

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΑΠΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ



ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ 3Δ ΕΚΤΥΠΩΤΗ ΜΕ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΧΑΜΗΛΟΥ
ΚΟΣΤΟΥΣ**



ΘΕΟΔΩΡΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΜΠΟΛΑΝΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ - MSc.,
Μηχανικός Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος

ΧΑΝΙΑ
ΜΑΪΟΣ 2018

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

**ΜΠΟΛΑΝΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ
ΜΑΡΑΒΕΛΑΚΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ
ΚΑΤΣΙΓΙΑΝΝΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ**

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	2
Πίνακας εικόνων	4
Περίληψη	7
ABSTRACT	8
Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή – Τεχνολογίες 3D εκτύπωσης και ο μικροελεγκτής Arduino	9
1.1 3D εκτυπωτές	9
1.2 Ταχεία πρωτοτυποποίηση	10
1.3 Πώς λειτουργεί ο 3D εκτυπωτής	10
1.4 Υλικά εκτύπωσης	12
1.4.1 PLA (Polylactic acid)	12
1.4.2 ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)	13
1.4.3 Full Color Sandstone	13
1.4.4 Nylon Powder	14
1.4.5 High Resolution SLA	14
1.4.6 Flexible	15
1.4.7 Polycarbonate	15
1.4.8 Z-Ultrat	16
1.4.9 Polymax	16
1.4.10 Wood PLA	17
1.4.11 Metal PLA	17
1.4.12 Z-GLASS	18
1.4.13 Z-HIPS	18
1.4.14 Glow in the Dark PLA	19
1.4.15 NYLON	19
1.5 Μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης	20
1.5.1 Στερεολιθογραφία	20
1.5.2 Fused Deposition Modelling (FDM) / Fused Filament Fabrication (FFF) ...	21
1.5.3 Laser Sintering (LS) / Laser Melting (LM)	22
1.5.4 Inkjet	22
1.5.5 Digital Light Processing (DLP)	23
1.5.6 Laminated Object Manufacturing (LOM)	24

1.6 Εφαρμογές τρισδιάστατης εκτύπωσης	25
1.6.1 Ιατρική τεχνολογία	25
1.6.2 Τέχνη	26
1.6.3 Βιομηχανική τεχνολογία	26
1.6.4 Τεχνολογία οπλικών συστημάτων	27
1.6.5 Καθημερινή χρήση	28
1.7 Ο μικροελεγκτής Arduino	29
1.8 Οι εκδοχές του Arduino Hardware που έχουν χρησιμοποιηθεί εμπορικά	30
1.9 Ο μικροελεγκτής Arduino Uno	34
1.9.1 Τα μέρη του Arduino Uno	34
1.9.2 Σειριακή Θύρα	36
1.9.3 Χαρακτηριστικά του Arduino	36
1.9.4 Τροφοδοσία	36
1.9.5 Επικοινωνία	37
Κεφάλαιο 2^ο: GRBL Λογισμικό, MakerCam και μοντέλα εκτύπωσης.....	38
2.1 GRBL Λογισμικό.....	38
2.1.1 Απλά παραδείγματα G-Code.....	38
2.1.2 Περιορισμοί.....	39
2.2 Παρουσίαση της χρήσης του GRBL λογισμικού	39
2.3 MakerCam λογισμικό	42
2.3.1 Παρουσίαση της χρήσης του λογισμικού MakerCam.....	43
Κεφάλαιο 3^ο: Ανάπτυξη του 3Δ εκτυπωτή με τη χρήση του μικροελεγκτή	
Arduino.....	45
3.1 Υλικά για την κατασκευή.....	45
3.2 Ανάπτυξη του 3Δ εκτυπωτή.....	46
3.3 Προγραμματισμός 3Δ εκτυπωτή	54
3.4 Σχεδιασμός μοντέλων με χρήση Makercam	55
3.6 Εκτύπωση μοντέλου	62
3.7 Τα εκτυπωμένα μοντέλα	65
G-Codes εκτυπωμένων μοντέλων	68
Συμπεράσματα	74
Βιβλιογραφία	75

Πίνακας εικόνων

Εικόνα 1: 3Δ εκτυπωτής Formiga P110	9
Εικόνα 2: Λειτουργία 3Δ εκτύπωσης.....	11
Εικόνα 3: Υλικό εκτύπωσης PLA	12
Εικόνα 4: Υλικό εκτύπωσης ABS.....	13
Εικόνα 5: Υλικό εκτύπωσης Full Color Sandstone	13
Εικόνα 6: Υλικό Εκτύπωσης Nylon Powder	14
Εικόνα 7: Υλικό Εκτύπωσης High Resolution SLA.....	14
Εικόνα 8: Υλικό Εκτύπωσης Flexible	15
Εικόνα 9: Υλικό Εκτύπωσης Polycarbonate	15
Εικόνα 10: Υλικό Εκτύπωσης Z-Ultrat	16
Εικόνα 11: Υλικό Εκτύπωσης Polymax	16
Εικόνα 12: Υλικό Εκτύπωσης Wood PLA.....	17
Εικόνα 13: Υλικό Εκτύπωσης Metal PLA	17
Εικόνα 14: Υλικό Εκτύπωσης Z-GLASS	18
Εικόνα 15: Υλικό Εκτύπωσης Z-HIPS.....	18
Εικόνα 16: Υλικό Εκτύπωσης Glow In The Dark PLA.....	19
Εικόνα 17: Υλικό Εκτύπωσης Nylon	19
Εικόνα 18: Διαδικασία Στερεολιθογραφία.....	20
Εικόνα 19: Διαδικασία FDM / FFF	21
Εικόνα 20: Διαδικασία LS / LM.....	22
Εικόνα 21: Διαδικασία Blinder Jetting	22
Εικόνα 22: Διαδικασία DLP	23
Εικόνα 23: Διαδικασία LOM.....	24
Εικόνα 24: Προσθετικό Μέλος από 3Δ Εκτύπωση	25
Εικόνα 25: 3Δ Εκτύπωση Γλυπτού	26
Εικόνα 26: Το Πρώτο Τρισδιάστατα Εκτυπωμένο, Λειτουργικό Αυτοκίνητο ...	26
Εικόνα 27: 3Δ Πιστόλι.....	27
Εικόνα 28: 3Δ Γλάστρες	28
Εικόνα 29: Μικροελεγκτής Arduino MEGA ADK	29
Εικόνα 30: Arduino Serial.....	31
Εικόνα 31: Arduino Extreme.....	31
Εικόνα 32: Arduino Mini	32
Εικόνα 33: Arduino Nano	32
Εικόνα 34: LilyPad Arduino.....	32
Εικόνα 35: Arduino NG.....	32
Εικόνα 36: Arduino Bluetooth.....	32
Εικόνα 37: Arduino Diecimila	32
Εικόνα 38: Arduino Duemilanove	33
Εικόνα 39: Arduino Mega.....	33
Εικόνα 40: Arduino Uno	33
Εικόνα 41: Arduino Mega2560	33
Εικόνα 42: Arduino Leonardo.....	33

Εικόνα 43: Arduino Esplora	33
Εικόνα 44: Arduino Due	34
Εικόνα 45: Μέρη της πλατφόρμας Arduino Uno	35
Εικόνα 46: Το GRBL αφού έχει ενεργοποιηθεί.....	39
Εικόνα 47: Το μενού του Step Size	40
Εικόνα 48: Ο αριθμητικός πίνακας	40
Εικόνα 49: Η μεταβολή του άξονα X ως προς 1	40
Εικόνα 50: Η εντολή στο πεδίο Command και η ανάλογη μεταβολή	41
Εικόνα 51: Η καρτέλα Visualizer με το σχήμα	41
Εικόνα 52: Οι εντολές Zero Position και Go Home	42
Εικόνα 53: Η θέση ης κεφαλής, ο κώδικας και η εξέλιξη εκτύπωσης	42
Εικόνα 54: Αρχική εικόνα λογισμικού	43
Εικόνα 55: Η εργαλειοθήκη.....	43
Εικόνα 56: Τα διαθέσιμα μενού.....	44
Εικόνα 57: Εναλλαγή από ίντσες σε εκατοστά	44
Εικόνα 58: Ανοιχτό CD-ROM με τελικό αποτέλεσμα αυτό που χρησιμοποιείται στην ανάπτυξη του 3Δ εκτυπωτή.....	46
Εικόνα 59: CD-ROM με την ανάλογη χρήση καλωδίων.....	46
Εικόνα 60: Οι τρεις άξονες από CD-ROMs	47
Εικόνα 61: Ο άξονα X και Y πάνω στα μεταλλικά κουτιά.....	47
Εικόνα 62: Η ιδιοκατασκευή σε σχήμα L με τους X και Y άξονες	48
Εικόνα 63: Τελική μορφή της κατασκευής.....	48
Εικόνα 64: Σχεδιάγραμμα συνδεσμολογίας του άξονα X με το stepper motor driver.....	49
Εικόνα 65: Σχεδιάγραμμα συνδεσμολογίας του άξονα Y με το stepper motor driver.....	49
Εικόνα 66: Σχεδιάγραμμα συνδεσμολογίας του άξονα Z με το stepper motor driver.....	50
Εικόνα 67: Η συνδεσμολογία με το Arduino, τα τρία stepper motor drivers και του τρεις άξονες σχεδιασμένο στο Fritzing Software.....	51
Εικόνα 68: Το βύσμα του τροφοδοτικού με τα καλώδια που χρησιμοποιούνται	52
Εικόνα 69: Η τελική μορφή του 3Δ εκτυπωτή	53
Εικόνα 70: Xloader Software	54
Εικόνα 71: XLoader με το αρχείο .hex	54
Εικόνα 72: Το on-line λογισμικό Makercam	55
Εικόνα 73: Αλλαγή από ίντσες σε εκατοστά.....	55
Εικόνα 74: Η επιφάνεια σχεδίασης όπου θα δημιουργηθεί το σχέδιο	56
Εικόνα 75: Η επιλογή Insert με τα έτοιμα μοντέλα	56
Εικόνα 76: Επιλογή του μήκους και του πλάτους του τετραγώνου	57
Εικόνα 77: Το μοντέλο στη σωστή θέση και σωστό μέγεθος.....	57
Εικόνα 78: Η επιλογή Follow Path Operation	58
Εικόνα 79: Οι σωστές επιλογές στην εντολή Follow path operation	58
Εικόνα 80: Το αποτέλεσμα μετά το OK στο follow path operation	59

Εικόνα 81: Η εντολή calculate all	59
Εικόνα 82: Η εντολή export gcode.....	60
Εικόνα 83: Η επιλογή για να γίνει η εξαγωγή του μοντέλου σε G κώδικα	60
Εικόνα 84: Αρχική μορφή κώδικα	61
Εικόνα 85: Ο κώδικας με τις αλλαγές	61
Εικόνα 86: Αρχική εικόνα του GRBL	62
Εικόνα 87: Το GRBL αφού έχει ενεργοποιηθεί.....	62
Εικόνα 88: Η εντολή Choose file	63
Εικόνα 89: Η Επιλογή του αρχείου .nc	63
Εικόνα 90: Η εμφάνιση του σχεδίου έτοιμο για εκτύπωση	64
Εικόνα 91: Αποτέλεσμα εκτύπωσης.....	64
Εικόνα 92: Εκτυπωμένο μοντέλο σε σχήμα τετράγωνο	65
Εικόνα 93: Εκτυπωμένο μοντέλο σε σχήμα αστεριού	65
Εικόνα 94: Εκτυπωμένο μοντέλο σε σχήμα πολυγώνου	66
Εικόνα 95: Εκτυπωμένο μοντέλο σε σχήμα κύκλου	66



Περίληψη

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η παρουσίαση της κατασκευής και λειτουργίας ενός μικρού 3D εκτυπωτή, χαμηλού κόστους.

Για να ολοκληρωθεί η εργασία αυτή χρειάστηκε η επαφή με το προγραμματισμό και τη κατασκευή ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Επιπλέον χρειάστηκαν εξαρτήματα από παλιούς ηλεκτρονικούς υπολογιστές, ένα “3D μολύβι”, ένας μικροελεγκτής Arduino και διάφορα υλικά καθημερινής χρήσης.

Πιο αναλυτικά, στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια γενική αναφορά στους 3D εκτυπωτές και στο μικροελεγκτή Arduino. Στη συνέχεια, στο κεφάλαιο δύο αναλύονται το λογισμικό GRBL που είναι για την κίνηση των αξόνων της CNC μηχανής όπως επίσης και το λογισμικό σχεδίασης μοντέλων MakerCam τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή. Στο κεφάλαιο τρία, αναλύεται η κατασκευή του 3D εκτυπωτή, καθώς επίσης και όλα τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, ακόμα παραθέτονται και τα παραδείγματα των μοντέλων που δημιουργήθηκαν. Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται οι G-codes των εκτυπωμένων μοντέλων όπως επίσης και τα συμπεράσματα από τη κατασκευή και χρήση του παραπάνω χαμηλού κόστους 3D εκτυπωτή.

Λέξεις Κλειδιά: 3D εκτύπωση, 3D εκτυπωτές, Arduino, μικροελεγκτής, GRBL, MakerCam, χαμηλό κόστος.

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to present the construction and operation of a small, low cost 3D printer.

In order to complete this task, it was required to get in touch with programming and manufacture of electronic circuits. In addition, components from old computers were used, such as a 3D pen, an Arduino microcontroller and a variety of other materials that are widely used on daily basis.

More specifically, the first chapter is a general introduction to 3D printers and the Arduino microcontroller. In the second chapter there is the analysis of the GRBL software that operates CNC machines as well as the MakerCam modeling software, both software's used in this work. The third chapter is an extensive reference to the construction of the 3D printer, all the materials that were used and examples of the created models. The fourth and final chapter of this thesis refers to the G-codes of the created model and the conclusions from the construction and use of the above 3D low-cost printer.

Keywords: 3D printing, 3D printer, Arduino, microcontroller, GRBL, MakerCam, low cost printer



Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή – Τεχνολογίες 3D εκτύπωσης και ο μικροελεγκτής Arduino

1.1 3D εκτυπωτές

Η τρισδιάστατη εκτύπωση (3D Printing) είναι μία μέθοδος προσθετικής κατασκευής, στην οποία δημιουργούνται αντικείμενα μέσω επαναλαμβανόμενων στρώσεων υλικού. Στην τρισδιάστατη γίνεται χρήση διάφορων τύπων υλικών, κατά κύριο λόγο κεραμικά και πολυμερή. Σε σύγκριση με άλλους τρόπους προσθετικής κατασκευής, οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές είναι συνήθως ταχύτεροι, φθηνότεροι και ευκολότεροι στη χρήση. Εξαιτίας αυτών πολλοί πιστεύουν ότι στα επόμενα χρόνια η παγκόσμια παραγωγή αγαθών θα οδηγηθεί προς αυτή την τεχνική, αντικαθιστώντας σταδιακά τις παραδοσιακές. Πολλοί πιστεύουν ότι η τρισδιάστατη εκτύπωση θα αποτελέσει μία «νέα βιομηχανική επανάσταση», καθώς η παραγωγική διαδικασία θα είναι ευκολότερα προσβάσιμη από πολλούς, ανοίγοντας τον δρόμο για παραγωγή τοπικής και μικρής κλίμακας, προσαρμοσμένη στις τρέχουσες ανάγκες. Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές χρησιμοποιούνται κυρίως για την κατασκευή φυσικών μοντέλων και πρωτοτύπων από σχεδιαστές, μηχανικούς και ομάδες ανάπτυξης νέων προϊόντων. Έχουν τη δυνατότητα να εκτυπώνουν μέρη και εξαρτήματα από διάφορα μοντέλα, με διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες¹ (Εικόνα 1).



Εικόνα 1: 3D εκτυπωτής Formiga P110
Πηγή: www.3dhubs.com

¹ <https://infoservice.com.gr>, τελευταία πρόσβαση στις 28/2/2018

1.2 Ταχεία πρωτοτυποποίηση

Αποτελεί μια νέα τεχνολογία κατασκευής μοντέλων, στρώμα-στρώμα (layer by layer), που μείωσε το χρόνο κατασκευής μοντέλων κάθε πολυπλοκότητας σε ώρες αντί για ημέρες, εβδομάδες ή ακόμα και μήνες. Αποτελεί πλέον για πολλές εταιρείες έναν απαραίτητο κρίκο στη διαδικασία εξέλιξης των προϊόντων. Η πρώτη εμπορική διαδικασία παρουσιάστηκε στην Έκθεση Autofact στο Detroit, το Νοέμβριο του 1987, από την εταιρεία 3D Systems Inc. Σήμερα υπάρχουν πάνω από 30 διαδικασίες, μερικές από τις οποίες είναι εμπορικές, ενώ άλλες βρίσκονται υπό εξέλιξη σε εργαστήρια έρευνας. Η ακρίβεια έχει βελτιωθεί σημαντικά και οι επιλογές των υλικών είναι σχετικά πολλές. Τα μοντέλα χρησιμοποιούνται όλο και πιο συχνά για λειτουργικές δοκιμές ή για να παράγονται εργαλεία. Είναι αλήθεια πως μπορεί να επιτευχθεί Ταχεία Πρωτοτυποποίηση (RP-Rapid Prototyping)) και με συμβατικές μεθόδους, όπως με μηχανές NC. Παρ' όλα αυτά, ο όρος RP έχει καθιερωθεί να περιγράφει τις νέες τεχνολογίες που κατασκευάζουν μοντέλα προσθέτοντας υλικό και όχι αφαιρώντας².

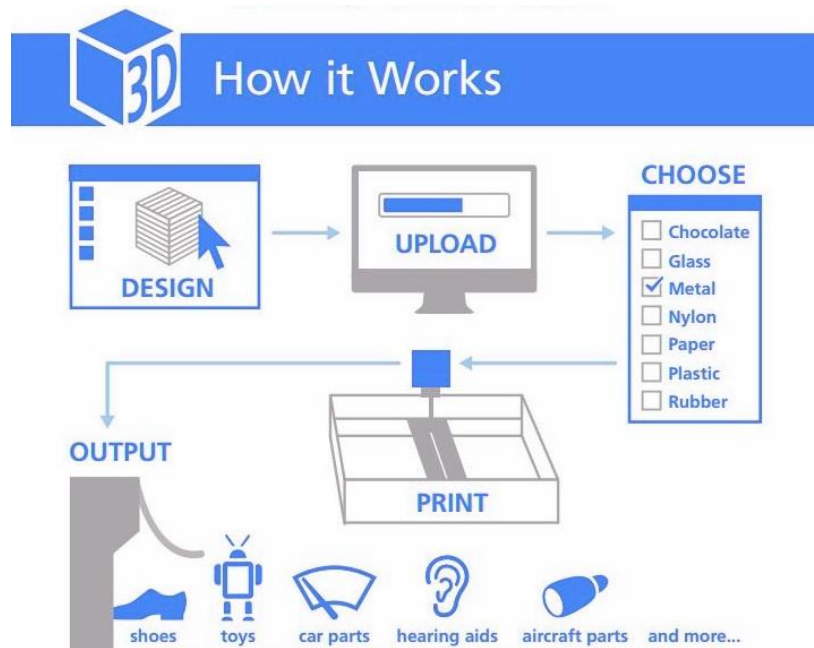
1.3 Πώς λειτουργεί ο 3Δ εκτυπωτής

Η κεντρική ιδέα πίσω από την τρισδιάστατη εκτύπωση -μια φράση που καθιερώθηκε και έγινε γνωστή για την τεχνική της προσθετικής κατασκευής- συναντάται στους σχηματισμούς πετρωμάτων σε μεγάλα βάθη κάτω από τη γη (οι σταγόνες του νερού εναποθέτουν λεπτές στρώσεις μετάλλων σχηματίζοντας σταλακτίτες και σταλαγμίτες), ενώ ένα πιο σύγχρονο παράδειγμα είναι ένα κοινός επιτραπέζιος εκτυπωτής. Όπως ακριβώς ένας εκτυπωτής ψεκασμού μελάνης προσθέτει μεμονωμένες κουκίδες του μελανιού για να σχηματίσουν μια εικόνα, ένας 3Δ εκτυπωτής προσθέτει υλικό μόνο όπου χρειάζεται, ακολουθώντας εντολές από ένα ψηφιακό αρχείο. Η τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής εφαρμόζεται σε εκτυπωτές με διάφορα μεγέθη και σχήματα ανεξάρτητα όμως από το είδος του 3Δ εκτυπωτή ή από το υλικό που χρησιμοποιείται, η διαδικασία της 3Δ εκτύπωσης ακολουθεί τα ίδια βασικά βήματα. Ξεκινά με τη δημιουργία ενός 3Δ σχεδίου από το αντικείμενο που θέλει κανείς να εκτυπώσει, χρησιμοποιώντας ψηφιακό λογισμικό CAD (Computer Aided Design)(Εικόνα 2). Το ψηφιακό μοντέλο μπορεί επίσης να προκύψει μέσω της χρήσης κάποιου τρισδιάστατου σαρωτή είτε κατεβάζοντας απλώς κάποιο αρχείο από το διαδίκτυο.

Η προετοιμασία του εκτυπωτή περιλαμβάνει αρχικά το γέμισμά του με πρώτες ύλες (π.χ. πλαστικά, σκόνες μετάλλων). Καλό θα ήταν να διαλέξει κανείς το υλικό με το οποίο θα επιτύχει καλύτερα τις συγκεκριμένες ιδιότητες που απαιτούνται για το αντικείμενο που θέλει να παράξει. Η ποικιλία των υλικών που χρησιμοποιούνται στους 3Δ εκτυπωτές είναι πολύ μεγάλη, συμπεριλαμβάνει πλαστικά, κεραμικά, ρητίνη, μέταλλα, άμμο, υφάσματα, βιοϋλικά, γυαλί ακόμα και τροφή.

² <http://dml.chania.teicrete.gr>, τελευταία πρόσβαση στις 26/2/2018

Επιπλέον, απαιτείται προετοιμασία της πλατφόρμας κατασκευής (σε ορισμένες περιπτώσεις, ίσως χρειαστεί να καθαριστεί ή να εφαρμόσει μια κόλλα για να αποτραπεί η μετακίνηση και στρέβλωση του αντικειμένου από τη θερμότητα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκτύπωσης). Μόλις φορτωθεί το ψηφιακό μοντέλο στον εκτυπωτή, το μηχάνημα αναλαμβάνει να δημιουργήσει αυτόματα το επιθυμητό αντικείμενο. Ενώ οι διεργασίες εκτύπωσης διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο της τεχνολογίας του εκτυπωτή, η εξώθηση υλικού είναι η πιο κοινή μέθοδος που χρησιμοποιείται στους επιτραπέζιους 3D εκτυπωτές.



Εικόνα 2: Λειτουργία 3D εκτύπωσης
Πηγή: <http://www.techandtrick.com>

Η εξώθηση υλικού λειτουργεί σαν ένα πυροβόλο όπλο κόλλας. Το υλικό εκτύπωσης, είναι κατά κανόνα ένα πλαστικό νήμα, όπου θερμαίνεται μέχρι να υγροποιηθεί και εξωθείται μέσω του ακροφυσίου εκτύπωσης. Χρησιμοποιώντας πληροφορίες από το ψηφιακό αρχείο, ο σχεδιασμός είναι χωρισμένος σε λεπτές δισδιάστατες διατομές, ώστε ο εκτυπωτής να ξέρει ακριβώς πού να τοποθετήσει το πλαστικό υλικό μέσω του ακροφυσίου σε λεπτές στρώσεις, συχνά 0,1 χιλιοστό πάχος. Το υλικό στερεοποιείται άμεσα και δένεται με το στρώμα της βάσης, πριν χαμηλώσει η πλατφόρμα και η κεφαλή εκτύπωσης προσθέσει άλλο στρώμα. Ανάλογα με το μέγεθος και την πολυπλοκότητα του αντικειμένου, η διαδικασία μπορεί να διαρκέσει από λεπτά έως ημέρες.

Αφού ολοκληρωθεί η εκτύπωση, κάθε αντικείμενο απαιτεί μία επιπλέον επεξεργασία η οποία περιλαμβάνει πολλές πρακτικές, από την απλή αποκόλληση του αντικειμένου από την πλατφόρμα εκτύπωσης, έως την αφαίρεση δομών στήριξης από το αντικείμενο (προσωρινό υλικό που τυπώνεται για τη στήριξη προεξοχών επί του αντικειμένου), το βούρτσισμα, το φινιρίσμα κτλ. Αυτό το βήμα προϋποθέτει συχνά εξειδικευμένες δεξιότητες και υλικά. Όταν το αντικείμενο πρωτοτυπώνεται, πολλές φορές δεν μπορεί να

χρησιμοποιηθεί άμεσα ή να ολοκληρωθεί μέχρι να φινιριστεί, βερνικωθεί ή βαφτεί ώστε να ολοκληρωθεί ο αρχικός σχεδιασμός του. Το υλικό το οποίο έχει επιλεγεί είναι αυτό το οποίο θα καθορίσει ποια μέθοδος επιπλέον επεξεργασίας είναι η πιο αρμόδια.³

1.4 Υλικά εκτύπωσης

1.4.1 PLA (Polylactic acid)



Εικόνα 3: Υλικό εκτύπωσης PLA
Πηγή: <http://www.3dprinterworld.com>

Το PLA (Polylactic Acid) είναι ένα δημοφιλές γενικής χρήσης νήμα 3Δ εκτύπωσης. Παράγεται από ανανεώσιμες πηγές όπως ζαχαρότευτλα, σόγια κλπ. και είναι οικολογικό και ασφαλές. Χρησιμοποιείται σε κάθε είδους μοντέλα και λόγω πολύ μικρού συντελεστή συρρίκνωσης εμφανίζει μηδαμινή στρέβλωση ακόμα και σε μεγάλα αντικείμενα. Λόγω χαμηλής θερμοκρασίας εκτύπωσης και εύκολης ψύξης, έχει πλεονέκτημα σε μοντέλα με μικρολεπτομέρειες και αιχμηρές άκρες. Η επιφάνειά του είναι σχετικά γυαλιστερή και μπορεί να δεχτεί κανονικά εξωτερική επεξεργασία (Εικόνα 3).⁴

³ <https://infoservice.com.gr>, τελευταία πρόσβαση στις 28/2/2018

⁴ <http://www.3dhub.gr>, τελευταία πρόσβαση στις 26/2/2018

1.4.2 ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)



Εικόνα 4: Υλικό εκτύπωσης ABS
Πηγή: <https://shop.3dfilaprint.com>

Το ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) αποτελεί ένα από τα πιο δημοφιλή υλικά 3Δ εκτύπωσης μαζί με το PLA. Το ABS είναι πιο εύκαμπτο και ανθεκτικό σε κρούση, διαθέτει επίσης υψηλότερο σημείο τήξης και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Η υφή του είναι πιο ματ από του PLA και μπορεί να υποστεί επεξεργασία, τρίψιμο και βάψιμο. Επίσης είναι διαλυτό σε ακετόνη, κάτι που μας βοηθάει για συγκόλληση εκτυπώσεων μεταξύ τους ή για την εξομάλυνσή τους. Είναι κατάλληλο για κάθε είδους μοντέλα με μόνο περιορισμό τα πολύ μεγάλα αντικείμενα που λόγω συρρίκνωσης ενδέχεται να εμφανίσουν στρέβλωση (Εικόνα 4).

1.4.3 Full Color Sandstone



Εικόνα 5: Υλικό εκτύπωσης Full Color Sandstone
Πηγή: <https://www.shapeways.com>

Εκτύπωση σε πούδρα με βάση τον γύψο, με δυνατότητα πλήρους χρωματικής γκάμας. Αποτελεί τη μοναδική τεχνολογία με τόσο καλό φινίρισμα και χρωματική απόδοση. Η μοναδική επιλογή για φωτορεαλιστική εκτύπωση, ιδανική για πρωτότυπα, αρχιτεκτονικά μοντέλα αλλά και έγχρωμη απόδοση σαρώσεων ή και ανθρώπινες φιγούρες (Εικόνα 5).

1.4.4 Nylon Powder



Εικόνα 6: Υλικό Εκτύπωσης Nylon Powder
Πηγή: <https://www.shapeways.com>

Η εκτύπωση με πούδρα Nylon έχει το πλεονέκτημα της μεγάλης διαστατικής ακρίβειας και της δυνατότητα απόδοσης οποιασδήποτε γεωμετρίας χωρίς περιορισμούς και την ανάγκη υποστηρίγματα. Δίνει απόλυτη ελευθερία στο σχεδιασμό και χρησιμοποιείται σε κάθε είδους μοντέλα, λειτουργικά, αρχιτεκτονικά κλπ. αλλά κυρίως σε πρωτότυπα (Εικόνα 6).

1.4.5 High Resolution SLA



Εικόνα 7: Υλικό Εκτύπωσης High Resolution SLA
Πηγή: <https://i.materialise.com>

Υπερυψηλής ανάλυσης εκτύπωση σε υγρή φωτοπολυμεριζόμενη ρητίνη. Είναι η ιδανική μέθοδος εκτύπωσης για μινιατούρες και άλλα μικρά αντικείμενα που έχουν πολύ λεπτές λεπτομέρειες. Επίσης είναι κατάλληλη για εκτύπωση πρωτοτύπων κοσμημάτων με ρητίνη που αντέχει βουλκανισμό για πάτημα λάστιχου, είτε με χυτεύσιμη ρητίνη για απευθείας lost wax χύτευση (Εικόνα 7).

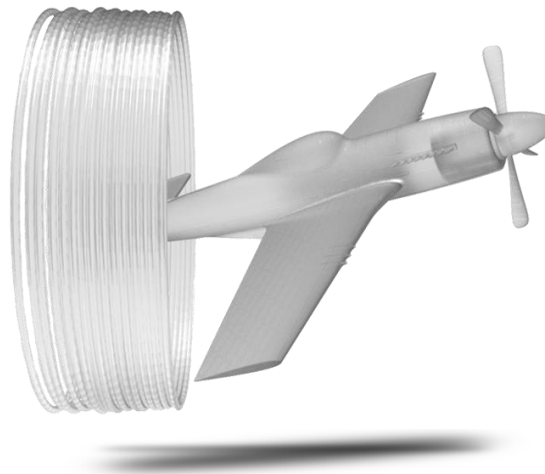
1.4.6 Flexible



Εικόνα 8: Υλικό Εκτύπωσης Flexible
Πηγή: <https://pinshape.com>

Ελαστικό και πολύ δυνατό TPE (ThermoPlastic Elastomer) ελαστομερές για μοντέλα που θέλουμε να έχουν ελαστικότητα, αντοχή σε θερμοκρασίες, έκθεση σε UV και χημικά. Προσφέρει πολύ καλή συναρμογή μεταξύ των επιπέδων του και η υφή του είναι πραγματικά σα λάστιχο (Εικόνα 8).

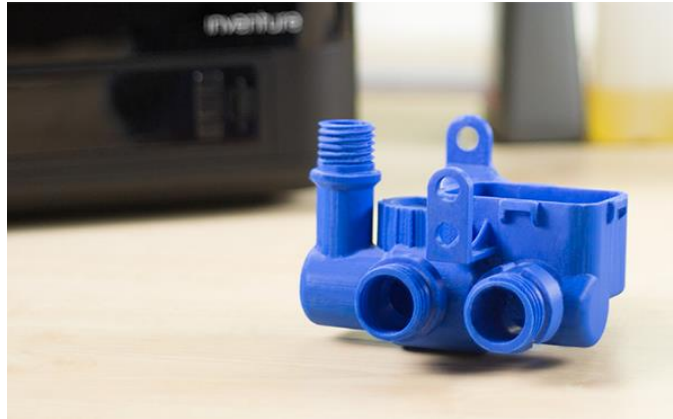
1.4.7 Polycarbonate



Εικόνα 9: Υλικό Εκτύπωσης Polycarbonate
Πηγή: <http://treedfilaments.com>

Ειδικά σχεδιασμένο πολυκαρβονικό αναλώσιμο που προσφέρει ανώτερη ποιότητα εκτύπωσης, εξαιρετικές μηχανικές αντοχές και ανθεκτικότητα σε θερμοκρασία σε σχέση με τα άλλα υλικά 3D εκτύπωσης. Είναι το υλικό επιλογής για μοντέλα που μας ενδιαφέρει η απόλυτη αντοχή, όπως ανταλλακτικά συσκευών, για μοντελισμό, drones κλπ. (Εικόνα 9).

1.4.8 Z-Ultrat



Εικόνα 10: Υλικό Εκτύπωσης Z-Ultrat
Πηγή: <https://www.3ders.org>

Ένα σύνθετο θερμοπλαστικό που αποτελεί μια πιο εξελιγμένη έκδοση του ABS με προσμίξεις από άλλα πολυμερή (Polycarbonate κλπ.) που του δίνουν σκληρότητα και αντοχή σε παραμορφώσεις. Είναι το πιο κατάλληλο υλικό για εκτυπώσεις λειτουργικών μηχανολογικών πρωτοτύπων, εξαρτημάτων, τελικών χρηστικών αντικειμένων και μοντέλα που επιθυμούμε να έχουν αυξημένες μηχανικές αντοχές. Το φινίρισμά του είναι σχεδόν λείο, ιδανικό στρώσιμο και εξαιρετική ακρίβεια (Εικόνα 10).

1.4.9 Polymax



Εικόνα 11: Υλικό Εκτύπωσης Polymax
Πηγή: <http://ivbsolutions.net>

Έχει ως και 90% μεγαλύτερη αντοχή κρούσης από το PLA και 20 φορές από το ABS και χρησιμοποιείται όταν θέλουμε να παράξουμε μοντέλα με βάση το PLA αλλά να έχουν παράλληλα και εξαιρετικές μηχανικές αντοχές (Εικόνα 11).

1.4.10 Wood PLA



Εικόνα 12: Υλικό Εκτύπωσης Wood PLA
Πηγή: <https://3dwithus.com>

Αναλώσιμο με 30% πραγματικά ροκανίδια ξύλου. Το αποτέλεσμα είναι εντυπωσιακό με ένα σχετικά άγριο φινίρισμα αλλά και μυρωδιά που θυμίζει όντως ξύλο! Πολύ χρήσιμο για αντικείμενα που θέλουμε να ξεφύγουν από την πλαστική όψη που έχουν τα άλλα υλικά 3D εκτύπωσης και φυσικά για πρωτότυπα που χρειάζονται ξύλινη υφή (Εικόνα 12).

1.4.11 Metal PLA



Εικόνα 13: Υλικό Εκτύπωσης Metal PLA
Πηγή: <https://www.geeky-gadgets.com>

Αναλώσιμο υλικό με ρινίσματα μετάλλων για καλλιτεχνική χρήση σε μοντέλα για να μοιάζουν μεταλλικά. Το συναντάμε σε διαφορετικούς τύπους ανάλογα με το είδος του μετάλλου που περιέχεται στο νήμα. Τα πιο δημοφιλή είναι ο μπρούτζος και ο χαλκός. Μετά την εκτύπωση τα μοντέλα έχουν μια ματ άγρια όψη και με την κατάλληλη επεξεργασία αναδεικνύονται τα ρινίσματα του μετάλλου και το τελικό αποτέλεσμα μοιάζει με πραγματικό μέταλλο (Εικόνα 13).

1.4.12 Z-GLASS



Εικόνα 14: Υλικό Εκτύπωσης Z-GLASS
Πηγή: <https://zortrax.com>

Είναι ένα ημιδιάφανο θερμοπλαστικό με μεγάλη φωτοδιαπερατότητα και εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, αντοχή στην τριβή, στον εφελκυσμό και τις υψηλές θερμοκρασίες. Έχει επίσης και υψηλή χημική αντίσταση σε οξέα, άλατα και αλκαλικές ενώσεις (Εικόνα 14).

1.4.13 Z-HIPS



Εικόνα 15: Υλικό Εκτύπωσης Z-HIPS
Πηγή: <https://profound3d.com>

Το Z-HIPS (High impact polystyrene) είναι ένα πολύ ανθεκτικό αναλώσιμο με πολύ μικρό συντελεστή συρρίκνωσης και επομένως ελάχιστη στρέβλωση. Δεν είναι εξαιρετικά σκληρό και σαν αποτέλεσμα δεν είναι εύθραυστο και αντέχει σε άσκηση πιέσεων και σε δυνάμεις εφελκυσμού. Εξαιρετικά χρήσιμο για μεγάλα αντικείμενα με δύσκολες επιφάνειες αλλά και για αρχιτεκτονικά μοντέλα (Εικόνα 15).

1.4.14 Glow in the Dark PLA



Εικόνα 16: Υλικό Εκτύπωσης Glow In The Dark PLA
Πηγή: <https://shop.prusa3d.com>

Ένα πολύ ενδιαφέρον αναλώσιμο με βάση το PLA αλλά με την ιδιότητα να συσσωρεύει φως από φυσικές ή τεχνητές πηγές και στη συνέχεια να το ακτινοβολεί. Χρήσιμο για πολύ εντυπωσιακά διακοσμητικά ή άλλα μοντέλα που θέλουμε να φωσφορίζουν στο σκοτάδι (Εικόνα 16).

1.4.15 NYLON

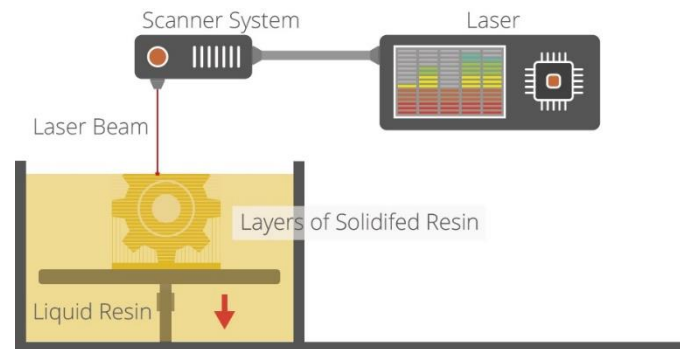


Εικόνα 17: Υλικό Εκτύπωσης Nylon
Πηγή: <https://ultimaker.com>

Το υλικό αυτό προσφέρει ευελιξία και μεγάλη αντοχή, ενώ έχει εξαιρετικά μικρό βάρος. Αποτελεί λοιπόν μια εξαιρετική επιλογή για την εκτύπωση αντικειμένων όπως εργαλεία, γρανάζια, προσθετικά μέλη ή πρωτότυπα λειτουργικών μοντέλων (Εικόνα 17).

1.5 Μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης

1.5.1 Στερεολιθογραφία

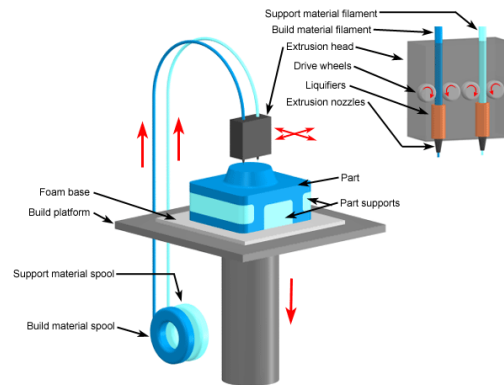


Εικόνα 18: Διαδικασία Στερεολιθογραφία
Πηγή: <http://brain.ee.auth.gr>

Η στερεογραφία επινοήθηκε από τον Charles Hull το 1984. Αποτελεί την παλαιότερη τεχνική για την τρισδιάστατη εκτύπωση και βασίζεται στο γεγονός ότι τα υγρά πολυμερή στερεοποιούνται όταν εκτεθούν σε υπεριώδη ακτινοβολία. Μία πλατφόρμα βυθίζεται ελάχιστα σε ένα δοχείο που περιέχει υγρή, ακρυλική ρητίνη. Στην συνέχεια μια κεφαλή laser υπεριώδων ακτίνων χαμηλής ισχύος κινούμενη οριζοντίως και καθέτως σχεδιάζει το αντικείμενο. Τα σημεία που περνάει το laser στερεοποιούνται και έτσι δημιουργείται το πρώτο στρώμα. Μετά την δημιουργία του πρώτου στρώματος, η βάση βυθίζεται κι άλλο και ακολουθείται η ίδια διαδικασία για το επόμενο στρώμα. Μόλις ολοκληρωθεί όλο το αντικείμενο, αφαιρείται από το υγρό, πλένεται και αφαιρούνται τυχών ατέλειες. Η διαδικασία ολοκληρώνεται με την θέρμανση του αντικειμένου σε έναν φούρνο υπεριώδων ακτίνων για την ολοκλήρωση της στερεοποίησης. Στις αρχές της χρήσης της στερεολιθογραφίας, τα αντικείμενα που δημιουργούνταν ήταν αρκετά εύθραυστα και με λιγοστή λεπτομέρεια. Όμως με την συνεχή βελτίωσή της τεχνολογίας, έχει καταφέρει να παράγει αρκετά λεπτομερή και ανθεκτικά μοντέλα (Εικόνα 18).⁵

⁵ Μπιλάλης Ν. Μαραβελάκης Ε.(2014). Συστήματα CAD/CAM και τρισδιάστατη μοντελοποίηση, 2η ΕΚΔΟΣΗ, τελευταία πρόσβαση στις 26/2/2018

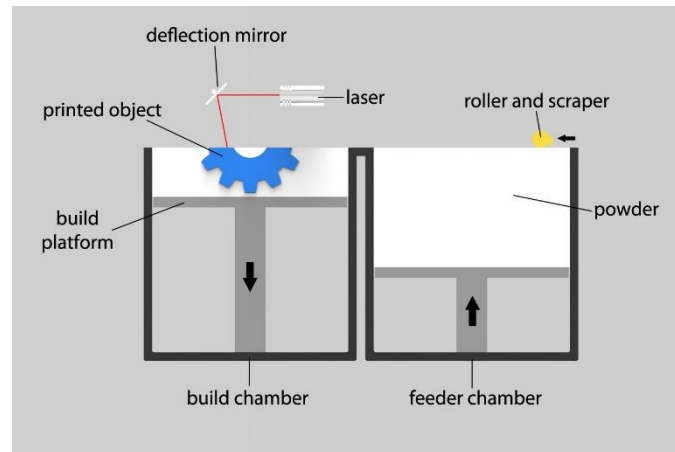
1.5.2 Fused Deposition Modelling (FDM) / Fused Filament Fabrication (FFF)



Εικόνα 19: Διαδικασία FDM / FFF
Πηγή: <http://www.custompartnet.com>

Ουσιαστικά οι μέθοδοι FDM και FFM είναι ακριβώς η ίδια μέθοδος, απλά η ονομασία fused deposition modeling και η συντόμευση FDM έχουν κατοχυρωθεί από την εταιρεία Stratasys. Η ονομασία Fused Filament Fabrication και η συντόμευση FFF δημιουργήθηκαν από το RepRap Project και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ελεύθερα και χωρίς περιορισμούς από τρίτους κατασκευαστές τρισδιάστατων εκτυπωτών. Καμιά φορά θα συναντήσουμε την ίδια τεχνολογία με την ονομασία Plastic Jet Printing (PJP). Ανεξαρτήτως της ονομασίας, στην πράξη το υλικό, που βρίσκεται σε μορφή νήματος, περνά από έναν εξωθητή, ο οποίος έχει τέτοια υπολογισμένη ροπή ώστε να περνάει μια συγκεκριμένη ποσότητα υλικού. Στην συνέχεια, το υλικό περνάει σε ένα χώρο στον οποίο θερμαίνεται μέχρι να λιώσει και εξέρχεται μέσω μιας κεφαλής. Μόλις ολοκληρωθεί το πρώτο στρώμα, η βάση στην οποία είναι τοποθετημένο κινείται προς το κάτω, ώστε πάνω από το υπάρχον στρώμα να δημιουργηθεί ένα νέο. Σε πολλές περιπτώσεις που το αντικείμενο χρειάζεται επιπλέον στήριξη, υπάρχει μια δεύτερη κεφαλή η οποία εκκρίνει υλικό στήριξης. Αυτό το υλικό διαλύεται στο νερό. Στο τέλος της εκτύπωσης, το αντικείμενο πλένεται με νερό υπό πίεση, ώστε να αποκολληθεί το περισσευούμενο υλικό. Η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελεί την πιο δημοφιλή τεχνική που εφαρμόζεται στους τρισδιάστατους εκτυπωτές. Αυτό οφείλεται στο χαμηλό κόστος υλοποίησης της και στα οικονομικά υλικά που χρησιμοποιεί. Τέτοια υλικά είναι το χαρτί, το κερί, και τα μέταλλα (Εικόνα 19).

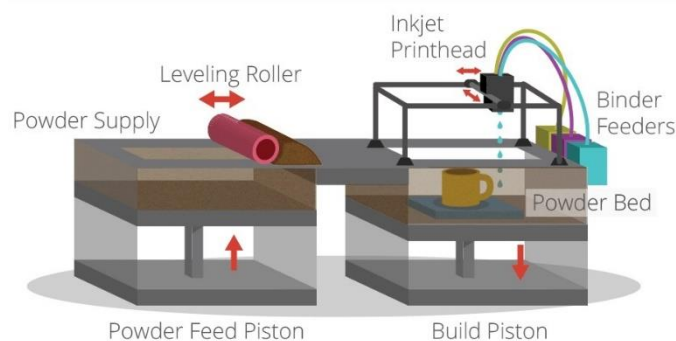
1.5.3 Laser Sintering (LS) / Laser Melting (LM)



Εικόνα 20: Διαδικασία LS / LM
Πηγή: <https://www.additive.blog>

Οι δύο αυτές μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι όμοιες. Η κύρια διαφορά τους είναι το είδος του υλικού που χρησιμοποιούν και το ποσό της θερμότητας που ασκούν στο υλικό αυτό. Οι εκτυπωτές που χρησιμοποιούν αυτές τις μεθόδους αποτελούνται από μία βάση, μια δεξαμενή, και έναν κύλινδρο. Στην δεξαμενή βρίσκεται το υλικό σε μορφή σκόνης, η οποία ωθείται μέσω του κυλίνδρου στην βάση. Η βάση είναι σε πιο χαμηλό ύψος από το υπόλοιπο σύστημα. Το ύψος αυτό εξαρτάται από το ύψος της στρώσης που θέλουμε να δημιουργήσουμε. Αφού τοποθετηθεί η σκόνη πάνω στη βάση, μια δέσμη φωτός laser θερμαίνει τα σημεία του υλικού που θέλουμε να σταθεροποιήσουμε, μέσω ενός καθρέφτη. Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία, η βάση κινείται προς τα κάτω και επαναλαμβάνεται η ίδια μέθοδος. Η διαφορά είναι ότι στην LS η σκόνη θερμαίνεται σε τέτοιο βαθμό, ώστε να ενωθούν τα μόρια των κόκκων σκόνης, ενώ στην LM το υλικό λιώνεται πλήρως, ώστε να δημιουργηθεί μια ομοιόμορφη μάζα. Η LS χρησιμοποιείται για μίγματα μετάλλων ενώ η LM για καθαρά μέταλλα (Εικόνα 20).

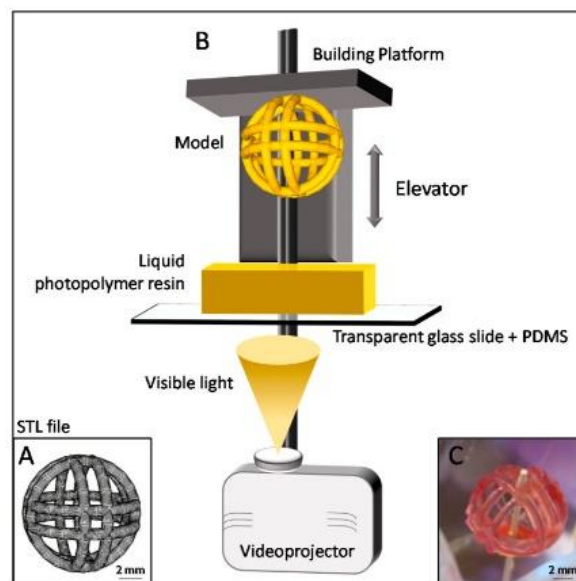
1.5.4 Inkjet



Εικόνα 21: Διαδικασία Binder Jetting
Πηγή: <http://www.golte3d.com>

Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές inkjet χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, οι οποίες υλοποιούν την ίδια ακριβώς εργασία με πανομοιότυπο τρόπο. Οι δύο αυτές κατηγορίες είναι η blinder jetting και η direct material jetting. Οι blinder jetting εκτυπωτές χρησιμοποιούν υλικά σε μορφή σκόνης για την τρισδιάστατη εκτύπωση. Ένας κύλινδρος ωθεί ένα ποσό σκόνης στην βάση κατασκευής. Σε αυτό το σημείο, κάποιες κεφαλές που βρίσκονται πάνω από την βάση κατασκευής ψεκάζουν μια ειδική κόλλα στα σημεία που θέλουμε να σταθεροποιηθεί το αντικείμενο. Τα σημεία που έχουν ψεκαστεί με κόλλα, γίνονται ένα ενιαίο σώμα και η περιττή σκόνη απομακρύνεται. Στην συνέχεια, η βάση κατεβαίνει και ξαναγίνεται η ίδια διαδικασία για το επόμενο στρώμα. Προαιρετική είναι η τοποθέτηση του τελικού αντικειμένου σε φούρνο για αύξηση της αντοχής του. Επιπλέον, μπορούν να προστεθούν διάφορα χρώματα κόλλας, ώστε το αντικείμενο να είναι χρωματιστό. Στους direct material jetting εκτυπωτές χρησιμοποιούνται κεφαλές με πολλά ακροφύσια, τα οποία ψεκάζουν το υγρό υλικό σε ποσότητες μη ορατές στο ανθρώπινο μάτι. Αυτές οι κεφαλές έχουν την δυνατότητα να εκκρίνουν και το βασικό υλικό αλλά και το υλικό στήριξης ταυτόχρονα. Γύρω από τις κεφαλές εκπέμπεται υπεριώδης ακτινοβολία, η οποία στερεοποιεί το αντικείμενο. Μόλις τελειώσει το τρέχον στρώμα, η βάση κατεβαίνει και δημιουργείται το επόμενο. Στο τέλος της εκτύπωσης, το υποστηρικτικό υλικό μπορεί να αφαιρεθεί με το χέρι (Εικόνα 21).

1.5.5 Digital Light Processing (DLP)

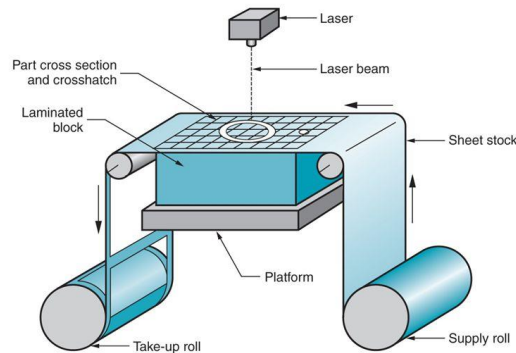


Εικόνα 22: Διαδικασία DLP
Πηγή <https://adalidda.com>

Η μέθοδος DLP μοιάζει σε μεγάλο βαθμό με τη στερεολιθογραφία. Η βασική διαφορά είναι πως χρησιμοποιείται απλούστερη πηγή φωτός αντί για laser. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι το γεγονός ότι καταναλώνει λιγότερο υλικό, άρα αποτελεί και πιο οικονομική μέθοδο. Κατά τα άλλα, ακόμη και ως προς το φινίρισμα, ισχύει ό,τι και στη στερεολιθογραφία (Εικόνα 22).

1.5.6 Laminated Object Manufacturing (LOM)

Laminated Object Manufacturing



Εικόνα 23: Διαδικασία LOM
Πηγή: <http://slideplayer.com>

Η διαδικασία δημιουργίας ενός μοντέλου με χρήση της μεθόδου LOM, έχει ως βάση πολλαπλά φύλλα χαρτιού. Το πρώτο φύλλο τοποθετείται σε μια βάση και από πάνω του περνάει ένας κύλινδρος. Στη συνέχεια, ένα laser κόβει το στρώμα του φύλλου χαρτιού στο επιθυμητό σχήμα. Για το επόμενο στρώμα συνέχεια τοποθετείται ένα νέο φύλλο χαρτιού και ξανά ακολουθείται η ίδια διαδικασία. Το τελικό αντικείμενο καλύπτεται με βερνίκι για μεγαλύτερη αντοχή (Εικόνα 23).

1.6 Εφαρμογές τρισδιάστατης εκτύπωσης

1.6.1 Ιατρική τεχνολογία



Εικόνα 24: Προσθετικό Μέλος από 3D Εκτύπωση
Πηγή: <https://m.blog.naver.com>

Η προσφορά των τρισδιάστατων εκτυπωτών στην ιατρική είναι τεράστια. Με την τρισδιάστατη εκτύπωση μπορούν να κατασκευαστούν προσθετικά μέρη σώματος με πολύ χαμηλότερο κόστος από ότι ήταν δυνατό μέχρι πριν λίγα χρόνια. Τα τελευταία χρόνια γίνεται εκτεταμένη έρευνα πάνω στη δημιουργία τρισδιάστατων εκτυπωμένων μοσχευμάτων. Ενώ δεν έχει πραγματοποιηθεί κάποια προσπάθεια με 100% επιτυχία, στο μέλλον και εφόσον τελειοποιηθεί αυτή η τακτική αναμένεται να σώζει δεκάδες χιλιάδες ζωές κάθε χρόνο (Εικόνα 24).⁶

⁶ <https://www.pcsteps.gr>, Τελευταία πρόσβαση στις 26/2/2018

1.6.2 Τέχνη



Εικόνα 25: 3Δ Εκτύπωση Γλυπτού
Πηγή: <http://www.thisiscolossal.com>

Παρά το γεγονός ότι σε αυτό το τομέα η τρισδιάστατη εκτύπωση δεν έχει εντατική χρήση, πολλοί γλύπτες έχουν αρχίσει να αντικαθιστούν τις παραδοσιακές τεχνικές τους με την δημιουργία ψηφιακών μοντέλων. Η μετάβαση αυτή από αρκετούς είναι κατακριτέα, λόγω της αλλοίωσης της ταυτότητας της τέχνης. Πέραν αυτού όμως, η χρήση αυτής της νέας μεθόδου δίνει την δυνατότητα στους δημιουργούς να κατασκευάσουν πιο περίτεχνα και πλήρως λειτουργικά έργα, που με τις παραδοσιακές τεχνικές θα ήταν πολύ δύσκολο έως και ακατόρθωτο (Εικόνα 25).

1.6.3 Βιομηχανική τεχνολογία



Εικόνα 26: Το Πρώτο Τρισδιάστατα Εκτυπωμένο, Λειτουργικό Αυτοκίνητο
Πηγή: <https://www.popularmechanics.com>

Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης αναμένεται να συμβάλει στην ανάπτυξη της βιομηχανίας. Η πλήρης αυτοματοποίηση της παραγωγής έχει ως αποτέλεσμα τη κατασκευή αναρίθμητων πανομοιότυπων προϊόντων, μειώνοντας την πιθανότητα του ανθρώπινου λάθους. Επιπλέον, το κόστος των ανταλλακτικών θα εξαλειφθεί αρκετά καθώς θα πάψει η ανάγκη για ανταλλακτικά σε αποθήκες. Το μόνο που θα χρειάζεται θα είναι ένας τρισδιάστατος εκτυπωτής και το αρχείο CAD του ανταλλακτικού. Τέλος, θα μειωθούν τα έξοδα μεταφοράς των εταιρειών, αφού θα έχουν την δυνατότητα κατασκευής πολλών μονάδων παραγωγής βασισμένες στους τρισδιάστατους εκτυπωτές, με μηδαμινό κόστος. Πολλές εταιρείες έχουν είδη αξιοποιήσει τέτοιες τεχνικές. Ένα πολύ χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η Local Motors. Δημιούργησε ένα τρισδιάστατα εκτυπωμένο, λειτουργικό αυτοκίνητο. Το 2016, η εταιρεία κατασκεύασε κι άλλα μοντέλα, τα οποία τηρούν όλους τους κανονισμούς για νόμιμη κυκλοφορία στους δρόμους (Εικόνα 26).

1.6.4 Τεχνολογία οπλικών συστημάτων



Εικόνα 27: 3D Πιστόλι
Πηγή: <http://microfabricator.com>

Τα τελευταία χρόνια γίνεται μεγάλη συζήτηση μεταξύ των βιομηχανιών όπλων για την εκμετάλλευση των τρισδιάστατων εκτυπωτών ώστε να αναπτύξουν νέες τεχνολογίες πολέμου. Η βασική ιδέα είναι οι στρατιωτικές μονάδες, και ειδικότερα αυτές που βρίσκονται μακριά από τον τόπο που προήλθαν, να μπορούν να παράγουν μόνες τους τα όπλα τους. Με αυτόν τον τρόπο θα μηδενιστούν τα έξοδα μεταφοράς των οπλικών συστημάτων και θα είναι εύκολη η αντικατάσταση των ήδη υπαρχόντων όπλων με τρισδιάστατη εκτύπωση. Παρά τα πλεονεκτήματα αυτού του τρόπου παραγωγής όπλων, υπάρχει ένα βασικό μειονέκτημα. Αν αυτή η τεχνολογία διαρρεύσει σε άτομα που δεν έχουν δικαιοδοσία, θα γίνει δυνατή η ακατάσχετη παραγωγή παράνομων όπλων από οποιονδήποτε χρήστη με συμβατό εκτυπωτή, τα οποία θα είναι αδύνατον να ταυτοποιηθούν (Εικόνα 27).

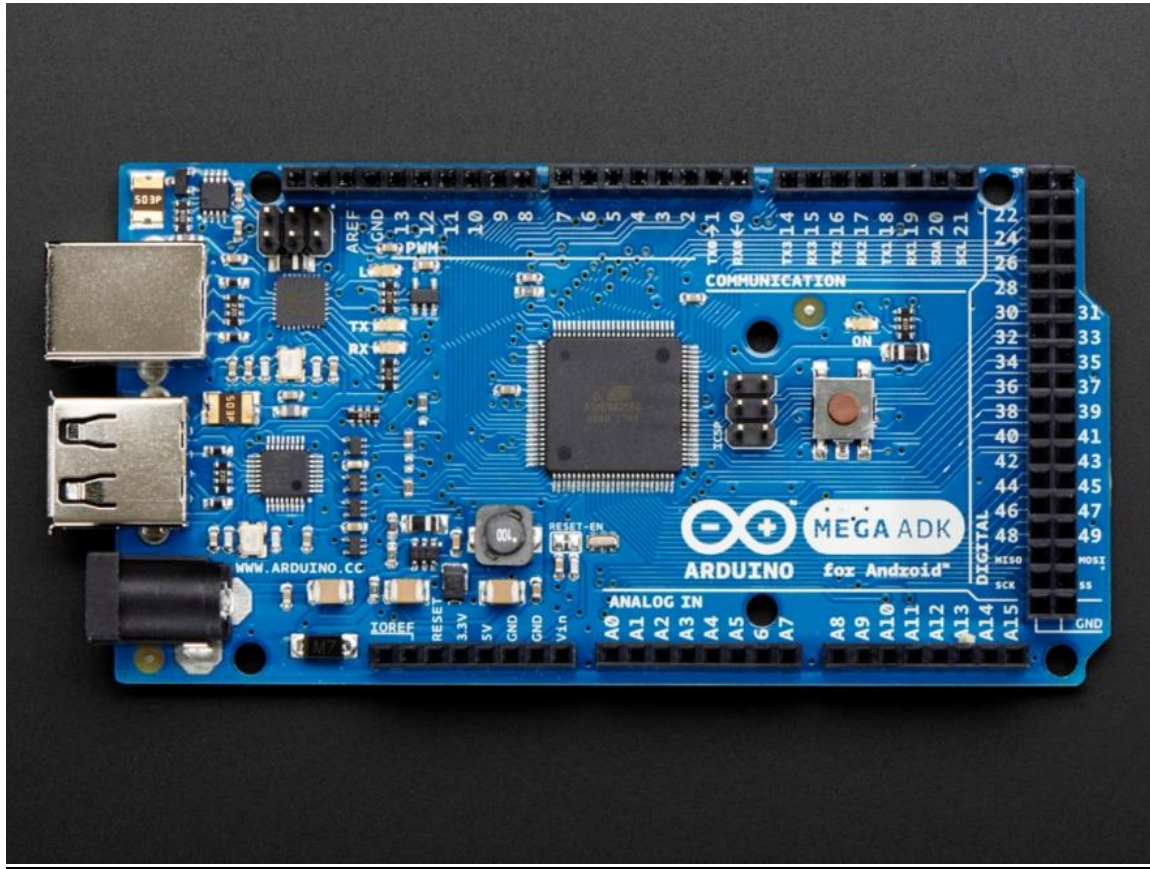
1.6.5 Καθημερινή χρήση



Εικόνα 28: 3D Γλάστρες
Πηγή: <https://www.pinterest.com>

Σε λίγα χρόνια, όπου η χρήση των τρισδιάστατων εκτυπωτών θα έχει καθιερωθεί, οι τιμές αυτών των εκτυπωτών θα έχουν γίνει προσβάσιμες στο ευρύ κοινό. Με δεδομένη την κοινότητα του διαδικτύου, υποθέτω ότι θα υπάρξει η δυνατότητα να κατεβάσεις το αρχείο ενός τρισδιάστατου μοντέλου και να το εκτυπώσεις στο σπίτι σου. Επομένως, η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να αποτελέσει την εναλλακτική για την αντικατάσταση φθαρμένων αντικειμένων. Επίσης, οι κατασκευάστριες εταιρείες θα μπορούν είτε να διαθέτουν στην αγορά τα σχέδια των προϊόντων τους με ένα ελάχιστο κόστος, είτε να σου δίνουν το αντικείμενο είδη κατασκευασμένο (Εικόνα 28).

1.7 Ο μικροελεγκτής Arduino



Εικόνα 29: Μικροελεγκτής Arduino MEGA ADK
Πηγή: <https://www.adafruit.com>

Ο μικροελεγκτής (microcontroller) είναι ένας τύπος επεξεργαστή, μια παραλλαγή του μικροεπεξεργαστή, ο οποίος μπορεί να λειτουργεί με ελάχιστα εξωτερικά εξαρτήματα, λόγω των πολλών ενσωματωμένων υποσυστημάτων που διαθέτει. Χρησιμοποιείται ευρέως σε όλα τα ενσωματωμένα συστήματα ελέγχου χαμηλού και μεσαίου κόστους, όπως είναι αυτά που χρησιμοποιούνται σε αυτοματισμούς, ηλεκτρονικά καταναλωτικά προϊόντα (ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, παιχνίδια κ.α.), ηλεκτρικές συσκευές και κάθε είδους αυτοκινούμενα τροχοφόρα οχήματα. Ποιο συγκεκριμένα, το Arduino είναι μια υπολογιστική πλατφόρμα βασισμένη σε μια απλή μητρική πλακέτα με ενσωματωμένο μικροελεγκτή και εισόδους/εξόδους. Η μητρική πλακέτα αυτή μπορεί να προγραμματιστεί με τη γλώσσα Wiring (ουσιαστικά πρόκειται για τη C++ με κάποιες μετατροπές). Το Arduino μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη ανεξάρτητων διαδραστικών αντικειμένων αλλά και να συνδεθεί με υπολογιστή μέσω προγραμμάτων (Εικόνα 29).⁷

Οι περισσότερες εκδόσεις του Arduino μπορούν να αγοραστούν προσυναρμολογημένες, το διάγραμμα και οι πληροφορίες για το υλικό είναι ελεύθερα διαθέσιμα για όσους θέλουν να συναρμολογήσουν το Arduino μόνοι

⁷ Μουτσούλα, Σ., & Moutsoula, S. (2016). Έξυπνες εφαρμογές για το σπίτι του μέλλοντος, τελευταία πρόσβαση 01/03/2018

τους. Τα παραπάνω δεν είναι πρωτότυπα. Υπάρχουν και άλλες πλατφόρμες και υλοποιήσεις που μπορούν να κάνουν τα ίδια πράγματα. Ποια είναι η βασική διαφορά; Το Arduino βασίζεται σε τεχνολογίες ανοιχτού κώδικα. Μπορεί να κατασκευαστεί από τον καθένα, μπορεί να ενσωματωθεί σε συσκευές ακόμα και για εμπορικούς σκοπούς και το σημαντικότερο είναι ότι υπάρχει μια ολόκληρη κοινότητα που χρησιμοποιεί το Arduino σε κατασκευές οπότε υπάρχει μεγάλος όγκος ελεύθερης πληροφορίας.

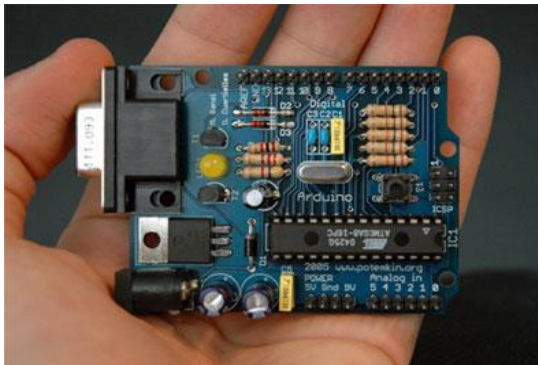
Γενικά, τα Projects στον εν λόγω Μικροελεγκτή μπορούν να είναι αυτόνομα (σε επίπεδο hardware) ή να επικοινωνούν με κάποιο software στον Η/Υ (προγράμματα όπως τα Flash, Processing, MaxMSP). Το Arduino χρησιμοποιεί ένα ειδικά προγραμματιζόμενο Atmega382 αντί του chip FTDI ώστε αυτό να επιτρέπει τόσο την πιο γρήγορη ταχύτητα μεταφοράς όσο και τη γρηγορότερη σειριακή επικοινωνία. Ο μικροεπεξεργαστής ενός Arduino προγραμματίζεται εκ των προτέρων ώστε να παρέχει κάποιο φορτωτή εκκίνησης (BootLoader). Ο φορτωτής εκκίνησης υπάρχει ώστε να απλοποιεί την διαδικασία της αποθήκευσης των προγραμμάτων στην Flash Memory του Arduino μέσω σειριακής USB θύρας. Επιπλέον, η γλώσσα προγραμματισμού, οι διάφορες βιβλιοθήκες και το ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης που υπάρχουν για τον προγραμματισμό της πλατφόρμας Arduino αποτελούν ανοιχτό λογισμικό προσφέροντας έτσι ανεκτίμητη γνώση σε όλους.

1.8 Οι εκδοχές του Arduino Hardware που έχουν χρησιμοποιηθεί εμπορικά

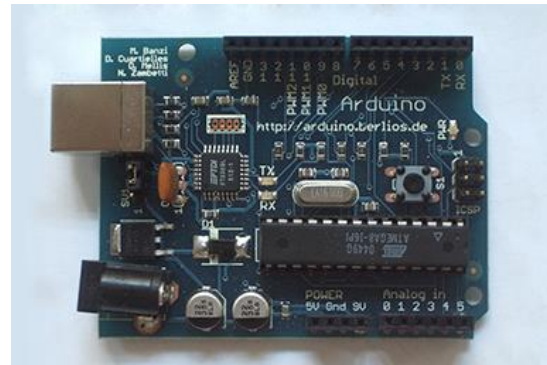
1. Το Serial Arduino, προγραμματισμένο με μία σειριακή DE-9 σύνδεση χρησιμοποιώντας τεχνολογία ATmega8 (Εικόνα 30).
2. Το Arduino Extreme (Εικόνα 31), με ένα USB interface για προγραμματισμό χρησιμοποιώντας τεχνολογία ATmega8.
3. Το Arduino Mini (Εικόνα 32), μία έκδοση μινιατούρας του Arduino χρησιμοποιώντας τεχνολογία surface-mounted ATmega168
4. Το Arduino Nano (Εικόνα 33), ένα ακόμα πιο μικρό, USB τροφοδοτούμενη έκδοσή του Arduino χρησιμοποιώντας τεχνολογία surface-mounted ATmega168 (ATmega328 για την νεότερη έκδοση)
5. Το LilyPad Arduino (Εικόνα 34), ένα μινιμαλιστικό σχέδιο για εφαρμογές ένδυσης και E-textiles χρησιμοποιώντας τεχνολογία surface-mounted ATmega328.
6. Το Arduino NG (Εικόνα 35), με ένα USB interface για προγραμματισμό και χρησιμοποιώντας τεχνολογία ATmega8.
7. Το Arduino NG plus, με ένα USB interface για προγραμματισμό και χρησιμοποιώντας τεχνολογία atmega168.
8. Το Arduino Bluetooth (Εικόνα 36), με Bluetooth interface για προγραμματισμό χρησιμοποιώντας τεχνολογία ATmega168.
9. Το Arduino Diecimila (Εικόνα 37), με ένα USB interface και χρησιμοποιεί τεχνολογία ATmega168 σε ένα DIP 28 πακέτο.
10. Το Arduino Duemilanove ("2009") (Εικόνα 38), χρησιμοποιεί τεχνολογία ATmega168 (ATmega328 για την καινούργια έκδοση) και τροφοδοτείται μέσω ενέργειας USB/DC, αυτόματα εναλλασσόμενης.

11. Το Arduino Mega (Εικόνα 39), χρησιμοποιώντας τεχνολογία surface-mounted ATmega1280 για περαιτέρω I/O και μνήμη.
12. Το Arduino Uno (Εικόνα 40), χρησιμοποιώντας την ίδια τεχνολογία ATmega328 όπως το τελευταίο μοντέλο Duemilanove, αλλά ενώ το Duemilanove χρησιμοποιεί ένα FTDI chipset για το USB, το Uno χρησιμοποιεί τεχνολογία ATmega8U2 προγραμματισμένο ως σειριακός μετατροπέας.
13. Το Arduino Mega2560 (Εικόνα 41), χρησιμοποιεί τεχνολογία surface-mounted ATmega2560 φέρνοντας την ολική μνήμη στα 256kB. Επίσης ενσωματώνει την νέα τεχνολογία ATmega8U2 (ATmega16U2 σε αναθεώρηση τύπου 3) USB chipset..
14. Το Arduino Leonardo (Εικόνα 42), με ένα ATmega32U4 chip που εξαλείφει την ανάγκη για συνδεσιμότητα μέσω USB και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ψηφιακό πληκτρολόγιο ή ποντίκι. Κυκλοφόρησε στο Maker Faire Bay Area το 2012.
15. Το Arduino Esplora (Εικόνα 43), με εμφάνιση που παραπέμπει σε χειριστήριο κονσόλας βιντεοπαιχνιδιών με joystick και ενσωματωμένους αισθητήρες για ήχο, φως, θερμοκρασία και επιτάχυνση.
16. Το Arduino Due (Εικόνα 44), είναι ένα μικροχειριστήριο board βασισμένο στην τεχνολογία Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 CPU. Είναι το πρώτο board της Arduino βασισμένη σε επεξεργαστή 32-bit ARM microcontroller.⁸

Παράθεση εικόνων όλων των παραπάνω εκδοχών.

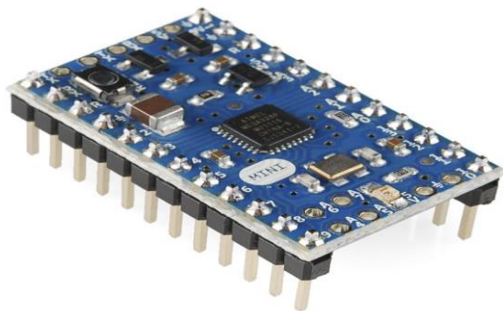


Εικόνα 30: Arduino Serial
Πηγή: <https://www.arduino.cc>

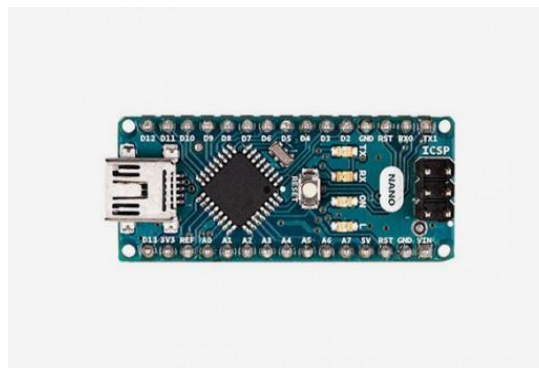


Εικόνα 31: Arduino Extreme
Πηγή: <https://www.arduino.cc>

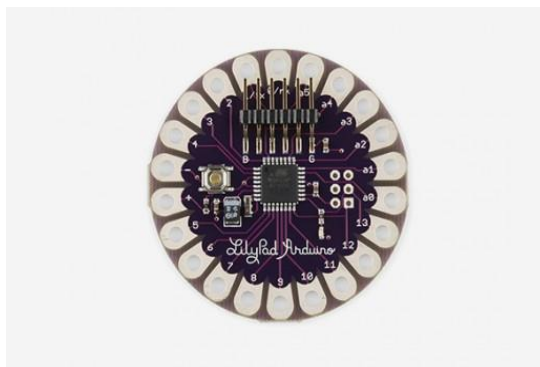
⁸ <http://hlektrologia.gr>, τελευταία πρόσβαση 01/03/2018



Εικόνα 32: Arduino Mini
Πηγή: <https://store.arduino.cc>



Εικόνα 33: Arduino Nano
Πηγή: <https://store.arduino.cc>



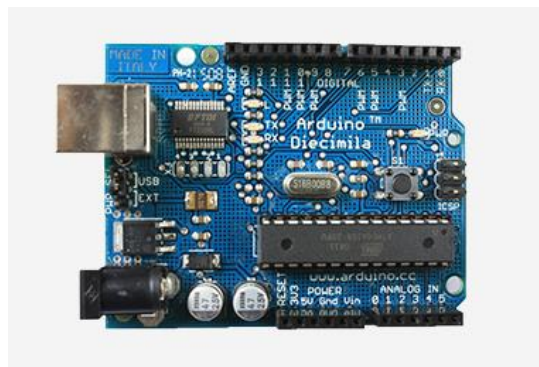
Εικόνα 34: LilyPad Arduino
Πηγή: <https://store.arduino.cc>



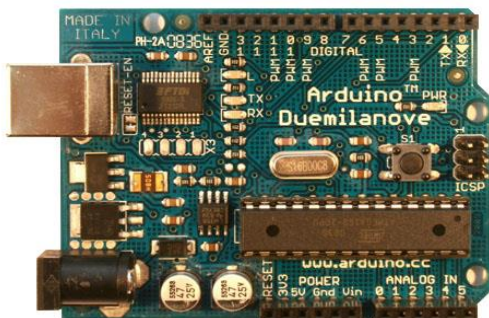
Εικόνα 35: Arduino NG
Πηγή: <https://store.arduino.cc>



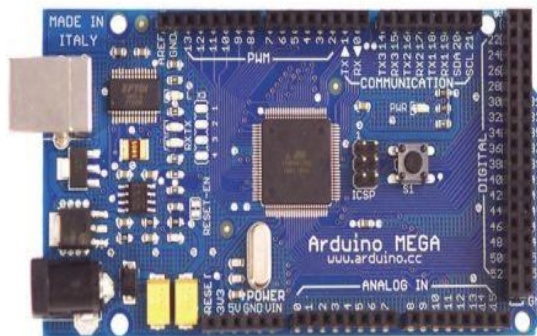
Εικόνα 36: Arduino Bluetooth
Πηγή: <https://store.arduino.cc>



Εικόνα 37: Arduino Diecimila
Πηγή: <https://store.arduino.cc>



Εικόνα 38: Arduino Duemilanove
Πηγή: <https://store.arduino.cc>



Εικόνα 39: Arduino Mega
Πηγή: <http://int.rsdelivers.com>



Εικόνα 40: Arduino Uno
Πηγή: <https://store.arduino.cc>



Εικόνα 41: Arduino Mega2560
Πηγή: <https://store.arduino.cc>



Εικόνα 42: Arduino Leonardo
Πηγή: <https://store.arduino.cc>



Εικόνα 43: Arduino Esplora
Πηγή: <https://store.arduino.cc>



Εικόνα 44: Arduino Due
Πηγή: <https://store.arduino.cc>

1.9 Ο μικροελεγκτής Arduino Uno

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η πλακέτα Arduino Uno. Η καρδιά του Arduino Uno είναι φυσικά ένας μικροεπεξεργαστής. Αυτός είναι το «μυαλό» του Arduino και είναι προγραμματιζόμενος ώστε να ελέγχει τα 14 ψηφιακά input/output pins και τα 6 αναλογικά που υπάρχουν πάνω στην πλακέτα ανάπτυξης. Μέσω αυτών των 20 pins γίνονται όλες οι διασυνδέσεις με εξωτερικά στοιχεία (κινητήρες, LEDs, LCD οθόνες κλπ.) και αισθητήρες (υγρασιόμετρα, θερμομέτρα, επιταχυνσιόμετρο κ.α.).

Στην πλακέτα υπάρχει μια θύρα USB. Μέσω αυτής γίνεται η μεταφορά, συνήθως από έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή, και το αντίστροφο. Ωστόσο, η κύρια χρήση στα αρχικά στάδια εκμάθησης είναι η μεταφορά του προγράμματος από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή στον μικροεπεξεργαστή αλλά και η οπτικοποίηση των δεδομένων που παράγονται από την λειτουργία της συσκευής μετά από το προγραμματισμό.⁹

1.9.1 Τα μέρη του Arduino Uno

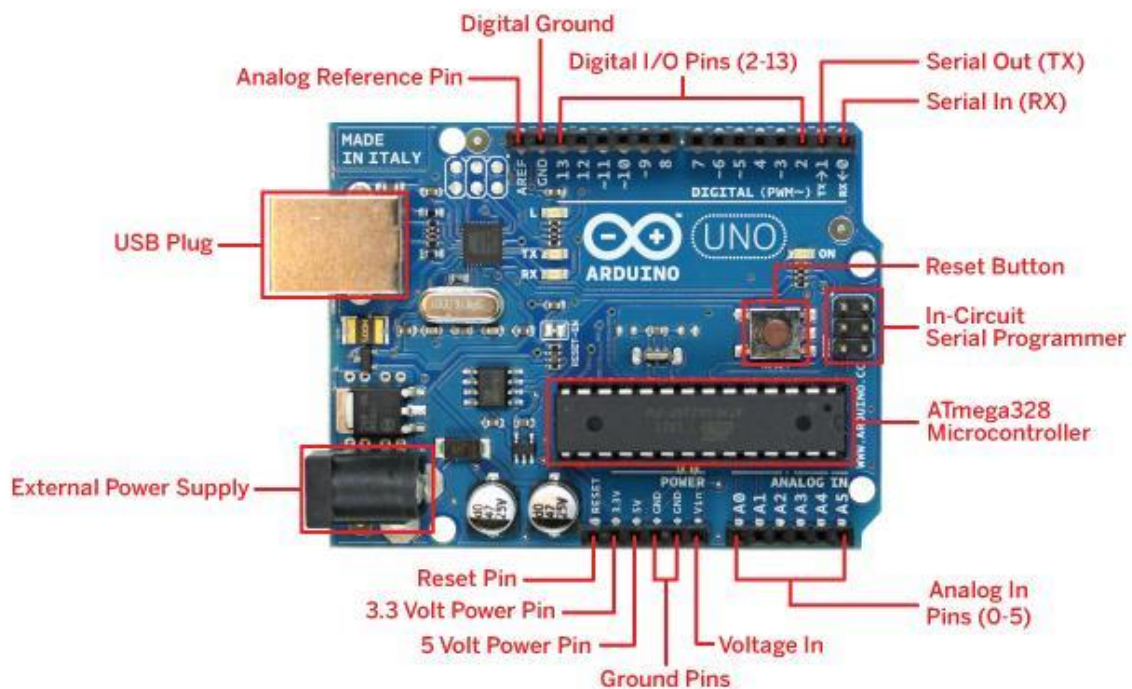
Το Arduino έχει 14 ψηφιακούς ακροδέκτες Εισόδου/Εξόδου οι οποίοι μπορούν να τεθούν ως είσοδοι ή ως εξοδοι με τις εντολές-συναρτήσεις `pinMode()`, `digitalWrite()`, και `digitalRead()` που θα αναλυθούν παρακάτω. Λειτουργούν στα 5 Volts και έχουν την δυνατότητα να παρέχουν ή να καταβυθίζουν ένταση της τάξεως των 40mA. Σε κάθε pin υπάρχει εσωτερικά ένας Pull-up αντιστάτης στα 20-50KΩ. Επιπλέον, έχει 6 αναλογικούς ακροδέκτες Εισόδου. Αυτοί μπορούν να διαβάσουν αναλογικές τιμές όπως η τάση μιας μπαταρίας κτλ. και να τις μετατρέψουν σε έναν αριθμό από 0-1023. Η μέτρηση της τάσης γίνεται προκαθορισμένα από 0 έως 5 volts. Εκτός αυτού, 6 εκ των 14 ψηφιακών

⁹ Φελλόπουλος, Α., & Σπύρου, Μ. Υλοποίηση ενός τρίτροχου κινούμενου ρομπότ χρησιμοποιώντας πλατφόρμα Arduino, τελευταία πρόσβαση 05/03/2018

ακροδεκτών οι P3, P5, P6, P9, P10 και P11 έχουν την δυνατότητα να προγραμματιστούν ώστε να λειτουργούν ως αναλογικές Έξοδοι.

Κάποιοι ακροδέκτες έχουν συγκεκριμένες λειτουργίες. (Εικόνα 45)

- Σειριακή Λειτουργία: 0 (RX) και 1 (TX). Χρησιμοποιούνται για λήψη (RX) και εκπομπή (TX) TTL σειριακών δεδομένων.
- Εξωτερικές Διακοπές: 2 και 3. Αυτοί οι ακροδέκτες μπορούν να ενεργοποιούν διακοπές αν ανιχνευθεί παλμός χαμηλής τάσης. Με την συνάρτηση 9 Κεφάλαιο 2 : Arduino Uno 5 attachInterrupt(). Ο σκανδαλισμός των διακοπών μπορεί να γίνεται στο λογικό 0,1.
- PWM: 3, 5, 6, 9, 10, και 11 pins. Παρέχουν Έξοδο 8-bit PWM με την συνάρτηση analogWrite().
- SPI: 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK). Αυτοί οι ακροδέκτες επιτρέπουν επικοινωνία SPI, η οποία αν και παρέχεται από το hardware δεν είναι ακόμα διαθέσιμη στην γλώσσα προγραμματισμού του Arduino.
- LED: 13. Στον ακροδέκτη 13 υπάρχει ένα ενσωματωμένο LED. Όταν ο ακροδέκτης έχει τιμή HIGH, το LED ανάβει ενώ όταν το pin είναι LOW δεν ανάβει.



Εικόνα 45: Μέρη της πλατφόρμας Arduino Uno
Πηγή: <https://www.researchgate.net>

1.9.2 Σειριακή Θύρα

Χρησιμοποιείται για επικοινωνία μεταξύ της πλατφόρμας Arduino και ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή ή με άλλες συσκευές. Επομένως, όλες οι πλακέτες έχουν τουλάχιστον μια σειριακή θύρα. Επικοινωνεί με τις ψηφιακές ακίδες 0 (RX) και 1 (TX), καθώς και με τον υπολογιστή μέσω USB. Έτσι, εάν χρησιμοποιείται αυτή η λειτουργία(USB), δεν μπορούν ταυτόχρονα να χρησιμοποιηθούν οι ακίδες 0 και 1 για ψηφιακή είσοδο ή έξοδο.

Αξίζει να αναφερθεί ότι, η ενσωματωμένη σειριακή οθόνη στο περιβάλλον του Arduino μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επικοινωνεί με την πλακέτα Arduino. Κάνοντας κλικ στο κουμπί Serial Monitor στην γραμμή εργαλείων και επιλέγοντας την ίδια ταχύτητα που χρησιμοποιείται στην κλήση της Serial.begin()).

Οι βασικές συναρτήσεις της σειριακής θύρας είναι:

- begin() (αρχικοποίηση της σειριακής)
- end() (κλείσιμο της σειριακής)
- available() (έλεγχος αν υπάρχουν δεδομένα να διαβαστούν)
- read() (ανάγνωση των εισερχόμενων σειριακών δεδομένων)
- peek() (επιστρέφει το επόμενο byte από την σειριακή)
- flush() (άδειασμα του buffer της σειριακής από δεδομένα που έχει)
- print() (γράψιμο δεδομένων στη σειριακή)
- println() (το ίδιο με την Print(), αλλά με αλλαγή γραμμής στο τέλος)
- write() (γράφει δυαδικά δεδομένα στη σειριακή)

1.9.3 Χαρακτηριστικά του Arduino

- Microcontroller: ATmega328
- Τάση λειτουργίας: 5V
- Τάση εισόδου: 7-12V
- Τάση εισόδου (όριο): 6-20V
- Digital I/O Pins: 14 (εκ των οποίων 6 περιέχουν PWM εξόδους)
- Analog Input Pins: 6
- DC ρεύματος I/O Pin: 40 mA
- DC τρέχουσα για 3.3V Pin: 50 mA
- Flash Memory: 32 KB εκ των οποίων 0,5 KB που χρησιμοποιούνται από τον bootloader
- SRAM: 2 KB
- EEPROM: 1 KB
- Clock Speed: 16 MHz

1.9.4 Τροφοδοσία

Το Arduino Uno τροφοδοτείται είτε από εξωτερική τροφοδοσία, είτε μέσω μιας υποδοχής των 2.1mm, είτε απευθείας από την θύρα USB του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η επιλογή της πηγής γίνεται αυτόματα από το αναπτυξιακό. Ως εξωτερική τροφοδοσία ορίζεται μια μπαταρία, ή μετασχηματιστής των 9Volt από

220V. Η μπαταρία μπορεί να συνδεθεί στις υποδοχές του Arduino Vin και GND όπου τοποθετούνται ο θετικός πόλος και ο αρνητικός αντίστοιχα. Από την άλλη αν τροφοδοτηθεί με μετασχηματιστή απλά πρέπει να τοποθετηθεί το βύσμα στην υποδοχή που υπάρχει θετικό πόλο στο κέντρο.

Η πλακέτα μπορεί να λειτουργήσει με εξωτερική πηγή από 6 έως 20 Volts. Αν ωστόσο τροφοδοτηθεί με λιγότερα από 7 Volt τα pin εξόδου 5Volt δεν θα εξάγουν τάση. Αντίθετα, αν δώσουμε πάνω από 12 Volts θα υπερθερμανθεί ο σταθεροποιητής τάσης στην πλακέτα και ενδεχομένως να καταστραφεί. Συνεπώς, μια ιδανική τάση είναι τα 9 Volts.

Οι ακροδέκτες τροφοδοσίας είναι οι εξής:

- VIN. Ακροδέκτης για μη σταθεροποιημένη τάση. Συνήθως εδώ συνδέεται μια εξωτερική πηγή τροφοδοσίας.
- 5V. Ακροδέκτης σταθεροποιημένης τάσης 5Volt. Η ρυθμιζόμενη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος που χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία του μικροελεγκτή ή άλλων ηλεκτρονικών στοιχείων της πλακέτας. Αυτό μπορεί να προέρχεται είτε από Vin με ενσωματωμένο ρυθμιστή, ή να παρέχεται από USB ή άλλη ρυθμιζόμενη παροχή 5V
- 3V3. Μέγιστη κατανάλωση ρεύματος είναι 50mA.
- GND. Γειωμένες ακίδες

1.9.5 Επικοινωνία

Το Arduino Uno έχει την δυνατότητα να επικοινωνεί με έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή, έναν άλλον Arduino ή άλλους μικροελεγκτές. Το ολοκληρωμένο ATmega382 παρέχει σειριακή επικοινωνία TTL 5 Volt UART, η οποία είναι διαθέσιμη από τους ακροδέκτες (λήψη RX) 0 και (εκπομπή TX) 1 του ολοκληρωμένου.

Επιπλέον, το Arduino παρέχει σειριακή επικοινωνία με ηλεκτρονικό υπολογιστή για προγραμματισμό με την βοήθεια ενός ειδικά προγραμματιζόμενου ενσωματωμένου ολοκληρωμένου ATmega382 αντί του chip FTDI. Ωστόσο, αυτό επιτρέπει την πιο γρήγορη ταχύτητα μεταφοράς και σειριακής επικοινωνίας. Με την σύνδεση του Arduino μέσω της θύρας USB αυτό εμφανίζεται ως εικονική σειριακή θύρα COM στο λογισμικό του υπολογιστή. Το firmware ATmega382 χρησιμοποιεί τα προγράμματα οδήγησης USB COM και δεν χρειάζεται να υπάρχει εξωτερικός παράγοντας. Επομένως, στα Windows απαιτείται μόνο ένα αρχείο .inf .

Ένα Arduino περιλαμβάνει ένα τμηματικό όργανο ελέγχου το οποίο επιτρέπει την απλή μορφή κειμένου δεδομένων που αποστέλλονται προς και από τη πλακέτα Arduino. Οι RX και TX λυχνίες LED στην πλακέτα θα αναβοσβήνουν όταν γίνεται μετάδοση δεδομένων μέσω του USB-to-chip σειριακή και USB σύνδεση με τον υπολογιστή (αλλά όχι για σειριακή επικοινωνία στις ακίδες 0 και 1).

Κεφάλαιο 2^ο: GRBL Λογισμικό, MakerCam και μοντέλα εκτύπωσης

2.1 GRBL Λογισμικό

Πρόκειται για ένα δωρεάν λογισμικό ανοιχτού κώδικα, υψηλών επιδόσεων, για τον έλεγχο της κίνησης μηχανών που κινούνται, κατασκευάζουν αντικείμενα ή κάνουν άλλες μηχανές να κινούνται και «τρέχουν» απευθείας από ένα Arduino.

Οι περισσότεροι 3D εκτυπωτές λειτουργούν με το GRBL σαν λογισμικό τους. Έχει προσαρμοστεί για χρήση σε εκατοντάδες εφαρμογές συμπεριλαμβανομένων laser cutters και CNC εργαλειομηχανές. Χάρη στην απλότητά του και των λιγοστών απαιτήσεων του, το λογισμικό GRBL έχει εξελιχθεί σε «φαινόμενο»

Το 2009, ο Simen Svalle Skogsrud, έγραψε και κοινοποίησε τις πρώτες εκδοχές του GRBL στην «κοινότητα του ανοιχτού κώδικα». Από το 2011 συνεχίζει σαν πρόγραμμα που αναπτύσσεται μέσω της κοινότητας του, υπό την ηγεσία του Sungeun “Sonny” Jeon Ph.D.

Το GRBL είναι ιδανικό για λιγότερο απαιτητικές διεργασίες. Χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με ηλεκτρονικό υπολογιστή ή Raspberry Pi μέσω των ειδικά σχεδιασμένων πλατφορμών που έχουν αναπτυχθεί για να λειτουργούν με το GRBL. Είναι γραμμένο σε εξειδικευμένη C (γλώσσα προγραμματισμού) εκμεταλλευόμενο έτσι όλα τα πλεονεκτήματα που προσφέρει ο μικροελεγκτής ATmega328p («καρδιά» Arduino) για χρονισμό και ασύγχρονη λειτουργία. Είναι ικανό να διατηρήσει περισσότερα από 30kHz ρυθμό βημάτων και προσφέρει μια καθαρή, χωρίς διακυμάνσεις ροή παλμών.

Ο διερμηνέας του G-code περιλαμβάνει ένα υποσύνολο από τα πρότυπα του LinuxCNC και υποστηρίζεται από τα περισσότερα εργαλεία CAM χωρίς προβλήματα.

2.1.1 Απλά παραδείγματα G-Code

- Basic movement
X10
Move X axis to 10
X0
Move X axis to 0

- Basic configuration

\$120=1

Set X acceleration to 1mm/s²

\$120=1000

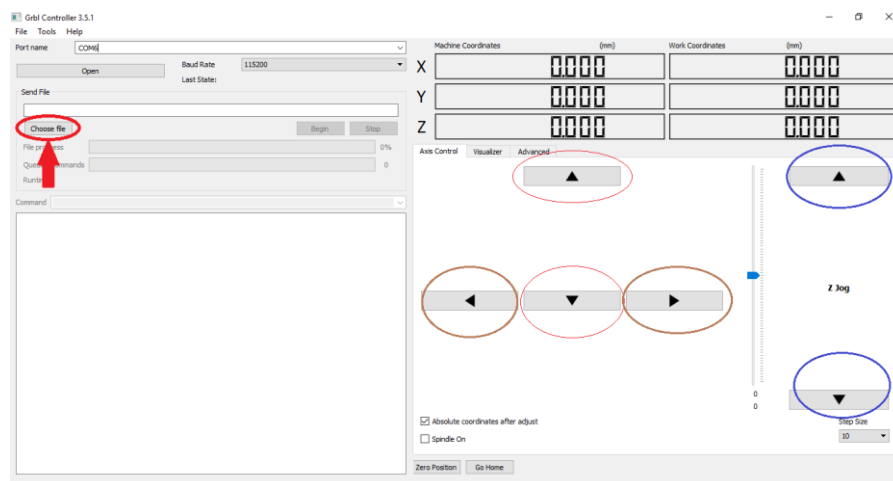
Set X acceleration to 1m/s²

2.1.2 Περιορισμοί

Οι προγραμματιστές έχουν περιορίσει τους G-κώδικες που υποστηρίζονται για να διατηρήσουν τον κώδικα απλό, ελαφρύ και ευέλικτο καθώς συνεχίζουν να βελτιώνουν και να διατηρούν τη σταθερότητα της λειτουργίας με κάθε νέα προσθήκη. Το GRBL μπορεί να ανταπεξέλθει σε όλες τις κοινές διεργασίες μέσω του κώδικα που παράγεται από τα CAM συστήματα ενώ δεν υποστηρίζονται μεταβλητές, βάσεις δεδομένων για εργαλεία, συναρτήσεις, κύκλοι εργασιών και άλλες εξειδικευμένες εντολές. Υποστηρίζονται μόνο οι βασικές λειτουργίες και δυνατότητες της μηχανής. Οι πιο περίπλοκες εντολές μπορούν να απλοποιηθούν μέσω των διεπαφών χρήστη (UIs) και να μεταφραστούν για το GRBL.¹⁰

2.2 Παρουσίαση της χρήσης του GRBL λογισμικού

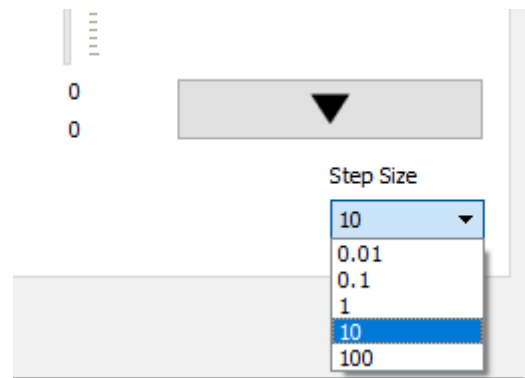
Το GRBL λογισμικό στην έκδοση 3.5.1 που χρησιμοποιείται στη παρούσα εργασία, δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να κινεί τους άξονες της εκάστοτε CNC μηχανής με αρκετά απλό τρόπο, αρκεί πρώτα να έχει ενεργοποιηθεί η μηχανή αυτή με την εντολή «Open». Στην αρχική οθόνη έχει κάποια βέλη που αντιστοιχούν στις κινήσεις κατά X, Y και Z. Τα χρωματισμένα βέλη με το κόκκινο είναι για την κίνηση του Y, τα καφέ είναι για τον X και τα μπλε για τον άξονα Z. (Εικόνα 46).



Εικόνα 46: Το GRBL αφού έχει ενεργοποιηθεί

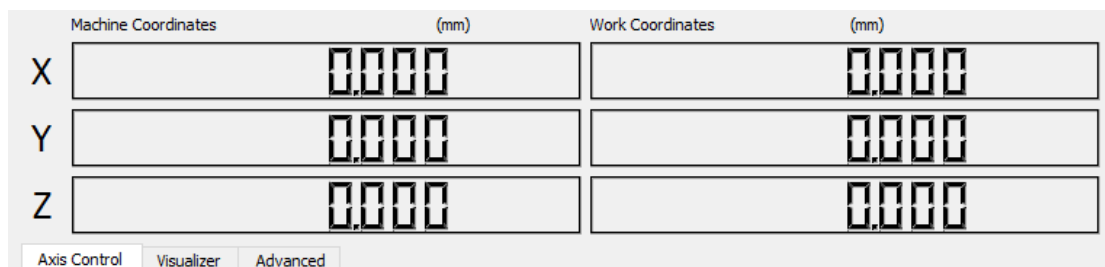
¹⁰ Φιλοσίδης, Γ., Μήτσουρας, Γ., & Σίμος, Μ. (2018). Αναβάθμιση συστήματος ελέγχου εργαλειομηχανής CNC τριών αξόνων., τελευταία πρόσβαση 08/03/2018

Κάτω δεξιά υπάρχει ένα μενού για το μέγεθος του βήματος που θα κάνουν οι άξονες όταν κινούνται “χειροκίνητα”, το «Step size» (Εικόνα 47).



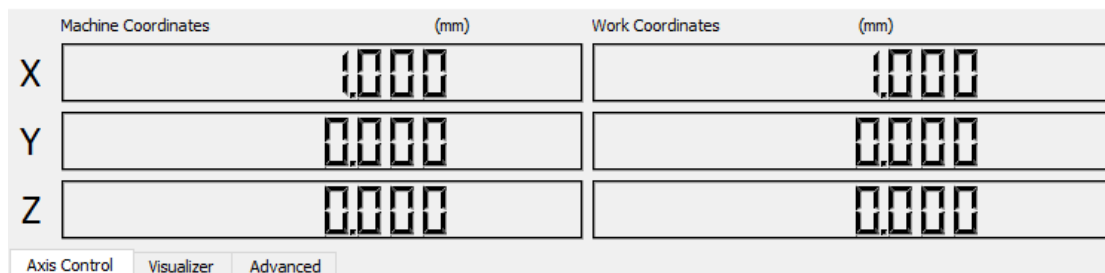
Εικόνα 47: Το μενού του Step Size

Η καλύτερη επιλογή για την εργασία αυτή είναι το « 1 ». Κάθε φορά που θα γίνεται η επιλογή να κινηθούν οι άξονες, θα μετακινείται κατά 1. Το κατά πόσο κινείται ο άξονας μπορεί να ελεγχθεί από τον αριθμητικό πίνακα που υπάρχει πάνω δεξιά (Εικόνα 48).



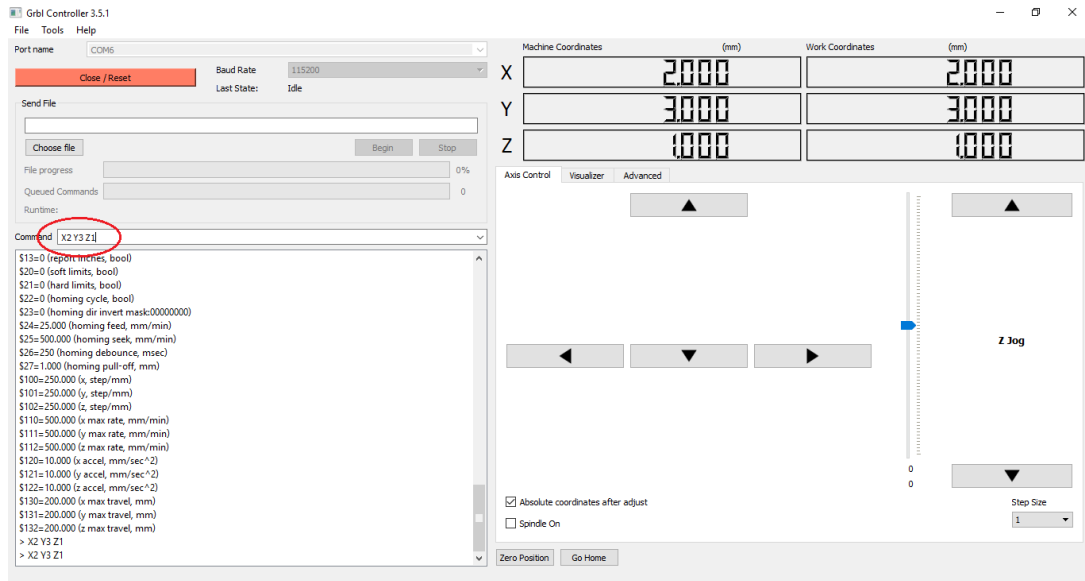
Εικόνα 48: Ο αριθμητικός πίνακας

Αν επιλεγθεί να μετακινηθεί ο άξονας X ως προς τη θετική πλευρά τότε στον πίνακα αυτή η μεταβολή θα είναι φανερή (Εικόνα 49).



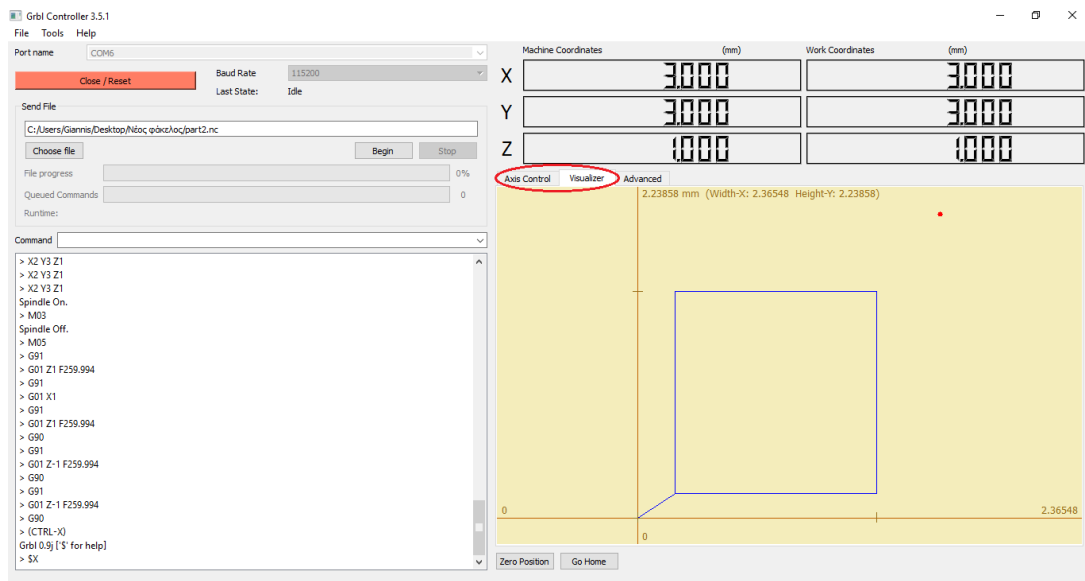
Εικόνα 49: Η μεταβολή του άξονα X ως προς 1

Οι άξονες βέβαια μπορούν να μετακινηθούν πάλι “χειροκίνητα” δίνοντας μία εντολή από το πεδίο «Command». Στο πεδίο εκείνο γράφοντας για παράδειγμα «X2, Y3, Z1» οι άξονες θα μετακινηθούν (Εικόνα 50).



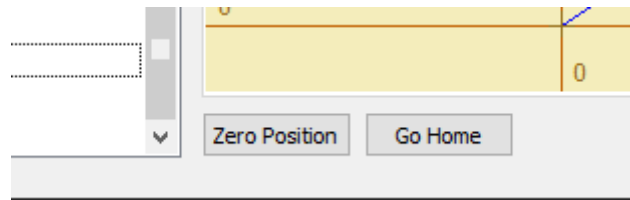
Εικόνα 50: Η εντολή στο πεδίο Command και η ανάλογη μεταβολή

Στη συνέχεια επιλέγοντας ένα αρχείο για εκτύπωση από την εντολή «Choose file», το πρόγραμμα αλλάζει αυτόματα καρτέλα από το «Axis Control» στο «Visualizer» και εμφανίζεται το σχέδιο που έχει επιλεγθεί (Εικόνα 51).



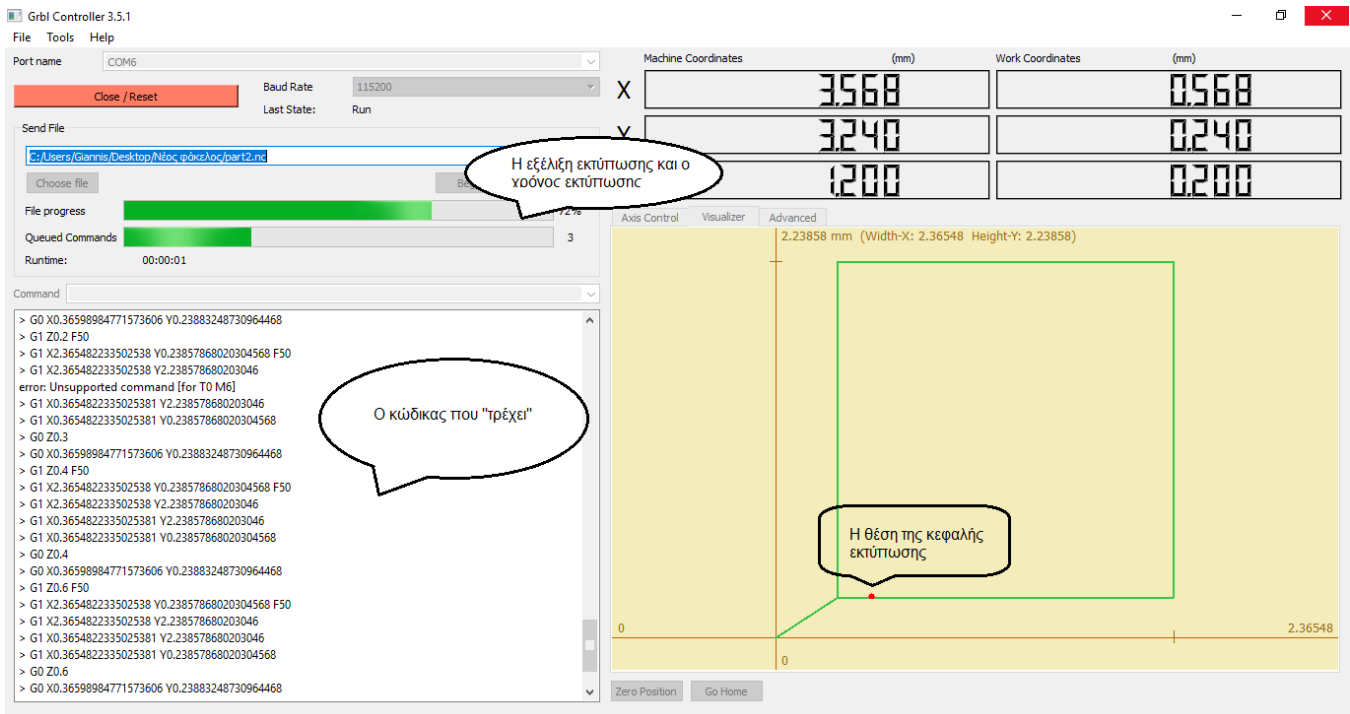
Εικόνα 51: Η καρτέλα Visualizer με το σχήμα

Μία ακόμα δυνατότητα που προσφέρει το GRBL είναι ότι μπορεί να μηδενίσει τους άξονες εκεί όπου θέλει ο χρήστης από την εντολή «Zero Position». Αφού μηδενιστούν οι άξονες και υπάρξει κίνησή τους, αν ο χρήστης θέλει να ξαναγυρίσουν στο μηδενικό σημείο μπορεί να το κάνει με την εντολή «Go Home» (Εικόνα 52).



Εικόνα 52: Οι εντολές Zero Position και Go Home

Αφού λοιπόν γίνει η έναρξη εκτύπωσης του αρχείου, στην αριστερά πλευρά της οθόνης εμφανίζεται το πώς “τρέχει” ο κώδικας. Στην δεξιά πλευρά στο σχέδιο επάνω εμφανίζεται μία κόκκινη κουκίδα η οποία υποδηλώνει το πού βρίσκεται κάθε φορά το 3D μολύβι και κάνει έκχυση του υλικού. Τέλος, πάνω και αριστερά εμφανίζεται η πρόοδος της εκτύπωσης και πόση ώρα εκτυπώνει ο 3D εκτυπωτής (Εικόνα 53).



Εικόνα 53: Η θέση ης κεφαλής, ο κώδικας και η εξέλιξη εκτύπωσης

2.3 MakerCam λογισμικό

Το MakerCam είναι ένα δωρεάν on-line λογισμικό αρκετά απλό και εύκολο στη χρήση του, επιτρέπει να παράγονται διαδρομές εργαλείων για χρήση σε μηχανές CNC. Δίνει την ελευθερία στον χρήστη να δημιουργεί το δικό του ελεύθερο σχέδιο, όπως επίσης και την επιλογή από κάποια ήδη έτοιμα σχέδια, για παράδειγμα κύκλος, τετράγωνο, αστέρι, πολύγωνο κ.α..

Το λογισμικό αυτό είναι σε δοκιμαστικό στάδιο, οπότε και έτσι θα πρέπει να αντιμετωπίζεται από τον εκάστοτε χρήστη.¹¹

2.3.1 Παρουσίαση της χρήσης του λογισμικού MakerCam

Στη συγκεκριμένη εργασία επιλέχτηκε το λογισμικό αυτό ως από τα πιο εύχρηστα on-line δωρεάν λογισμικά. Καθώς λοιπόν ανοίγει η αρχική οθόνη του λογισμικού παρατηρείτε ένα απλό design χωρίς περιττές πληροφορίες(Εικόνα 54).



Εικόνα 54: Αρχική εικόνα λογισμικού

Πάνω αριστερά υπάρχει μία εργαλειοθήκη με πέντε εργαλεία (Εικόνα 55).

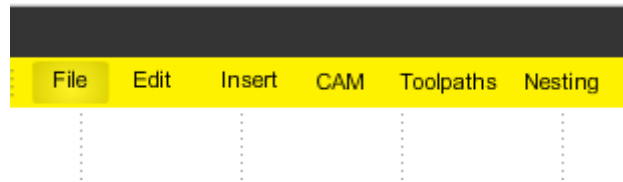


Εικόνα 55: Η εργαλειοθήκη

Αυτά τα πέντε εργαλεία είναι για την μετακίνηση όλης της επιφάνειας σχεδίασης, την επιλογή και την μετακίνηση του σχεδίου, την ελεύθερη σχεδίαση, την σχεδίαση με χρήση ευθείας και τέλος την επιλογή ενός κόμβου από το σχέδιο για τις αλλαγές αυτού.

¹¹ <http://www.makercam.com>, τελευταία πρόσβαση 29/03/2018

Δεξιά από τα εργαλεία αυτά υπάρχουν κάποια μενού (Εικόνα 56).

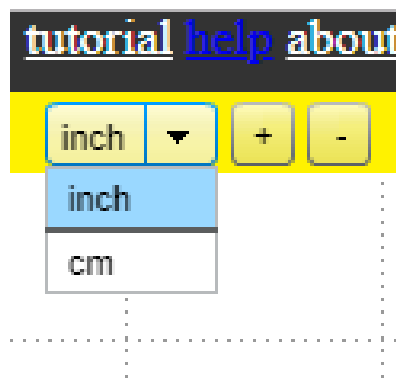


Εικόνα 56: Τα διαθέσιμα μενού

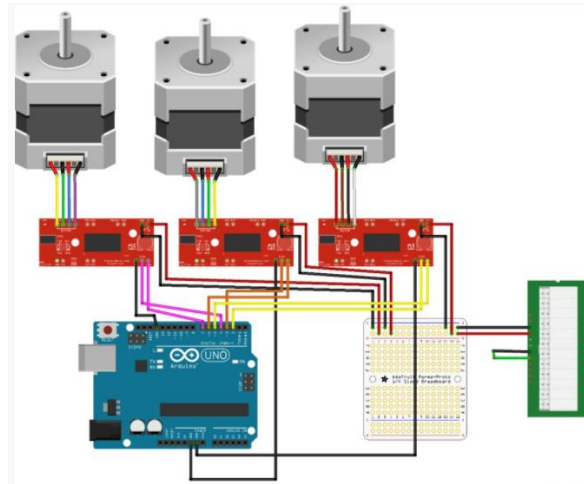
Από αυτά τα μενού παρέχεται η δυνατότητα στον χρήστη να “ανεβάσει” ένα αρχείο τύπου .svg, να εισάγει κάποιο προσχεδιασμένο μοντέλο όπως επίσης και να το μορφοποιήσει ως προς το μέγεθος είτε αυτό είναι μικρότερο είτε μεγαλύτερο, να το περιστρέψει κ.α.. Επίσης αφού υπάρχει κάποιο σχεδιασμένο μοντέλο μπορεί ο χρήστης να επιλέξει την διαδρομή του εργαλείου που θα κάνει την εκτύπωση. Κατά πόσο δηλαδή θα εκχύει υλικό όπως και το πόσο γρήγορα θα κινούνται οι άξονες. Επειδή όμως το πρόγραμμα είναι για τις περισσότερες CNC μηχανές, μπορεί να τροποποιηθεί και η πορεία μιας μηχανής που δημιουργεί τρύπες όπως ένας τόρνος.

Γίνεται εξαγωγή του σχεδίου σε μορφή .nc το οποίο τροποποιείται αρκετά εύκολα μέσω τη εφαρμογής σημειωματάριο. Οι τροποποιήσεις χρησιμεύουν για την καλύτερη δυνατή εκτύπωση.

Η σχεδίαση μοντέλων μπορεί να γίνει είτε σε ίντσες είτε εκατοστά, επιλέγοντάς το απλά από την πάνω δεξιά πλευρά της αρχική οθόνης (Εικόνα 57).



Εικόνα 57: Εναλλαγή από ίντσες σε εκατοστά



Κεφάλαιο 3^ο: Ανάπτυξη του 3D εκτυπωτή με τη χρήση του μικροελεγκτή Arduino

3.1 Υλικά για την κατασκευή

Για την ανάπτυξη αυτού του 3D εκτυπωτή χρησιμοποιήθηκαν υλικά από παλαιότερους ηλεκτρονικούς υπολογιστές, όπως επίσης και διάφορα άλλα υλικά που μπορούν να βρεθούν εύκολα στην αγορά.

Ποιο αναλυτικά:

1. 3x CD-ROM
2. 3x Stepper motor drivers
3. 1x Arduino Uno
4. 1x Τροφοδοτικό
5. 1x 3D Μολύβι – Υλικό εκτύπωσης
6. 1x Breadboard
7. Καλώδια για τις συνδεσμολογίες
8. Ζεστή κόλλα
9. Διάφορες βίδες – παξιμάδια
10. 2x Γωνίες

3.2 Ανάπτυξη του 3Δ εκτυπωτή

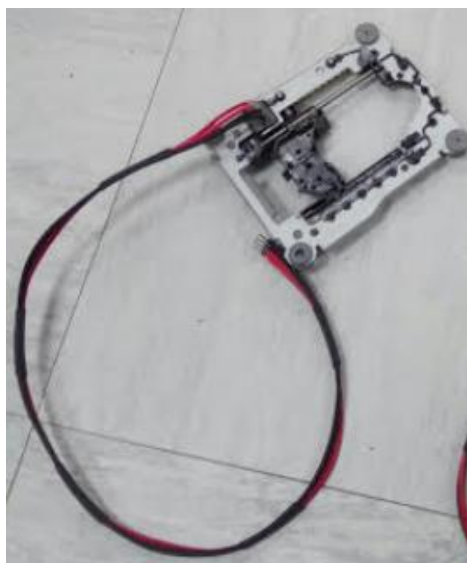
Ξεκινώντας την ανάπτυξη του 3Δ εκτυπωτή πρέπει από τα 3 CD-ROMs να αφαιρεθούν τα “περιττά” κομμάτια (Εικόνα 58).



Εικόνα 58: Ανοιχτό CD-ROM με τελικό αποτέλεσμα αυτό που χρησιμοποιείται στην ανάπτυξη του 3Δ εκτυπωτή

Πηγή: <http://www.homofaciens.de>

Στη συνέχεια θα πρέπει να βρεθούν οι κοινές επαφές πάνω στα cd-roms, ώστε μετέπειτα να γίνει η συνδεσμολογία με τα stepper motor drivers. Υπάρχουν τέσσερις επαφές, δύο από αυτές είναι κοινές μεταξύ τους και οι άλλες δύο είναι κοινές και αυτές. Στις πρώτες κοινές επαφές θα χρησιμοποιηθεί ένα χρώμα καλωδίων, στην προκειμένη περίπτωση κόκκινο, στις άλλες δύο θα χρησιμοποιηθεί μαύρο χρώμα καλωδίων (Εικόνα 59).



Εικόνα 59: CD-ROM με την ανάλογη χρήση καλωδίων

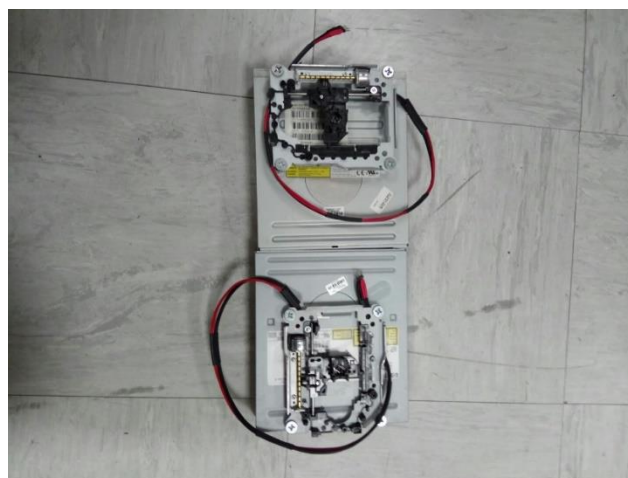
Αφού έχουν έρθει στην επιθυμητή μορφή τα τρία CD-ROMs, τότε είναι έτοιμα ώστε να τοποθετηθούν ως προς X, Y, Z πάνω σε μια ιδιοκατασκευή από τα μεταλλικά κουτιά των CD-ROMs (Εικόνα 60).



Εικόνα 60: Οι τρεις άξονες από CD-ROMs

Τα δύο μεταλλικά κουτιά που θα χρησιμοποιηθούν στην ιδιοκατασκευή θα τοποθετηθούν το ένα πάνω στο άλλο σε μορφή «L» και θα ενωθούν με δύο γωνίες για να σταθεροποιηθούν. Στο πάνω κομμάτι της ιδιοκατασκευής θα είναι ο άξονας X και επάνω σε αυτό τον άξονα θα ενσωματωθεί και ο άξονας Z.

Στο κάτω κομμάτι θα είναι ο άξονας Z, επάνω στον οποίο θα υπάρχει και η βάση για την εκτύπωση (Εικόνες 61 & 62).



Εικόνα 61: Ο άξονας X και Y πάνω στα μεταλλικά κουτιά



Εικόνα 62: Η ιδιοκατασκευή σε σχήμα L με τους X και Y άξονες

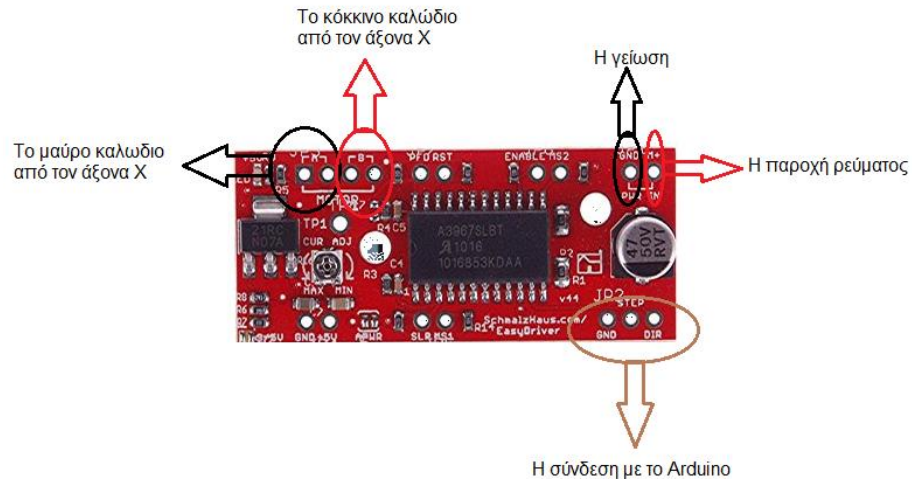
Για να μπορέσει να συγκρατηθεί σωστά ο άξονας Z πάνω στον άξονα X, θα πρέπει να προστεθεί μία ακόμα σκληρή βάση. Έτσι μπήκε ένα ακόμα μεταλλικό κομμάτι πάνω στον άξονα X σε απόσταση με την βοήθεια βιδών και παξιμαδιών. Ο X άξονας θα πρέπει να τοποθετηθεί στο μέγιστο ύψος του όρθιου μεταλλικού κουτιού. Αυτοί οι δύο άξονες σταθεροποιούνται με βίδες και παξιμάδια (Εικόνα 62).

Αφού η ιδιοκατασκευή είναι έτοιμη θα πρέπει να γίνουν και οι συνδεσμολογίες (Εικόνα 63).

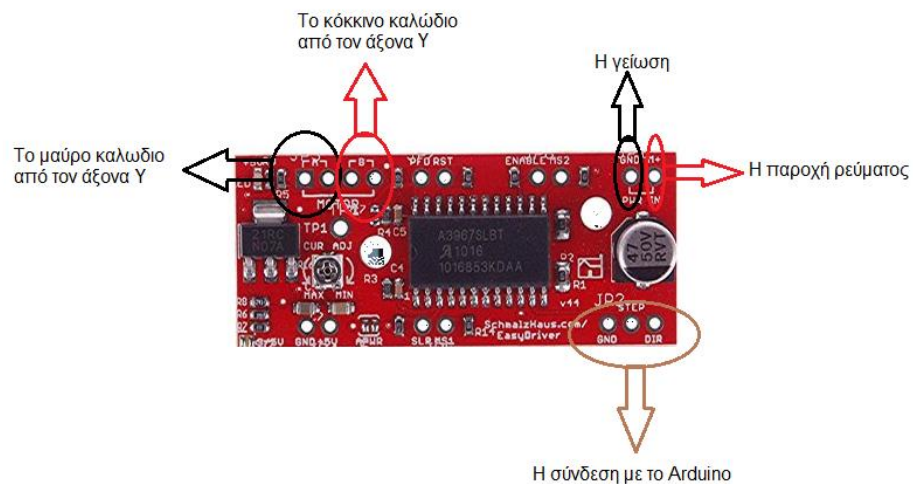


Εικόνα 63: Τελική μορφή της κατασκευής

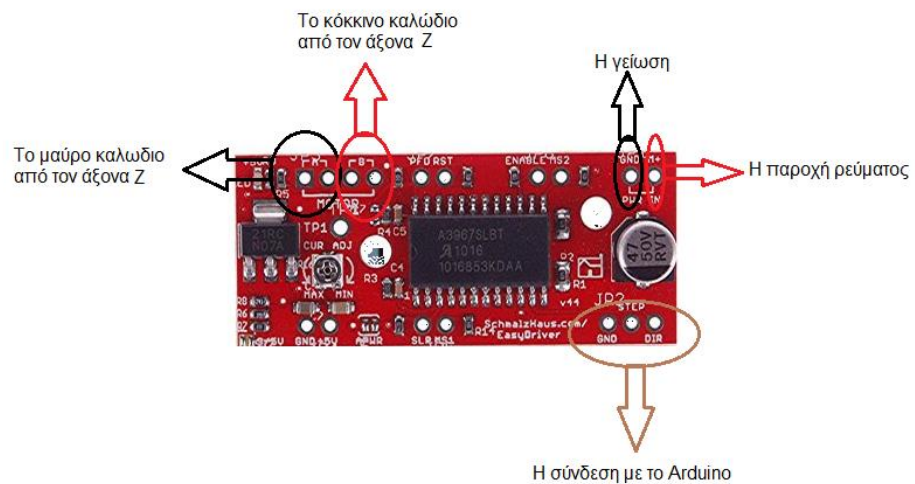
Για τις συνδεσμολογίες θα χρειαστούν οι τρεις Stepper motor drivers το breadboard και το Arduino Uno. Η συνδεσμολογία πάνω στους Stepper motor drivers είναι αρκετά απλή (Εικόνες 64, 65, 66)



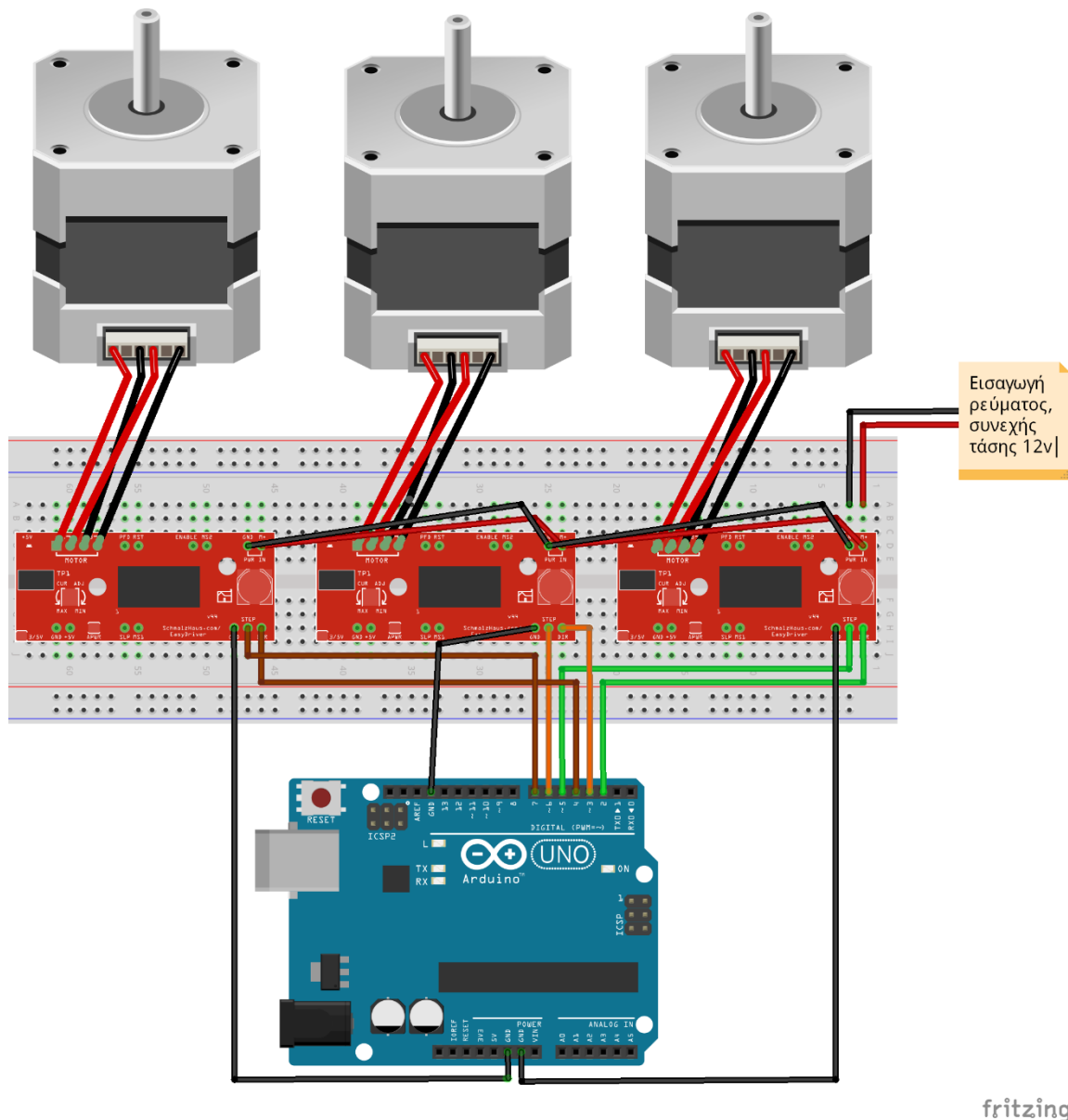
Εικόνα 64: Σχεδιάγραμμα συνδεσμολογίας του άξονα X με το stepper motor driver



Εικόνα 65: Σχεδιάγραμμα συνδεσμολογίας του άξονα Y με το stepper motor driver



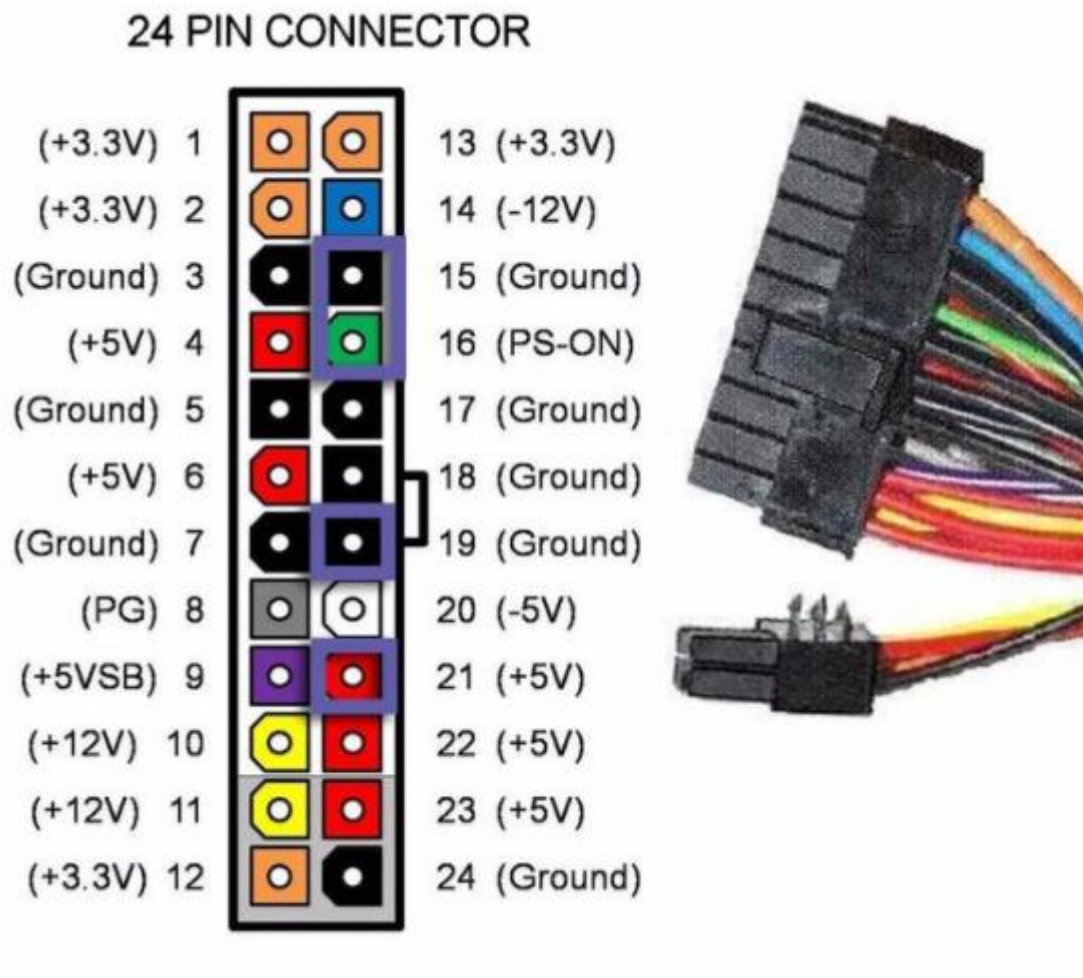
Εικόνα 66: Σχεδιάγραμμα συνδεσμολογίας του άξονα Z με το stepper motor driver



Εικόνα 67: Η συνδεσμολογία με το Arduino, τα τρία stepper motor drivers και του τρεις άξονες σχεδιασμένο στο Fritzing Software

Εφόσον είναι έτοιμα όλα και συνδεδεμένα μεταξύ τους το μόνο που λείπει είναι η παροχή ρεύματος. Η χρήση ενός τροφοδοτικού από παλιό ηλεκτρονικό υπολογιστή είναι μία εύκολη και οικονομική λύση. Το πρόβλημα που υπάρχει όμως με το τροφοδοτικό είναι ότι υπάρχουν πολλά καλώδια, τα οποία δεν χρειάζονται όλα. Σε όλα τα τροφοδοτικά υπάρχει ένα πράσινο καλώδιο που όταν δεν είναι κάπου συνδεδεμένο τότε δεν ενεργοποιείτε (Εικόνα 67).

Έτσι για να παρακαμφτεί αυτό γίνεται χρήση ενός καλωδίου ώστε να προκληθεί βραχυκύκλωμα από αυτό το πράσινο καλώδιο σε μία γείωση. Στη συνέχεια θα πρέπει, ένα από τα κόκκινα καλώδια του τροφοδοτικού και ένα μαύρο να ενωθούν με το breadboard στην ανάλογη θέση (Εικόνα 68).



Εικόνα 68: Το βύσμα του τροφοδοτικού με τα καλώδια που χρησιμοποιούνται

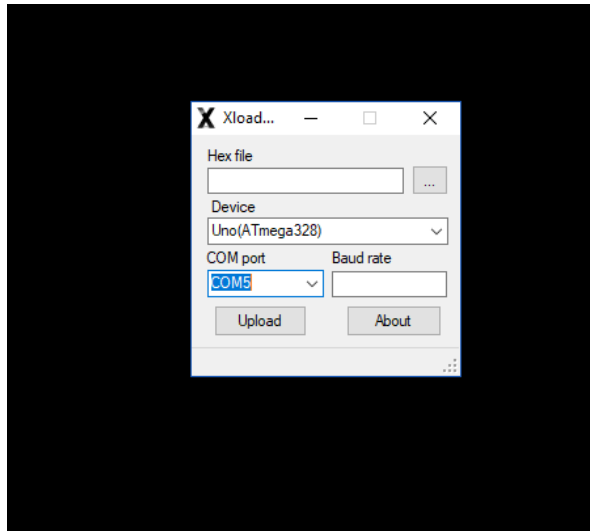
Στη συνέχεια και αφού ο 3Δ εκτυπωτής είναι στην επιθυμητή μορφή, είναι ώρα να συνδεθεί και το 3Δ μολύβι. Έτσι λοιπόν με την χρήση βίδας και παξιμαδιών στηρίζεται το 3Δ μολύβι πάνω στον άξονα Z (Εικόνα 69).



Εικόνα 69: Η τελική μορφή του 3Δ εκτυπωτή

3.3 Προγραμματισμός 3Δ εκτυπωτή

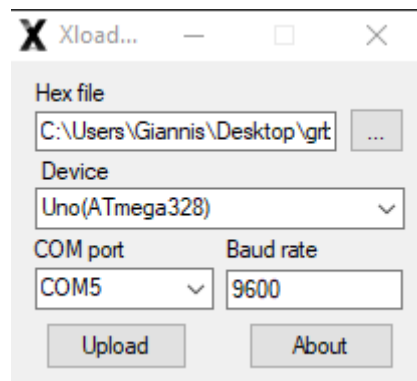
Καθώς λοιπόν όλα είναι έτοιμα, πρέπει να γίνει έλεγχος αν ο εκτυπωτής είναι ικανός να εκτυπώσει ότι του δοθεί. Γι' αυτό θα πρέπει να γίνει προγραμματισμός των αξόνων μέσω ενός λογισμικού από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Το λογισμικό που χρησιμοποιείται στην συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία είναι το XLoader (Εικόνα 70).



Εικόνα 70: Xloader Software

Στη συνέχεια θα πρέπει να συνδεθεί το Arduino Uno στον ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω USB και να γίνει upload ένα αρχείο .hex, να επιλεγεί η σωστή συσκευή Arduino όπως επίσης και η σωστή θύρα COM. Το Baud rate θα είναι ανάλογο με το αρχείο .hex.

Από μια αναζήτηση στο διαδίκτυο βρίσκεται το κατάλληλο αρχείο .hex, επιλέγεται το Arduino Uno, η θύρα COM 5 και γίνεται το ανέβασμα του αρχείου (Εικόνα 71).



Εικόνα 71: XLoader με το αρχείο .hex

3.4 Σχεδιασμός μοντέλων με χρήση Makercam

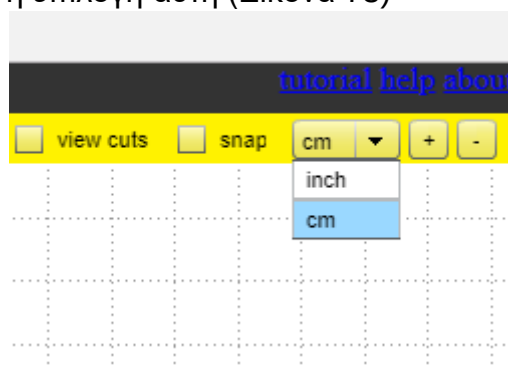
Αφού έχει προγραμματιστεί ο μικροελεγκτής είναι ώρα να σχεδιαστεί κάποιο μοντέλο και να δοθεί για εκτύπωση στον 3D εκτυπωτή. Θα πρέπει να βρεθεί ένα λογισμικό σχεδίασης το οποίο να εξαγάγει το σχεδιασμένο μοντέλο σε μορφή G-Code, γιατί τέτοιο κώδικα χρησιμοποιεί το GRBL λογισμικό, του οποίου γίνεται χρήση για την λειτουργία του 3D εκτυπωτή.

Ένα τέτοιο λογισμικό σχεδίασης είναι το makercam το οποίο είναι δωρεάν on-line και αρκετά εύκολο στη χρήση του (Εικόνα 72).



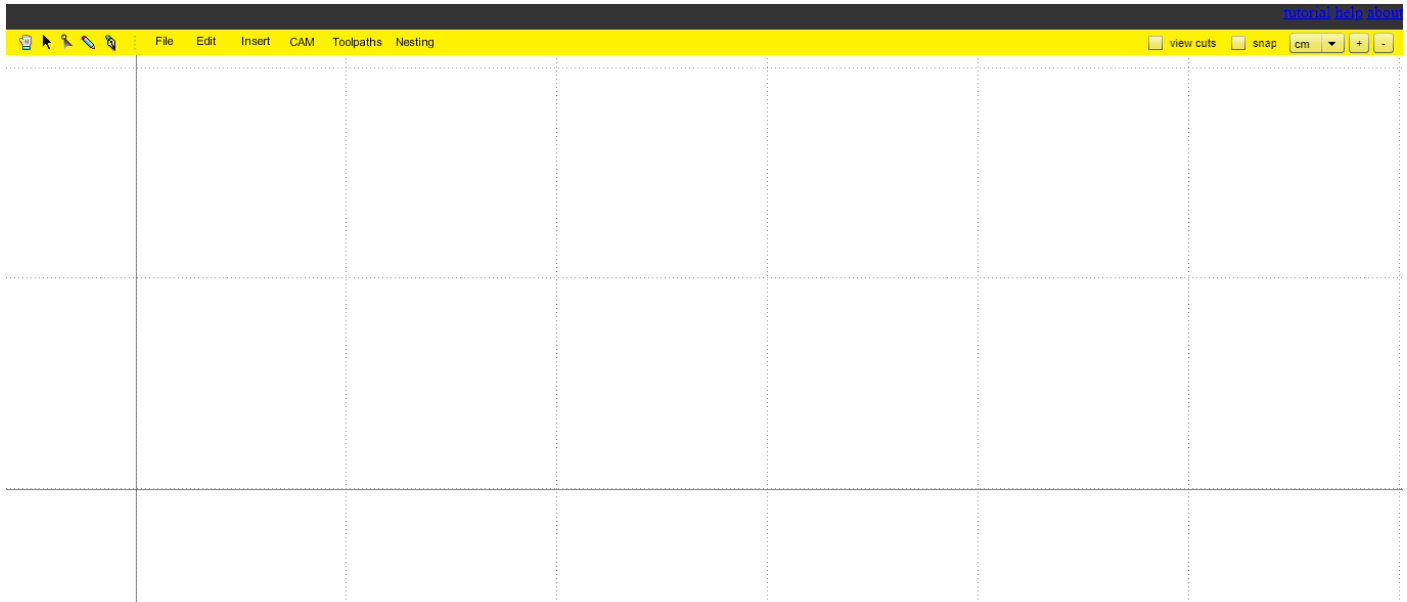
Εικόνα 72: Το on-line λογισμικό Makercam

Καθώς λοιπόν έχει βρεθεί το σωστό λογισμικό, έχει έρθει η ώρα για το πρώτο μοντέλο. Πρώτα απ' όλα πρέπει να γίνει εναλλαγή από ίντσες σε εκατοστά. Πάνω δεξιά υπάρχει η επιλογή αυτή (Εικόνα 73)



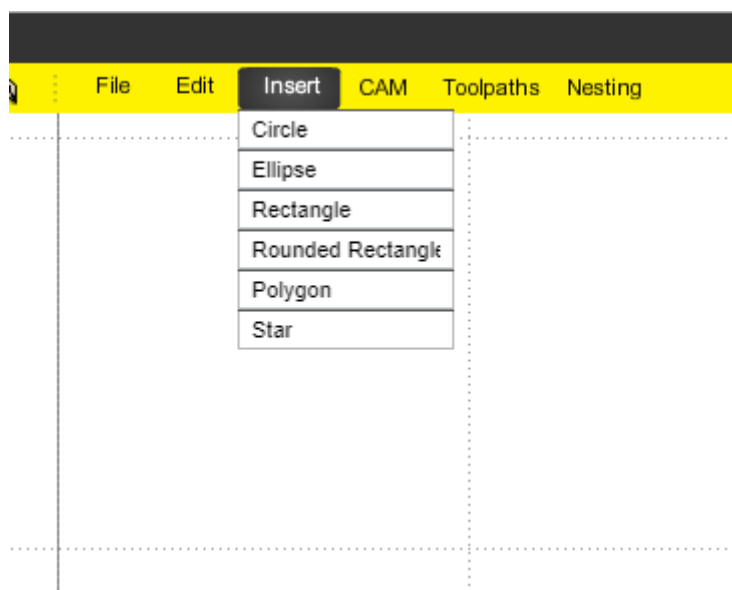
Εικόνα 73: Αλλαγή από ίντσες σε εκατοστά

Μετάπειτα πρέπει να γίνει εστίαση όσο περισσότερο γίνεται. Δίπλα από την εναλλαγή από ίντσες σε εκατοστά υπάρχουν τα σύμβολα « + » και « - », τα οποία είναι η μεγέθυνση και η σμίκρυνση αντίστοιχα. Μετά από αυτό θα πρέπει να μετακινηθεί η επιφάνεια σχεδίασης στο κέντρο των αξόνων (Εικόνα 74).



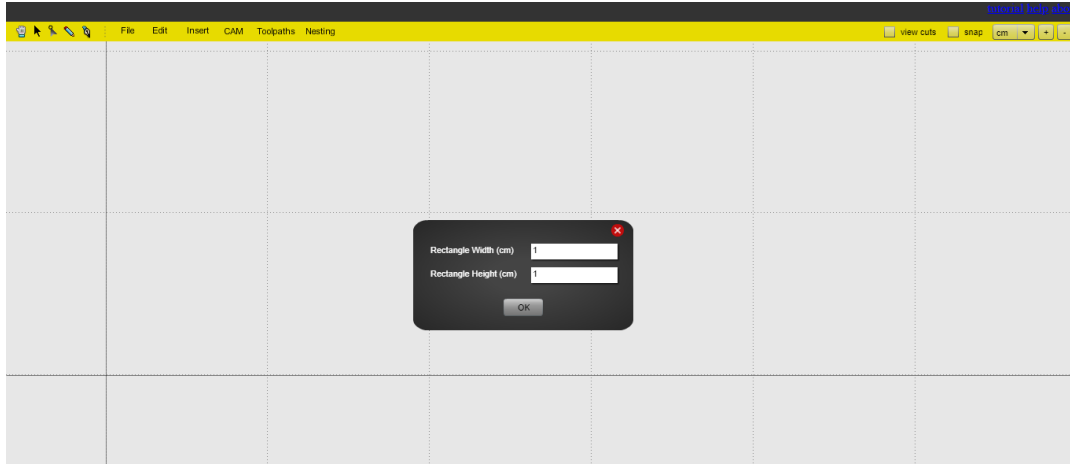
Εικόνα 74: Η επιφάνεια σχεδίασης όπου θα δημιουργηθεί το σχέδιο

Στη συνέχεια πάνω αριστερά υπάρχει η επιλογή «Insert» η οποία παρέχει την δυνατότητα για τη δημιουργία κάποιων απλών μοντέλων όπως κύκλο, τετράγωνο, αστέρι κ.α. (Εικόνα 75).



Εικόνα 75: Η επιλογή Insert με τα έτοιμα μοντέλα

Γίνεται επιλογή του μοντέλου «Rectangle» και το πρόγραμμα αυτόματα ζητάει το μήκος και το πλάτος του τετραγώνου (Εικόνα 76).

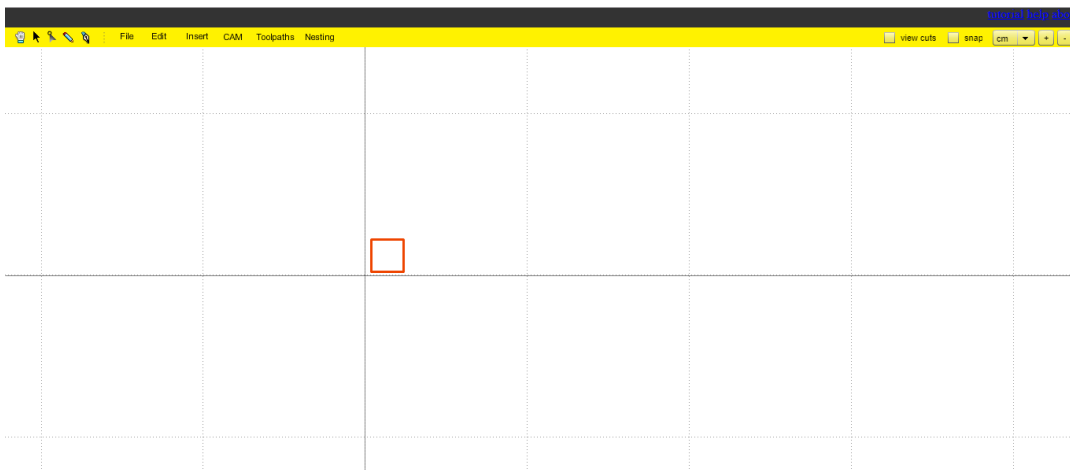


Εικόνα 76: Επιλογή του μήκους και του πλάτους του τετραγώνου

Σε αυτό το σημείο επειδή η επιφάνεια εκτύπωσης στον 3Δ εκτυπωτή είναι μικρή (7cm πλάτος και 5cm μήκος), θα γίνει επιλογή :

Rectangle Width 0.20cm
Rectangle Height 0.20cm

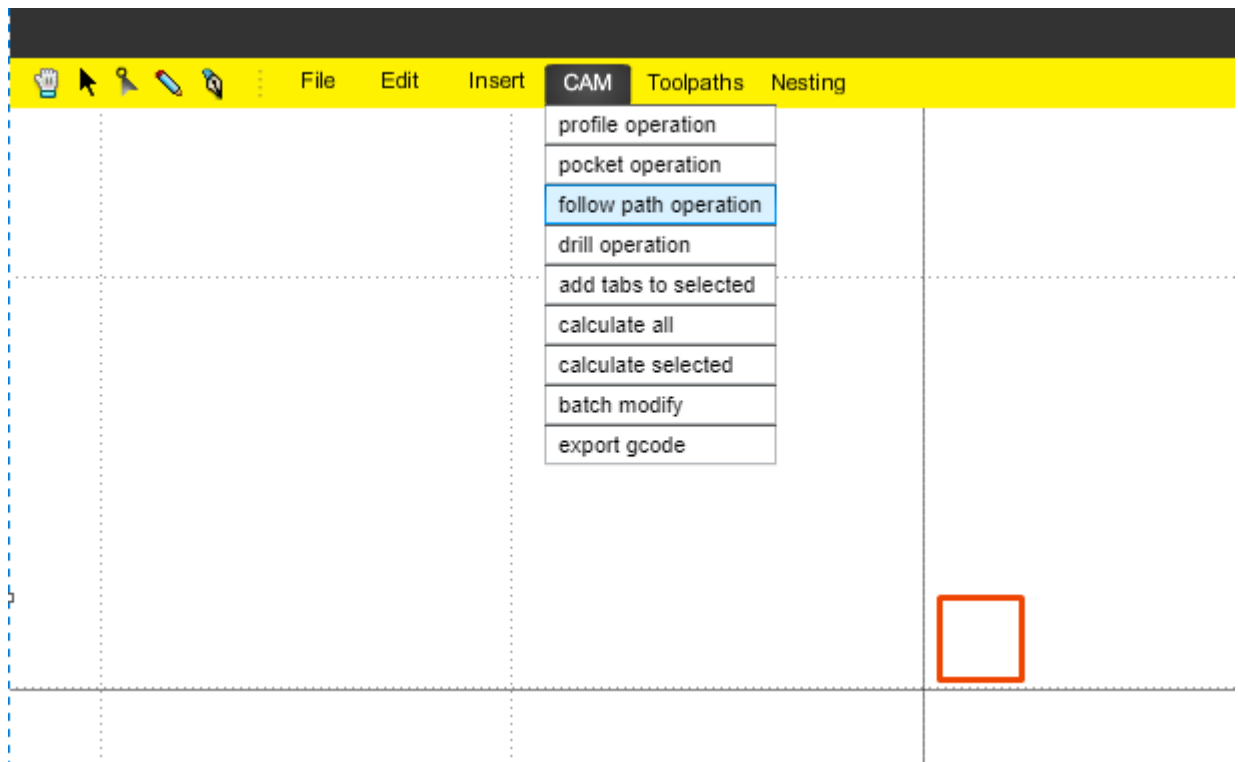
Έτσι θα υπάρξει το επιθυμητό αποτέλεσμα σε μέγεθος. Το τετράγωνο που θα δημιουργηθεί θα πρέπει να μετακινηθεί σε κέντρο των αξόνων στο λογισμικό σχεδίασης (Εικόνα 77).



Εικόνα 77: Το μοντέλο στη σωστή θέση και σωστό μέγεθος

Στη συνέχεια θα πρέπει να δημιουργηθεί το «μονοπάτι» που θα ακολουθήσει ο 3D εκτυπωτής για να εκτυπώσει το μοντέλο.

Αυτό θα γίνει από την επιλογή «Follow Path Operation» που βρίσκεται στο αναπτυσσόμενο μενού της επιλογής CAM που βρίσκεται πάνω αριστερά (Εικόνα 78).



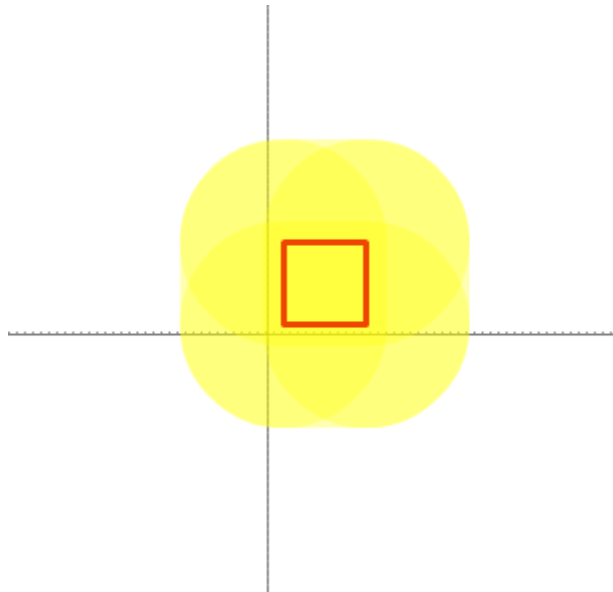
Εικόνα 78: Η επιλογή Follow Path Operation

Στο μενού που εμφανίζεται μετά την επιλογή του Follow path operation θα πρέπει να γίνουν ακόμα κάποιες αλλαγές. Το επιθυμητό είναι αυτό που ακολουθεί και μετά κλικ στο OK (Εικόνα 79).



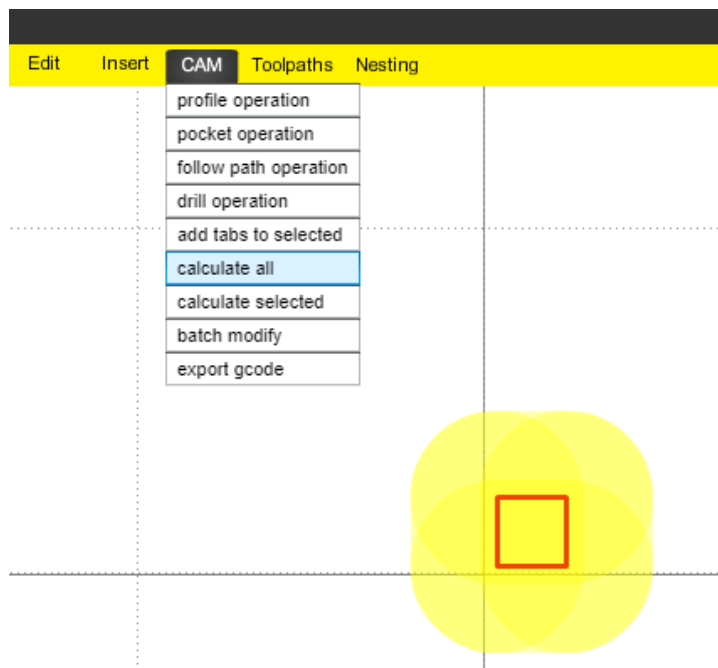
Εικόνα 79: Οι σωστές επιλογές στην εντολή Follow path operation

Το αποτέλεσμα θα είναι αυτό που βρίσκεται στην εικόνα 80.



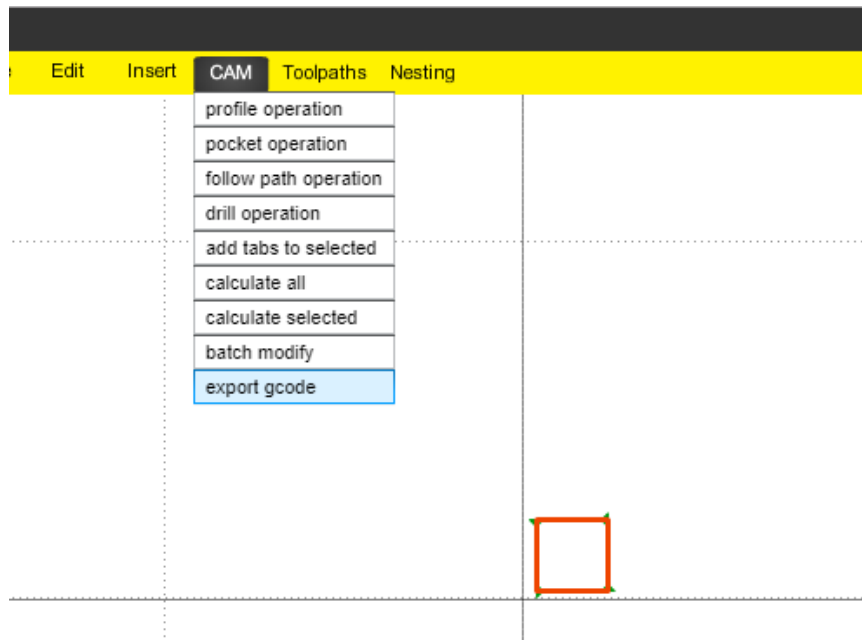
Εικόνα 80: Το αποτέλεσμα μετά το OK στο follow path operation

Αμέσως μετά, από το μενού CAM, γίνεται η επιλογή της εντολής «calculate all» (Εικόνα 81).



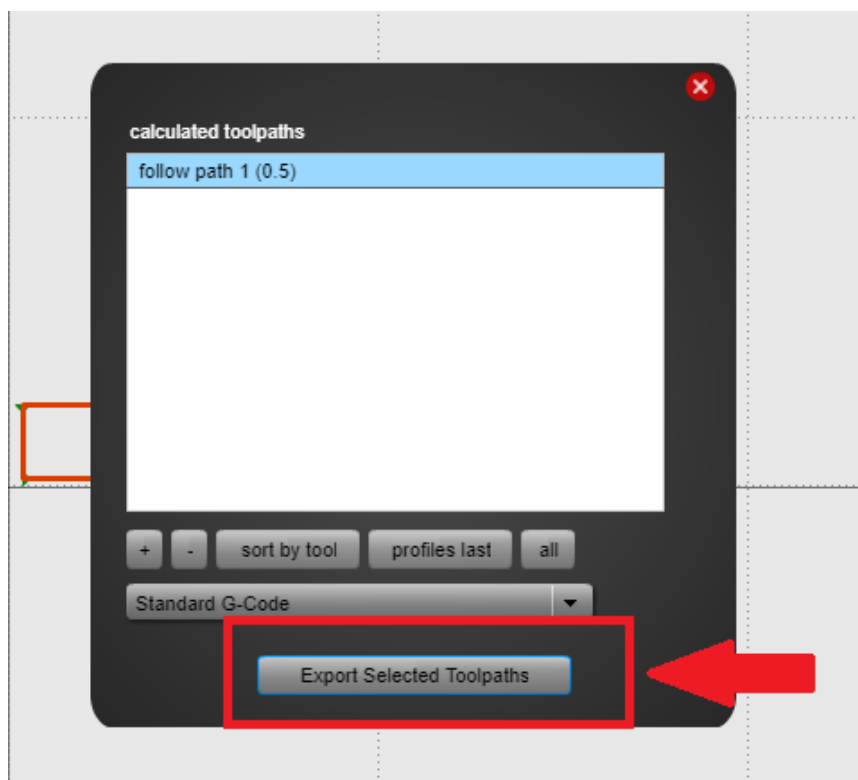
Εικόνα 81: Η εντολή calculate all

Μετά το «calculate all» έχει μείνει μία τελευταία εντολή για να γίνει η εξαγωγή του σχεδίου, έτσι λοιπόν πάλι από το μενού CAM ακολουθεί η εντολή «export gcode» (Εικόνα 82).



Εικόνα 82: Η εντολή export gcode

Στη συνέχεια εμφανίζεται ένα τελευταίο παράθυρο στο οποίο απλά χρειάζεται να επιλεγεί το «Export Selected Toolpaths» (Εικόνα 83).



Εικόνα 83: Η επιλογή για να γίνει η εξαγωγή του μοντέλου σε G κώδικα

3.5 Επεξεργασία του Gcode για την ορθή διαδικασία εκτύπωσης

Έχοντας κάνει την εξαγωγή του σχεδίου σε Gcode, εμφανίζεται ένα αρχείο τύπου .nc, αυτό το αρχείο μπορεί να τροποποιηθεί ανοίγοντάς το με το σημειωματάριο. Όλη αυτή η διαδικασία αποσκοπεί στην ορθή διαδικασία εκτύπωσης. Στις εικόνες που ακολουθούν υπάρχουν οι τροποποιήσεις που πρέπει να γίνουν (Εικόνες 84 & 85).

```
G0 Z0
T0 M6
G17
M3
G0 X0.36598984771573606 Y0.23883248730964468
G1 Z-0.2 F50
G1 X2.365482233502538 Y0.23857868020304568 F5
G1 X2.365482233502538 Y2.238578680203046
G1 X0.3654822335025381 Y2.238578680203046
G1 X0.3654822335025381 Y0.23857868020304568
G0 Z0
G0 X0.36598984771573606 Y0.23883248730964468
G1 Z-0.4 F50
G1 X2.365482233502538 Y0.23857868020304568 F5
G1 X2.365482233502538 Y2.238578680203046
G1 X0.3654822335025381 Y2.238578680203046
G1 X0.3654822335025381 Y0.23857868020304568
G0 Z0
G0 X0.36598984771573606 Y0.23883248730964468
G1 Z-0.6 F50
G1 X2.365482233502538 Y0.23857868020304568 F5
G1 X2.365482233502538 Y2.238578680203046
G1 X0.3654822335025381 Y2.238578680203046
G1 X0.3654822335025381 Y0.23857868020304568
G0 Z0
G0 X0.36598984771573606 Y0.23883248730964468
G1 Z-0.8 F50
G1 X2.365482233502538 Y0.23857868020304568 F5
G1 X2.365482233502538 Y2.238578680203046
G1 X0.3654822335025381 Y2.238578680203046
G1 X0.3654822335025381 Y0.23857868020304568
G0 Z0
G0 X0.36598984771573606 Y0.23883248730964468
G1 Z-1 F50
G1 X2.365482233502538 Y0.23857868020304568 F5
G1 X2.365482233502538 Y2.238578680203046
G1 X0.3654822335025381 Y2.238578680203046
G1 X0.3654822335025381 Y0.23857868020304568
G0 Z0
M5
M30
```

Εικόνα 84: Αρχική μορφή κώδικα

```
G0 Z0
T0 M6
G17
M3
G0 X0.36598984771573606 Y0.23883248730964468
G1 Z0.2 F50
G1 X2.365482233502538 Y0.23857868020304568 I
G1 X2.365482233502538 Y2.238578680203046
G1 X0.3654822335025381 Y2.238578680203046
G1 X0.3654822335025381 Y0.23857868020304568
G0 Z0.3
G0 X0.36598984771573606 Y0.23883248730964468
G1 Z0.4 F50
G1 X2.365482233502538 Y0.23857868020304568 I
G1 X2.365482233502538 Y2.238578680203046
G1 X0.3654822335025381 Y2.238578680203046
G1 X0.3654822335025381 Y0.23857868020304568
G0 Z0.4
G0 X0.36598984771573606 Y0.23883248730964468
G1 Z0.6 F50
G1 X2.365482233502538 Y0.23857868020304568 I
G1 X2.365482233502538 Y2.238578680203046
G1 X0.3654822335025381 Y2.238578680203046
G1 X0.3654822335025381 Y0.23857868020304568
G0 Z0.6
G0 X0.36598984771573606 Y0.23883248730964468
G1 Z0.8 F50
G1 X2.365482233502538 Y0.23857868020304568 I
G1 X2.365482233502538 Y2.238578680203046
G1 X0.3654822335025381 Y2.238578680203046
G1 X0.3654822335025381 Y0.23857868020304568
G0 Z0.8
G0 X0.36598984771573606 Y0.23883248730964468
G1 Z1 F50
G1 X2.365482233502538 Y0.23857868020304568 I
G1 X2.365482233502538 Y2.238578680203046
G1 X0.3654822335025381 Y2.238578680203046
G1 X0.3654822335025381 Y0.23857868020304568
G0 Z1
G0 X0 Y0
M5
M30
```

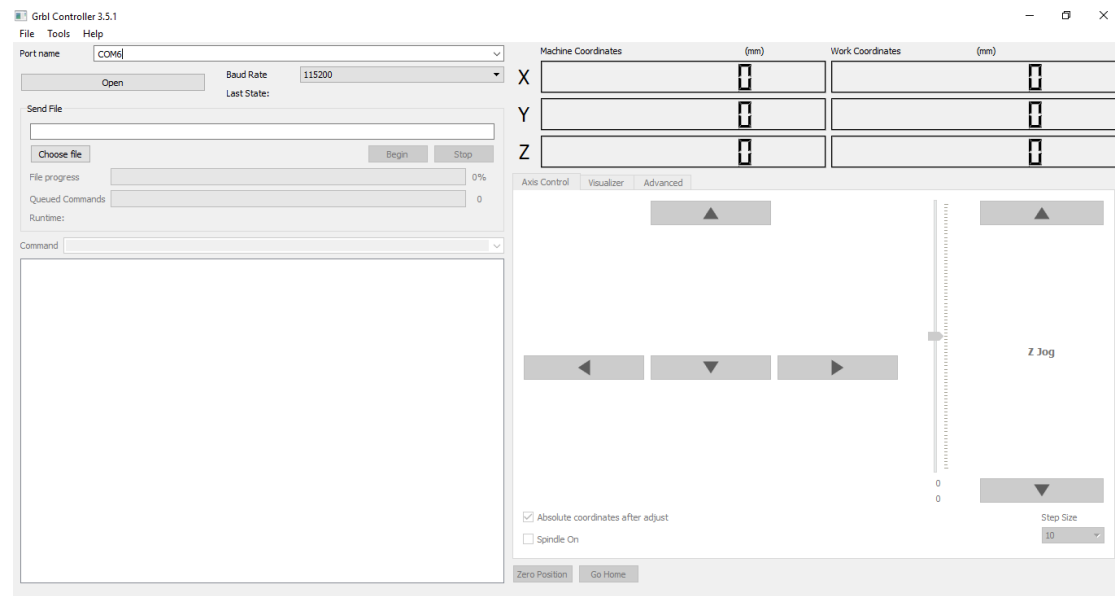
Εικόνα 85: Ο κώδικας με τις αλλαγές

Οι μεταβολές που είναι χρωματισμένες με κίτρινο, αφορούν τον άξονα Z και την κίνηση που κάνει. Το πρόσημο « - » έχει αφαιρεθεί για να κάνει ανοδική κίνηση ο άξονας Z και όχι καθοδική. Όπως επίσης και η τελευταία εντολή που προστέθηκε, « G0 X0 Y0 », είναι για να μετακινηθεί ο άξονας στην αρχική του μηδενική θέση. Οι μεταβολές που είναι χρωματισμένες με πράσινο, αφορούν

πάλι τον άξονα Z όμως αυτή την φορά του δίνεται η εντολή όταν ολοκληρώνει ένα “πέρασμα” να μη κατεβαίνει στο μηδέν αλλά να ανεβαίνει κατά 0.2.

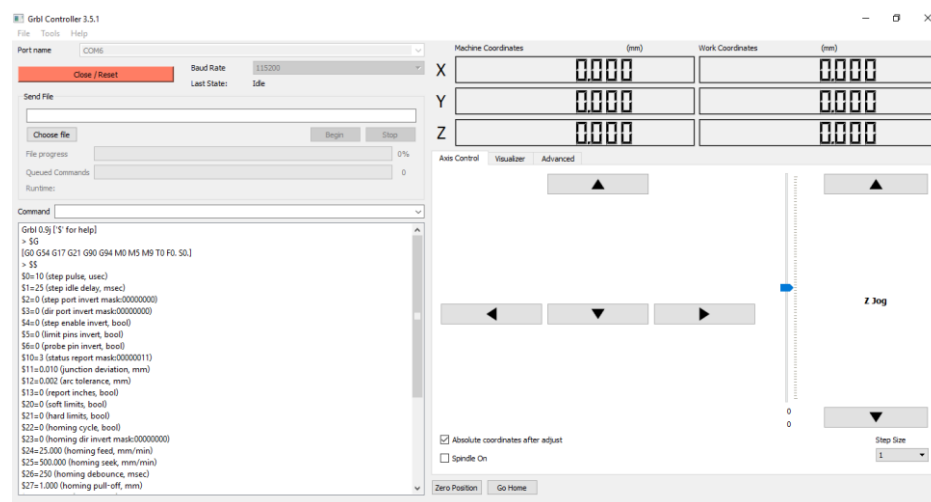
3.6 Εκτύπωση μοντέλου

Το αρχείο πλέον είναι έτοιμο για εκτύπωση. Έτσι λοιπόν πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα λογισμικό που μπορεί να “διαβάσει” Gcode για την εκτύπωση. Ένα τέτοιο είναι το GRBL, το οποίο είναι δωρεάν και πρέπει να εγκατασταθεί στον ηλεκτρονικό υπολογιστή (Εικόνα 86).

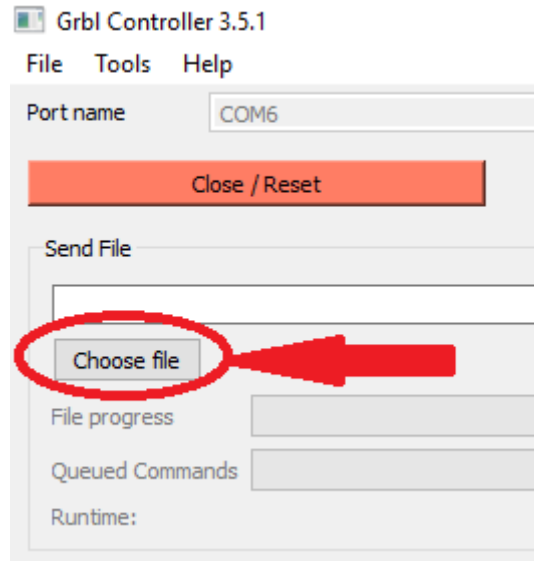


Εικόνα 86: Αρχική εικόνα του GRBL

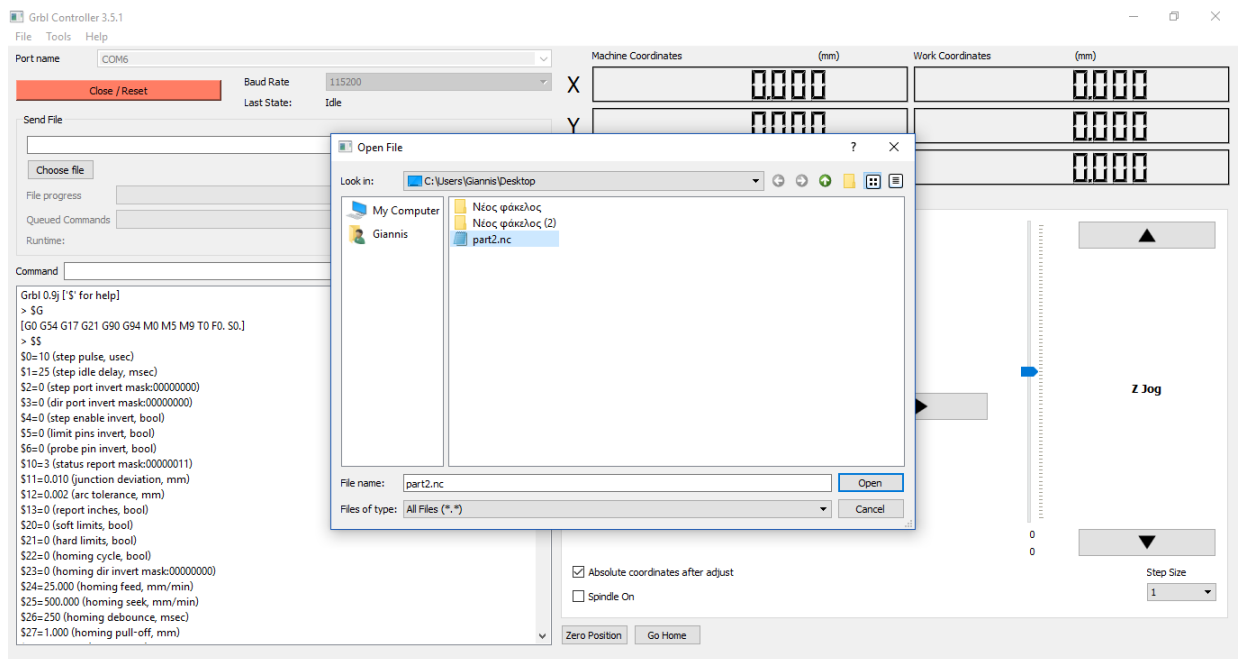
Θα πρέπει να επιλεγεί η σωστή θύρα COM όπως επίσης και το Baud rate, τα οποία είναι ανάλογα σε σχέση με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν παραπάνω και στο XLoader. Μετά επιλέγοντας την εντολή Open υπάρχει το παρακάτω αποτέλεσμα (Εικόνα 87).



Στη συνέχεια με το «Choose file» ανοίγει ένα παράθυρο για να επιλεγεί το αρχείο .nc που δημιουργήθηκε πρωτύτερα (Εικόνες 88 & 89).

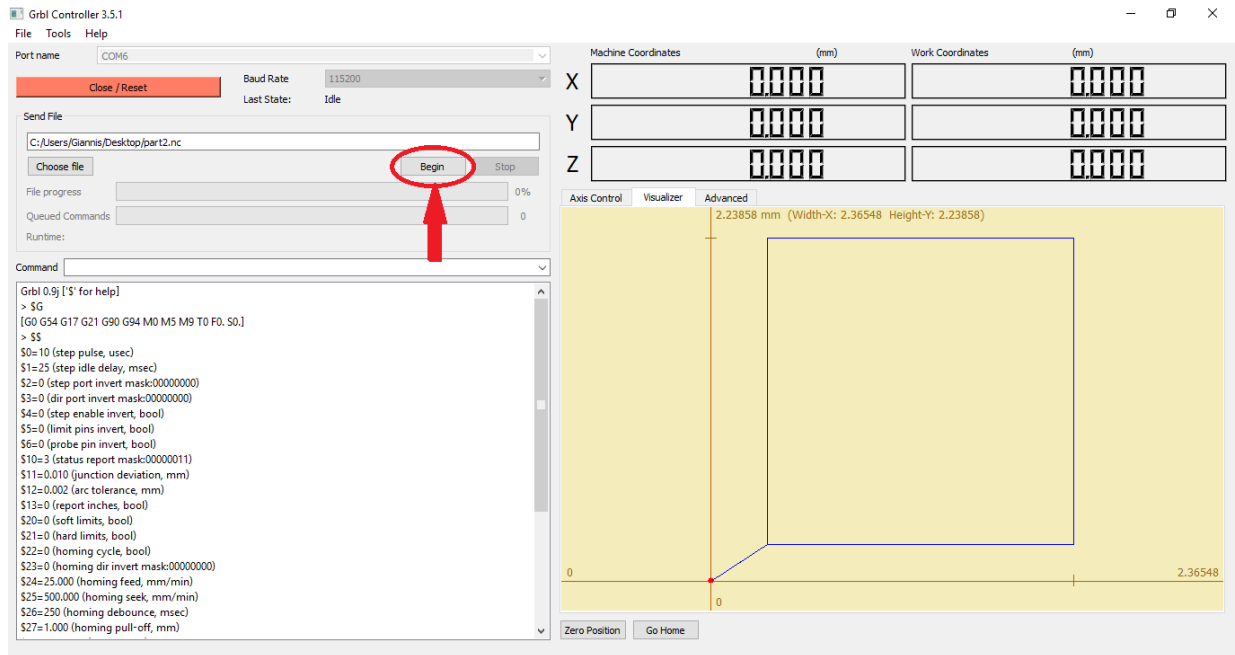


Εικόνα 88: Η εντολή Choose file



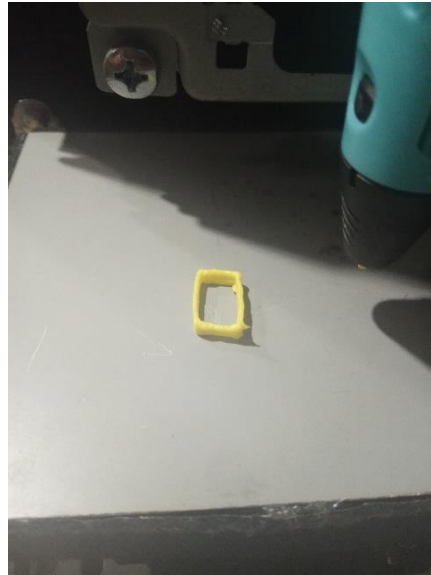
Εικόνα 89: Η Επιλογή του αρχείου .nc

Αφού λοιπόν έχει επιλεγεί το αρχείο εκτύπωσης, εμφανίζεται η ακόλουθη εικόνα και με το πάτημα της εντολής «Begin», ο 3D εκτυπωτής θα ξεκινήσει να κινείται ανάλογα του κώδικα. Το μόνο που μένει είναι να ενεργοποιηθεί και το 3D μολύβι να εκχύει το υλικό (Εικόνα 90).



Εικόνα 90: Η εμφάνιση του σχεδίου έτοιμο για εκτύπωση

Αφού έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία εκτύπωσης το αποτέλεσμα που δίνει ο εκτυπωτής εκ πρώτης όψης δεν φαίνεται σωστό. Για την αποφυγή βέβαια κάθε λάθους μετρήθηκαν οι πλευρές με χάρακα και όντως υπάρχει διαφορά. Αντί να είναι τετράγωνο είναι ορθογώνιο (Εικόνα 91).

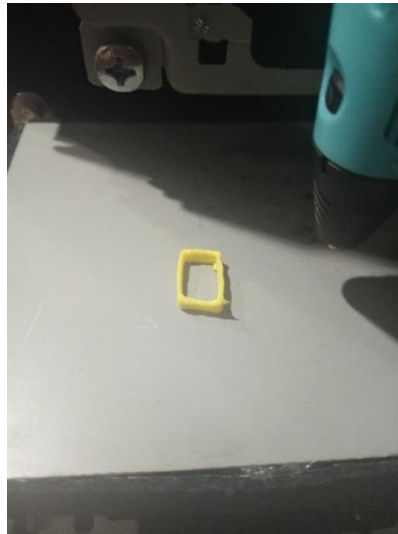


Εικόνα 91: Αποτέλεσμα εκτύπωσης

3.7 Τα εκτυπωμένα μοντέλα

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα γίνει παρουσίαση των μοντέλων που εκτυπώθηκαν από τον 3D εκτυπωτή, που έχει αναπτυχθεί για την παρούσα εργασία.

Η πρώτη προσπάθεια, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο δύο ήταν ανεπιτυχής. Ενώ έχει επιλεγεί ένα τετράγωνο ο εκτυπωτής αποδίδει ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο (Εικόνα 92).



Εικόνα 92: Εκτυπωμένο μοντέλο σε σχήμα τετράγωνο

Στην συνέχεια έγινε μια ακόμη απόπειρα εκτύπωσης, αυτή τη φορά όμως επιλέχθηκε ένα αστέρι. Για ακόμη μία φορά όμως το αποτέλεσμα δεν είναι αποδεκτό ακόμα και με γυμνό μάτι (Εικόνα 93).



Εικόνα 93: Εκτυπωμένο μοντέλο σε σχήμα αστεριού

Το επόμενο μοντέλο που δοκιμάστηκε να εκτυπωθεί είναι αυτό του πολυγώνου. Για ακόμα μία φορά το αποτέλεσμα δεν είναι αποδεκτό, για ακόμα μία φορά το σχήμα είναι “τεντωμένο” ως προς τον άξονα Υ (Εικόνα 94).



Εικόνα 94: Εκτυπωμένο μοντέλο σε σχήμα πολυγώνου

Το τελευταίο μοντέλο που εκτυπώθηκε ήταν αυτό με το σχήμα κύκλος. Εκεί βέβαια υπήρξε ένα γενικότερο πρόβλημα, διότι αυτό το οποίο εκτυπώθηκε δεν έμοιαζε καν με κύκλο (Εικόνα 95).



Εικόνα 95: Εκτυπωμένο μοντέλο σε σχήμα κύκλου

Σε κάθε ένα από τα παραπάνω σχήματα ελέγχθηκε ο κώδικας πριν εκτυπωθούν. Έγιναν κάποιες αλλαγές όμως και πάλι δεν διορθώθηκε η αποτυχημένη εκτύπωση. Όλα τα μοντέλα εξαιρουμένου αυτό του κύκλου, είχαν μία ελαφριά παραμόρφωση ως προς τον Υ. Στον κύκλο βέβαια παρουσιάστηκε το μεγαλύτερο πρόβλημα. Το μοντέλο που εκτυπωνόταν για άγνωστο λόγω δεν έμοιαζε καθόλου στο αρχικό σχέδιο. Μία βασική διαφορά που υπάρχει σε σχέση με τα υπόλοιπα σχέδια είναι, ότι ο κύκλος πέραν του Χ, Υ και Ζ έχει στο Gcode που εξάγεται από το MakerCam έχει ακόμα το Ι και το J. Αν αυτά διαγραφούν ή διαφοροποιηθούν τότε το σχήμα δεν εμφανίζεται καν στο GRBL για εκτύπωση.

Η σχετική παραμόρφωση που υπάρχει στα υπόλοιπα σχέδια ελέγχθηκε αρκετές φορές, είτε μέσα από τον κώδικα που εξήχθει από το MakerCam είτε και από την ίδια την κατασκευή του 3D εκτυπωτή. Το αποτέλεσμα όμως δεν άλλαξε.

G-Codes εκτυπωμένων μοντέλων

1. Τετράγωνο

G0 Z0
T0 M6
G17
M3
G0 X0.36598984771573606 Y0.23883248730964468
G1 Z0.2 F50
G1 X2.365482233502538 Y0.23857868020304568 F50
G1 X2.365482233502538 Y2.238578680203046
G1 X0.3654822335025381 Y2.238578680203046
G1 X0.3654822335025381 Y0.23857868020304568
G0 Z0.3
G0 X0.36598984771573606 Y0.23883248730964468
G1 Z0.4 F50
G1 X2.365482233502538 Y0.23857868020304568 F50
G1 X2.365482233502538 Y2.238578680203046
G1 X0.3654822335025381 Y2.238578680203046
G1 X0.3654822335025381 Y0.23857868020304568
G0 Z0.4
G0 X0.36598984771573606 Y0.23883248730964468
G1 Z0.6 F50
G1 X2.365482233502538 Y0.23857868020304568 F50
G1 X2.365482233502538 Y2.238578680203046
G1 X0.3654822335025381 Y2.238578680203046
G1 X0.3654822335025381 Y0.23857868020304568
G0 Z0.6
G0 X0.36598984771573606 Y0.23883248730964468
G1 Z0.8 F50
G1 X2.365482233502538 Y0.23857868020304568 F50
G1 X2.365482233502538 Y2.238578680203046
G1 X0.3654822335025381 Y2.238578680203046
G1 X0.3654822335025381 Y0.23857868020304568
G0 Z0.8
G0 X0.36598984771573606 Y0.23883248730964468
G1 Z1 F50
G1 X2.365482233502538 Y0.23857868020304568 F50
G1 X2.365482233502538 Y2.238578680203046
G1 X0.3654822335025381 Y2.238578680203046
G1 X0.3654822335025381 Y0.23857868020304568
G0 Z3
G0 X0 Y0
M5
M30

2. Πολύγωνο

G0 Z0

T0 M6

G17

M3

G0 X2.552284263959391 Y5.741116751269035

G1 Z0.2 F50

G1 X3.251269035532995 Y4.152284263959391 F50

G1 X4.977157360406092 Y4.34010152284264

G1 X3.951776649746193 Y2.9416243654822334

G1 X4.977157360406092 Y1.5406091370558375

G1 X3.251269035532995 Y1.7284263959390864

G1 X2.5532994923857864 Y0.14213197969543148

G1 X1.8527918781725887 Y1.7284263959390864

G1 X0.12690355329949238 Y1.5406091370558375

G1 X1.1522842639593909 Y2.9416243654822334

G1 X0.12690355329949238 Y4.34010152284264

G1 X1.8527918781725887 Y4.152284263959391

G1 X2.5532994923857864 Y5.741116751269035

G0 Z0.3

G0 X2.552284263959391 Y5.741116751269035

G1 Z0.4 F50

G1 X3.251269035532995 Y4.152284263959391 F50

G1 X4.977157360406092 Y4.34010152284264

G1 X3.951776649746193 Y2.9416243654822334

G1 X4.977157360406092 Y1.5406091370558375

G1 X3.251269035532995 Y1.7284263959390864

G1 X2.5532994923857864 Y0.14213197969543148

G1 X1.8527918781725887 Y1.7284263959390864

G1 X0.12690355329949238 Y1.5406091370558375

G1 X1.1522842639593909 Y2.9416243654822334

G1 X0.12690355329949238 Y4.34010152284264

G1 X1.8527918781725887 Y4.152284263959391

G1 X2.5532994923857864 Y5.741116751269035

G0 Z0.5

G0 X2.552284263959391 Y5.741116751269035

G1 Z0.6 F50

G1 X3.251269035532995 Y4.152284263959391 F50

G1 X4.977157360406092 Y4.34010152284264

G1 X3.951776649746193 Y2.9416243654822334

G1 X4.977157360406092 Y1.5406091370558375

G1 X3.251269035532995 Y1.7284263959390864

G1 X2.5532994923857864 Y0.14213197969543148

G1 X1.8527918781725887 Y1.7284263959390864

G1 X0.12690355329949238 Y1.5406091370558375

G1 X1.1522842639593909 Y2.9416243654822334
G1 X0.12690355329949238 Y4.34010152284264
G1 X1.8527918781725887 Y4.152284263959391
G1 X2.5532994923857864 Y5.741116751269035
G0 Z0.7
G0 X2.552284263959391 Y5.741116751269035
G1 Z0.8 F50
G1 X3.251269035532995 Y4.152284263959391 F50
G1 X4.977157360406092 Y4.34010152284264
G1 X3.951776649746193 Y2.9416243654822334
G1 X4.977157360406092 Y1.5406091370558375
G1 X3.251269035532995 Y1.7284263959390864
G1 X2.5532994923857864 Y0.14213197969543148
G1 X1.8527918781725887 Y1.7284263959390864
G1 X0.12690355329949238 Y1.5406091370558375
G1 X1.1522842639593909 Y2.9416243654822334
G1 X0.12690355329949238 Y4.34010152284264
G1 X1.8527918781725887 Y4.152284263959391
G1 X2.5532994923857864 Y5.741116751269035
G0 Z0.9
G0 X2.552284263959391 Y5.741116751269035
G1 Z1 F50
G1 X3.251269035532995 Y4.152284263959391 F50
G1 X4.977157360406092 Y4.34010152284264
G1 X3.951776649746193 Y2.9416243654822334
G1 X4.977157360406092 Y1.5406091370558375
G1 X3.251269035532995 Y1.7284263959390864
G1 X2.5532994923857864 Y0.14213197969543148
G1 X1.8527918781725887 Y1.7284263959390864
G1 X0.12690355329949238 Y1.5406091370558375
G1 X1.1522842639593909 Y2.9416243654822334
G1 X0.12690355329949238 Y4.34010152284264
G1 X1.8527918781725887 Y4.152284263959391
G1 X2.5532994923857864 Y5.741116751269035
G0 Z2
G0 X0 Y0
M5
M30

3. Κύκλος

G0 Z0

T0 M6

G17

M3

G0 X0.1634517766497462 Y1.1248730964467004

G1 Z0.2 F50

G2 X0.23857868020304568 Y1.5076142131979695 F50

G2 X0.45685279187817257 Y1.83248730964467

G2 X0.7817258883248732 Y2.0482233502538074

G2 X1.1624365482233503 Y2.1243654822335025

G2 X1.5456852791878173 Y2.0482233502538074

G2 X1.8705583756345179 Y1.83248730964467

G2 X2.0862944162436547 Y1.5076142131979695

G2 X2.1624365482233503 Y1.1243654822335025

G2 X2.0862944162436547 Y0.7411167512690355

G2 X1.8705583756345179 Y0.41878172588832485

G2 X1.5456852791878173 Y0.20050761421319796

G2 X1.1624365482233503 Y0.12436548223350254

G2 X0.7817258883248732 Y0.20050761421319796

G2 X0.45685279187817257 Y0.41878172588832485

G2 X0.23857868020304568 Y0.7411167512690355

G2 X0.16243654822335027 Y1.1243654822335025

G0 Z0.3

G0 X0.1634517766497462 Y1.1248730964467004

G1 Z0.4 F50

G2 X0.23857868020304568 Y1.5076142131979695

G2 X0.45685279187817257 Y1.83248730964467

G2 X0.7817258883248732 Y2.0482233502538074

G2 X1.1624365482233503 Y2.1243654822335025

G2 X1.5456852791878173 Y2.0482233502538074

G2 X1.8705583756345179 Y1.83248730964467

G2 X2.0862944162436547 Y1.5076142131979695

G2 X2.1624365482233503 Y1.1243654822335025

G2 X2.0862944162436547 Y0.7411167512690355

G2 X1.8705583756345179 Y0.41878172588832485

G2 X1.5456852791878173 Y0.20050761421319796

G2 X1.1624365482233503 Y0.12436548223350254

G2 X0.7817258883248732 Y0.20050761421319796

G2 X0.45685279187817257 Y0.41878172588832485

G2 X0.23857868020304568 Y0.7411167512690355

G2 X0.16243654822335027 Y1.1243654822335025

G0 Z0.5

G0 X0.1634517766497462 Y1.1248730964467004

G1 Z0.6 F50

G2 X0.23857868020304568 Y1.5076142131979695
G2 X0.45685279187817257 Y1.83248730964467
G2 X0.7817258883248732 Y2.0482233502538074
G2 X1.1624365482233503 Y2.1243654822335025
G2 X1.5456852791878173 Y2.0482233502538074
G2 X1.8705583756345179 Y1.83248730964467
G2 X2.0862944162436547 Y1.5076142131979695
G2 X2.1624365482233503 Y1.1243654822335025
G2 X2.0862944162436547 Y0.7411167512690355
G2 X1.8705583756345179 Y0.41878172588832485
G2 X1.5456852791878173 Y0.20050761421319796
G2 X1.1624365482233503 Y0.12436548223350254
G2 X0.7817258883248732 Y0.20050761421319796
G2 X0.45685279187817257 Y0.41878172588832485
G2 X0.23857868020304568 Y0.7411167512690355
G2 X0.16243654822335027 Y1.1243654822335025
G0 Z0.7
G0 X0.1634517766497462 Y1.1248730964467004
G1 Z0.8 F50
G2 X0.23857868020304568 Y1.5076142131979695
G2 X0.45685279187817257 Y1.83248730964467
G2 X0.7817258883248732 Y2.0482233502538074
G2 X1.1624365482233503 Y2.1243654822335025
G2 X1.5456852791878173 Y2.0482233502538074
G2 X1.8705583756345179 Y1.83248730964467
G2 X2.0862944162436547 Y1.5076142131979695
G2 X2.1624365482233503 Y1.1243654822335025
G2 X2.0862944162436547 Y0.7411167512690355
G2 X1.8705583756345179 Y0.41878172588832485
G2 X1.5456852791878173 Y0.20050761421319796
G2 X1.1624365482233503 Y0.12436548223350254
G2 X0.7817258883248732 Y0.20050761421319796
G2 X0.45685279187817257 Y0.41878172588832485
G2 X0.23857868020304568 Y0.7411167512690355
G2 X0.16243654822335027 Y1.1243654822335025
G0 Z0.9
G0 X0.1634517766497462 Y1.1248730964467004
G1 Z1 F50
G2 X0.23857868020304568 Y1.5076142131979695
G2 X0.45685279187817257 Y1.83248730964467
G2 X0.7817258883248732 Y2.0482233502538074
G2 X1.1624365482233503 Y2.1243654822335025
G2 X1.5456852791878173 Y2.0482233502538074
G2 X1.8705583756345179 Y1.83248730964467
G2 X2.0862944162436547 Y1.5076142131979695
G2 X2.1624365482233503 Y1.1243654822335025

G2 X2.0862944162436547 Y0.7411167512690355
G2 X1.8705583756345179 Y0.41878172588832485
G2 X1.5456852791878173 Y0.20050761421319796
G2 X1.1624365482233503 Y0.12436548223350254
G2 X0.7817258883248732 Y0.20050761421319796
G2 X0.45685279187817257 Y0.41878172588832485
G2 X0.23857868020304568 Y0.7411167512690355
G2 X0.16243654822335027 Y1.1243654822335025
G0 Z2
G0 X0 Y0
M5
M30



Συμπεράσματα

Ολοκληρώνοντας την παρούσα πτυχιακή εργασία συμπεραίνεται ότι η ανάπτυξη ενός πολύ οικονομικού 3D εκτυπωτή από υλικά χαμηλού κόστους, υλικά από παλαιότερους ηλεκτρονικούς υπολογιστές και άλλα προϊόντα που είναι εύκολο να βρεθούν στην αγορά, είναι εφικτό χωρίς εξειδικευμένες γνώσεις.

Υπήρξαν σημεία που χρειάστηκαν οι βασικές γνώσεις του προγραμματισμού και των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, όπως στις συνδεσμολογίες με το Arduino Uno και σε εκείνες πάνω στο breadboard. Τα δύο λογισμικά, σχεδίασης και εκτύπωσης, είναι αρκετά εύκολα στη χρήση τους, χωρίς ιδιαίτερες δυσκολίες.

Τέλος, βλέποντας τα εκτυπωμένα μοντέλα το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι ο συγκεκριμένος 3D εκτυπωτής επ' ουδενί δεν είναι για επαγγελματική χρήση, πράγμα το οποίο ήταν γνωστό από την αρχή. Θα μπορούσε όμως να χρησιμοποιηθεί δοκιμαστικά για λογισμικά σχεδίασης και εκτύπωσης. Ακόμα μία χρήση αυτού του 3D εκτυπωτή είναι, ως προς την δημιουργία εύκολων μοντέλων χωρίς πολλές λεπτομέρειες, για ίδια χρήση από τον χρήστη του.



Βιβλιογραφία

Μπιλάλης Ν. Μαραβελάκης Ε.(2014). Συστήματα CAD/CAM και τρισδιάστατη μοντελοποίηση, 2η ΕΚΔΟΣΗ

Μουτσούλα, Σ., & Moutsoula, S. (2016). Έξυπνες εφαρμογές για το σπίτι του μέλλοντος

Φελλόπουλος, Α., & Σπύρου, Μ. Υλοποίηση ενός τρίτροχου κινούμενου ρομπότ χρησιμοποιώντας πλατφόρμα Arduino

Φιλοσίδης, Γ., Μήτσουρας, Γ., & Σίμος, Μ. (2018). Αναβάθμιση συστήματος ελέγχου εργαλειομηχανής CNC τριών αξόνων

Menna, F., and S. Troisi. "Low cost reverse engineering techniques for 3D modelling of propellers." International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 38.Part 5 (2010): 452-457.

PAULUS, Stefan, et al. Low-cost 3D systems: suitable tools for plant phenotyping. Sensors, 2014, 14.2: 3001-3018.

Fruh, Christian, and Avidesh Zakhor. "3D model generation for cities using aerial photographs and ground level laser scans." Computer Vision and Pattern Recognition, 2001. CVPR 2001. Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on. Vol. 2. IEEE, 2001.

Hellerstein, D. "GRBL: A Package of Gauss Programs." US Department of Agriculture/Economic Research Service, Washington DC (1993).

Fruh, Christian, and Avidesh Zakhor. "3D model generation for cities using aerial photographs and ground level laser scans." Computer Vision and Pattern Recognition, 2001. CVPR 2001. Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on. Vol. 2. IEEE, 2001.

<https://infoservice.com.gr> τελευταία πρόσβαση στις 28/2/2018

<http://dml.chania.teicrete.gr>, τελευταία πρόσβαση στις 26/2/2018

<https://infoservice.com.gr>, τελευταία πρόσβαση στις 28/2/2018

<http://www.3dhub.gr>, τελευταία πρόσβαση στις 26/2/2018

<https://www.pcsteps.gr>, Τελευταία πρόσβαση στις 26/2/2018

<http://hlektrologia.gr>, τελευταία πρόσβαση 01/03/2018

<http://www.makercam.com>, τελευταία πρόσβαση 29/03/2018