δύο ζεύγη των πηνίων, αυτά ενώνονται στον stepper motor driver στις θέσεις A+ - A- και B+ - B-. Η μεταξύ των δύο καλωδίων του ζεύγους πολικότητα δεν παίζει ρόλο, ωστόσο, αν τα ζεύγη μεταξύ τους τοποθετηθούν σε αντίθετες θέσεις, τότε η φορά κίνησης του κινητήρα αντιστρέφεται.

Οι stepper motors χρησιμοποιούν για τον καθορισμό της κίνησής τους τη μονάδα steps/revolution, δηλαδή τον αριθμό των βημάτων που εκτελούνται σε μία πλήρη περιστροφή. Αυτή θα πρέπει να μετατραπεί σε steps/mm καθώς αυτό χρησιμοποιεί το Marlin. Για τη ρύθμιση του μεγέθους των απαιτούμενων βημάτων ώστε ο άξονας να μετακινηθεί κατά 1mm ακολουθείται ο τύπος:

$$\text{Steps/mm} = (\text{Steps per Revolution}) * (\text{Micro-steps}) / (\text{mm per Revolution})$$

Εφόσον ο κινητήρας προέρχεται από συγκεκριμένη εταιρία, συνήθως συνοδεύεται και από τις προδιαγραφές του. Ωστόσο, επειδή η μεταβλητή mm/Revolution είναι άγνωστη και εξαρτάται από τον τρόπο και το μέσο μετάδοσης της κίνησης από τον κινητήρα στον άξονα, χρησιμοποιείται η τεχνική try and fail.

Επίσης, μέσω των drivers δίνεται η δυνατότητα ελάττωσης του step μέσω της λειτουργίας του microstepping. Στις ολοκληρωμένες πλακέτες, όπως το Ramps, υπάρχουν jumpers επαφών ώστε το βήμα του κινητήρα να διαιρεθεί σε 1/2, 1/4, 1/8 και 1/16. Όσο μεγαλώνει η διαίρεση του βήματος τόσο αυξάνεται η ακρίβεια κίνησης του κινητήρα, ωστόσο θυσιάζοντας την μέγιστη ροπή στρέψη, άρα μειώνεται και το βάρος του φορτίου το οποίο μπορεί να κινήσει.



Εικόνα 51: Microstepping jumpers

Για τη συγκεκριμένη κατασκευή επιλέχθηκε η εφαρμογή 1/16 microstepping.

Μία άλλη σημαντική ρύθμιση είναι η μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να κινηθεί (max acceleration). Για να βρεθεί αυτή, αυξάνεται σιγά σιγά η τιμή της δίνοντας εντολή κίνησης στον κινητήρα. Η αύξηση σταματάει μόλις ο κινητήρας αρχίσει και παρουσιάζει έντονο θόρυβο κατά την κίνησή του και χάνει βήματα.

5.2.1.1 Scanner

Αρχικά συνδέεται το stepper motor με το Ramps και το Arduino Mega. Αφού τοποθετηθεί ένας δείκτης επί της κεφαλής για μεγαλύτερη ακρίβεια στην ανάγνωση της απόστασης, τοποθετείται χάρακας παραπλήσια του άξονα κίνησης, ώστε να μετρηθεί με ακρίβεια το πραγματικό ποσό κίνησης. Εισάγεται μία τυχαία τιμή στο Marlin στην γραμμή `DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT` και φορτώνεται στο Arduino.



Εικόνα 52: Μέτρηση κίνησης άξονα του scanner

Εν συνεχεία γίνεται σύνδεση με το PronterFace και δίνεται εντολή κίνησης συγκεκριμένης απόστασης. Αν η απόσταση επί του χάρακα που κινήθηκε η κεφαλή είναι μικρότερη από αυτή που δόθηκε, τότε η τιμή steps/mm πρέπει να αυξηθεί, αν είναι μεγαλύτερη τότε πρέπει να ελαττωθεί.

Μέσω αυτής της διαδικασίας η τιμή του stepper motor του scanner υπολογίστηκε σε 755 steps/mm. Επίσης, το max federate υπολογίστηκε στα 300 mm/sec.

5.2.1.2 DVD-Rom

Με την ίδια διαδικασία η τιμή του stepper motor του DVD-Rom υπολογίστηκε σε 106.5 steps/mm και το max federate στα 5 mm/sec.

5.2.1.3 Extruder

Αρχικά συνδέεται ο stepper motor του extruder στο Ramps και το Arduino Mega, μετριέται μία απόσταση 120mm επί του filament του PLA, εισάγεται το filament στον μηχανισμό του extruder και τοποθετείται μία τυχαία τιμή στο Marlin στη γραμμή DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT. Στη συνέχεια γίνεται σύνδεση με το PronterFace και εκτελείται εξαγωγή 100mm με την εντολή G1 E100 F100. Αφού ολοκληρωθεί η εξαγωγή, μετριέται το εναπομείναν μήκος του filament. Αν είναι μικρότερο του 20mm, τότε η τιμή steps/mm πρέπει να μειωθεί, αν είναι μεγαλύτερη να αυξηθεί.

Μέσω αυτής της διαδικασίας η τιμή του stepper motor του extruder υπολογίστηκε σε 95 steps/mm. Επίσης, το max federate υπολογίστηκε στα 300 mm/sec.

5.2.2 Dc motor

Ο κινητήρας που διαθέτει η γέφυρα του printer είναι τύπου QK1-1500. Αν και στάθηκε αδύνατο να βρεθούν τα specifications του, είναι γνωστό πως λειτουργεί με τάση μέχρι 24V. Για τον έλεγχο της κίνησής του και για το λόγο ότι η λειτουργία του επιτυγχάνεται με τη συνεχόμενη κίνηση προς τη μια ή την άλλη κατεύθυνση, απαιτείται η δημιουργία ενός κλειστού loop, όπου θα ελέγχεται ανά πάσα στιγμή η απαιτούμενη κίνηση για να επιτευχθεί η τελική θέση, μέσω ανατροφοδότησης (feedback) από κάποιο μέσο. Αυτό υλοποιείται μέσω ενός PID controller, ο οποίος ελέγχει συνεχώς την τιμή εξόδου (output) υπολογίζοντας την τιμή του σφάλματος (error) μεταξύ του τελικού επιθυμητού σημείου (setpoint) και της παρούσας θέσης (process variable), δηλαδή:

$$\text{error} = \text{setpoint} - \text{process variable}.$$

5.2.2.1 PID Controller

Η έννοια αυτού εξάγεται από τις τρεις μεταβλητές proportional, integral, and derivative και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

όπου: u = το απαιτούμενο output

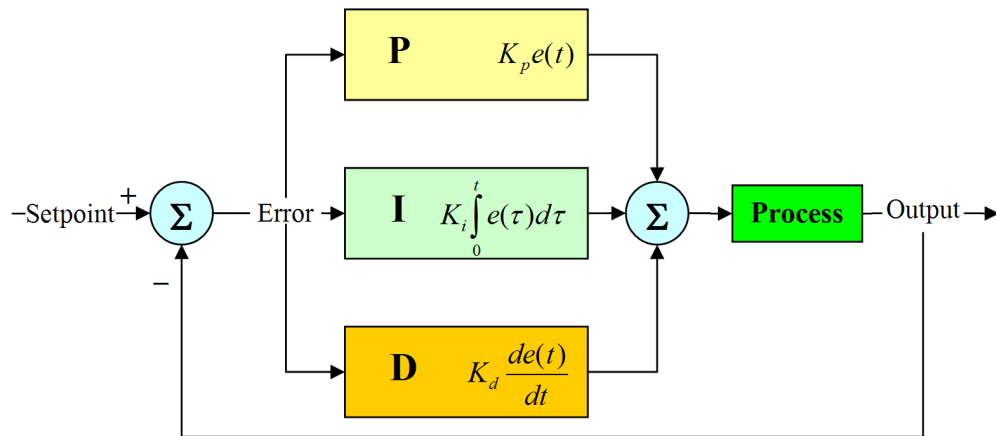
K_p = η μεταβλητή proportional

K_i = η μεταβλητή integral

K_d = η μεταβλητή derivative

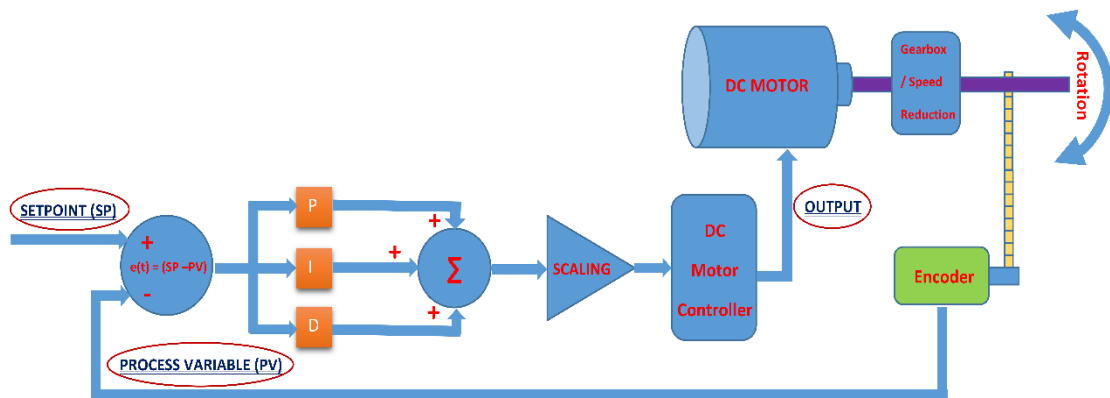
e = το σφάλμα

dt = το διάστημα του loop μέτρησης



Σχήμα 5: Αναπαράσταση λειτουργίας του PID controller

Στην προκειμένη περίπτωση το output είναι η ένταση του ρεύματος προς τον κινητήρα (PWM) για να του δώσει την κατάλληλη ταχύτητα περιστροφής, το setpoint εξάγεται από τα σήματα STEP και DIR του άξονα X από το Arduino Mega και το process variable δίνεται μέσω του optical encoder της κεφαλής του printer.



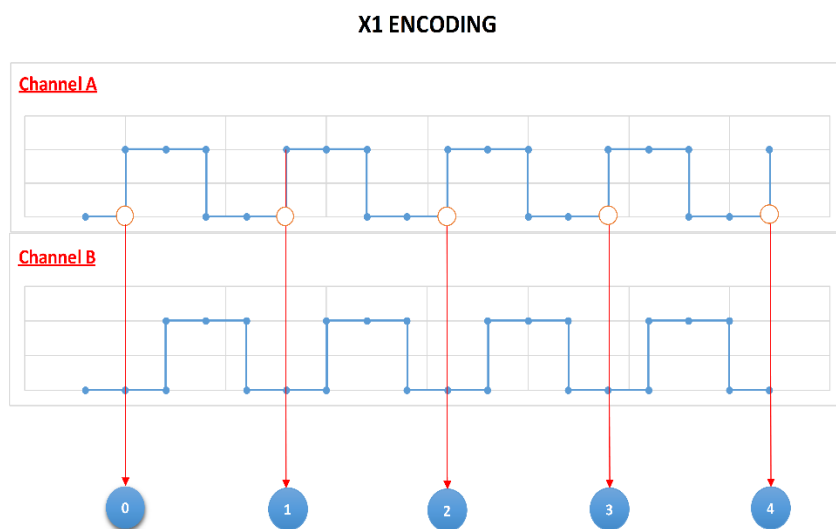
Σχήμα 6: Το closed loop του άξονα X

5.2.2.2 Optical encoder

Ο optical encoder αποτελείται από δύο εξαρτήματα, τον linear encoder, ο οποίος είναι μια διαφανής πλαστική λωρίδα που έχει εκτυπωμένες πάνω του κατακόρυφες γραμμές σε πολύ πυκνή απόσταση μεταξύ τους, και τον αισθητήρα ανάγνωσης αυτού. Ο δεύτερος, με την ονομασία quadrature optical encoder, αποτελείται από ένα IR led το οποίο βρίσκεται από τη μια μεριά του linear encoder και δύο encoders, A και B, οι οποίοι βρίσκονται στην άλλη μεριά, σε offset 90 μοιρών

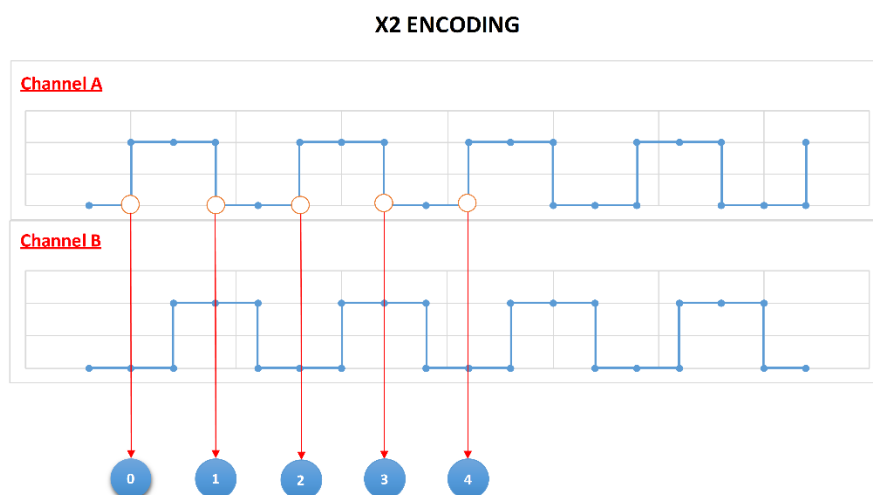
μεταξύ τους στον κύκλο ανάγνωσης. Όταν η κεφαλή κινείται με κίνηση δεξιά, ο A προηγείται του B, ενώ με κίνηση αριστερά ισχύει το ανάποδο. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατόν να γνωρίζουμε τη φορά κίνησης της κεφαλής. Οι δύο αυτοί encoders παράγουν τα δύο απαιτούμενα σήματα, channel A και B.

Για να επιτευχθεί το encoding, υπάρχουν τρεις δυνατοί τρόποι. Ο πρώτος είναι η μέτρηση να γίνεται μόνο κατά την άνοδο του channel A (X1 encoding). Όταν το A προηγείται τότε προτίθεται, ενώ αν προηγείται το B αφαιρείται.



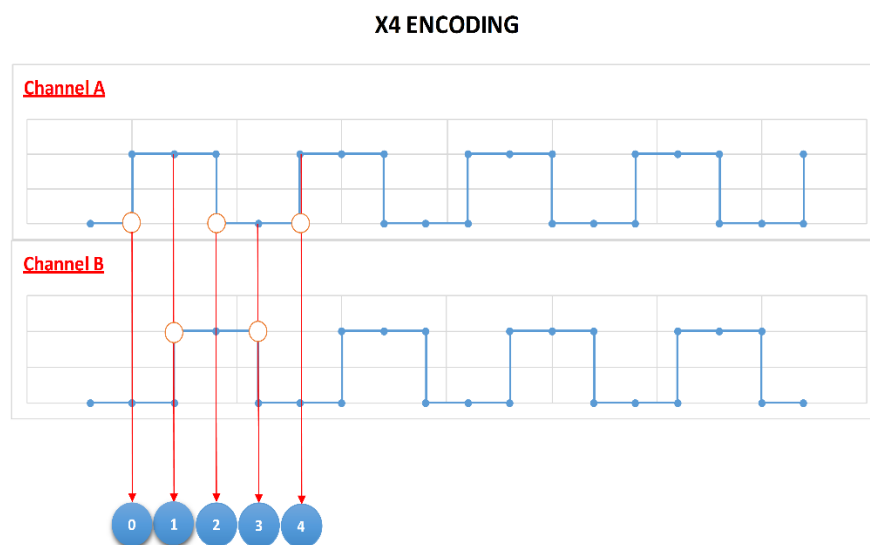
Σχήμα 7: Encoding με μονή μέτρηση στην άνοδο

Ο δεύτερος τρόπος είναι με μέτρηση της ανόδου και της καθόδου του channel A (X2 encoding). Με αυτόν τον τρόπο τετραπλασιάζεται η ακρίβεια μέτρησης.



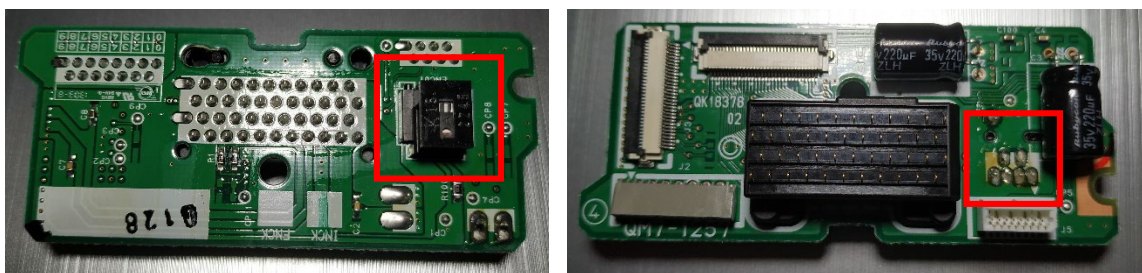
Σχήμα 8: Encoding με μονή μέτρηση στην άνοδο και στην κάθοδο

Ο τρίτος τρόπος είναι με μέτρηση της ανόδου και της καθόδου και των δύο channel (X4 encoding). Με αυτόν τον τρόπο τετραπλασιάζεται η ακρίβεια μέτρησης.



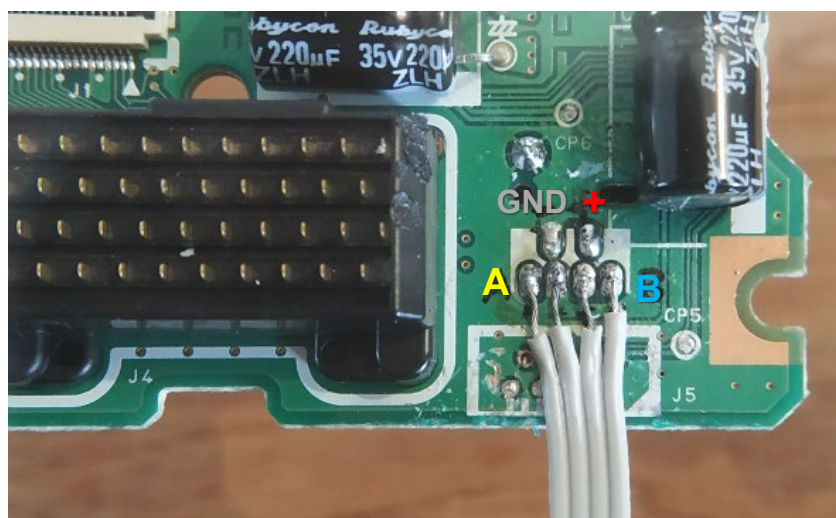
Σχήμα 9: Encoding με διπλή μέτρηση στην άνοδο και στην κάθοδο

Για να γίνει χρήση του optical encoder της κεφαλής, αρχικά αφαιρείται το καπάκι που καλύπτει την πλακέτα ελέγχου των μελανιών. Πάνω σε αυτήν είναι τοποθετημένος ο quadrature optical που αποτελείται από 6 pin, τα 2 συνδέονται στον θετικό πόλο, τα 2 στον αρνητικό και τα άλλα δύο είναι το σήμα ανάγνωσης των channel A και B.



Εικόνα 53: Quadrature optical encoder επί της πλακέτας

Το pinout μπορεί να βρεθεί, σε περίπτωση έλλειψης βιβλιογραφίας, με τη βοήθεια πολύμετρου. Οι δύο επαφές που βρίσκονται μαζί, είναι για την τροφοδοσία του IR led, ενώ οι δύο επαφές από τις τέσσερις σε σειρά για την τροφοδότηση των encoders. Οι αρνητικές επαφές είναι μεταξύ τους συνδεδεμένες, ενώ ανάμεσα στις δύο θετικές παρεμβάλλεται αντίσταση. Για τη σύνδεση των επαφών με το Arduino και το power supply χρησιμοποιείται κομμάτι καλωδιοταινίας από parallel ATA καλώδιο σύνδεσης δίσκων αποθήκευσης από παλιό PC.



Εικόνα 54: Optical encoder pinout

5.2.2.3 Κώδικας

Ο κώδικας που θα φορτωθεί στο Arduino UNO επιτελεί τη λειτουργία του PID Controller. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να επεξεργάζεται τα σήματα που λαμβάνει από το Arduino MEGA των εξόδων STEP και DIR, για τον έλεγχο του άξονα X και αυτά από την ανάγνωση του optical encoder της κεφαλής του εκτυπωτή.

5.2.2.3.1 Βιβλιοθήκες

Οι βιβλιοθήκες που χρησιμοποιούνται είναι οι κάτωθι:

- FlexiTimer2: επιτρέπει την εκτέλεση διαδικασιών σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, χωρίς να σταματάει η εκτέλεση του κώδικα. Βασισμένη στη βιβλιοθήκη MsTimer2, δίνει τη δυνατότητα υποδιαίρεσης του χρονικού interval κάτω του 1ms.
- Encoder: Μετράει τους παλμούς από rotary & linear position encoders, τα οποία διατίθενται συνήθως από rotary knobs, motor ή shaft sensors και άλλους αισθητήρες θέσης.
- L298N: παρέχει έναν εύκολο τρόπο για τον έλεγχο των DC Motor με τη χρήση του L298N module.
- PID_v1: optimized βιβλιοθήκη για την υλοποίηση του PID controller.

```
1. #include <FlexiTimer2.h>
2. #include <Encoder.h>
3. #include <L298N.h>
4. #include <PID_v1.h>
```

5.2.2.3.2 Ορισμός μεταβλητών

Αρχικά ορίζονται οι μεταβλητές εισόδου των pins για τον έλεγχο του DC Motor και δημιουργείται το αντικείμενό του.

```
1. //----Motor----//
2. //Define pins
3. #define motorIn1 9;
4. #define motorIn2 10;
5. #define motorEnA 8;
6.
7. //Create motor
8. L298N motor(8,9,10);
```

Το ίδιο γίνεται με τον encoder για την ανάγνωση των σημάτων του αισθητήρα και ορίζεται η μεταβλητή encoderPosition για τον υπολογισμό της συνολικής κίνησής του.

```
1. //----Encoder----//
2. //Define pins
3. #define encoderA 2
4. #define encoderB 4
5.
6. //Create encoder
7. Encoder encoderX(encoderA,encoderB);
8.
9. volatile long encoderPosition = 0;
```

Εν συνεχεία ορίζονται οι μεταβλητές που θα χρησιμοποιηθούν στον PID controller και δημιουργείται το αντικείμενό του.

```
1. //----PID----//
2. //Define values
3. double kp=3, ki=10, kd=0.1;
4. double input=0, output=0, setpoint=0;
5.
6. //Create PID
7. PID myPID(&input, &output, &setpoint, kp, ki, kd, DIRECT);
```

Ορίζονται οι μεταβλητές εισόδου των σημάτων STEP και DIR για τον έλεγχο του άξονα X και οι μεταβλητές stepsPerMM, στην οποία θα τηρείται η τιμή step/mm, και deadBand, η οποία ορίζει τον νεκρό τομέα στον οποίο όταν το σφάλμα του άξονα είναι μικρότερο από αυτήν, δεν θα δίνεται κίνηση.

```
1. //----Stepper----//
2. //Stepper input
3. #define stepInput 3
4. #define dirInput 5
5.
6. #define stepsPerMM 23.6
7. #define deadBand 2
```

Τέλος, ορίζονται οι μεταβλητές, οι οποίες θα τηρούν τις υπολογιζόμενες τιμές θέσης του άξονα X. Επίσης ορίζεται η boolean μεταβλητή debug για την έξοδο αποσφαλμάτωσης στο Serial Monitor του Arduino.

```
1. //----Positioning values----/
2. double inputOld = 0;
3. double outputOld = 0;
4. double setpointOld = 0;
5. double actualPosition;
6. double actualPositionOld;
7. double error = 0;
8. double errorOld = 0;
9. bool debug = true;
```

5.2.2.3 Συναρτήσεις

Στη συνάρτηση setup() ορίζεται η ταχύτητα επικοινωνίας του Serial Monitor και τίθενται τα pin των σημάτων STEP και DIR σε εισόδους. Εν συνεχεία, τίθενται τα όρια του output του PID σε 255, καθώς αυτή είναι η μέγιστη τιμή που λαμβάνει η PWM έξοδος του Arduino, ο ρυθμός υπολογισμού του PID στο 1ms και το mode σε AUTO. Τέλος, ορίζονται τα interrupts, στα οποία θα καλούνται οι συναρτήσεις encoderCalculate, με την ύπαρξη σήματος από τον encoder για τον υπολογισμό

της θέσης της κεφαλής, και `stepCalculate`, με την ύπαρξη σήματος από το STEP για τον υπολογισμό των απαιτούμενων step του άξονα, ενώ γίνεται και η έναρξη του FlexiTimer σε 1 επανάληψη ανά 1/1000 του sec για την εκτέλεση της συνάρτησης `doPID`, κατά την οποία υπολογίζεται το output που θα σταλεί στον DC motor για την κίνησή του.

```
1. void setup() {
2.   //Serial
3.   Serial.begin(115200);
4.
5.   //Pin modes
6.   pinMode(stepInput, INPUT);
7.   pinMode(dirInput, INPUT);
8.
9.   //PID
10.  myPID.SetOutputLimits(-255, 255);
11.  myPID.SetSampleTime(1);
12.  myPID.SetMode(AUTOMATIC);
13.
14.  //Interrupts
15.  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(encoderA), encoderCalculate, CHANGE);
16.  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(stepInput), stepCalculate, RISING);
17.
18.  //Calculate PID every 1ms
19.  FlexiTimer2::set(1, 1.0/1000, doPID);
20.  FlexiTimer2::start();
21. }
```

Στη συνάρτηση `loop()` κυρίως τίθεται ως input για τον PID η θέση που υπολογίζει ο encoder και υπολογίζεται το σφάλμα μεταξύ παρούσας και επιθυμητής θέσης. Εντός του if, εφόσον η boolean debug έχει τεθεί σε true, εκτυπώνονται στο Serial Monitor όλες οι τιμές που αφορούν την κίνηση του άξονα για αποσφαλμάτωση.

```
1. void loop() {
2.   input = encoderPosition;
3.   error = input-setpoint;
4.
5.   //Print for debugging
6.   if (debug){
7.     actualPosition = input / stepsPerMM;
8.     if (actualPositionOld != actualPosition){
9.       Serial.print("Position(MM): ");
10.      Serial.println(actualPosition);
11.      actualPositionOld = actualPosition;
12.    }
13.    if (inputOld != input){
14.      Serial.print("Input      : ");
15.      Serial.println(input);
16.      inputOld = input;
17.    }
18.    if (setpointOld != setpoint){
19.      Serial.print("Setpoint  : ");
20.      Serial.println(setpoint);
21.    }
22.  }
```



```
21.     setpointOld = setpoint;
22.   }
23.   if (outputOld != output){
24.     Serial.print("Output      : ");
25.     Serial.println(output);
26.     outputOld = output;
27.   }
28.   if (errorOld != error){
29.     Serial.print("Error      : ");
30.     Serial.println(error);
31.     errorOld = error;
32.   }
33. }
34. }
```

Στη συνάρτηση `encoderCalculate()` διαβάζεται η τιμή του encoder για τον υπολογισμό της θέσης του άξονα.

```
1. void encoderCalculate(){
2.   encoderPosition = encoderX.read();
3. }
```

Στη συνάρτηση `stepCalculate()`, εφόσον η είσοδος του DIR είναι HIGH, αυξάνεται η επιθυμητή θέση για να δείξει κίνηση προς τη θετική κατεύθυνση του άξονα, ενώ αν είναι LOW μειώνεται για κίνηση προς την αρνητική.

```
1. void stepCalculate(){
2.   if (digitalRead(dirInput) == HIGH) setpoint++;
3.   else setpoint--;
4. }
```

Τέλος, στη συνάρτηση `doPID()` υπολογίζεται, μέσω του PID, το απαιτούμενο output προς το DC Motor. Εντός του if, αν η τιμή του output είναι μικρότερη του deadband τότε δεν δίνεται εντολή κίνησης, ενώ αν είναι μεγαλύτερη, τίθεται στην PWM έξοδο το απαιτούμενο σήμα. Τέλος, αν η τιμή του output είναι θετική, υποδηλώνει κίνηση προς την θετική μεριά του άξονα, ενώ προς την αρνητική μεριά υποδηλώνεται με αρνητική τιμή.

```
1. void doPID(){
2.   interrupts();
3.   myPID.Compute();
4.   if (abs(error) < deadBand){ // If the motor X is in position within the deadband
   width (acceptable error)
5.     motor.setSpeed(0); // Turn off the X motor
6.   }
7.   else{
8.     motor.setSpeed(abs(int(output)));
9.   }
10.
11.   if (output > 0){
12.     motor.forward();
```

```
13. }  
14. else if (output < 0){  
15.     motor.backward();  
16. }  
17. else {  
18.     motor.stop();  
19. }  
20. }
```

5.2.2.3.4 Συνολικός κώδικας

Ο συνολικός κώδικας φαίνεται παρακάτω:

```
1. #include <FlexiTimer2.h>  
2. #include <Encoder.h>  
3. #include <L298N.h>  
4. #include <PID_v1.h>  
5.  
6. //----Motor----//  
7. //Define pins  
8. #define motorIn1 9;  
9. #define motorIn2 10;  
10. #define motorEnA 8;  
11.  
12. //Create motor  
13. L298N motor(8,9,10);  
14.  
15. //----Encoder----//  
16. //Define pins  
17. #define encoderA 2  
18. #define encoderB 4  
19.  
20. //Create encoder  
21. Encoder encoderX(encoderA,encoderB);  
22.  
23. volatile long encoderPosition = 0;  
24.  
25. //----PID----//  
26. //Define values  
27. double kp=3, ki=10, kd=0.1;  
28. double input=0, output=0, setpoint=0;  
29.  
30. //Create PID  
31. PID myPID(&input, &output, &setpoint, kp, ki, kd, DIRECT);  
32.  
33. //----Stepper----//  
34. //Stepper input  
35. #define stepInput 3  
36. #define dirInput 5  
37.  
38. #define stepsPerMM 23.6  
39. #define deadBand 2  
40.  
41. //----Positioning values----//  
42. double inputOld = 0;  
43. double outputOld = 0;  
44. double setpointOld = 0;  
45. double actualPosition;  
46. double actualPositionOld;  
47. double error = 0;  
48. double errorOld = 0;  
49. bool debug = true;  
50.  
51. void setup() {  
52.     //Serial
```

```
53. Serial.begin(115200);
54.
55. //Pin modes
56. pinMode(stepInput, INPUT);
57. pinMode(dirInput, INPUT);
58.
59. //PID
60. myPID.SetOutputLimits(-255, 255);
61. myPID.SetSampleTime(1);
62. myPID.SetMode(AUTOMATIC);
63.
64. //Interrupts
65. attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(encoderA), encoderCalculate, CHANGE);
66. attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(stepInput), stepCalculate, RISING);
67.
68. //Calculate PID every 1ms
69. FlexiTimer2::set(1, 1.0/1000, doPID);
70. FlexiTimer2::start();
71. }
72.
73. void loop() {
74.   input = encoderPosition;
75.   error = input-setpoint;
76.
77.   //Print for debugging
78.   if (debug){
79.     actualPosition = input / stepsPerMM;
80.     if (actualPositionOld != actualPosition){
81.       Serial.print("Position(MM): ");
82.       Serial.println(actualPosition);
83.       actualPositionOld = actualPosition;
84.     }
85.     if (inputOld != input){
86.       Serial.print("Input      : ");
87.       Serial.println(input);
88.       inputOld = input;
89.     }
90.     if (setpointOld != setpoint){
91.       Serial.print("Setpoint   : ");
92.       Serial.println(setpoint);
93.       setpointOld = setpoint;
94.     }
95.     if (outputOld != output){
96.       Serial.print("Output     : ");
97.       Serial.println(output);
98.       outputOld = output;
99.     }
100.    if (errorOld != error){
101.      Serial.print("Error      : ");
102.      Serial.println(error);
103.      errorOld = error;
104.    }
105.  }
106. }
107.
108. void encoderCalculate(){
109.   encoderPosition = encoderX.read();
110. }
111.
112. void stepCalculate(){
113.   if (digitalRead(dirInput) == HIGH) setpoint++;
114.   else setpoint--;
115. }
116.
117. void doPID(){
118.   interrupts();
119.   myPID.Compute();
```

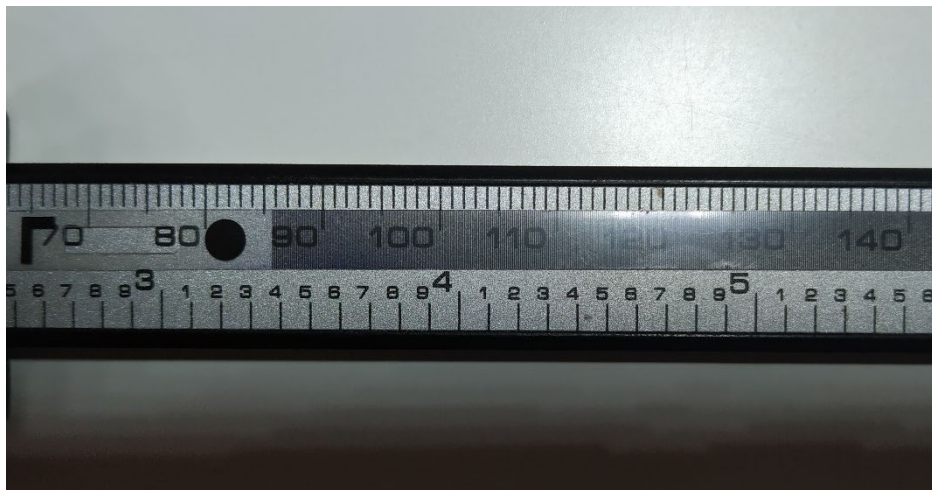
```

120.   if (abs(error) < deadBand){ // If the motor X is in position within the deadband
      width (acceptable error)
121.     motor.setSpeed(0); // Turn off the X motor
122.   }
123.   else{
124.     motor.setSpeed(abs(int(output)));
125.   }
126.
127.   if (output > 0){
128.     motor.forward();
129.   }
130.   else if (output < 0){
131.     motor.backward();
132.   }
133.   else {
134.     motor.stop();
135.   }
136. }

```

5.2.2.4 Υπολογισμός παραμέτρων

Επειδή το Marlin χρησιμοποιεί τη μονάδα steps/mm για τη ρύθμιση των stepper, θα πρέπει να γίνει μετατροπή της ανάγνωσης του optical encoder ανά mm κίνησης. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η γνώση του αριθμού των γραμμών ανά mm που έχει ο linear encoder. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με μέτρηση των γραμμών ανά mm με παχύμετρο. Ωστόσο ο τρόπος αυτός δεν δίνει μεγάλη ακρίβεια στη μέτρηση λόγω της πολύ μικρής απόστασης των εκτυπωμένων γραμμών επί του linear encoder.



Εικόνα 55: Linear encoder επί παχύμετρου

Για πιο ακριβή μέτρηση μπορεί να γίνει χρήση του Arduino IDE. Αρχικά συνδέεται ο DC motor με το L298N shield και το Arduino Uno. Στη συνέχεια φορτώνεται ο παρακάτω κώδικας με τον οποίο διαβάζεται η ένδειξη των μετρήσεων

του optical encoder, στον οποίο γίνεται χρήση των attachInterrupt pins του Arduino για γρηγορότερη ανάγνωση των σημάτων του encoder.

```
1. #define ENCODER_OPTIMIZE_INTERRUPTS
2. #include <Encoder.h>
3.
4.
5. //----Encoder----//
6. //Define pins
7. #define encoderA 2
8. #define encoderB 4
9.
10. //Create encoder
11. Encoder encoderX(encoderA,encoderB);
12.
13. volatile long encoderPosition = 0;
14.
15. void setup() {
16.   //Serial
17.   Serial.begin(115200);
18.
19.   //Interrupts
20.   attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(encoderA), encoderCalculate, CHANGE);
21. }
22.
23. void loop() {
24. }
25.
26. void encoderCalculate(){
27.   encoderPosition = encoderX.read();
28. }
```

Για μεγαλύτερη ακρίβεια των μετρήσεων απόστασης υπάρχει η δυνατότητα τοποθέτησης δείκτη επί της κεφαλής, όπως για παράδειγμα μία καρφίτσα στερεωμένη με κολλητική ταινία. Κινώντας την κεφαλή χειροκίνητα από το ένα άκρο της γέφυρας στο άλλο, στο Serial monitor του Arduino IDE εμφανίζεται το σύνολο των σημάτων. Στη συνέχεια μετريέται με χάρακα η συνολική κίνηση της κεφαλής σε mm. Διαιρώντας το σύνολο των σημάτων με τη συνολική απόσταση υπολογίζεται το steps/mm. Στην προκύπτουσα περίπτωση το αποτέλεσμα είναι **23,6 steps/mm**.

Η ρύθμιση των παραμέτρων P, I και D του PID controller γίνεται με τη μέθοδο try and fail. Αρχικά φορτώνεται ο κώδικας στο Arduino Uno. Εν συνεχεία, μηδενίζονται οι τιμές k_p , k_i και k_d και αυξάνουν κατά 0,1 έκαστη, ώστε να βρεθεί ο κατάλληλος συνδυασμός με τον οποίο η κίνηση της κεφαλής θα είναι ομαλή και σταθερή και θα σταματάει στο προκαθορισμένο σημείο χωρίς υπέρβαση αυτής ή εκτελώντας παλινδρομικές κινήσεις ως προς το επιθυμητό σημείο. Προσοχή θέλει το γεγονός ότι ο υπολογισμός των μεταβλητών εξαρτάται πάντοτε από την εκάστοτε εφαρμογή στην οποία θα εφαρμοστούν. Για το λόγο αυτό, ο τελικός υπολογισμός

αυτών πρέπει να γίνει όταν θα έχουν συνδεθεί όλα τα εξαρτήματα πάνω στην κεφαλή.

Για την επιβεβαίωση των μετρήσεων, αρχικά μαρκάρεται μία προμετρημένη απόσταση στο σιδερένιο σκελετό της γέφυρας. Αφού εισαχθεί η τιμή steps/mm στο Marlin και φορτωθεί στο Arduino Mega, γίνεται σύνδεση μέσω του PronterFace. Στη συνέχεια δίνεται εντολή κίνησης της μετρημένης απόστασης και έλεγχος αν η κεφαλή κινήθηκε στην καθορισμένη απόσταση.

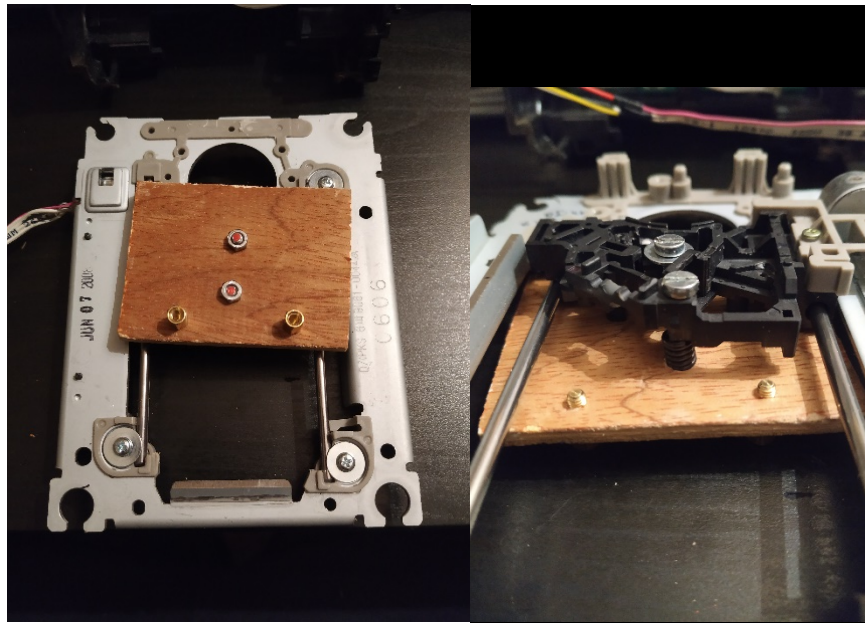


Εικόνα 56: Μέτρηση κίνησης της κεφαλής απόστασης 1cm

5.3 Συναρμολόγηση

5.3.1 Τοποθέτηση του hot end

Για να τοποθετηθεί το hot end στον μηχανισμό κίνησης του DVD-Rom κόπηκε κομμάτι από κόντρα πλακέ διαστάσεων 6x4cm και στερεώθηκε στην πλατφόρμα με δύο βίδες 2mm με προσαρμοσμένα ελατήρια ώστε να επιτευχθεί η οριζοντιοποίησή του.



Εικόνα 57: Πλατφόρμα στήριξης του hot end

Εν συνεχεία κόπηκε δεύτερο κομμάτι κόντρα πλακέ και τοποθετήθηκε πάνω από το πρώτο κομμάτι με δύο διπλές βίδες για motherboard, στο οποίο τοποθετήθηκε το hot end με tie wrap.

5.3.2 Συναρμολόγηση αξόνων X και Z

Για να τοποθετηθεί ο μηχανισμός του DVD-Rom πάνω στον άξονα X κόπηκε κομμάτι από κόντρα πλακέ διαστάσεων 11x12cm και στερεώθηκε στην κεφαλή των μελανιών με δύο βίδες 2mm στις τρύπες που δημιουργήθηκαν από την απομάκρυνση της θέσης στήριξης των μελανιών. Στη συνέχεια τοποθετήθηκε ο μηχανισμός του DVD-Rom σε τέσσερις βίδες 2mm ανάμεσα σε παξιμάδια, ώστε να επιτευχθεί η παραλληλοποίησή του με τον άξονα του X.



Εικόνα 58: Σύνδεση αξόνων X και Z

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε ώστε όταν ο άξονας του Z βρίσκεται στην τελείως πάνω θέση, το nozzle να έχει clearance ως προς το κόντρα πλακέ στήριξης, ώστε να επιτυγχάνεται η κατά το δυνατόν μεγαλύτερη εκμετάλλευση της κίνησής του.



Εικόνα 59: Clearance του nozzle με τη βάση στήριξης

5.3.3 Κατασκευή της πλατφόρμας εκτύπωσης

Η τοποθέτηση της τελικής επιφάνειας εκτύπωσης έγινε με χρήση της πλατφόρμας κίνησης της κεφαλής ανάγνωσης του scanner. Αρχικά κόπηκε Plexiglas πάχους 10mm σε διαστάσεις 22x22cm, ελαφρώς μικρότερο από τις διαστάσεις του heated bed. Αυτό στηρίχθηκε με τέσσερις βίδες στο καπάκι που κλείνει την κοιλότητα με τους καθρέφτες ανάγνωσης του scanner.



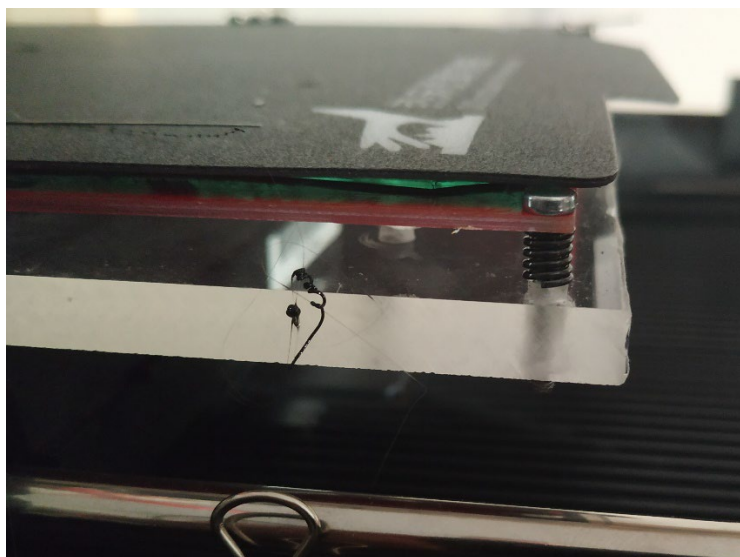
Εικόνα 60: Τοποθέτηση του Plexiglas επί της κεφαλής του scanner

Στη συνέχεια τοποθετήθηκε το thermistor στο κάτω μέρος του heated bed και στερεώθηκε με ταινία αλουμινίου, υψηλής θερμοκρασιακής αντοχής, ώστε να μην επηρεάζεται από τη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης.



Εικόνα 61: Τοποθέτηση thermistor

Το heated bed βιδώθηκε πάνω στο Plexiglas με δύο βίδες 2mm και ανάμεσα τοποθετήθηκαν ελατήρια τα οποία είχαν αφαιρεθεί από μηχανισμούς κίνησης του συρταριού διαφόρων DVD-Rom.

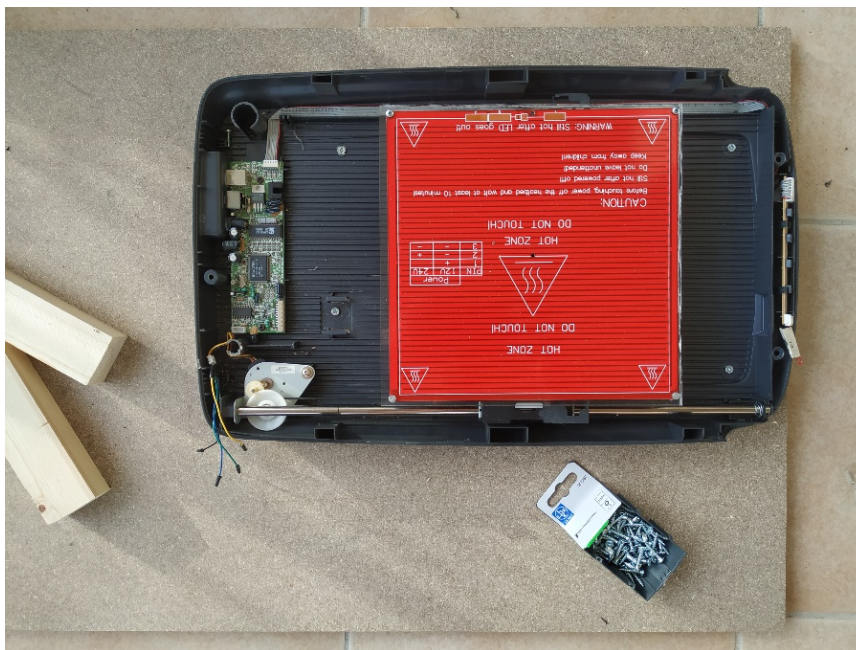


Εικόνα 62: Σύνδεση του heated bed με το Plexiglas

Πάνω από το heated bed τοποθετήθηκε μαγνητική επιφάνεια διπλής όψης για καλύτερη συναρμογή της πρώτης στρώσης του υλικού εκτύπωσης και ευκολότερη απόσπαση του αντικειμένου.

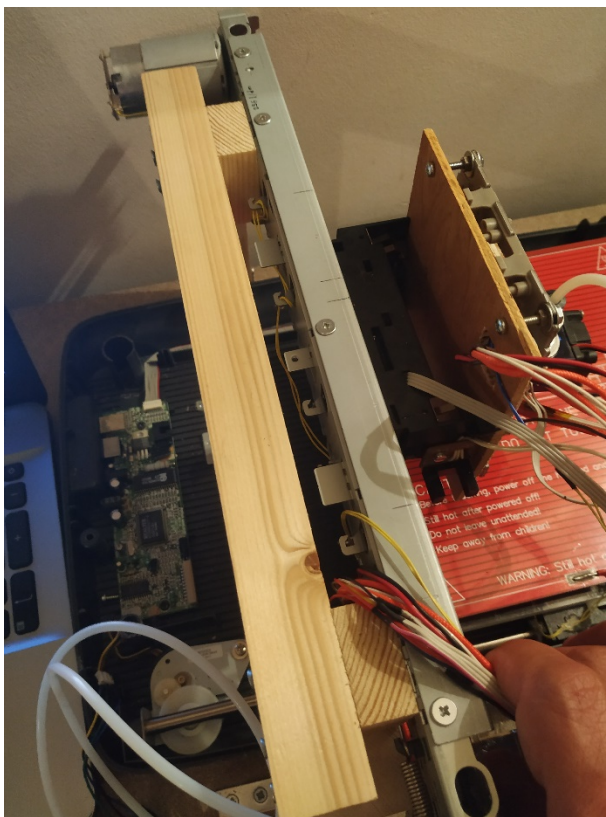
5.3.4 Συναρμολόγηση Αξόνων ΧΖ και Υ

Ως βάση στήριξης του εκτυπωτή επιλέχθηκε μοριοσανίδα πάχους 2εκ. διαστάσεων 50x50cm ώστε να χωρέσουν και τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα αυτού. Το scanner βιδώθηκε πάνω στη μοριοσανίδα με τέσσερις βίδες 2mm κάθετα ως προς τις πλευρές της.



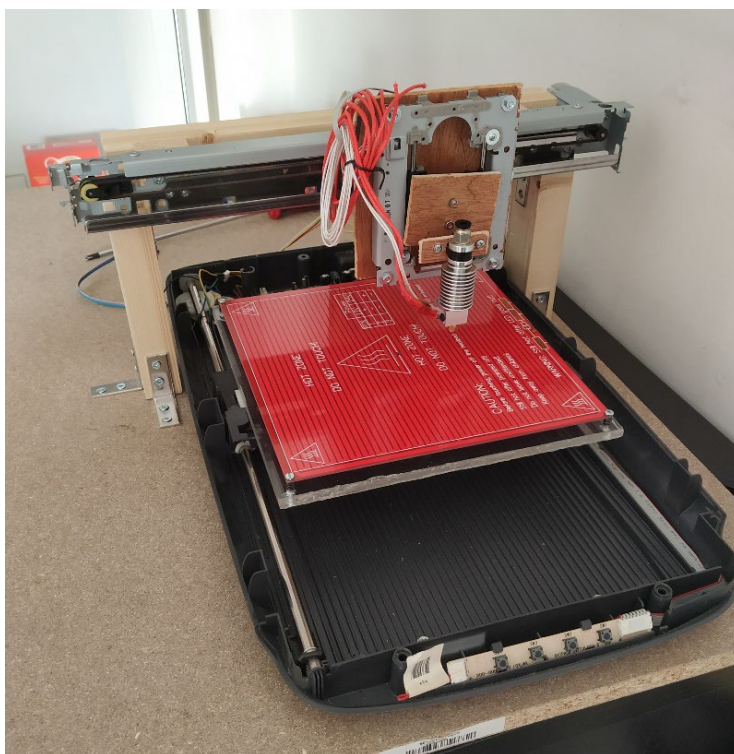
Εικόνα 63: Τοποθέτηση του scanner επί της μοριοσανίδας

Η γέφυρα του άξονα Χ προσαρμόστηκε πάνω σε καδρόνι διαστάσεων 3x4,5cm και με μήκος τόσο ώστε να χωράει μεταξύ του DC Motor και του ελατηρίου τεντώματος του timing belt. Μεταξύ του καδρονιού και της γέφυρας τοποθετήθηκαν ξύλινοι αποστάτες, καθώς στο οπίσθιο μέρος της δεύτερης υπάρχουν τα άγκιστρα πρόσδεσης των καλωδίων. Στη συνέχεια η διάταξη στερεώθηκε στα κατακόρυφα καδρόνια με σιδερογωνιές.



Εικόνα 64: Η γέφυρα του άξονα X

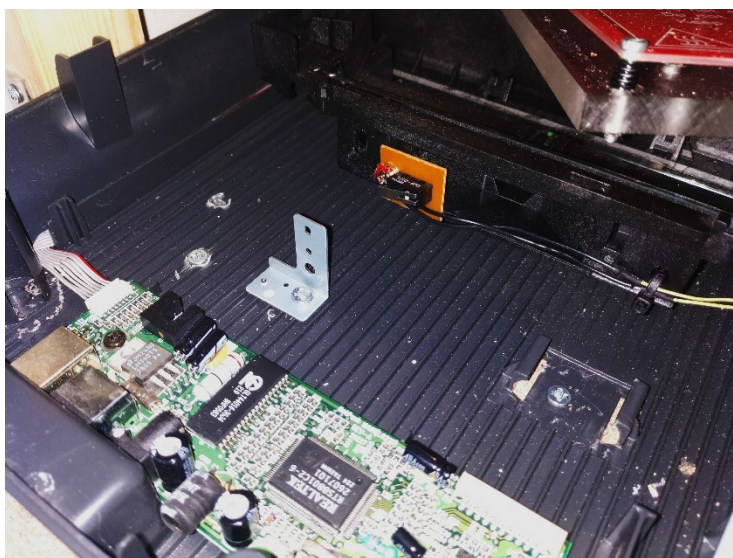
Για να στηριχθούν οι άξονες X και Z πάνω από τον Y, κόπηκαν δύο κομμάτια από καδρόνι διαστάσεων 3x4,5cm, αφού πρώτα υπολογίστηκε το ύψος τους ώστε το nozzle στην κατώτερη θέση του να ακουμπάει την επιφάνεια εκτύπωσης. Αυτά στερεώθηκαν επί της μοριοσανίδας με σιδερογωνιές και βίδες, ώστε να είναι κάθετα ως προς την επίπεδη επιφάνεια και σε τέτοια απόσταση από το εμπρός μέρος του scanner, ώστε το nozzle να τοποθετείται στο κέντρο της επιφάνειας εκτύπωσης και ως προς τον άξονα του X αλλά και ως προς του Y.



Εικόνα 65: Η τελική συναρμολόγηση και των τριών αξόνων

5.3.5 Τοποθέτηση των endstop switches

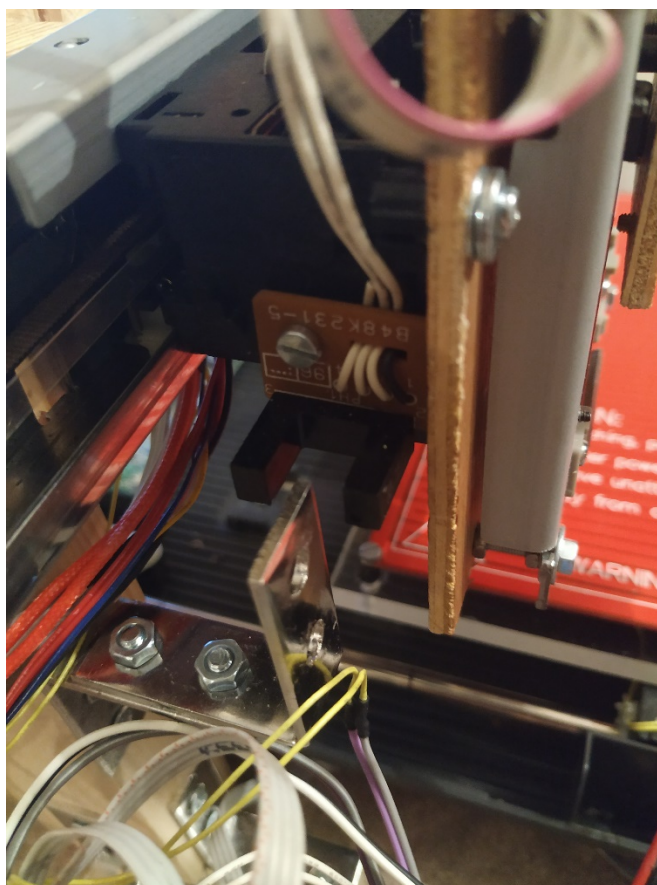
Στον άξονα του Υ τοποθετήθηκε μηχανικός διακόπτης ο οποίος αφαιρέθηκε από τον εκτυπωτή και προσαρμόστηκε στο κάτω μέρος της κεφαλής του scanner, ενώ για την ενεργοποίησή του χρησιμοποιήθηκε σιδερένια γωνία, η οποία επίσης αφαιρέθηκε από τον εκτυπωτή, και βιδώθηκε στην πλαστική βάση του scanner.



Εικόνα 66: Μηχανικός Endstop switch του άξονα Υ

Δεν χρησιμοποιήθηκε ο optical switch της πλακέτας του scanner διότι, η κεφαλή εκτύπωσης τοποθετήθηκε στο κέντρο της συνολικής κίνησης της κεφαλής του, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα αύξησης της επιφάνειας εκτύπωσης στο μέλλον. Με αυτόν τον τρόπο δεν είναι εκμεταλλεύσιμη η κίνηση αυτή στο σύνολό της παρά μόνο $\pm 10\text{cm}$ από το κέντρο. Ωστόσο, ο διακόπτης του scanner βρίσκεται στο τέλος της συνολικής διαδρομής, οπότε και στάθηκε αδύνατη η χρησιμοποίησή του.

Στον άξονα του X τοποθετήθηκε οπτικός διακόπτης από τον εκτυπωτή, ο οποίος προσαρμόστηκε στο πλάι της κεφαλής των μελανιών του εκτυπωτή. Για την ενεργοποίησή του τοποθετήθηκε σιδερένια γωνία επί των κατακόρυφων καδρονιών και μετρήθηκε η θέση του έτσι ώστε το nozzle να μην ακουμπάει πάνω στις επαφές του heated bed που τοποθετήθηκαν στο πλάι.



Εικόνα 67: Οπτικός Endstop switch του άξονα X

Στον άξονα του Z τοποθετήθηκε μηχανικός μικροδιακόπτης, ο οποίος αφαιρέθηκε από τον εκτυπωτή. Προσαρμόστηκε στην ξύλινη βάση του άξονα με

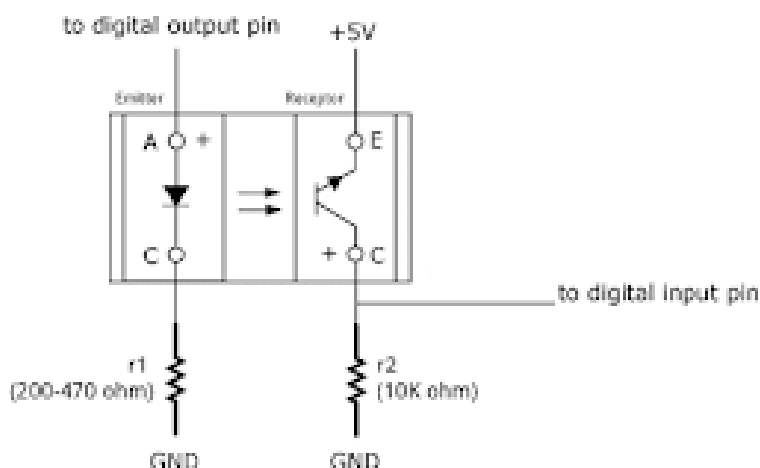
την εργοστασιακή του βίδα και πλήττεται από την κεφαλή ανάγνωσης του DVD-Rom.



Εικόνα 68: Μηχανικός Endstop switch του άξονα Z

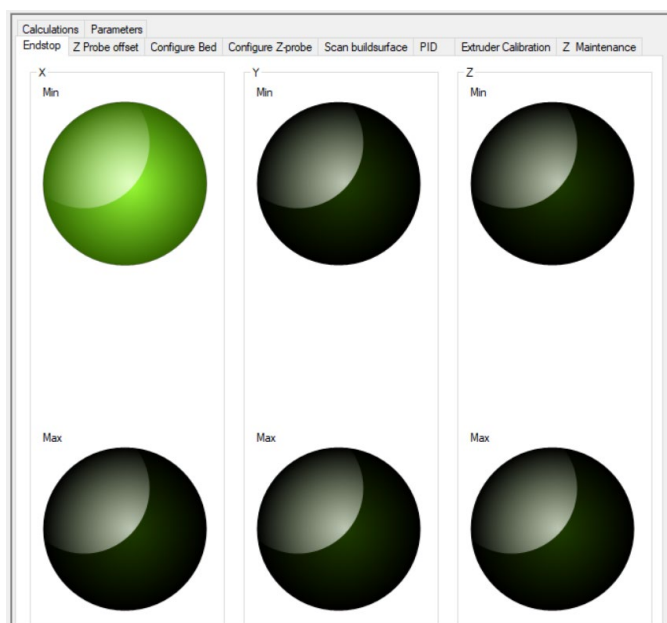
Όλοι οι διακόπτες συνδέθηκαν στην πλακέτα του RAMPS με θηλυκά dupont βύσματα στις θέσεις των endstop switches που αφορούν τις min θέσεις, ενώ οι καλωδιώσεις επιμηκύνθηκαν με κομμάτια από την καλωδίωση των ηλεκτρονικών του εκτυπωτή.

Οι μηχανικοί διακόπτες συνδέονται στα pins του RAMPS ανεξαρτήτως πολικότητας. Αντιθέτως, για τον οπτικό διακόπτη αναγνωρίστηκαν αρχικά οι επαφές του, οι οποίες αποτελούνται από το Vcc, το Gnd και το Signal και συνδέθηκαν στη θέση του X min endstop στα αντίστοιχα pins.



Εικόνα 69: Optical encoder pinout

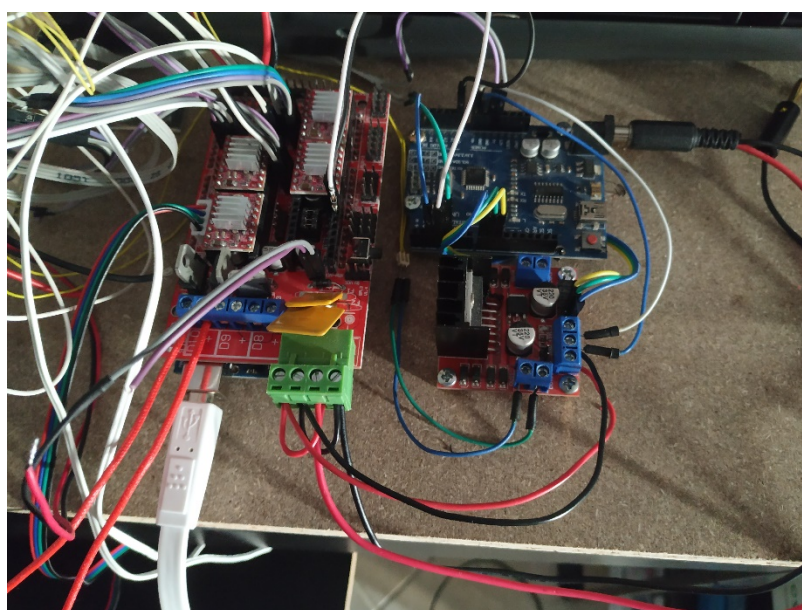
Για την εύρεση της θέσης τοποθέτησης των διακόπτων, αρχικά έγινε σύνδεση του Arduino Mega με το λογισμικό Marlin 3d Printer Tool και, αφού κινήθηκαν και οι τρεις άξονες στην αρχική τους θέση, υπολογίστηκε η θέση τοποθέτησης στο σημείο στο οποίο ενεργοποιούνται η φωτεινή ένδειξη trigger στο tab “Endstop”.



Εικόνα 70: Tab ένδειξης των endstop switches status στο Marlin 3d Printer Tool

5.3.6 Τοποθέτηση ηλεκτρονικών

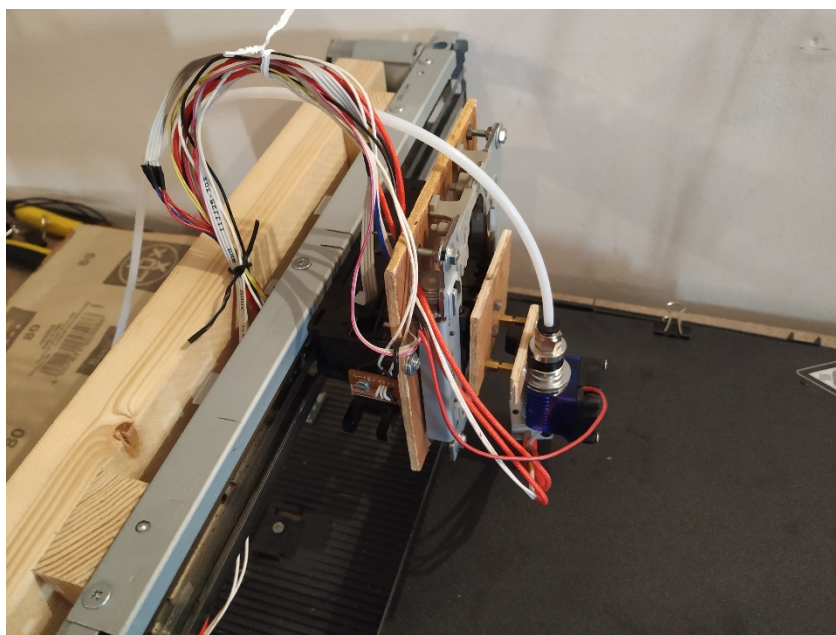
Οι πλακέτες του Arduino Mega, Ramps, Arduino Uno και του Motor driver τοποθετήθηκαν πάνω στην ξύλινη επιφάνεια της βάσης. Το Arduino Mega και το Ramps είναι μαζί ενωμένα και τοποθετήθηκαν κοντά στο καδρόνι στήριξης της γέφυρας, ώστε όλα τα καλώδια από τα εξαρτήματα των παρελκομένων να έχουν το μικρότερο μήκος. Δίπλα του ακριβώς τοποθετήθηκαν οι άλλες δύο πλακέτες. Όλες στηρίχθηκαν σε βίδες βάσης από motherboard, ώστε να έχουν κενό στο κάτω μέρος του για καλύτερη κυκλοφορία του αέρα.



Εικόνα 71: Τοποθέτηση ελεγκτών επί της μοριοσανίδας

5.3.7 Δρομολόγηση καλωδιώσεων

Όλα τα καλώδια πιάστηκαν ενώθηκαν με δεματικά καλωδίων που προήλθαν από συσκευασίες ηλεκτρονικών συσκευών. Τα καλώδια της γέφυρας, αφού μετρήθηκε πρώτα το απαιτούμενο μήκος ώστε αυτή να κινείται ελεύθερα σε όλη της τη διαδρομή, περάστηκαν ανάμεσα από τους γάντζους στήριξης των καλωδίων και στερεώθηκαν σε έναν από αυτούς. Μαζί με αυτά πιάστηκε και το καλώδιο τροφοδοσίας του DC Motor.



Εικόνα 72: Δρομολόγηση καλωδίων κεφαλής εκτύπωσης

Τα καλώδια της πλατφόρμας εκτύπωσης ενώθηκαν και αυτά όλα μαζί με την ίδια διαδικασία, ώστε και αυτή να κινείται χωρίς παρεμπόδιση. Το καλώδιο του endstop switch κρατήθηκε πάνω στην κεφαλή του scanner με κόλλα από θερμοπίστολο. Το σύνολο των καλωδίων στηρίχθηκε στις σιδερένιες γωνίες που χρησιμοποιήθηκαν για την ενεργοποίηση του optical switch του άξονα X.

5.3.8 Extruder and filament placement

Για τον extruder επιλέχθηκε η διάταξη του Bowden, ώστε να μειωθεί το βάρος που θα απαιτούνταν να κινήσει το stepper motor του DVD-Rom. Σε αυτήν, ο stepper motor, που ωθεί το filament προς το hot end μέσα από ένα PTFE tube, τοποθετείται σε άλλο μέρος και όχι από πάνω του. Ωστόσο, όσο πιο μεγάλη είναι η απόσταση μεταξύ τους, τόσο μεγαλύτερες ανοχές αποκτάει το filament μέσα στο PTFE tube και δημιουργεί προβλήματα κατά την εκτύπωση.

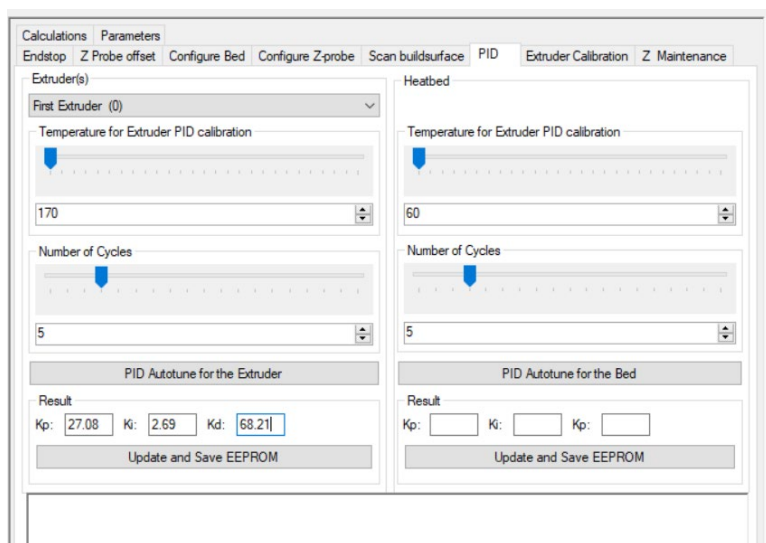
Για τον ανωτέρω λόγο, ο extruder τοποθετήθηκε πάνω στο καδρόνι της γέφυρας του άξονα X, ώστε να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη η απόσταση από το hot end και σε τέτοιο μέρος ώστε να μην εμποδίζεται η κίνηση της κεφαλής εκτύπωσης. Επίσης, θα πρέπει να είναι πολύ καλά στερεωμένος, ώστε να μην φεύγει από τη θέση του.

Η βάση στήριξης του καρουλιού του filament τοποθετήθηκε στον κενό χώρο ανάμεσα στις πλακέτες των ηλεκτρονικών, ώστε να παραμείνει μέσα στα πλαίσια της βάσης.

5.3.9 Ρύθμιση hot end και heated bed PID

Για τη διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας των hot end και heated bed, το Marlin χρησιμοποιεί PID controller, μέσω FET. Αυτό διαθέτει διαδικασία autotune, κατά την οποία εκτελούνται συγκεκριμένοι κύκλοι αυξομειώσης της θερμοκρασία, ώστε να εξαχθούν αυτόματα οι τιμές P, I και D.

Αφού συνδεθεί το τροφοδοτικό και συνδεθεί το Arduino MEGA με το Marlin 3d Printer Tool, από το tab PID επιλέγεται το κουμπί PID Autotune for the Extruder. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας, οι υπολογισμένες τιμές προβάλλονται στο πεδίο Result. Και στη συνέχεια επιλέγεται Update and Save EEPROM, ώστε να αποθηκευτούν στη μνήμη του Arduino. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για το heated bed επιλέγοντας το κουμπί PID Autotune for the Bed.



Εικόνα 73: Hot end PID autotune

Ένας δεύτερος τρόπος είναι μέσω G commands. Μέσα από το PronterFace, εκτελείται το autotune του hot end με την εντολή `M303 E0 S215 C8`, όπου `M303` είναι η εντολή του autotune, `E0` επιλέγει το hot end, `S190` θέτει τη θερμοκρασία-στόχο στους 190°C και `C8` ορίζει 8 κύκλους εκτέλεσης. Μετά το πέρας της διαδικασίας, στο παράθυρο προβολής κατάστασης εμφανίζονται οι τελικές τιμές PID που

υπολογίστηκαν. Με την εντολή `M301`, ακολουθούμενη από τις ανωτέρω τιμές, αποθηκεύονται στην EEPROM του Arduino.

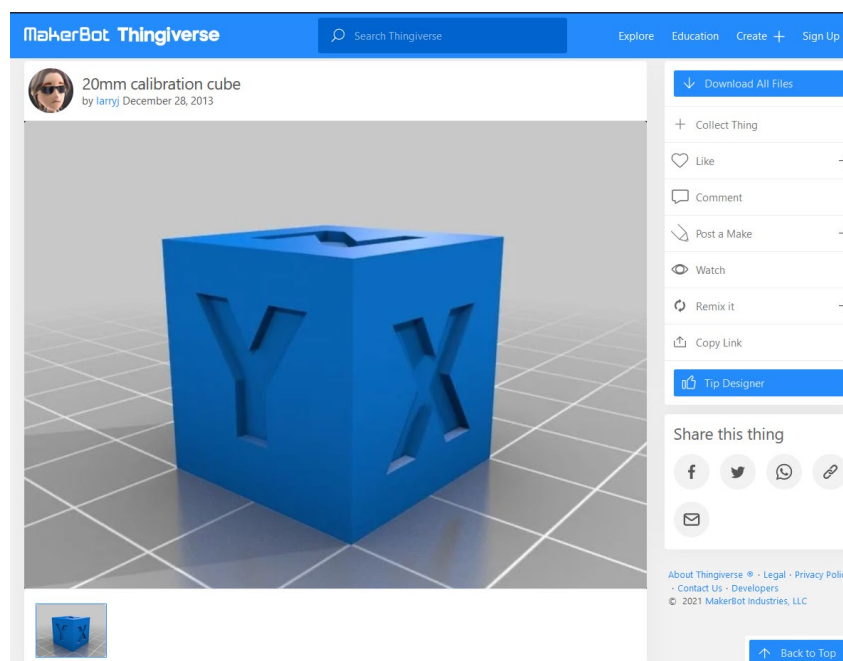
Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για την εξαγωγή των παραμέτρων του heated bed, με τη διαφορά πως στην εντολή εκτέλεσης του autotune επιλέγεται `E-1`

6 Λειτουργία και σύγκριση

6.1 Διαδικασία εκτύπωσης

Το πρώτο βήμα είναι η σχεδίαση του αντικειμένου σε τρισδιάστατο μοντέλο. Ωστόσο, η συγκεκριμένη διαδικασία είναι εκτός του scope της συγκεκριμένης εργασίας.

Για την επίδειξη της λειτουργίας του εκτυπωτή χρησιμοποιήθηκε ένα έτοιμο μοντέλο από τον ιστοτόπο thingiverse.com. Επιλέχθηκε το 20mm calibration cube του χρήστη larryj. Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει σχεδιασθεί ώστε να κάνει χρήση όλων των δυνατοτήτων του εκτυπωτή ώστε να είναι δυνατή η ρύθμισή του σύμφωνα με το τελικό αποτέλεσμα.

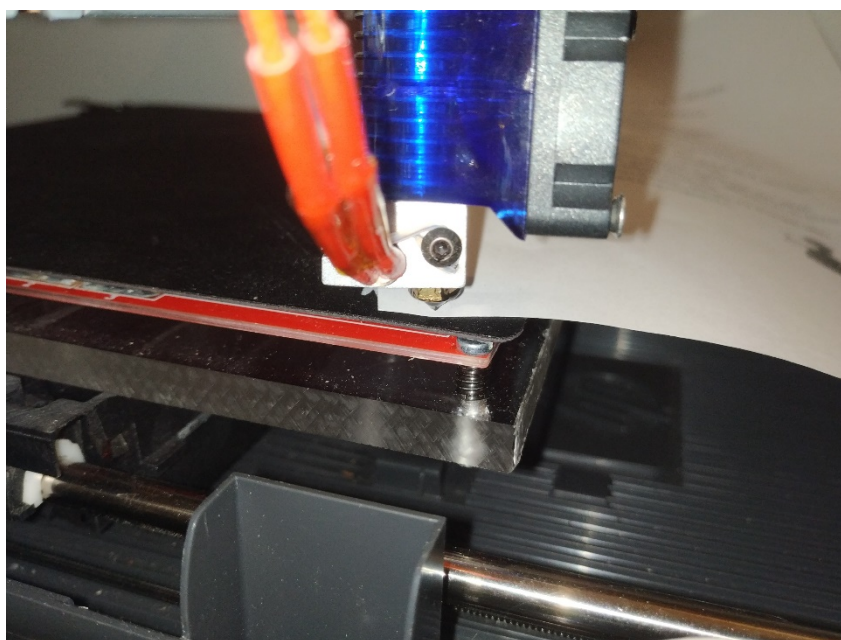


Εικόνα 74: Το μοντέλο 20mm calibration cube

Το διατιθέμενο αρχείο είναι σε μορφή stl. Για τη μετατροπή του σε g code χρησιμοποιείται το Cura. Αφού φορτωθεί το αρχείο stl, επιλέγονται οι ρυθμίσεις εκτύπωσης. Το layer height ρυθμίστηκε στα 0.2mm, το ποσοστό πλήρωσης (infill density) στο 20%, η θερμοκρασία εκτύπωσης στους 185°C ενώ του heated bed στους XX°C και η ταχύτητα στα 50mm/sec. Πατώντας το κουμπί slice δημιουργείται το αρχείο gcode και αποθηκεύεται στον υπολογιστή.

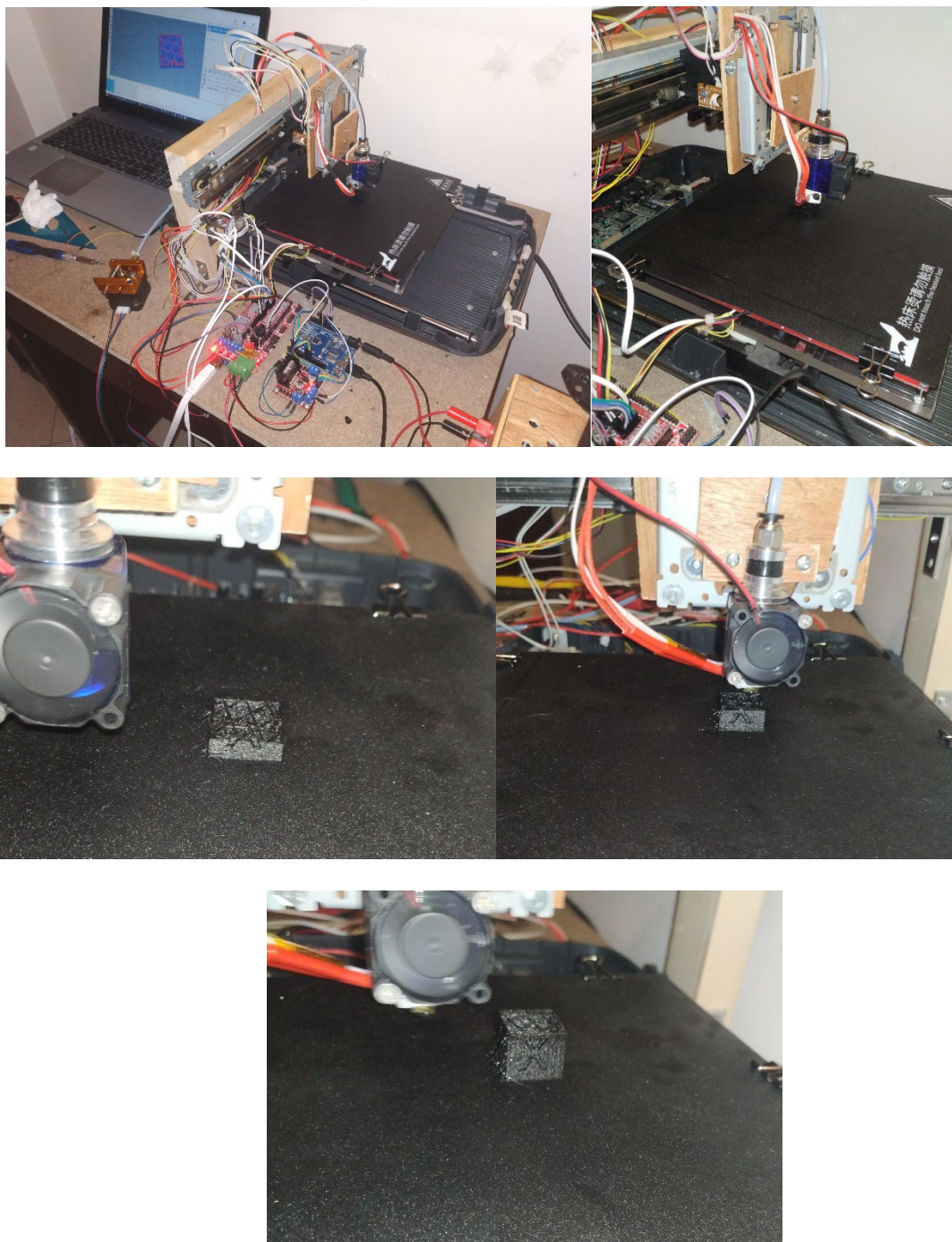
Ο εκτυπωτής συνδέεται στο τροφοδοτικό, το Ramps στην έξοδο των 12V και το Arduino UNO στην έξοδο των 5V, ενώ το Arduino MEGA, μέσω καλωδίου USB, στον υπολογιστή. Στη συνέχεια, μέσα από το Pronterface επιτυγχάνεται η σύνδεση με τον εκτυπωτή.

Το επόμενο βήμα είναι το bed leveling, ώστε η επιφάνεια εκτύπωσης να είναι παράλληλη προς την κεφαλή εκτύπωσης. Εκτελείται η διαδικασία homing και μετά την ολοκλήρωσή της, απενεργοποιούνται τα stepper motors με την εντολή M18. Η κεφαλή τοποθετείται χειροκίνητα σε κάθε γωνία της επιφάνειας εκτύπωσης και με τη βοήθεια ενός χαρτιού τύπου A4 ελέγχεται το διάκενο μεταξύ nozzle και heated bed. Το χαρτί θα πρέπει να περνάει με ελαφρά δυσκολία ανάμεσά τους, αλλιώς γίνεται η κατάλληλη διόρθωση ρυθμίζοντας το ύψος του heated bed μέσω των βιδών που το στερεώνουν στο Plexiglas.



Εικόνα 75: Διαδικασία του bed leveling

Το αρχείο g code που δημιουργήθηκε φορτώνεται στο PronterFace και πατώντας το κουμπί Print πάνω από την εικόνα του αντικειμένου, αυτό αποστέλλεται στον εκτυπωτή. Αυτός, αφού εκτελέσει τη διαδικασία του homing και τα hot end και heated bed φτάσουν στην επιθυμητή θερμοκρασία, ξεκινάει την εκτύπωση του αντικειμένου.



Εικόνα 76: Διαδικασία εκτύπωσης

6.2 Σύγκριση

Για την αξιολόγηση του εκτυπωτή, σε σχέση με άλλα προϊόντα της αγοράς, επιλέχθηκε να γίνει σύγκριση με δύο μοντέλα, τα οποία να έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά. Έτσι, επιλέχθηκε ο Ender 3 της εταιρίας Creality και ο Mega Zero

της εταιρίας Anycubic. Και οι δύο προορίζονται για οικιακή χρήση, είναι σχεδιασμένο βάση του καρτεσιανού μοντέλου και χρησιμοποιούν τη μέθοδο FDM.

6.2.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά και των τριών μοντέλων:

	Custom	Ender 3	Mega Zero
Build volume	220 x 220 x 38 mm	220 x 220 x 250 mm	220 x 220 x 250 mm
Layer height	0.1-0.4mm	0.1-0.4mm	0.1-0.4mm
Nozzle	0.4mm	0.4mm	0.4mm
Filament diameter	1.75 mm	1.75 mm	1.75 mm
Supported materials	ABS/PLA	ABS/PLA, WOOD, FLEXIBLE, Carbon firber	PLA, TPU, HIPS
Max travel speed	100 mm/s	180 mm/s	100mm/s
Extruder	Bowden	Bowden	Bowden
Safety features	2 thermistors	3 thermistors	N/A
LCD Screen	N/A	Monochromatic LCD	Monochromatic LCD
Calibration	Manual	Manual	Manual
Print medium	USB	USB, MicroSD card	USB, SD card
Size	500 x 500 x 425mm	440 x 410 x 465mm	504 x 396 x 607mm
Weight	7.2kg	8kg	6.4kg

Πίνακας 4: Σύγκριση τεχνικών χαρακτηριστικών

Από τα ανωτέρω φαίνονται χαρακτηριστικά οι ελαφρώς υποδεέστερες δυνατότητες που παρέχει ο εκτυπωτής, σε σχέση με αυτούς της αγοράς, κυρίως στο διαθέσιμο ύψος εκτύπωσης. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός πως αυτός κατασκευάστηκε με υλικά από άλλες συσκευές, τον αντικειμενικό σκοπό που στόχο είχε την επίδειξη της δυνατότητας κατασκευής του, την απαίτηση χαμηλού κόστους, αλλά και το γεγονός πως αυτός έχει τη δυνατότητα για περαιτέρω βελτιώσεις, όπως θα αναφερθεί παρακάτω, με μικρό σχετικά κόστος μπορεί να φτάσει στο ίδιο επίπεδο με του εμπορικούς.

6.2.2 Μέγεθος

Καθώς ο εκτυπωτής προορίζεται για οικιακή χρήση, σημαντικό είναι και το μέγεθος που αυτός έχει. Από τον πίνακα 4 φαίνεται πως ο εκτυπωτής που κατασκευάστηκε έχει ελαφρώς μεγαλύτερες διαστάσεις από τους άλλους δύο, χωρίς ωστόσο να τον καθιστούν δύσκολο στη μεταφορά και την τοποθέτηση επί γραφείου. Επίσης, το βάρος του κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα.

6.2.3 Κόστος

Το συνολικό κόστος του εκτυπωτή (Bill Of Materials - BOM) από τα επιπλέον εξαρτήματα που απαιτήθηκε να προμηθευτούν από το εμπόριο, φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Είδος	Ποσότητα	Κόστος
Arduino MEGA	1	13,99€
Arduino UNO	1	3,14€
Ramps 1.4	1	8,06€
L298N driver module	1	3,11€
Extruder Bracket	1	4,13€
A4988 Driver Module StepStick Stepper Motor	2	8,99€

NEMA17 17HS3401S 42 Stepper Motor	1	8,55€
3D Printer Magnetic Heat Bed Sticker	1	15,76€
MK2B Heat Bed	1	7,84€
0.4mm J-head V6 Hotend Extruder	1	27,41€
Reprap NTC 3950 Thermistor 100K	1	3,39€
2,5mm Nuts and Bolts	40	2,5€
Μοριοσανίδα 100 x 50	1	18€
Καδρόνι πλανισμένο 30 x 45	1	6,5€
Σύνολο		121,37€

Πίνακας 5: Bill Of Materials

Σχεδόν όλα τα εξαρτήματα προμηθεύτηκαν από το ebay.com, εκτός από τις βίδες και την ξυλεία.

Όσον αφορά τα δύο εμπορικά μοντέλα που επιλέχθηκαν για τη σύγκριση, η μέση τιμή του Ender 3 κυμαίνεται στα 230€, ενώ του Mega Zero στα 219€. Ο εκτυπωτής που κατασκευάστηκε έχει χαμηλότερη τιμή της τάξης των 100 € και αυτό έγκειται στο γεγονός πως πολλά εξαρτήματα προήλθαν από συσκευές που αποκτήθηκαν με μηδενικό κόστος.

6.2.4 Τελικό προϊόν

Σύγκριση στο τελικό προϊόν εκτύπωσης δεν δύναται να επιτευχθεί, καθώς δεν διατίθεντο οι δύο εμπορικοί εκτυπωτές. Ωστόσο, μετά από έρευνα στο διαδίκτυο, καθίσταται σαφές πως και οι δύο αυτοί εκτυπωτές απαιτούν εκτενή

ρύθμιση των παραμέτρων τους και υπόκεινται σε αρκετά σφάλματα εκτύπωσης έως ότου το τελικό προϊόν φτάσει τα επιθυμητά επίπεδα.

Όπως φαίνεται στο προηγούμενο κεφάλαιο, το εκτυπωμένο προϊόν του εκτυπωτή που κατασκευάστηκε παρουσιάζει ατέλειες, κυρίως ως προς την υφή της εξωτερικής επιφάνειάς του, ωστόσο, καθίσταται σαφές πως με εκτενέστερη ρύθμιση, κυρίως των μεταβλητών του PID controller, αυτό θα φτάσει στα επίπεδα που αποδίδουν οι εμπορικού τύπου εκτυπωτές.

6.3 Περιθώρια βελτίωσης

Το καλύτερο είναι ο μεγαλύτερος εχθρός του καλού. Έτσι και στη συγκεκριμένη περίπτωση, βελτιώσεις μπορούν να γίνουν στην κατασκευή ώστε να βελτιωθεί η απόδοσή της, να μειωθούν οι πιθανότητες εκτέλεσης λάθους αλλά και να χρησιμοποιηθούν ακόμη περισσότερα εξαρτήματα από τις συσκευές.

Για την προστασία των μηχανικών μερών του εκτυπωτή σε περίπτωση λανθασμένου υπολογισμού από τη σχεδίαση του αντικειμένου ή από πιθανή απώλεια βημάτων κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης, μπορούν να τοποθετηθούν endstop switches στο μέγιστο σημείο διαδρομής όλων των αξόνων.

Το Marlin έχει τη δυνατότητα σύνδεσης οθόνης LCD για την προβολή των στοιχείων της εκτύπωσης, θερμοκρασία nozzle, θέση αξόνων, προβολή ρυθμίσεων της EEPROM κ.α. Επίσης, με τα ενσωματωμένα buttons που αυτές συνήθως διαθέτουν, αποστέλλονται εντολές G code στον ελεγκτή. Με τέτοιου είδους οθόνες είναι συνήθως εξοπλισμένοι οι εκτυπωτές χαρτιού και τα πολυμηχανήματα. Buttons διαθέτουν σχεδόν όλες οι συσκευές, οπότε και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον σκοπό αυτό.

Δυνατότητα βελτίωσης υπάρχει και στον διατιθέμενο χώρο εκτύπωσης. Η πλατφόρμα, με τροποποίηση του τρόπου στήριξης της γέφυρας του άξονα X, δύναται να αυξηθεί μέχρι και 38x38cm, κάνοντας χρήση όλης της διατιθέμενης διαδρομής της βάσης του scanner αλλά και του οπτικού διακόπτη που διαθέτει στην πλακέτα. Επίσης, για να αυξηθεί το διατιθέμενο ύψος εκτύπωσης, ο άξονας Z μπορεί να υλοποιηθεί με τη χρήση άλλη μιας γέφυρας εκτύπωσης, όπως του άξονα X, ή με χρήση μόνο των steel rods και των κινητήρων που μπορούν να βρεθούν μέσα στις συσκευές. Με αυτόν τον τρόπο το ύψος εκτύπωσης μπορεί να αυξηθεί

έως και τα 40cm, από τα υπάρχοντα 3.8cm, το οποίο όπως αναφέρθηκε έγινε για σκοπούς επίδειξης.

Η ταχύτητα της εκτύπωσης περιορίζεται από τη μέγιστη ταχύτητα του stepper motor του scanner, καθώς αυτή έχει σχεδιασθεί να κινεί μόνο την κεφαλή ανάγνωσης, αλλάζοντας το stepper motor με άλλο π.χ. NEMA 17, θα αυξηθεί η διαθέσιμη ταχύτητα και, κατ' επέκταση, θα μειωθεί ο απαιτούμενος χρόνος της συνολικής εκτύπωσης, αλλά και το ωφέλιμο βάρος που αυτός μπορεί να κινήσει, σε περίπτωση που απαιτηθεί να αυξηθεί η ωφέλιμη επιφάνεια εκτύπωσης.

Τέλος, για να αυξηθεί το ποσοστό χρησιμοποίησης των παρελκομένων και να μειωθεί το τελικό κόστος της κατασκευής, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν οι πλακέτες των ηλεκτρονικών όλων αυτών των συσκευών, στη θέση κυρίως των stepper drivers και των ελεγκτών των DC motor. Ωστόσο, επειδή η χρήση τους απευθύνεται σε εργοστασιακό επίπεδο, είναι αρκετά δύσκολο να βρεθεί βιβλιογραφία για τον τρόπο λειτουργίας τους (datasheets) στο διαδίκτυο. Εκτιμάται ωστόσο πως, καθώς τα ηλεκτρονικά που διαθέτουν είναι παλαιότερης τεχνολογίας, οι εταιρίες κατασκευής τους πιθανόν να είναι διατεθειμένες να παρέχουν τις συγκεκριμένες πληροφορίες.

7 Επίλογος

Η τεχνολογική πρόοδος, η οποία προχωράει με αλματώδη βήματα τις τελευταίες δεκαετίες, σε συνδυασμό με τη μείωση του κόστους κατασκευής των ηλεκτρονικών συσκευών, αλλά και της ολοένα αυξανόμενης απαίτησης για ποιοτικότερο αποδιδόμενο αποτέλεσμα των τελικών προϊόντων, έχει δημιουργήσει τεράστιες ποσότητες άχρηστων μη χρησιμοποιούμενων συσκευών. Το φαινόμενο αυτό γιγαντώνεται μέρα με τη μέρα, συμβάλλοντας στη συγκέντρωση μη διασπώμενων υλικών στο περιβάλλον και, τελικά, στην όξυνση του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής.

Καθώς οι περισσότερες συσκευές που απορρίπτονται είναι είτε πλήρως είτε μερικώς λειτουργικές, υπάρχει η δυνατότητα ανακύκλωσης των εξαρτημάτων τους μέσω της χρησιμοποίησής τους για την κατασκευή άλλων συσκευών. Στην παρούσα εργασία υποδείχθηκε ένας από τους πολλούς τρόπους επαναχρησιμοποίησης πολλών εξ αυτών, με ταυτόχρονα την υψηλή απόδοση και την πολύ καλή ποιότητα του τελικού προϊόντος.

Ως τελικό συμπέρασμα μπορεί να εξαχθεί πως η κατασκευή ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή από αποσυρθείσες ηλεκτρονικές συσκευές είναι οικονομικά συμφέρουσα, δίνοντας την ευκαιρία απόκτησης γνώσεων επί θεμάτων ηλεκτρονικής, ηλεκτρολογικής και μηχανολογικής, ενώ βοηθάει στην ελάττωση του γεγονότος της απόρριψης αυτών στο περιβάλλον, συμβάλλοντας στη μάχη εναντίον της κλιματικής αλλαγής, την οποία έχει επιφέρει ο άνθρωπος και τόσο απειλεί τη ζωή πάνω στον πλανήτη μας.

Βιβλιογραφία

Ακολουθούν οι βιβλιογραφικές αναφορές (πηγές) της Εργασίας.

- 3D Printing in Chemical Sciences: Applications Across Chemistry Authors: Vipul Gupta, Pavel Nesterenko, Brett Paull
- Mastering 3D Printing: A Guide to Modeling, Printing, and Prototyping, Joan Horvath
- Don't Be a Total Waster (of plastic) Calibrate Your Desktop 3D, Book 2, By Mr. Duncan Weir
- Could 3D Printing Change the World?, Thomas Campbell Christopher Williams Olga Ivanova Banning Garrett
- The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications, Ben Redwood, Filemon Schöffner, Brian Garret
- An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications, N. Shahrubudina, T. C. Leea, R.Ramlan
- www.medicaldevice-network.com
- www.dezeen.com
- www.flanewsonline.com
- www.simplify3d.com
- www.3dexpert.gr
- <https://all3dp.com/>

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.