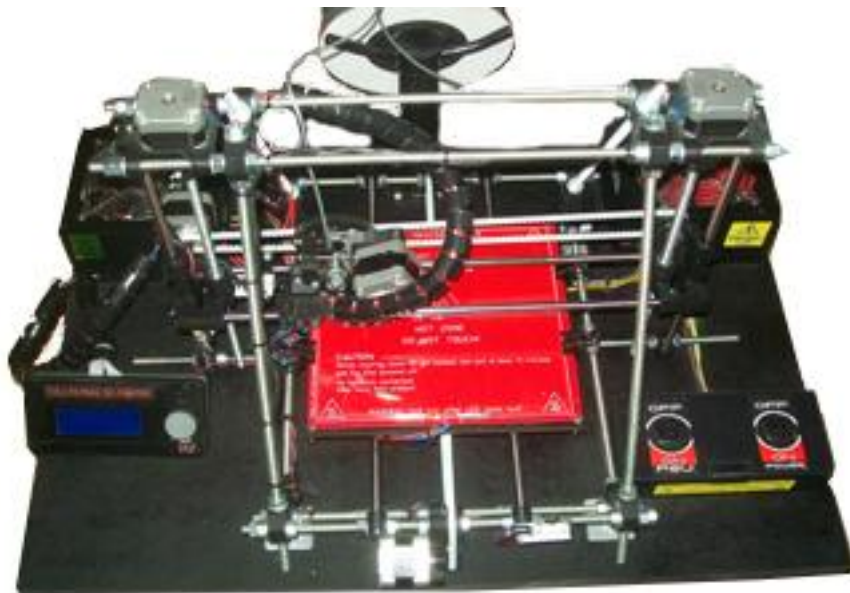


ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΕΚΤΥΠΩΤΗ ΤΑΧΕΙΑΣ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΚΙΑΦΑΣ ΛΟΥΚΑΣ (Α.Μ. 5576)

ΒΑΣΙΛΑΚΗΣ ΛΑΜΠΡΟΣ (Α.Μ. 5694)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2013

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία, έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Μηχανολογίας του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πάτρας και αναφέρεται στον τρόπο κατασκευής ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή τύπου Prusa Mendel LM8UU. Αναλύεται η διαδικασία της ταχείας πρωτοτυποποίησης, και η ραγδαία εξέλιξη της στον βιομηχανικό κλάδο και παράλληλα παρουσιάζονται οι νέες μέθοδοι κατασκευής πρωτότυπων μοντέλων. Επίσης, μέσω της κατασκευής κατανοούμε σε βάθος τον τρόπο λειτουργίας των μηχανών ταχείας πρωτοτυποποίησης και συγκεκριμένα των F.D.M. 3D Printers.

Ευχαριστούμε θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μας, κύριο Γεώργιο Γιαννόπουλο για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μας πρόσφερε για την υλοποίηση της εργασίας. Επίσης το Τμήμα Μηχανολογίας του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πάτρας, για την χρηματοδότηση, την παραχώρηση του χώρου εργασίας και των εργαλείων.

Λ. Κιάφας – Λ. Βασιλάκης

Πάτρα 2013

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της πτυχιακής εργασίας, είναι η κατασκευή ενός μηχανήματος ταχείας πρωτοτυποποίησης 3D Printer. Μέσω της διαδικασίας αυτής, θα μελετήσουμε τον τρόπο λειτουργίας των μηχανών αυτών, άλλα και την συμβολή που έχουν στην ανάπτυξη των βιομηχανικών γραμμών παράγωγης. Επίσης, θα παρατηρήσουμε τις διαφορές που παρουσιάζονται σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους ταχείας πρωτοτυποποίησης.

Η ανάλυση του θέματος γίνεται σε 8 κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο, αναφέρεται η χρήση υπολογιστικών συστημάτων για την ανάπτυξη προϊόντων και αναλύονται σε κατηγορίες ανάλογα με την πρόσφορα τους στην γραμμές παράγωγης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, αναφέρεται ο τρόπος κατασκευής πρωτοτυπών μοντέλων, με συμβατικές μεθόδους και η εξέλιξη του με το πέρασμα των χρόνων που μας οδήγησε στον όρο ταχεία πρωτοτυποποίηση.

Στο τρίτο κεφάλαιο, αναλύεται ο ορός της ταχείας πρωτοτυποποίησης, και αναφέρονται οι νέες μέθοδοι κατασκευή πρωτότυπων αντικειμένων, που υπάρχουν στις μέρες μας. Ο διαχωρισμός τους, γίνεται κυρίως με βάση την αρχή λειτουργίας τους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται, μέσω διαγραμμάτων, η ραγδαία ανάπτυξη των συστημάτων ταχείας πρωτοτυποποίησης, σε παγκόσμιο επίπεδο μέσω των πωλήσεων διάφορων εταιριών.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, αναλύεται, ο τρόπος λειτουργίας, του Prusa Mendel. Εξετάζονται, οι βασικές του λειτουργίες και οι προδιαγραφές των εξαρτημάτων του ανάλογα με την λειτουργία τους.

Στο έκτο κεφάλαιο περιγράφουμε, βήμα-βήμα την διαδικασία κατασκευής του 3D Printer Prusa Mendel LM8UU. Μέσω αυτής μελετάται η λειτουργία ενός 3D Printer και γενικότερα των μηχανών εναπόθεσης υλικού. Έτσι μαθαίνουμε για τις βασικές τους λειτουργίες και για τα εξαρτήματα που τις αποτελούν.

Στο έβδομο κεφάλαιο εξετάζονται τα απαραίτητα προγράμματα για το χειρισμό της μηχανής. Συγκεκριμένα δίνονται αναλυτικά οι οδηγίες για τον ορθό τρόπο χρήσης τους.

Τέλος στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία σχεδίασης και κατασκευής ενός πρωτότυπου αντικείμενου. Παρέχονται οι οδηγίες ρυθμίσεις της μηχανής για την ορθή κατασκευή της συγκεκριμένης γεωμετρίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	iii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	v
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	vii
ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ – ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	7
1.1 Χρήση υπολογιστικών συστημάτων για την ανάπτυξη προϊόντων.....	7
1.2 Ανάλυση συστημάτων C.A.D.	8
1.3 Ανάλυση συστημάτων C.A.M.	9
1.4 Ανάλυση συστημάτων C.A.E.	10
1.5 Ανάλυση συστημάτων C.I.M.	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	15
2.1 Πρωτότυπα μοντέλα και κατηγορίες.....	15

2.2 Εφαρμογές πρωτοτυποποίησης.....	16
2.3 Κατασκευή πρωτότυπων μοντέλων.....	17
2.4 Ταχεία πρωτοτυποποίηση.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	21
3.1 Τεχνολογίες ταχείας πρωτοτυποποίησης.....	21
3.2 Στερεολιθογραφία	22
3.3 Επιλεκτική σύντηξη με την χρήση ακτινών λέιζερ	24
3.4 Συγκόλληση λεπτών φύλλων.....	26
3.5 Τρισδιάστατη εκτύπωση	28
3.6 Στερεά σκλήρυνση επιφανείας	29
3.7 Εναπόθεση – σύντηξη διαδοχικών στρώσεων	31
3.8 Σύγκριση μεθόδων	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	35
4.1 Στατιστικά στοιχεία RP σε παγκόσμιο επίπεδο.....	35
4.2 3D System Inc.	38
4.3 Stratasys.....	40
4.4 EOS GmbH.....	42
4.5 Ανάλυση πωλήσεων RP με το πέρασμα των χρόνων	43

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	47
5.1 Τι είναι το «Prusa Mendel LM8UU»;	47
5.2 Ανάλυση βασικών λειτουργικών εξαρτημάτων	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	54
6.1 Ανάλυση μηχανολογικών εξαρτημάτων	54
6.2 Διαδικασία κατασκευής Prusa Mendel LM8UU	56
6.3 Διαδικασία ευθυγράμμισης και ρύθμισης της μηχανής	63
6.4 Ρύθμιση του λογισμικού του arduino	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	68
7.1 Εισαγωγή στα προγράμματα χειρισμού	68
7.2 Pronterface	68
7.3 Slic3r.....	69
7.4 Έλεγχος της μηχανής μέσω του Controller.....	73
7.5 Επεξήγηση του κώδικα G και M.....	75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8	78
8.1 Διαδικασία κατασκευής κομματιού	78
8.2 Επίδραση της θερμοκρασίας στις εκτυπώσεις	80
8.3 Επίδραση του ύψους του hotend στις εκτυπώσεις	81
ΠΑΡΑΤΗΜΑ	83

Προδιαγραφές εξαρτημάτων	83
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	92
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	95
ΠΗΓΕΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	96

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ – ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

RP = Rapid prototyping, Ταχεία πρωτοτυποποίηση

C.A.D. = Computer Aided Design, Σχεδίαση με την βοήθεια Ηλεκτρονικού Υπολογιστή.

C.A.M. = Computer Aided Manufacturing, Κατασκευή με την βοήθεια Ηλεκτρονικού Υπολογιστή.

C.A.E. = Computer Aided Engineering, Μηχανική με την βοήθεια Ηλεκτρονικού Υπολογιστή.

C.I.M. = Computer Integrated Manufacturing, Παράγωγή με την βοήθεια Ηλεκτρονικού Υπολογιστή

STL = Stereolithography, Στερεολιθογραφία

SLS = Selective Laser Sintering, Επιλεκτική σύντηξη με την χρήση ακτινών λέιζερ

LOM = Laminated Object Manufacturing, Συγκόλληση λεπτών φύλων

SGC = Ground Curing, Στερεά Σκλήρυνση Επιφανείας

FDM = Fused Deposition Modeling, Εναπόθεση –Σύντηξη διαδοχικών στρώσεων

CNC = Computer Numerical Control, Αριθμητικός Έλεγχος Μέσω Ηλεκτρονικού Υπολογιστή.

ΤΚΠ = Ταχεία Κατασκευή Πρωτότυπων.

CM = Centimeter, Εκατοστά

MM = Millimeter, Χιλιοστά.

OFF = Fused Filament Fabrication, Κατασκευή με χρήση τακτοποιούμενου νήματος

PLA = POLYLACTIC ACID, Πολυγαλακτικό οξύ

ABS = Ακρολονιτρίλιο Βουταδιαινίο Στυρόλιο

REPRAP = replicating rapid prototyping

RAMPS = RepRap Arduino Mega Pololu Shield

PWM = Pulse Width Modulation

RPM = Revolution per Minute, Στροφές ανά Λεπτό

mH = MiliHenry, Μονάδα μέτρησης μαγνητικού πεδίου

V = Volt, Μονάδα μέτρησης Διαφοράς Δυναμικού

100K = 100 KΩ, Kilo Ohm, Μονάδα μέτρησης αντίστασης

PSU = Power Supply Unit, Τροφοδοτικό.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις μέρες μας, η κατασκευή πρωτότυπων μοντέλων από τις βιομηχανίες, έχει καθιερωθεί καθώς μέσα από αυτή την διαδικασία μπορούν να ληφθούν ασφαλή συμπεράσματα για το τελικό προϊόν. Το πρωτότυπο μοντέλο, είναι ένα πρώιμο δείγμα του προϊόντος, το οποίο κατασκευάζεται με σκοπό να δοκιμαστεί υπό ορισμένες συνθήκες. Αυτό χρησιμεύει στην παροχή πληροφοριών και αποδεκτών προδιαγραφών για ένα πραγματικό λειτουργικό σύστημα, και όχι για ένα θεωρητικό.

Η κατασκευή πρωτότυπων αποτελούσε πάντα κύριο μέρος της διαδικασίας σχεδίασης και ανάπτυξης ενός προϊόντος, καθώς σε πολλούς τομείς υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα ως προς το αν ένα νέο σχέδιο στην πραγματικότητα θα κάνει ότι είναι επιθυμητό. Συνήθως νέα σχέδια προϊόντων παρουσιάζουν απροσδόκητα προβλήματα. Αυτή η διαδικασία δίνει την δυνατότητα στον μηχανικό/σχεδιαστή να διερευνήσει το προϊόν να προβεί σε εναλλακτικές λύσεις, να δοκιμάσει νέες τεχνολογίες και καινοτομίες με σκοπό να εξετάσει την αποδοτικότητα του αντικειμένου, πριν από την έναρξη της παραγωγής του. Σε γενικές γραμμές, μια επαναληπτική σειρά κατασκευής πρωτοτύπων βοηθάει στην συνεχή βελτιστοποίηση του τελικού προϊόντος.

Πρωτοτυποποίηση ορίζεται ως η μετάβαση από τον ιδεατό κόσμο του σχεδίου στον φυσικό κόσμο των αντικειμένων. Παλαιότερα η διαδικασία της κατασκευής πρωτότυπων μοντέλων, ήταν χρονοβόρα και υψηλού κόστους, διότι απαιτούνταν έμπειροι και επιδέξιοι τεχνίτες, καθώς και η χρήση εργαλείων χειρός και μικρών εργαλειομηχανών ακριβείας. Ο παραδοσιακός αυτός τρόπος πρωτοτυποποίησης, ενείχε πάντα ένα στοιχείο ασάφειας, καθώς μεταξύ του σχεδίου και του μοντέλου, μεσολαβούσε σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό το χέρι και η αντίληψη του τεχνίτη. Με την πάροδο των χρόνων και την εξέλιξη της τεχνολογίας, νέες εργαλειομηχανές ελεγχόμενες από ηλεκτρονικούς υπολογιστές οι οποίες βασίζονταν στην ρομποτική, αναβάθμισαν την διαδικασία της πρωτοτυποποίησης καθώς ο ανθρώπινος παράγοντας περιορίστηκε.

Η ανάπτυξη αυτή, μείωσε δραστικά τον χρόνο και το κόστος κατασκευής των πρωτοτύπων και έδωσε την δυνατότητα στους κατασκευαστές, να τελειοποιήσουν τα προϊόντα τους στο πιο κρίσιμο στάδιό τους, αυτό της βασικής σχεδίασης. Οι νέες

μηχανές, επέτρεψαν την κατασκευή μοντέλων, μεγαλύτερης ακρίβειας και πιστότητας, απευθείας από ψηφιακά αρχεία C.A.D. (Computer Aided Design), με μικρότερο κόστος και χρονική διάρκεια κατασκευής από ότι απαιτούνταν στις παλαιότερες διαδικασίες.

Με την πάροδο των χρόνων, η τεχνολογία προσφέρει συνεχώς νέες δυνατότητες και ανοίγονται νέοι ορίζοντες για τον τρόπο κατασκευής πρωτότυπων αντικειμένων. Τον Νοέμβριο του 1987, έκανε την εμφάνισή του το πρώτο εμπορικό σύστημα ταχείας πρωτοτυποποίησης στην έκθεση Autofact του Detroit από την εταιρεία 3D Systems Inc. Μερικά χρόνια μετά, οι τεχνικοί της εταιρίας αεροπορικών κινητήρων Pratt & Whitney χρησιμοποιώντας την μέθοδο της ταχείας πρωτοτυποποίησης, για την κατασκευή χυτών ακριβείας, κατάφεραν να πετύχουν, μείωση του κόστους και του χρόνου κατασκευής της τάξης του 70% έως 90%. Τα αποτελέσματα αυτά, καθιέρωσαν την μέθοδο της ταχείας πρωτοτυποποίησης αναγκαίο στοιχείο, των γραμμών παραγωγής όλων των βιομηχανιών. Η καθιέρωση αυτή, συντέλεσε στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και μηχανημάτων, ταχείας πρωτοτυποποίησης.

Οι τεχνολογίες ταχείας πρωτοτυποποίησης που είναι διαθέσιμες στην αγορά σήμερα, περιλαμβάνουν πολλές μεθόδους παραγωγής πρωτοτύπων. Μια από αυτές τις μεθόδους είναι και η τρισδιάστατη εκτύπωση (3D Printing), την οποία και θα εξετάσουμε. Υπάρχουν διάφορων ειδών μηχανές τρισδιάστατης εκτύπωσης, οι οποίες ακολουθούν όλες μια κοινή διαδικασία πρωτοτυποποίησης, με μόνη διαφορά τον τρόπο κατασκευής των μοντέλων. Οι μηχανές αυτές, κατηγοριοποιούνται με βάση την αρχή λειτουργίας τους και την πρώτη ύλη που χρησιμοποιούν.

Διακρίνονται σε:

- Στερεολιθογραφίας (stereolithography, STL)
- Επιλεκτικής σύντηξης με την χρήση ακτίνων λέιζερ (Selective Laser Sintering, S.L.S.)
- Συγκόλλησης λεπτών φύλων (Laminated Object Manufacturing, L.O.M.)
- Εναπόθεσης –Σύντηξης διαδοχικών στρώσεων (Fused Deposition Modeling, F.D.M.)
- Τρισδιάστατης εκτύπωσης ink-jet (3D ink-jet Printing)

- Και μια παραλλαγή της Στερεολιθογραφίας γνωστή ως Solid Ground Curing, SGC.

Ανάμεσα στην σχεδίαση του ψηφιακού πρωτότυπου μοντέλου μέσω ενός λογισμικού C.A.D., και στο στάδιο εκτύπωσής του, ως ένα φυσικό αντικείμενο, παρεμβάλλεται μια σειρά ψηφιακής επεξεργασίας με σκοπό την «κατανόησή» του από την μηχανή. Η επεξεργασία αυτή, είναι κοινή για όλους τους τύπους μηχανών τρισδιάστατης εκτύπωσης και περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

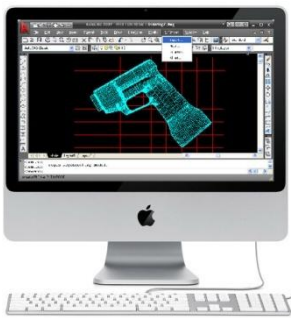
- Δημιουργία ψηφιακού μοντέλου C.A.D. (με σχεδίαση, ή σκανάρισμα του αντικειμένου)
- Μετατροπή του μοντέλου C.A.D. σε μορφή STL.
- “Τεμαχισμό” του αρχείου STL σε λεπτές διατομές με την χρήση κατάλληλου λογισμικού.
- Κατασκευή του αντικειμένου με την διαδοχική εναπόθεση των διατομών
- Καθαρισμό και τελικό φινίρισμα του μοντέλου.

Ένα είδος μηχανής τρισδιάστατης εκτύπωσης, εναπόθεσης/σύντηξης διαδοχικών στρώσεων (Fused Deposition Modeling, F.D.M.), είναι το Prusa Mendel. Με την κατασκευή και την μελέτη του, θα κατανοήσουμε τον τρόπο λειτουργίας των F.D.M. μηχανών πρωτοτυποποίησης, την ψηφιακή δημιουργία και επεξεργασία πρωτότυπων μοντέλων και τέλος την κατασκευή ιδιόμορφων μηχανολογικών εξαρτημάτων των οποίων η συμβατική παραγωγή θεωρείται δύσκολη. Η βασική λειτουργία της, δεν διαφέρει από αυτή των C.N.C. εργαλειομηχανών που ήδη γνωρίζουμε, καθώς έχουμε κίνηση σε 3 άξονες (X,Y,Z) και ο χειρισμός της γίνεται με την βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή. Αυτό που τις κατατάσσει σε διαφορετική κατηγορία, είναι ο τρόπος κατεργασίας της πρώτης ύλης. Στις μέχρι τώρα κατεργασίες κατασκευής πρωτοτύπων, η εργαλειομηχανή αφαιρούσε υλικό με σκοπό την διαμόρφωση του επιθυμητού αντικειμένου ενώ με την τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης, το αντικείμενο παίρνει μορφή προσθέτοντας υλικό σε στρώσεις βάση του σχεδίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ

Τα υπολογιστικά συστήματα έχουν εισαχθεί στις διαδικασίες ανάπτυξης προϊόντων, λόγω των δυνατοτήτων που παρέχουν στους σχεδιαστές. Με την βοήθεια των συστημάτων αυτών, ο σχεδιασμός, η ανάλυση, ο έλεγχος και η παραγωγή γίνονται πλέον αυτοματοποιημένα. Ο μηχανικός, έχει την δυνατότητα να επέμβει στο σχέδιο και να το επεξεργαστεί ανάλογα με τις απαιτούμενες ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Αυτό παλαιότερα ήταν μια χρονοβόρα και απαιτητική διαδικασία, καθώς ο σχεδιαστής, έπρεπε να επαναλάβει την διαδικασία του σχεδιασμού, ώστε να καλύψει τα νέα δεδομένα. Έτσι, αναπτύχθηκαν νέα λογισμικά τα οποία βοηθούσαν, όχι μόνο στον σχεδιασμό, αλλά και στην μηχανολογική μελέτη, του προϊόντος. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την δραματική μείωση του χρόνου παραγωγής. Παρακάτω παρουσιάζονται τα στάδια κατασκευής ενός προϊόντος με την χρήση υπολογιστικών συστημάτων (Σχήμα 1). [1] [7] [9] [10]



(α)



(β)

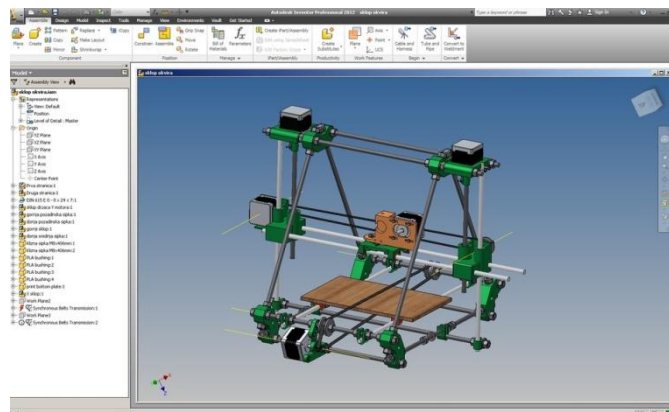


(γ)

Σχήμα 1: Στάδια κατασκευής α) Σχεδίαση μέσω υπολογιστικών συστημάτων β) Κατεργασία κομματιού σε εργαλειομηχανές γ) Τελικό προϊόν.

1.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ C.A.D. (COMPUTER AIDED DESIGN)

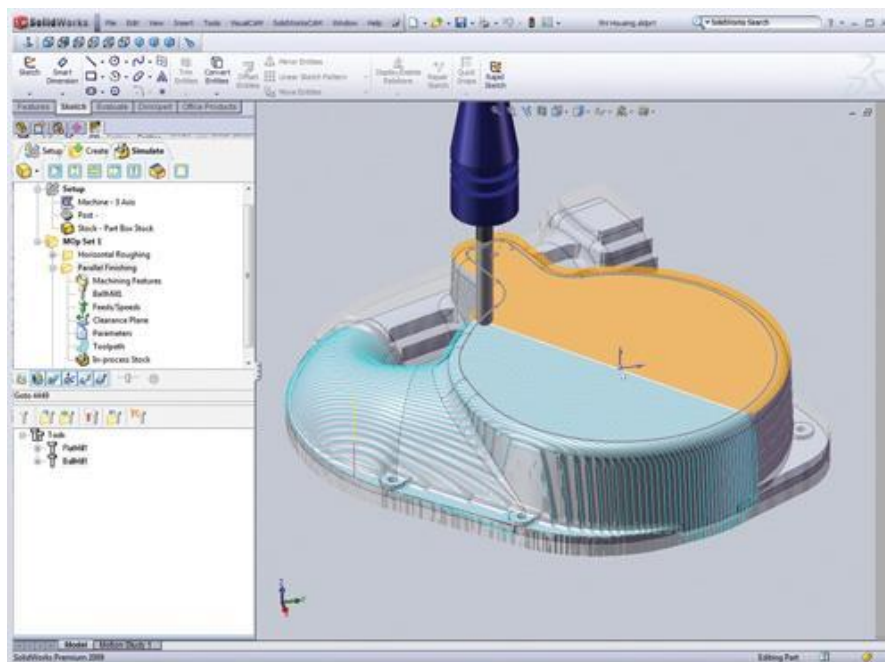
Η κλασική σχεδίαση σε χαρτί έχει εκλείψει, καθώς τα σχέδια μεταφέρονται δύσκολα, φθείρονται εύκολα, και στην περίπτωση αλλαγών ή λάθους γίνονται από την αρχή. Στη διάρκεια της δεκαετίας του 70 άρχισε η χρήση των υπολογιστών για σχεδίαση με την εμφάνιση των πρώτων σχεδιαστικών προγραμμάτων. Τα προγράμματα αυτά δίνουν τη δυνατότητα στο σχεδιαστή, να κάνει πολύ εύκολα αλλαγές και τροποποιήσεις με μεγαλύτερη ακρίβεια. Εκτός αυτού η δυνατότητα απεικόνισης λεπτομερειών δεν συγκρίνεται με τις παλιές μεθόδους. Η διακίνηση των σχεδίων με ηλεκτρονικό τρόπο γίνεται εύκολα, με την αποθήκευσή τους σε αρχεία, και όσο για το θέμα φθοράς, αυτό είναι ανύπαρκτο. Η ανάπτυξη αυτών των προγραμμάτων οδήγησε στην αυτοματοποίηση ορισμένων ενεργειών όπως η τοποθέτηση διαστάσεων στα σχέδια ή η διαγράμμιση επιφανειών. Με τον καιρό σχηματίστηκαν αρχεία τα οποία περιέλαβαν έτοιμα σχέδια τα οποία είχαν συχνή χρήση και μπορούσαν να τοποθετηθούν σε κάποιο μεγαλύτερο σχέδιο. Έτσι, ο χρήστης δεν χρειαζόταν να τα σχεδιάσει από την αρχή και το μόνο που είχε να κάνει ήταν να καταφύγει σε μια βιβλιοθήκη C.A.D. όπου περιλαμβάνει τυποποιημένες διαστάσεις μηχανολογικών στοιχείων (π.χ. διαμέτρους σωλήνων) και να επιλέξει αυτό που του χρειάζεται, βοηθώντας τον έτσι στη σχεδίαση του τελικού προϊόντος. Η τρισδιάστατη γεωμετρική μοντελοποίηση (3D) (σχήμα 2) με χρήση C.A.D. προσφέρει στον σχεδιαστή, καλύτερη αξιολόγηση και οπτικοποίηση του προϊόντος, περισσότερες πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά του, κάνοντας την διαδικασία παραγωγής πιο γρήγορη καθώς χρειάζονται λιγότερα πρωτότυπα για την ανάπτυξη του τελικού προϊόντος. [1] [8] [11]



Σχήμα 2: Γεωμετρική μοντελοποίηση σε πρόγραμμα C.A.D. τρισδιάστατου εκτυπωτή.

1.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ C.A.M. (COMPUTER AIDED MANUFACTURING)

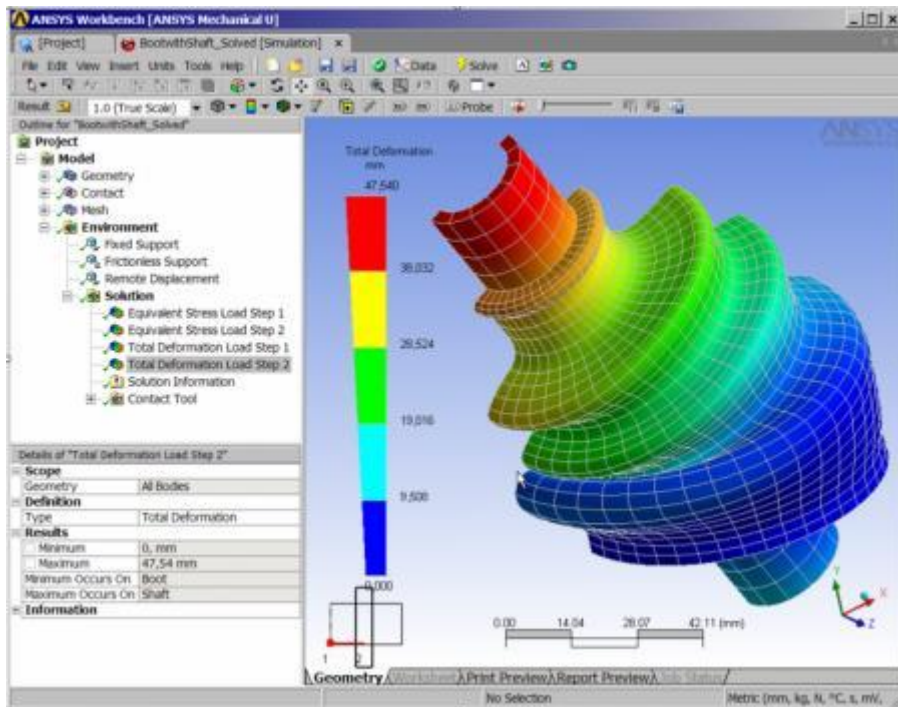
Τα συστήματα C.A.M. χρησιμοποιούνται για σχεδιασμό της διαδικασίας παραγωγής ενός προϊόντος. Σκοπός τους είναι η καθοδήγηση των εργαλειομηχανών, μέσω της δημιουργίας κατάλληλου προγράμματος από το σύστημα C.A.M., το οποίο μεταφέρεται στον ελεγκτή (controller) της εργαλειομηχανής. Ο χρήστης μεταφέρει τη γεωμετρία του αντικειμένου από το σύστημα C.A.D. στο σύστημα C.A.M. Ορίζει τα διαθέσιμα χαρακτηριστικά της κοπής, που παρέχονται από το πρόγραμμα. Έχει την δυνατότητα, προσομοίωσης της διαδικασία κοπής (σχήμα 3) , στην οθόνη του υπολογιστή, εμφανίζοντας τα αποτελέσματα, σύμφωνα με τις παραμέτρους που έχουν οριστεί. Έτσι γίνεται έλεγχος για λάθη σε σχέση με τις επιθυμητές διαμορφώσεις κάθε αντικειμένου και σε σχέση με τις παραμέτρους της κοπής. Η διαδικασία κοπής εξάγεται από το σύστημα C.A.M. σε μορφή προγράμματος, κατάλληλου για προγραμματισμό εργαλειομηχανών (G κώδικας). Το πρόγραμμα μεταφέρεται στον ελεγκτή της εργαλειομηχανής και ξεκινάει η διαδικασία κοπής. [1] [12] [13]



Σχήμα 3: Προσομοίωσης της διαδικασία κοπής στην οθόνη του υπολογιστή με χρήση C.A.M.

1.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ C.A.E. (COMPUTER AIDED ENGINEERING)

Με τον όρο αυτόν περιγράφουμε μια σειρά προγραμμάτων τα οποία εξομοιώνουν τη λειτουργία του σχεδιαζόμενου αντικειμένου. Ο σχεδιαστής-μηχανικός μπορεί να διαπιστώσει αν αυτό που σχεδιάζει ανταποκρίνεται στις προδιαγραφές του και να εντοπίσει προβλήματα που εμφανίζονται κατά τη λειτουργία του. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο εντάσσονται τα προγράμματα ανάλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Elements Analysis). Τα προγράμματα που χρησιμοποιούν τη μέθοδο αυτή βοηθούν το σχεδιαστή να αναλύσει τη συμπεριφορά του αντικειμένου κάτω από τα φορτία λειτουργίας του. Συγκεκριμένα υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού των τάσεων, παραμορφώσεων και δυνάμεων που αναπτύσσονται, σαν παράγωγα της φόρτισης. Ακόμα είναι δυνατός ο υπολογισμός και των τάσεων που αναπτύσσονται λόγω θερμικών φορτίων όπως και η ροή θερμότητας. Για την ανάλυση και μελέτη του, το μοντέλο χωρίζεται σε μικρά τμήματα (κυψέλες) σχηματίζοντας ένα πλέγμα (mesh) (σχήμα 4). Τα φορτία μπορούν να τοποθετηθούν στους κόμβους, ακμές ή και στην επιφάνεια κάθε κυψέλης. Το μέγεθος της κάθε κυψέλης εξαρτάται από την ακρίβεια η οποία απαιτείται: όσο μικρότερες είναι τόσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια. Στα δεδομένα που εισάγονται στο πρόγραμμα περιλαμβάνονται φυσικές ιδιότητες, όπως πυκνότητα, αγωγιμότητα κ.λπ. Η απεικόνιση των αποτελεσμάτων στην οθόνη του υπολογιστή είναι συνήθως εντυπωσιακή. Ανάλογα με το μέγεθος των αναπτυσσόμενων τάσεων χρωματίζονται οι αντίστοιχες επιφάνειες ενώ υπάρχει η δυνατότητα απεικόνισης των παραμορφώσεων υπό κλίμακα. Επίσης η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται για ανάλυση κίνησης ρευστών. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η χρήση υπολογιστικών προγραμμάτων για την κινηματική ανάλυση ενός μηχανισμού ή και ολόκληρου μηχανικού συστήματος. Στην περίπτωση μάλιστα όπου το σύστημα είναι περίπλοκο, δίνεται η δυνατότητα στο μηχανικό να μελετήσει την αλληλεπίδραση των τμημάτων μεταξύ τους. Οι διαδικασίες σχεδιασμού και ανάλυσης ενός μοντέλου είναι δύσκολο να διαχωριστούν εντελώς, αφού τα αποτελέσματα της ανάλυσης τροφοδοτούν με νέα δεδομένα το σχεδιασμό και αντίστροφα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη σύνδεση των προγραμμάτων C.A.D. C.A.E. [1] [12] [13]



Σχήμα 4: Ανάλυση και μελέτη του μοντέλου σε μικρά τμήματα σχηματίζοντας ένα πλέγμα

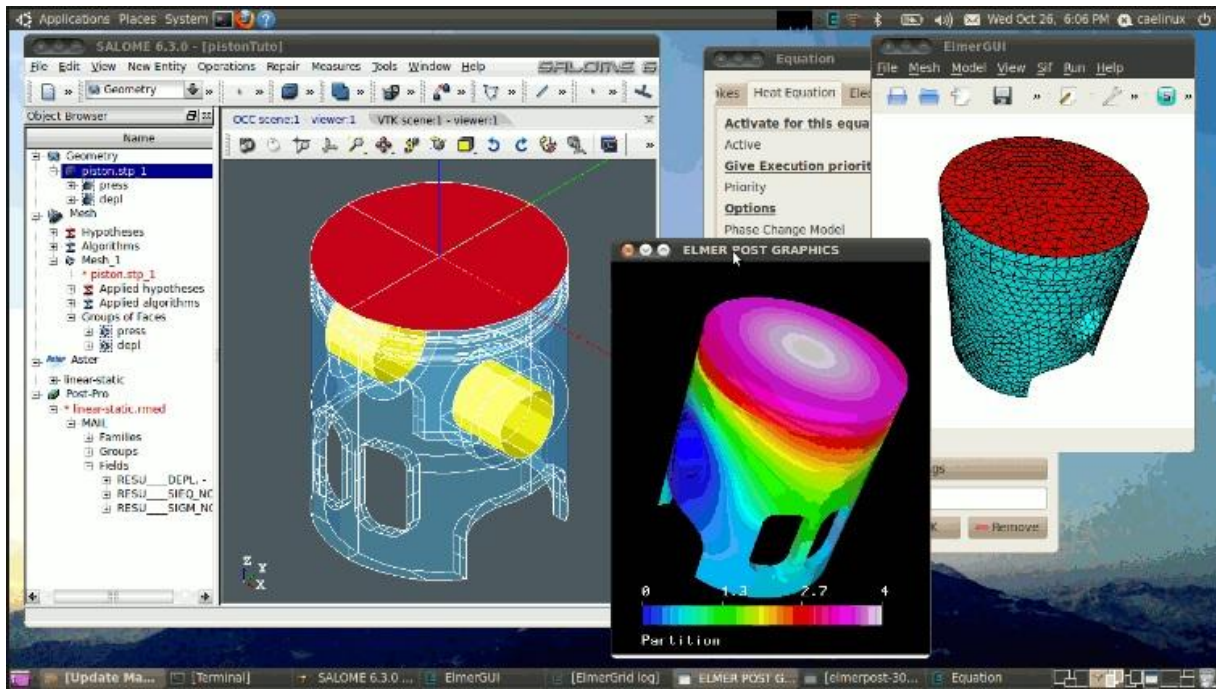
1.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ C.I.M. (COMPUTER INTEGRATED MANUFACTURING)

Με τον όρο C.I.M. ονομάζεται η ολοκληρωμένη βιομηχανική παραγωγή με τη βοήθεια υπολογιστή. Η μέθοδος αυτή παρουσιάστηκε πρόσφατα μετά την εμφάνιση πακέτων τα οποία περιλάμβαναν προγράμματα C.A.D.-C.A.M.-C.A.E. Τα πλεονεκτήματα τα οποία παρουσιάζουν τα προγράμματα C.A.D./C.A.M./C.A.E., περιορίζονταν σημαντικά στις περιπτώσεις όπου οι εφαρμογές αυτές ήταν ξεχωριστές και δεν υπήρχε επικοινωνία μεταξύ των προγραμμάτων. Ο σχεδιασμός ενός εμβόλου, για παράδειγμα, ήταν πολύ εντυπωσιακός όταν γινόταν στο πρόγραμμα C.A.D., υποβαθμιζόταν όμως η αξία του από τη στιγμή που για την κατασκευή του πρωτοτύπου χρειαζόταν να προγραμματιστεί η εργαλειομηχανή από την αρχή και δεν ήταν δυνατή η μεταφορά των υπαρχόντων δεδομένων κατευθείαν σε αυτή. Οι πρώτες προσπάθειες είχαν σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός προγράμματος I.G.E.S. (Initial Graphics Exchange Specification) το οποίο χρησιμοποιείται για τη μεταφορά δεδομένων ανάμεσα σε διαφορετικά προγράμματα. Η τελική λύση σε αυτό το πρόβλημα δόθηκε με τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου

πακέτου το οποίο περιλαμβάνει προγράμματα C.A.D./C.A.M./C.A.E (σχήμα 5). και επιτρέπει τη ροή των πληροφοριών από την ώρα του σχεδιασμού μέχρι την τελική παραγωγή του κομματιού. Τέτοιου είδους προγραμματιστικά πακέτα έχουν πλέον παρουσιάσει όλες οι μεγάλες εταιρίες λογισμικού, υποστηρίζοντάς τα με υπολογιστικές μονάδες μεγάλης ισχύος. Φυσικά το υψηλό κόστος αγοράς περιορίζει τη χρήση τέτοιων προγραμμάτων μόνο σε μεγάλες βιομηχανικές εφαρμογές. Από τη στιγμή που άρχισε η χρήση των υπολογιστών στη βιομηχανική παραγωγή οι στόχοι ήταν οι εξής:

1. Μείωση του χρόνου σχεδιασμού και ανάπτυξης του προϊόντος
2. Ελάττωση του συνολικού κόστους
3. Περιορισμός των λαθών.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα της χρήσης C.I.M. είναι η εταιρία Allison Transmission θυγατρική της General Motors. Η εταιρία ειδικεύεται στο σχεδιασμό συστημάτων μετάδοσης κίνησης, από σχολικά λεωφορεία μέχρι και βαριά φορτηγά ή στρατιωτικά οχήματα. Σύμφωνα με την εταιρία ο χρόνος σχεδιασμού και ανάπτυξης ενός συγκεκριμένου προγράμματος μπορεί να μειωθεί από τα πέντε χρόνια στα δύο. Ανάλογα υπολογίζεται ότι το οικονομικό όφελος ανά κύκλο παραγωγής θα είναι από 200.000 μέχρι 400.000 δολάρια. Οι εκτιμήσεις αυτές βασίζονται στο γεγονός ότι θα μειωθεί ο αριθμός των πρωτοτύπων από τρία σε δύο. Οι μηχανικοί της εταιρίας υποστηρίζουν ότι με τη βοήθεια του συστήματος αυτού μπορούν να μελετήσουν μέχρι δέκα διαφορετικές λύσεις στο σχεδιασμό ενός κομματιού μέσα σε διάστημα μόλις τεσσάρων ωρών. Το διάστημα για την ίδια εργασία με την κλασική μέθοδο θα μπορούσε να πάρει μέχρι και δέκα εβδομάδες. Γενικά η χρήση του C.I.M. εκτιμάται ότι μπορεί να αποφέρει κέρδος, σε χρόνο, της τάξης του 27%, ενώ μπορεί να περιορίσει το κόστος κατά 32%. Το κέρδος σε χρόνο επιτρέπει τη ταχύτερη είσοδο του προϊόντος στην αγορά προλαβαίνοντας τους ανταγωνιστές και εκτείνει το διάστημα πώλησης, ενώ η μείωση του κόστους μπορεί να αποφέρει συμπίεση της τελικής τιμής σε πιο ανταγωνιστικά πλαίσια. Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι η είσοδος των υπολογιστών άλλαξε εκ βάθρων την αντίληψη περί σχεδιασμού, ανάπτυξης και παραγωγής ενός προϊόντος. [1] [12] [13]



Σχήμα 5: Συνεργασία πακέτου συστημάτων C.A.D.-C.A.D.-C.A.E. για την ανάπτυξη και την κατασκευή ενός προϊόντος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

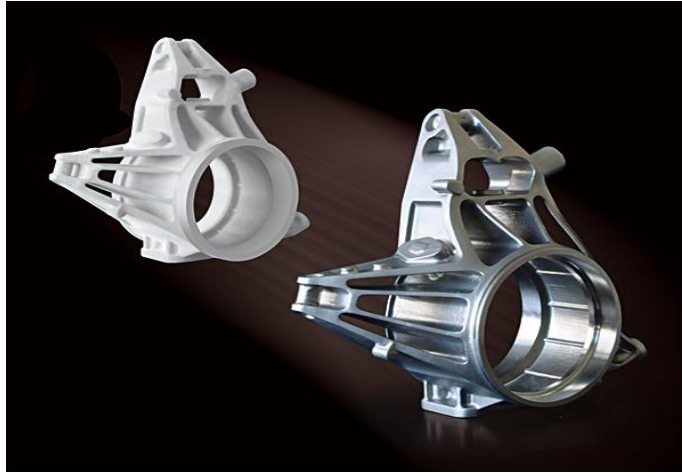
2.1 ΠΡΩΤΟΤΥΠΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΑΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ

Ως πρωτότυπο ορίζεται, ένα αντικείμενο, το οποίο δημιουργείται με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη προσέγγιση του τελικού προϊόντος, σε μια ή περισσότερες από τις διαστάσεις του. Κάθε αντικείμενο που μπορεί να παρουσιάσει ομοιότητα με κάποια χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος, μπορεί να θεωρηθεί ως πρωτότυπο μοντέλο. Η δημιουργία ενός πρωτότυπου, έχει καθιερωθεί στην παραγωγική διαδικασία, των βιομηχανιών λόγω των πληροφοριών που μπορούμε να αντλήσουμε για το τελικό αντικείμενο, καθώς και να γίνει λήψη αποφάσεων από τον μηχανικό για τον καθορισμό του τελικού προϊόντος. Στον ορισμό του πρωτότυπου, δεν περιέχονται, τα τυχόν σκίτσα του, τα μαθηματικά μοντέλα.

Τα πρωτότυπα κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη είναι ο βαθμός στον οποίο το πρωτότυπο είναι φυσικό σε αντίθεση με το αναλυτικό. Τα φυσικά πρωτότυπα είναι δημιουργήματα που προσεγγίζουν το πραγματικό προϊόν και δημιουργούνται για δοκιμές και πειράματα. Τέτοια πρωτότυπα είναι τα μοντέλα που μοιάζουν πολύ με το τελικό προϊόν (look and feel). Πρωτότυπα για την δοκιμή μιας ιδέας που χρησιμοποιούνται για να ελεγχθεί γρήγορα μια ιδέα, και πειραματικά πρωτότυπα που χρησιμοποιούνται για την επικύρωση μιας ιδέας.

Η δεύτερη κατηγοριοποίηση είναι ο βαθμός της περιεκτικότητας σε αντίθεση με την εστίαση. Τα πρώτα περιλαμβάνουν, αν όχι όλα, τα περισσότερα από τα χαρακτηριστικά του προϊόντος και είναι αυτό που θα λεγόταν ότι ανταποκρίνεται περισσότερο στον ορισμό του πρωτότυπου. Ένα τέτοιο λειτουργικό πρωτότυπο είναι αυτό που παραδίδεται σε ορισμένους πελάτες για να ανακαλύψουν τυχόν λάθη σχεδίασης πριν αρχίσει κανονικά η παραγωγή του προϊόντος. Σε αντίθεση με τα περιεκτικά πρωτότυπα υπάρχουν τα εστιακά πρωτότυπα, τα οποία περιέχουν ένα ή λίγα από τα χαρακτηριστικά του προϊόντος. Τέτοια είναι τα πρωτότυπα από μαλακό υλικό (αφρώδες) που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της μορφής (look like), ή χειροπιαστά ηλεκτρονικά κυκλώματα και πλακέτες που χρησιμοποιούνται για την ηλεκτρονική απόδοση του προϊόντος (works-like). Συνήθως χρησιμοποιούνται δύο ή

τρία πρωτότυπα αυτού του είδους για να εξεταστεί η συμπεριφορά του προϊόντος. [1]
[5]



Σχήμα 6: Απεικόνιση πρωτότυπου και τελικού προϊόντος

2.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΡΩΤΟΤΥΠΩΝ

Η χρήση των πρωτότυπων αντικειμένων, έχει καθιερωθεί στις βιομηχανικές αλυσίδες παράγωγης καθώς όπως έχουμε αναφέρει, βοηθούν στην μείωση του χρόνου και του κόστους παράγωγης. Ευρεία χρήση έχουμε στους παρακάτω βασικούς κλάδους:

- Αεροναυπηγική
- Αυτοκινητοβιομηχανία
- Ιατρική
- Κατασκευή εργαλείων
- Ηλεκτρονική
- Κοσμηματοποιία
- Κατασκευή καλουπιών
- Οικιακών συσκευών

Στο παρακάτω σχήμα 7 παρατηρούμε μερικά παραδείγματα χρήσης πρωτότυπων στις βιομηχανίες. [1] [3] [5]



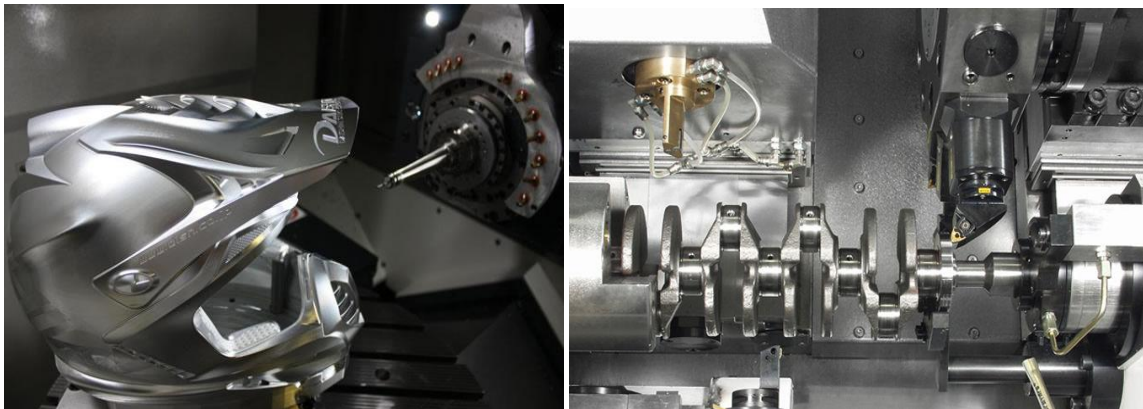
Σχήμα 7 : Μερικά παραδείγματα χρήσης πρωτότυπων στις βιομηχανίες

2.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΡΩΤΟΤΥΠΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1980 την κατασκευή των πρωτοτύπων πραγματοποιούσαν, κατά τρόπο σχεδόν αποκλειστικό, ειδικευμένοι τεχνικοί χρησιμοποιώντας συμβατικές κατά κύριο λόγο εργαλειομηχανές και πολλή χειρονακτική εργασία και επιδεξιότητα. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, και την εμφάνιση εργαλειομηχανών NC, η διαδικασία δημιουργίας πρωτότυπων, έγινε πιο αυτοματοποιημένη, και ο ρόλος του μηχανικού/σχεδιαστή περιοριζόταν κυρίως στον σχεδιασμό/ανάπτυξη του προϊόντος και στον προγραμματισμό των εργαλειομηχανών και όχι στις δεξιότητες του. Το σημαντικότερο όφελος από τις C.N.C.

εργαλειομηχανές ήταν η δυνατότητα κατασκευής πολύπλοκων γεωμετριών απευθείας από ψηφιακά αρχεία C.A.D. που ο τεχνίτης δεν μπορούσε να φέρει ης πέρασ οπ φαίνεται στο σχέδιο 8. Παρόλα αυτά, ο απαιτούμενος χρόνος για την δημιουργία πρωτότυπων μοντέλων, ήταν αρκετά μεγάλος (από ημέρες έως μήνες) και, συνακόλουθα ,το κόστος τους υψηλό. Για δύσκολες περιπτώσεις ο χρόνος κατασκευής αποτελούσε μέχρι και το 50% του συνολικού χρόνου και κόστους σχεδιασμού/ανάπτυξης του προϊόντος αντίστοιχα . Για τους λόγους αυτούς ο αριθμός των πρωτοτύπων ήταν κατά κανόνα περιορισμένος και, προφανώς οι δυνατότητες επανασχεδιασμού ή τροποποιήσεων ήταν και αυτές κατ' ανάγκη περιορισμένες.

Έκτοτε και μέχρι σήμερα έχει σημειωθεί στην κατασκευή πρωτοτύπων αξιοσημείωτη πρόοδος, ειδικά στο επίπεδο του απαιτούμενου χρόνου και κόστους, ώστε πλέον να χρησιμοποιείται ο όρος Ταχεία Κατασκευή Πρωτοτύπων (ΤΚΠ). [1] [3] [4] [5]



Σχήμα 8: Κατασκευή πρωτοτύπων πολύπλοκης γεωμετρίας με χρήση εργαλειομηχανών C.N.C.

2.4 ΤΑΧΕΙΑ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ

Ταχεία πρωτοτυποποίηση είναι 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 στην 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. Παρ' όλα αυτά, ο όρος RP έχει καθιερωθεί να περιγράφει τις νέες τεχνολογίες που κατασκευάζουν μοντέλα προσθέτοντας υλικό και όχι αφαιρώντας. [1] [2] [5]

Παράγοντες που συνέβαλαν στην ανάπτυξη της Τεχνολογίας Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων (RP):

- Ο ανταγωνισμός και οι απαιτήσεις της παραγωγής δημιούργησε την ανάγκη ελαχιστοποίησης του χρόνου.
- Τα σύνθετα , σύγχρονα προϊόντα προϋποθέτουν αυξημένο εξοπλισμό για την υλοποίηση ενός πρωτότυπου μοντέλου.
- Οι συμβατικοί τρόποι κατεργασίας απαιτούν εβδομάδες για την κατασκευή ενός πρωτοτύπου.
- Η πολυπλοκότητα της γεωμετρίας στα σημερινά προϊόντα.

Τρόπος λειτουργίας

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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΤΑΧΕΙΑΣ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗΣ

Όπως προαναφέραμε, υπάρχουν πάνω από 30 νέες τεχνολογικές μέθοδοι ταχείας πρωτοτυποποίησης μερικές από τις οποίες είναι εμπορικά διαθέσιμες. Χρησιμοποιούνται ευρέως, από τις βιομηχανικές γραμμές παράγωγης αλλά με την συνεχή εξέλιξη και την απλοποίηση των συστημάτων τους, έχουν κατασκευασθεί πλέον, μηχανές ταχείας πρωτοτυποποίησης ικανές για χρήση γραφείου. Οι μηχανές αυτές διαχωρίζονται ανάλογα με:

- Την αρχή λειτουργίας τους
- Το μέγεθος του κατασκευαζόμενου αντικείμενου
- Την ακρίβεια κατασκευής της μηχανής
- Τον τύπο του υλικού κατεργασίας
- Τις μηχανικές ιδιότητες του κατασκευαζόμενου εξαρτήματος

Οι πιο ευρέως διαδεδομένες τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί και είναι εμπορικά διαθέσιμες για την κατασκευή πρωτότυπων αντικειμένων στις βιομηχανικές γραμμές παράγωγης είναι οι εξής:

- Στερεολιθογραφία (Stereolithography)
- Επιλεκτικής σύντηξης με την χρήση ακτινών λέιζερ (Selective Laser Sintering)
- Συγκόλλησης λεπτών φύλων (Laminated Object Manufacturing)
- Εναπόθεσης –Σύντηξης διαδοχικών στρώσεων (Fused Deposition Modeling)
- Τρισδιάστατης εκτύπωσης ink-jet (3D ink-jet Printing)
- Και μια παραλλαγή της Στερεολιθογραφίας γνωστή ως Solid Ground Curing.

Οι μέθοδοι αυτοί θα αναλυθούν περεταίρω ανάλογα την αρχή λειτουργίας τους. [1] [2] [3] [4] [5]

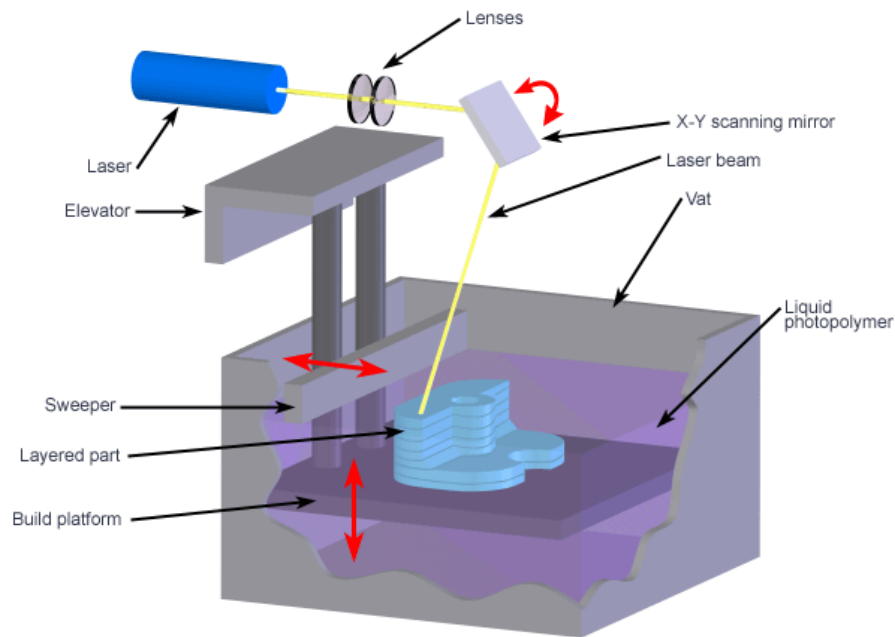
.3.2 Στερεολιθογραφία (Stereolithography, STL)

Το 1986, ο Charles W. Hull, καταχώρησε την Στερεολιθογραφία ως μια μέθοδο κατασκευής στερεών αντικειμένων, με διαδοχική εκτύπωση λεπτών στρώσεων σε ένα σκληρυνόμενο από το υπεριώδες φως υλικό. Η διαδικασία αυτή, περιγράφεται με μια συγκεντρωμένη δέσμη υπεριώδους φωτός, η οποία εστιάζεται στην επιφάνεια ενός δοχείου γεμάτο με φωτοπολυμερές υγρό. Η δέσμη φωτός, σχεδιάζει το αντικείμενο πάνω στην επιφάνεια του ρευστού στρώμα-στρώμα. Η διαδικασία αυτή βασίζεται στην αρχή του πολυμερισμού ή σταυρωτής σύνδεσης, για να δημιουργήσει ένα στερεό μέσω μιας πολύπλοκης διαδικασίας, στην οποία απαιτείται αυτοματισμός. Την ίδια χρονιά, ίδρυσε την εταιρεία 3D System Inc, για να γενικεύσει και να εμπορευματοποιήσει την διαδικασία αυτή. Έχουν γίνει προσπάθειες, για την κατασκευή μαθηματικών μοντέλων της διαδικασίας της Στερεολιθογραφίας, και αλγορίθμων σχεδιασμού, για να προσδιορισθεί, κατά πόσο ένα πρωτότυπο αντικείμενο μπορεί να κατασκευασθεί με αυτή την μέθοδο.

Είναι μια διαδικασία κατασκευής, η οποία περιλαμβάνει μια δεξαμενή με φωτοσκληρυνόμενο υγρό (πολυμερής ρητίνη), και ένα υπεριώδες λέιζερ για να χτίσει τις στρώσεις του εξαρτήματος μια-μια κάθε φορά. Για κάθε στρώμα, η δέσμη λέιζερ, σχεδιάζει μια εγκάρσια τομή του σχεδίου στην επιφάνεια της υγρής ρητίνης. Η έκθεση σε υπεριώδες φως, στερεοποιεί το μοτίβο που σχεδιάστηκε, πάνω στην ρητίνη και το ενώνει με το κάτω στρώμα. Αφού το πρωτότυπο, έχει σχεδιαστεί, η πλατφόρμα κατεβαίνει κατά μια απόσταση ίση με το πάχος του κάθε στρώματος (0,05mm έως 0.15mm) (Σχήμα 9). Η διαδικασία αυτή, επαναλαμβάνεται, εωςότου ολοκληρωθεί το σχέδιο του τρισδιάστατου κομματιού. Αφού κατασκευασθεί το εξάρτημα, βυθίζεται σε ένα χημικό λουτρό, και στην συνέχεια τοποθετείται σε έναν υπεριώδες φούρνο, για να σκληρυνθεί περισσότερο.

Με την μέθοδο αυτή, μπορούν να κατασκευασθούν, ταχύτατα πολύπλοκα σχέδια. Ο χρόνος κατασκευής, εξαρτάται από το μέγεθος και την πολυπλοκότητα του σχεδίου. Οι περισσότερες μηχανές, παράγουν κομμάτια με μέγιστο μέγεθος 50x50x60 cm (Σχήμα 10). Τα πρωτότυπα που παράγονται από την Στερεολιθογραφία, έχουν αυξημένη μηχανική αντοχή και μπορούν να επεξεργασθούν από εργαλειομηχανές C.N.C. Τα εξαρτήματα αυτά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κύρια τμήματα καλουπιών με χύτευση, θερμομόρφωσης και χύτευση με εμφύσηση

καθώς και διάφορες διαδικασίες χύτευσης μετάλλων. Η στερεολιθογραφία, μπορεί να παράγει ένα μεγάλο εύρος σχημάτων, τα οποία συχνά έχουν μεγάλο κόστος (κόστος φωτοσκληρυνόμενης ρητίνης από 80 έως 210 δολάρια ανά λίτρο). Το κόστος των μηχανών αυτών ξεκινάει από 100.000\$ και μπορεί να φθάσει πάνω από 500.000\$ αν και πρόσφατα δημιουργήθηκαν μοντέλα χαμηλότερου κόστους. [1] [2]



Σχήμα 9: Αρχή λειτουργίας Στερεολιθογραφίας



(α)

(β)

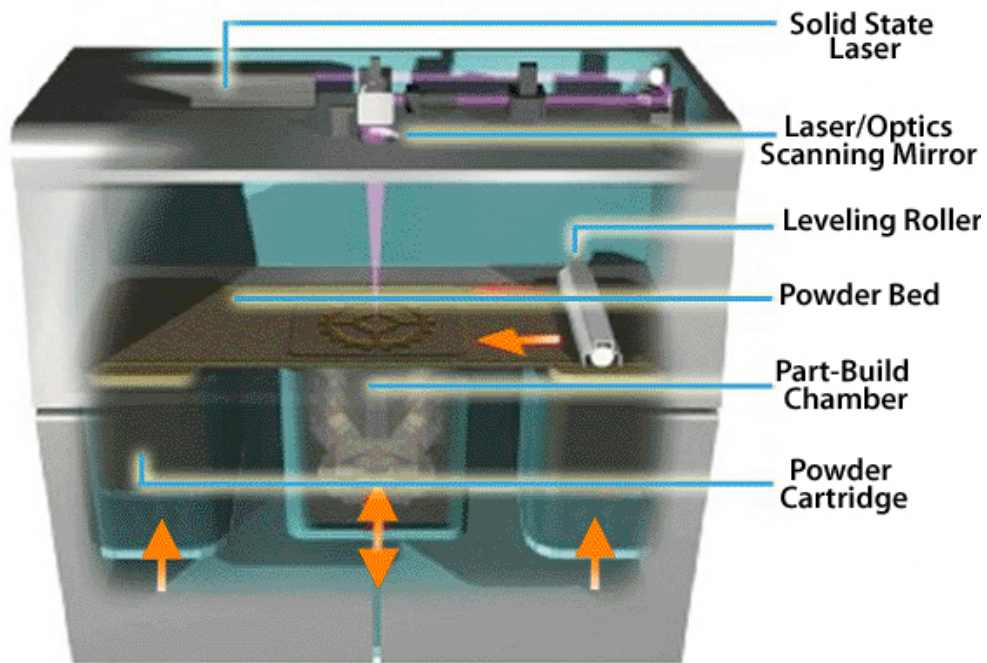
Σχήμα 10: (α) Βιομηχανικού τύπου μηχανήμα Στερεολιθογραφίας, (β) Πρωτότυπο μοντέλο

3.3 Επιλεκτική σύντηξη με την χρήση ακτίνων λέιζερ (Selective Laser Sintering, SLS)

Η επιλεκτική σύντηξη με την χρήση ακτίνων λέιζερ (S.L.S.), αναπτύχθηκε και καταχωρήθηκε από τον Dr. Carl Deckard, στο πανεπιστήμιο του Τέξας στο Όστιν, στα μέσα της δεκαετίας του 1980. Σε αντίθεση με άλλες μεθόδους κατασκευής πρωτοτύπων, όπως η στερεολιθογραφία και η εναπόθεσης –σύντηξης διαδοχικών στρώσεων (F.D.M.), η μέθοδος αυτή, δεν απαιτεί δομές υποστήριξης και αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι το εξάρτημα που κατασκευάζεται περιβάλλεται από μη λιωμένη σκόνη καθ' όλη την διάρκεια κατασκευής (Σχήμα 12).

Είναι μια τεχνική κατασκευής πρωτότυπων, που χρησιμοποιεί ένα λέιζερ υψηλής ισχύος, (π.χ. CO₂) για να λιώσει μικρά σωματίδια από πλαστικό, μέταλλο, κεραμικό και σκόνη γυαλιού στο επιθυμητό σχήμα. Το λέιζερ λιώνει επιλεκτικά, κονιοποιημένο υλικό, με σάρωση σε εγκάρσιες τομές από ένα ψηφιακό 3D αρχείο. Αφού, μια εγκάρσια διατομή έχει σχεδιασθεί, η επιφάνεια της σκόνης χαμηλώνει κατά ένα μήκος όσο το πάχος του στρώματος, και επαναλαμβάνεται η διαδικασία, έως ότου ολοκληρωθεί το εξάρτημα. Επειδή, η πυκνότητα του τελικού εξαρτήματος, εξαρτάται από την μέγιστη ισχύ του λέιζερ και όχι από την διάρκεια της ακτινοβολίας, η μηχανές S.L.S. χρησιμοποιούν συνήθως παλμικό λέιζερ. Η μηχανή προθερμαίνει το κονιοποιημένο υλικό λίγο κάτω από το σημείο τήξης του, ώστε να καταστεί ευκολότερο για το λέιζερ να αυξήσει την θερμοκρασία των επιλεγμένων περιοχών στο σημείο τήξης του (Σχήμα 11). Μερικά μηχανήματα S.L.S., χρησιμοποιούν σκόνη ενός συστατικού, (π.χ. άμεση συσσωμάτωση μετάλλου με λέιζερ), ωστόσο οι περισσότερες μηχανές χρησιμοποιούν σκόνη δύο συστατικών, συνήθως είτε επικαλυμμένης σκόνης είτε ένα μείγμα σκόνης. Σε ενός συστατικού σκόνης, το λέιζερ λιώνει μόνο την εξωτερική επιφάνεια των σωματιδίων, (τήξη επιφανείας) ενώνοντας τους στερεούς μη λιωμένους πύρινες μεταξύ τους και με το προηγούμενο στρώμα. Σε σύγκριση με άλλες μεθόδους παραγωγής με πρόσθεση υλικού, οι μηχανές αυτές μπορούν να παράγουν εξαρτήματα από ένα ευρύ φάσμα εμπορικά διαθέσιμων υλικών σε σκόνη. Μερικά από αυτά είναι το νάιλον, το καθαρό γυαλί, πολυστυρόλιο, ή μέταλλα συμπεριλαμβανομένου του τιτανίου, του χάλυβα, μείγμα κράματος και σύνθετα. Η φυσική διαδικασία, μπορεί να είναι μερική τήξη, ή υγρής φάσης πυροσυσσωμάτωση. Ανάλογα με την πυκνότητα του υλικού (100%), μπορούμε να

πετύχουμε μηχανικές ιδιότητες, ανάλογες με αυτές από τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής. Σε πολλές περιπτώσεις, μεγάλος αριθμός εξαρτημάτων, μπορεί να τοποθετηθεί μέσα στην σκόνη επιτρέποντας έτσι πολύ μεγάλη παραγωγικότητα. [1]
[2]



Σχήμα 11: Αρχή λειτουργίας Selective Laser Sintering.



(α)



(β)

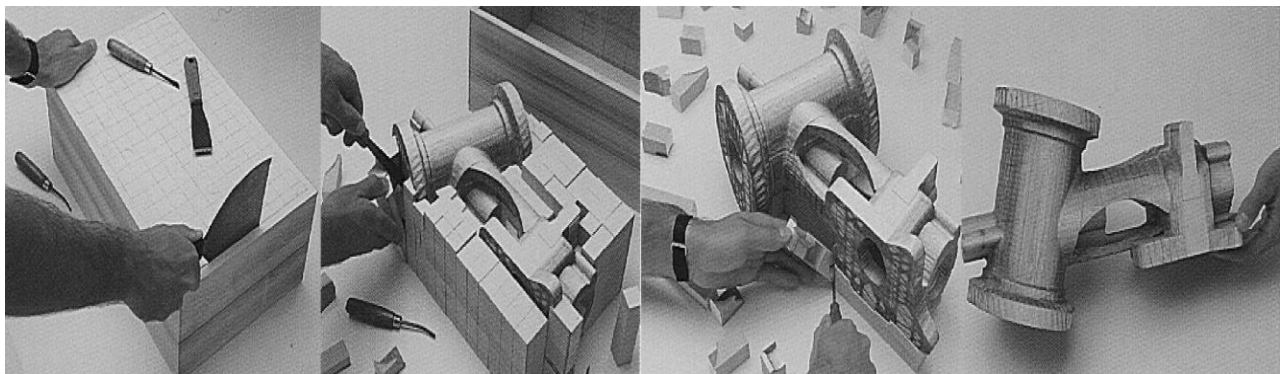
Σχήμα 12: (α) Βιομηχανικού τύπου μηχάνημα SLS, (β) Πρωτότυπο μοντέλο

3.4 Συγκόλληση Λεπτών Φύλλων (Laminated Object Manufacturing, L.O.M.)

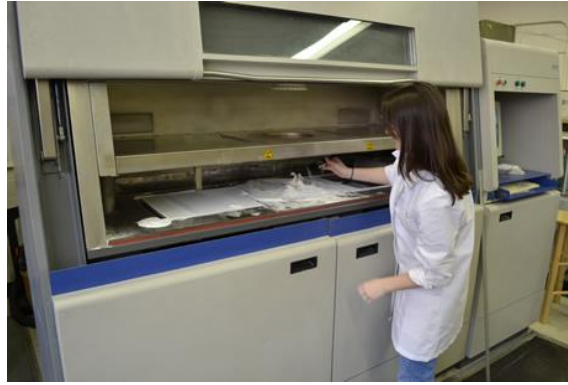
Είναι ένα σύστημα ταχείας πρωτοτυποποίησης, που αναπτύχθηκε από την εταιρεία Helisys Inc. Σε αυτή την μέθοδο, τα στρώματα δημιουργούνται με κόλλα και χαρτί, πλαστικό, ή μεταλλικά ελάσματα, που συγκολλούνται μεταξύ τους και κόβονται στο επιθυμητό σχήμα, με ακτίνα λέιζερ ή κάποιου είδους λεπίδα (Σχήμα 13).

Η διαδικασία ξεκινάει από ένα θερμαινόμενο κύλινδρο, ο οποίος προσκολλά το φύλλο σε ένα υπόστρωμα (τράπεζα), και στην συνέχεια το λέιζερ χαράζει τις επιθυμητές διαστάσεις του πρωτότυπου. Στην συνέχεια, χαράζει εγκοπές, για την πιο εύκολη απομάκρυνση του αποβλήτου. Η πλατφόρμα με το ολοκληρωμένο πια στρώμα, κατεβαίνει προς τα κάτω, για να λάβει θέση η επόμενη στρώση, και πλέον ένα νέο απλώνεται πάνω, και η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου ολοκληρωθεί το πρότυπο μοντέλο (Σχήμα 14).

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής, είναι το χαμηλό κόστος, τα απλά υλικά κατεργασίας, και τα μεγάλα εξαρτήματα που μπορούμε να κατασκευάσουμε. Δεν χρειάζονται κάποια χημική επεξεργασία όπως σε άλλες μεθόδους, και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου, μοιάζουν με αυτά του ξύλου. Ένα μειονέκτημα που έχει η μέθοδος αυτή, είναι ότι έχουμε μικρότερη ακρίβεια σε σχέση με άλλες τεχνικές. [1]
[2]

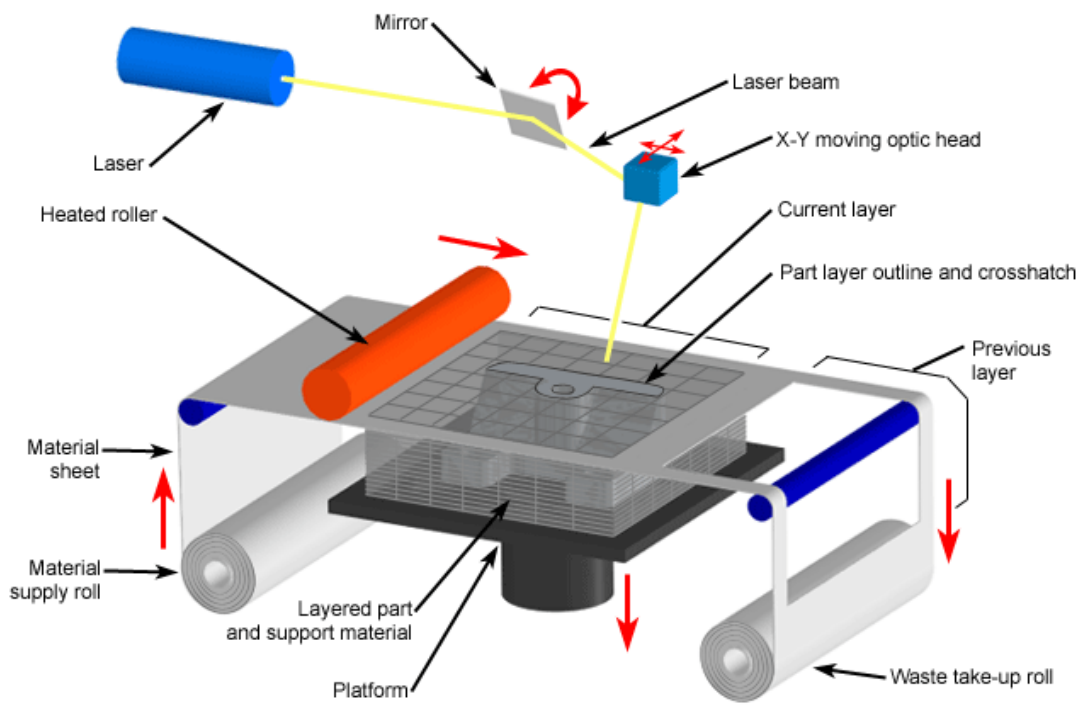


(α)



(β)

Σχήμα 13: (α) Πρωτότυπο αντικείμενο, (β) Βιομηχανικού τύπου μηχάνημα L.O.M.



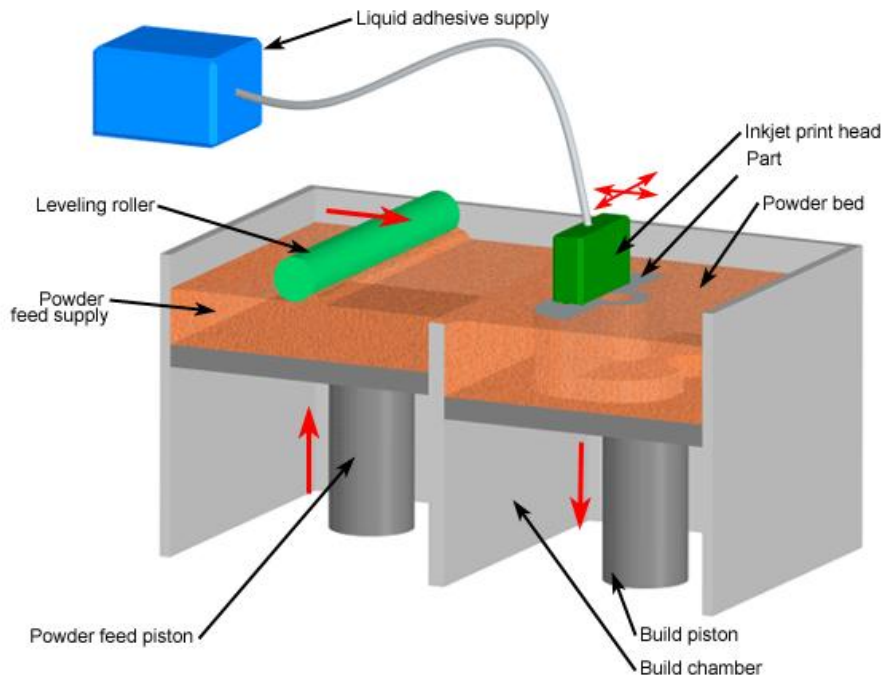
Σχήμα 14: Αρχή λειτουργίας LAMINATED OBJECT MANUFACTURING

3.5 Τρισδιάστατη Εκτύπωση (3D INK-JET PRINTING)

Η διαδικασία 3D Printing είναι μια διαδικασία Ταχείας Πρωτοτυποποίησης η οποία αναπτύχθηκε από την IBM και στη συνέχεια πουλήθηκε στην εταιρεία Stratasys Inc. Και αυτή η διαδικασία κατασκευάζει μοντέλα χτίζοντας layer by layer (Σχήμα 16).

Αρχικά, στρώνεται ένα μικρό στρώμα από σκόνη στην επιφάνεια του εμβόλου. Από ένα μοντέλο σχεδιασμένο σε σύστημα C.A.D, υπολογίζονται οι απαραίτητες πληροφορίες για τα στρώματα, μέσω ενός αλγορίθμου. Χρησιμοποιώντας τεχνολογία παρόμοια με αυτή των ink-jet εκτυπωτών, ένα υλικό ενοποιεί τα σωματίδια στα σημεία εκείνα όπου το αντικείμενο πρέπει να είναι ένα σώμα. Το έμβολο τότε, χαμηλώνει τόσο ώστε να απλωθεί η νέα σκόνη και να ενοποιηθεί επιλεκτικά. Αυτή η διαδικασία, στρώμα-στρώμα επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί το μοντέλο. Με μια κατάλληλη θερμική διαδικασία, αφαιρείται η ελεύθερη σκόνη αφήνοντας πίσω το μοντέλο (Σχήμα 15).

Πολλοί επιμένουν πως η διαδικασία 3D Printing είναι πιο ευέλικτη από όλες τις τεχνολογίες. [1] [2] [3]



Σχήμα 15: Αρχή λειτουργίας 3D ink-jet Printing



Σχήμα 16: Πρωτότυπο Μοντέλο

3.6 Στερεά Σκλήρυνση Επιφανείας (Solid Ground Curing, SGC)

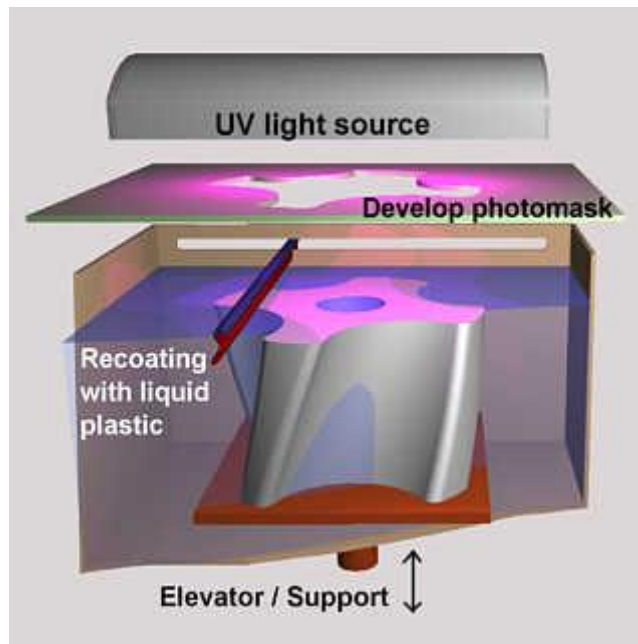
Το σύστημα SOLIDER αναπτύχθηκε από την εταιρεία Cubital. Έχει την ίδια αρχή λειτουργίας με την στερεολιθογραφία, με σημαντικά όμως διαφορετική διαδικασία.

1. Πρώτη διαφορά. Το διάλυμα μετακινείται και οριζόντια μεταφέροντας τον ενεργό χώρο διαδικασίας σε διαφορετικούς σταθμούς στη μηχανή.
2. Δεύτερη διαφορά. Η πηγή φωτός και η διαδικασία. Χρησιμοποιείται λάμπα υπεριώδους φωτός που φωτίζει το θάλαμο και στερεοποιείται όλο η στρώση. Για να διαλέξουμε την περιοχή που πρέπει να στερεοποιηθεί, δημιουργείται μια μάσκα σε μια γυάλινη επιφάνεια και σβήνεται διαδοχικά μετά τη χρήση της. Η γυάλινη πλάκα με τη μάσκα τοποθετείται μεταξύ της λάμπας και της επιφάνειας του χώρου εργασίας (Σχήμα 17).
3. Τρίτη διαφορά. Τα μοντέλα χτίζονται περικυκλωμένα από κερί, περιορίζοντας την ανάγκη χρήσης κατασκευών για υποστήριξη. Μόλις μια στρώση έχει εκτεθεί στο υπεριώδες φως της λάμπας, οι περιοχές που δεν έχουν στερεοποιηθεί, αυτές που γεμίζουν με υπολείμματα, αντικαθίστανται με κερί.

Αυτό επιτυγχάνεται με εξάλειψη των καταλοίπων και στρώνοντας έναν layer από κερί. Πετυχαίνουμε την σκλήρυνση του κεριού με μια παγωμένη μεταλλική πλάκα και διαδοχικά ο layer επεξεργάζεται στο σωστό ύψος (Σχήμα 18).

Της, ο σταθμός κατεργασίας δίνει τη δυνατότητα να αφαιρεθούν layers. Ο της layer του πολυμερούς έχει εφαρμοστεί όταν ο χώρος εργασίας μετακινείται από το χώρο

κατεργασίας πίσω στο θάλαμο έκθεσης φωτός. Οι τελευταίες βελτιώσεις που ανακοινώθηκαν από την Cubital είναι η δυνατότητα να αλλάζει το μέγεθος του χώρου κατεργασίας και μια επιπλέον λάμπα υπεριώδους φωτός. Το σύστημα αυτό της Cubital μπορεί να πετύχει πάχος layer ίσο με 0.1-0.2 mm, μπορεί να κατασκευάσει έναν layer σε 70 sec και κοστίζει 470.000 \$. [1] [2]



Σχήμα 17: Αρχή Λειτουργίας Solid Ground Curing



(α)



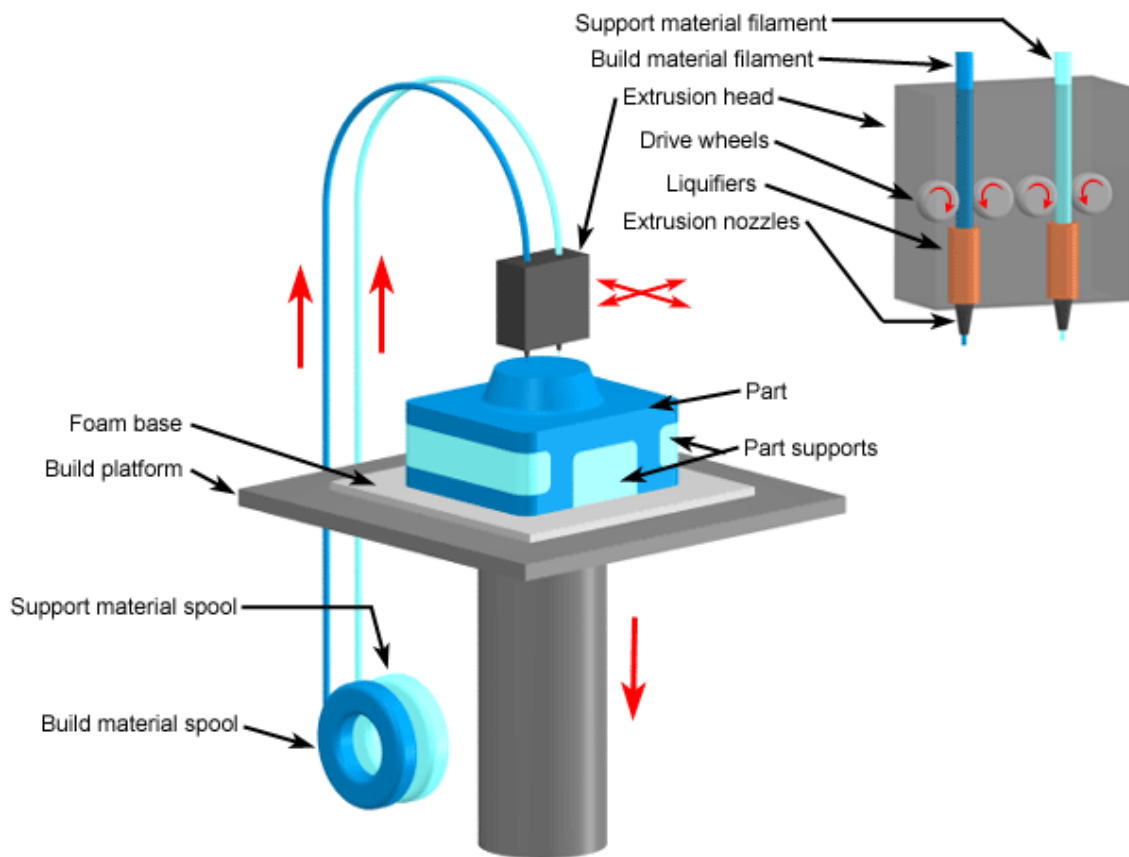
(β)

Σχήμα 18: (α) Βιομηχανικού τύπου μηχανήμα SGC, (β) Πρωτότυπο Μοντέλο

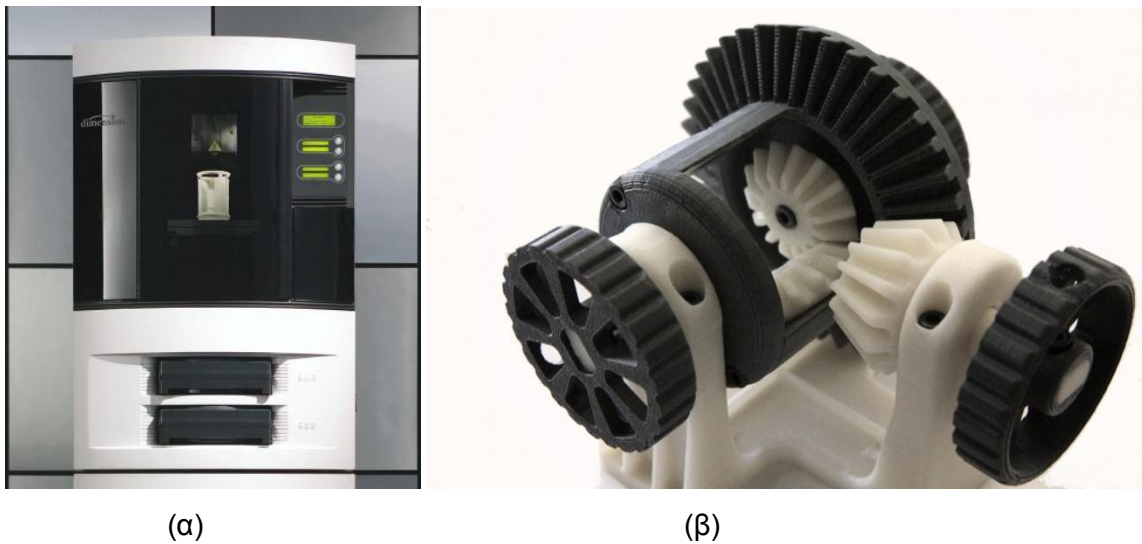
3.7 Εναπόθεση – Σύντηξη Διαδοχικών Στρώσεων (Fused Deposition Modeling, F.D.M.)

Είναι μια τεχνολογία κατασκευής, πρόσθεσης υλικού, που χρησιμοποιείται κυρίως για την μοντελοποίηση, την πρωτοτυποποίηση και την παραγωγή εφαρμογών. Το F.D.M., λειτουργεί σε μια αρχή πρόθεσης υλικού, απλώνοντας το υλικό σε στρώματα. Ένα πλαστικό νήμα, ξετυλίγεται από ένα ρολό, το οποίο προωθείται σε ένα ακροφύσιο εξωθήσεως (hotend). Το ακροφύσιο, λιώνει το υλικό και μπορεί να κινείται σε οριζόντια και κάθετη διεύθυνση, με ένα ελεγκτή αριθμητικού ελέγχου (N.C. Controller). Το μοντέλο ή εξάρτημα, παράγεται, με εξώθηση υλικού, σε εύπλαστη μορφή, από ένα θερμοπλαστικό υλικό, για τον σχηματισμό στρωμάτων, καθώς το υλικό σκληραίνει αμέσως μετά από την εξώθησή του από το ακροφύσιο (Σχήμα 19). Η κίνηση του Hotend, γίνεται με βηματικούς κινητήρες ή σερβοκινητήρες, και η τεχνολογία αυτή αναπτύχθηκε από τον S. Scott Crump, στα τέλη του 1980, και εμφανίστηκε στο εμπόριο το 1990. Ο όρος F.D.M., είναι εμπορικό σήμα της Stratasys Inc, και ακριβός ισοδύναμος όρος, είναι το F.F.F. (Fused Filament Fabrication) που επινοήθηκε, από τα μέλη των RepRap Project, για να δώσει μια φράση που θα μπορούσε να είναι νόμιμο χωρίς περιορισμούς.

Η μέθοδος F.D.M., ξεκινάει με μια διαδικασία λογισμικού, που αναπτύχθηκε από την εταιρεία Stratasys Ltd, το οποίο επεξεργάζεται ένα αρχείο STL μέσα σε λίγα λεπτά, και με μαθηματικό τρόπο τεμαχίζει, και προσανατολίζει το μοντέλο, για την διαδικασία κατασκευής, του και δημιουργούνται αυτόματα δομές υποστήριξης εάν απαιτούνται. Το θερμοπλαστικό υλικό υγροποιείται, και εναποτίθενται μέσω ενός ακροφυσίου, το οποίο ακολουθεί μια διαδρομή η οποία καθορίζεται από το αρχείο C.A.D. του σχεδίου. Το υλικό αποτίθενται, σε στρώματα λεπτού πάχους, έως 0,01mm, και το εξάρτημα φτιάχνεται από κάτω προς τα πάνω, ένα στρώμα κάθε φορά (Σχήμα 20). Τα υλικά που χρησιμοποιεί, είναι το ABS, (ακρολονονιτρίλιο βουταδιαίνιο στυρόλιο) πολυμερές, PLA, (πολυγαλακτικό οξύ), πολυανθρακικά, πολυκαπρολακτόνη, πολυφαινισουλφόνες και κερί με διαφορετικές αντοχές και θερμοκρασιακές ιδιότητες. [1] [2] [4]



Σχήμα 19: Αρχή λειτουργίας Fused Deposition Modeling



(α)

(β)

Σχήμα 20: (α) Βιομηχανικού τύπου μηχάνημα FDM, (β) Πρωτότυπο μοντέλο

3.8 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

Η σύγκριση των μεθόδων, που αναπτύχθηκαν παραπάνω, στηρίζεται στον χρόνο κατασκευής, το κόστος και τη λειτουργικότητα. Όλες οι τεχνικές έχουν περιορισμούς που επιβάλλονται από το κόστος, την ακρίβεια, τα υλικά, τη γεωμετρία και το μέγεθος του μοντέλου.

Στον πίνακα 1, δίνεται μια περίληψη των διαφορών μεταξύ των διαδικασιών που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα. Η σύγκριση είναι ελλιπής γιατί λείπουν αρκετά σημαντικά στοιχεία όπως οι τιμές των εξοπλισμών, το κόστος υποστήριξης και το κόστος των υλικών, παρόλα αυτά είναι ενδεικτική.

Διαδικασίες	STL	SLS	LOM	3D Print	SGC	FDM
Μέγεθος μοντέλου mm	254x254x254	305x381x305	330x2540x381	203x203x203	508x508x355	600x500x600
Πάχος στρώματος	0,1-0,9	0,13	0,005-0,05	-	0,05-0,15	0,1
Ταχύτητα	Εξαρτάται από τη γεωμετρία	Εξαρτάται από τη γεωμετρία	10mm/ώρα	101mm/δευτ.	60-100 στρώμα/ώρα	Εξαρτάται από τη γεωμετρία
Ακρίβεια	0.2 mm	0.05-0.25mm	(+/-) 0.127 mm	(+/-) 0.127 mm	0.1%	0.1 mm
Υλικά	Ρητίνες φωτοπολυμερείς	PVC, Nylon, abs, κερί	Nylon, χαρτί, πολυεστέρας	Πολυεστέρας (στερεός)	Ρητίνες πολυμερείς, κερί	Ρητίνες πολυμερείς

Πίνακας 1: Σύγκριση μεθόδων

Όταν το κομμάτι δε χωρά στον χώρο της μηχανής, μπορεί να χωριστεί σε τμήματα, τα οποία κατασκευάζονται ξεχωριστά και συναρμολογούνται στο τέλος.

Τα δεδομένα παρέχονται σε τριγωνοποιημένα μοντέλα, STL format. Όλοι οι προμηθευτές παρέχουν εργαλεία λογισμικού για την επιβεβαίωση, διόρθωση και

τεμάχισμα των μοντέλων. Η αρχιτεκτονική του λογισμικού και η ποιότητα τους ποικίλει σημαντικά. [1] [3] [4]

Επιλογή της κατάλληλης τεχνικής

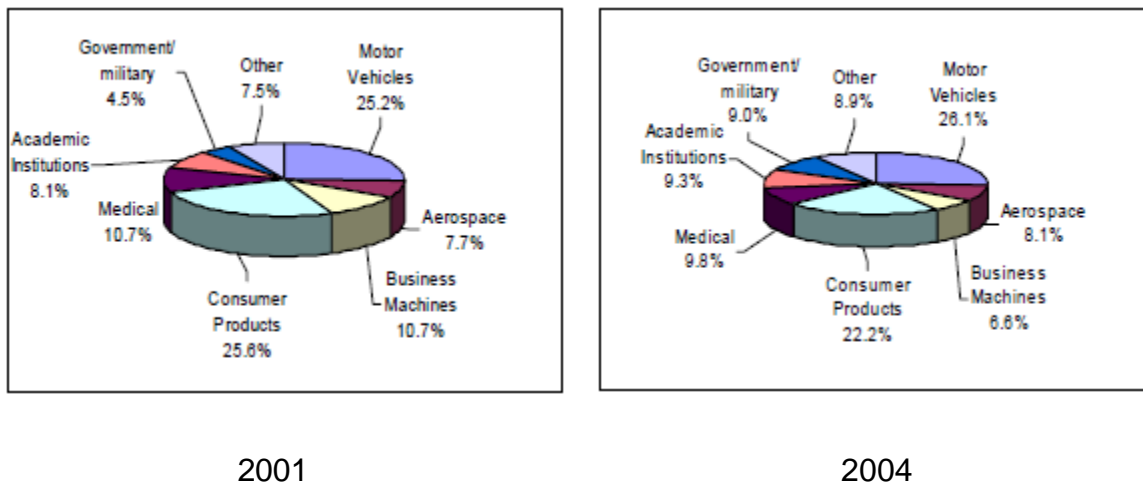
Όλα τα συστήματα ταχείας πρωτοτυποποίησης μπορούν να παράγουν φυσικά αντικείμενα. Μια εταιρεία για να καταλήξει στο ποια τεχνική είναι κατάλληλη για την κατασκευή μοντέλων που επιθυμεί και για να την εφαρμόσει, προηγουμένως θα ακολουθήσει το εξής σκεπτικό. Εάν σκοπός της είναι να παράγει μικρά ή μεσαίου μεγέθους κομμάτια έχοντας ακρίβεια και μια καλά φινιρισμένη επιφάνεια σε ένα αρκετά στερεό πλαστικό υλικό, όπως είναι η *εποξική ρητίνη*, τότε θα επιλέξει την τεχνολογία της Στερεολιθογραφίας.

Εάν η απλότητα, οι μηχανές μικρού μεγέθους, η επιμέρους δύναμη και η αρχή συμβατότητας είναι τα σημαντικά στοιχεία που μια εταιρεία έχει ως στόχο να εφαρμόσει στην παραγωγή της, τότε η ζητούμενη τεχνολογία είναι η FDM και το δικό της *ABS πλαστικό υλικό*. Εάν η επιμέρους δύναμη είναι η βασική αρχή και προτεραιότητα της εταιρείας, θα πρέπει να επιλέξει το πολυεστερικό υλικό με ίνες γυαλιού (the glass-filled nylon) που χρησιμοποιείται στην τεχνολογία της SLS: διαθέσιμη είναι η *άμμος SLS* για την παραγωγή καλουπιών και πυρήνων, καθώς επίσης το *μέταλλο* για την παραγωγή πρωτοτύπων σε θερμοπρεσαριστά καλούπια. Η τεχνολογία 3D Printing ενδείκνυται για την κατασκευή περίπλοκων μοντέλων από κερι, ενώ η LOM ενδείκνυται για την κατασκευή μεγάλων και ογκώδεις κομματιών αποτελούμενα από πολλά υλικά. Τελικά, εάν η εταιρεία θέλει να παράγει πολλά πρωτότυπα αμέσως, τότε θα δουλέψει την SGC, καθώς αυτή η τεχνολογία, αναμφίβολα, παράγει τα περισσότερα πλαστικά κομμάτια σε λιγότερο χρόνο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ RP ΣΕ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

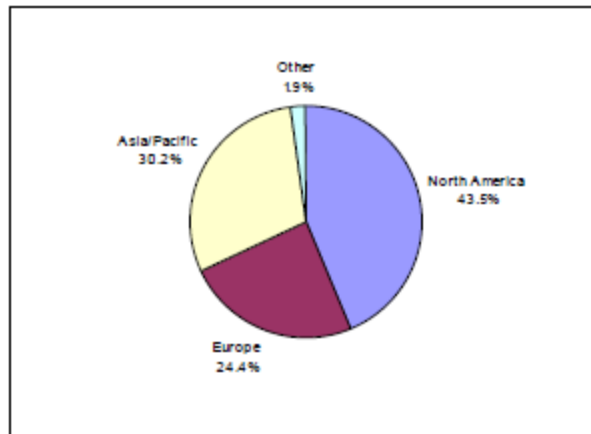
Οι βιομηχανίες απασχολούν RP συστήματα για διάφορους σκοπούς, όπως το σχήμα δοκιμή, εφαρμογή και λειτουργία των προϊόντων τους. Το διάγραμμα 1 δείχνει την κατανομή των τομέων που εξυπηρετούνται με τα καταναλωτικά προϊόντα, με τις αυτοκινητοβιομηχανίες να αποτελούν περίπου το 50% του συνόλου. Η πιο αξιοσημείωτη αλλαγή είναι ότι στα ακαδημαϊκά ιδρύματα και την στρατιωτική βιομηχανία, αυξήθηκε η χρήση RP κατά 5,7% κατά τα τελευταία 3 χρόνια, ενώ τα καταναλωτικά προϊόντα μειώθηκαν κατά 3,4%. Επίσης, πολλές μικρές και μεσαίου μεγέθους επιχειρήσεις συμμετέχουν όλο και περισσότερο στην αγορά μεσαίας κατηγορίας συστημάτων RP και τα οφέλη της 3D εκτύπωσης γίνονται ευρύτερα κατανοητά. [6]



Διάγραμμα 1: Εξυπηρετούμενες Βιομηχανίες (Πηγή: Wohlers Associates, Inc.)

Αν και η βιομηχανία RP προέρχεται από τις ΗΠΑ, ένα μεγάλο μέρος των χρηστών και των προμηθευτών, λαμβάνει χώρα πλέον, στην Ευρώπη και την Ασία. Το διάγραμμα 2 δείχνει ότι μόνο το 43,5% των RP μηχανών σε όλο τον κόσμο έχουν εγκατασταθεί στη Βόρεια Αμερική μέχρι το 2003, ενώ παλαιότερα αντιπροσώπευε το 52,6% του συνόλου των RP το 1997. Το συνολικό μερίδιο που κατέχει η Βόρεια Αμερική αναμένεται σιγά-σιγά να μειωθεί περαιτέρω, καθώς η Κίνα και άλλες χώρες, αναπτύσσουν με RP συστήματα τις βιομηχανικές γραμμές παράγωγής τους. Η

κατανομή των πωλήσεων ανά χώρα τα τελευταία 8 παρουσιάζεται στο πίνακα πωλήσεων. Τα τελευταία τρία χρόνια, στο Ηνωμένο Βασίλειο και τις ΗΠΑ, οι αγορές είχαν ραγδαία ανάπτυξη, με 43,9% και 32,5%, αντίστοιχα, μεταξύ των μεγάλων αγορών. Η Αυστραλία και η Ταϊβάν, από την άλλη πλευρά, έδειξαν τη μεγαλύτερη αύξηση μεταξύ των χωρών με μικρότερες εγκαταστάσεις RP.



*Διάγραμμα 2: Συγκεντρωτικό Σύνολο Εγκατάστασης 3D Μηχανών σε Παγκόσμιο Επίπεδο
(Πηγή: Wohlers Associates, Inc.),*

Η ζήτηση για RP μηχανές, οδηγείται από την ανάγκη, να μειωθεί ο χρόνος παραγωγής, σε συνδυασμό με μια αύξηση στην ανάπτυξη των νέων προϊόντων. Τα RP μοντέλα είχαν τεράστιο αντίκτυπο στον αριθμό των προϊόντων που εισάγονται στην αγορά, καθώς και την επιτυχία αυτών των προϊόντων. Φυσικά μοντέλα ενός προϊόντος επιτρέπουν στα αγοραστές και τους επενδυτές να κατανοήσουν τις ιδέες και την σχεδίαση των προϊόντων.

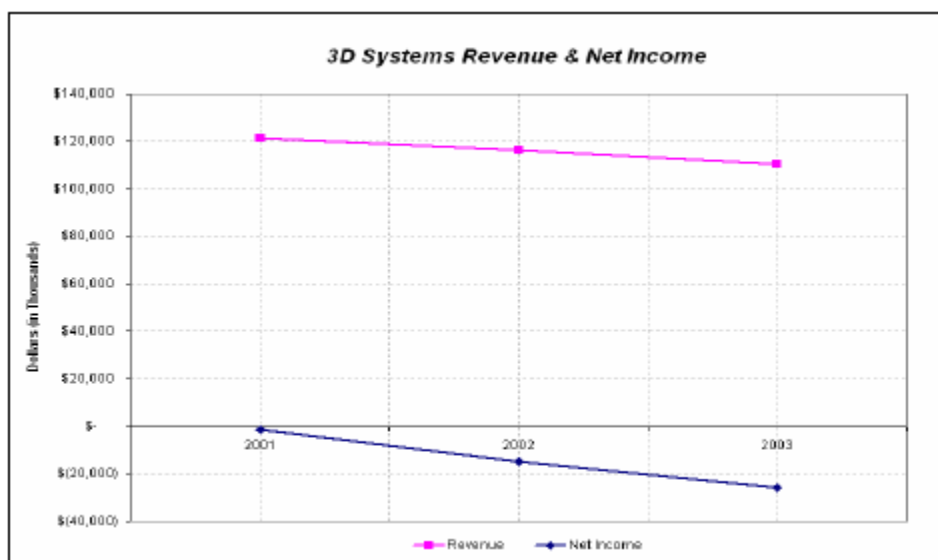
Πίνακας Πωλήσεων

Country	Accum total	Sold in 2003	Sold in 2002	Sold in 2001	Sold in 2000	Sold in 1999	Sold in 1998	Sold in 1997	Thru 1996
U.S.	4758	803	606	466	492	487	431	451	1022
Canada	104	19	10	7	12	7	17	19	13
Austria	28	3	4	6	2	6	3	1	3
Belgium	18	5	1	1	3	2	0	1	5
Bosnia	1	0	0	1	0	0	0	0	0
Czech Rep	19	4	2	5	1	3	1	3	0
Denmark	28	5	1	7	5	3	2	2	3
Finland	32	4	1	2	3	7	4	5	6
France	311	40	37	50	44	42	22	21	55
Germany	984	135	120	134	117	112	103	24	169
Greece	26	4	4	7	1	0	1	4	5
Hungary	4	0	3	0	0	0	1	0	0
Iceland	2	2	0	0	0	0	0	0	0
Ireland	2	0	0	0	0	0	0	0	2
Italy	379	59	48	60	52	35	39	38	48
Luxembourg	2	0	0	0	1	0	0	0	1
Netherlands	41	0	5	11	2	12	4	4	3
Norway	11	1	2	2	1	1	1	2	1
Poland	10	2	2	0	2	0	2	2	0
Portugal	15	4	0	3	1	4	2	1	0
Romania	3	0	0	1	0	0	0	0	2
Russia	57	9	10	8	6	5	0	7	12
Slovenia	7	0	3	1	2	0	0	1	0
Spain	91	14	7	17	23	11	11	5	3
Sweden	115	12	12	8	12	12	15	6	28
Switzerland	47	9	13	7	4	2	4	3	5
Ukraine	2	0	1	0	1	0	0	0	0
United Kingdom	479	82	57	62	65	64	35	56	58
Other European	10	1	0	0	1	0	0	0	8
Cyprus	4	0	2	0	0	0	2	0	0
Egypt	5	0	4	0	1	0	0	0	0
Israel	22	5	4	7	2	3	0	1	0
Iran	3	1	1	0	0	0	0	0	1
Saudi Arabia	3	1	0	0	2	0	0	0	0
Turkey	72	25	16	1	10	9	3	5	3
United Arab Emirates	3	0	0	0	0	1	2	0	0
South Africa	14	2	2	2	1	1	0	2	4
Australia	64	19	7	7	6	0	3	7	15
China	716	183	160	83	120	64	31	42	33
India	92	21	7	20	10	5	7	13	9
Indonesia	4	1	2	0	0	0	0	0	1
Japan	1917	235	216	219	251	238	208	187	363
Korea	242	54	46	29	29	30	9	13	32
Malaysia	62	14	12	14	6	4	1	9	2
New Zealand	3	0	1	1	0	1	0	0	0
Singapore	55	7	3	4	4	6	5	8	18
Taiwan	158	50	22	26	13	9	6	13	19
Thailand	47	11	12	6	4	2	2	5	5
Vietnam	7	4	2	1	0	0	0	0	0
Argentina	4	0	0	1	0	2	0	1	0
Brazil	45	7	7	9	3	3	5	6	5
Chile	2	0	1	0	0	0	0	1	0
Colombia	8	5	3	2	0	0	0	0	1
Uruguay	2	0	0	0	0	1	0	0	1
Other S. America	2	0	0	0	0	0	0	0	2
Costa Rica	1	0	1	0	0	0	0	0	0
Mexico	17	5	1	0	5	0	1	1	2
Other Nations	6	0	2	1	0	1	0	0	5
Total	11166	1864	1482	1299	1320	1195	983	1050	1973

4.2 3D SYSTEMS INC.

Για πολλά χρόνια, η 3D Systems ήταν ο ηγέτης της τεχνολογίας στον τομέα της RP. Η πρώτη εμπορικά διαθέσιμη μηχανή RP εισήχθη από την 3D Systems το 1987. Η εισοδός του, το SLA-1 (Συσκευή Stereolithography), δεν είχε ανταγωνισμό μέχρι ένα χρόνο αργότερα. Για άλλη μια φορά, το 1996, η 3D Systems ήταν η πρώτη στην αγορά με μια νέα τεχνολογία, την 3D εκτύπωση. Μέχρι το 1999, η 3D Systems αντικαθιστά τον αρχικό της εκτυπωτή, με ένα προϊόν που εξακολουθεί να πωλείται μέχρι σήμερα, το thermojet, η οποία είναι ταχύτερη, και λιγότερο δαπανηρή σε σχέση με τον αρχικό εκτυπωτή Actua 2100. Ενώ έρχονται στην αγορά με αυτή τη νέα τεχνολογία, η 3D Systems συνέχισαν να εργάζονται στον τομέα της τεχνολογίας Stereolithography, εισάγοντας ένα από τα πιο πρόσφατα προϊόντα της, το SLA 7000, το 1999, το πιο ακριβό μηχάνημα RP στην αγορά στην τιμή των \$ 800.000.

Μέχρι τις 31 Δεκεμβρίου του 2003, η 3D Systems κατείχε 367 διπλώματα ευρεσιτεχνίας στις ΗΠΑ, ενώ είχε άλλα 144 να εκκρεμούν σε εργαστήρια. Παρά το γεγονός αυτό, κατά τη διάρκεια των τριών τελευταίων ετών, η 3D Systems έχει αρχίσει να χάνει έδαφος στην αγορά των RP, σε σημείο που κινδύνευε με πτώχευση. Κατά τη διάρκεια αυτών των ετών, τα έσοδα και τα καθαρά έσοδα έχουν πέσει κατακόρυφα, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 5.

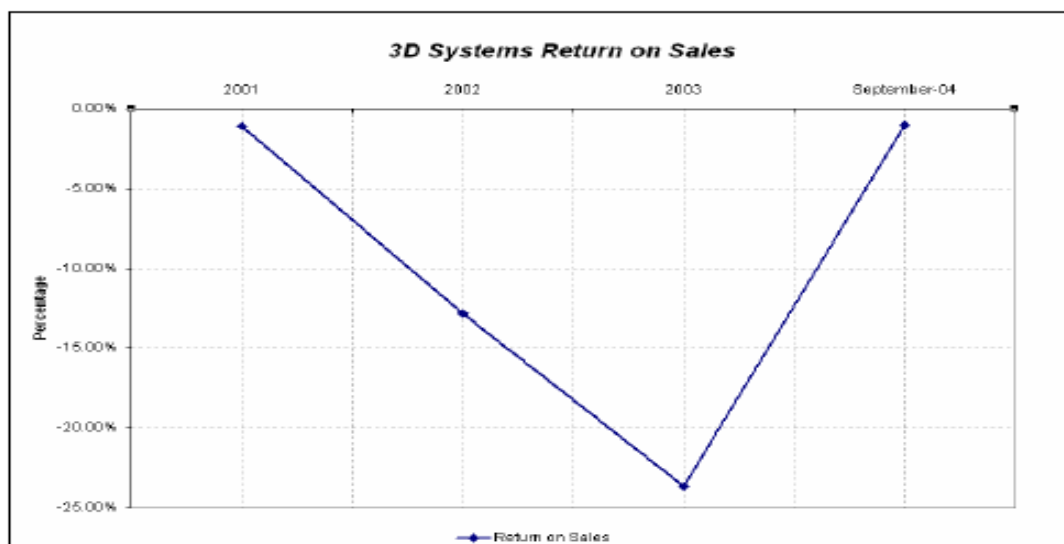


Διάγραμμα 5: Έσοδα και καθαρά έσοδα της εταιρίας 3D Systems από το 2001 έως το 2003
(Πηγή: Wohlers Associates, Inc.)

Ένας νέος Πρόεδρος/Διευθύνων Σύμβουλος διορίστηκε στα τέλη του 2003. Ο επαναπροσδιορισμός της εταιρείας για την παραγωγή νέων προϊόντων και την αλλαγή της εταιρικής στρατηγικής ώστε να προσφέρουν λύσεις χαμηλού κόστους για τους πελάτες ήταν ο κύριο στόχος της. Από τα μέσα του 2003, δύο νέα προϊόντα RP, έχουν εισαχθεί: το InVision και υψηλότερη ανάλυση, InVision HR με αποτέλεσμα την αύξηση των πωλήσεων (Διάγραμμα 6). Η σημερινή σειρά προϊόντων της 3D Systems παρατίθεται στον Πίνακα 3. [3] [6]

<i>3D Systems Product Line</i>			
<i>Machine Name</i>	<i>Technology</i>	<i>Build Envelope</i>	<i>Max Scan Speed</i>
InVision 3D Printer	Multi-Jet Modeling	11.75x7.3x8 in	not available
InVision HR 3D Printer	Multi-Jet Modeling	3x3x2 in	not available
Thermojet Printer	Multi-Jet Modeling	10x7.5x8 in	not available
Viper SLA System	Stereolithography	10x10x10 in 5x5x10 in (HR)	5 mm/sec
Viper HA SLA System	Stereolithography	4.7x9.64x2 in (dual) 10x10x2 in (single standard) 5x5x2 in (single HR)	5 mm/sec
SLA 7000 System	Stereolithography	20x20x23 in	2.54 m/sec (small) 9.53 m/sec (large)
SLA 5000 System	Stereolithography	20x20x23 in	5 m/sec
Sinterstation® HiQ™	Selective Laser Sintering	14x12x17 in	5 – 10 m/sec

Πίνακας 3: Τεχνικά χαρακτηριστικά των μηχανημάτων της γραμμής παράγωγής της εταιρείας 3D Systems (Πηγή: Wohlers Associates, Inc.)



Διάγραμμα 6: Επιστροφή της εταιρείας 3D Systems στις πωλήσεις μεταξύ 2001 και 2004 (Πηγή: Wohlers Associates, Inc.)

4.3 STRATASYS

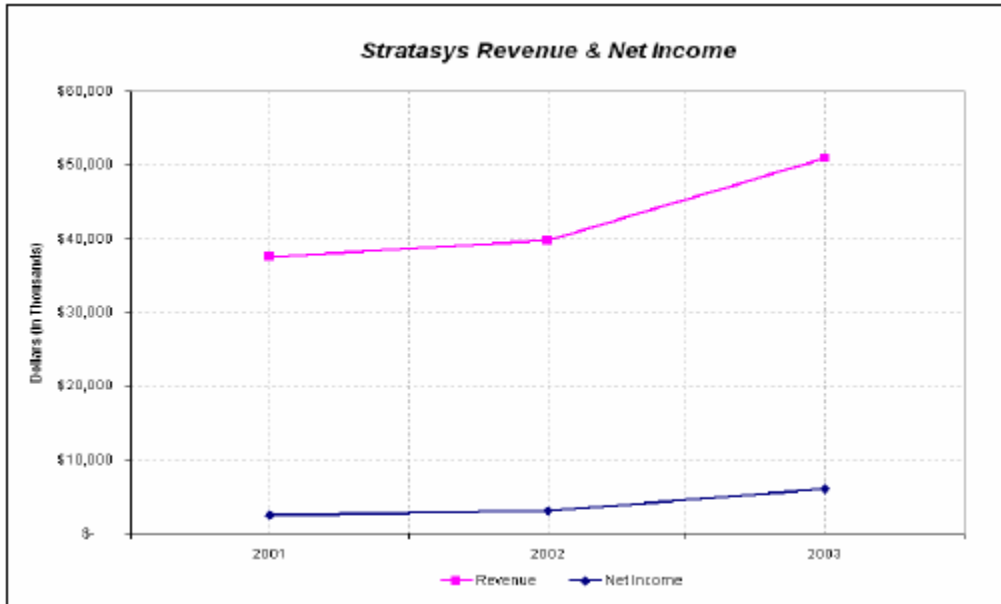
Η Stratasys ιδρύθηκε στο Delaware το 1989 με βάση την τεχνολογία F.D.M. Πούλησε το πρώτο μηχάνημα της (3D Modeler) τον Απρίλιο του 1992 και από τότε η εταιρεία έχει αυξήσει τη σειρά προϊόντων της σε εννέα μοντέλα. Εξέδωσε μια αρχική δημόσια προσφορά το 1996. Από τότε η Stratasys ήταν η δεύτερη στο σύνολο των πωλήσεων ανά μονάδα RP το 1999 και το 2000. Η αύξηση των πωλήσεων της, ήταν επίσης σχετικά στάσιμη μεταξύ του 1999 και του 2000, με ρυθμό ανάπτυξης μικρότερο του 2% (293 έναντι 297 μονάδες, αντίστοιχα).

Από το 2001 όμως, οι πωλήσεις της έχουν αυξηθεί σε σημείο όπου ξεπέρασε την 3D Systems για να γίνει νούμερο ένα στο σύνολο των εγκατεστημένων μονάδων RP το 2003 (3.013 μονάδες). Οι πωλήσεις αυξήθηκαν κατά 50% μεταξύ 2003 και 2002. Ολόκληρη η σειρά προϊόντων Stratasys παρουσιάζεται στον Πίνακα 4. [4] [6]

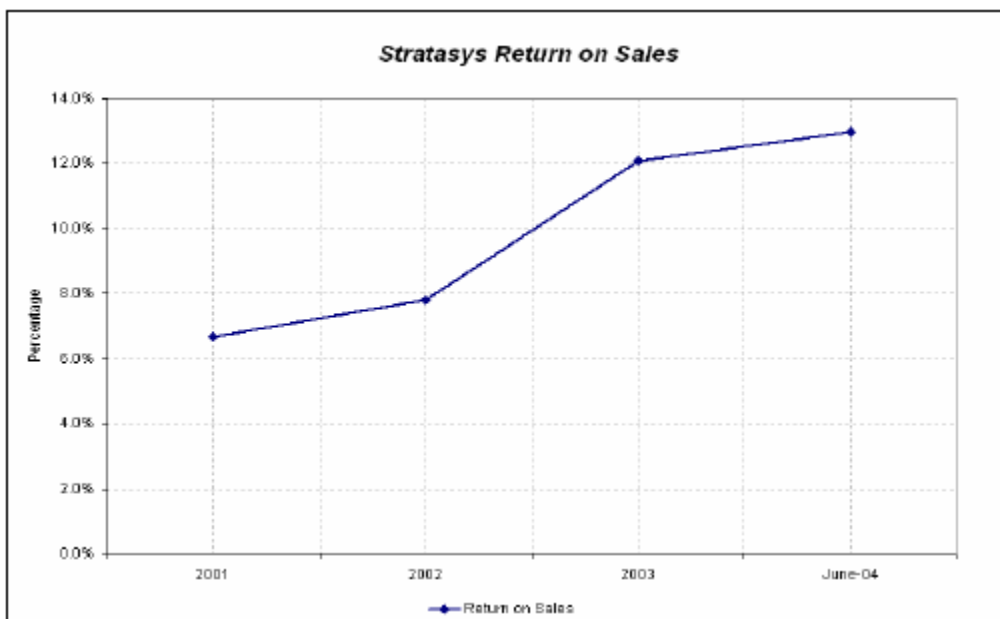
<i>Stratasys Product Line</i>		
<i>Machine Name</i>	<i>Build Envelope</i>	<i>Materials</i>
Prodigy Plus	8x8x12 in	ABS plastic
Eden 333	13.4x13x7.9 in	Proprietary UV plastic
FDM Vantage i	14x10x10 in	ABS or Polycarbonate
FDM Vantage S	14x10x10 in	ABS and Polycarbonate
FDM Vantage SE	16x14x16 in	ABS and Polycarbonate
FDM Titan	16x14x16 in	ABS, Polycarbonate and Polyphenylsulfone
FDM Maxum	23.6x19.7x23.6 in	ABS and ABSi plastic
Dimension BST	8x8x12 in	ABS
Dimension SST	8x8x12 in	ABS

Πίνακας 4: Τεχνικά χαρακτηριστικά των μηχανημάτων της γραμμής παραγωγής της εταιρίας Stratasys Inc. (Πηγή: Wohlers Associates, Inc.)

Χάρη στη μεγάλη προσφορά των προϊόντων τους στον τομέα της 3D εκτύπωσης, τα έσοδα και τα καθαρά κέρδη αυξήθηκαν κατά 29% και 98% αντίστοιχα μεταξύ του 2002 και του 2003 (Διάγραμμα 4). Τα έσοδα Stratasys και τα καθαρά κέρδη από τις πωλήσεις RP παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 3.



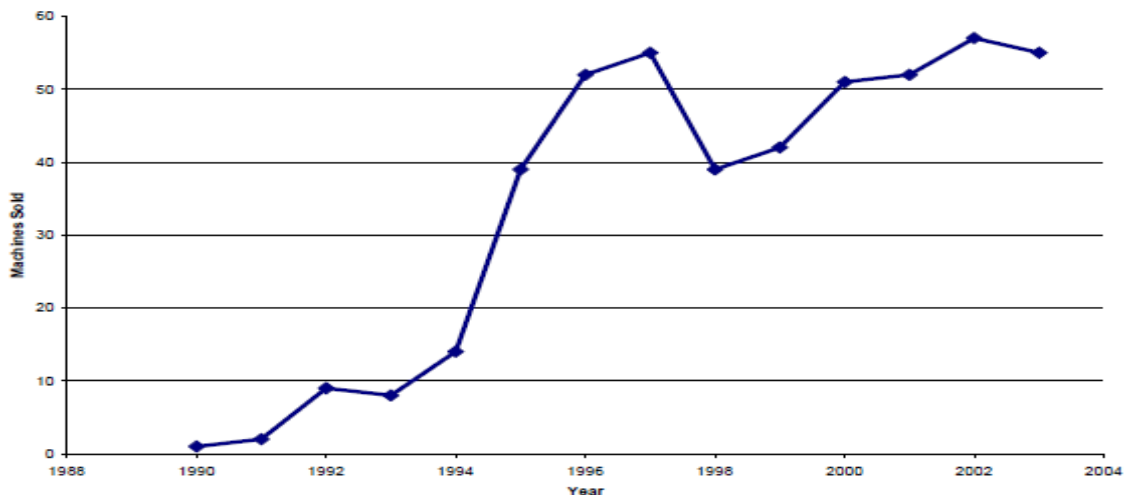
Διάγραμμα 3: Έσοδα και καθαρά έσοδα της εταιρίας Stratasys από το 2001 έως το 2003 (Πηγή: Wohlers Associates, Inc.)



Διάγραμμα 4: Επιστροφή της εταιρίας Stratasys στις πωλήσεις μεταξύ 2001 και 2004 (Πηγή: Wohlers Associates, Inc.)

4.4 EOS GmbH

Αυτή η γερμανική εταιρεία παράγει τη σειρά EOSINT, που αναφέρεται σε μια οικογένεια μηχανών τύπου Direct Sintering Metal Laser, η οποία μοιάζει με την τεχνολογία της 3D Systems. Σε αντίθεση με την 3D Systems, η τεχνολογία SLS, ωστόσο, δεν είναι δυνατόν να επεξεργάζεται θερμοπλαστικά και μέταλλα σε ένα μόνο μηχάνημα EOSINT. Αντί αυτού, η EOS προσκομίζει μηχανές που έχουν σχεδιαστεί ειδικά για να ταιριάζουν στις ανάγκες επεξεργασίας του κάθε υλικού. Για παράδειγμα, το P EOSINT επεξεργάζεται θερμοπλαστικές σκόνες, άμμο χυτηρίου κλπ. Σε γενικές γραμμές, οι μηχανές EOS έχουν την δυνατότητα κατασκευής εξαρτημάτων σε ευρεία ποικιλία από διαφορετικά υλικά όπως πολυστυρένιο, πολυαμίδιο, γυαλί γεμάτο πολυαμίδιο, άμμος χυτηρίων, μέταλλο, και θερμοπλαστικά. Η άνοδος των πωλήσεων της εταιρίας παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 10, ενώ στον Πίνακα 6, παρουσιάζεται όλη η σειρά των προϊόντων της.



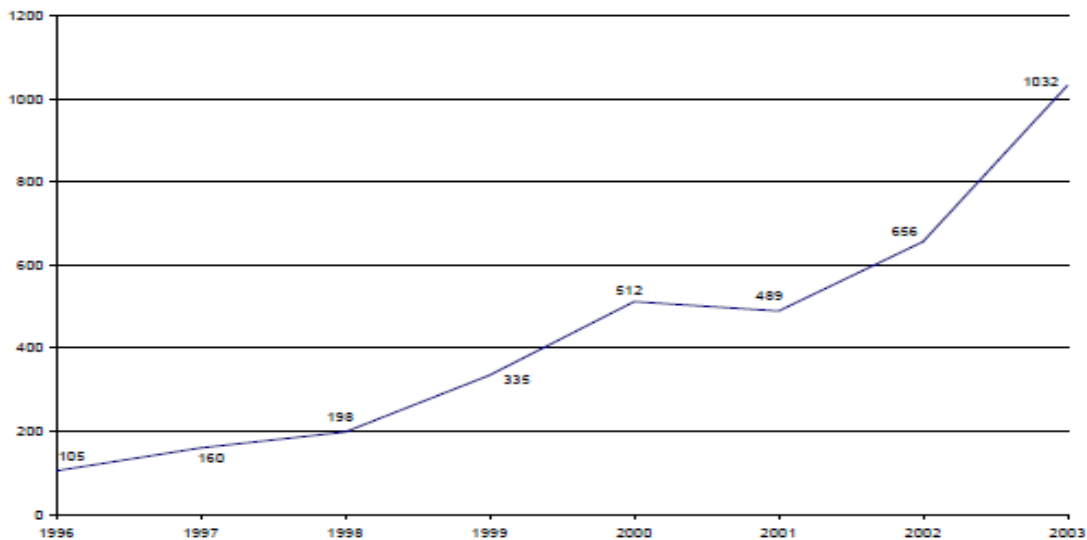
Διάγραμμα 10: Πωλήσεις Μηχανημάτων από την εταιρία EOS GmbH με την πάροδο των χρόνων. (Πηγή: Wohlers Associates, Inc.)

<i>EOS GmbH Product Line</i>			
<i>Machine Name</i>	<i>Build Envelope</i>	<i>Material</i>	<i>Price</i>
EOSINT P 380	13x13x24 in.	Polystyrene, polyamide, glass-filled and aluminum-filled polyamide powders	\$416,000-\$447,000
EOSINT P 700	28x15x23 in.	Polystyrene, polyamide, glass-filled and aluminum-filled polyamide powders	\$939,000-\$1,038,000
EOSINT M 250	10x10x6 in.	Proprietary metal powders	\$441,000
EOSINT M 270	10x10x8.5 in.	Proprietary bronze- and steel-based powders	\$441,000
EOSINT S 750	28x15x15 in.	Resin-coated sand	\$380,000-\$400,000

Πίνακας 6: Τεχνικά χαρακτηριστικά των μηχανημάτων της γραμμής παράγωγής της εταιρίας

4.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΩΛΗΣΕΩΝ RP ΜΕ ΤΟ ΠΕΡΑΣΜΑ ΤΩΝ ΧΡΟΝΩΝ

Ο αριθμός των 3D εκτυπωτών που πωλούνται σε όλο τον κόσμο έχει αυξηθεί δραματικά τα τελευταία χρόνια, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 7. Οι εκτυπωτές 3D αντιπροσωπεύουν πλέον το 30,7% του συνόλου των RP συστημάτων που έχουν εγκατασταθεί σε όλο τον κόσμο, από 25,8% που ήταν προηγούμενα έτη. Οι αναλυτές εκτιμούν ότι οι 3D Systems, Stratasys, και EOS GmbH πρόκειται να πουλήσουν 3D εκτυπωτές αξίας 37.400.000 δολαρίων τα επόμενα χρόνια. Η εκτίμηση αντιπροσωπεύει μια άνευ προηγουμένου αύξηση της τάξης του 57,3% σε σχέση με τα προηγούμενα έτη, ξεπερνώντας την αύξηση 34,2% που είχε χαρτογραφηθεί το 2002. Το Διάγραμμα 7 και ο Πίνακας 2 παρουσιάζουν τις πωλήσεις RP συστημάτων από το 1996 έως το 2003.

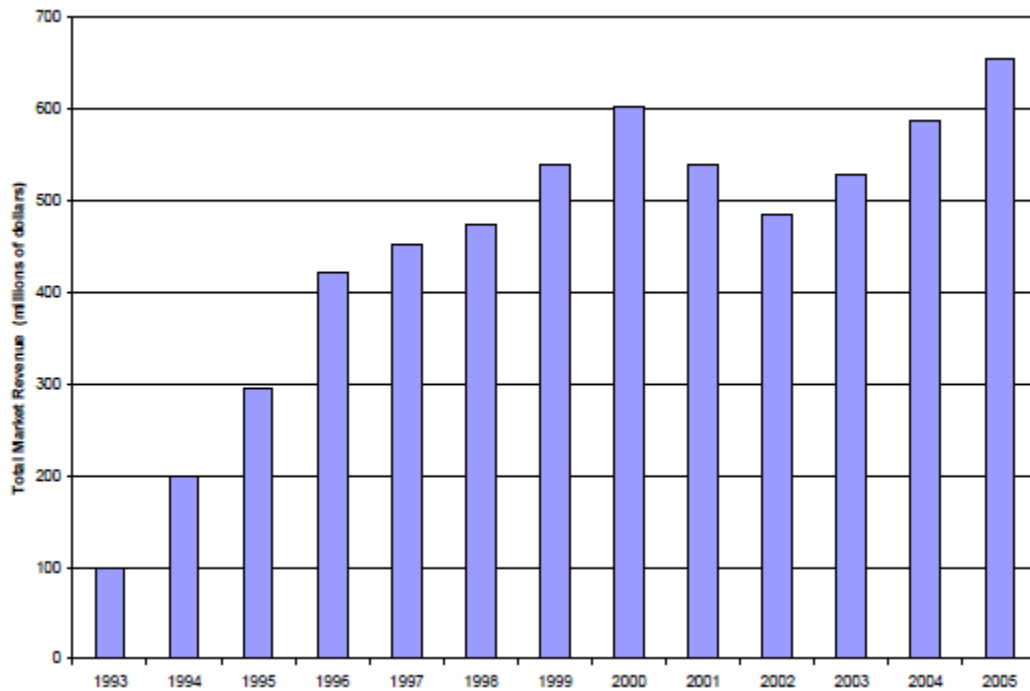


Διάγραμμα 7: Άνοδος πωλήσεων 3D Printer από το 1996 μέχρι το 2003 (Πηγή: Wohlers Associates, Inc.)

3D Printer Sales since 1996									
Company	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	Total
Stratasys	90	40	60	75	115	95	305	497	1277
Z Corp.	1	7	48	105	170	188	210	349	1078
3D Systems	14	113	90	155	227	182	88	53	922
Objet	-	-	-	-	-	24	51	94	169
Envisiontec	-	-	-	-	-	-	2	39	41
Total	105	160	198	335	512	489	656	1032	3487

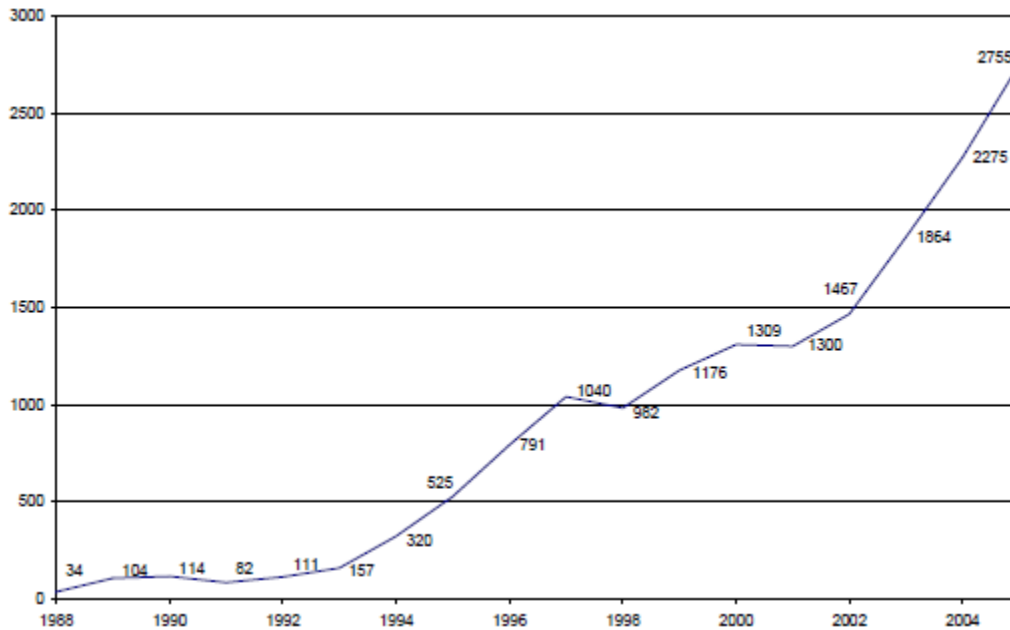
Πίνακας 2: Πωλήσεις 3D Printer με την πάροδο των χρόνων (Πηγή: Wohlers Associates, Inc.)

Συνοψίζοντας, η βιομηχανία RP, παρουσιάζεται πολλά υποσχόμενη για το μέλλον. Το 2003, η παγκόσμια αγορά για την ταχεία προτυποποίηση, που αποτελείται από προϊόντα και υπηρεσίες, αυξήθηκε κατά 9,2% (\$528.9 εκατομμύρια). Αυτό έρχεται σε έντονη αντίθεση με τη μείωση 10% στα έσοδα της βιομηχανίας (\$485.5 εκατομμύρια) το 2002 και πτώση της τάξης του 10,5% το 2001, όπως απεικονίζεται στο Διάγραμμα 8.



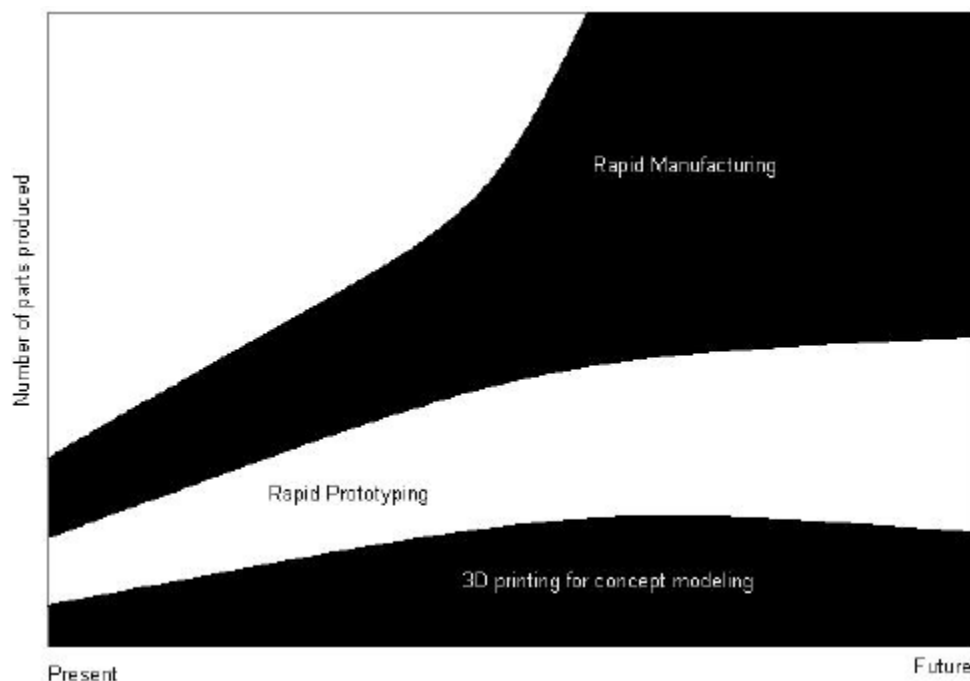
Διάγραμμα 8: Συνολικά έσοδα αγορών για την Βιομηχανία της Ταχείας Πρωτοτυποποίησης
(Πηγή: Wohlers Associates, Inc.)

Τα ετήσια έσοδα από τις πωλήσεις του προϊόντος ήταν ιδιαίτερα έντονη κατά το 2003. Αυτό το τμήμα της αγοράς αυξήθηκε κατά 15,2% (\$271.8) εκατομμύρια. Οι παγκόσμιες πωλήσεις της RP μηχανημάτων αυξήθηκαν, καθώς σε 1.864 μηχανές το 2003 (Διάγραμμα 11). Αυτό αποτελεί αύξηση της τάξης του 27,1% από τις 1.467 μονάδες που πωλήθηκαν το 2002 και συγκρίνεται ευνοϊκά με μια αύξηση 12,8% το 2002.



Διάγραμμα 11: Σύνολο πωλήσεων Μηχανών Ταχείας Πρωτοτυποποίησης από το 1985 έως το 2005. (Πηγή: Wohlers Associates, Inc.)

Τέλος, προβλέπεται ότι τα επόμενα χρόνια οι όλο και περισσότερες βιομηχανίες θα αναβαθμίσουν και θα επαναπροσδιορίσουν τις γραμμές παραγωγής τους, με την χρήση συστημάτων RP όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 12.



Διάγραμμα 12: Πρόβλεψη της χρήσης συστημάτων RP, από τις βιομηχανίες στο μέλλον.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5.1 ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΤΟ «PRUSA MENDEL LM8UU» ;

Το PRUSA MENDEL LM8UU ανήκει στην κατηγορία των RepRap. Οι RepRap μηχανές είναι τρισδιάστατοι εκτυπωτές γραφείου (Desktop 3D Printers), οι όποιοι είναι ικανοί να δημιουργούν αντικείμενα τριών διαστάσεων σχεδιασμένα από Η/Υ. Το RepRap δημιουργήθηκε από μια ομάδα μηχανικών από όλη την Ευρώπη, με επικεφαλής τον Adrian Bowyer που είχε ως στόχο την δημιουργία ενός project ελεύθερο στο κοινό, για την κατασκευή πλαστικών αντικειμένων. Το Prusa Mendel πήρε το όνομά του από τον δημιουργό του Josef Prusa ο οποίος βασιζόμενος στο project του Bowyer κατασκεύασε και εξέλιξε την μηχανή Prusa Mendel LM8UU.

Είναι μια μηχανή ταχείας πρωτοτυποποίησης η οποία ανήκει στην κατηγορία των F.F.F. (F.D.M.) μηχανών. Έχει την δυνατότητα κατασκευής μικρών αντικειμένων, μεγάλης ακρίβειας, σχεδιασμένα σε ψηφιακά αρχεία C.A.D. Ως πρώτη ύλη, χρησιμοποιεί πλαστικό νήμα (ABS ή PLA) το οποίο τίκτεται σε κατάλληλη θερμοκρασία, με σκοπό την κατασκευή του επιθυμητού αντικειμένου. Αποτελείται από το κύριο σώμα, που πάνω σε αυτό, βρίσκονται οι βηματικοί κινητήρες οι οποίοι εκτελούν τις κινήσεις των τεσσάρων αξόνων (X,Y,Z,E). Η τράπεζα μαζί με την θερμαινόμενη πλάκα (heatbed), αποτελούν την περιοχή εκτύπωσης και καθορίζουν το μέγιστο μέγεθός τις. Επιπλέον στο κύριο σώμα, είναι τοποθετημένο το εργαλειοφορείο της μηχανής, το οποίο φέρει πάνω του το θερμαινόμενο ακροφύσιο (hotend), καθώς και τον μηχανισμό εξώθησης του πλαστικού (extruder). Η μετάδοση κίνησης, από τις βηματικούς κινητήρες γίνεται με διάταξη κοχλία-περικόχλιο για τον άξονα Z, ενώ για του άξονες X και Y χρησιμοποιείται οδοντωτός ιμάντας σε συνεργασία με οδοντωτό τροχό. Η κίνηση αυτή μεταφέρεται πάνω σε λείους άξονες (γλίστρες) οι οποίοι λειτουργούν σαν οδηγοί για την τράπεζα και το εργαλειοφορείο. Η πλακέτα αριθμητικού ελέγχου (NC), ελέγχει τους βηματικούς κινητήρες, με την χρήση εντολών (κώδικας G και M) τις οποίες μπορούμε να εισάγουμε μέσω κάρτας μνήμης ή του control panel είτε μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή. [2]

5.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ

Το Prusa Mendel αποτελείται από 4 βασικά κομμάτια:

- Κύριο σώμα
- Τράπεζα
- Εργαλειοφορείο
- Πλακέτα αριθμητικού ελέγχου και ηλεκτρονικά μέρη

Τα οποία θα τα αναλύονται περαιτέρω με σκοπό να εξηγήσουμε τις βασικές τους λειτουργίες, καθώς και τα εξαρτήματα που τα αποτελούν.

Κύριο σώμα

Το κύριο σώμα χρησιμεύει για την στήριξη όλων των εξαρτημάτων τράπεζα, εργαλειοφορείο και ηλεκτρονικά μέρη. Αποτελείται από χαλύβδινες ντίζες, και με ειδικά σχεδιασμένες πλαστικές ενώσεις, δημιουργούν τον σκελετό της μηχανής. Η στιβαρότητά της κατασκευής εξαρτάται από την επιλογή της διαμέτρου που έχουν οι ντίζες και από την πυκνότητα πλήρωσης των εκτυπωμένων πλαστικών ενώσεων.

Στο κύριο σώμα βρίσκονται:

- Δυο βάσεις για την τοποθέτηση βηματικών κινητήρων, οι οποίες βρίσκονται στο επάνω μέρος της μηχανής, συγκρατούν τα ηλεκτρονικά μοτέρ σε 4 σημεία με κοχλίες, και χρησιμεύουν για την κίνηση του άξονα Z. Ακόμη έχουμε μια βάση η οποία βρίσκεται στο κάτω-εμπρός μέρος του κύριου σώματος, και συγκρατεί το μοτέρ του άξονα Y σε 3 σημεία. Στο πίσω μέρος, απέναντι από την βάση στήριξης, υπάρχει η τροχαλία καθοδήγησης του ιμάντα που κινεί , την πλατφόρμα της τράπεζας στις γλίστρες.
- Η κίνηση του άξονα X, γίνεται πάνω σε μια πλατφόρμα που προσαρμόζεται με ειδικές βάσεις, στο κύριο σώμα. Αποτελείται από τις γλίστρες του εργαλειοφορείου, καθώς και το εργαλειοφορείο. Στην αριστερή πλευρά της πλατφόρμας, έχουμε την βάση του βηματικού κινητήρα η οποία τον συγκρατεί

σε 3 σημεία ενώ στην δεξιά πλευρά υπάρχει η τροχαλία η οποία καθοδηγεί τον ιμάντα και μεταφέρει την κίνηση.

- Στις ράβδους που βρίσκονται στο επάνω μέρος του σκελετού, έχει τοποθετηθεί ο οδηγός για το υλικό κατεργασίας. Αυτός βοηθάει στην ομαλή τροφοδοσία με υλικό, σε όποια κίνηση και να κάνει η μηχανή, καθ' όλη την διάρκεια εκτύπωσης.

Ο τρόπος συγκράτησης όλων των πλαστικών εξαρτημάτων, είναι της μορφής περικόχλιο-ροδέλα-πλαστικές ενώσεις-ροδέλα-περικόχλιο.

Τράπεζα

Η πλατφόρμα της τράπεζας, προσαρμόζεται πάνω στο κύριο σώμα, με την χρήση ειδικών πλαστικών βάσεων, που συγκρατούν τις γλίστρες και πάνω σε αυτές γίνεται η κίνηση στον άξονα Υ. Αποτελείται από:

- Μια γυάλινη επιφάνεια, η οποία αποτελεί τον χώρο εκτύπωσης της μηχανής. Εξυπηρετεί στην επιπεδότητα της τράπεζας, στην ομοιόμορφη επαγωγή της θερμότητας, και τέλος κατά την ολοκλήρωση της διαδικασίας εκτύπωσης, η αποκόλληση του κομματιού γίνεται ευκολότερη.
- Την θερμαινόμενη πλάκα (heated bed) η οποία, καθορίζει τον μέγιστο χώρο εκτύπωσης. Αποτελείται από μια αντίσταση την οποία η μηχανή τροφοδοτεί με ρεύμα και την ελέγχει με την χρήση ενός αισθητήρα θερμοκρασίας ο οποίος είναι τοποθετημένος στο κέντρο της πλάκας. Ο σκοπός του heated bed είναι ο έλεγχος της θερμοκρασίας του κομματιού και η αποφυγή της απότομης μεταβολής της θερμοκρασίας του. Αυτό βελτιώνει κατά πολύ την ποιότητα του αντικειμένου καθώς το λιωμένο πλαστικό ψύχεται από τον αέρα και συστέλλεται. Όταν η συστολή δεν γίνεται ομοιόμορφα σε όλο το κομμάτι, το αποτέλεσμα είναι ένα αλλοιωμένο προϊόν, κακής ποιότητας επιφάνειας και μη σωστή ένωση των στρωμάτων (layers). Το φαινόμενο αυτό της αλλοίωσης είναι πιο έντονο στις γωνίες, όπου τις παρατηρούμε να σηκώνονται από την τράπεζα εκτύπωσης. Η θερμαινόμενη πλατφόρμα επιτρέπει στο εκτυπωμένο προϊόν να παραμένει ζεστό καθ' όλη την διαδικασία εκτύπωσης κάνοντας στο τέλος την συστολή του κομματιού ομοιόμορφη.

- Το σύστημα ρύθμισης της ευθυγράμμισης, είναι μια διάταξη κοχλιών και ελατήριων οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στις 4 γωνίες του heated bed. Η χρήση τους είναι να ρυθμίζουμε το ύψος της εκάστου γωνίας με σκοπό την απόλυτη επιπεδότητα του τραπεζιού έτσι ώστε το πρώτο layer να έχει το επιθυμητό πάχος. Η ρύθμιση αυτή γίνεται, βιδώνοντας η ξεβιδώνοντας τον εκάστοτε κοχλία αλλάζοντας έτσι το ύψος της αντίστοιχης γωνίας.
- Τέλος έχουμε μια επιφάνεια που εξυπηρετεί στην συγκράτηση των παραπάνω και την προσαρμογή του τραπεζιού στις γλίστρες. Πάνω σε αυτή βρίσκονται οι βάσεις συγκράτησης του ιμάντα για την μεταφορά της κίνησης, ο τανυστήρας του ιμάντα καθώς και οι βάσεις ενώσεις της πλατφόρμας στις γλίστρες. Επιπλέον συγκρατεί το heated bed με το σύστημα ρύθμισης ευθυγράμμισης και την γυάλινη επιφάνεια.

Εργαλειοφορείο

Το εργαλειοφορείο είναι τοποθετημένο πάνω στην πλατφόρμα του άξονα X και φέρει πάνω του τα εργαλεία που χρησιμεύουν για την εκτύπωση του αντικειμένου. Αυτά αναλύονται σε:

- Ο extruder είναι ο μηχανισμός με τον οποίο γίνεται η τροφοδοσία της μηχανής με το υλικό κατεργασίας. Η συναρμολόγησή του αποτελείται από έναν βηματικό κινητήρα, μια διάταξης οδοντωτών τροχών, και έναν κοχλία που διαθέτει οδόντωση όπου λειτουργεί σαν αρπάγη. Ανάλογα με τους ηλεκτρονικούς παλμούς που στέλνονται στον βηματικό κινητήρα περιστρέφονται οι οδοντωτοί τροχοί και ο κοχλίας με σκοπό να ωθήσει με συγκεκριμένο βήμα το υλικό κατεργασίας στη θερμαινόμενη κεφαλή εκτύπωσης (hotend).
- Το hot-end, τοποθετείτε στην απόληξη του extruder, και τροφοδοτείται από αυτόν. Καθώς το υλικό εισέρχεται στο hot-end αυτό τήκεται και εξέρχεται σε μορφή νήματος. Έχει σαν βάση ένα ακροφύσιο (nozzle) φτιαγμένο από ορείχαλκο ή αλουμίνιο ώστε να έχει καλή επαγωγή θερμότητας. Συνήθως, χρησιμοποιείται συνδεσμολογία κεραμικών αντιστάσεων μεγάλης ισχύος ή μερικές φορές καλώδιο από nichrome που, είναι ένα μη μαγνητικό κράμα,

νικελίου, χρωμίου και μερικές φορές σιδήρου. Η διάταξη αυτή, επιτρέπει στο hot-end να φτάνει στη θερμοκρασία τήξης του υλικού κατεργασίας, η οποία κυμαίνεται από 185 °C μέχρι 240 °C ανάλογα με το υλικό. Πάνω από οποιαδήποτε εστία θέρμανσης, τοποθετείται μόνωση που είναι είτε μια ειδική ταινία, είτε μια επικάλυψη από ένα κεραμικό υλικό υγρής μορφής καθώς μετά την θέρμανση του στερεοποιείται και λειτουργεί σαν μονωτής. Για τον έλεγχο της θερμοκρασίας χρησιμοποιούμε έναν αισθητήρα που βρίσκεται πάνω στο μεταλλικό περίβλημα και μέσω του αλγορίθμου της μηχανής γνωρίζουμε την θερμοκρασία του οποιαδήποτε χρονική στιγμή.

- Δίπλα στην κεφαλή του hot-end είναι τοποθετημένος ένας ανεμιστήρας. Αυτό εξυπηρετεί στην άμεση ψύξη του υλικού κατεργασίας που εξέρχεται, για την κατασκευή ιδιόμορφων επιφανειών. Ο έλεγχος της λειτουργίας του γίνεται αυτόματα από τον αλγόριθμο της μηχανής μέσω του προγράμματος C.A.M. όπου αυτό το κρίνει απαραίτητο. Η κατασκευή γεφυρών χωρίς ενδιάμεσες βάσεις στήριξης και χωρίς την χρήση ανεμιστήρα δεν θα ήταν δυνατή, καθώς το νήμα εξέρχεται σε υψηλές θερμοκρασίες και δεν μπορεί να σταθεροποιηθεί άμεσα. Έτσι, αυτό που επιτυγχάνεται με την χρήση του ανεμιστήρα, είναι η άμεση κατασκευή γεφυρών μεγάλου μήκους, χωρίς την αλλοίωση του αποτελέσματος.

Πλακέτα αριθμητικού ελέγχου και ηλεκτρονικά μέρη.

Η πλακέτα αριθμητικού ελέγχου, μαζί με τα ηλεκτρονικά μέρη, αποτελεί τον εγκέφαλο και τα αισθητήρια όργανα της μηχανής. Οποιαδήποτε λειτουργία κάνει, ορίζεται μέσω του κώδικα G και M, τον οποίο μετατρέπει, σε κινήσεις των αξόνων και σε λειτουργίες των εξαρτημάτων. Η σύνδεση τους, με τους νηματικούς κινητήρες, τους διακόπτες ορίων (end-stops), τους αισθητήρες θερμοκρασίας και τα θερμαινόμενα μέρη, μας δίνουν όλες τις απαραίτητες πληροφορίες που χρειαζόμαστε για την ασφαλή λειτουργία της μηχανής. Η διάταξη των πλακετών αποτελείται από ένα Arduino και μια πλακέτα RAMPS, οι οποίες συνδέονται με καλώδιο USB στον Ηλεκτρονικό Υπολογιστή. Με την χρήση προγραμμάτων C.A.D/C.A.M. παίρνουν τα δεδομένα και καθορίζουν την λειτουργία της. Οι ηλεκτρονικές πλακέτες ελέγχουν την διεργασία της εκτύπωσης και οι βασικές λειτουργίες τους είναι:

- Επεξεργασία των πληροφοριών του κώδικα G και M.

Ο κώδικας αυτός, είναι η γλωσσά επικοινωνίας του χρηστή με όλες τις εργαλειομηχανές C.N.C. Συντάσσεται είτε χειροκίνητα είτε αυτόματα μέσω του προγράμματος C.A.M. και οι πλακέτες μετατρέπουν τις εντολές του, σε κινήσεις και λειτουργίες της μηχανής.

- Οδήγηση των βηματικών κινητήρων

Η οδήγηση των βηματικών κινητήρων, επιτυγχάνεται μέσω ηλεκτρονικών οδηγών, που είναι τοποθετημένοι πάνω στην RAMPS, και μετατραπούν τις εντολές, σε παλμούς ρεύματος για την κίνηση τους.

- Έλεγχος της θερμοκρασίας του hot-end και του heated bed.

Ο έλεγχος επιτυγχάνεται μέσω της ύπαρξης αισθητήρων, οι οποίοι στέλνουν τα δεδομένα για την θερμοκρασία στην πλακέτα αριθμητικού έλεγχου και αυτή μας εμφανίζει μέσα στο γραφικό περιβάλλον του Υπολογιστή, και στον controller την θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου (°C).

- Έλεγχος των end-stops (όρια μηχανής)

Τα end-stops είναι διακόπτες είτε μαγνητικοί, είτε απλοί και καθορίζουν την μέγιστη διαδρομή της κάθε πλατφόρμας. Είναι τοποθετημένοι στα άκρα των αξόνων, και στέλνουν τα δεδομένα στην πλακέτα αριθμητικού έλεγχου, και προστατεύοντας έτσι τα κινούμενα από τυχόν χτυπήματα στα άκρα.

- Έλεγχος λειτουργίας του ανεμιστήρα.

Το Arduino Mega 2560 είναι ένας μικροελεγκτής με βάση το κύκλωμα ATmega2560. Διαθέτει 54 ψηφιακούς ακροδέκτες εισόδου / εξόδου (εκ των οποίων 14 μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εξόδοι PWM), 16 αναλογικές εισόδους, 4 UARTs (σειριακές θύρες), ένα 16 MHz κρύσταλλο, μια σύνδεση USB, μια υποδοχή για τροφοδοσία

ρεύματος και ένα κουμπί επαναφοράς (RESET). Συνδέεται σε έναν υπολογιστή με ένα καλώδιο USB ή με τροφοδοτικό ή μπαταρία για ξεκινήσει η λειτουργία του.

Το RepRap Arduino Mega Pololu Shield ή εν συντομία RAMPS είναι μια ηλεκτρονική πλακέτα σχεδιασμένη να διαθέτει όλα τα απαραίτητα εξαρτήματα για την λειτουργία μιας μηχανής RepRap (προτυποποίησης). Το RAMPS συνδέεται με την πλατφόρμα Arduino και έχει χώρο για αρκετές επεκτάσεις. Η διάταξή του περιλαμβάνει βύσματα για οδηγούς βηματικών κινητήρων και ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου τα οποία είναι εύκολα στην λειτουργία από ένα Arduino και έχουν την δυνατότητα αναβάθμισης όπως κάρτα μνήμης SD, Bluetooth, οθόνη ενδείξεων και άλλα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ

Για την κατασκευή του 3d Printer Prusa Mendel LM8UU θα χρειαστούμε τα εξής εξαρτήματα που αναγράφονται στον πίνακα εξαρτημάτων.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ

α/α	ΠΟΣΟΤΗΤΑ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΤΥΠΟΣ
1	100	M8 ΠΕΡΙΚΟΧΛΙΟ	Fastener
2	100	M8 ΡΟΔΕΛΑ	Fastener
3	2	M4 X20 ΚΟΧΛΙΑΣ	Fastener
4	2	M4 ΠΕΡΙΚΟΧΛΙΟ	Fastener
5	2	M4 ΡΟΔΕΛΑ	Fastener
6	22	M3X10 ΚΟΧΛΙΑΣ	Fastener
7	16	M3X25 ΚΟΧΛΙΑΣ	Fastener
8	4	M3X40 ΚΟΧΛΙΑΣ	Fastener
9	70	M3 ΡΟΔΕΛΑ	Fastener
10	40	M3 ΠΕΡΙΚΟΧΛΙΟ	Fastener
11	2	M3 ΚΟΧΛΙΕΣ	Fastener
12	3	608 ZZ	Bearing
13	4	ΕΛΑΤΗΡΙΑ	Spring
14	6	M8X370	Threaded rod
15	4	M8X294	Threaded rod
16	3	M8X440	Threaded rod
17	2	M8X210	Threaded rod
18	1	M8X50	Threaded rod
19	2	8X420	Smooth rod
20	2	8X406	Smooth rod
21	2	8X350	Smooth rod
22	1	220X220X60	Thick Sheet
23	1	840X5	Belt
24	1	1380X5	Belt
25	50	ZIPTIE	Fastener

Επιπλέον θα χρειαστούμε το σετ των πλαστικών εξαρτημάτων που φαίνονται στο Σχήμα 21.

Ποσότητα	Ονομασία	Εικόνα
8	bar-clamp	
3	bearing-guide	
4	belt-clamp	
4	belt-clamp-nut-holder	
2	coupling	
3	endstop-holder	
2	frame-vertex	
4	frame-vertex-foot	
2	rod-clamp	
1	x-carriage	
1	x-end-idler	
1	x-end-motor	
1	ybrac-t	
3	y-bushing	
2	z-motor-mount	

Σχήμα 21: Επεξήγηση Πλαστικών Μερών Μηχανής.

6.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ PRUSA MENDEL LM8UU

- **Βήμα 1°**

Οι χαλύβδινες ράβδοι που προμηθευτήκαμε είχαν διαθέσιμα μήκη του 1m, οπότε έπρεπε να κοπούν στο επιθυμητό μέγεθος (Σχήμα 22). Τα επιθυμητά μεγέθη που χρειαζόμαστε είναι:

Χαλύβδινες Ντιζες: 6*M8X370mm, 4*M8X294mm, 3*M8X440mm, 2*M8X210mm, 1*M8X50mm

Λείες Ράβδοι: 2*8mmX420mm, 2*8mmX406mm, 2*8mmX350mm



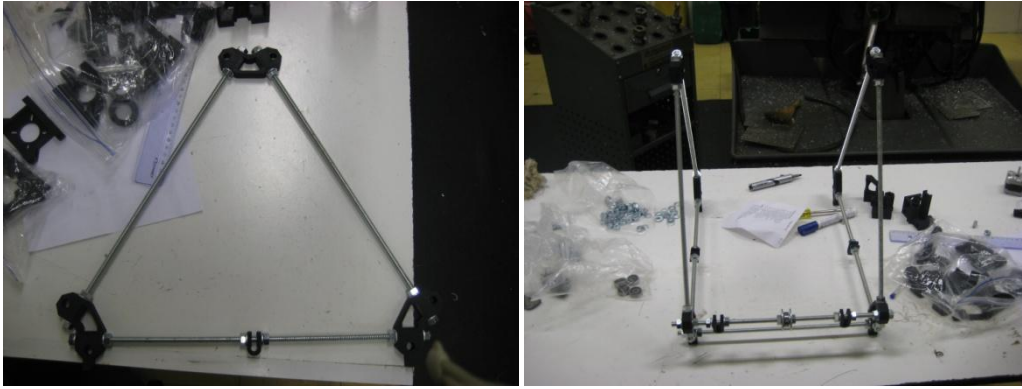
Σχήμα 22: Κοπή ράβδων στο εργαστήριο του C.N.C.

Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι: Σιδεροπρίονο, Μέγγενη, Παχύμετρο.

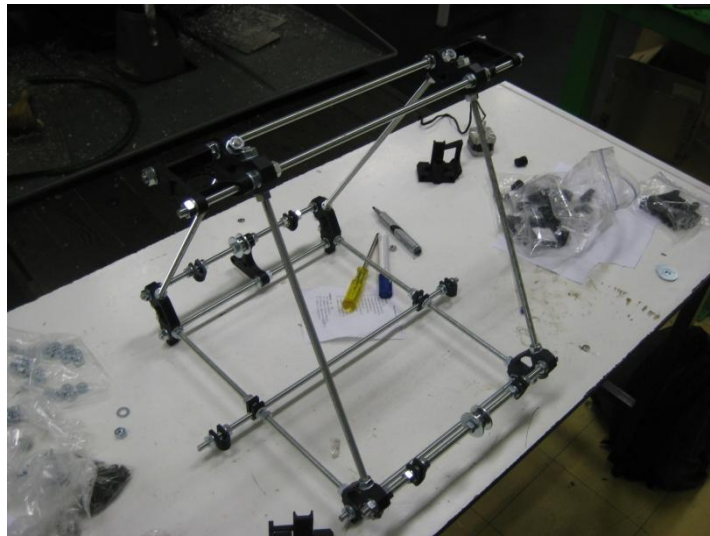
- **Βήμα 2°**

Αφού κόψαμε τις ράβδους στα επιθυμητά μήκη, ξεκινάμε την διαδικασία συναρμολόγησης του σκελετού της μηχανής. Χρησιμοποιώντας τις ράβδους M8X370mm, με τις πλαστικές ενώσεις Frame Vertex With Foot και Frame Vertex δημιουργούμε τα 2 βασικά τρίγωνα του σκελετού (Σχήμα 23).

Στην συνέχεια, με τις ράβδους M8X294mm ενώνουμε τα 2 τρίγωνα, αφού πρώτα έχουμε τοποθετήσει τα πλαστικά μέρη Bar Clamp, Y Motor Bracket και τα έδρανα κύλισης 608ZZ, στις κατάλληλες θέσεις (Σχήμα 24).



Σχήμα 22: Συναρμολόγηση Τριγώνων



Σχήμα 23: Συναρμολόγηση Σκελετού Μηχανής

- **Βήμα 3^ο**

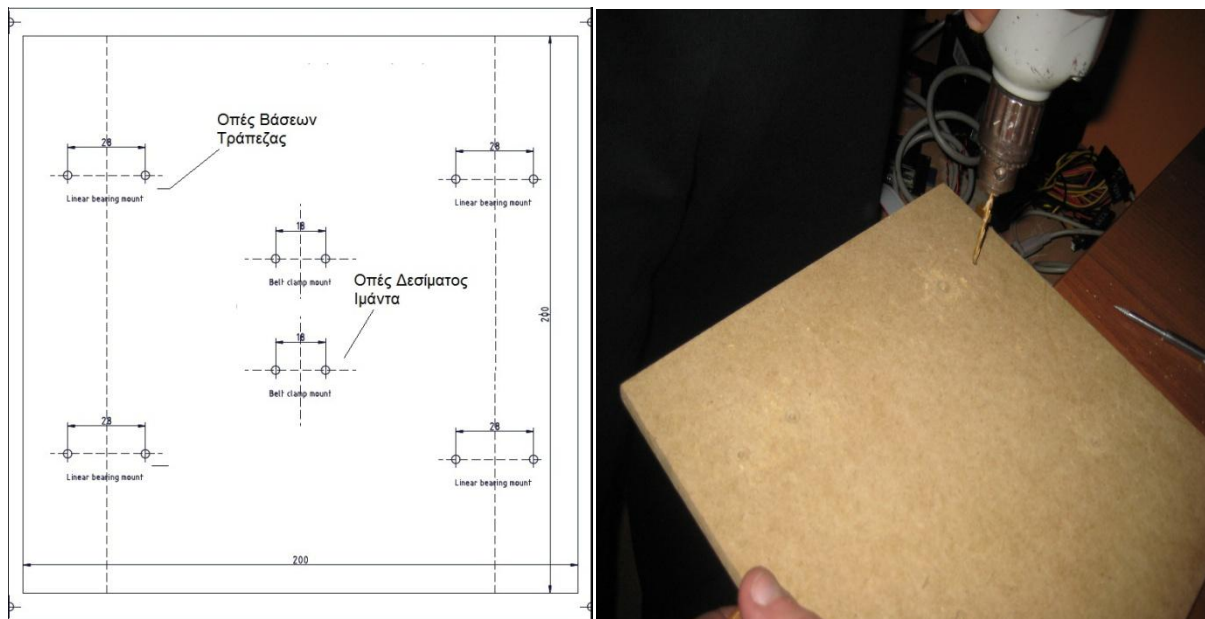
Για την κατασκευή της πλατφόρμας του άξονα X χρησιμοποιούμε τις λείες ράβδους 8mm×420mm, σε συνεργασία με τα πλαστικά μέρη End Motor, PLA Bushings και End Idler. Στο End Idler βάζουμε τον κοχλία M8X50mm, τοποθετώντας τον μαζί με το ένα από τα έδρανα κύλισης στην κατάλληλη θέση (Σχήμα 24).



Σχήμα 24: Τοποθετημένη Πλατφόρμα Χ

- Βήμα 4^ο

Η πλατφόρμα Υ τοποθετείτε πάνω στις λείες ράβδους 8mm×350mm με τις κατάλληλες βάσεις, Στο τραπέζι από MDF ανοίγονται οπές 3mm σημεία οπου δείχνει το Σχήμα 25.

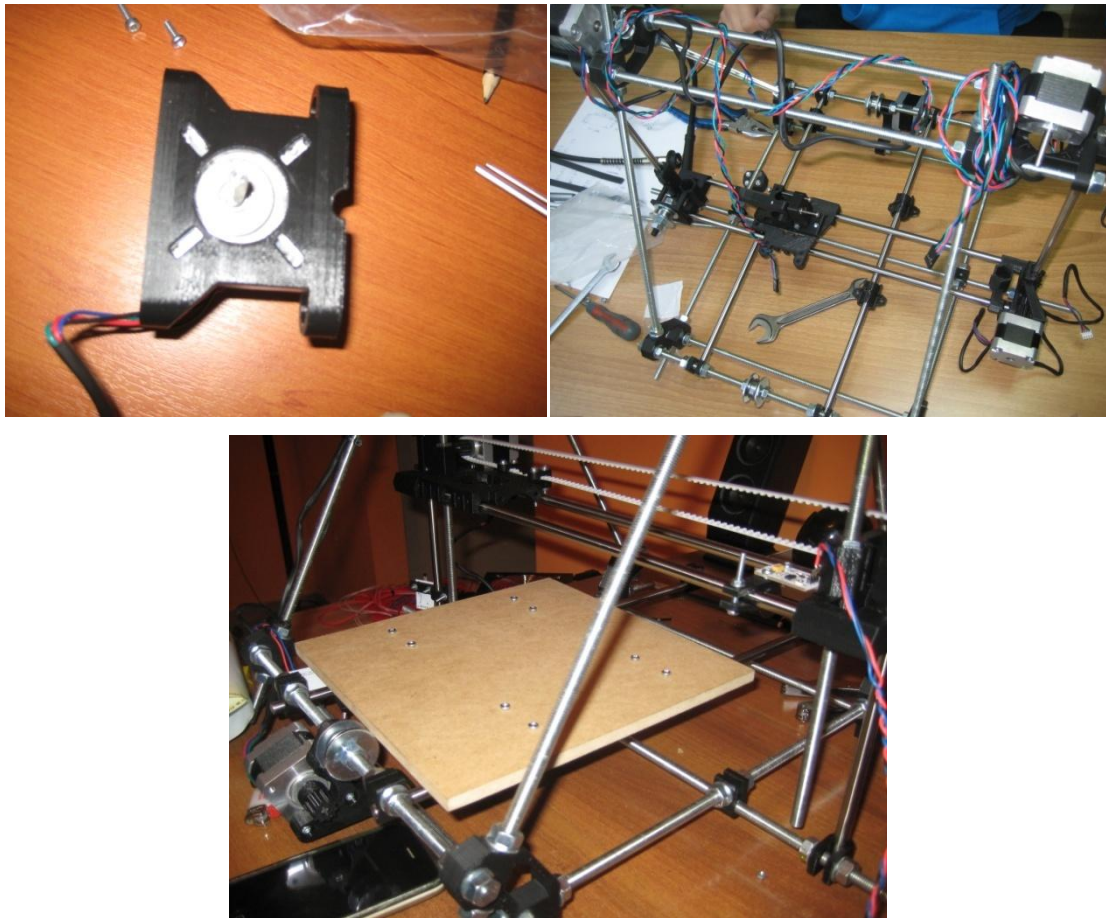


Σχήμα 25: Κάτοψη Τραπεζιού και διάνοιξη οπών

- **Βήμα 5°**

Οι βηματικοί κινητήρες, δένονται με τις βίδες M3 σε 3 σημεία, στις βάσεις τους. Στις ατράκτους των βηματικών, προσαρμόζονται οι τροχαλίες, για την μετάδοση της κίνησης στους άξονες X και Y. Ο οδοντωτός ιμάντας τύπου T5, δένεται στο ένα του άκρο στην βάση στήριξης, περνάει από τα 2 έδρανα κυλίσεως που βρίσκονται στο κάτω μέρος του σκελετού, και στην συνέχεια δένεται ξανά στο τραπέζι, αφού πρώτα τανυστεί με την κατάλληλη δύναμη. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τον άξονα X, με την μόνη διαφορά ότι ο ιμάντας δένεται στο εργαλειοφορείο.

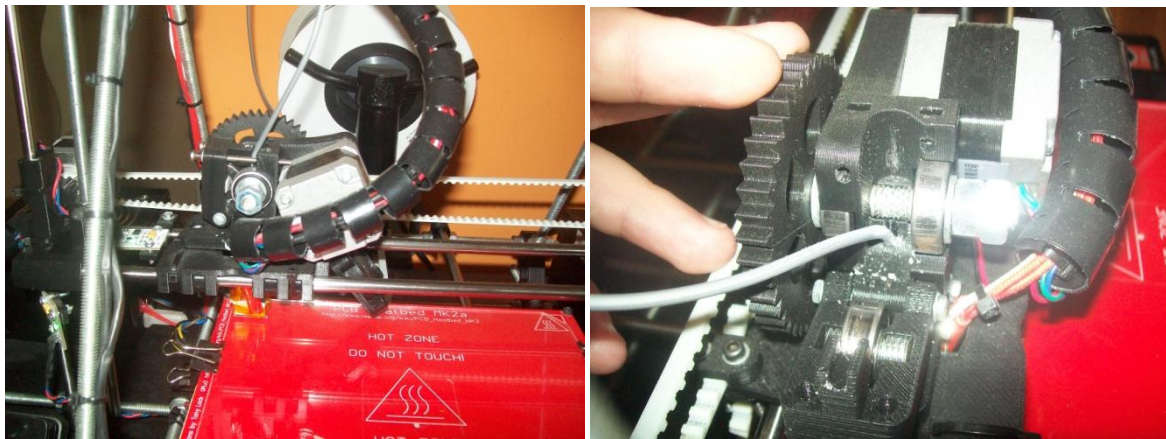
Για την κίνηση του άξονα Z από την άλλη, χρησιμοποιούνται χαλύβδινες ντίτζες M8×210mm οι οποίες βιδώνονται στα περικόχλια M8 που είναι τοποθετημένα στα 2 άκρα της πλατφόρμας X στις κατάλληλες θέσεις. Οι ράβδοι ενώνονται με τις ατράκτους των βηματικών με τις πλαστικές ενώσεις Coupling, οι οποίες συγκρατούν την άτρακτο με κοχλίες και περικόχλια M3. Παράλληλα με τις ράβδους μετάδοσης κίνησης του άξονα Z τοποθετούνται λείες ράβδοι 8mm×406mm (Σχήμα 26).



Σχήμα 26: Συναρμολογημένες βάσεις και Τραπέζι μηχανής.

- **Βήμα 6°**

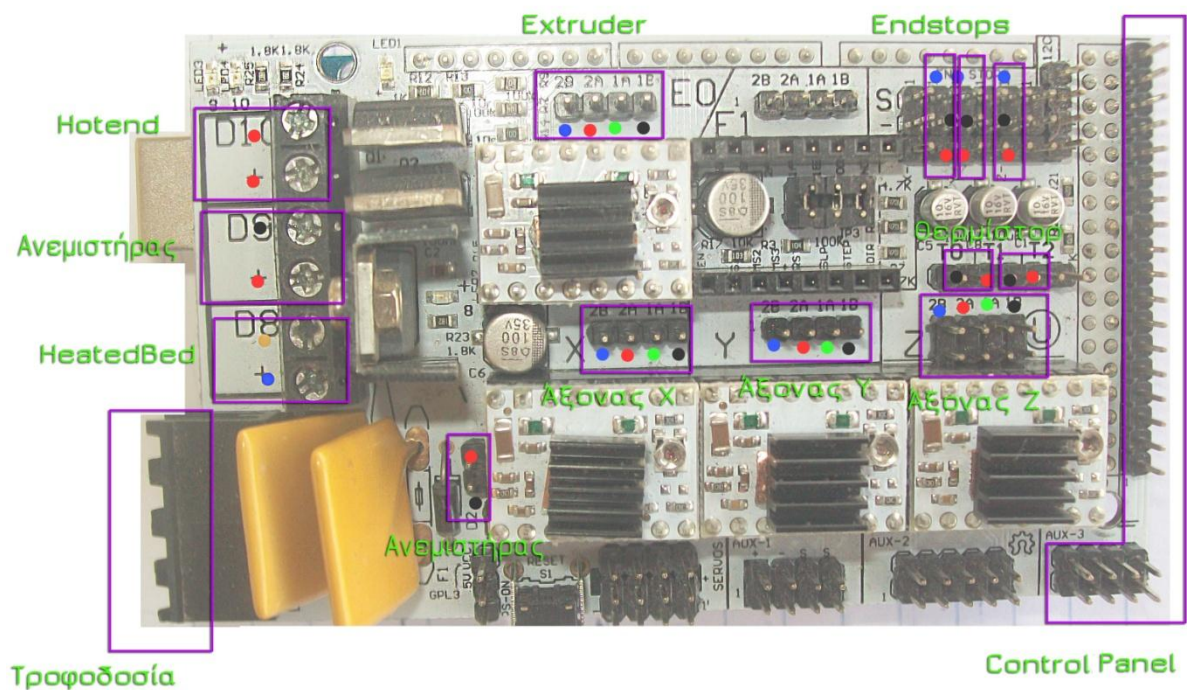
Στον extruder τοποθετείται ο τελευταίος βηματικός κινητήρας, όποιος συγκρατείται σε 3 σημεία με κοχλίες M3, και στην άτρακτο του τοποθετείται ο οδοντωτός τροχός μετάδοσης κίνησης ο οποίος συγκρατείται επίσης με κοχλία M3. Στο κύριο σώμα του extruder, τοποθετούνται 2 έδρανα κύλισης τα οποία συγκρατούν ένα κοχλία M8 όποιος φέρει οδόντωση για την ομαλή τροφοδοσία της μηχανής (Σχήμα 27). Στην κεφαλή του κοχλία, τοποθετείται ο μεγαλύτερος οδοντωτός τροχός πραγματοποιώντας έτσι μια σχέση μετάδοσης 43:10, και στο κάτω μέρος του extruder, τοποθετείται το Hotend, το οποίο συγκρατείτε με 2 κοχλίες M3 στο επάνω μέρος.



Σχήμα 27: Συναρμολογημένος Extruder.

- **Βήμα 7°**

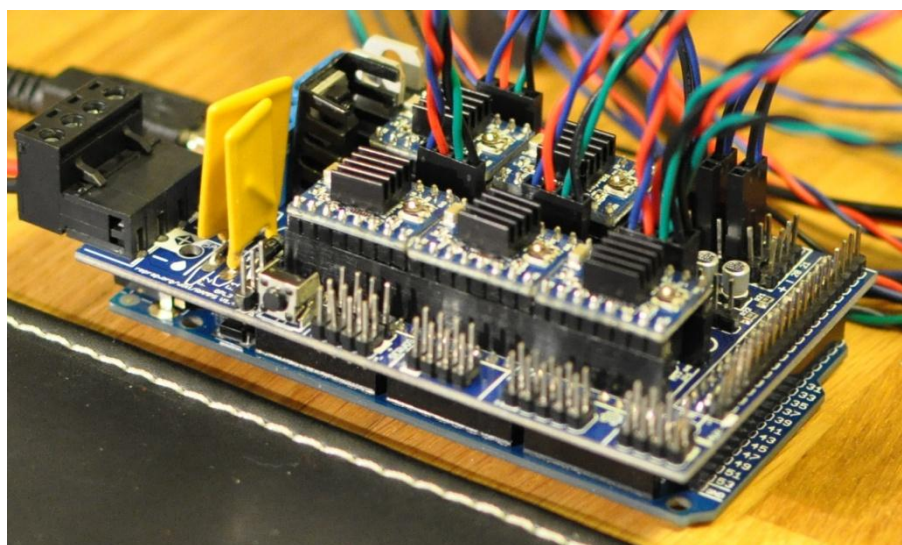
Για την ολοκλήρωση της κατασκευής της μηχανής, εφόσον όλα τα μηχανικά μέρη είναι τοποθετημένα, συνδέουμε στην πλακέτα RAMPS1.4 της συνδέσεις για τους βηματικούς κινητήρες, το Hotend, το heated bed, τα end stops, τα θερμίστορ, το Control Panel, τον ανεμιστήρα ψύξης της πλακέτας και τέλος τον ανεμιστήρα ψύξης του εκτυπωμένου κομματιού. Όλες οι συνδέσεις γίνονται με βάση το παρακάτω σχεδιάγραμμα (Σχήμα 28).



Σχήμα 28: Συνδεσμολογία RAMPS 1.4

- Βήμα 8°

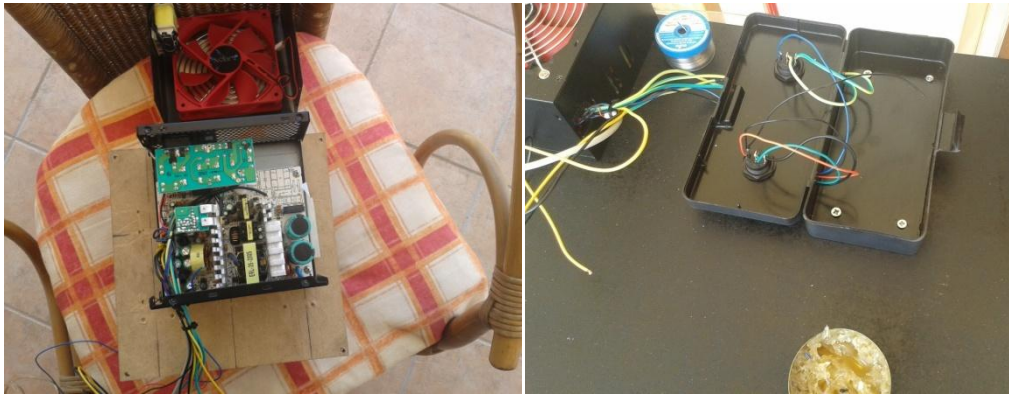
Η πλακέτα RAMPS συνδέεται πάνω στο Arduino , το οποίο δέχεται όλες τις εντολές και στην συνέχεια οι έξοδοί του χειρίζονται με κατάλληλο τρόπο όλα τα ηλεκτρονικά μέρη της μηχανής (Σχήμα 29).



Σχήμα 29: Ηλεκτρονικές πλακέτες RAMPS – Arduino.

- **Βήμα 9°**

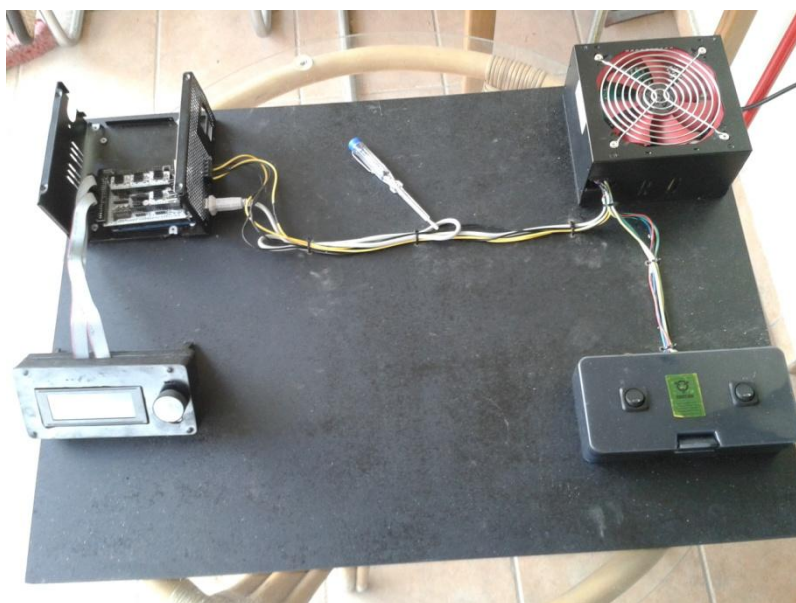
Για την τροφοδοσία των πλακετών, χρησιμοποιούμε το τροφοδοτικό TURBO-X PSU. Από το τροφοδοτικό αυτό, εξέρχονται 2 διακόπτες. Ο πρώτος παρέχει ρεύμα στο προδοτικό, και ο δεύτερος θέτει σε λειτουργία την μηχανή. Από την πλακέτα του τροφοδοτικού, κολλήθηκαν οι απαραίτητοι έξοδοι για την τροφοδοσία των πλακετών (Σχήμα 30).



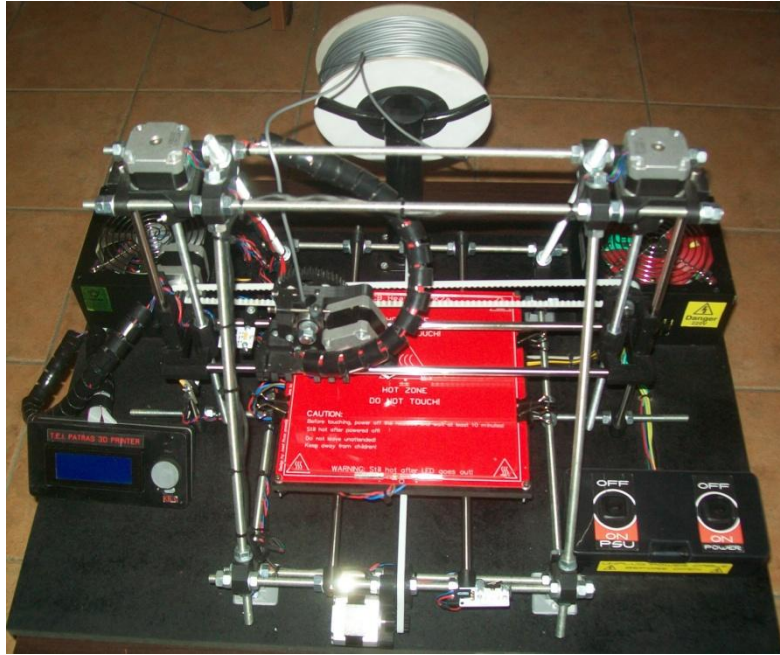
Σχήμα 30: Επεξεργασία τροφοδοτικού.

- **Βήμα 10°**

Με την ολοκλήρωση προσαρμογής του τροφοδοτικού, την τοποθέτηση του Control Panel σε ειδική θήκη και την τοποθέτηση των πλακετών σε ειδικά διαμορφωμένο κουτί για την αποτελεσματική ψύξη τους, θα τοποθετηθούν σε μια βάση από MDF διαστάσεων 50X70 cm για την σωστή συγκράτησή τους με την μηχανή (Σχήμα 31).



(α)

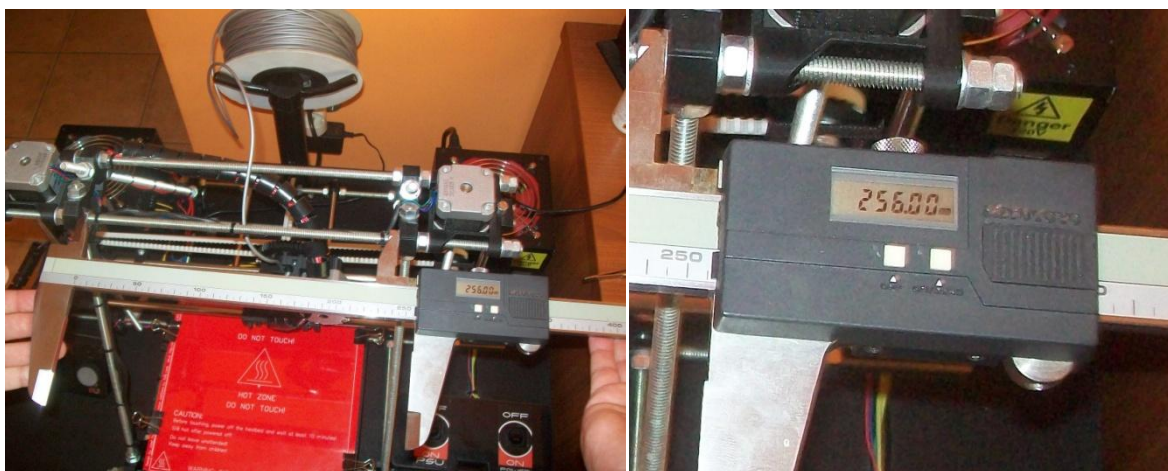


(β)

Σχήμα 31: Τοποθέτηση εξαρτημάτων (α) και μηχανής (β) στην βάση.

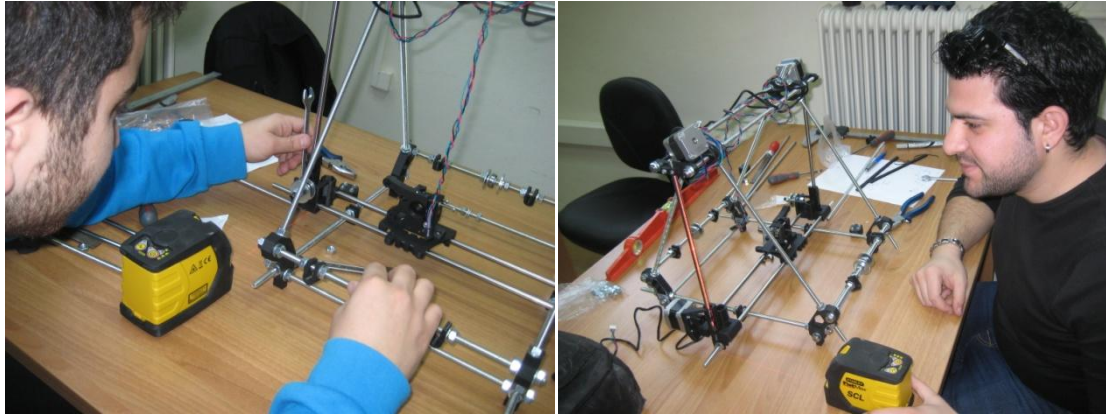
6.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗΣ ΚΑΙ ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ

Για σωστή λειτουργία της μηχανής είναι απαραίτητη η ευθυγράμμιση και η ρύθμιση της καθετότητας και της παραλληλότητας των αξόνων. Για να γίνει αυτό, πρέπει οι αποστάσεις ανάμεσα στα 2 βασικά τρίγωνα του σκελετού να είναι ρυθμισμένη με ακρίβεια 0,01 mm. Αυτό επιτεύχθη, με την χρήση παχυμέτρου, ανάλογης ακριβείας. Όλες οι αποστάσεις είναι μετρημένες με αυτό, και ίσες με 256 mm (Σχήμα 32).



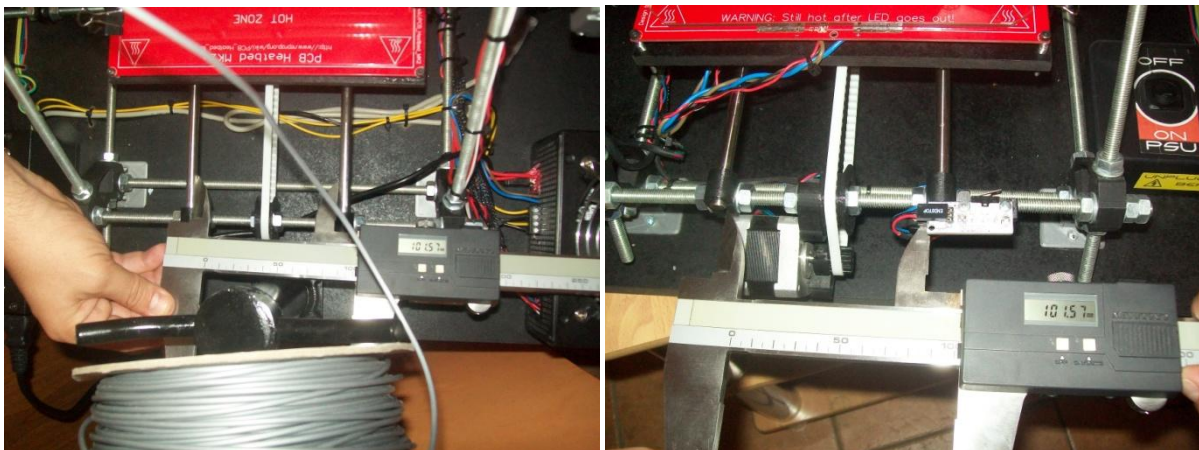
Σχήμα 32: Ευθυγράμμιση Σκελετού.

Η καθετότητα των αξόνων είναι η πιο βασική παράμετρος στην διαδικασία κατασκευής. Χωρίς αυτή οι άξονες θα ήταν αδύνατον να κινηθούν, και για να επιτύχουμε την απολυτή καθετότητα των αξόνων χρησιμοποιήσαμε αλφάδι λέιζερ (Σχήμα 33).



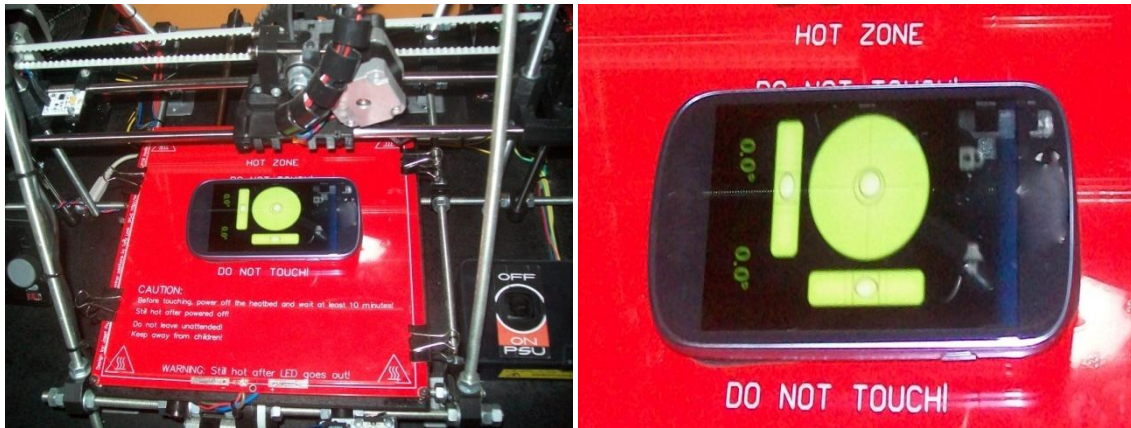
Σχήμα 33: Έλεγχος καθετότητας με αλφάδι λέιζερ.

Η κίνηση όλων των αξόνων γίνεται πάνω σε γλίστρες. Για να είναι εφικτή η κίνηση αυτή πρέπει οι λείες ράβδοι, να είναι απόλυτα παράλληλες μεταξύ τους (σχήμα 34). Χωρίς την απολυτή παραλληλότητα, η κίνηση των αξόνων θα ήταν δύσκολη, έως αδύνατη.



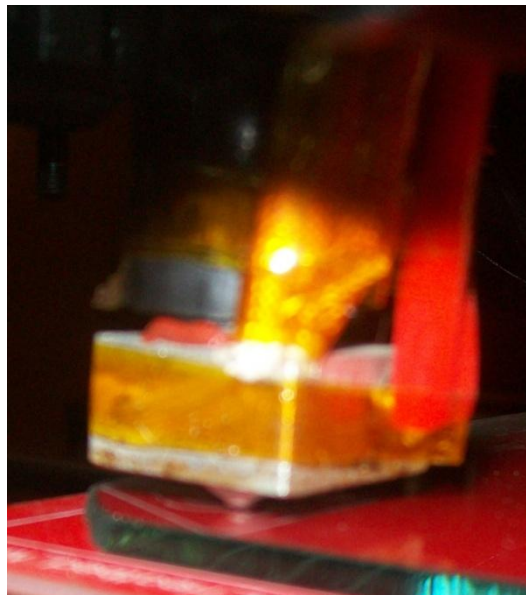
Σχήμα 34: Ευθυγράμμιση Οδηγών.

Για την σωστή εκτύπωση κομματιών, είναι απαιτητή η απολυτή επιπεδότητα της τράπεζας εκτύπωσης. Το σύστημα ευθυγράμμισης, με την χρήση αλφαδιού ρυθμίζεται ώστε να επιτευχτεί η επιπεδότητα αυτή, και σε αυτό συμβάλλει κατά ένα μεγάλο βαθμό και η γυάλινη επιφάνεια που είναι τοποθετημένη πάνω στην θερμαινόμενη πλάκα (Σχήμα 35).



Σχήμα 35: Ευθυγράμμιση Τράπεζας με Ψηφιακό Αλφάδι.

Η απαραίτητη απόσταση της κεφαλής του Hotend από την γυάλινη επιφάνεια πρέπει να είναι ίση με 0.08 mm (πάχος κολλάς A4). Αυτό επιτυγχάνεται, τοποθετώντας το end stop στην κατάλληλη θέση, ρυθμίζοντας το ύψος, στο οποίο θα σταματήσει η πλατφόρμα του άξονα X (Σχήμα 36).



Σχήμα 36: Απόσταση του Hotend από την γυάλινη επιφάνεια.

6.4 ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΤΟΥ ARDUINO

Όπως αναφέραμε παραπάνω το Arduino είναι ένας προγραμματιζόμενος μικρό-ελεγκτής, και για να λειτουργήσει πρέπει να προγραμματίσει με το κατάλληλο λογισμικό. Οι ρυθμίσεις που περιλαμβάνονται σε αυτό, εξαρτώνται από τον τρόπο κατασκευής της μηχανής και από τα εξαρτήματα που χρησιμοποιηθήκαν. Για την σωστή ρύθμιση των παραμέτρων αυτών υπάρχουν μαθηματικοί τύποι για τον υπολογισμό των τιμών που πρέπει να χρησιμοποιήσουμε.

Η οδήγηση των κινητήρων γίνεται με ηλεκτρονικούς παλμούς. Για να είναι η κίνηση αυτή ακριβής πρέπει να κάνουμε κάποιους υπολογισμούς, ώστε το λογισμικό να καταλάβει πόσους ηλεκτρονικούς παλμούς πρέπει να στείλει στον κινητήρα, ώστε να πραγματοποιήσει κίνηση ενός χιλιοστού.

Αρχικά ανοίγουμε το αρχείο Marlin.pde στο περιβάλλον προγραμματισμού του Arduino. Στην καρτέλα Configuration.h γράφουμε `#define MOTHERBOARD 33` στην αντίστοιχη επιλογή, το οποίο δείχνει πως χρησιμοποιούμε την πλακέτα RAMPS 1.4. Στην επιλογή Thermal Settings βάζουμε τις ρυθμίσεις `#define TEMP_SENSOR_0 1` και `#define TEMP_SENSOR_BED 1` οι οποίες αντιστοιχούν σε θερμίστορ 100K για το Hotend και για το Heated Bed. Στην επιλογή Mechanical Settings, και συγκεκριμένα στην γραμμή `#define X_MAX_POS` βάζουμε την μέγιστη διαδρομή του άξονα X σε mm, και ομοίως ρυθμίζουμε τις αντίστοιχες επιλογές για τους άξονες Y και Z. Άλλη μια ρύθμιση είναι η επιλογή της θέσης που έχουν τα end stops στους άξονες. Στην γραμμή `#define X_HOME_DIR` βάζουμε 1 στον άξονα X και -1 στους άξονες Y και Z, δηλώνοντας έτσι την μέγιστη θέση στον άξονα X και την θέση 0 για τους άλλους 2 άξονες.

Σε αυτό το σημείο, συνδέουμε το Arduino με θύρα USB σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή και πατάμε το κουμπί «Φόρτωση» ώστε να εισάγουμε τις τροποποιήσεις που κάναμε.

Στην συνέχεια, σημαντική ρύθμιση είναι να αλλάξουμε την περιστροφή του βηματικού κινητήρα του άξονα X, διότι η εργοστασιακή ρύθμιση προκαλεί ανεστραμμένη εκτύπωση. Για να γίνει αυτό αλλάζουμε στην ρύθμιση `#define INVERT_X_DIR` από true σε false. Τέλος, η ρύθμιση για την ακρίβεια της κίνησης των αξόνων, γίνεται στην γραμμή `#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT`

{X,Y,Z,E} βάζοντας όπου X,Y,Z,E τα νούμερα που αντιστοιχούν στους άξονες X,Y,Z,E.

Ο υπολογισμός αυτός γίνεται ως εξής:

Αρχικά βάζουμε τον άξονα X να πραγματοποιήσει μια κίνηση 100 χιλιοστών. Μετράμε με παχύμετρο μεγάλης ακριβείας το μήκος της κίνησης, και καταγράφουμε την μέτρηση που έκανε. Στην συνέχεια πολλαπλασιάζουμε τον αριθμό που προϋπήρχε στην θέση X, με την απόσταση που περιμέναμε να πραγματοποιήσει (100 mm) και διαιρούμε το αποτέλεσμα με την μέτρηση του πραγματικού μήκους που έκανε. Δηλαδή:

Το αποτέλεσμα αυτής πράξης, το εισάγουμε ξανά στο πρόγραμμα, και αναπρογραμματίζουμε το Arduino. Ομοίως πράττουμε και για του άλλους άξονες και στην συνέχεια, επαναλαμβάνουμε όλη την διαδικασία μέτρησης άλλη μια φορά για να βελτιώσουμε περεταίρω την ακρίβεια, έως ότου επιτύχουμε ένα αποτέλεσμα της τάξης του 0.01 mm. [2] [1]

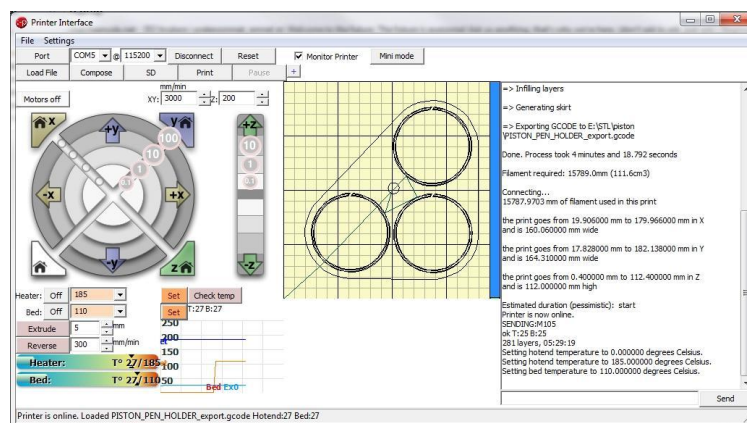
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΧΕΙΡΙΣΜΟΥ

Για τον χειρισμό και τον έλεγχο του 3D Printer Prusa Mendel, χρησιμοποιούμε 2 προγράμματα. Το πρώτο, λέγεται Slic3r και είναι το πρόγραμμα C.A.M. που βγάξει τον κώδικα G. Το δεύτερο, λέγεται Pronterface και είναι το πρόγραμμα που αναλαμβάνει τον χειρισμό της μηχανής καθώς και την πληροφόρηση του χρηστή με της απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τις λειτουργίες της μηχανής, όπως θερμοκρασία κτλ. Αξίζει να σημειωθεί, πως υπάρχουν και άλλα προγράμματα για τον χειρισμό (π.χ. Repetier και Skein forge), αλλά η πολυπλοκότητα τους δεν επιτρέπει την ανάλυσή τους στα πλαίσια τις εργασίας.

7.2 PRONTERFACE

Το γραφικό περιβάλλον του Pronterface, είναι αρκετά απλό και εύχρηστο. Στο επάνω μέρος, βρίσκονται τα κουμπιά σύνδεσης με την μηχανή, καθώς και τα κουμπιά για την φόρτωση του κώδικα G και την εκτέλεση του. Στην αριστερή πλευρά, υπάρχει μια συστοιχία από κουμπιά για την κίνηση των αξόνων, στο κέντρο υπάρχει ένας χώρος στον οποίο μπορούμε να παρατηρούμε σε πραγματικό χρόνο την κίνηση της μηχανής. Στα αριστερά υπάρχει η κονσόλα με την οποία υπάρχει επικοινωνία μεταξύ του χρηστή και της μηχανής, με την μορφή μηνυμάτων και κώδικα G. Στην κάτω αριστερή πλευρά, βρίσκονται τα κουμπιά διαχείρισης της θερμοκρασίας, καθώς και ένα γράφημα της θερμοκρασίας σε σχέση με τον χρόνο (Σχήμα 37).

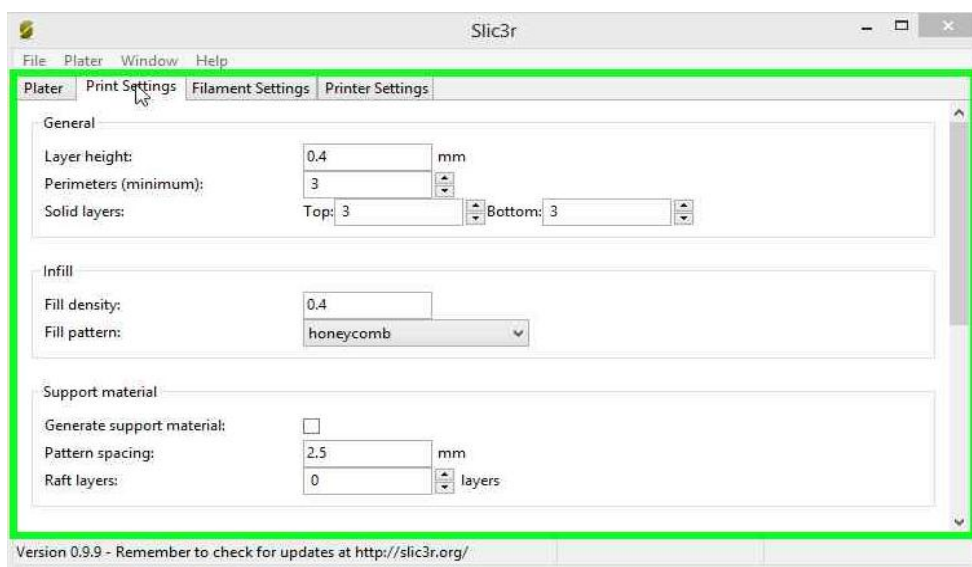


Σχήμα 37: Γραφικό περιβάλλον Pronterface.

Αρχικά, για να συνδεθούμε στην μηχανή επιλεγούμε την θύρα στην οποία είναι συνδεδεμένο το Arduino και πατάμε το κουμπί «Connect». Στην συνέχεια πατάμε στο κουμπί «Load File» και επιλεγούμε το αρχείο με τον κώδικα G που επιθυμούμε να εκτυπώσουμε και πατάμε την επιλογή «Print» που θα εμφανίσει, ώστε να ξεκινήσει η εκτύπωση.

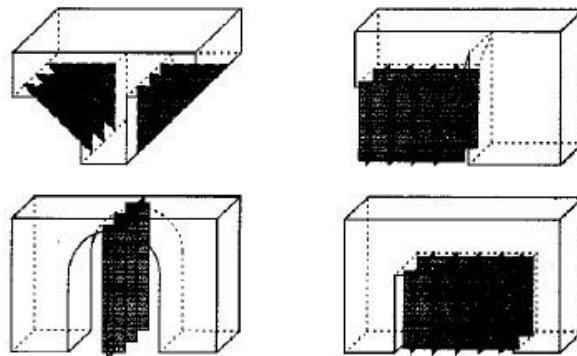
7.3 Slic3r

Το Slic3r, είναι το πρόγραμμα το οποίο βγάζει το κώδικα G από οποιοδήποτε σχέδιο σε μορφή .STL, ο οποίος είναι αξιοποιήσιμος από την μηχανή. Για να είναι εφικτό να εκτυπωθεί κάποιο αντικείμενο, πρέπει να προμηθεύσουμε το πρόγραμμα με τις απαραίτητες πληροφορίες για συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της μηχανής. Το πρόγραμμα αυτό, παρέχει της την δυνατότητα στον χρήστη να αποθηκεύσει της ρυθμίσεις που έκανε σε ένα αρχείο ώστε να μπορεί εύκολα να της χρησιμοποιήσει και στο μέλλον. Στην καρτέλα «Print Settings» (Σχήμα 38) μπορούμε να εισάγουμε της επιλογές της. Στο πρώτο πεδίο εισαγωγής βάζουμε το επιθυμητό πάχος της κάθε στρώσης μετρημένο σε mm. Στην συνέχεια, στο επόμενο πεδίο ζητείται ο αριθμός τον ελαχίστων περιμέτρων που θέλουμε να σχεδιάσει η μηχανή, μέσα στις οποίες θα κάνει το γέμισμα με υλικό. Τέλος, έχουμε το πεδίο εισαγωγής του αριθμού των στρωμάτων που θέλουμε να είναι γεμισμένα στο 100%. Συνήθως 3 με 4 είναι αρκετά.



Σχήμα 38: Καρτέλα Print Settings Slic3r.

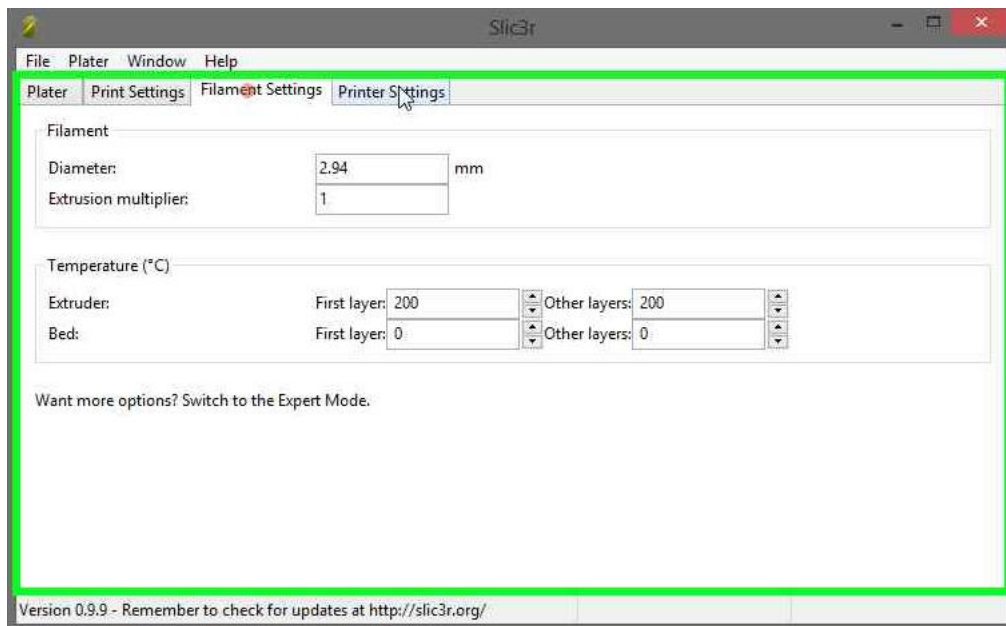
Στο πεδίο «Infill», και στην πρώτη επιλογή, βάζουμε το ποσοστό που θέλουμε να γεμίσει το κομμάτι, σε μορφή δεκαδικού αριθμού. Για παράδειγμα, για γέμισμα 25%, θα εισάγουμε τον νούμερο 0,25, για γέμισμα 50% θα εισάγουμε 0,50 κτλ. Συνήθως για κομμάτια που δεν είναι σχεδιασμένα να φέρουν κάποιου είδους φόρτια, ένα ποσοστό γεμίματος της τάξης του 25% είναι αρκετό. Ακριβώς κάτω έχουμε την επιλογή του μοτίβου γεμίματος, το οποίο είναι στην κρίση του χειριστή, της η επιλογή «rectilinear» είναι από της πιο γρήγορες. Της για κάποιο περίεργο σχέδιο, το οποίο είναι δύσκολο να εκτυπωθεί λόγω της γεωμετρίας του, έχουμε την επιλογή χτισίματος δόμων υποστήριξης με αυτόματο τρόπο όπου το πρόγραμμα κρίνει απαραίτητο ότι χρειάζονται (Σχήμα 39).



Σχήμα 39: Δομές Υποστήριξης.

Της, είναι δυνατή η ρύθμιση της ταχύτητας πρόωσης, για συγκεκριμένες επιλογές, της στην εκτύπωση περιμέτρων, στο γέμισμα, καθώς και στον νεκρό χρόνο κατά τον οποίο το hotend διανύει απλά κάποια απόσταση χωρίς να τυπώνει.

Στην καρτέλα «Filament Settings» (Σχήμα 40), ο χρήστης καλείται να εισάγει τα χαρακτηριστικά του υλικού κατεργασίας. Η διάμετρος, είναι η πρώτη επιλογή που ζητείται και πρέπει να δοθεί μετρημένη σε mm. Το υλικό κατεργασίας έρχεται με τυποποιημένη διάμετρο σε διαστάσεις 1,75mm και 3mm. Το υλικό που έχουμε επιλέξει έχει τυποποιημένη διάμετρο 3mm. Στο πρόγραμμα πρέπει να εισάγουμε την διάμετρο μετρημένη με μεγάλη ακρίβεια διότι το νούμερο αυτό χρησιμοποιείτε για να υπολογίσει βάση του όγκου του σχεδίου πόσο υλικό πρέπει να καταναλώσει.

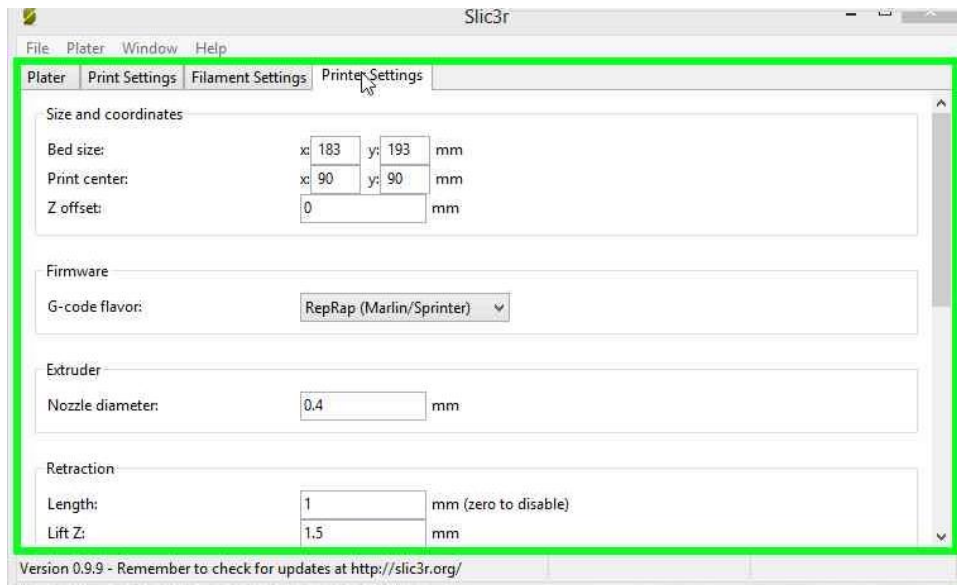


Σχήμα 40: Καρτέλα Filament Settings Slic3r.

Στο πεδίο «Temperature», εισάγουμε την επιθυμητή θερμοκρασία σε βαθμούς κελσίου (°C), για το hotend και το heated bed, με ξεχωριστές επιλογές θερμοκρασίας για το πρώτο στρώμα εκτύπωσης. Το πρώτο στρώμα εκτύπωσης έχει ξεχωριστή επιλογή θερμοκρασίας, γιατί είναι το πιο σημαντικό στρώμα καθ' όλη την εκτύπωση, διότι πρέπει να κολλήσει πολύ καλά πάνω στο heated bed για να έχουμε επιτυχημένη εκτύπωση.

Τέλος, στην καρτέλα «Printer Settings» (Σχήμα 41) εισάγουμε στο πρώτο πεδίο τα χαρακτηριστικά της τράπεζα εκτύπωσης, της το μέγεθος σε mm και το κέντρο της τράπεζας. Στο παρακάτω πεδίο έχουμε την δυνατότητα επιλογής της μορφής του κώδικα G. Αυτή η επιλογή χρησιμεύει για την κατανόηση του κώδικα από το λογισμικό του Arduino. Για την προκείμενη περίπτωση η επιλογή του λογισμικού θα είναι η RepRap (Marlin/Sprinter).

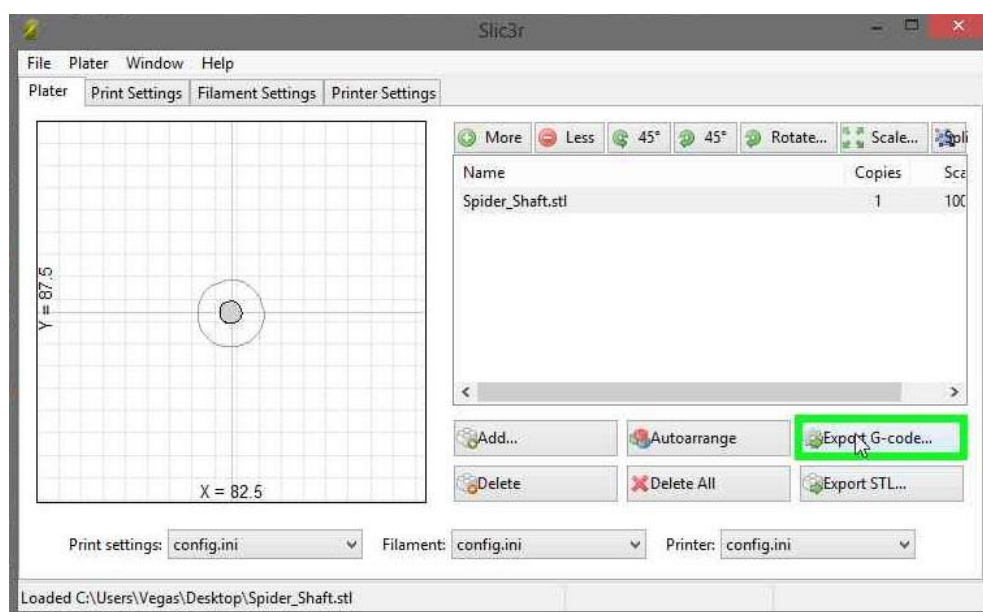
Κάτω από την επιλογή αυτή, υπάρχει ρύθμιση για την διάμετρο του ακροφυσίου του hotend μετρημένη σε mm. Στην συνέχεια, μπορούμε να προσθέσουμε κάποιο κομμάτι συγκεκριμένο για τον κώδικα G είτε στην αρχή είτε στο τέλος του τελικού προγράμματος του κώδικα G.



Σχήμα 41: Καρτέλα Printer Settings Slic3r.

Αφού έχουμε ρυθμίσει της παραπάνω παραμέτρους, μπορούμε να εξαγάμε τον κώδικα G από ένα σχέδιο STL. Αυτό γίνεται με τον εξής τρόπο:

Στην κεντρική οθόνη του προγράμματος Slic3r, ρίχνουμε το αρχείο STL που θέλουμε τεμαχίσουμε, με drag and drop. Στην συνέχεια, έχουμε την επιλογή να διαμορφώσουμε τα σχέδια STL ανάλογα με το μέγεθος, τον προσανατολισμό και αλλά. Τέλος, μπορούμε να σβήσουμε τον αρχείο, η να χρησιμοποιήσουμε την επιλογή για αυτόματο προσανατολισμό του κομματιού. Η εξαγωγή του κώδικα G γίνεται πατώντας το κουμπί «Export G-Code» (Σχήμα 42).



Σχήμα 42: Γραφικό Περιβάλλον Slic3r.

7.4 ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΕΣΩ ΤΟΥ CONTROLLER

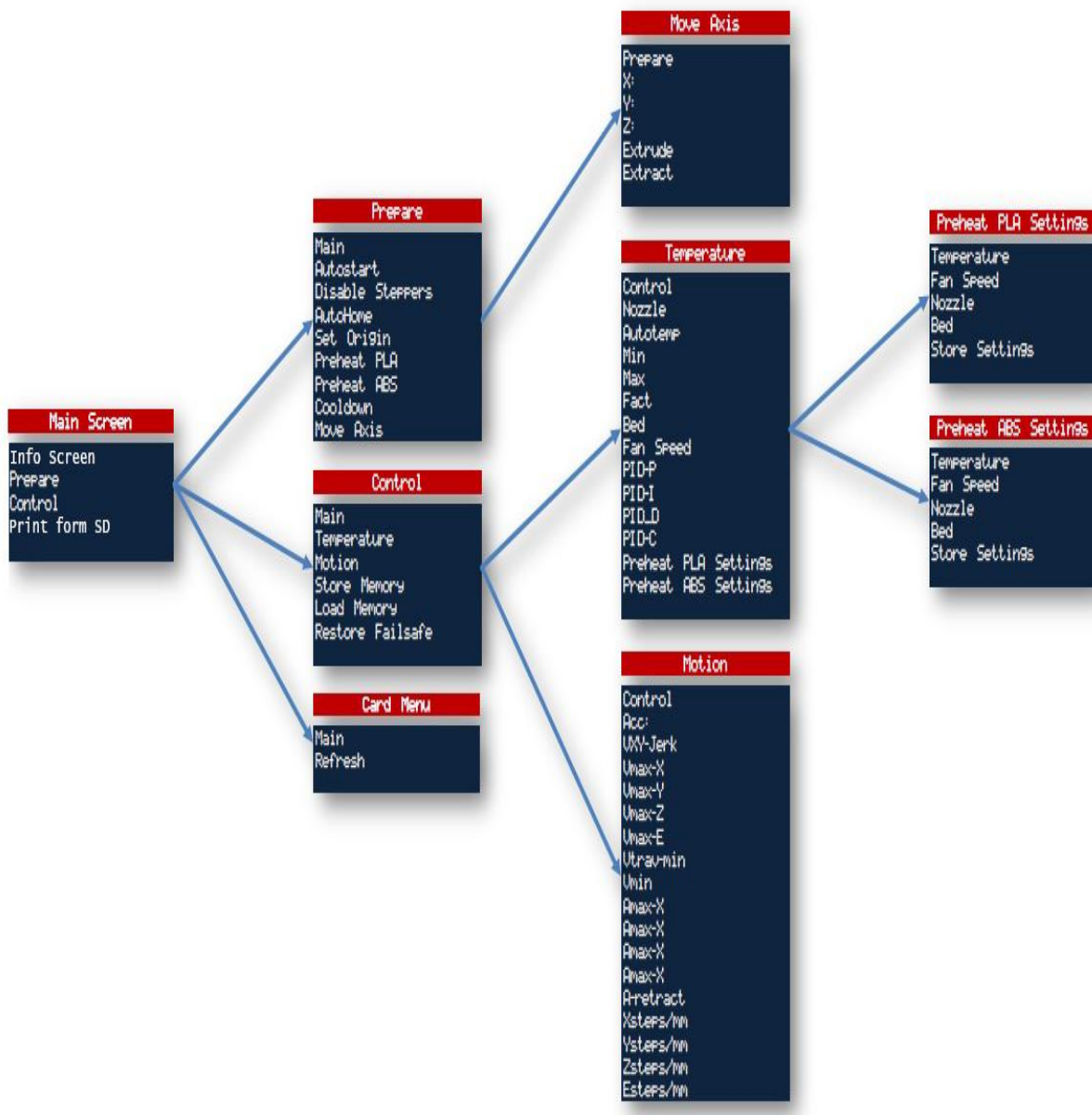
Έκτος από τα προγράμματα χειρισμού, το 3D Printer, έχει την δυνατότητα να κάνει εκτύπωση από την κάρτα SD. Η δυνατότητα αυτή, είναι παρά πολύ χρήσιμη διότι δεν είναι απαραίτητη η δέσμευση ηλεκτρονικού υπολογιστή καθ' όλη την διάρκεια της εκτύπωσης. Μερικές εκτυπώσεις, ανάλογα με το μέγεθος τους, και την πολυπλοκότητα τους, μπορεί να διαρκέσουν έως και 30 ώρες. Η δέσμευση, ηλεκτρονικού υπολογιστή για τόσο χρονικό διάστημα, ίσως να αποτελεί μειονέκτημα για κάποιους χρήστες. Το πρόβλημα αυτό, διορθώνεται, συνδέοντας στις ηλεκτρονικές πλακέτες έλεγχου της μηχανής, έναν controller, ο οποίος έχει έκτος των άλλων, υποδοχή για κάρτα μνήμης.

Ο controller έχει την δυνατότητα χειρισμού της μηχανής, με τις ίδιες δυνατότητες και λειτουργίες που θα έκανε ένας υπολογιστής, με την μονή διαφορά, ότι θα πρέπει να έχουμε τον κώδικα G αποθηκευμένο, στην κάρτα μνήμης SD. Η διαδικασία που ακολουθούμε είναι η εξής:

Ο χρήστης, τεμαχίζει το αντικείμενο που επιθυμεί να τυπώσει, με το πρόγραμμα C.A.M. Slic3r, όπως περιγράφεται παραπάνω. Στην συνέχεια, ο κώδικας G αποθηκεύεται στην κάρτα SD, μέσω κάποιου card reader. Αφού γίνει αυτό, αφαιρείται η κάρτα, και τοποθετείται στην υποδοχή του controller. Θα παρουσιαστεί αντίστοιχο μήνυμα στην οθόνη, το οποίο θα ενημερώνει τον χειρίστη πως εντοπίστηκε η κάρτα. Όπως κάθε φορά, έτσι και τώρα πριν την εκτύπωση, γίνεται προθέρμανση της μηχανής, μέσω της αντίστοιχης επιλογής στο μενού (Σχήμα 43). Αφού φτάσουν στην επιθυμητή θερμοκρασία, το hotend καθώς και το heated bed, πατάμε την επιλογή Print from SD και θα ξεκινήσει η εκτύπωση. Η επιλογή γίνεται πατώντας την ροδέλα πλοήγησης για επιλογή κάποιου στοιχείου, και περιστρέφοντας την μετακίνηση στο μενού.

Τέλος, η μηχανή διαθέτει, ένα κουμπί με το όνομα «KILL», το οποίο τερματίζει επιτόπου την λειτουργία της μηχανής. Η λειτουργία του είναι χρήσιμη σε περίπτωση που υπάρχει κάποιο πρόβλημα στην λειτουργία με αποτέλεσμα να προκληθεί σοβαρή βλάβη στην μηχανή. Για παράδειγμα, εάν κάποιο Endstop δεν λειτουργήσει κατά την διάρκεια εκτέλεσης της εντολής HOME τότε το εργαλειοφορείο, ή η τράπεζα, ή ακόμα και ολόκληρη η πλατφόρμα του άξονα X θα έρθει σε σύγκρουση με κάποιο

άλλο μέρος της μηχανής. Σε περίπτωση που πατηθεί το κουμπί «KILL» η μηχανή πρέπει να κάνει επανεκκίνηση για να λειτουργήσει.



Σχήμα 43: Μενού επιλογών του Controller.

7.5 ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΚΩΔΙΚΑ G ΚΑΙ M

Ο κώδικας G και M, για 3D Printer, έχει διαφοροποιηθεί από τον κλασσικό κώδικα των C.N.C. εργαλειομηχανών και αυτό οφείλετε στην διάφορα της αρχής λειτουργίας τους. Παρακάτω αναλύονται οι βασικές εντολές.

RepRap G Codes

G0 -> G1

G1 - συντονισμένη κίνηση X Y Z E

G2 - CW Τόξο

G3 - CCW Τόξο

G4 - Αναμονή

G10 - Αφαίρεση νήματος σύμφωνα με τις ρυθμίσεις M207

G11 - Ανάκληση της αφαίρεσης νήματος σύμφωνα με τις ρυθμίσεις M208

G28 – Κίνηση στο Home όλων των αξόνων

G90 - Χρήση απόλυτων συντεταγμένων

G91 - Χρήση σχετικών συντεταγμένων

RepRap M Codes

M0 - Αναμονή για τον χρήστη

M1 - Το ίδιο με M0

M104 - Ορισμός θερμοκρασίας Extruder

M105 - Διάβασμα τρέχουσας θερμοκρασίας

M106 - Fan on

M107 - Fan off

M109 - Αναμονή μέχρι το Hotend να φθάσει την επιθυμητή θερμοκρασία

M114 - Προβολή τρέχουσας θέσης

Κώδικες M για το λογισμικό Marlin

M17 - Ενεργοποίηση όλων των βηματικών κινητήρων

M18 - Απενεργοποίηση όλων των βηματικών κινητήρων. Ίδιο με την M84

M20 – Κατάλογος κάρτας SD
M21 – Διαμόρφωση κάρτας SD
M22 - Αφαίρεση κάρτας SD
M23 – Επιλογή αρχείου από κάρτα SD (M23 filename.g)
M24 - Έναρξη / συνέχιση Εκτύπωσης κάρτας SD
M25 - Παύση εκτύπωσης κάρτας SD
M26 - Set SD position in bytes (M26 S12345)
M27 - Παρουσίαση προόδου εκτύπωσης από κάρτα SD
M28 - Έναρξη εγγραφής κάρτας SD (M28 filename.g)
M29 – Τερματισμός εγγραφής κάρτας SD
M30 - Διαγραφή αρχείου από κάρτα SD (M30 filename.g)
M31 - Output time since last M109 or SD card start to serial
M42 - Change pin status via gcode Use M42 PX Sy to set pin x to value y, when omitting PX the onboard led will be used.
M80 - Ανοίξτε την παροχή ρεύματος
M81 - Κλείστε την παροχή ρεύματος
M82 – Απόλυτες συντεταγμένες για τον Extruder (προεπιλογή)
M83 – Σχετικές συντεταγμένες για τον Extruder
M84 - Απενεργοποίηση όλων των βηματικών κινητήρων μέχρι την επόμενη κίνηση, ή να χρησιμοποιήσετε S για να καθορίσετε ένα χρονικό όριο αδράνειας, μετά την οποία οι βηματικοί κινητήρες θα απενεργοποιηθούν. S0 για να απενεργοποιήσετε το χρονικό όριο.
M85 - Ορισμός του χρονομέτρου αδράνειας με την παράμετρο χρόνου S. Για απενεργοποίηση ορίζουμε S0 (προεπιλογή)
M92 - Ορισμός βήματος των αξόνων (Είναι ορισμένο στο Marlin από προγραμματισμό)
M114 - Προβολή τρέχουσας θέσης στην κονσόλα
M115 - Capabilities string
M117 – Προβολή μηνύματος στην οθόνη
M119 – Προβολή κατάστασης Endstop στην κονσόλα.
M126 - Solenoid Air Valve Open (BariCUDA support by jmil)
M127 - Solenoid Air Valve Closed (BariCUDA vent to atmospheric pressure by jmil)
M128 - EtoP Open (BariCUDA EtoP = electricity to air pressure transducer by jmil)

M129 - EtoP Closed (BariCUDA EtoP = electricity to air pressure transducer by jmil)

M140 – Ορισμός θερμοκρασίας Heated bed

M190 – Αναμονή μέχρι το Heated bed να φθάσει την επιθυμητή θερμοκρασία

M200 – Ορισμός διαμέτρου του νήματος

M201 - Set max acceleration in units/s² for print moves (M201 X1000 Y1000)

M202 - Set max acceleration in units/s² for travel moves (M202 X1000 Y1000)

M203 - Set maximum feedrate that your machine can sustain (M203 X200 Y200 Z300 E10000) in mm/sec

M204 - Set default acceleration: S normal moves T filament only moves (M204 S3000 T7000) in mm/sec² also sets minimum segment time in ms (B20000) to prevent buffer underruns and M20 minimum feedrate

M205 - advanced settings: minimum travel speed S=while printing T=travel only, B=minimum segment time X= maximum xy jerk, Z=maximum Z jerk, E=maximum E jerk

M206 – Αντιστάθμιση στην επιλογή HOME

M207 - set retract length S [positive mm] F [feedrate mm/sec] Z [additional zlift/hop]

M218 – Αντιστάθμιση hotend (σε mm): T X Y

M220 – Παράκαμψη του συντελεστή ταχύτητας σε ποσοστό %

M221 -Παράκαμψη του συντελεστή εξώθησης σε ποσοστό %

M240 - Λήψη φωτογραφίας (εάν είναι διαθέσιμη)

M302 - Άρση περιορισμού ψυχρής εξώθησης (MONO ΕΑΝ ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΥΛΙΚΟ ΣΤΟΝ EXTRUDER!!)

M400 - Τερματισμός για όλες τις κινήσεις

M600 - Παύση για αλλαγή νήματος X [pos] Y [pos] Z [σχετική ανύψωση]

M928 – Έναρξη αρχείου καταγραφής σε κάρτα SD (M928 filename.g) - Τερματισμός με M29

M999 - Επανεκκίνηση αφού σταμάτησε από λάθος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

8.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΟΜΜΑΤΙΟΥ

Η διαδικασία κατασκευής, ξεκάνει με την σχεδίαση του επιθυμητού κομματιού, σε ένα σχεδιαστικό πρόγραμμα, το οποίο έχει την δυνατότητα εξαγωγής αρχείων σε μορφή .STL όπως το Google SketchUp, το Autodesk 123D Design, και άλλα. Επίσης, στο διαδίκτυο υπάρχει μεγάλη ποικιλία διαθέσιμων κομματιών, καθώς και τα πλαστικά μέρη για την κατασκευή ή την βελτίωση της μηχανής..

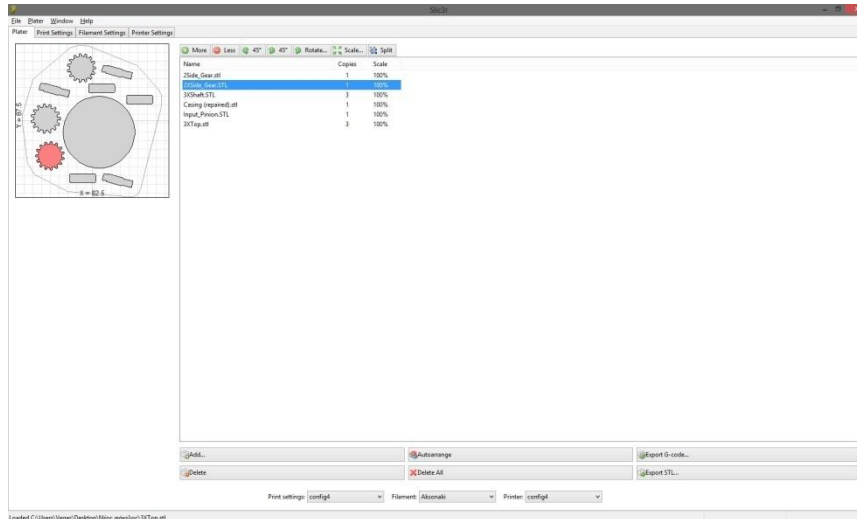
Με την επιλογή του επιθυμητού σχεδίου, εισάγουμε τα αρχεία .STL στο Slic3r. Έπειτα αφού καθορίσουμε τον προσανατολισμό (Σχήμα 44) εκτύπωσης και προσέχουμε αν είναι δυνατή η εκτύπωση τους στον υπάρχοντα χώρο εκτύπωσης. Σε περίπτωση που δεν είναι δυνατή η εκτύπωση λόγω χώρου, κάνουμε 2 ή 3 εκτυπώσεις μοιράζοντας τα σχέδια αντίστοιχα . Αν χρειάζεται λόγω σχεδίου, κάνουμε τις απαραίτητες αλλαγές στις ρυθμίσεις του προγράμματος Slic3r.

Στην συνέχεια, έχοντας εξάγει τον κώδικα G, τον φορτώνουμε στο Pronterface. Πριν να ξεκινήσουμε την εκτύπωση, είναι απαραίτητη η προθέρμανση της μηχανής. Αυτό γίνεται βάζοντας στα πεδία «Heater» και «Bed» τις αντίστοιχες θερμοκρασίες, η οποίες για την δική μας περίπτωση λόγω υλικού (PLA) είναι 185 °C και 60 °C αντίστοιχα, και πατώντας τα κουμπιά «Set» για την κάθε επιλογή.

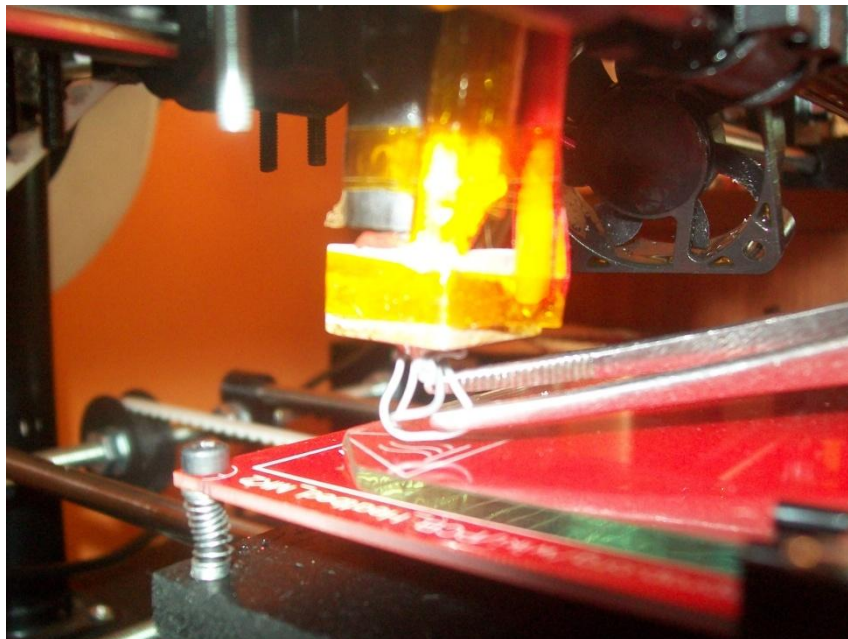
Στο επάνω μέρος, τσεκάρουμε την επιλογή «Monitor Printer», για να παρακολουθούμε σε πραγματικό χρόνο την θερμοκρασία. Καθώς η θερμοκρασία ανεβαίνει, βάζουμε την μηχανή να κάνει την κίνηση HOME για να καταλάβει τα όρια του κάθε της άξονα, και στην συνέχεια σηκώνουμε τον άξονα Z κατά 10 mm, διότι λόγω της θέρμανσης θα ρέει μικρή ποσότητα υλικού από το ακροφύσιο. Όταν η θερμοκρασία φτάσει στα επιθυμητά επίπεδα, κάνουμε Extrude 5 mm υλικού με πρόωση 160mm/min για εξαλείψουμε τυχόν φουσαλίδες μέσα στο ακροφύσιο. Χρησιμοποιώντας μυτοσίμπιδο, αφαιρούμε ότι υλικό είναι στο ακροφύσιο και πατάμε το κουμπί «Print» για να ξεκινήσει η εκτύπωση (Σχήμα 45). [2]

Το κομμάτι που θα κατασκευαστεί, είναι μικρογραφία ενός πλανητικού συστήματος οδοντωτών τροχών. Αποτελείτε από 4 κωνικούς οδοντωτούς τροχούς, οι οποίοι βρίσκονται μέσα σε ένα μεγαλύτερο γρανάζι το οποίο μεταφέρει την κίνηση από τον κύριο άξονα. Το όλο σχέδιο είναι μοντέλο ενός διαφορικού, το οποίο έχει σχεδιάσει

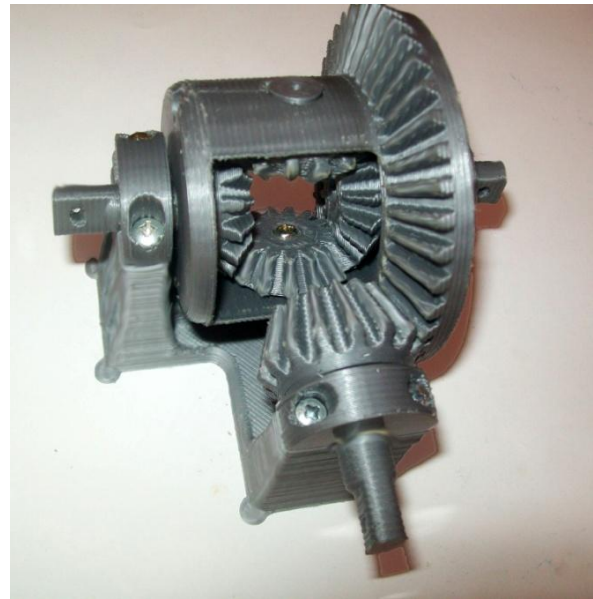
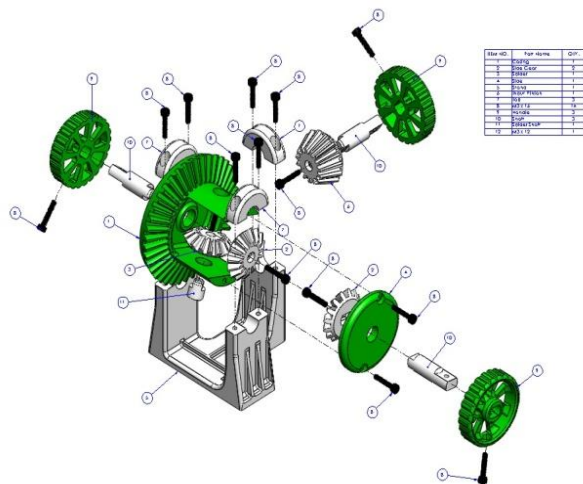
κατάλληλα για την απεικόνιση της λειτουργίας ενός διαφορικού συστήματος. Η όλη διάταξη θα τοποθετηθεί πάνω σε μια βάση η οποία τα συγκρατεί ο όλο σύστημα. (Σχήμα 46)



Σχήμα 44: Προσανατολισμός κομματιών.



Σχήμα 45: Αφαίρεση Υλικού από το ακροφύσιο.



Σχήμα 46: Εκτυπωμένο Μοντέλο Διαφορικού.

8.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΙΣ ΕΚΤΥΠΩΣΕΙΣ

Η θερμοκρασία, παίζει τον πιο σημαντικό ρολό για μια σωστή εκτύπωση. Ο βασικός παράγοντας είναι το είδος του υλικού που χρησιμοποιεί η κάθε μηχανή, και οι προσθήκες που έχει. Κατά την εκτύπωση, του υλικό που εξέρχεται από το ακροφύσιο, πρέπει να βγαίνει σαν συνεχές νήμα, ομοιόμορφης γεωμετρίας. Θέτοντας σε μεγάλη θερμοκρασία το Hotend, υπάρχει κίνδυνος, εκτός από μια κακή εκτύπωση, να ρευστοποιηθεί εντελώς το υλικό, με αποτέλεσμα την εμπλοκή του μέσα στο ακροφύσιο, καταστρέφοντας το (Σχήμα 45).

Αντίθετα, με χαμηλές θερμοκρασίες, έχουμε μη σωστή ένωση των ινών μεταξύ τους, με αποτέλεσμα ένα χαμηλής αντοχής αντικείμενο .

Στο σχήμα 45, φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας στην γεωμετρία του αντικείμενου, καθώς και στην ποιότητα της εκτύπωσης. Το πρώτο δοκίμιο, έχει εκτυπωθεί με θερμοκρασία 210 °C, και όπως είναι φανερό η όψη του είναι σαν μια άμορφη μάζα. Στην συνέχεια, με σταδιακή μείωση της θερμοκρασίας, παρατηρούμε πως το αντικείμενο όρχησε να παίρνει μορφή, και φαίνονται όλο και περισσότερο λεπτομερές της γεωμετρίας του. Μετά από μια πληθώρα δοκιμών, παρατηρήθηκε πως η θερμοκρασία 190 °C για το πρώτο στρώμα και η μείωση της στους 183 °C για

τα επόμενα στρώματα, δίνει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα για τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της μηχανής.

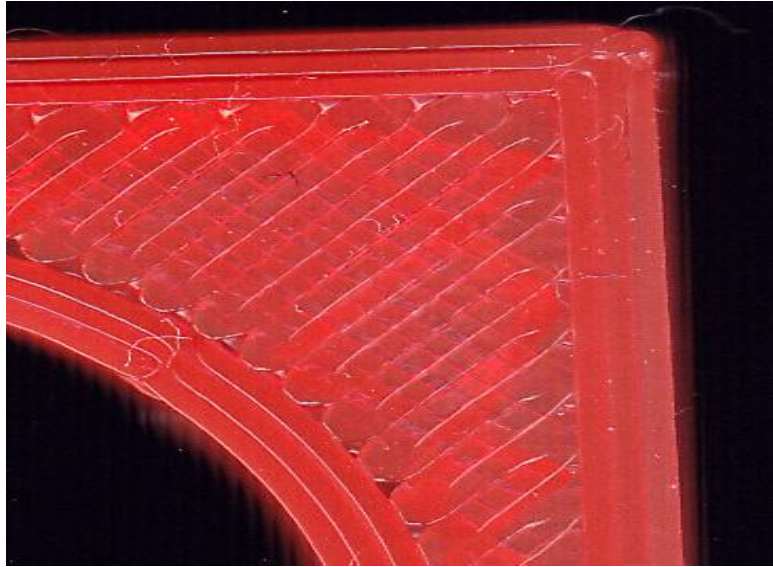


(α) (β) (γ) (δ)
Σχήμα 45: Εκτύπωση στους 210 °C (α), 200 °C (β), 190 °C (γ), 183 °C (δ)

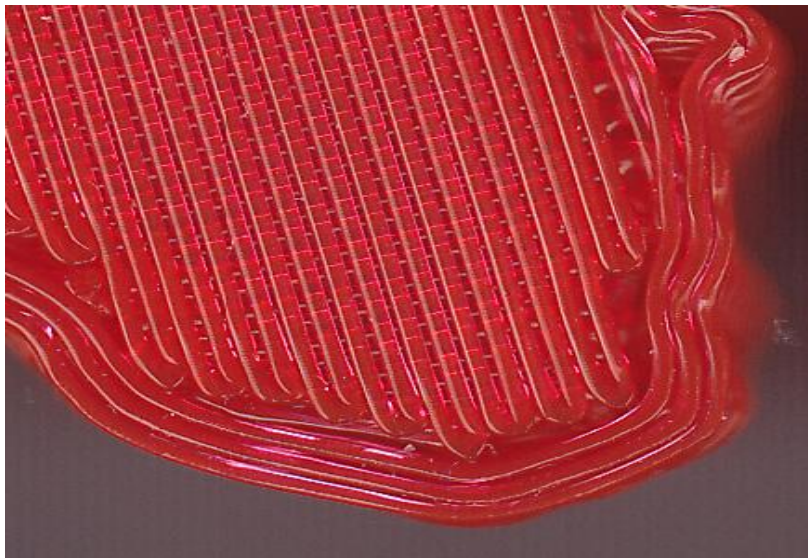
8.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ ΤΟΥ HOTEND ΣΤΙΣ ΕΚΤΥΠΩΣΕΙΣ

Το ύψος του κάθε στρώματος, παίζει και αυτό έναν σημαντικό ρολό για την ποιότητα και την αντοχή του αντικείμενου. Το πρώτο στρώμα, θα πρέπει να έχει μικρότερο πάχος, σε σχέση με τα άλλα στρώματα, διότι, πάνω σε αυτό θα χτισθεί το υπόλοιπο αντικείμενο. Μέσα από πειράματα, παρατηρήθηκε πως για Hotend διαμέτρου 0,4 mm, θα πρέπει το πάχος του στρώματος να είναι 0,25 mm. Το πάχος του πρώτου στρώματος, υπολογίστηκε εμπειρικά, πως πρέπει να είναι το 72% του πάχους της κάθε στρώσης, και στην συγκεκριμένη περίπτωση ίσο με 0,18 mm (Σχήμα 46).

Για πάχος πρώτης στρώσης, όσο με το 100 % του κανονικού πάχους, το εκτυπωμένο αντικείμενο είναι δύσκολο να κολληθεί πάνω στην γυάλινη επιφάνεια (Σχήμα 47) με αποτέλεσμα την αποκόλληση του αντικείμενου κατά την διάρκεια της εκτύπωσης. [2]



Σχήμα 46: Σωστό ύψος Hotend.



Σχήμα 47: Μεγάλο ύψος Hotend.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ

- Τεχνικά Χαρακτηρίστηκα : PSU TURBO-X (DR-812BTX)

Η χρήση του είναι να μετατρέπει τα 220V της ΔΕΗ σε 12V που είναι η συνιστώμενη λειτουργία της μηχανής. Η ισχύς των 550Watt είναι αρκετή για να τροφοδοτήσει τις πλακέτες που διαχειρίζονται την μηχανή με το απαιτούμενο ρεύμα.

Πινάκας χαρακτηριστικών PSU

Τύπος	ATX 12V
Ισχύς	550W
Efficiency	75%
Ψύξη	Single Fan 120mm
Fan Characteristic	Auto Fan Control
Maximum RPM	1900rpm
Minimum RPM	1700rpm
Διαστάσεις	15cm 14cm 8.6cm
Τάση Λειτουργίας	220V/ 50Hz

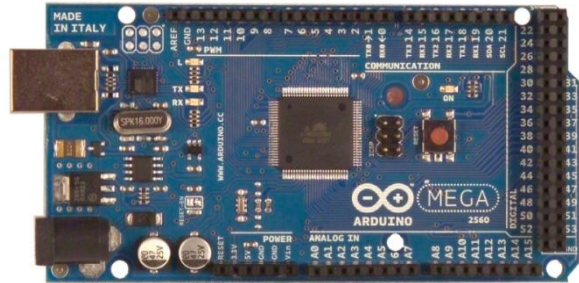


TURBO-X (DR-812BTX)

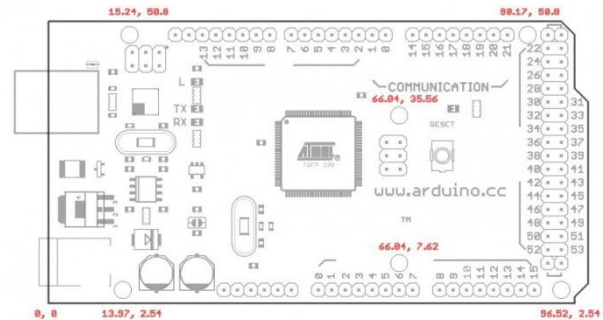
- Τεχνικά Χαρακτηρίστηκα: ARDUINO MEGA 2560

Πινάκας χαρακτηριστικών Mega 2560

Τύπος	AT mega 2560
Τάση λειτουργίας	5V
Τάση Εισόδου (Συνιστώμενη)	7-12V
Τάση Εισόδου (Οριακή)	6-20V
Digital I/O Pins	54
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	40mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by boot loader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz



ARDUINO MEGA 2560



ΣΧΕΔΙΟ ARDUINO MEGA 2560

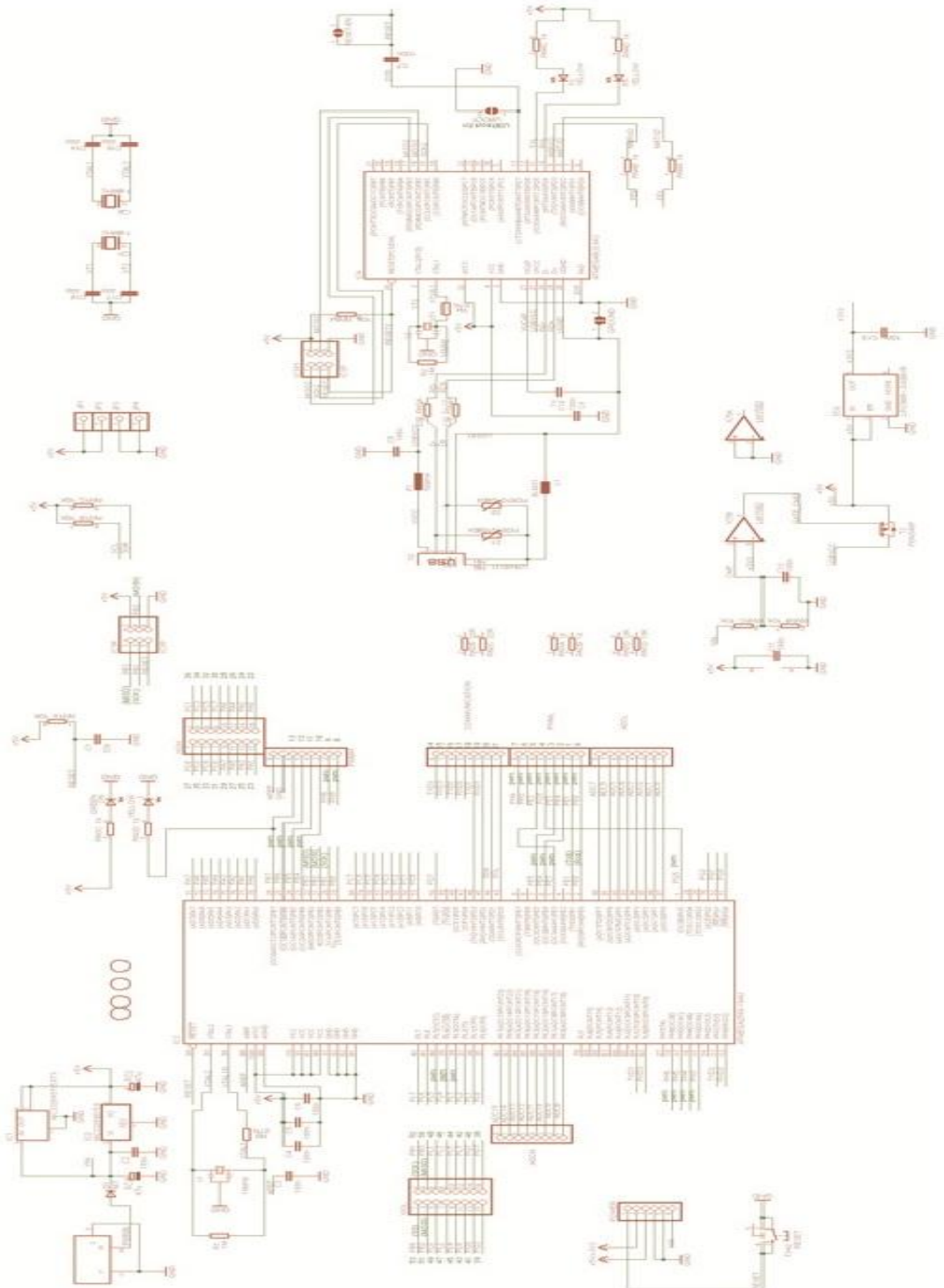
ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ: ARDUINO MEGA 2560

Arduino Mega 2560 Reference Design

Reference Design provided by AT&M (AVR) Pin 17: Arduino Mega 2560. AT&M (AVR) Pin 17: Arduino Mega 2560. AT&M (AVR) Pin 17: Arduino Mega 2560. AT&M (AVR) Pin 17: Arduino Mega 2560.

Atmel is not responsible for any damage or loss of data or information that may occur as a result of using the Reference Design. The Reference Design is provided as a guide only and is not intended to be used as a substitute for a professional design.

Atmel is not responsible for any damage or loss of data or information that may occur as a result of using the Reference Design. The Reference Design is provided as a guide only and is not intended to be used as a substitute for a professional design.



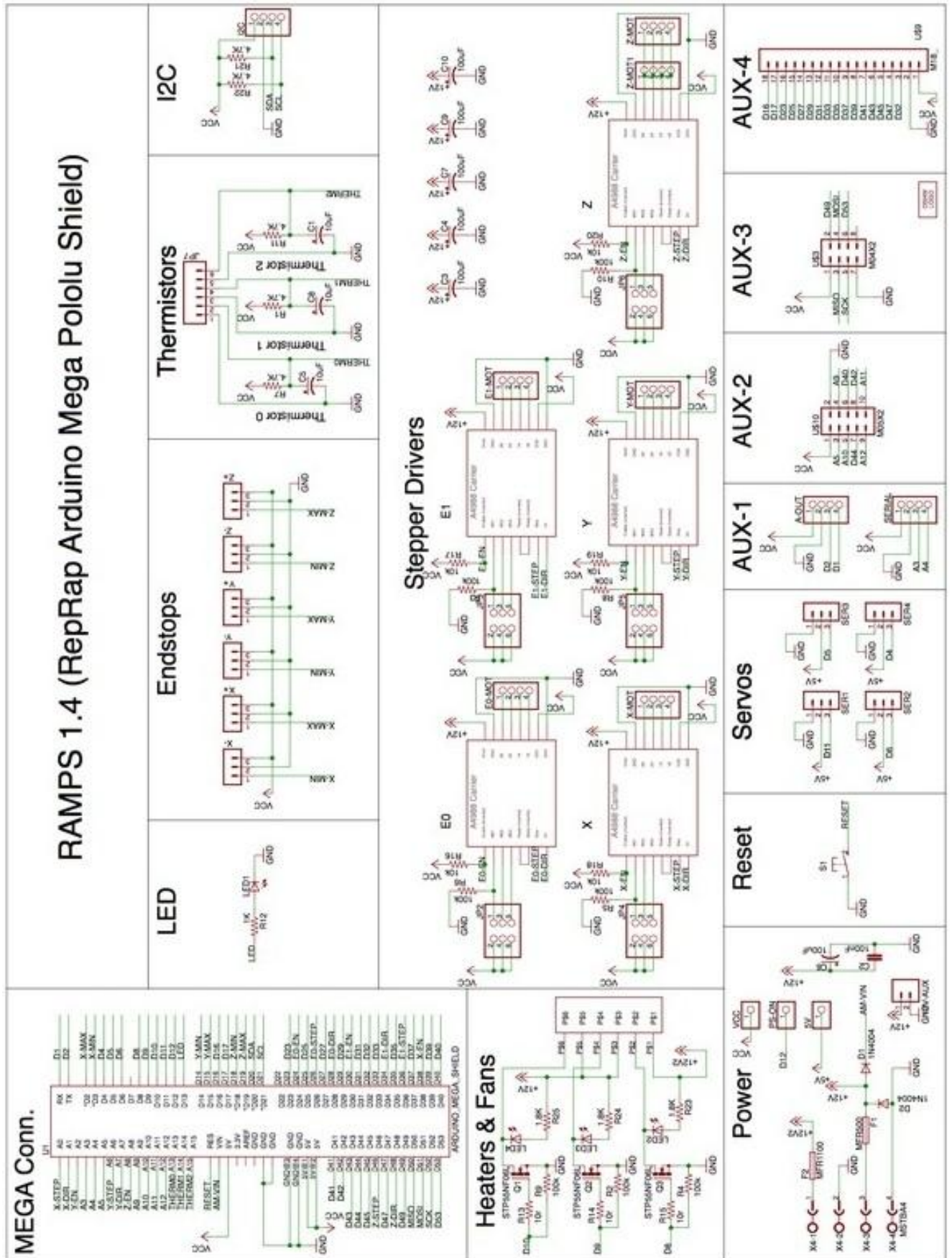
- **Τεχνικά Χαρακτηρίστηκα:** RepRap Arduino Mega Pololu Shield

Πινάκας χαρακτηριστικών RAMPS

Τύπος	RAMPS 1.4
Τάση λειτουργίας	Μέχρι 35V
Heated Bed Control	Ναι με ασφάλεια 11A
Έλεγχος θερμοκρασίας	3 κυκλώματα για θερμίστορ
Οδηγοί Βηματικών κινητήρων	5 (4 και 1 για 2 ^ο Extruder)
Digital I/O Pins	6 σετ
Ασφάλεια για άνοδο τάσης	5A
Συνδέσεις	x5 2.54mm 1x4 female pin header
	x3 2.54mm 1x2 female pin header
	x28 2.54 female pin connector
	x6 70mm wire with 2.54mm female pin crimped to one end and 3.18mm female



RepRap Arduino Mega Pololu Shield



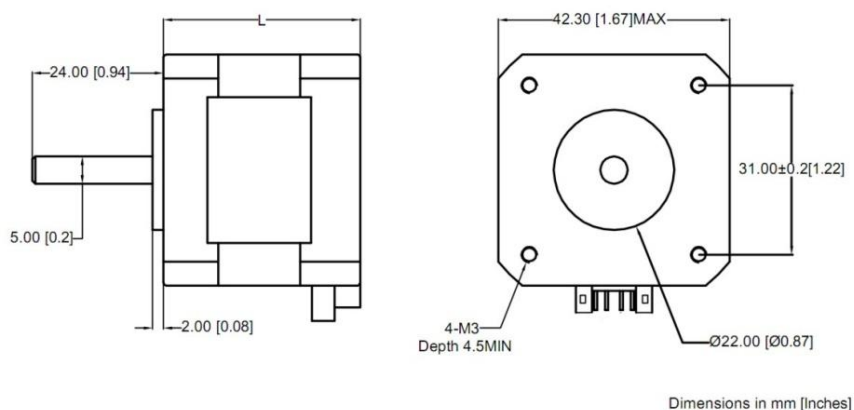
- Τεχνικά Χαρακτηρίστηκα: NEMA 17

Πινάκας χαρακτηριστικών NEMA 17

Τύπος	NEMA 17
Τάση λειτουργίας	12V
Ροπή	0,3 Nm
Maximum RPM	3000rpm
Ακρίβεια	1,8°
Συνδεσμολογία πηνίων	4καλοδίων παράλληλα πηνία
Αντίσταση Φάσης	5,25Ω
Ένταση Φάσης	1A
Επαγωγή	7,7mH
Θερμοκρασία Λειτουργίας	-20 °C έως +40 °C
Διαστάσεις	Μήκος 42,7mm
	Πλάτος 42.7mm
	Ύψος 35.1mm



NEMA 17



ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ NEMA 17

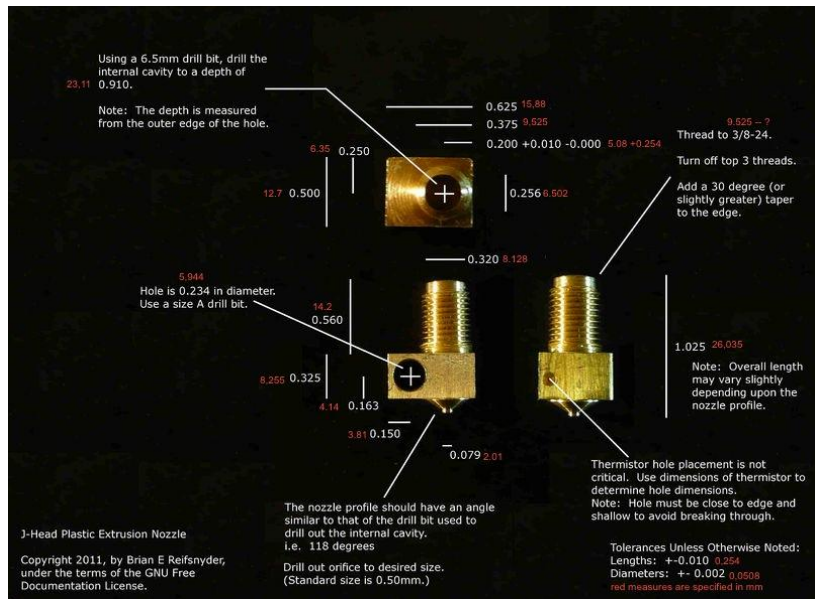
- Τεχνικά Χαρακτηρίστηκα: MK4 J-Head Hot End

Πινάκας χαρακτηριστικών Hotend

Τάση λειτουργίας	12V
Θερμοκρασία λειτουργίας	185 °C μέχρι 240 °C
Θερμαντική αντίσταση	12 volt 40 watt
Αισθητήρας θερμοκρασίας	Θερμίστορ EPCOS γυάλινο σώμα 100K
Διαμετρήματα ακροφυσίου	0.4mm
Συμβατό διαμέτρημα υλικού κατεργασίας	3mm filament



MK4 J-Head Hot End



ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΚΕΦΑΛΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ

- Τεχνικά Χαρακτηρίστηκα: Heated Bed MK2

Πινάκας χαρακτηριστικών Heated Bed

Τάση λειτουργίας	12V
Ένταση λειτουργίας	Έως 10A
Θερμοκρασία λειτουργίας	50 °C έως 110 °C
Τύπος εστίας θέρμανσης	Αντιστάσεις



Heated Bed MK2

- Τεχνικά Χαρακτηρίστηκα: T5 Timing Belt

Πινάκας χαρακτηριστικών Ιμάντα

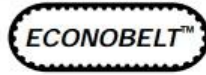
Τύπος	T5 timing belt
Βήμα δοντιού	5mm
Ύψος δοντιού	1,2mm
Πλάτος ιμάντα	Από 6mm έως 25mm
Υλικό κατασκευής ιμάντα	Ύφασμα Neoprene με ενίσχυση από ίνες υαλοβάμβακα επικαλυμμένο με Nylon
Τάση θραύσης	≥80N/mm
Θερμοκρασία λειτουργίας	-40°C έως 120°C



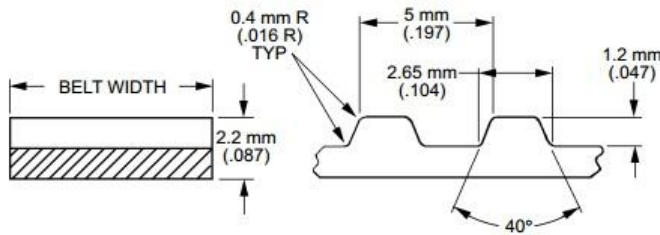
T5 Timing Belt

Σχέδιο και χαρακτηριστικά ιμάντα χρονισμού

T5 Timing Belts



Pitch 5 mm (.197")



QB-T5 - □ □ □ □ - □ □

PITCH LENGTH CODE

WIDTH CODE	Belt* Width
06	6 mm (.236)
10	10 mm (.394)
16	16 mm (.630)
25	25 mm (.984)

PITCH LENGTH CODE	Pitch Length		No. of Teeth
	mm	Inch	
0115	115	4.528	23
0150	150	5.906	30
0165	165	6.496	33
0185	185	7.283	37
0200	200	7.874	40
0210	210	8.268	42
0215	215	8.465	43
0220	220	8.661	44
0225	225	8.858	45
0250	250	9.843	50
0255	255	10.039	51
0260	260	10.236	52
0270	270	10.630	54
0275	275	10.827	55
0280	280	11.024	56
0295	295	11.614	59
0300	300	11.811	60
0305	305	12.008	61
0310	310	12.205	62
0325	325	12.795	65

PITCH LENGTH CODE	Pitch Length		No. of Teeth
	mm	Inch	
0330	330	12.992	66
0340	340	13.386	68
0350	350	13.780	70
0355	355	13.976	71
0365	365	14.370	73
0375	375	14.764	75
0390	390	15.354	78
0400	400	15.748	80
0410	410	16.142	82
0420	420	16.535	84
0450	450	17.717	90
0455	455	17.913	91
0480	480	18.898	96
0500	500	19.685	100
0505	505	19.882	101
0510	510	20.079	102
0525	525	20.669	105
0545	545	21.457	109
0550	550	21.654	110
0560	560	22.047	112

PITCH LENGTH CODE	Pitch Length		No. of Teeth
	mm	Inch	
0570	570	22.441	114
0575	575	22.638	115
0600	600	23.622	120
0610	610	24.016	122
0620	620	24.409	124
0630	630	24.803	126
0650	650	25.591	130
0665	665	26.181	133
0675	675	26.575	135
0685	685	26.969	137
0690	690	27.165	138
0700	700	27.559	140
0720	720	28.346	144
0725	725	28.543	145
0740	740	29.134	148
0750	750	29.528	150
0780	780	30.709	156
0800	800	31.496	160
0805	805	31.693	161

Continued on the next page

PITCH LENGTH CODE	Pitch Length		No. of Teeth
	mm	Inch	
0810	810	31.890	162
0815	815	32.087	163
0840	840	33.071	168
0860	860	33.858	172
0900	900	35.433	180
0940	940	37.008	188
0990	990	38.976	198
0995	995	39.173	199
1000	1000	39.370	200
1030	1030	40.551	206
1045	1045	41.142	209
1050	1050	41.339	210
1075	1075	42.323	215
1100	1100	43.307	220

PITCH LENGTH CODE	Pitch Length		No. of Teeth
	mm	Inch	
1380	1380	54.331	276
1390	1390	54.724	278
1520	1520	59.843	304
1800	1800	70.866	360
1940	1940	76.378	388
1960	1960	77.165	392
2120	2120	83.465	424
2220	2220	87.402	444
2260	2260	88.976	452
3060	3060	120.472	612
3255	3255	128.150	651
3540	3540	139.370	708
4075	4075	160.433	815

[1] [2]

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με την εκπόνηση αυτής της εργασίας, κατανοήσαμε κατά πολύ την λειτουργία των F.D.M. μηχανών ταχείας πρωτοτυποποίησης και την σημαντικότητα που έχει η κατασκευή πρωτότυπων μοντέλων. Ο χρόνος κατασκευής τους είναι πολύτιμος, διότι μειώνεται ο χρόνος διάθεσης του προϊόντος στην αγορά, κάνοντας την εκάστοτε εταιρία ανταγωνιστική. Επιπλέον, μέσα από την εργασία αυτή, είδαμε την άμεση επίπτωση που έχει η ταχεία πρωτοτυποποίηση στην δραστική μείωση του κόστους ενός προϊόντος, αφού για να κατασκευαστεί, χρειάζονται λιγότερα και μικρότερου κόστους πρωτότυπα μοντέλα, καθώς και λιγότερο ανθρώπινοι πόροι, σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής πρωτοτύπων.

Η αρχή λειτουργίας του αριθμητικού έλεγχου της μηχανής που κατασκευάσαμε, μας βοήθησε να εξασκήσουμε τις δεξιότητές μας, στον προγραμματισμό εργαλειομηχανών C.N.C., καθώς και στην παράγωγη, μικρών πρωτότυπων αντικειμένων και στα χαρακτηρισίτηκα τους. Κατασκευάζοντας το μοντέλο Prusa Mendel, το οποίο είναι παράδειγμα από την πληθώρα μηχανών πρωτοτυποποίησης που υπάρχουν, είδαμε ποσό σημαντικό ρολό παίζουν οι ακριβείς μετρήσεις που παίρνουμε, και η σωστή αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων που είχαμε στην κατοχή μας.

Σε μεγάλο βαθμός, αναπτύξαμε περαιτέρω τις υπάρχουσες γνώσεις μας, στα σχεδιαστικά προγράμματα που υπάρχουν διαθέσιμα, καθώς και στην επεξεργασία ψηφιακών αρχείων C.A.D. για την παράγωγη του αποτελέσματος που επιθυμούσαμε.

Η μηχανή αυτή, έπειτα από περαιτέρω έρευνα που πραγματοποιήσαμε στον τομέα των μηχανών πρωτοτυποποίησης, μπορεί να βελτιωθεί ακόμα περισσότερο, παράγοντας πρωτότυπα καλύτερης ακριβείας, και ποιοτικότερων λεπτομερών. Αντικαθιστώντας ορισμένα πλαστικά μέρη που φέρει, με μεταλλικά, οι εκτυπώσεις κομματιών, θα γίνονται με μεγαλύτερη ακρίβεια, πιο λείες επιφάνειες, και η συντήρηση της μηχανής, που τώρα χρειάζεται, μειώνεται κατά πολύ. Επίσης, επεμβάσεις μπορούν να γίνουν και στον σκελετό της μηχανής, κάνοντάς τον πιο στιβαρό, με άμεσο αντίκτυπο στην χρήση της μηχανής, καθώς και σε κύρια

μηχανολογικά μέρη όπως ο τρόπος κύλισης στους άξονες, η μετάδοση της κίνησης και άλλα.

Με το πέρας αυτής της πτυχιακής εργασίας, έχουμε διευρύνει τους ορίζοντες σκέψης μας, στην ανάπτυξη, νέων εναλλακτικών τρόπων κατασκευής και παράγωγης αντικειμένων, και στην κατανόηση της σημαντικότητας αυτών.

Επιπλέον, η παρούσα εργασία, αποτελεί ένα παράδειγμα από τεραστία χρήση μηχανών πρωτοτυποποίησης που γίνεται σε παγκόσμιο επίπεδο, καθώς και τα οφέλη που παρέχουν στις βιομηχανικές γραμμές παράγωγης.

Η αξιοποίηση τέτοιου είδους μηχανών, έχει γίνει πλέον και σε τομείς, που δεν σχετίζονταν σε μεγάλο βαθμό με τις μαζικές γραμμές παράγωγης, όπως η ιατρική, η κοσμηματοποιία και η κατασκευή μακετών, αφού πρακτικά οι χρήσεις ενός τέτοιου μηχανήματος είναι άπειρες.

Αναμένεται στο μέλλον, να αναπτυχθούν νέα υλικά κατεργασίας των μηχανών ταχείας πρωτοτυποποίησης, βελτιώνοντας περαιτέρω τον χρόνο κατασκευής ενός πρωτοτύπου αντικείμενου, καθώς και τις μηχανικές του ιδιότητες σε μεγάλο βαθμό. Εξετάζονται διάφορων ειδών πολυμερή, καθώς νέοι τρόποι εκτύπωσης κομματιών από μέταλλο, αλλάζοντας ριζικά την παράγωγή όπως την ξέρουμε μέχρι σήμερα. Η εξέλιξη των υπολογιστικών συστημάτων, και η δημιουργία, νέων, γρηγορότερων πρωτοκόλλων επικοινωνίας μεταξύ μηχανής και υπολογιστή, προβλέπεται να βοηθήσει σε μεγάλο βαθμό, την παράγωγή όλων των αντικειμένων και προϊόντων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] <http://el.wikipedia.org/wiki/>

[2] http://RepRap.org/wiki/Main_Page

[3] <http://www.3dsystems.com/>

[4] <http://www.stratasys.com/>

[5] Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age
N.HOPKINSON, R.J.M. HAGUE, P.M. DICKENS

[6] www.wohlerassociates.com

[7] www.newscientist.com

[8] www.zcorp.com

[9] www.infovis.net

[10] www.padtinc.com

[11] www.ad-mkt-review.com/public

[12] www.machinedesign.com

[13] Advanced Manufacturing Technology for Medical Application, Ian Gibson

Πηγές εικόνων:

- <http://el.wikipedia.org/wiki/>
- http://RepRap.org/wiki/Main_Page
- <http://www.3dsystems.com/>
- <http://www.stratasys.com/>
- www.wohlerassociates.com