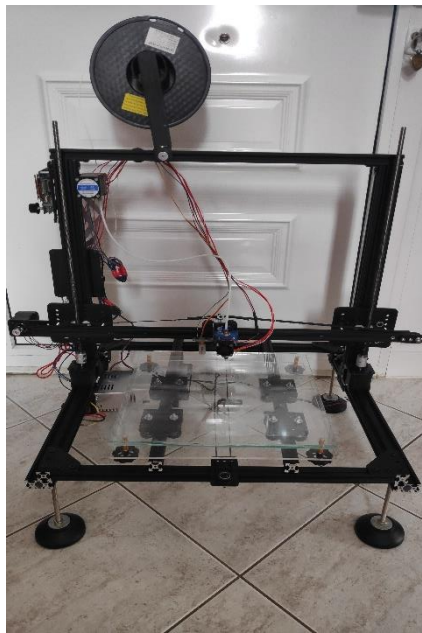


ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Εκτυπωτής 3D»



Του φοιτητή :

Μαυρουδή Ιωάννη

Αρ. Μητρώου: 516082

Επιβλέπων

Γιακουμής Άγγελος

Καθηγητής

Ημερομηνία: 02/09/2022

Τίτλος Π.Ε.: Εκτυπωτής 3D

Κωδικός Δ.Ε. 17213

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: Μαυρουδής Ιωάννης

Όνοματεπώνυμο εισηγητή: Γιακουμής Άγγελος

Ημερομηνία ανάληψης Π.Ε. 24-12-2020

Ημερομηνία περάτωσης Π.Ε. 02/09/2022

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Μαυρουδή Ιωάννη που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

*«Στους γονείς μου Κωνσταντίνο και Ουρανία ,στις αδερφές μου Μαριάννα,
Χριστίνα, Βαλέρια και σε όσους με εμπνέουν να γίνω καλύτερος.»*

Πρόλογος

Η συγκεκριμένη Π.Ε. επιλέχθηκε με σκοπό την θεμελίωση και απόκτηση γνώσεων πάνω στην υλοποίηση μιας λεπτομερούς και δύσκολης κατασκευής όπως είναι ο 3D εκτυπωτής καθώς επίσης και στην εντριβή με το ποικίλο λογισμικό για την επίτευξη διάφορων λειτουργιών και εκτυπώσεων. Με το πέρας της Π.Ε. έγιναν κατανοητές οι βασικές αρχές για μια ολοκληρωμένη και επιτυχή εκτύπωση, το προγραμματιστικό περιβάλλον για την εγκατάσταση του λογισμικού καθώς επίσης και τα προγράμματα σχεδίασης και προσομοίωσης. Ο λόγος επιλογής του θέματος αποτελεί μακροχρόνια επιθυμία και η συγκεκριμένη Π.Ε. αποτέλεσε το έναυσμα ενασχόλησης με αυτό το μεγάλο, και παρόλα αυτά πρώιμο, κεφάλαιο που ονομάζεται τρισδιάστατη εκτύπωση. Τέλος, όλα τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη κριτικής σκέψης και την απόκτηση γνώσεων και εμπειριών επάνω στην επιλογή υλικών και αποφάσεων και το κυριότερο, στην υπομονή και επιμονή παρά το πέρας πολλαπλών δυσκολιών.

Περίληψη

Στην παρακάτω πτυχιακή εργασία παρουσιάζονται και αναλύονται το ξεκίνημα της τρισδιάστατης εκτύπωσης, τα είδη και η λειτουργία των τρισδιάστατων εκτυπωτών καθώς επίσης και τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιήσουν. Η ταχεία ανάπτυξη της συγκεκριμένης τεχνολογίας έχει επιφέρει πολλαπλά οφέλη σε πολλούς τομείς, με μερικούς από αυτούς να είναι η εκπαίδευση, βιομηχανία και η ιατρική. Στην σημερινή εποχή, έχει εξελιχθεί σε μεγάλο βαθμό προκαλώντας την δημιουργία πολλών ειδών εκτύπωσης, που αποτελούν γνώμονα για την κατανόηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης και προφανώς την επιλογή του κατάλληλου είδους 3D εκτυπωτή. Στην συγκεκριμένη Π.Ε. κατασκευάστηκε ένας καρτεσιανός FDM 3D εκτυπωτής ο οποίος λόγω του μεγάλου μεγέθους του μπορεί να υποστηρίξει εκτυπώσεις 320mmx320mmx300mm (στους άξονες X,Y και Z αντίστοιχα). Η επιλογή υλικών έγινε διεξοδικά καθώς οι αστοχίες έχουν σημαντικές επιπτώσεις, με τα πιο σημαντικά υλικά να αποτελούν η μητρική πλακέτα που καθορίζει την επικοινωνία και την τρόπο λειτουργίας όλων των εξαρτημάτων και το ακροφύσιο (nozzle) που καθόριζε την ποιότητα και το υλικό εκτύπωσης. Η παραπάνω κατασκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση λεπτομερών μοντέλων τρισδιάστατης εκτύπωσης σε καθημερινή βάση χωρίς να χρειάζεται σημαντικές και άμεσες βελτιώσεις. Όλα τα παραπάνω θα αναλυθούν με λεπτομέρειες στα επόμενα κεφάλαια.

«3D Printer»

«Mavroudis Ioannis»

Abstract

This thesis presents and analyzes the beginning of 3D printing, the types and operation of 3D printers as well as the materials they can use. The rapid development of this technology has brought multiple benefits in many fields, some of them being education, industry and medicine. In today's time, it has evolved to a great extent causing the creation of many kinds of printing, which are the driving force for understanding 3D printing and obviously choosing the right kind of 3D printer. In this particular thesis, a Cartesian FDM 3D printer was built which due to its large size can support 320mmx320mmx300mm prints (in X, Y and Z axes respectively). The selection of materials was thorough, as failures have a significant impact, with the most important materials being the motherboard, which determines the communication and operation of all components, and the nozzle, which determines the quality and material of the print. The above construction can be used to implement detailed 3D printing models on a daily basis without the need for significant and immediate improvements. All the above will be analyzed in detail in the following chapters.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επόπτη μου, τον κύριο Γιακουμή Άγγελο για την πολύτιμη βοήθεια, συμβουλές και καθοδήγησή του όλους αυτούς τους μήνες. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους φίλους, την οικογένειά μου και όλους όσους με υποστήριξαν ψυχολογικά και οικονομικά καθ' όλη τη συγγραφή αυτής της διατριβής.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	4
Περίληψη.....	5
Abstract	6
Περιεχόμενα	8
Κατάλογος Πινάκων.....	11
Κατάλογος Εικόνων	12
Συνομογραφίες.....	15
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στην τρισδιάστατη εκτύπωση.....	17
1.1 Εισαγωγή και ορισμός της τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	17
1.2 Ιστορική αναδρομή.....	17
1.3 Η διαδικασία της 3D εκτύπωσης βήμα-βήμα.....	20
1.3.1 Απόκτηση τρισδιάστατου μοντέλου.....	20
1.3.2 Επιλογή μορφής αρχείου	20
1.3.3 Τεμαχισμός του τρισδιάστατου μοντέλου	21
1.3.4 Εκτύπωση	22
1.4 Τα πλεονεκτήματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην βιομηχανία	23
1.4.1 Εξατομίκευση.....	23
1.4.2 Περιπλοκότητα.....	24
1.4.3 Βιωσιμότητα.....	25
1.4.4 Ανακύκλωση	25
1.4.5 Οικονομίες κλίμακας.....	26
1.5 Επίλογος 1ου κεφαλαίου	27
Κεφάλαιο 2: 3D εκτυπωτές και υλικά εκτύπωσης	27
2.1 Εισαγωγή στα είδη 3D εκτυπωτών.....	27
2.1.1 1 ^η Γενική κατηγορία - Εκτυπωτές FDM.....	27
2.1.2 Εκτυπωτές PolyJet.....	31
2.1.3 Εκτυπωτές LENS (Laser Engineered Net Shaping)	31
2.1.4 Εκτυπωτές LOM (Laminated object manufacturing)	32
2.2 Είδη 3D εκτυπωτών 2ης γενικής κατηγορίας.....	33
2.2.1 Εκτυπωτές SLA (Stereolithography Apparatus)	33
2.2.2 Εκτυπωτές DLP (Digital Light Processing)	34

2.2.3 Εκτυπωτές SLS (Selective Laser Sintering).....	36
2.2.4 Εκτυπωτές 3DP (Three-Dimensional Printing).....	37
2.3 Είδη τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	38
2.3.1 PBF (Powder Bed Fusion).....	39
2.3.2 Binder Jetting	43
2.3.3 Material Jetting.....	45
2.3.3 DED (Directed Energy Deposition)	47
2.3.4 Material Extrusion.....	49
2.3.4 Sheet Lamination.....	50
2.3.5 Vat Photopolymerization.....	52
2.4 Είδη υλικών και νημάτων σε έναν εκτυπωτή FDM	53
2.4.1 PLA (Polylactic acid)	55
2.4.2 ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene).....	55
2.4.3 Nylon (Polyamides).....	56
2.4.4 PVA (Polyvinyl alcohol)	56
2.4.5 PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol).....	57
2.4.6 HIPS (High Impact Polystyrene).....	57
2.5 Επίλογος 2 ^{ου} Κεφαλαίου.....	58
Κεφάλαιο 3: Υλοποίηση και λειτουργία του 3D εκτυπωτή	58
3.1 Εισαγωγή στο πρότζεκτ.....	58
3.2 Δομικά υλικά και υλικά στήριξης	59
3.3 Λειτουργικά υλικά και εξαρτήματα	61
3.3.1 Κίνηση στον άξονα Z.....	61
3.3.2 Κίνηση στους άξονες X και Y.....	62
3.3.3 Κίνηση του νήματος.....	64
3.3.4 BIGTREETECH SKR2 REVB (Motherboard).....	65
3.3.5 TMC2209 V2.0 (Stepper Motor Drivers).....	67
3.3.6 BIGTREETECH TFT-E3 V3.0 (LCD Display).....	67
3.3.7 BLTOUCH V3.1 (Leveling Sensor).....	68
3.4 Λογισμικό και επικοινωνία	71
3.4.1 Marlin Firmware.....	72
3.4.2 Pronterface.....	73
3.4.3 Ultimate-Cura Slicer.....	75

3.5 Επίλογος 3 ^{ου} κεφαλαίου	76
Κεφάλαιο 4: Προβλήματα και συμπεράσματα.....	76
4.1 Εισαγωγή 4 ^{ου} κεφαλαίου	76
4.2 Προβλήματα, λύσεις και μελλοντικές βελτιώσεις.....	76
4.2 Επίλογος 4 ^{ου} κεφαλαίου - Συμπεράσματα.....	80
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	82

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1. Δομικά υλικά	60
Πίνακας 3.2. Λειτουργικά υλικά και εξαρτήματα	69

Κατάλογος Εικόνων

Κεφάλαιο 1^ο

Εικόνα 1.1. Ο πρώτος εμπορικός 3D εκτυπωτής (SLA-1).....	18
Εικόνα 1.2 Ο RepRap Mendel, εκτυπωμένος από έναν άλλον 3D Printer.....	19
Εικόνα 1.3. Το πρώτο 3D εκτυπωμένο σπίτι στην Γερμανία.....	19
Εικόνα 1.4. Χρήση raft και support στην ίδια εκτύπωση.....	22
Εικόνα 1.5. Όλες οι πιθανές επιλογές για μία ολοκληρωμένη και επιτυχημένη εκτύπωση.....	23
Εικόνα 1.6. 3D εκτυπωμένη θήκη κινητού	24
Εικόνα 1.7. Μία πολύπλοκη και ιδιαίτερη εκτύπωση.....	24
Εικόνα 1.8. Διαδικασία ανακύκλωσης για την δημιουργία 3D αντικειμένων	26

Κεφάλαιο 2^ο

Εικόνα 2.1. Η FDM διαδικασία σε 5 βήματα.....	28
Εικόνα 2.2. Μερικά από τα είδη FDM 3D εκτυπωτών	30
Εικόνα 2.3. Διαδικασία εκτύπωσης με εκτυπωτή PolyJet.....	31
Εικόνα 2.4. Διαδικασία εκτύπωσης με εκτυπωτή LEN.....	32
Εικόνα 2.5. Διαδικασία εκτύπωσης με εκτυπωτή LOM	33
Εικόνα 2.6. Εκτυπωτής SLA	34
Εικόνα 2.7. Μερικές από τις διαφορές μεταξύ SLA και DLP 3D εκτυπωτών.....	35
Εικόνα 2.8. Εκτυπωτής SLS.....	36
Εικόνα 2.9. Εκτυπωτής 3DP βιομηχανικού μεγέθους.....	37
Εικόνα 2.10. Βιομηχανικοί εκτυπωτές.....	38
Εικόνα 2.11. Εκτυπωτής που κάνει χρήση SLS	39
Εικόνα 2.12. Εκτυπωτής που κάνει χρήση SLM.....	40
Εικόνα 2.13. Εκτυπωτής που κάνει χρήση DMLS.....	41
Εικόνα 2.14. Εκτυπωτής που κάνει χρήση EBM	41
Εικόνα 2.15. Εκτυπωτής που κάνει χρήση DMLM	42
Εικόνα 2.16. Εκτυπωτής που κάνει χρήση SHS.....	42
Εικόνα 2.17. Η διαδικασία του Powder Bed Fusion	43
Εικόνα 2.18. Εκτυπωτής που κάνει χρήση Binder Jetting	44
Εικόνα 2.19. Η διαδικασία του Binder Jetting	45
Εικόνα 2.20. Εκτυπωτής που κάνει χρήση Material Jetting.....	46
Εικόνα 2.21. Η διαδικασία του Material Jetting.....	47

Εικόνα 2.22. Εκτυπωτής που κάνει χρήση DED.....	48
Εικόνα 2.23. Η διαδικασία του Directed Energy Deposition.....	48
Εικόνα 2.24. Εκτυπωτής που κάνει χρήση Material Extrusion.....	49
Εικόνα 2.25. Η διαδικασία του Material Extrusion.....	50
Εικόνα 2.26. Εκτυπωτής που κάνει χρήση UAM.....	51
Εικόνα 2.27. Εκτυπωτής που κάνει χρήση Vat Photopolymerization.....	52
Εικόνα 2.28. Η διαδικασία του Vat Photopolymerization	53
Εικόνα 2.29. Εμφανή προβλήματα ενός φθηνού νήματος	54
Εικόνα 2.30. Οι διαφορές ανάμεσα σε PLA, ABS και Nylon.....	56

Κεφάλαιο 3^ο

Εικόνα 3.1. Οι συνδέσεις των εξαρτημάτων σε μία από τις τέσσερις γωνίες του πλαισίου	59
Εικόνα 3.2. Block διάγραμμα λειτουργίας.....	61
Εικόνα 3.3. Η σύνδεση των εξαρτημάτων για την κίνηση στον άξονα Z.....	62
Εικόνα 3.4. Η σύνδεση των εξαρτημάτων για την κίνηση του μάντα χρονισμού και στις δύο πλευρές του άξονα X.....	63
Εικόνα 3.5. Το κρεβάτι και η σύνδεση των εξαρτημάτων για την κίνηση στον άξονα Y	63
Εικόνα 3.6. Ο μηχανισμός εξώθησης του νήματος πριν εισέλθει στο σωληνάκι PTFE	64
Εικόνα 3.7. Όλο το σύστημα του nozzle μαζί με το BLtouch.....	65
Εικόνα 3.8. Όλες οι διαθέσιμες θύρες σύνδεσης σε μία SKR2 μητρική πλακέτα	66
Εικόνα 3.9. Τα pins και η συνδεσμολογία του driver TMC2209.....	67
Εικόνα 3.10. Διάγραμμα συνδεσιμότητας της οθόνης TFT35-E3 V3.0	68
Εικόνα 3.11. Ο τρόπος σύνδεσης του BLtouch πάνω στην SKR2.....	69
Εικόνα 3.12. Ηλεκτρονικό σχέδιο συνδεσμολογίας σε μία SKR2 μητρική πλακέτα.....	72
Εικόνα 3.13. Όλη η διαδικασία σε τρία βήματα: 1) Ρύθμιση του Marlin, 2) Εγκατάσταση του λογισμικού στην μητρική πλακέτα και 3) Εκτύπωση	72
Εικόνα 3.14. Το interface του προγράμματος Pronterface.....	73
Εικόνα 3.15. Διάγραμμα ροής της επικοινωνίας του εκτυπωτή με το Pronterface.....	74
Εικόνα 3.16. Το interface του προγράμματος Ultimate-Cura	75

Κεφάλαιο 4^ο

Εικόνα 4.1. Το Leveling Foot σε μία από τις τέσσερις γωνίες.....	77
Εικόνα 4.2. Η επίλυση των προβλημάτων στον άξονα Z.....	78
Εικόνα 4.3. Η επίλυση του προβλήματος με το BLtouch	79
Εικόνα 4.4. Τα προβλήματα στην εκτύπωση χωρίς ανεμιστηράκι	80

Εικόνα 4.5. Το τελικό αποτέλεσμα από δύο γωνίες λήψης..... 81

Συντομογραφίες

- Π.Ε. Πτυχιακή εργασία
- 3D Three Dimensional
- CAD Computer-aided Design
- SLA Stereolithography
- SLS Selective Laser Sintering
- FDM Fused Filament Modeling
- FFF Fused Filament Fabrication
- 3MF 3D Manufacturing Format
- AMD Additive Manufacturing File
- OBJ Object File Format
- STL Standard Triangle Language
- USB Universal Serial Bus
- SD Secure Digital
- ABS Acrylonitrile Butadiene Styrene
- PLA Polylactic Acid
- UV Ultraviolet
- LENS Laser Engineered Net Shaping
- LOM Laminated Object Manufacturing
- DLP Digital Light Processing
- 3DP Three-Dimensional Printing
- MIT Massachusetts Institute of Technology
- DIY Do It Yourself
- PBF Powder Bed Fusion
- DMLS Direct Metal Laser Sintering
- EBM Electron Beam Melting
- SHS Selective Heat Sintering
- SLS Selective Laser Sintering
- SLM Selective Laser Melting
- DMLM Direct Metal Laser Melting
- UAM Ultrasonic Additive Manufacturing
- CNC Computer numerical control

- PVA Polyvinyl Alcohol
- PETG Polyethylene Terephthalate Glycol
- HIPS High Impact Polystyrene Sheet

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στην τρισδιάστατη εκτύπωση

1.1 Εισαγωγή και ορισμός της τρισδιάστατης εκτύπωσης

Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μία προσθετική παραγωγική διαδικασία (additive manufacturing) που κατασκευάζει ένα φυσικό αντικείμενο μέσω της ανάλυσης ενός ψηφιακού σχεδίου (CAD ή ψηφιακού 3D μοντέλου). Συγκεκριμένα, κατά την διάρκεια της διαδικασίας αυτής λεπτά στρώματα από το εξαγόμενο υλικό (πλαστικό, μέταλλο, τσιμέντο κ.α.) ομαδοποιούνται μεταξύ τους, το ένα πάνω στο άλλο, και μετά από συνεχή, λεπτομερή και αυτοματοποιημένο έλεγχο όλων των διαδικασιών μέσω ενός υπολογιστή καταλήγουμε σε ένα ομοιόμορφο και επιθυμητό αποτέλεσμα [1], [2], [10].

Οι 3D εκτυπωτές πρωτοεμφανίστηκαν ως ένα καινοτόμο εργαλείο για τις βιομηχανικές ανάγκες της εποχής, δηλαδή για ταχεία προτυποποίηση. Η δυνατότητα που παρουσιάστηκε για την τροποποίηση και δημιουργία μοναδικών αντικειμένων που δεν μπορούσαν να βρεθούν ή να κατασκευαστούν εύκολα, έκαναν την τρισδιάστατη εκτύπωση να μοιάζει ως μία ιδανική λύση. Παρά τις προσπάθειες τις εποχής, το μέγεθος και το κόστος των πρώτων εκτυπωτών έκαναν τα οράματα των ευεργετών της τρισδιάστατης εκτύπωσης να μοιάζουν ανέφικτα. Μετά από χρόνια εξέλιξης της τεχνολογίας, φτάσαμε σε σημείο όπου το κόστος ενός 3D εκτυπωτή είναι αρκετά χαμηλό για να μπορεί να βρίσκεται στο σπίτι κάθε ανθρώπου, ωστόσο, ακόμα και τώρα οι μεγάλοι χρόνοι εκτύπωσης δεν επιτρέπουν στην ιδεολογία της ταχείας προτυποποίησης να ενταχθεί μόνιμα στην μαζική παραγωγή 3D αντικειμένων [1], [2].

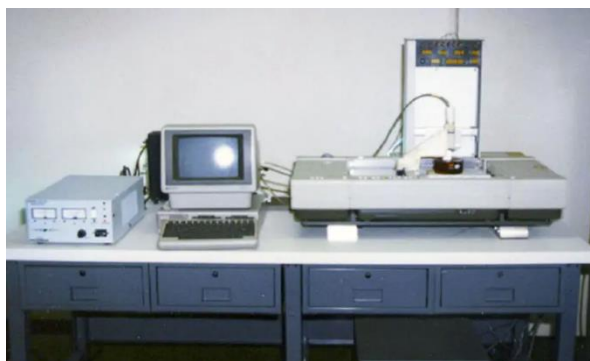
1.2 Ιστορική αναδρομή

Η γενική ιδέα και διαδικασία χρησιμοποίησης της τρισδιάστατης εκτύπωσης περιεγράφηκε για πρώτη φορά από τον Murray Leinster το 1945 στην ιστορία μικρού μήκους “Things Pass By” όπου αφού τροφοδοτούσε έναν μηχανικό βραχίονα με πλαστικό, αυτός με την σειρά του σχημάτιζε αντικείμενα εξάγοντας το λιωμένο πλαστικό. Τον Νοέμβριο του 1950 έχουμε ακόμα μια αναφορά, αυτή την φορά στην ιστορία του Raymond F. Jones με τίτλο “Tools of the Trade” όπου παρουσίασε τον 3D εκτυπωτή ως ένα μοριακό σπρέι [10], [11].

Οι πρώτες καταγεγραμμένες αλληλεπιδράσεις με την τρισδιάστατη εκτύπωση μπορούν να εντοπιστούν από τις αρχές του 1980 στην Ιαπωνία. Το 1981, ο Hideo Kodama προσπαθούσε να βρει έναν τρόπο για να αναπτύξει ένα σύστημα ταχείας προτυποποίησης και έτσι του ήρθε η ιδέα να προσεγγίσει την κατασκευή με πολλαπλά στρώματα, χρησιμοποιώντας φωτοευαίσθητη ρητίνη που πολυμεριζόταν με το υπεριώδες φως. Παρόλο που ο Kodama δεν κατάφερε να καταθέσει την “πατέντα” της συγκεκριμένης τεχνολογίας για να πιστωθεί και επίσημα τον ίδιο, από πολλούς θεωρείται ως ο πρώτος εφευρέτης αυτού του συστήματος παραγωγής, το οποίο αποτελεί μία πρόιμη έκδοση της σύγχρονης μηχανής SLA (Στερεολιθογραφία) [10], [11].

Λίγα χρόνια αργότερα, μία ομάδα τριών Γάλλων ερευνητών επιδίωκε επίσης να δημιουργήσει μια μηχανή γρήγορης δημιουργίας πρωτοτύπων, ωστόσο αντί για ρητίνη προσπάθησαν να δημιουργήσουν ένα σύστημα που θα μετέτρεπε μονομερή υγρά σε στερεά με την χρήση ενός λέιζερ. Παρομοίως με τον Kodama, δεν κατάφεραν να πιστοποιήσουν την τεχνολογία αυτή αλλά εξακολουθούν να πιστώνονται ότι την δημιούργησαν οι ίδιοι [10], [11].

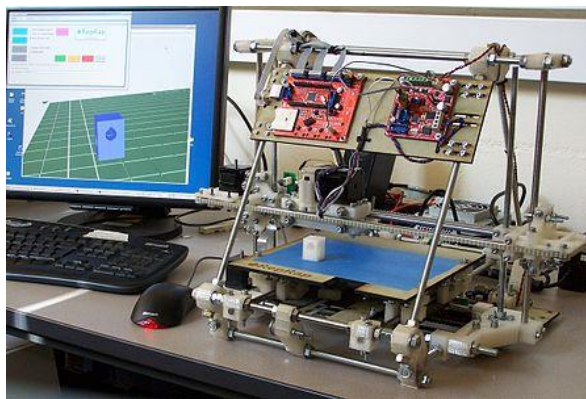
Την ίδια χρονιά, ο Charles Hull, ένας Αμερικανός κατασκευαστής επίπλων που ήταν απογοητευμένος καθώς δεν μπορούσε να δημιουργήσει εύκολα μικρά και προσαρμοσμένα εξαρτήματα που χρειαζόταν καθημερινά στην δουλειά του, κατέθεσε το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για το SLA. Ο Hull ανέπτυξε ένα σύστημα για τη δημιουργία αυτών των μοντέλων επιχειρώντας να χρησιμοποιήσει τη φωτοευαίσθητη ρητίνη στρώμα προς στρώμα. Το 1986 υπέβαλε την αίτησή του για δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για την τεχνολογία και το 1988 ίδρυσε την 3D Systems Corporation. Ο πρώτος εμπορικός εκτυπωτής SLA 3D, ο SLA-1, κυκλοφόρησε από την εταιρεία του το 1988. Παρά την τεχνολογία της εποχής, το SLA δεν ήταν η μόνη διαδικασία παραγωγής πρόσθετων που εξερευνήθηκε κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου [10], [11].



Εικόνα 1.1. Ο πρώτος εμπορικός 3D εκτυπωτής (SLA-1)

Το 1988, ο Carl Deckard στο Πανεπιστήμιο του Τέξας κατέθεσε το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για την τεχνολογία Selective Laser Sintering (SLS). Αυτό το σύστημα συγχώνευε σκόνες, αντί για υγρό, χρησιμοποιώντας λέιζερ. Το Fused Deposition Modeling (FDM) κατοχυρώθηκε επίσης με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας περίπου την ίδια εποχή από τον Scott Crump. Το FDM, που ονομάζεται επίσης “Fused Filament Fabrication (FFF)”, διαφέρει από το SLS και το SLA στο ότι αντί να χρησιμοποιεί φως, το νήμα εξωθείται απευθείας από ένα θερμαινόμενο ακροφύσιο. Η τεχνολογία FFF έχει γίνει η πιο κοινή μορφή τρισδιάστατης εκτύπωσης που βλέπουμε σήμερα. Αυτές οι τρεις τεχνολογίες δεν είναι οι μόνοι τύποι μεθόδων τρισδιάστατης εκτύπωσης που υπάρχουν, όμως, είναι οι τρεις που χρησιμεύουν ως δομικά στοιχεία που θα θέσουν τις βάσεις για την ανάπτυξη της τεχνολογίας και για τη διακοπή της βιομηχανίας [10], [11].

Στη δεκαετία του '90, πολλές εταιρείες και νέες επιχειρήσεις άρχισαν να εμφανίζονται και να πειραματίζονται με τις διαφορετικές τεχνολογίες κατασκευής προσθέτων. Το 2006, κυκλοφόρησε ο πρώτος εμπορικά διαθέσιμος εκτυπωτής SLS, αλλάζοντας την ιδεολογία όσον αφορά τη δημιουργία κατ' απαίτηση κατασκευής βιομηχανικών ανταλλακτικών. Τα εργαλεία CAD έγιναν ακόμα πιο διαθέσιμα, επιτρέποντας στους ανθρώπους να αναπτύξουν τρισδιάστατα μοντέλα στους υπολογιστές τους. Αυτό είναι ένα από τα πιο σημαντικά εργαλεία στα αρχικά στάδια της δημιουργίας μιας τρισδιάστατης εκτύπωσης. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, τα μηχανήματα ήταν πολύ διαφορετικά από αυτά που χρησιμοποιούμε τώρα, ήταν δύσκολα στη χρήση, ακριβά και πολλές από τις τελικές εκτυπώσεις απαιτούσαν πολλή επεξεργασία για την διαμόρφωση του τελικού αποτελέσματος. Στη συνέχεια, το 2005, η εταιρεία Open Source άλλαξε το παιχνίδι για την τρισδιάστατη εκτύπωση, δίνοντας στους ανθρώπους μεγαλύτερη πρόσβαση σε αυτήν την τεχνολογία. Ο Δρ. Adrian Bowyer δημιούργησε το RepRap Project, το οποίο ήταν μια πρωτοβουλία ανοιχτού κώδικα για τη δημιουργία ενός 3D εκτυπωτή που θα μπορούσε να δημιουργήσει έναν άλλο 3D εκτυπωτή, βασιζόμενος σε 3D εκτυπωμένα αντικείμενα [10], [11].



Εικόνα 1. 2 Ο RepRap Mendel, εκτυπωμένος από έναν άλλον 3D Printer

Το 2008, εκτυπώθηκε το πρώτο προσθετικό πόδι, προωθώντας την τρισδιάστατη εκτύπωση στο προσκήνιο και εισάγοντας τον όρο σε εκατομμύρια ανθρώπους σε όλο τον κόσμο. Επειδή η τεχνολογία ήταν πλέον πιο διαθέσιμη σε νέες εταιρείες και στον ανταγωνισμό, οι τιμές των τρισδιάστατων εκτυπωτών άρχισαν να μειώνονται και η τρισδιάστατη εκτύπωση έγινε όλο και πιο προσιτή [10], [11].

Καθώς ωρίμαζαν οι διάφορες διεργασίες πρόσθετων, έγινε σαφές ότι σύντομα η αφαίρεση μετάλλου δεν θα ήταν πλέον η μόνη διαδικασία επεξεργασίας μετάλλου που γίνεται μέσω ενός εργαλείου, μετατρέποντας μια μάζα πρώτης ύλης σε ένα επιθυμητό σχήμα στρώμα-στρώμα. Η δεκαετία του 2010 ήταν η πρώτη δεκαετία κατά την οποία μεταλλικά εξαρτήματα τελικής χρήσης, όπως βραχίονες κινητήρα και μεγάλα παξιμάδια θα καλλιεργούνταν (είτε πριν είτε αντί της μηχανικής κατεργασίας) στην παραγωγή εργασίας αντί να κατεργάζονταν υποχρεωτικά από υλικό ράβδου ή πλάκα. Εξακολουθεί να ισχύει ότι η χύτευση, η κατασκευή και η μηχανική κατεργασία είναι πιο διαδεδομένες από την κατασκευή προσθέτων στη μεταλλουργία, ωστόσο με τις τιμές των 3D εκτυπωτών να μειώνονται, καθιστώντας τους διαθέσιμους στο ευρύ κοινό, αυξήθηκε η ποιότητα και η ευκολία, συνεπώς και η χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης σε πολλούς εργασιακούς τομείς [10], [11].

Φτάνοντας στην σημερινή εποχή, έχουμε το 2019 να ολοκληρώνεται το μεγαλύτερο λειτουργικό 3D εκτυπωμένο κτίριο στον κόσμο ενώ η τρισδιάστατη εκτύπωση χρησιμοποιείται πλέον σταθερά στην ανάπτυξη ακουστικών βαρηκοΐας και άλλων εφαρμογών υγειονομικής περίθαλψης και πολλές βιομηχανίες και τομείς έχουν υιοθετήσει την τεχνολογία στην καθημερινή τους ροή εργασίας. Είναι ασφαλές να πούμε ότι η ιστορία της τρισδιάστατης εκτύπωσης εξακολουθεί να γράφεται και σημαντικές καινοτομίες και ιδέες να δημιουργούνται καθημερινά καθιστώντας το μέλλον της τρισδιάστατης εκτύπωσης άκρως ενδιαφέρον [10], [11].



Εικόνα 1.3. Το πρώτο 3D εκτυπωμένο σπίτι στην Γερμανία

1.3 Η διαδικασία της 3D εκτύπωσης βήμα-βήμα

Υπάρχουν πολλοί τρόποι για το ξεκίνημα μιας τρισδιάστατης εκτύπωσης καθώς το κάθε είδος εκτύπωσης, υλικού αλλά και εκτυπωτή έχει τις ιδιαιτερότητες του. Η απόκτηση ενός τρισδιάστατου μοντέλου και η τελειοποίηση της εκτύπωσης είναι βήματα που έχουν πολλαπλές μεθόδους ολοκλήρωσης με βάση το έργο ή τον εξοπλισμό σας. Η αρχική πηγή καθορίζει τον τρόπο δημιουργίας ή λήψης ενός τρισδιάστατου μοντέλου, ενώ η ποσότητα καθαρισμού και τελειοποίησης καθορίζει τις μεθόδους φινιρίσματος. Παρόλα αυτά, τα βασικά βήματα για την μεθοδολογία και ολοκλήρωση της παραμένουν τα ίδια και διευκολύνουν έτσι την κατανόηση και διεκπεραίωση της κάθε εκτύπωσης.

1.3.1 Απόκτηση τρισδιάστατου μοντέλου

Η διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης ξεκινά με ένα ψηφιακό σχέδιο ή μοντέλο. Αυτό το μοντέλο είναι μια ψηφιακή τρισδιάστατη αναπαράσταση ενός στερεού αντικειμένου που αποτελείται από τρίγωνα. Οι επιφάνειες αυτών των τριγώνων αποθηκεύονται στο αρχείο του υπολογιστή για να περιγράψουν τη γεωμετρία του μοντέλου. Όλα τα τρισδιάστατα αντικείμενα και οι μορφές που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη εκτύπωση χρησιμοποιούν τρίγωνα για να καθορίσουν την επιφάνεια ενός τρισδιάστατου μοντέλου. Υπάρχουν πολλοί τρόποι για την δημιουργία ή την απόκτηση ενός τρισδιάστατου μοντέλου, όπως η χρήση προγραμμάτων υπολογιστή, σαρωτών και κάμερας ή παραμετρικών μαθηματικών εξισώσεων[1], [2], [12].

Τρισδιάστατα μοντέλα μπορούν να δημιουργηθούν από:

- Την σχεδίαση του αντικείμενου μέσα σε λογισμικό τρισδιάστατων κινούμενων εικόνων, τέχνης, παιχνιδιών ή σχεδίασης με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD).
- 3D σαρωτές που μπορούν να σαρώσουν ολόκληρη την επιφάνεια και τις πλευρές ενός αντικείμενου για να δημιουργήσουν ένα τρισδιάστατο μοντέλο. Αυτό περιλαμβάνει ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές που παίρνουν μια εικόνα 2D και ανακατασκευάζουν και αποδίδουν σε 3D χρησιμοποιώντας επιλεγμένο λογισμικό υπολογιστή.
- Παραμετρικές μεθόδους που χρησιμοποιούν μαθηματικές εξισώσεις μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται μερικές φορές από διαδικτυακούς ιστότοπους.
- Τα προκατασκευασμένα τρισδιάστατα μοντέλα μπορούν επίσης να ληφθούν από ιστότοπους στο διαδίκτυο τόσο για εμπορική όσο και για ιδιωτική χρήση.

1.3.2 Επιλογή μορφής αρχείου

Ο πιο κοινός και διαδεδομένος τύπος αρχείου για πληροφορίες τρισδιάστατης μοντελοποίησης είναι η στερεολιθογραφική μορφή (STL). Ωστόσο, υπάρχουν μερικές άλλες μορφές αρχείων που χρησιμοποιούνται και ορισμένες που αυξάνονται σε δημοτικότητα. Πιο συγκεκριμένα οι βασικές μορφές αρχείων στην τρισδιάστατη εκτύπωση είναι [1], [2], [12]:

- **3D Manufacturing Format (3MF)** – Μια μορφή δεδομένων που βασίζεται σε XML, που αναπτύχθηκε και δημοσιεύτηκε από την 3MF Consortium. Αποτελεί μια σχετικά νέα μορφή που μπορεί να αποθηκεύσει πληροφορίες μοντέλου όπως σχήμα, χρώμα και υλικό και αυτό είναι βολικό για πολύχρωμους εκτυπωτές. Έχει όλα όσα χρειάζονται για την τρισδιάστατη εκτύπωση, αλλά δεν έχει ακόμη υιοθετηθεί από τους χρήστες σε μεγάλο βαθμό.
- **Additive Manufacturing File (AMF)** – Μια σχετικά νέα μορφή που μπορεί να αποθηκεύσει πληροφορίες μοντέλου όπως σχήμα, χρώμα και υλικό και αυτό είναι βολικό για πολύχρωμους

εκτυπωτές. Αυτά μπορεί να είναι σε μορφή κειμένου XML ή σε συμπιεσμένη μορφή που είναι περίπου το μισό του μεγέθους του Binary STL και έχει όλα όσα χρειάζονται για την τρισδιάστατη εκτύπωση.

- **Object file format (OBJ)** – Μια παλαιότερη μορφή τρισδιάστατου μοντέλου που χρησιμοποιείται από διάφορο συντάκτες 3D μοντέλων. Θεωρείται μια γνωστή μορφή ανοιχτού κώδικα που μπορεί να περιέχει πρόσθετες πληροφορίες όπως χαρτογράφηση UV και συντεταγμένες υφής. Αυτή η μορφή είναι κατασκευασμένη για τρισδιάστατη εκτύπωση, αλλά είναι κοινή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ελεύθερα ενώ τις περισσότερες φορές αποτελεί μια μορφή εξαγωγής μεταξύ προγραμμάτων.
- **Standard Triangle Language (STL)** – Μια μορφή αρχείου εγγενή στο λογισμικό στερεολιθογραφίας CAD που δημιουργήθηκε από την 3D Systems. Είναι πλέον μια μορφή αρχείου που περιέχει πληροφορίες τρισδιάστατης μοντελοποίησης και κοπής, αναγνώσιμες από έναν 3D εκτυπωτή. Η πιο κοινή μορφή, η οποία διατίθεται σε δύο εκδόσεις (δυαδική και ASCII). Είναι μια πολύ απλοϊκή μορφή που περιέχει μόνο το πλέγμα και τις κανονικές πληροφορίες αρχείου ενώ ακόμα, οι συντεταγμένες δεν έχουν μονάδες, αλλά συνήθως χρησιμοποιούν χιλιοστά ή ίντσες και πρέπει να καθοριστούν. Επίσης, αυτή η μορφή τείνει να έχει τα μεγαλύτερα μεγέθη αρχείων.

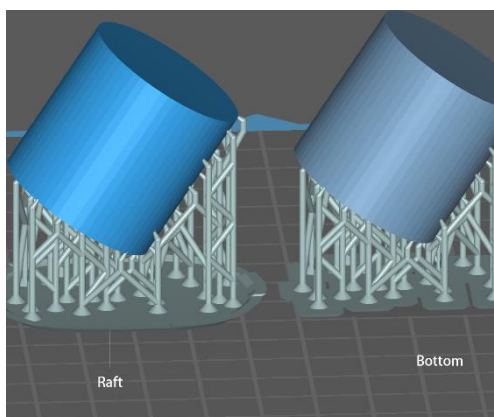
1.3.3 Τεμαχισμός του τρισδιάστατου μοντέλου

Ο slicer, που ονομάζεται και επίσημα λογισμικό κοπής, είναι ένα λογισμικό υπολογιστή που χρησιμοποιείται στις περισσότερες διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης για τη μετατροπή ενός μοντέλου τρισδιάστατου αντικειμένου σε συγκεκριμένες οδηγίες για τον εκτυπωτή. Ειδικότερα, η μετατροπή από μοντέλο σε μορφή STL σε εντολές εκτυπωτή με μορφή g-code στην κατασκευή λιωμένου νήματος και σε άλλες παρόμοιες διαδικασίες. Ο slicer πρώτα διαιρεί το αντικείμενο ως μια στοίβα επίπεδων στρωμάτων και στη συνέχεια περιγράφει αυτά τα στρώματα ως γραμμικές κινήσεις του εξωθητήρα τρισδιάστατου εκτυπωτή. Όλες αυτές οι κινήσεις, μαζί με ορισμένες συγκεκριμένες εντολές εκτυπωτή, όπως αυτές για τον έλεγχο της θερμοκρασίας του εξωθητήρα ή της θερμοκρασίας του κρεβατιού, γράφονται τελικά στο αρχείο g-code, το οποίο μπορεί στη συνέχεια να μεταφερθεί στον εκτυπωτή [1], [2], [12].

Βασικά χαρακτηριστικά που αποδίδουν όλοι οι slicer στα αντικείμενα πριν την τρισδιάστατη εκτύπωση είναι το:

- **Γέμισμα (Infill)** – τα στερεά αντικείμενα χρειάζονται μεγάλη ποσότητα πολύτιμου υλικού και χρόνο εκτύπωσης. Ο slicer μπορεί να μετατρέψει αυτόματα συμπαγείς όγκους σε κούφιους, εξοικονομώντας κόστος και χρόνο. Το κενό αντικείμενο μπορεί να γεμίσει μερικώς από εσωτερικές κατασκευές, ως εσωτερικά τοιχώματα, για να παρέχει πρόσθετη στιβαρότητα. Η ποσότητα αυτών των δομών ονομάζεται πυκνότητα γεμίσματος (infill density), και είναι μία από τις πιο σημαντικές ρυθμίσεις των slicers.
- **Στήριγμα (Support)** – οι περισσότερες από τις διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης δημιουργούν το αντικείμενο στρώμα προς στρώμα, από κάτω προς τα πάνω, με το στρώμα υπό κατασκευή να τοποθετείται πάνω από το προηγούμενο. Κατά συνέπεια, όλα τα μέρη του αντικειμένου πρέπει να καλύπτουν, τουλάχιστον σε κάποιο μέρος, το στρώμα που βρίσκεται από κάτω τους. Στην περίπτωση ενός στρώματος αντικειμένου που επιπλέει, ο slicer μπορεί αυτόματα να προσθέσει στηρίγματα για αυτό. Το στήριγμα αγγίζει το αντικείμενο με τρόπο που είναι εύκολα αποσπώμενο από αυτό στο στάδιο φινιρίσματος της παραγωγής του αντικειμένου γεγονός που το κάνει απαραίτητο σε 3D μοντέλα με περίεργα σχήματα.

- **Rafts, skirts και brims** – η εκτύπωση του πρώτου στρώματος του αντικειμένου, αυτού που έρχεται σε επαφή με το κρεβάτι του εκτυπωτή, έχει κάποιες ιδιαιτερότητες, όπως προβλήματα προσκόλλησης στο κρεβάτι, τραχύτητα, ομαλή εναπόθεση των πρώτων ποσοτήτων νήματος κ.α. Ο slicer μπορεί να προσθέσει αυτόματα ορισμένες αποσπώμενες δομές για να ελαχιστοποιήσει αυτά τα προβλήματα. Οι συνήθεις τύποι αυτών των δομών βάσης είναι μια φούστα (skirt - μια μονή ταινία γύρω από τη βάση του αντικειμένου χωρίς να την αγγίζει), ένα χείλος (brim - πολλές γραμμές νήματος γύρω από τη βάση του αντικειμένου, που το αγγίζουν αλλά όχι κάτω από αυτό και ακτινοβολούν προς τα έξω) και σχεδίες (rafts - πολλές στρώσεις υλικού που σχηματίζουν μια αποσπώμενη βάση, με το αντικείμενο τυπωμένο πάνω της).



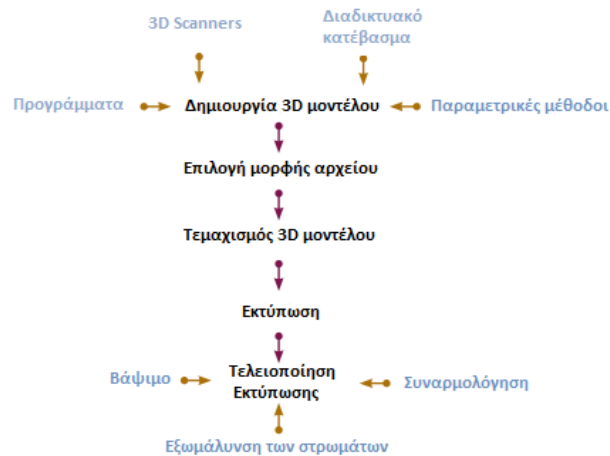
Εικόνα 1.4. Χρήση raft και support στην ίδια εκτύπωση

1.3.4 Εκτύπωση

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι πρόσβασης σε έναν 3D εκτυπωτή με μερικές από τα πιο συνηθισμένες επιλογές να είναι η αγορά ή η κατασκευή του εκτυπωτή από καταστήματα λιανικής αλλά και από έτοιμα kit όπου απλά χρειάζεται συναρμολόγηση. Άλλοι τρόποι για την πρόσβαση στην τρισδιάστατη εκτύπωση είναι η ενοικίαση, οι δημόσιες βιβλιοθήκες, οι χώροι δημιουργίας ή οι διαδικτυακές υπηρεσίες. Μετά την ολοκλήρωση του προγράμματος κοπής, οι πληροφορίες του μοντέλου σε φέτες κοινοποιούνται στον εκτυπωτή συνδέοντας τον υπολογιστή σας χρησιμοποιώντας καλώδιο Universal Serial Bus (USB), Wi-Fi ή κάρτα Secure Digital (SD). Ανάλογα με τον τύπο του 3D εκτυπωτή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια ποικιλία υλικών, συμπεριλαμβανομένων πλαστικών, μετάλλων, κεραμικών, γυαλιού, χαρτιού και τροφίμων (όπως η σοκολάτα). Στη συνέχεια, ο εκτυπωτής εκτυπώνει το αντικείμενο κάτι το οποίο μπορεί να διαρκέσει αρκετές ώρες ανάλογα με το μέγεθος και την πολυπλοκότητα του αντικειμένου. Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής κάνει ακριβώς αυτό που κάνουν καλύτερα οι υπολογιστές και τα μηχανήματα, ακολουθώντας μεθοδικά και με ακρίβεια τις οδηγίες, ανιχνεύοντας μια γραμμή από πλαστικό (ή άλλο υλικό) στρώμα - στρώμα. Αφού ο εκτυπωτής τελειώσει με την τοποθέτηση των στρώσεων υλικού για τη δημιουργία του αντικειμένου, μπορούν να αφαιρεθούν τυχόν δομές στήριξης [1], [2], [12].

Μετά την ολοκλήρωση της εκτύπωσης, μπορεί να χρειαστεί να γίνουν κάποιες βελτιώσεις πριν τελειώσει το αντικείμενο, όπως ο καθαρισμός και η αφαίρεση αχρείαστου υλικού. Επειδή η διαδικασία εκτύπωσης περιλαμβάνει τη συγκόλληση στρωμάτων υλικού για τη δημιουργία του αντικειμένου, η

στρωματοποίηση θα εμφανιστεί στην εκτύπωση και υπάρχουν πολλές διαφορετικές μέθοδοι για την εξομάλυνση ή την κάλυψη των στρώσεων με μερικές από αυτές να είναι το τρίψιμο και το βάψιμο.



Εικόνα 1.5. Όλες οι πιθανές επιλογές για μία ολοκληρωμένη και επιτυχημένη εκτύπωση

1.4 Τα πλεονεκτήματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην βιομηχανία

Επειδή τα μοντέλα και τα σχέδια υπολογιστών μπορούν να μεταφερθούν ηλεκτρονικά ή να μοιραστούν για λήψη από το Διαδίκτυο, η κατασκευή προσθέτων δίνει την δυνατότητα στους κατασκευαστές να επιτρέπουν στους πελάτες να σχεδιάζουν τις δικές τους εξατομικευμένες εκδόσεις προϊόντων. Στον σημερινό διασυνδεδεμένο κόσμο, η ικανότητα γρήγορης τροποποίησης προϊόντων για να προσελκύουν μια ποικιλία πολιτισμών και κλίματος είναι πολύ σημαντική. Γενικότερα, τα πλεονεκτήματα της παραγωγής προσθέτων μπορούν να ομαδοποιηθούν στις ακόλουθες υποενότητες που θα αναλυθούν παρακάτω [2], [3].

1.4.1 Εξατομίκευση

Η εξατομίκευση κατά τη στιγμή της κατασκευής επιτρέπει στα προϊόντα που κατασκευάζονται με πρόσθετα να ταιριάζουν περισσότερο στις προτιμήσεις κάθε καταναλωτή όσον αφορά τη μορφή, το μέγεθος, το σχήμα, το σχέδιο και ακόμη και το χρώμα. Σε ελάχιστο χρόνο, άτομα στην κοινότητα της τρισδιάστατης εκτύπωσης δημιουργούν πολλές παραλλαγές σε αντικείμενα καθημερινής χρήσης, και όχι μόνο, και μέσω αυτής της ποικιλομορφίας καλύπτονται οι περισσότερες ανάγκες. Βελτιώσεις στα πιο επιθυμητά σχέδια και αντικείμενα κοινοποιούνται γρήγορα μεταξύ των μελών της κοινότητας που τις χρησιμοποιούν για να δημιουργήσουν εξαιρετικά προσαρμοσμένες εκδόσεις ανάλογα με τις επιθυμίες του κοινού[2], [3].



Εικόνα 1.6. 3D εκτυπωμένη θήκη κινητού

1.4.2 Περιπλοκότητα

Από την στιγμή που όλα τα στρώματα ενός αντικειμένου δημιουργούνται διαδοχικά, η τρισδιάστατη εκτύπωση καθιστά δυνατή τη δημιουργία πολύπλοκων εσωτερικών δομών που είναι αδύνατο να επιτευχθούν με παραδοσιακά χυτά μέρη. Οι κατασκευές που δεν είναι φέρουσες μπορεί να έχουν λεπτά ή ακόμα και απόντα τοιχώματα, με πρόσθετο υλικό στήριξης που προστίθεται κατά την εκτύπωση. Εάν η αντοχή ή η ακαμψία είναι επιθυμητές ιδιότητες, αλλά το βάρος είναι ένα ζήτημα η κατασκευή προσθέτων μπορεί να δημιουργήσει μερικώς γεμάτα εσωτερικά κενά με δομές κηρήθρας, με το αποτέλεσμα ένα άκαμπτο και ελαφρύ προϊόν. Δομές διαμορφωμένες από τη φύση, που μιμούνται αντικείμενα όπως τα οστά ενός πουλιού, μπορούν να δημιουργηθούν με τεχνικές πρόσθετης κατασκευής για τη δημιουργία δυνατοτήτων προϊόντος που είναι αδύνατο να παραχθούν στην παραδοσιακή κατασκευή. Αυτά τα σχέδια μερικές φορές αναφέρονται ως οργανικά[2], [3].



Εικόνα 1.7. Μία πολύπλοκη και ιδιαίτερη εκτύπωση

1.4.3 Βιωσιμότητα

Επιτρέποντας τη διακύμανση της αντοχής και της ευελιξίας μέσα σε ένα αντικείμενο, τα εξαρτήματα που εκτυπώνονται τρισδιάστατα μπορούν να μειώσουν το βάρος των προϊόντων και να εξοικονομήσουν καύσιμο. Ένας κατασκευαστής αεροσκαφών, για παράδειγμα, αναμένει ότι ο επανασχεδιασμός της ζώνης ασφαλείας θα εξοικονομήσει δεκάδες χιλιάδες γαλιόνια αεροπορικών καυσίμων καθ' όλη τη διάρκεια ζωής ενός αεροσκάφους. Επίσης, με την τοποθέτηση υλικών μόνο εκεί που χρειάζεται, η κατασκευή προσθέτων μπορεί να μειώσει την ποσότητα των υλικών που χάνονται στη μηχανική κατεργασία μετά την παραγωγή, η οποία εξοικονομεί χρήματα και πόρους[2], [3].

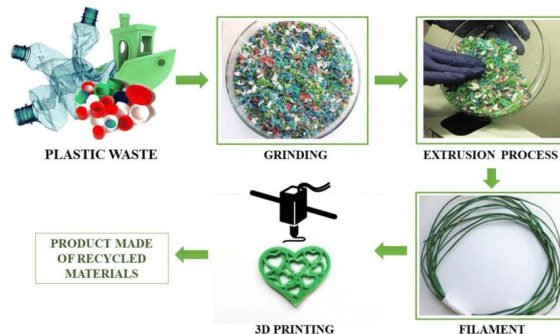
Η κατασκευή πρόσθετων επιτρέπει τη χρήση μιας ποικιλίας υλικών σε πολλά εξαρτήματα, ακόμη και το λιωμένο πλαστικό που χρησιμοποιείται σε εκτυπωτές, όπως η συσκευή RepRap. Το ακριλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρόλιο (ABS), με ιδιότητες που είναι ευρέως γνωστές από τη χρήση στην κατασκευή παιχνιδιών όπως τα τούβλα LEGO, χρησιμοποιείται συνήθως για οικιακή τρισδιάστατη εκτύπωση, αλλά είναι ένα πλαστικό με βάση την πετροχημική. Οι χρήστες με περιβαλλοντική συνείδηση θα μπορούσαν να επιλέξουν αντ' αυτού να χρησιμοποιήσουν εναλλακτικές λύσεις φυτικής προέλευσης, όπως το πολυγαλακτικό οξύ (PLA) για να επιτύχουν παρόμοια αποτελέσματα. Εναλλακτικές λύσεις όπως το PLA δημιουργούνται συνήθως από καλαμπόκι ή παντζάρια. Η τρέχουσα έρευνα για την παραγωγή βιομηχανικών ποσοτήτων αυτού του υλικού από φύκια μπορεί κάποτε να συμβάλει στη μείωση της εξάρτησής μας από πλαστικά με βάση τα πετροχημικά[2], [3].

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλα υλικά, ακόμη και πρώτες ύλες. Ορισμένοι τρισδιάστατοι εκτυπωτές έχουν σχεδιαστεί για να εκτυπώνουν αντικείμενα χρησιμοποιώντας σκυρόδεμα ή ακόμα και άμμο ως πρώτες ύλες χρησιμοποιώντας τίποτα περισσότερο από τη δύναμη του ήλιου που συγκεντρώνεται μέσω ενός φακού. Υπάρχει σύστημα ελεγχόμενο από υπολογιστή για να κατευθύνει το συγκεντρωμένο ηλιακό φως ακριβώς εκεί που χρειάζεται για να λιώσει κόκκους άμμου σε μια ακατέργαστη μορφή γυαλιού, το οποίο χρησιμοποιεί, στρώμα προς στρώμα, για να δημιουργήσει μολ και άλλα αντικείμενα[2], [3].

1.4.4 Ανακύκλωση

Η τρίτη Βιομηχανική Επανάσταση προσφέρει έναν τρόπο να εξαλειφθεί η παραδοσιακή έννοια της προγραμματισμένης απαξίωσης που βρίσκεται πίσω από τον τρέχοντα οικονομικό κύκλο. Στην πραγματικότητα, αυτή η επανάσταση οδηγεί σε μεγάλο βαθμό στο να καταστήσει ξεπερασμένη ολόκληρη την έννοια της απαρχειότητας. Ο κωμικός Jay Leno, ο οποίος συλλέγει κλασικά αυτοκίνητα, χρησιμοποιεί τρισδιάστατους εκτυπωτές για να επαναφέρει τα ξεπερασμένα αυτοκίνητά του με ατμό σε λειτουργία, παρόλο που τα ανταλλακτικά δεν ήταν διαθέσιμα για το μεγαλύτερο μέρος ενός αιώνα. Με μια τέτοια τεχνολογία, οι κατασκευαστές δεν χρειάζεται καν να κάνουν απογραφή παλαιών ανταλλακτικών, μπορούν απλώς να κατεβάσουν το σχέδιο των κατάλληλων εξαρτημάτων και να εκτυπώσουν αντικαταστάσεις όταν χρειάζεται[2], [3].

Αντί να πιέζουν ατελείωτα τις σειρές προϊόντων του επόμενου έτους ή της επόμενης σεζόν (όπως αυτοκίνητα, σπία, έπιπλα ή ρούχα), οι μελλοντικές βιομηχανίες θα μπορούσαν κάλλιστα να επικεντρωθούν στη διατήρηση της επένδυσής σε βασικά στοιχεία, στην προσθήκη ενημερώσεων και στην ανάκτηση υλικών για μελλοντικές τροποποιήσεις. Στο μέλλον, ένα δευτερεύον στοιχείο ενός κεφαλαιουχικού αγαθού, όπως ένα πλυντήριο ρούχων, αποτύχει, ένα νέο μηχάνημα δεν θα χρειαστεί να κατασκευαστεί και να αποσταλεί. Η αντικατάσταση θα δημιουργηθεί τοπικά και το αρχικό θα επανέλθει σε λειτουργική κατάσταση για ένα κλάσμα του κόστους και με ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις[2], [3].



Εικόνα 1.8. Διαδικασία ανακύκλωσης για την δημιουργία 3D αντικειμένων

1.4.5 Οικονομίες κλίμακας

Η τρισδιάστατη εκτύπωση επιτρέπει τη δημιουργία μεμονωμένων ειδών για το ίδιο κόστος προϊόντος με πολλά είδη του ίδιου ή παρόμοιου σχεδίου. Αντίθετα, η παραδοσιακή μαζική κατασκευή απαιτεί την κατασκευή τεράστιου αριθμού πανομοιότυπων αντικειμένων για να μειωθεί το κόστος ανά είδος που μεταφέρεται στον καταναλωτή[2], [3].

Η παραγωγή προσθέτων, καθώς ωριμάζει, μπορεί να προκαλέσει έναν θεμελιώδη μετασχηματισμό στην παραγωγή υλικών αγαθών. Οι υποστηρικτές παρουσιάζουν τη δυνατότητα εξατομικευμένης παραγωγής κοντά στους καταναλωτές. Οι επικριτές, ωστόσο, διαφωνούν για τη ζημιά αυτής της μετάβασης στις τρέχουσες οικονομίες. Η παραδοσιακή κατασκευή εξαρτάται από τη μαζική παραγωγή σε περιοχές χαμηλού κόστους, τη μαζική μεταφορά αγαθών σε όλο τον κόσμο και τα μεγάλα δίκτυα αποθήκευσης και διανομής για την παροχή προϊόντων στους καταναλωτές[2], [3].

Με την τοποθέτηση της παραγωγής σε άμεση εγγύτητα με τους καταναλωτές, η αποστολή και η αποθήκευση αγαθών μαζικής παραγωγής δεν θα είναι πλέον αναγκαία. Τα φορτηγά πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, μαζί με το κόστος που σχετίζεται με τις οικονομίες μαζικής κατασκευής, μπορεί να γίνουν παρελθόν[2], [3].

Μπορεί να είναι δυνατό να επαναχρησιμοποιηθούν αυτά τα τεράστια φορτηγά πλοία ως πλωτά κέντρα κατασκευής πρόσθετων σταθμευμένα στην ανοικτή θάλασσα κοντά στην καταναλωτική βάση τους καθώς ο κόσμος μεταναστεύει μακριά από τα παραδοσιακά κέντρα παραγωγής μαζικής παραγωγής. Ένα πιθανό πλεονέκτημα αυτής της αλλαγής θα ήταν ότι οι κατασκευαστές προϊόντων ειδικά για το χειμώνα ή το καλοκαίρι θα μπορούσαν απλώς να επιπλέουν βόρεια ή νότια για παραγωγή όλο το χρόνο για να καλύψουν τη ζήτηση των καταναλωτών χωρίς τα προβλήματα και τα κόστη που σχετίζονται με τους κύκλους μεταφοράς και αποθήκευσης της μαζικής παραγωγής. Επίσης, μετά από μια φυσική καταστροφή, ένα τέτοιο πλοίο θα μπορούσε απλώς να ανέβει στην ανοικτή θάλασσα και να αρχίσει να ανακυκλώνει συντρίμμια για να επισκευάσει και να αντικαταστήσει ό,τι χάθηκε από τα στοιχεία[2], [3].

1.5 Επίλογος 1ου κεφαλαίου

Συνοψίζοντας, η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μία προσθετική παραγωγική διαδικασία που κατασκευάζει ένα φυσικό αντικείμενο μέσω της ανάλυσης ενός ψηφιακού σχεδίου. Η διαδικασία αυτή υπήρξε πρώτη φορά ως σκέψη το 1945 και η πρώτη αλληλεπίδραση του ανθρώπου χρονολογείται κοντά στο 1980. Παρόλα αυτά, η εξέλιξη της τεχνολογίας αυτής, ως χρήσιμη και υλοποιήσιμη, συνέβη τα τελευταία περίπου 15 χρόνια όπου σηματοδοτήθηκε από την εκτύπωση του πρώτου προσθετικού ποδιού. Η τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελείται από διάφορα στάδια τα οποία πρέπει να γίνουν προσεκτικά ώστε να υπάρξουν τα επιθυμητά αποτελέσματα, όπως η επιλογή του τρισδιάστατου μοντέλου, η επιλογή της μορφής του αρχείου, ο τεμαχισμός του τρισδιάστατου μοντέλου και τέλος οι διορθώσεις στην τελική εκτύπωση. Η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει επηρεάσει θετικά πολλούς τομείς της καθημερινότητας του ανθρώπου, πόσο μάλλον την βιομηχανία όπου αποτελεί την ιδανική λύση για εξεζητημένα και περίπλοκα προϊόντα και την ικανοποίηση όλων των καταναλωτών.

Κεφάλαιο 2: 3D εκτυπωτές και υλικά εκτύπωσης

2.1 Εισαγωγή στα είδη 3D εκτυπωτών

Οι 3D εκτυπωτές την σημερινή εποχή έχουν πολλά και διαφορετικά σχήματα και μεγέθη έτσι ώστε να καλύπτουν όλες τις απαιτούμενες ανάγκες τόσο σε προσωπική χρήση όσο και στην βιομηχανία. Εκτός από την οικιακή ή επαγγελματική χρήση, οι 3D εκτυπωτές μπορούν να τοποθετούν σε κατηγορίες καθώς διαφέρουν σε χαρακτηριστικά όπως η συνολική δομή τους, η μεθοδολογία της εκτύπωσης αλλά και τα υλικά που χρησιμοποιούν. Ωστόσο, υπάρχουν δύο μεγάλες οικογένειες τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης. Η πρώτη οικογένεια εκτυπωτών εναποθέτει στρώματα πρώτης ύλης για να φτιάξει πράγματα, ενώ η δεύτερη οικογένεια εκτυπωτών δεσμεύει πρώτες ύλες για να φτιάξει πράγματα. Η πρώτη οικογένεια – τεχνολογία στρώμα προς στρώμα – εξάγει την πρώτη ύλη σε στρώματα. Αυτή η κατηγορία εκτυπωτών εκτοξεύει, ψεκάζει ή συμπιέζει υγρό, πάστα ή κονιοποιημένη πρώτη ύλη μέσω κάποιου σύριγγας ή ακροφυσίου. Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές που χρησιμοποιούνται στα σπίτια και τα γραφεία των ανθρώπων είναι συνήθως αυτού του τύπου, επειδή τα λέιζερ ή τα πιστόλια θερμότητας βιομηχανικής ποιότητας μπορεί να είναι πολύ εύθραυστα και επικίνδυνα. Η δεύτερη οικογένεια εκτυπωτών που δεσμεύει (δεν εναποτίθεται ούτε εναποθέτει) πρώτη ύλη συνήθως χρησιμοποιεί ένα λέιζερ ή μια συγκόλληση πάνω σε κάποιο είδος πρώτης ύλης. Αυτή η κατηγορία εκτυπωτών - που ονομάζονται "εκτυπωτές επιλεκτικής δέσμησης" - χρησιμοποιούν θερμότητα ή φως για να στερεοποιήσουν τη σκόνη ή ένα φωτοευαίσθητο φωτοπολυμερές.

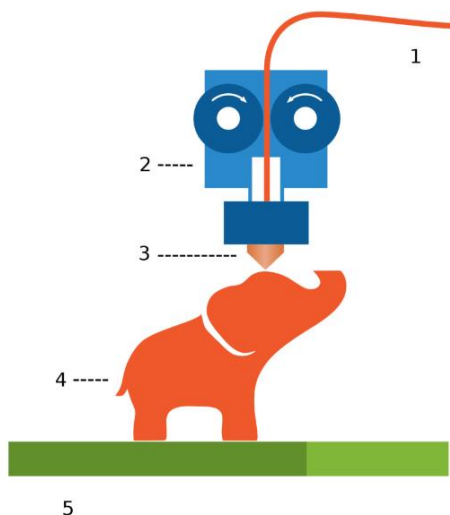
2.1.1 1^η Γενική κατηγορία - Εκτυπωτές FDM

Η τεχνολογία FDM, όπως ονομάζεται και επίσημα η τεχνολογία της πρώτης οικογένειας τρισδιάστατων εκτυπωτών που αναφέρθηκε πιο πάνω, αποτελεί την πιο διαδεδομένη επιλογή καθώς χρησιμοποιείται κατά κόρον σε προσιτούς εκτυπωτές αλλά και σε 3D στυλό. Το αρχείο CAD που φορτώνεται στον εκτυπωτή χωρίζεται σε στρώματα, το πάχος των οποίων εξαρτάται από την ανάλυση στρώματος του μηχανήματος (αυτό εξαρτάται από τον εκτυπωτή και τη ρύθμιση). Στη συνέχεια, το ακροφύσιο εξωθεί το επιλεγμένο υλικό σε ένα κρεβάτι, το οποίο, ανάλογα με το υλικό, μπορεί να χρειαστεί να θερμανθεί για να αποφευχθεί η παραμόρφωση ή ακόμα και η ρωγμή λόγω της διαδικασίας τήξης και ταχείας ψύξης. Μετά την εκτύπωση του πρώτου στρώματος, η κεφαλή εκτύπωσης ανυψώνεται ελαφρά και επιστρέφει στη δουλειά για να απλώσει το δεύτερο στρώμα. Ο εκτυπωτής

συνεχίζει να επαναλαμβάνει αυτή τη διαδικασία, τοποθετώντας υπομονετικά τη μια διατομή του αντικειμένου μετά την άλλη, όπως απεικονίζεται στο αρχείο σχεδίασης, μια διαδικασία που μπορεί να συνεχιστεί για ώρες, ακόμη και μέρες. Το υλικό υποστήριξης δημιουργείται συνήθως αυτόματα όταν ο εκτυπωτής πιστεύει ότι θα το χρειαστεί για να το χρησιμοποιήσει για μελλοντικά επίπεδα. Αυτά ονομάζονται προεξοχές και είναι απλώς μέρη του μοντέλου που ξεπροβάλλουν εκεί όπου δεν έχει τοποθετηθεί κανένα υλικό προηγουμένως[1], [2], [3], [4] .

Αναλυτικά τα βήματα της διαδικασίας μιας εκτύπωσης με την τεχνολογία FDM:

- Ένα καρούλι από θερμοπλαστικό νήμα τοποθετείται στον εκτυπωτή και το νήμα τροφοδοτείται στον εξωθητήρα. Η θερμοκρασία του ακροφυσίου αυξάνεται στο επιθυμητό επίπεδο και το νήμα στο ακροφύσιο λιώνει.
- Ο εξωθητήρας είναι προσαρτημένος σε ένα σύστημα 3 αξόνων που του επιτρέπει να κινείται με ακρίβεια και αξιοπιστία στις κατευθύνσεις X, Y και Z (X – δεξιά–αριστερά, Y – εμπρός–πίσω, Z – πάνω–κάτω). Το λιωμένο νήμα/υλικό εξωθείται σε λεπτές γραμμές. Αυτό εναποτίθεται στρώμα προς στρώμα, σχηματίζοντας το αντικείμενο που εκτυπώνεται, όπου ψύχεται και στερεοποιείται. Η ψύξη του εξωθημένου νήματος μπορεί να επιταχυνθεί με τη χρήση ενός ανεμιστήρα ψύξης που είναι προσαρτημένος πάνω στον εξωθητήρα.
- Συχνά μόνο ένα περίγραμμα δεν αρκεί και το αντικείμενο χρειάζεται λίγο γέμισμα για να συγκρατήσει τα ανώτερα στρώματα και να διατηρήσει το αντικείμενο ισχυρό. Γενικά, αυτό το γέμισμα είναι ένα χαλαρό πλέγμα γραμμών, παρόμοιο με τη σταυρωτή σκίαση ή σε ένα σχήμα που σχεδιάστηκε το περίγραμμα.
- Αφού τελειώσει ένα στρώμα, ο εξωθητήρας ή η πλατφόρμα κατασκευής μετακινείται για να δημιουργηθεί χώρος για την εναπόθεση του επόμενου στρώματος.
- Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί το αντικείμενο.



Εικόνα 2.1. Η FDM διαδικασία σε 5 βήματα

Με τη βοήθεια του FDM, μπορείτε να εκτυπώσετε όχι μόνο λειτουργικά πρωτότυπα, αλλά και έτοιμα προς χρήση προϊόντα όπως Lego, πλαστικά γρανάζια και πολλά άλλα. Το FDM είναι η μόνη

τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης που χρησιμοποιεί θερμοπλαστικά υψηλής ποιότητας, επομένως τα αντικείμενα που εκτυπώνονται έχουν εξαιρετικά μηχανικά, θερμικά και χημικά χαρακτηριστικά κάτι που είναι αρκετά ωφέλιμο για τους μηχανικούς και τους κατασκευαστές. Το καλό με αυτόν τον κλάδο της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι ότι η τεχνολογία εκτύπωσης μπορεί να απλοποιηθεί σε εκδόσεις σχετικά χαμηλής τεχνολογίας (low – end) που είναι χαμηλού κόστους και μπορούν να χρησιμοποιήσουν ένα ευρύ φάσμα οικονομικών υλικών και γενικότερα οποιαδήποτε πρώτη ύλη που μπορεί να συμπιεστεί μέσω ενός ακροφυσίου μπορεί να εκτυπωθεί τρισδιάστατα. Αν και οι εταιρείες κατασκευής και σχεδιασμού χρησιμοποιούν μεγάλους και ακριβούς εκτυπωτές αυτού του είδους, οι εκτυπωτές επιλεκτικής εναπόθεσης είναι ιδανικοί για το σπίτι, το σχολείο. ή χρήση γραφείου. Ακόμη και οι εκτυπωτές χαμηλού επιπέδου αυτού του είδους λειτουργούν αθόρυβα και το γεγονός ότι χρησιμοποιούν κεφαλή εκτύπωσης σχετικά χαμηλής θερμοκρασίας τους καθιστά ασφαλέστερους στη λειτουργία τους από τους εκτυπωτές που χρησιμοποιούν λέιζερ υψηλής ισχύος. Τέλος, πολλοί κατασκευαστές FDM εκτυπωτών έχουν τα μοντέλα τους open source οπότε υπάρχει ένα μεγάλο εύρος δυνατοτήτων και παραμετροποιήσεων αλλά και άμεση επικοινωνία με άλλους χρήστες για την επίλυση κοινών προβλημάτων[1], [2], [3], [4].

Ένα σημαντικό μειονέκτημα των εκτυπωτών επιλεκτικής εναπόθεσης είναι ότι μπορούν να εκτυπώσουν μόνο σε υλικά που μπορούν να εξωθηθούν ή να συμπιεστούν μέσω μιας κεφαλής εκτύπωσης. Το λιωμένο μέταλλο ή το γυαλί, για παράδειγμα, πρέπει να διαμορφώνονται υπό διαφορετικές συνθήκες. Οι περισσότεροι εκτυπωτές απόθεσης στην αγορά σήμερα κάνουν τα πράγματα απλά χρησιμοποιώντας έναν ειδικό τύπο πλαστικού που έχει δημιουργηθεί ειδικά για αυτούς. Το πλαστικό τρισδιάστατης εκτύπωσης πωλείται σε κουλούρες, το άκρο των οποίων τροφοδοτείται απευθείας στον εκτυπωτή, όπου το πλαστικό τήκεται και συμπιέζεται έξω από την κεφαλή εκτύπωσης. Επίσης, ανάλογα με το μέγεθος και την πολυπλοκότητα του μοντέλου η εκτύπωση μπορεί να διαρκέσει αρκετές ώρες ακόμα και μέρες. Αυτό συνεπάγεται ότι ο χρήστης δεν μπορεί να έχει συνεχή παρακολούθηση της διαδικασίας γεγονός που σε συνδυασμό με την πιθανή εξαγωγή ενός αδύναμου, κατασκευαστικά, μοντέλου καθιστά την όλη διαδικασία αρκετά επίφοβη και χωρίς εγγυημένα αποτελέσματα[1], [2], [3], [4].

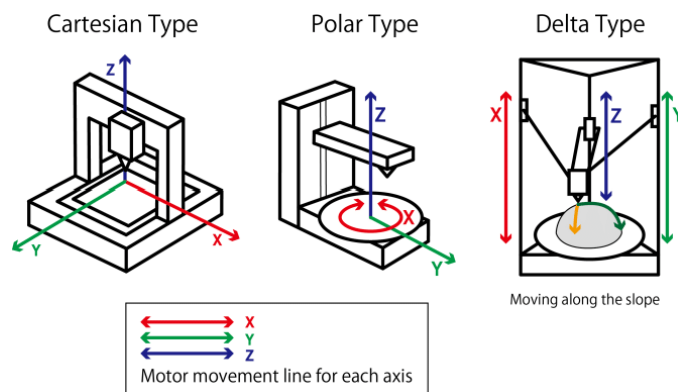
Μερικά βασικά είδη FDM τρισδιάστατων εκτυπωτών είναι:

- **FreeHand Pen** – ή αλλιώς **3D Pen** θα μπορούσε να θεωρηθεί ως ένας 3D εκτυπωτής όπου δεν υπάρχει η κίνηση σε κάποιον άξονα. Ο ίδιος ο χρήστης καθορίζει την κίνηση χρησιμοποιώντας με το χέρι του το 3D Pen το οποίο είναι ιδανικό για χειροτεχνίες, για σχεδίαση ακόμα και ολόκληρες κατασκευές.
- **Cartesian 3D FDM Printer** - οι καρτεσιανοί 3D εκτυπωτές είναι μακράν ο πιο συνηθισμένος διαθέσιμος εκτυπωτής. Βασίζονται στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων στα μαθηματικά χρησιμοποιώντας τρεις άξονες: X, Y και Z για την μετακίνηση και την τοποθέτηση της κεφαλής εκτύπωσης. Συχνά αυτοί οι εκτυπωτές μετακινούν το κρεβάτι μόνο στον άξονα z, με την εκτύπωση να λειτουργεί δισδιάστατα σε επίπεδο x-y. Ορισμένες εκδόσεις, ωστόσο, μετακινούν την κεφαλή εκτύπωσης στα x και z και το κρεβάτι μετακινείται στο y .Οι συγκεκριμένοι εκτυπωτές είναι σήμερα οι πιο ανεπτυγμένοι και ευέλικτοι σε τέτοιο σημείο όπου μερικοί έχουν ακόμη και διαφορετικές κεφαλές για κοπή με λέιζερ και εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου υπολογιστή (Computer Numerical Control -CNC).
- **Delta 3D FDM Printers** - οι εκτυπωτές Delta είναι ένας νεότερος τύπος που χρησιμοποιεί το ίδιο σύστημα συντεταγμένων αλλά μετακινεί την κεφαλή εκτύπωσης με μοναδικό τρόπο. Αυτό περιλαμβάνει ένα στρογγυλό κρεβάτι εκτύπωσης σε συνδυασμό με έναν εξωθητήρα που είναι προσαρτημένος σε τρία τριγωνικά σημεία. Στη συνέχεια, καθένα από τα τρία σημεία

κινείται πάνω-κάτω σε ράγες, καθορίζοντας τη θέση και την κατεύθυνση του κρεβατιού εκτύπωσης. Οι εκτυπωτές Delta μετακινούν αποκλειστικά την κεφαλή εκτύπωσης. Οι εκτυπωτές Delta μπορεί να είναι αρκετά γρήγοροι, αλλά είναι δυνητικά λιγότερο ακριβείς από έναν συμβατικό καρτεσιανό εκτυπωτή. Επίσης, για την μείωση του βάρους της κεφαλής εκτύπωσης, οι περισσότεροι χρησιμοποιούν ένα σωλήνα Bowden για να τροφοδοτήσουν το νήμα στην κεφαλή εκτύπωσης. Αυτό το στυλ εξώθησης περιορίζει δυνητικά τους τύπους νημάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και μπορεί να προκαλέσει δέσμευση μέσα στον ίδιο τον σωλήνα. Λόγω της στρογγυλής πλάκας κατασκευής και του μεγάλου ύψους κίνηση στον Z άξονα, ένας εκτυπωτής Delta μπορεί να είναι πιο κατάλληλος για συγκεκριμένα μεγέθη κατασκευής, ανάλογα με την εκτύπωσή.

- Polar 3D FDM Printers** - με τους πολικούς τρισδιάστατους εκτυπωτές, έχουμε ένα άλλο σύστημα συντεταγμένων, καθώς η θέση της κεφαλής δεν καθορίζεται από τις συντεταγμένες X, Y και Z, αλλά από μια γωνία και το μήκος. Αυτό σημαίνει ότι το κρεβάτι περιστρέφεται (R) και η κεφαλή εκτύπωσης μετακινείται μέσα και έξω και πάνω και κάτω (X και Z). Ένα πλεονέκτημα των πολικών εκτυπωτών είναι ότι χρησιμοποιούν μόνο δύο κινητήρες για να μετακινηθούν στις απαιτούμενες συντεταγμένες, εξοικονομώντας χρήματα και εξαρτήματα. Δυστυχώς, οι πολικοί τρισδιάστατοι εκτυπωτές βρίσκονται ακόμα στα αρχικά στάδια και δεν είναι ακόμη τόσο αξιόπιστοι όσο οι καρτεσιανοί και οι Delta 3D εκτυπωτές, με μερικούς ανθρώπους να τους αποκαλούν περισσότερο ως καινοτομία παρά ως μια αξιόπιστη λύση 3D εκτύπωσης στην τρέχουσα κατάστασή τους. Δεν συνιστώνται σε λάτρεις, επαγγελματίες και ιδιοκτήτες επιχειρήσεων που αναζητούν έναν αξιόπιστο 3D εκτυπωτή για τακτική χρήση [13].

- Robotic Arm 3D FDM Printers** - τέλος, υπάρχουν ρομποτικοί τρισδιάστατοι εκτυπωτές που βασίζονται σε βραχίονα. Αυτοί μπορούν να επιτρέψουν μεγαλύτερη ευελιξία, κινητικότητα και μέγεθος και έτσι μπορούν να κλιμακωθούν και να τοποθετηθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια από τους άλλους εκτυπωτές, καθιστώντας δυνατές απομακρυσμένες ή μεγάλες εργασίες. Ωστόσο, δεν μπορούν να κινηθούν τόσο γρήγορα ή με την ίδια ακρίβεια. Μερικά πλεονεκτήματα τέτοιου είδους εκτυπωτών είναι ότι τα τυπωμένα εξαρτήματα από τρισδιάστατους εκτυπωτές ρομποτικού βραχίονα γενικά δεν απαιτούν στηρίγματα, γεγονός που αυξάνει περαιτέρω τον βαθμό ελευθερίας του σχεδιασμού και εξοικονομεί χρήματα σε κόστος υλικού. Επίσης, ένα άλλο μοναδικό χαρακτηριστικό είναι ότι αυτοί οι εκτυπωτές δεν απαιτούν λογισμικό κοπής για τη δημιουργία των στρώσεων όπως με τους συμβατικούς εκτυπωτές, χάρη στις κινήσεις πολλαπλών αξόνων που μπορούν να προγραμματιστούν με εξειδικευμένο λογισμικό τρισδιάστατης εκτύπωσης [14].



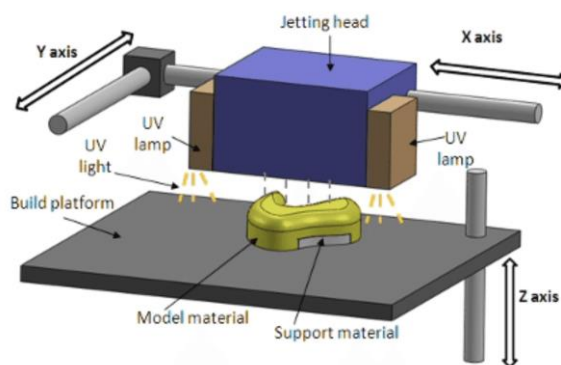
Εικόνα 2.2. Μερικά από τα είδη FDM 3D εκτυπωτών

2.1.2 Εκτυπωτές PolyJet

Οι εκτυπωτές PolyJet είναι τα νεότερα μέλη του κλάδου της πρώτης οικογένειας εκτυπωτών, που αναπτύχθηκε το 2000 από μια ισραηλινή εταιρεία που ονομάζεται Objet Geometries. Οι εκτυπωτές PolyJet δανείζονται τεχνολογίες και από τους δύο κύριους κλάδους του οικογενειακού δέντρου των τρισδιάστατων εκτυπωτών, συνδυάζοντας μια κεφαλή εκτύπωσης που ψεκάζει υγρό φωτοπολυμερές σε εξαιρετικά λεπτά στρώματα και σταθεροποιεί το φωτοπολυμερές με μια φωτεινή λάμπα UV [3], [4], [5].

Το πλεονέκτημα από τη χρήση της εκτύπωσης PolyJet είναι ότι ο ψεκασμός σταγονιδίων είναι ένας γρήγορος και ακριβής τρόπος για να απλώσετε στρώματα τόσο λεπτά όσο 16 microns. Ως σημείο αναφοράς, η διάμετρος ενός ερυθρού κυττάρου είναι περίπου 10 microns. Η ακρίβεια των εκτυπωτών PolyJet τους καθιστά ιδανικούς για βιομηχανικές ή ιατρικές εφαρμογές, όπου τα σχήματα «υψηλής ανάλυσης» και η γρήγορη εκτύπωση μπορεί να είναι κρίσιμα. Οι εκτυπωτές PolyJet μπορούν να χρησιμοποιήσουν πολλές κεφαλές εκτύπωσης ταυτόχρονα, ώστε να μπορούν να εκτυπώνουν σε πολλά υλικά σε μία εργασία εκτύπωσης [3], [4], [5].

Ένα σημαντικό μειονέκτημα της εκτύπωσης PolyJet έγκειται στους εγγενείς περιορισμούς στο υλικό εκτύπωσης που χρησιμοποιεί, έναν τύπο πλαστικού που ονομάζεται φωτοπολυμερές. Τα φωτοπολυμερή είναι εξαιρετικά εξειδικευμένα, ακριβά πλαστικά που ανταποκρίνονται στο υπεριώδες φως. Το πλαστικό μπορεί να είναι ένα από τα πιο ανθεκτικά υλικά κατασκευής που υπάρχουν, αλλά τα περισσότερα φωτοπολυμερή εξακολουθούν να είναι σχετικά εύθραυστα και εύθραυστα, γεγονός που περιορίζει το φάσμα των εφαρμογών τους [3], [4], [5].



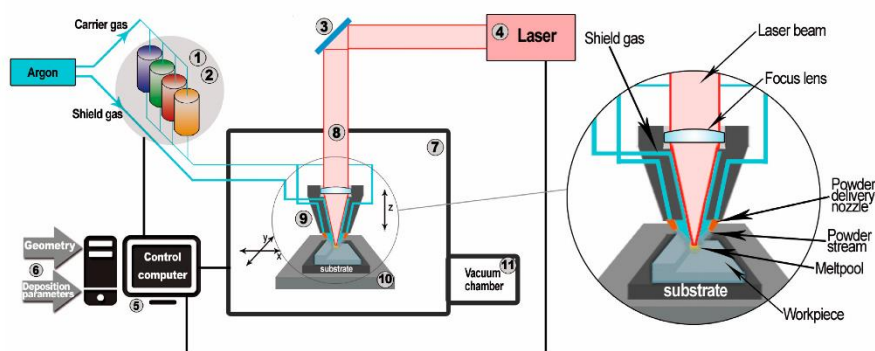
Εικόνα 2.3. Διαδικασία εκτύπωσης με εκτυπωτή PolyJet.

2.1.3 Εκτυπωτές LENS (Laser Engineered Net Shaping)

Ένα άλλο μέλος της οικογένειας εκτυπωτών επιλεκτικής εναπόθεσης, το Laser Engineered Net Shaping (LENS), φουά υλικό σε σκόνη σε μια προσεκτικά καθοδηγούμενη δέσμη λέιζερ υψηλής ισχύος. Κάποια από τη σκόνη χάνει τη δέσμη και πέφτει στην άκρη, αλλά τα τυχερά σωματίδια που χτυπούν το εστιακό σημείο του λέιζερ λιώνουν αμέσως και συγχωνεύονται στην επιφάνεια του αναπτυσσόμενου τμήματος. Έτσι, καθώς το εστιακό σημείο του λέιζερ σαρώνει τα περιγράμματα του αντικειμένου και το ακροφύσιο φουά περισσότερη σκόνη, το τμήμα σταδιακά μεγαλώνει, στρώμα προς στρώμα [4].

Το πλεονέκτημα αυτής της διαδικασίας είναι ότι μπορεί να κατασκευάσει αντικείμενα από σκληρά υλικά όπως τιτάνιο και ανοξείδωτο χάλυβα. Μέχρι να εφευρεθούν τέτοιες διαδικασίες εκτύπωσης μετάλλων, η τρισδιάστατη εκτύπωση δεν λαμβανόταν τόσο σοβαρά υπόψη από τις «μεγάλες» βιομηχανίες επειδή μπορούσε να λειτουργήσει μόνο σε πλαστικά. Όταν εμφανίστηκαν διαδικασίες εκτύπωσης μετάλλων όπως το LENS, μεγάλες βιομηχανίες όπως η αεροδιαστημική και η αυτοκινητοβιομηχανία άρχισαν να ενδιαφέρονται περισσότερο για την τρισδιάστατη εκτύπωση. Η τεχνολογία LENS χρησιμοποιείται σήμερα για την κατασκευή σύνθετων αντικειμένων από σκληρά μέταλλα, όπως πτερύγια τουρμπίνας τιτανίου με εσωτερικά κανάλια ψύξης [4].

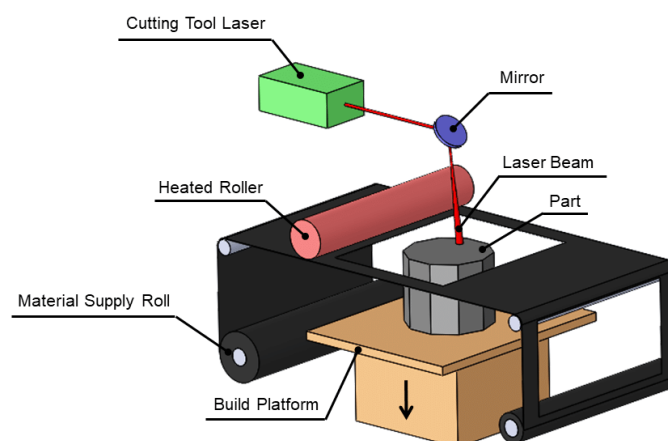
Δεδομένου ότι περισσότερα από ένα ακροφύσια μπορούν να φυσήξουν σκόνη στη δέσμη λέιζερ ταυτόχρονα, πολλαπλά βασικά μέταλλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα για την «εκτύπωση» κραμάτων (ανάμεικτα μέταλλα). Η αναλογία μπορεί ακόμη και να ποικίλλει ανάλογα με τη θέση της κεφαλής, οδηγώντας σε διαβαθμισμένα κράματα [4].



Εικόνα 2.4. Διαδικασία εκτύπωσης με εκτυπωτή LENS

2.1.4 Εκτυπωτές LOM (Laminated object manufacturing)

Τελευταίο αλλά εξίσου σημαντικό, ένα άλλο μέλος της οικογένειας εκτυπωτών επιλεκτικής εναπόθεσης είναι οι εκτυπωτές κατασκευής αντικειμένων με πλαστικοποιημένο υλικό (LOM). Οι εκτυπωτές LOM δεν χρησιμοποιούν κεφαλή εκτύπωσης για να σχηματίσουν στρώματα. Αντίθετα, οι εκτυπωτές LOM, όπως υποδηλώνει το όνομά τους, πλαστικοποιούν λεπτά φύλλα υλικού σε ένα ενιαίο συμπαγές τρισδιάστατο αντικείμενο. Η διαδικασία LOM ξεκινά με ένα αρχείο σχεδίασης και αντί για κεφαλή εκτύπωσης, τη δουλειά κάνει ένα μαχαίρι ή μια ακτίνα λέιζερ. Ακολουθώντας τις οδηγίες του αρχείου σχεδίασης, το εργαλείο κοπής κόβει τα περιγράμματα ενός σχήματος από ένα λεπτό φιλμ από χαρτί, πλαστικό ή μέταλλο. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία από το όργανο κοπής, ο εκτυπωτής LOM αφήνει το κομμένο κομμάτι στην άκρη και απλώνει ένα νέο φύλλο αυτοκόλλητης μεμβράνης για να κόψει τα επόμενα στρώματα. Ο εκτυπωτής στοιβάζει μαζί τα κομμένα στρώματα χαρτιού, πλαστικού ή μετάλλου. Όταν όλες οι διατομές του αντικειμένου έχουν κοπεί, ο εκτυπωτής πλαστικοποιεί και πιέζει τα στρώματα των εγχοπών για να τα συνθέσει σε ένα συμπαγές τρισδιάστατο αντικείμενο. Ορισμένα μοντέλα εκτυπωτών LOM συγχωνεύουν κομμένα φύλλα αλουμινίου με ισχυρούς κραδασμούς υπερήχων που προκαλούν το φύλλο να τρίβεται πάνω στο προηγούμενο στρώμα και να στερεώνεται σε πυκνά συσκευασμένα στρώματα [4].



Εικόνα 2.5. Διαδικασία εκτύπωσης με εκτυπωτή LOM

2.2 Είδη 3D εκτυπωτών 2ης γενικής κατηγορίας

Η δεύτερη μεγάλη οικογένεια τρισδιάστατων εκτυπωτών αποτελείται από εκτυπωτές που χρησιμοποιούν μια διαδικασία επιλεκτικής δέσμευσης για τη σύντηξη ή τη σύνδεση πρώτης ύλης σε στρώματα. Πολλοί από τους πρώτους εμπορικούς εκτυπωτές χρησιμοποίησαν αυτήν την προσέγγιση. Δύο παραλλαγές αυτής της μεθόδου, ειδικότερα, είναι σε ευρεία χρήση: η Stereolithography (SLA) και η Laser Sintering (SLS).

2.2.1 Εκτυπωτές SLA (Stereolithography Apparatus)

Η στερεολιθογραφία (SLA) ήταν μια από τις πρώτες εμπορικές μεθόδους τρισδιάστατης εκτύπωσης. Πολλοί το παρομοιάζουν ως μια μικρή δεξαμενή υγρού πολυμερούς που κάθεται μέσα σε έναν εκτυπωτή στο μέγεθος ενός οικιακού ψυγείου. Ο εκτυπωτής σαρώνει μια ακτίνα λέιζερ πάνω από την επιφάνεια ενός ειδικού τύπου πλαστικού, ενός φωτοπολυμερούς ευαίσθητου στην υπεριώδη ακτινοβολία που σκληραίνει όταν εκτίθεται σε υπεριώδη ακτινοβολία. Κάθε πέρασμα του λέιζερ ανιχνεύει το περίγραμμα και τη διατομή του εκτυπωμένου σχήματος σε διαδοχικά στρώματα. Μετά από κάθε πέρασμα του λέιζερ, ένα κινούμενο τραπέζι που συγκρατεί το τυπωμένο μέρος χαμηλώνεται κατά ένα κλάσμα του χιλιοστού. Το εξάρτημα βυθίζεται λίγο στο υγρό και το φρέσκο φωτοπολυμερές πλημμυρίζει την επάνω πλευρά του. Ορισμένοι εκτυπωτές SLA λειτουργούν προς την αντίθετη κατεύθυνση στοχεύοντας το λέιζερ προς τα πάνω μέσα στο φωτοπολυμερές και στη συνέχεια ανασηκώνοντας το εκτυπωμένο αντικείμενο για να πλημμυρίσει τη βάση του με φρέσκο υγρό. Μετά την τρισδιάστατη εκτύπωση ενός αντικειμένου με αυτήν τη μέθοδο, υπάρχει ακόμη περισσότερη δουλειά που πρέπει να γίνει. Το πλεονάζον υλικό πρέπει να ξεπλυθεί και οι επιφάνειες μερικές φορές πρέπει να τρίψουν με το χέρι. Ανάλογα με το τι εκτυπώνεται, μερικές φορές η περαιτέρω σκλήρυνση γίνεται σε «φούρνο» υπεριώδους φωτός [2],[3], [4], [5].

Το πλεονέκτημα της εκτύπωσης SLA είναι ότι το λέιζερ είναι γρήγορο και ακριβές. Πολλά λέιζερ μπορούν να λειτουργήσουν παράλληλα για να εντοπίσουν σχήματα σε υψηλότερη ανάλυση από ό,τι οι σημερινές κεφαλές τρισδιάστατης εκτύπωσης τύπου εξώθησης. Οι σημερινοί τρισδιάστατοι εκτυπωτές βιομηχανικής κλίμακας μπορούν να κατασκευάσουν ακριβή μοντέλα και εξαρτήματα σε στρώματα τόσο λεπτά όσο 10 microns — δηλαδή πιο λεπτά και από ένα φύλλο χαρτιού. Ορισμένοι εκτυπωτές SLA λειτουργούν σε γωνία 45 μοιρών, καθώς απαιτούν μια κίνηση αποφλοιώσης για να σταματήσουν τα μέρη από το να κολλήσουν στο κάτω μέρος της δεξαμενής. Αυτό, μειώνει επίσης τη διάρκεια των

Κεφάλαιο 2

“εκρήξεων” που κάνει το λέιζερ, μειώνοντας την υπερβολική σκλήρυνση και επιτρέποντας την επαναχρησιμοποίηση περισσότερης ρητίνης. Καθώς η ποιότητα και η γκάμα των ακατέργαστων φωτοπολυμερών συνεχίζει να επεκτείνεται, οι εκτυπωτές SLA μπορούν να κατασκευάσουν ένα ευρύτερο φάσμα αντικειμένων με εξειδικευμένες ιδιότητες υλικού [2],[3], [4], [5].

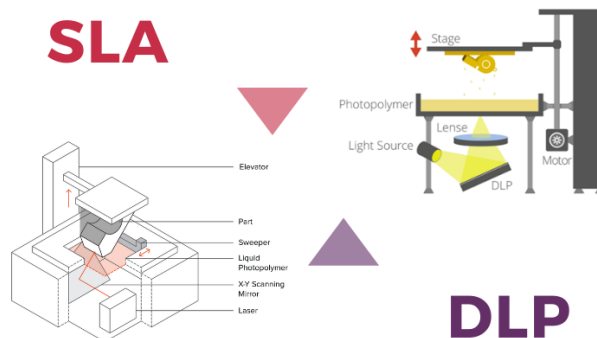


Εικόνα 2.6. Εκτυπωτής SLA

Ένα μειονέκτημα της εκτύπωσης SLA είναι ότι οι αναθυμιάσεις από μη σκληρυνθέντα φωτοπολυμερή μπορεί να είναι τοξικές για την αναπνοή. Επίσης, τα φωτοπολυμερή δεν είναι τόσο ισχυρά και ανθεκτικά όσο τα θερμοπλαστικά που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανική χύτευση με έγχυση. Το κόστος και η πολυπλοκότητα της συντήρησης ενός μηχανήματος που χρησιμοποιεί λέιζερ καθιστά τους εκτυπωτές SLA πολύ ακριβούς για τους περισσότερους οικιακούς χρήστες, αλλά φθηνότερα μηχανήματα που χρησιμοποιούν χαμηλού κόστους λέιζερ UV από δίσκους Blu-ray μπορεί να αυξήσουν αυτή την αγορά. Οι εκτυπωτές SLA μπορούν επί του παρόντος να εκτυπώνουν με ένα μόνο υλικό κάθε φορά το οποίο αποτελεί ένα ακόμα σημαντικό μειονέκτημα [2],[3], [4], [5].

2.2.2 Εκτυπωτές DLP (Digital Light Processing)

Νέα υλικά και μέθοδοι επιτρέπουν τη χρήση εναλλακτικών τεχνολογιών για τρισδιάστατη εκτύπωση έτσι εμφανίστηκε άλλη μία κατηγορία, παρόμοια με αυτή της στερεολιθογραφικής εκτύπωσης, η οποία χρησιμοποιεί μία διαφορετική διαδικασία από αυτή του UV λέιζερ (όπως αναφέρθηκε προηγουμένως).. Μια συναρπαστική εξέλιξη είναι η χρήση υγρών ρητινών ευαίσθητων στο φως της ημέρας. Οι υπάρχοντες εκτυπωτές SLA χρησιμοποιούν υπεριώδες (UV) λέιζερ ή ανακλώμενη ψηφιακή επεξεργασία φωτός (DLP) ως σύστημα προβολής για τη σκλήρυνση υγρής ρητίνης ευαίσθητης στην υπεριώδη ακτινοβολία, στρώμα με στρώμα. Πολλές εξελίξεις επιταχύνουν αυτή τη διαδικασία, επομένως μοντέλα υψηλής ανάλυσης μπορούν να κατασκευαστούν γρήγορα και σε μια σειρά υλικών. Ως εναλλακτική λύση στις ρητίνες UV, τα υλικά που σκληρύνονται στο φως της ημέρας επιτρέπουν την απευθείας χρήση μιας οθόνης κινητού για τη σκλήρυνση της ρητίνης. Η οθόνη εμφανίζει ένα κομμάτι ενός τρισδιάστατου αντικείμενου. Αφού εκτεθεί κάθε στρώμα, η οθόνη τοποθετείται ελαφρώς πιο μακριά και ένα τρισδιάστατο αντικείμενο φαίνεται να αναπτύσσεται από το υγρό. Η εγκατάσταση αυτών των μηχανημάτων είναι λίγο δύσκολη, καθώς δεν πρέπει να εκτεθεί κατά λάθος η υγρή ρητίνη σε πηγή φωτός κατά την διάρκεια της ημέρας. Επίσης, εάν κινητό σας έχει ρυθμιστεί σε φωτισμό χαμηλής κατανάλωσης, ίσως χρειαστεί ώρες για να ολοκληρωθεί η διαδικασία εκτύπωσης [4], [15], [16].



Εικόνα 2.7. Μερικές από τις διαφορές μεταξύ SLA και DLP 3D εκτυπωτών

Ωστόσο, αυτή η διαδικασία είναι πιθανό να είναι ένας εύχρηστος τρόπος για περισσότερους ανθρώπους να βιώσουν την τρισδιάστατη εκτύπωση και μπορεί να προκαλέσει τη χρήση τρισδιάστατων εκτυπωτών για φορητές συσκευές. Οι προκλήσεις παραμένουν προτού αυτά τα υλικά μπορούν να χειριστούν εύκολα και να χρησιμοποιηθούν σε μικρές συμπαγείς μηχανές. Οι ρητίνες συχνά θερμαίνονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αντίδρασης σκλήρυνσης, για παράδειγμα οπότε με ορισμένα σκευάσματα ρητίνης, μπορεί να συμβεί αρκετά γρήγορη θερμική αντίδραση στο άμεσο ηλιακό φως. Όσο περισσότερο επιβραδύνεται αυτή η αντίδραση, τόσο περισσότερος χρόνος χρειάζεται για να παραχθεί ένα τρισδιάστατο αντικείμενο από ρητίνες. Μια άλλη πρόκληση είναι ότι σχεδόν κάθε συσκευή οθόνης παράγει διαφορετικό επίπεδο φωτός. Ανάλογα με το μέγεθος της οθόνης, ενδέχεται να μην έχει το αναμενόμενο μοντέλο κλίμακας 1:1 και έτσι το μέγεθος ενός στρώματος εικόνας στην οθόνη μπορεί να βαθμονομηθεί ως μέρος της διαδικασίας εγκατάστασης, ώστε να επιτευχθεί το τμήμα σωστών διαστάσεων [4], [15], [16].

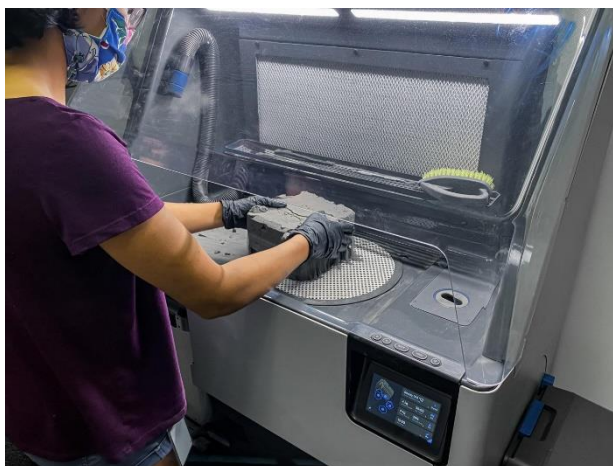
Εν κατακλείδι, συγκρίνοντας τις δύο μεθόδους τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορούμε να καταλήξουμε σε κάποια ασφαλή συμπεράσματα. Και τα δύο εκθέτουν υγρά φωτοπολυμερή σε μια πηγή φωτός. Καθώς και τα δύο διαθέτουν δεξαμενή ρητίνης, προορίζονται για την εκτύπωση μικρών μοντέλων με ακριβείς λεπτομέρειες. Οι μέθοδοι είναι συμβατές με εύκαμπτα ή σκληρά υλικά και μπορούν επίσης να εκτυπώσουν σύνθετα υλικά, γεμισμένα με γυαλί ή κεραμικό για παράδειγμα. Τα εκτυπωμένα μέρη είναι σχετικά εύθραυστα, και ενδέχεται να καταστραφούν εάν εκτεθούν στον ήλιο ή να υποστούν στρέβλωση. Οι εκτυπωτές DLP κατασκευάζουν το μοντέλο ανάποδα ενώ το αιωρούν πάνω από το κάτω μέρος της δεξαμενής ρητίνης. Αφού εμφανιστεί κάθε προβαλλόμενη εικόνα, το κρεβάτι μετακινείται προς τα πάνω για να επιτρέψει τη δημιουργία ενός νέου στρώματος. Και πάλι, υλικό στήριξης μπορεί να είναι απαραίτητο για τη στήριξη τυχόν προεξοχών στο σχέδιο. ο προβολέας κάτω από το μοντέλο προβάλλει μια εικόνα ολόκληρου του στρώματος στη ρητίνη για περίπου οκτώ έως δέκα δευτερόλεπτα για να το σκληρύνει. ο χρόνος στρώσης εξαρτάται φυσικά από τη μηχανή, καθώς και από την ισχύ του ίδιου του προβολέα. Αυτό την καθιστά πολύ πιο γρήγορη διαδικασία από το SLA, καθώς παρακάμπτει το βήμα της εκ νέου επικάλυψης του κρεβατιού εκτύπωσης και πρέπει να σχεδιάσει και να χρωματίσει στο αρχείο CAD. Το DLP επιτρέπει επίσης την ταυτόχρονη εκτύπωση πολλών στοιχείων στο ίδιο κρεβάτι. Η διαδικασία DLP θεωρείται ταχύτερη από την SLA αφού δεν λειτουργεί σημείο προς σημείο. Επιπλέον, ως αποτέλεσμα των προβολέων τους, οι εκτυπωτές DLP είναι μεγαλύτεροι και τις περισσότερες φορές, η δεξαμενή ρητίνης στις μηχανές DLP είναι πιο ρηχή από αυτές που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία SLA. Τέλος, η τελευταία διαφορά μεταξύ των τεχνολογιών SLA και DLP είναι στη συντήρηση, οι εκτυπωτές DLP απαιτούν λίγη συντήρηση και συχνά

επισκευάζονται ευκολότερα καθώς η παρουσία του λέιζερ σε μηχανές SLA καθιστά την συντήρηση πιο συχνή και πιο περίπλοκη [4], [15], [16].

2.2.3 Εκτυπωτές SLS (Selective Laser Sintering)

Η επιλεκτική πυροσυσσώματωση λέιζερ, που συνήθως αναφέρεται ως SLS, επινοήθηκε τη δεκαετία του 1980 από τους ερευνητές του Πανεπιστημίου του Τέξας, Carl Deckard και Joseph Beaman. Η επιλεκτική πυροσυσσώματωση λέιζερ ακολουθεί μια τεχνική παρόμοια με τους εκτυπωτές SLA. Ωστόσο, αντί να χρησιμοποιούν υγρά φωτοπολυμερή σε κάδο, οι εκτυπωτές SLS χρησιμοποιούν σκόνη. Όπως το SLA, η διαδικασία εκτύπωσης SLS δεν είναι αυτό που πολλοί άνθρωποι θα οραματίζονταν ως «διαδικασία εκτύπωσης». Αυτοί οι εκτυπωτές εντοπίζουν μια δέσμη λέιζερ υψηλής ισχύος πάνω από την επιφάνεια μιας κλίνης σκόνης. Η σκόνη λιώνει όταν φωτίζεται από το λέιζερ και ένας κύλινδρος μέσα στον εκτυπωτή βουρτσίζει ένα φρέσκο στρώμα πούδρας από πάνω και χαμηλώνει το κρεβάτι εκτύπωσης κατά ένα κλάσμα του χιλιοστού [4].

Η εκτύπωση με πούδρα αντί για υγρά υλικά έχει τα πλεονεκτήματά της. Ένα αντικείμενο που εκτυπώνεται σε σκόνη είναι λιγότερο πιθανό να καταρρεύσει κατά τη διαδικασία εκτύπωσης, καθώς η μη συντηγμένη σκόνη λειτουργεί ως ενσωματωμένο στήριγμα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η αχρησιμοποίητη σκόνη που έχει απομείνει μπορεί να ανακυκλωθεί και να χρησιμοποιηθεί σε άλλη εργασία εκτύπωσης. Το υλικό σε σκόνη είναι πιο ευέλικτο επειδή πολλές πρώτες ύλες μπορούν να ληφθούν σε μορφή σκόνης, συμπεριλαμβανομένου του νάιλον σε σκόνη, του χάλυβα, του μπρούτζου και του τιτανίου. Από την άλλη πλευρά, οι εκτυπωτές SLS δημιουργούν αντικείμενα των οποίων η επιφάνεια τείνει να είναι πορώδης και όχι λεία. Επί του παρόντος, οι εκτυπωτές SLS δεν μπορούν να εκτυπώσουν διαφορετικούς τύπους σκόνης ταυτόχρονα. Επιπλέον, δεν είναι ακόμη κατάλληλοι για χρήση στο σπίτι ή στο γραφείο δεδομένου ότι ορισμένες σκόνες έχουν την τάση να εκρήγνυνται σε περίπτωση εσφαλμένου χειρισμού και ένας εκτυπωτής SLS απαιτεί έναν σφραγισμένο θάλαμο γεμάτο με άζωτο. Τέλος, η διαδικασία εκτύπωσης SLS πραγματοποιείται κάτω από πολύ μεγάλες θερμοκρασίες και αυτό συνεπάγεται ότι ένα ολοκληρωμένο εκτυπωμένο αντικείμενο δεν μπορεί να αφαιρεθεί γρήγορα από το μηχάνημα, ενώ ανάλογα με το μέγεθος και το πάχος των στρωμάτων, μεγαλύτερα τμήματα μπορεί να χρειαστεί να κρυώσουν για έως και μία ημέρα [4].



Εικόνα 2.8. Εκτυπωτής SLS

2.2.4 Εκτυπωτές 3DP (Three-Dimensional Printing)

Το 3DP, χρησιμοποιεί μια διαδικασία που ονομάζεται «τριδιάστατη εκτύπωση» όπου η κεφαλή εκτύπωσης πιέζει κάποιο είδος κόλλας σε ακατέργαστο υλικό από σκόνη. Το 3DP επινοήθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1980 από έναν φοιτητή του MIT ονόματι Paul Williams και τον σύμβουλό του καθηγητή Eli Sachs. Εκείνη την εποχή, τα εμπορικά συστήματα κατασκευής προσθέτων χρησιμοποιούσαν λέιζερ και μερικές φορές τοξικά υλικά εκτύπωσης και είχαν το μέγεθος ενός μικρού φορτηγού. Τα πρώτα μηχανήματα κατασκευής πρόσθετων ήταν πολύπλοκα στη λειτουργία και ακριβά. Δεδομένου ότι το 3DP ήταν μια ευπρόσδεκτη εναλλακτική, το MIT θα κατοχυρώσει αργότερα την τεχνολογία στην οποία βασίζεται το 3DP και θα την αδειοδοτήσει σε πολλές εταιρείες (όπου έγινε το θεμέλιο πολλών από τους εμπορικούς τρισδιάστατους εκτυπωτές του κόσμου) [4].



Εικόνα 2.9. Εκτυπωτής 3DP βιομηχανικού μεγέθους

Η ανακάλυψη της 3DP εκτύπωσης ήταν η απλότητά της. Το όραμα του Paul Williams για το 3DP ήταν τολμηρό, ιδιαίτερα δεδομένης της κατάστασης της τέχνης εκείνη την εποχή. Ο Paul έγραψε στη διατριβή του, ο στόχος της κατασκευής επιτραπέζιων υπολογιστών είναι η κατασκευή εξαρτημάτων με το πάτημα ενός κουμπιού, χωρίς να απαιτείται περαιτέρω ενέργεια. Οραματίστηκε το 3DP ως ένα σύστημα κατασκευής επιτραπέζιων υπολογιστών που θα ήταν ακριβές, γρήγορο, φθινό και εύκολο στη χρήση. Σήμερα, το 3DP έχει ανταποκριθεί στο όραμα του δημιουργού του και έχει γίνει μια δημοφιλής, χαμηλού κόστους μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης. Δεδομένου ότι οι εκτυπωτές 3DP σχηματίζουν στρώματα πιέζοντας κόλλα πάνω στην πρώτη ύλη για να δημιουργήσουν στρώματα, αυτά τα μηχανήματα δεν χρησιμοποιούν λέιζερ και μπορούν να λειτουργήσουν με ένα ευρύ φάσμα πρώτων υλών. Οι εκτυπωτές 3DP δεν χρειάζεται να υποστηρίζουν εξαρτήματα υψηλής ισχύος, ώστε να είναι ενεργειακά αποδοτικοί στη λειτουργία τους [4].

Από την άλλη πλευρά, επειδή είναι δύσκολο να δημιουργηθούν εξαιρετικά λεπτά στρώματα χωρίς λέιζερ, τα αντικείμενα που δημιουργούνται σε έναν εκτυπωτή 3DP τείνουν να έχουν μια τραχιά επιφάνεια. Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα του 3DP είναι η ικανότητά του να εκτυπώνει έγχρωμα. Όταν η κόλλα εναποτίθεται, μερικά επιπλέον σταγονίδια έγχρωμου μελανιού μπορούν επίσης να εκτοξευθούν με μελάνι, επιτρέποντας την κατασκευή πλήρους έγχρωμων μοντέλων 3D. Οι διεργασίες 3DP μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν με μια ποικιλία υλικών σε σκόνη, που κυμαίνονται από υλικό που μοιάζει με κόλλα που έχει ως αποτέλεσμα ένα αντικείμενο με υφή που μοιάζει με αμμόπετρα έως πηλό σε σκόνη που πρέπει να ψηθεί σε φούρνο για να σκληρυνθεί. Μερικοί

έχουν χρησιμοποιήσει 3DP με σκόνη γυαλιού, τριμμένα κόκαλα, τεμαχισμένα ελαστικά και ακόμη και πριονίδι. Ορισμένοι εκτυπωτές χρησιμοποιούν μέταλλο σε σκόνη, όπως μπρούτζο και κολλημένος μπρούτζος στη συνέχεια πρέπει να πυροσυσσωματωθεί σε φούρνο για να γίνει στερεός [4].

2.3 Είδη τρισδιάστατης εκτύπωσης

Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές διατίθενται σε όλα τα σχήματα και μεγέθη και χρησιμοποιούν διαφορετικές μεθόδους και υλικά εκτύπωσης. Δύο ακόμα βασικές κατηγορίες εκτυπωτών θα μπορούσαν να είναι οι βιομηχανικοί (industrial) και οι επιτραπέζιοι (desktop). Οι βιομηχανικοί εκτυπωτές συνήθως διαφέρουν από τους επιτραπέζιους εκτυπωτές ως προς το μέγεθος και την εμβέλεια, αν και υπάρχει κάποια διασταύρωση. Επιπλέον:

- Οι βιομηχανικοί εκτυπωτές χρησιμοποιούνται για βιομηχανικούς λόγους και κυρίως στην μαζική παραγωγή υλικών. Διατίθενται σε όλα τα σχήματα, μεγέθη και μπορούν να χρησιμοποιήσουν διαφορετικές μεθόδους εκτύπωσης ενώ ακόμα μπορούν να κατασκευαστούν ειδικά για μια συγκεκριμένη εργασία ή προϊόν.
- Οι επιτραπέζιοι ή DIY (Do It Yourself) εκτυπωτές είναι γενικά μικρότεροι 3D εκτυπωτές που μπορούν να χωρέσουν πάνω σε ένα τραπέζι και μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για επιχειρήσεις, για τέχνη όσο και για αναψυχή.



Εικόνα 2.10. Βιομηχανικοί εκτυπωτές

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω οι βιομηχανικοί εκτυπωτές συνήθως διαφέρουν από τους επιτραπέζιους εκτυπωτές ως προς το μέγεθος και την εμβέλεια. Χρησιμοποιούν επίσης ένα ευρύτερο φάσμα μεθόδων και υλικών κατασκευής πρόσθετων. Μερικές διαφοροποιήσεις περιλαμβάνουν:

- Το πρωτογενές υλικό που χρησιμοποιείται και η κατάσταση του – για παράδειγμα, πλαστικό ή μέταλλο ως τύπος, με σκόνη ή υγρό ως τη κατάσταση του υλικού.
- Μέθοδος σύντηξης – χρήση θερμότητας ή φωτός για την τήξη του υλικού.
- Δομή κατασκευής – συμπεριλαμβανομένου του στυλ της περιοχής εκτύπωσης, του συστήματος τροφοδοσίας υλικού, του αριθμού αξόνων και του αριθμού των κεφαλών εκτύπωσης και του τρόπου λειτουργίας τους.
- Βελτίωση/Τελειοποίηση – ο όγκος της εργασίας μετά την εκτύπωση που πρέπει να γίνει με το εκτυπωμένο αντικείμενο για τα επιθυμητά αποτελέσματα

2.3.1 PBF (Powder Bed Fusion)

Οι διεργασίες σύντηξης σκόνης (PBF) στην παραγωγή προσθέτων με βάση το λέιζερ έχουν λάβει σημαντική προσοχή στην έρευνα και ανάπτυξη προηγμένων υλικών μηχανικής λόγω του υψηλότερου ρυθμού ψύξης και του καλύτερου φινιρίσματος της επιφάνειας σε σύγκριση με άλλες διαδικασίες παραγωγής προσθέτων. Το PBF χρησιμοποιεί την τήξη ενός υλικού σε σκόνη (μέταλλο ή πλαστικό) για τη σύντηξη σωματιδίων μεταξύ τους. Η πλήρης ή μερική τήξη μπορεί να πραγματοποιηθεί με θερμαινόμενη κεφαλή εκτύπωσης, λέιζερ ή δέσμη ηλεκτρονίων. Τα στρώματα κατασκευής επιτυγχάνονται απλώνοντας ένα λεπτό στρώμα υλικού στην περιοχή του θαλάμου εκτύπωσης. Το στρώμα περιγράμματος του αντικείμενου εκτύπωσης λιώνει και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να γίνει το επιθυμητό αντικείμενο λιώνοντας μόνο τα σωματίδια του αντικείμενου στα στρώματα. Το μη λιωμένο υλικό στη συνέχεια διοχετεύεται, αποκαλύπτοντας το νέο αντικείμενο. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται συνήθως για την κατασκευή του τελικού προϊόντος, λόγω της υψηλής αντοχής και του εύρους φινιρίσματος μετά την εκτύπωση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Ένα μεγάλο εύρος τρισδιάστατων εκτυπωτών χρησιμοποιεί τη μέθοδο PBF [17].

Η διαδικασία Powder Bed Fusion περιλαμβάνει τις ακόλουθες κοινώς χρησιμοποιούμενες τεχνικές εκτύπωσης: Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Electron Beam Melting (EBM), Selective Heat Sintering (SHS), Selective Laser Melting (SLM), Selective Laser Sintering (SLS) και Direct Metal Laser Melting (DMLM). Αναλυτικότερα η μέθοδος:

- **SLS** - αποτελείται από τρία συστατικά, μια πηγή θερμότητας για τη σύντηξη του υλικού, μια μέθοδο ελέγχου αυτής της πηγής θερμότητας και έναν μηχανισμό για την προσθήκη νέων στρωμάτων υλικού σε σχέση με την προηγούμενη. Χρησιμοποιεί λέιζερ για τη σύντηξη/μερική τήξη διαφόρων υλικών, όπως θερμοπλαστικό, γυαλί ή κεραμική σκόνη. Η σκόνη προστίθεται και τήκεται επιλεκτικά για να δημιουργηθεί πάνω στο προηγούμενο στρώμα για να σχηματιστεί το τρισδιάστατο αντικείμενο. Η διαδικασία SLS επωφελείται από το ότι δεν απαιτεί πρόσθετη δομή στήριξης, καθώς το υλικό πούδρας παρέχει επαρκή υποστήριξη μοντέλου σε όλη τη διαδικασία κατασκευής. Η πλατφόρμα κατασκευής βρίσκεται μέσα σε έναν θάλαμο ελεγχόμενης θερμοκρασίας, όπου η θερμοκρασία είναι συνήθως μερικούς βαθμούς κάτω από αυτή του σημείου τήξης του υλικού, μειώνοντας την εξάρτηση του λέιζερ να συγχωνεύει τα στρώματα μεταξύ τους. Ο θάλαμος είναι συχνά γεμάτος με άζωτο για να μεγιστοποιηθεί η οξείδωση και η τελική ποιότητα του μοντέλου. Τα μοντέλα απαιτούν μια περίοδο ψύξης για να εξασφαλιστεί υψηλή ανοχή και ποιότητα σύντηξης. Ορισμένα μηχανήματα παρακολουθούν τη θερμοκρασία στρώμα προς στρώμα και προσαρμόζουν την ισχύ και την ισχύ του λέιζερ αντίστοιχα για να βελτιώσουν την ποιότητα [17].



Εικόνα 2.11. Εκτυπωτής που κάνει χρήση SLS

- **SLM** - σε σύγκριση με το SLS, το SLM είναι συνήθως ταχύτερο, αλλά απαιτεί τη χρήση αδρανούς αερίου, έχει υψηλότερο ενεργειακό κόστος και συνήθως έχει κακή ενεργειακή απόδοση 10 έως 20 % . Χρησιμοποιεί λέιζερ για να λιώσει επιλεκτικά πλήρως και να συντήξει στρώματα σκόνης στην περιοχή εκτύπωσης για να δημιουργήσει ένα αντικείμενο. Η διαδικασία, επίσης, χρησιμοποιεί είτε έναν κύλινδρο είτε μια λεπίδα για να απλώσει νέες στρώσεις σκόνης σε προηγούμενες στρώσεις. Όταν μια λεπίδα κολλάει, συχνά δονείται για την πιο ομοιόμορφη κατανομή της σκόνης και μια χοάνη ή μια δεξαμενή κάτω ή στο πλάι του κρεβατιού παρέχει φρέσκο υλικό [17].



Εικόνα 2.12. Εκτυπωτής που κάνει χρήση SLM

- **DMLS** - χρησιμοποιεί την ίδια διαδικασία με το SLS, αλλά με τη χρήση μετάλλων και όχι πλαστικών σκονών. Η μέθοδος είναι πολύ παρόμοια με την SLM, που ονομάζεται επίσης DMMLM, αλλά σε μοριακό επίπεδο, η σκόνη μόνο πυροσυσσωματώνεται (δεν τήκεται) μαζί. Χρησιμοποιεί ένα λέιζερ για την επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση/μερική τήξη μεταλλικής σκόνης στρώμα-με-στρώμα. Μπορεί να χρησιμοποιήσει μια ποικιλία από μεταλλικές σκόνες, όπως τιτάνιο και αλουμίνιο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μέρη που είναι λιγότερο πορώδη από τη μέθοδο τήξης. Το πλεονέκτημα αυτού είναι ότι μπορεί ο χρήστης εύκολα να εκτυπώσει από κράματα που περιέχουν υλικά με διαφορετικά σημεία τήξης. Μπορεί ακόμη να συνδυάσει μεταλλικά και πλαστικά υλικά. Ένα καλό παράδειγμα είναι το Alumide, το οποίο είναι ένα μείγμα σκόνης νάιλον + σκόνης αλουμινίου. Μια άλλη διαφορά μεταξύ πυροσυσσωμάτωσης και τήξης σε αυτές τις δύο διαδικασίες είναι η θερμοκρασία που χρησιμοποιείται για τη σύντηξη της σκόνης μετάλλου. Το SLM θερμαίνει τη μεταλλική σκόνη μέχρι να λιώσει πλήρως σε υγρό. Το DMLS δεν λιώνει τη μεταλλική σκόνη, επομένως απαιτείται λιγότερη ενέργεια. Η πυροσυσσωμάτωση θερμαίνει τα σωματίδια αρκετά ώστε οι επιφάνειές τους να συγκολληθούν μεταξύ τους. Το υλικό εργασίας για αυτή τη διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι μέταλλο σε λεπτή σκόνη. Συνήθως το κατασκευασμένο μέγεθος των μεταλλικών σωματιδίων είναι 20 – 40 μικρόμετρα. Το μέγεθος και το σχήμα των σωματιδίων περιορίζουν την ανάλυση λεπτομερειών του τελικού τμήματος. Το μικρότερο μέγεθος μεταλλικών σωματιδίων και η μικρότερη διακύμανση επιτρέπουν καλύτερη ανάλυση. Άλλα όρια ανάλυσης σε αυτήν την τεχνολογία είναι το ύψος του στρώματος και το μέγεθος του σημείου λέιζερ. Όπως και άλλες διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης, το μοντέλο χωρίζεται σε πολλά λεπτά στρώματα, τα οποία στη συνέχεια εκτυπώνονται ένα προς ένα για να κατασκευαστεί το τελικό μέρος. Τα εκτυπώσιμα ύψη στρώματος είναι περίπου το μέγιστο μέγεθος της σκόνης μετάλλου που χρησιμοποιείται [17].



Εικόνα 2.13. Εκτυπωτής που κάνει χρήση DMLS

- EBM** - χρησιμοποιεί μια εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων σε μια περιοχή εκτύπωσης κενού αέρος για να λιώσει μέταλλα σε σκόνη όπως τιτάνιο, ανοξείδωτο χάλυβα και χαλκό. Είναι ταχύτερη από άλλες μεθόδους PBF με μεγαλύτερα στρώματα και πιο τραχιές επιφάνειες που έχει λιγότερη υπολειμματική τάση και παραμόρφωση. Τα στρώματα συντήκονται χρησιμοποιώντας μια δέσμη ηλεκτρονίων για να λιώσουν μεταλλικές σκόνες. Το EBM παρέχει μοντέλα με πολύ καλές ιδιότητες αντοχής λόγω της ομοιόμορφης κατανομής της θερμοκρασίας κατά τη σύντηξη. Η υψηλή ποιότητα και το φινιρίσμα που επιτρέπει η διαδικασία το καθιστά κατάλληλο για την κατασκευή εξαρτημάτων υψηλών προδιαγραφών που χρησιμοποιούνται σε αεροπλάνα και ιατρικές εφαρμογές. Η διαδικασία προσφέρει μια σειρά από οφέλη σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους δημιουργίας εμφυτευμάτων, συμπεριλαμβανομένης της πρόσθεσης στελέχους ισχίου. Σε σύγκριση με την κατεργασία CNC, η χρήση EBM με τιτάνιο και πάχος στρώσης 0,1 mm, μπορεί να επιτύχει καλύτερα αποτελέσματα, σε ταχύτερο χρόνο και μπορεί να μειώσει το κόστος έως και 35% [17].



Εικόνα 2.14. Εκτυπωτής που κάνει χρήση EBM

- DMLM** - Το DMLM είναι μια διαδικασία κατασκευής προσθέτων που χρησιμοποιεί λέιζερ για να λιώσει εξαιρετικά λεπτά στρώματα μεταλλικής σκόνης για την κατασκευή τρισδιάστατων αντικειμένων. Η χρήση λέιζερ για την επιλεκτική τήξη λεπτών στρωμάτων μικροσκοπικών σωματιδίων αποδίδει αντικείμενα που παρουσιάζουν λεπτά, πυκνά και ομοιογενή χαρακτηριστικά. Η διαδικασία DMLM ξεκινά με έναν recoater (επενδύει ξανά το αντικείμενο)

που απλώνει ένα λεπτό στρώμα μεταλλικής σκόνης στο κρεβάτι εκτύπωσης. Στη συνέχεια, το αρχείο σε φέτες που δημιουργείται καθορίζει τις διαδρομές σάρωσης που ελέγχουν την έκθεση του λέιζερ για να λιώσει η σκόνη και να δημιουργήσει μια διατομή του αντικειμένου. Στη συνέχεια, το κρεβάτι εκτύπωσης χαμηλώνει, ώστε η διαδικασία να μπορεί να επαναληφθεί για τη δημιουργία του επόμενου στρώματος. Αφού εκτυπωθούν όλα τα στρώματα, η περίσσεια της μη λιωμένης σκόνης βουρτσίζεται ή απομακρύνεται με αμμοβολή. Το τελευταίο μέρος μερικές φορές απαιτεί λίγο, αν όχι καθόλου, φινιρίσμα. Μόλις ολοκληρωθεί η εκτύπωση, η μη συντηγμένη σκόνη απομακρύνεται, αφήνοντας το τυπωμένο αντικείμενο. Αυτή η διαδικασία είναι ισχυρή και μπορεί να ανταγωνιστεί τις παραδοσιακές μεθόδους [17], [18].



Εικόνα 2.15. Εκτυπωτής που κάνει χρήση DMLM

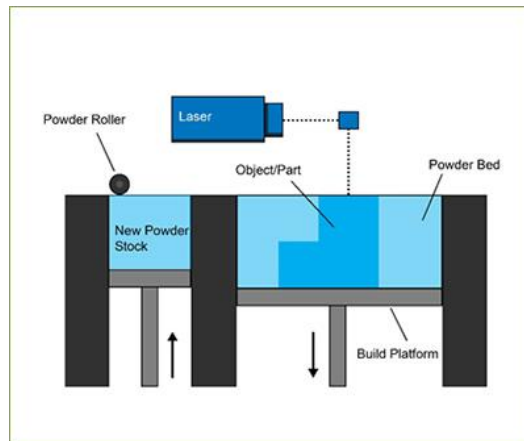
- **SHS** - είναι μια πρόσθετη διαδικασία παραγωγής παρόμοια με την SLS. Ωστόσο, οι δύο διαδικασίες δεν πρέπει να συγχέονται. Η SHS χρησιμοποιεί μια θερμική κεφαλή εκτύπωσης για τη σύντηξη θερμοπλαστικής σκόνης, ενώ η SLS χρησιμοποιεί ένα λέιζερ για τη σύντηξη θερμοπλαστικής σκόνης. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιεί θερμοπλαστικές σκόνης που λιώνουν επιλεκτικά από μια θερμαινόμενη κεφαλή εκτύπωσης. Όπως και πριν, τα στρώματα προστίθενται με έναν κύλινδρο μεταξύ της σύντηξης των στρωμάτων. Η διαδικασία χρησιμοποιείται για τη δημιουργία πρωτότυπων ιδεών και λιγότερο δομικών στοιχείων. Προστίθεται νέα πούδρα στην περιοχή εκτύπωσης και η διαδικασία επαναλαμβάνεται στρώμα-στρώμα. Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιεί χαμηλότερες θερμοκρασίες από άλλα PBF, αλλά μερικές φορές απαιτεί και στηρίγματα για τα στρώματα... Η χρήση θερμικής κεφαλής εκτύπωσης και όχι λέιζερ ωφελεί τη διαδικασία μειώνοντας σημαντικά τα απαιτούμενα επίπεδα θερμότητας και ισχύος ενώ ακόμα χρησιμοποιούνται θερμοπλαστικές πούδρες οι οποίες λειτουργούν ως υλικό στήριξης [17], [19].



Εικόνα 2.16. Εκτυπωτής που κάνει χρήση SHS

Καταλήγοντας η διαδικασία PBF είναι η εξής:

- Ένα στρώμα υλικού, τυπικά πάχους 0,1 mm απλώνεται πάνω από την πλατφόρμα κατασκευής.
- Ένα λέιζερ συγχωνεύει το πρώτο στρώμα ή την πρώτη διατομή του μοντέλου.
- Μια νέα στρώση σκόνης απλώνεται στην προηγούμενη στρώση χρησιμοποιώντας ένα ρολό.
- Περαιτέρω στρώματα ή διατομές συγχωνεύονται και προστίθενται.
- Τέλος, η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να δημιουργηθεί ολόκληρο το μοντέλο. Η χαλαρή, μη συντηγμένη σκόνη παραμένει στη θέση της, αλλά αφαιρείται κατά τη τελική επεξεργασία.



Εικόνα 2.17. Η διαδικασία του Powder Bed Fusion

Συμπερασματικά η διαδικασία PBF έχει και πλεονεκτήματα:

- Σχετικά φθηνή
- Κατάλληλη για οπτικά μοντέλα και πρωτότυπα
- (SHS) Δυνατότητα ενσωμάτωσης τεχνολογίας σε μηχανή μικρής κλίμακας, μεγέθους γραφείου
- Η πούδρα λειτουργεί ως μια ολοκληρωμένη δομή στήριξης
- Μεγάλη γκάμα επιλογής υλικών

Αλλά και μειονεκτήματα:

- Σχετικά αργή ταχύτητα
- Έλλειψη δομικών ιδιοτήτων στα υλικά
- Περιορισμοί μεγέθους
- Υψηλή κατανάλωση ενέργειας
- Το φινίρισμα εξαρτάται από το μέγεθος κόκκων σκόνης

2.3.2 Binder Jetting

Η διαδικασία Binder Jetting χρησιμοποιεί δύο υλικά, ένα υλικό με βάση τη σκόνη και ένα συνδετικό (binder). Το συνδετικό δρα ως κόλλα μεταξύ των στρωμάτων σκόνης και είναι συνήθως σε υγρή μορφή ενώ το δομικό υλικό σε μορφή σκόνης. Μια κεφαλή εκτύπωσης κινείται οριζόντια κατά μήκος των αξόνων x και y του μηχανήματος και εναποθέτει εναλλασσόμενα στρώματα του υλικού κατασκευής και του συνδετικού υλικού. Μετά από κάθε επίπεδο, το αντικείμενο που εκτυπώνεται χαμηλώνει στην πλατφόρμα κατασκευής του. Λόγω της μεθόδου δεσίματος, τα χαρακτηριστικά του

Κεφάλαιο 2

υλικού δεν είναι πάντα κατάλληλα για δομικά μέρη και παρά τη σχετική ταχύτητα εκτύπωσης, η πρόσθετη επεξεργασία μπορεί να προσθέσει σημαντικό χρόνο στη συνολική διαδικασία. Όπως και με άλλες μεθόδους κατασκευής με βάση τη σκόνη, το αντικείμενο που εκτυπώνεται στηρίζεται μόνο του εντός του στρώματος πούδρας και αφαιρείται από τη μη δεσμευμένη σκόνη μόλις ολοκληρωθεί μερικές φορές είναι εύθραυστη συνολικά και αυτό το κάνει καλό για πιο καλλιτεχνικούς σκοπούς.. Η τεχνολογία αναφέρεται συχνά ως τεχνολογία 3DP και προστατεύεται από πνευματικά δικαιώματα με αυτό το όνομα [20], [21].

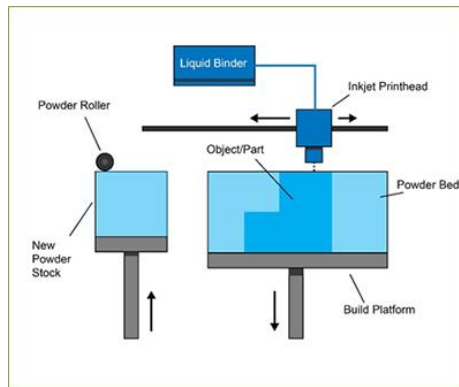


Εικόνα 2.18. Εκτυπωτής που κάνει χρήση Binder Jetting

Ειδικότερα, το Binder Jetting επιτρέπει την έγχρωμη εκτύπωση και χρησιμοποιεί μέταλλο, πολυμερή και κεραμικά υλικά. Η διαδικασία είναι γενικά ταχύτερη από άλλες και μπορεί να επιταχυνθεί περαιτέρω αυξάνοντας τον αριθμό των οπών της κεφαλής εκτύπωσης που αποθέτουν υλικό. Η προσέγγιση δύο υλικών επιτρέπει την επίτευξη μεγάλου αριθμού διαφορετικών συνδυασμών συνδετικού-σκόνης και διαφόρων μηχανικών ιδιοτήτων του τελικού μοντέλου αλλάζοντας την αναλογία και τις επιμέρους ιδιότητες των δύο υλικών. Η διαδικασία είναι επομένως κατάλληλη όταν η εσωτερική δομή του υλικού πρέπει να είναι συγκεκριμένης ποιότητας. Οι στρώσεις δομικού υλικού, συχνά σε κοκκώδη μορφή και μορφή σκόνης, συγκρατούνται μεταξύ τους χρησιμοποιώντας το συγκολλητικό συνδετικό. Η κεφαλή εκτύπωσης εναποθέτει το συνδετικό υλικό σε μικρές ποσότητες και το υλικό πούδρας χρησιμοποιείται για τη δημιουργία της πλειονότητας της συνολικής μάζας αντικειμένου. Ένας θερμαινόμενος θάλαμος κατασκευής μπορεί να βοηθήσει στην επιτάχυνση της διαδικασίας εκτύπωσης αυξάνοντας το ιξώδες των υλικών. Μετά την επεξεργασία ο συνολικός χρόνος διεργασίας παρατείνεται καθώς απαιτεί το συνδετικό υλικό να σταθεροποιηθεί και το εξάρτημα συχνά αφήνεται να κρυώσει στο μηχάνημα για να στερεοποιηθεί πλήρως για να επιτευχθεί φινίρισμα υψηλής ποιότητας. Συχνά απαιτείται φινίρισμα για να γίνει το εξάρτημα ισχυρότερο και να δώσει στο συνδετικό υλικό καλύτερες μηχανικές και δομικές ιδιότητες [20], [21].

Καταλήγοντας η διαδικασία Binder Jetting είναι η εξής:

- Το υλικό σε σκόνη απλώνεται στην πλατφόρμα κατασκευής χρησιμοποιώντας έναν κύλινδρο.
- Η κεφαλή εκτύπωσης εναποθέτει τη συγκολλητική ουσία πάνω από τη σκόνη όπου απαιτείται.
- Η πλατφόρμα κατασκευής μειώνεται από το πάχος του στρώματος του μοντέλου.
- Ένα άλλο στρώμα σκόνης απλώνεται πάνω από το προηγούμενο στρώμα. Το αντικείμενο σχηματίζεται εκεί όπου η σκόνη συνδέεται με το υγρό.
- Η μη δεσμευμένη σκόνη παραμένει στη θέση που περιβάλλει το αντικείμενο.
- Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να κατασκευαστεί ολόκληρο το αντικείμενο.



Εικόνα 2.19. Η διαδικασία του Binder Jetting

Συμπερασματικά η διαδικασία Binder Jetting έχει και πλεονεκτήματα :

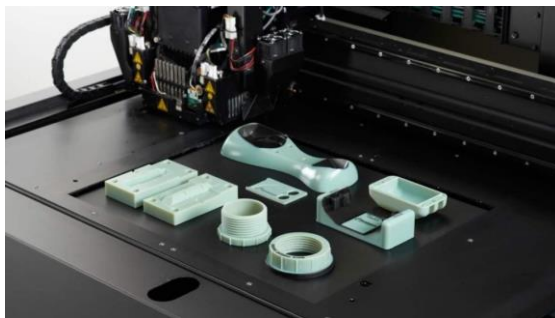
- Τα εξαρτήματα μπορούν να κατασκευαστούν με μια σειρά διαφορετικών χρωμάτων.
- Χρησιμοποιεί μια ποικιλία υλικών: μέταλλο, πολυμερή και κεραμικά.
- Μπορεί να κατασκευάσει πολύ μεγάλα εξαρτήματα και πολύπλοκα μεταλλικά γεωμετρικά σχήματα, καθώς δεν περιορίζεται από καμία θερμική επίδραση.
- Η διαδικασία είναι γενικά ταχύτερη από άλλες και οι κατασκευαστικές δυνατότητες του Binder Jetting είναι εξαιρετικές για παραγωγή χαμηλής έως μεσαίας παρτίδας.
- Η μέθοδος των δύο υλικών επιτρέπει μεγάλο αριθμό διαφορετικών συνδυασμών συνδετικού-σκόνης και διάφορες μηχανικές ιδιότητες.

Αλλά και μειονεκτήματα :

- Δεν είναι πάντα κατάλληλη για δομικά μέρη, λόγω της χρήσης συνδετικού υλικού.
- Η πρόσθετη επεξεργασία μετά το τέλος της εκτύπωσης μπορεί να αυξήσει σημαντικά τον χρόνο στη συνολική διαδικασία.
- Σε σύγκριση με άλλες διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης, το Binder Jetting προσφέρει περιορισμένη επιλογή υλικού.

2.3.3 Material Jetting

Η εκτόξευση υλικού δημιουργεί αντικείμενα με παρόμοια μέθοδο με έναν δισδιάστατο εκτυπωτή έγχυσης μελάνης. Το υλικό εκτοξεύεται σε μια πλατφόρμα κατασκευής χρησιμοποιώντας είτε συνεχή είτε προσέγγιση Drop on Demand (DOD). Οι μηχανές ποικίλουν ως προς την πολυπλοκότητα και τις μεθόδους ελέγχου της εναπόθεσης υλικού ενώ τα στρώματα υλικού στη συνέχεια σκληρύνονται χρησιμοποιώντας υπεριώδες φως (UV). Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί υποστηρίγματα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Αυτά τα στηρίγματα αναπτύσσονται χρησιμοποιώντας ένα δεύτερο σετ ακροφυσίων και με την σειρά τους διαλύονται μετά την ολοκλήρωση της εκτύπωσης. Καθώς το υλικό πρέπει να τοποθετεί τις σταγόνες, ο αριθμός των διαθέσιμων υλικών για χρήση είναι περιορισμένος. Τα πολυμερή και τα κεριά είναι τα πιο κατάλληλα υλικά, λόγω της παχύρρευστης φύσης τους και της ικανότητάς τους να σχηματίζουν σταγόνες. Αυτή η μέθοδος είναι πολύ ακριβής και μπορεί να εκτυπώσει σε πολλά χρώματα και χρησιμοποιείται για εκτυπώσεις που χρειάζονται υψηλή ακρίβεια και λείο φινιρίσμα [22].



Εικόνα 2.20. Εκτυπωτής που κάνει χρήση Material Jetting

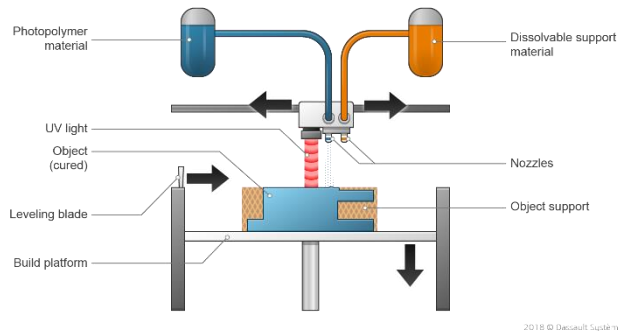
Ένα είδος Material Jetting είναι το Nanoparticle Jetting (NPJ) το οποίο χρησιμοποιεί υγρό που εγχέεται με μεταλλικά σωματίδια. Αυτό το υγρό εναποτίθεται στο κρεβάτι εκτύπωσης σε μια θερμαινόμενη περιοχή κατασκευής. Η θερμότητα εξατμίζει το υγρό αφήνοντας έτσι ένα στρώμα μετάλλου [22].

Η κατασκευαστική προσέγγιση Drop on Demand (DOD) που αναφέρθηκε προηγουμένως χρησιμοποιείται για τη διανομή υλικού στην απαιτούμενη επιφάνεια. Με την διαδικασία αυτή σχηματίζονται σταγονίδια και τοποθετούνται στην επιφάνεια κατασκευής, προκειμένου να κατασκευαστεί το αντικείμενο που εκτυπώνεται, με περαιτέρω σταγονίδια να προστίθενται σε νέα στρώματα μέχρι να κατασκευαστεί ολόκληρο το αντικείμενο. Η φύση της χρήσης σταγονιδίων περιορίζει τον αριθμό των υλικών που είναι διαθέσιμα προς χρήση. Τα πολυμερή και τα κεριά χρησιμοποιούνται συχνά και είναι κατάλληλα λόγω της παχύρρευστης φύσης τους και της ικανότητάς τους να σχηματίζουν σταγόνες. Το ιξώδες είναι ο κύριος καθοριστικός παράγοντας στη διαδικασία. υπάρχει ανάγκη να ξαναγεμίσει του δοχείου γρήγορα και αυτό με τη σειρά του επηρεάζει την ταχύτητα εκτύπωσης. Σε αντίθεση με μια συνεχή ροή υλικού, τα σταγονίδια διανέμονται μόνο όταν χρειάζεται, απελευθερώνονται από μια αλλαγή πίεσης στο ακροφύσιο από θερμικούς ή πιεζοηλεκτρικούς ενεργοποιητές. Οι θερμικοί ενεργοποιητές αποθέτουν σταγονίδια με πολύ γρήγορο ρυθμό και χρησιμοποιούν μια αντίσταση λεπτής μεμβράνης για να σχηματίσουν το σταγονίδιο. Η πιεζοηλεκτρική μέθοδος συχνά θεωρείται καλύτερη καθώς επιτρέπει τη χρήση ευρύτερου φάσματος υλικών [22].

Κατά την τελική επεξεργασία το υλικό στήριξης μπορεί να αφαιρεθεί χρησιμοποιώντας διάλυμα υδροξειδίου του νατρίου ή πίδακα νερού. Λόγω της υψηλής ακρίβειας της τεχνολογίας της διεργασίας, το επίπεδο μεταποίησης που απαιτείται για τη βελτίωση των ιδιοτήτων είναι περιορισμένο και οι λειτουργικές και αισθητικές ιδιότητες ενός εξαρτήματος καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό κατά το στάδιο της εκτύπωσης. Η τεχνολογία Stratasys polyjet ωριμάζει το υλικό χρησιμοποιώντας υπεριώδη ακτινοβολία και επομένως δεν απαιτείται πολύ δουλειά για το φινίρισμα [22].

Καταλήγοντας η διαδικασία Material Jetting είναι η εξής:

- Η κεφαλή εκτύπωσης είναι τοποθετημένη πάνω από την πλατφόρμα κατασκευής.
- Τα σταγονίδια υλικού εναποτίθενται από την κεφαλή εκτύπωσης στην επιφάνεια όπου απαιτείται, χρησιμοποιώντας είτε θερμική είτε πιεζοηλεκτρική μέθοδο.
- Τα σταγονίδια υλικού στερεοποιούνται και αποτελούν το πρώτο στρώμα.
- Τα περαιτέρω στρώματα δημιουργούνται όπως πριν πάνω από το προηγούμενο.
- Τα στρώματα αφήνονται να κρυσώσουν και να σκληρύνουν με υπεριώδη ακτινοβολία. Η μεταγενέστερη επεξεργασία περιλαμβάνει αφαίρεση του υλικού υποστήριξης.



Εικόνα 2.21. Η διαδικασία του Material Jetting

Συμπερασματικά η διαδικασία Binder Jetting έχει και πλεονεκτήματα :

- Επωφελείται από υψηλή ακρίβεια εναπόθεσης σταγονιδίων και επομένως χαμηλή σπατάλη.
- Επιτρέπει πολλαπλά υλικά και χρώματα σε μία κατασκευή.

Αλλά και μειονεκτήματα:

- Συχνά απαιτείται υλικό υποστήριξης.
- Μπορεί να επιτευχθεί υψηλή ακρίβεια, αλλά τα υλικά είναι περιορισμένα καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο πολυμερή και κεριά.

2.3.3 DED (Directed Energy Deposition)

Η διαδικασία DED (γνωστή και ως Direct Metal Deposition) χρησιμοποιεί θερμική ενέργεια για την τήξη και τη σύντηξη υλικού το οποίο συνήθως είναι σε μορφή σύρματος ή σκόνης. Το σύρμα είναι λιγότερο ακριβές λόγω της φύσης ενός προσχηματισμένου σχήματος, αλλά είναι πιο αποδοτικό ως προς το υλικό σε σύγκριση με τη σκόνη, καθώς χρησιμοποιείται μόνο το απαιτούμενο υλικό. Ένα τυπικό μηχάνημα DED αποτελείται από ένα ακροφύσιο τοποθετημένο σε έναν βραχίονα πολλαπλών αξόνων, ο οποίος εναποθέτει λιωμένο υλικό στην καθορισμένη επιφάνεια, όπου στερεοποιείται. Η μέθοδος τήξης του υλικού ποικίλλει μεταξύ ενός λέιζερ, μιας δέσμης ηλεκτρονίων ή ενός τόξου πλάσματος, όλα μέσα σε έναν ελεγχόμενο θάλαμο όπου η ατμόσφαιρα έχει μειωμένα επίπεδα οξυγόνου. Με μηχανές 4 ή 5 αξόνων, η κίνηση της κεφαλής τροφοδοσίας δεν θα αλλάξει τον ρυθμό ροής του υλικού, σε σύγκριση με τη σταθερή, κατακόρυφη εναπόθεση. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως για την εκτύπωση πρωτότυπων ή την επιδιόρθωση υπαρχόντων αντικειμένων και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με πολυμερή, κεραμικά, αλλά συνήθως χρησιμοποιείται με μέταλλα, με τη μορφή σκόνης ή σύρματος [23].



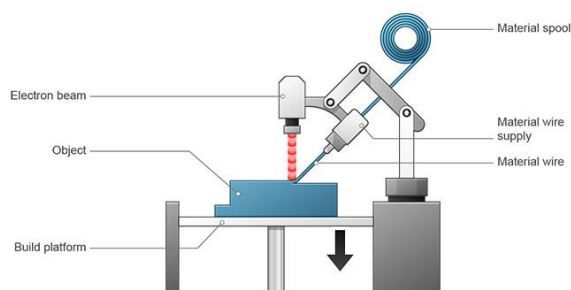
Εικόνα 2.22. Εκτυπωτής που κάνει χρήση DED

Η διαδικασία DED έχει μερικές βασικές υποκατηγορίες:

- **Laser Engineered Net Shape (LENS)** – χρησιμοποιεί λέιζερ για να λιώσει επιλεκτική περιοχή υλικού από σκόνη που βρίσκεται στην περιοχή εκτύπωσης. Το στρώμα στη συνέχεια στερεοποιείται πριν προστεθεί το επόμενο στρώμα.
- **Electron Beam Additive Melting (EBAM)** – χρησιμοποιεί μια δέσμη ηλεκτρονίων και μια περιοχή κατασκευής κενού αέρος για την τήξη μεταλλικού ρεύματος ή νήματος σύρματος.

Καταλήγοντας η διαδικασία DED είναι η εξής:

- Ο βραχίονας 5 αξόνων με ακροφύσιο κινείται γύρω από ένα σταθερό αντικείμενο.
- Το υλικό εναποτίθεται από το ακροφύσιο σε υπάρχουσες επιφάνειες του αντικειμένου.
- Το υλικό παρέχεται είτε σε μορφή σύρματος είτε σε μορφή σκόνης.
- Το υλικό τήκεται χρησιμοποιώντας λέιζερ, δέσμη ηλεκτρονίων ή τόξο πλάσματος κατά την εναπόθεση.
- Περαιτέρω υλικό προστίθεται στρώμα προς στρώμα και στερεοποιείται, δημιουργώντας ή επισκευάζοντας νέα χαρακτηριστικά υλικού στο υπάρχον αντικείμενο.



Εικόνα 2.23. Η διαδικασία του Directed Energy Deposition

Συμπερασματικά η διαδικασία Binder Jetting έχει και πλεονεκτήματα :

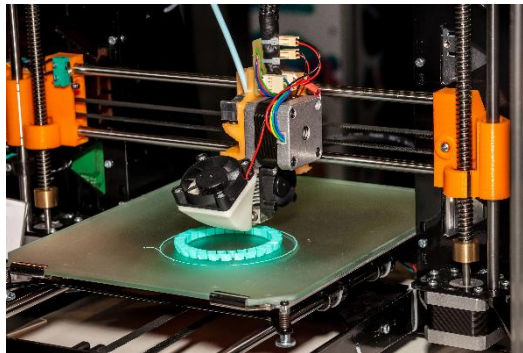
- Δυνατότητα ελέγχου της δομής των κόκκων σε υψηλό βαθμό, η οποία επιτρέπει τη διαδικασία επισκευής εργασιών υψηλής ποιότητας, λειτουργικών εξαρτημάτων
- Απαιτείται μια ισορροπία μεταξύ της ποιότητας της επιφάνειας και της ταχύτητας, αν και με τις εφαρμογές επισκευής, η ταχύτητα μπορεί συχνά να θυσιάσει για μια υψηλή ακρίβεια και μια προκαθορισμένη μικρή δομή.

Αλλά και μειονεκτήματα:

- Τα φινιρίσματα μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με το χαρτί ή το πλαστικό υλικό, αλλά μπορεί να απαιτούν μεταγενέστερη επεξεργασία για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.
- Περιορισμένη χρήση υλικού.
- Οι διαδικασίες σύντηξης απαιτούν περισσότερη έρευνα για την περαιτέρω εξέλιξη του τελικού αποτελέσματος.

2.3.4 Material Extrusion

Με την διαδικασία αυτή υλικό τραβιέται μέσω ενός ακροφυσίου, όπου θερμαίνεται και στη συνέχεια εναποτίθεται στρώμα-στρώμα. Το ακροφύσιο μπορεί να κινηθεί οριζόντια και μια πλατφόρμα κινείται πάνω και κάτω κάθετα μετά την απόθεση κάθε νέου στρώματος. Είναι μια συχνά χρησιμοποιούμενη τεχνική που χρησιμοποιείται σε πολλούς φθηνούς και οικιακούς τρισδιάστατους εκτυπωτές. Η διαδικασία έχει πολλούς παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα του τελικού μοντέλου, αλλά έχει μεγάλες δυνατότητες και βιωσιμότητα όταν αυτοί οι παράγοντες ελέγχονται με επιτυχία. Ενώ το FDM είναι παρόμοιο με όλες τις άλλες διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης, καθώς δημιουργεί στρώμα με στρώμα, ποικίλλει ως προς το γεγονός ότι το υλικό προστίθεται μέσω ενός ακροφυσίου υπό σταθερή πίεση και σε συνεχή ροή. Αυτή η πίεση πρέπει να διατηρείται σταθερή και σε σταθερή ταχύτητα για να επιτραπούν ακριβή αποτελέσματα ενώ τα στρώματα υλικού μπορούν να συνδεθούν με έλεγχο θερμοκρασίας ή με χρήση χημικών παραγόντων [24].



Εικόνα 2.24. Εκτυπωτής που κάνει χρήση Material Extrusion

Τα πλεονεκτήματα της διαδικασίας εξώθησης υλικού περιλαμβάνουν τη χρήση εύκολα διαθέσιμου πλαστικού το ABS, το οποίο μπορεί να παράγει μοντέλα με καλές δομικές ιδιότητες, κοντά σε ένα τελικό μοντέλο παραγωγής. Σε περιπτώσεις χαμηλού όγκου, αυτή μπορεί να είναι μια πιο οικονομική μέθοδος από τη χρήση χύτευσης με έγχυση. Ωστόσο, η διαδικασία απαιτεί πολλούς παράγοντες που πρέπει να ελέγχονται προκειμένου να επιτευχθεί φινιρίσμα υψηλής ποιότητας. Η ακρίβεια και η ταχύτητα είναι χαμηλές σε σύγκριση με άλλες διαδικασίες και η ποιότητα του τελικού μοντέλου περιορίζεται στο πάχος του ακροφυσίου υλικού. Όταν χρησιμοποιείται η διαδικασία για εξαρτήματα όπου πρέπει να επιτευχθεί υψηλή ανοχή, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η βαρύτητα και η επιφανειακή ένταση. Το τυπικό πάχος στρώσης κυμαίνεται από 0,178 mm έως 0,356 mm [24].

Μια μέθοδος φινιρίσματος για τη βελτίωση της οπτικής εμφάνισης των μοντέλων είναι η βελτίωση της μεταδοτικότητας του υλικού. Οι μέθοδοι που έχουν διερευνηθεί, περιλαμβάνουν την αύξηση της θερμοκρασίας και τη χρήση ρητίνης. Πειράματα με χρήση ρητίνης, που χρησιμοποιείται συχνά για τη βελτίωση της αντοχής των εξαρτημάτων, οδήγησαν σε αύξηση 5% στη μεταδοτικότητα

Κεφάλαιο 2

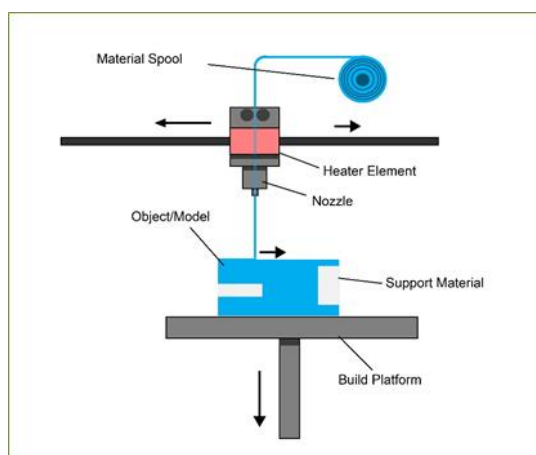
μετά από 30 δευτερόλεπτα. Όπως συμβαίνει με τις περισσότερες διαδικασίες μετά την επεξεργασία που σχετίζονται με τη θερμότητα, είναι πιθανό να συμβεί συρρίκνωση και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη εάν απαιτείται υψηλή ανοχή [24].

Ένα είδος Material Extrusion είναι το:

- **Fused deposition modeling (FDM)/Fused Filament Fabrication (FFF)** – (που αναλύθηκε προηγουμένως) αυτός ο τύπος τρισδιάστατου εκτυπωτή είναι ένας από τους πιο γνωστούς στο κοινό και χρησιμοποιείται ευρέως τόσο από τη βιομηχανία όσο και από τους λάτρεις των DIY.

Καταλήγοντας η διαδικασία Material Jetting είναι η εξής:

- Το πρώτο στρώμα κατασκευάζεται ως υλικό εξαγόμενο από τα ακροφύσια όπου απαιτείται στην περιοχή διατομής της πρώτης τομής αντικειμένου.
- Τα ακόλουθα στρώματα προστίθενται πάνω από τα προηγούμενα στρώματα.
- Τα στρώματα συντήκονται μεταξύ τους κατά την εναπόθεση καθώς το υλικό βρίσκεται σε κατάσταση τήξης.



Εικόνα 2.25. Η διαδικασία του Material Extrusion

Συμπερασματικά η διαδικασία Material Extrusion έχει και πλεονεκτήματα :

- Διαδεδομένη και φθηνή διαδικασία.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί πλαστικό ABS, το οποίο έχει καλές δομικές ιδιότητες και είναι εύκολα προσβάσιμο.

Αλλά και μειονεκτήματα:

- Η εύρος κίνησης του ακροφυσίου περιορίζει και μειώνει την τελική ποιότητα.
- Η ακρίβεια και η ταχύτητα είναι χαμηλές σε σύγκριση με άλλες διαδικασίες και η ακρίβεια του τελικού μοντέλου περιορίζεται στο πάχος του ακροφυσίου υλικού.
- Απαιτείται σταθερή πίεση υλικού για να αυξηθεί η ποιότητα του φινιρίσματος.

2.3.4 Sheet Lamination

Το Sheet Lamination χρησιμοποιεί πολύ λεπτά στρώματα υλικού που συνδέονται μεταξύ τους. Αυτό επιτυγχάνεται με εναλλασσόμενες στρώσεις υλικού και κόλλας και πραγματοποιείται από μία ποικιλία υλικών όπως χαρτί και μέταλλο. Μόλις σταθεροποιηθούν οι στρώσεις, κόβονται με λέιζερ ή λεπίδα για να σχηματίσουν μια εκτύπωση. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει δύο βασικές κατηγορίες:

- **Laminated Object Manufacturing (LOM)** – (που αναλύθηκε προηγουμένως) είναι μια από τις πρώτες τεχνικές κατασκευής πρόσθετων που δημιουργήθηκαν και χρησιμοποιεί μια ποικιλία υλικά σε σχήμα φύλλου, δηλαδή χαρτί. Τα πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν τη χρήση χαρτιού A4, το οποίο είναι άμεσα διαθέσιμο και φθινό, καθώς και μια σχετικά απλή και φθηνή εγκατάσταση, σε σύγκριση με άλλα [25].
- **The Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM)** - Η διαδικασία χρησιμοποιεί φύλλα μετάλλου, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους χρησιμοποιώντας συγκόλληση με υπερήχους. Η διαδικασία απαιτεί πρόσθετη κατεργασία CNC του μη δεσμευμένου μετάλλου. Σε αντίθεση με το LOM, το μέταλλο δεν μπορεί να αφαιρεθεί εύκολα με το χέρι και το ανεπιθύμητο υλικό πρέπει να αφαιρεθεί με μηχανική κατεργασία. Ωστόσο, η μεταλλική ταινία εξοικονόμησης υλικού πάχους 0,150 mm και πλάτους 25 mm έχει ως αποτέλεσμα να κοπεί λιγότερο υλικό στη συνέχεια. Η άλεση μπορεί να γίνει μετά την προσθήκη κάθε στρώσης ή μετά από ολόκληρη τη διαδικασία. Τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν αλουμίνιο, χαλκό, ανοξείδωτο χάλυβα και τιτάνιο και η διαδικασία είναι χαμηλής θερμοκρασίας και επιτρέπει τη δημιουργία εσωτερικών γεωμετριών. Ένα βασικό πλεονέκτημα είναι ότι η διαδικασία μπορεί να συνδέει διαφορετικά υλικά και απαιτεί σχετικά λίγη ενέργεια καθώς το μέταλλο δεν λιώνει, αντί να χρησιμοποιεί συνδυασμό συχνότητας και πίεσης υπερήχων. Τα υλικά συνδέονται και υποβοηθούνται από την πλαστική παραμόρφωση των μετάλλων η οποία επιτρέπει μεγαλύτερη επαφή μεταξύ της επιφάνειας και υποστηρίζει τους υπάρχοντες δεσμούς [25].



Εικόνα 2.26. Εκτυπωτής που κάνει χρήση UAM

Καταλήγοντας η διαδικασία Sheet Lamination είναι η εξής:

- Το υλικό τοποθετείται στη θέση του στο κρεβάτι κοπής.
- Το υλικό συγκολλάται στη θέση του, πάνω από το προηγούμενο στρώμα, χρησιμοποιώντας την κόλλα.
- Στη συνέχεια κόβεται το επιθυμητό σχήμα από το στρώμα, με λέιζερ ή μαχαίρι.
- Το επόμενο στρώμα προστίθεται.
- Εναλλακτικά, το υλικό μπορεί να κοπεί πριν τοποθετηθεί και συγκολληθεί.

Συμπερασματικά η διαδικασία Sheet Lamination έχει και πλεονεκτήματα:

- Η ταχύτητα, το χαμηλό κόστος, η ευκολία χειρισμού του υλικού, αλλά η αντοχή και η ακεραιότητα των μοντέλων εξαρτάται από τη χρησιμοποιούμενη κόλλα.
- Η κοπή μπορεί να είναι πολύ γρήγορη επειδή η διαδρομή κοπής είναι μόνο αυτή του περιγράμματος του σχήματος και όχι ολόκληρης της διατομής.

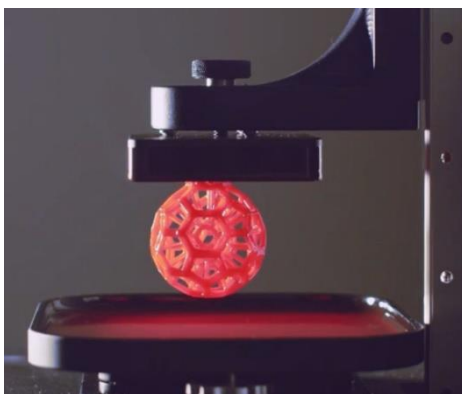
Αλλά και μειονεκτήματα:

- Τα φινιρίσματα μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με το χαρτί ή το πλαστικό υλικό, αλλά μπορεί να απαιτούν μεταγενέστερη επεξεργασία για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.
- Περιορισμένη χρήση υλικού.
- Οι διαδικασίες σύντηξης απαιτούν περισσότερη έρευνα για την περαιτέρω εξέλιξη του τελικού αποτελέσματος.

2.3.5 Vat Photopolymerization

Το Vat Photopolymerization χρησιμοποιεί μια δεξαμενή υγρής φωτοπολυμερούς ρητίνης, από την οποία το μοντέλο κατασκευάζεται στρώμα προς στρώμα. Ένα υπεριώδες φως χρησιμοποιείται για τη σκλήρυνση της ρητίνης όπου απαιτείται, ενώ μια πλατφόρμα μετακινεί το αντικείμενο που κατασκευάζεται προς τα κάτω μετά τη σκλήρυνση κάθε νέας στρώσης. Καθώς η διαδικασία χρησιμοποιεί υγρό για να σχηματίσει αντικείμενα, δεν υπάρχει δομική υποστήριξη από το υλικό κατά τη φάση κατασκευής, σε αντίθεση με τις μεθόδους που βασίζονται σε σκόνη, όπου η υποστήριξη παρέχεται από το μη δεσμευμένο υλικό. Σε αυτή την περίπτωση, συχνά θα χρειαστεί να προστεθούν δομές στήριξης. Οι ρητίνες ωριμάζουν χρησιμοποιώντας μια διαδικασία φωτοπολυμερισμού ή υπεριώδες φως, όπου το φως κατευθύνεται σε όλη την επιφάνεια της ρητίνης με τη χρήση καθρεφτών ελεγχόμενων από κινητήρα. Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για την εκτύπωση αντικειμένων με αρκετές λεπτομέρειες αλλά και λείες επιφάνειες. Δύο βασικές κατηγορίες Vat Photopolymerization είναι [26]:

- **Stereolithography (SL)** - (αναλύθηκε προηγουμένως) χρησιμοποιεί μια περιοχή εκτύπωσης γεμάτη με υγρή φωτοπολυμερή ρητίνη. Η ρητίνη ωριμάζει με ένα υπεριώδες φως (UV) στρώμα προς στρώμα για να σχηματιστεί το αντικείμενο. Αυτή η διαδικασία γίνεται μέρα με την μέρα και πιο δημοφιλής στην τρισδιάστατη εκτύπωση DIY.
- **Digital Light Processing (DLP)** – (αναλύθηκε προηγουμένως) είναι μια παραλλαγή της διαδικασίας SL που χρησιμοποιεί καθρέφτες για να αντανakλούν το υπεριώδες φως. Επίσης, μία διαδικασία που γίνεται δημοφιλής στην τρισδιάστατη εκτύπωση DIY.



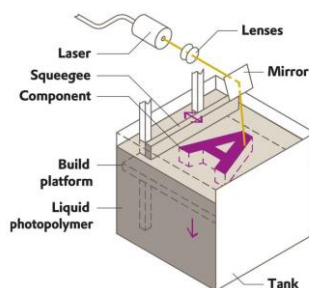
Εικόνα 2.27. Εκτυπωτής που κάνει χρήση Vat Photopolymerization

Για την τελική επεξεργασία, τα μέρη πρέπει να αφαιρεθούν από τη ρητίνη και οποιαδήποτε περίσσεια ρητίνης να αποστραγγιστεί πλήρως από τον κάδο. Τα στηρίγματα μπορούν να αφαιρεθούν χρησιμοποιώντας ένα μαχαίρι ή ένα αιχμηρό εργαλείο. Χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην μολυνθεί η ρητίνη και πρέπει να λαμβάνονται οι κατάλληλες προφυλάξεις ασφαλείας. Οι μέθοδοι για την αφαίρεση της ρητίνης και των υποστηριγμάτων περιλαμβάνουν τη χρήση ενός ξεβγάλματος με οινόπνευμα που ακολουθείται από ένα ξέβγαλμα με νερό. Η επεξεργασία μπορεί να είναι μακρά καθώς

τα μέρη μπορεί να απαιτούν πρόσθετο τρίψιμο για να αφαιρεθεί πλήρως το υλικό. Τέλος, τα εξαρτήματα μπορούν να στεγνώσουν φυσικά ή με τη χρήση σωλήνα αέρα. Η υπεριώδης ακτινοβολία χρησιμοποιείται επίσης συχνά, για μια τελική διαδικασία μετά την ωρίμανση για να εξασφαλιστεί ένα αντικείμενο υψηλής ποιότητας [26].

Καταλήγοντας η διαδικασία Vat Photopolymerization είναι η εξής:

- Η πλατφόρμα κατασκευής χαμηλώνει από την κορυφή του δοχείου ρητίνης προς τα κάτω κατά το πάχος του στρώματος.
- Ένα φως UV σκληραίνει τη ρητίνη στρώμα-στρώμα. Η πλατφόρμα συνεχίζει να κινείται προς τα κάτω και επιπλέον στρώματα χτίζονται πάνω από το προηγούμενο.
- Ορισμένες μηχανές χρησιμοποιούν μια λεπίδα που κινείται μεταξύ των στρωμάτων για να παρέχει μια λεία βάση ρητίνης για την κατασκευή της επόμενης στρώσης.
- Μετά την ολοκλήρωση, ο κάδος αποστραγγίζεται από ρητίνη και το αντικείμενο αφαιρείται.



Εικόνα 2.28. Η διαδικασία του Vat Photopolymerization

Συμπερασματικά η διαδικασία Vat Photopolymerization έχει και πλεονεκτήματα:

- Υψηλό επίπεδο ακρίβειας και καλό φινίρισμα.
- Σχετικά γρήγορη διαδικασία.
- Τυπικά μεγάλες περιοχές κατασκευής: διαστάσεις 1000 x 800 x 500 και μέγιστο βάρος μοντέλου γύρω στα 200 kg.

Αλλά και μειονεκτήματα:

- Σχετικά ακριβό.
- Μακρύς χρόνος μετά την επεξεργασία και αφαίρεση από τη ρητίνη.
- Περιορισμένη χρήση υλικού φωτορητίνων.
- Συχνά απαιτεί δομές στήριξης και στεγανοποίηση για τα εξαρτήματα να είναι αρκετά ισχυρά για δομική χρήση.

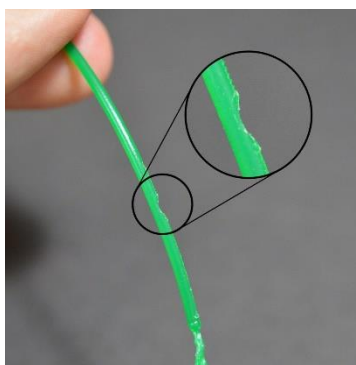
2.4 Είδη υλικών και νημάτων σε έναν εκτυπωτή FDM

Τα υλικά τρισδιάστατων εκτυπωτών διατίθενται σε μεγάλη γκάμα τύπων και χρωμάτων. Κάθε ένα έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη πριν από την επιλογή του υλικού που ταιριάζει καλύτερα στις ανάγκες της κατασκευής. Το χρησιμοποιήσιμο υλικό θα εξαρτηθεί επίσης από τον επιλεγμένο εκτυπωτή 3D. Για παράδειγμα, ορισμένοι βιομηχανικοί εκτυπωτές χρησιμοποιούν σκόνη ή ρητίνη, ενώ οι κοινοί επιτραπέζιοι 3D εκτυπωτές χρησιμοποιούν τύπους πλαστικών. Τα θερμοπλαστικά νήματα είναι ένα κοινό υλικό που χρησιμοποιείται από εκτυπωτές FDM.

Όταν θερμαίνονται, αυτά τα υλικά γίνονται μαλακά και εύκαμπτα ενώ όταν κρυώσουν γίνονται σκληρά και συνήθως είναι συσκευασμένα σε καρούλια που συνδέονται με τον 3D εκτυπωτή [1], [2], [3].

Η επιλογή του νήματος που ταιριάζει καλύτερα στον εκτυπωτή του κάθε χρήστη είναι ένα σημαντικό βήμα στη διαδικασία εκτύπωσης που επηρεάζει άμεσα την τελικό αποτέλεσμα. Ωστόσο αυτή η επιλογή δεν είναι τόσο εύκολη αν αναλογιστεί κανείς τις παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν υπόψη όπως:

- **Το μέγεθος του νήματος** - επί του παρόντος, υπάρχουν δύο κύρια μεγέθη νήματος για επιτραπέζιους 3D εκτυπωτές, 1,75mm και 3.0mm.
- **Το είδος** - το πλαστικό είναι το κύριο υλικό που χρησιμοποιείται στις εκτυπώσεις FDM. Ωστόσο, το πλαστικό μπορεί να συνδυαστεί με πρόσθετα υλικά, αλλοιώνοντας τις ιδιότητές του και αλλάζοντας τη συνολική εμφάνιση και αντοχή της τελικής εκτύπωσης.
- **Η αισθητική** - μπορεί να υπάρξει αντιστάθμιση κατά την επιλογή ενός νήματος. Για κάποιους χρήστες η αισθητική και η απτική γοητεία μπορεί να έχουν μεγαλύτερη απήχηση από αυτή της σκληρότητας και αντοχής.
- **Το κόστος και διαθεσιμότητα** - ανάλογα με τον τύπο και την ποσότητα, τα υλικά μπορεί να κυμαίνονται από πολύ χαμηλές έως και πολύ υψηλές τιμές ανά καρούλι. Κάποιο εξειδικευμένο νήμα μπορεί να είναι πιο δύσκολο να αποκτηθεί από τα πιο κοινά βασικά υλικά.
- **Η ποιότητα** - Δεν είναι όλα τα νήματα ίδια σε ποιότητα. Η ποιότητα του νήματος υπαγορεύει την ποιότητα της εκτύπωσης οπότε πριν την αγορά πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή στα παρακάτω:
 - ❖ **Διάμετρος και συνοχή** - το νήμα πρέπει να είναι ομαλό καθ' όλη την διάρκεια της εκτύπωσης. Εάν η διάμετρος μεγαλώσει πολύ, απλώς θα μπλοκάρει ενώ αν είναι πολύ μικρό, μπορεί να τροφοδοτεί αρκετά τον εκτυπωτή.
 - ❖ **Σύνθεση** - πολλές φορές τα φθηνότερα νήματα μπορούν να βγάλουν προβλήματα και να καταστρέψουν μία πολύωρη εκτύπωση, ένα από τα πιο συνήθη είναι οι κόμποι, δηλαδή το μπλέξιμο του νήματος μέσα στο καρούλι.
 - ❖ **Περιεκτικότητα σε υγρασία** - η καλή συσκευασία είναι κρίσιμη, καθώς το πλαστικό θα απορροφήσει την υγρασία από την ατμόσφαιρα ανάλογα με την υγρασία και τη διάρκεια της έκθεσης.
 - ❖ **Πιθανά προβλήματα από την πάροδο του χρόνου** - όσο παλαιότερο είναι το νήμα, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να μειωθεί η ποιότητα και η απόδοση του στις εκτυπώσεις.



Εικόνα 2.29. Εμφανή προβλήματα ενός φθηνού νήματος

2.4.1 PLA (Polylactic acid)

Ένα από τα πιο κοινά θερμοπλαστικά στην τρισδιάστατη εκτύπωση είναι το PLA, ένα φιλικό προς το περιβάλλον, βιοδιασπώμενο πολυμερές που δημιουργείται από φυτικά σάκχαρα από καλλιέργειες όπως το καλαμπόκι και το ζαχαροκάλαμο. Αυτό το υλικό μπορεί να τυπωθεί σε ένα κρεβάτι εκτύπωσης καλυμμένο με ταινία ζωγραφικής και δεν απαιτεί θερμαινόμενη πλάκα κατασκευής. Το PLA λιώνει σε χαμηλή θερμοκρασία (γύρω στους 160 βαθμούς Κελσίου), αν και συμπεριφέρεται καλύτερα στους 180 βαθμούς Κελσίου. Οι περισσότεροι εκτυπωτές PLA κατευθύνουν έναν μικρό ανεμιστήρα στον εξωθητήρα για να κρυώσει το υλικό καθώς προστίθεται, εμποδίζοντας το θερμό άκρο του εξωθητήρα να ξαναλιώσει τα προηγούμενα στρώματα [1], [2], [3].

Το PLA μπορεί να είναι πιο εύθραυστο από άλλα θερμοπλαστικά, αν και αναπτύσσονται ειδικές εκδόσεις για αυξημένη ευελιξία και μειωμένο αποτύπωμα άνθρακα κατά τη δημιουργία του υλικού. Το PLA είναι δημοφιλές στις φτωχές περιοχές του κόσμου, επειδή μπορεί να δημιουργηθεί από οποιαδήποτε φυσικά φυτικά σάκχαρα είναι διαθέσιμα τοπικά. Το PLA χρησιμοποιείται για τη δημιουργία συλλεκτών βροχής και εξαρτημάτων σωλήνων σε πολλά λιγότερο ανεπτυγμένα μέρη του κόσμου, μαζί με απλά προϊόντα υγιεινής, όπως καθίσματα τουαλέτας [1], [2], [3].

Μερικά πλεονεκτήματα από την χρήση του PLA:

- Είναι το πιο εύκολο υλικό για εργασία..
- Λειτουργεί καλά για αρχάριους.
- Είναι λιγότερο επιρρεπές σε στρέβλωση σε σύγκριση με το ABS.
- Διατίθεται σε πολλές παραλλαγές, όπως σε πλήρη γκάμα χρωμάτων, ημιδιαφανές ακόμα και σε εκδόσεις όπου λάμπει στο σκοτάδι.
- Μπορεί να παράγει ένα γλυκό άρωμα που μυρίζει σαν καραμέλα όταν θερμαίνεται.

Μερικά μειονεκτήματα από την χρήση του PLA:

- Μπορεί να είναι ισχυρό αλλά εύθραυστο.
- Προσελκύει μόρια νερού και κατά καιρούς γίνεται εύθραυστο, δυσκολεύοντας την εκτύπωση εάν δεν έχει αποθηκευτεί σωστά.
- Το κορεσμένο με νερό PLA χρειάζεται υψηλότερη θερμοκρασία εξώθησης.

2.4.2 ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)

Το πλαστικό ABS χρησιμοποιείται σε μια ποικιλία βιομηχανικών εφαρμογών για εξώθηση και χύτευση με έγχυση, όπως τα δημοφιλή τούβλα LEGO. Οι ιδιότητές του είναι γνωστές και η ποιότητα του νήματος μπορεί εύκολα να ελεγχθεί κατά την κατασκευή. Το ABS έχει την ιδιότητα να λιώνει σε αρκετά υψηλή θερμοκρασία (220-225 °C) και έχει αρκετά μικρή τριβή κατά την εξαγωγή του. Το πλαστικό ABS συρρικνώνεται καθώς ψύχεται. Έτσι, μια θερμαινόμενη πλάκα κατασκευής παράγει καλύτερα αποτελέσματα περιορίζοντας τη συστολή των προηγούμενων στρωμάτων για την αποφυγή παραμόρφωσης μεγάλων αντικειμένων. Εάν χρησιμοποιείται σε περιορισμένο χώρο. Το ABS έχει μια ήπια οσμή κατά την εξώθηση που μπορεί να επηρεάσει τα χημικά ευαίσθητα άτομα (και τα πουλιά) [1], [2], [3].

Μερικά πλεονεκτήματα από την χρήση του ABS:

- Είναι πολύ ανθεκτικό και δυνατό.
- Είναι ελαφρύ και ελαφρώς εύκαμπτο.
- Είναι ένα από τα φθηνότερα θερμοπλαστικά της αγοράς.
- Ανέχεται υψηλότερες θερμοκρασίες.

Κεφάλαιο 2

- Είναι ένα από τα πρώτα υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Μερικά μειονεκτήματα από την χρήση του ABS:

- Είναι πλαστικό με βάση το πετρέλαιο, λιγότερο βιοδιασπώμενο.
- Απαιτεί υψηλότερη θερμοκρασία για να φτάσει σε σημείο τήξης.
- Δημιουργεί αναθυμιάσεις που μπορεί να ερεθίσουν τους ανθρώπους.
- Είναι επιρρεπές σε συρρίκνωση και παραμόρφωση.

2.4.3 Nylon (Polyamides)

Το Nylon είναι μια άλλη πρόσφατη προσθήκη στις επιλογές τρισδιάστατης εκτύπωσης, ιδιαίτερα χρήσιμη για αντικείμενα που απαιτούν ευελιξία και ισχυρή κόλληση μεταξύ των στρωμάτων. Το θερμοπλαστικό νήμα από Nylon απαιτεί εξώθηση μεταξύ 240 και 270 βαθμών Κελσίου και έχει εξαιρετική πρόσφυση στο κάθε στρώμα. Το Nylon είναι ανθεκτικό στην ακετόνη, η οποία διαλύει υλικά όπως το ABS και το PLA. Επιπλέον, τα υλικά από Nylon μπορεί να είναι αδιαφανή, διαφανή ή βαμμένα διαφορετικά χρώματα με κοινές βαφές ρούχων που προορίζονται για νάιλον υφάσματα. Το Nylon μπορεί να παράγει καλά εύκαμπτα δοχεία, όπως βάζα και κύπελλα, επειδή η εξαιρετική του συγκόλληση στο στρώμα βοηθά στη δημιουργία στεγανών αντικειμένων [1], [2], [3].



Εικόνα 2.30. Οι διαφορές ανάμεσα σε PLA, ABS και Nylon

Μερικά πλεονεκτήματα από την χρήση του Nylon:

- Υψηλή αντοχή, ανθεκτικότητα και ευελιξία.
- Λιγότερο εύθραστο από το PLA .
- Μπορεί να λιώσει και να χρησιμοποιηθεί ξανά χωρίς να χάσει τις ιδιότητες συγκόλλησης
- Μπορεί να βαφτεί.

Μερικά μειονεκτήματα από την χρήση του Nylon:

- Πολύ υψηλή θερμοκρασία τήξης τουλάχιστον 240 °C
- Όταν θερμαίνεται, μπορεί να διασπαστεί και να εκπέμψει τοξικούς ατμούς.
- Απορροφά την υγρασία

2.4.4 PVA (Polyvinyl alcohol)

Μια δημοφιλής επιλογή για υδατοδιαλυτή υποστήριξη είναι το PVA, ένα βιοδιασπώμενο βιομηχανικό συγκολλητικό υλικό που εξωθείται μεταξύ 180 και 200 βαθμών Κελσίου. Ορισμένες

ποικιλίες PVA είναι αχώγιμες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την τρισδιάστατη εκτύπωση ηλεκτρικών κυκλωμάτων απευθείας σε κατασκευασμένα αντικείμενα. Το εκτυπωμένο με PVA υλικό διαλύεται εύκολα στο νερό, ωστόσο, πρέπει να απομονώνεται από την ατμοσφαιρική υγρασία. Το PVA χρησιμοποιείται συνήθως ως υλικό υποστήριξης για άλλους τύπους θερμοπλαστικών, έτσι ώστε αργότερα να μπορεί να διαλυθεί στο νερό για να αποκαλύψει το τελικό πλαστικό αντικείμενο [1], [2], [3].

Μερικά πλεονεκτήματα από την χρήση του PVA:

- Μη τοξικό και βιοδιασπώμενο.
- Διαλυτό στο νερό.
- Χαμηλή ευελιξία και ασφαλές για φαγητό.

Μερικά μειονεκτήματα από την χρήση του PVA:

- Μπορεί να είναι δύσκολο στη χρήση, καθώς απορροφά την υγρασία .
- Δύσκολη αποθήκευση.
- Ακριβό σε σύγκριση με άλλα νήματα.

2.4.5 PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol)

Το PETG γίνεται γρήγορα το βασικό υλικό για πολλούς χρήστες τρισδιάστατης εκτύπωσης. Μπορεί να είναι μια πολύ καλή εναλλακτική του ABS και του PLA επειδή έχει παρόμοια αντοχή σε κρούση με το ABS και υψηλότερη αντοχή στη θερμοκρασία από το PLA. Συνήθως έχει λιγότερη οσμή κατά την εκτύπωση και στρεβλώνει σημαντικά λιγότερο από το ABS. Το πλαστικό PETG χρησιμοποιείται για πολλούς τύπους πλαστικών συσκευασιών, ειδικά δοχεία τροφίμων και ποτών. Επιπλέον, για υλικά PETG που χρησιμοποιούνται από τρισδιάστατους εκτυπωτές, χρησιμοποιείται συχνά ο γενικός όρος πολυεστέρας. Αν και αυτό το υλικό είναι συχνά εξαιρετικό στη χρήση για μεγάλα μοντέλα για τα οποία το PLA μπορεί να είναι πολύ εύθραυστο, μπορεί να παρουσιάσει περισσότερα προβλήματα παραμόρφωσης και ακόμη και να καταστρέψει ορισμένες επιφάνειες πλατφόρμας κατασκευής. Μια θερμαινόμενη πλατφόρμα κατασκευής που λειτουργεί στους 85 βαθμούς C περίπου είναι ιδανική για εκτύπωση με υλικά με βάση τον πολυεστέρα. Οι ανεμιστήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ψύξη του εξωθημένου υλικού με παρόμοιο τρόπο με την ψύξη του PLA. Ο φυσικός πολυεστέρας συνήθως παρέχεται ως διαφανές νήμα, αλλά μπορεί να χρωματιστεί κατά την κατασκευή. Τα μπουκάλια PET με το σύμβολο ανακύκλωσης 1 μπορούν να αλέσουν και να λιώσουν για να παραχθούν ανακυκλωμένα υλικά για τρισδιάστατη εκτύπωση [1], [2], [3].

Μερικά πλεονεκτήματα από την χρήση του PETG:

- Ασφαλές για την χρήση σε είδη τροφίμων.
- Εύκολο υλικό για τρισδιάστατη εκτύπωση.
- Ευέλικτο.
- Χειρίζεται ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών χωρίς προβλήματα.
- Σκληρό και αντικραδασμικό.

Μερικά μειονεκτήματα από την χρήση του PETG:

- Απορροφά την υγρασία από τον αέρα οπότε το PETG πρέπει να αποθηκευτεί σωστά.
- Απαιτεί υψηλότερη θερμοκρασία για την εκτύπωση και ορισμένοι εκτυπωτές δεν μπορούν να φτάσουν στις απαιτούμενες θερμοκρασίες.

2.4.6 HIPS (High Impact Polystyrene)

Ένα άλλο διαλυτό υλικό στήριξης που έγινε πρόσφατα διαθέσιμο είναι το HIPS, μια παραλλαγή του στυρενίου, το οποίο είναι το υλικό που χρησιμοποιείται στα υλικά συσκευασίας και στα δοχεία

τροφίμων. Το HIPS έχει παρόμοιες ιδιότητες με το ABS, αλλά διαλύεται σε λιμονένιο (ένας βιολογικά προερχόμενος διαλύτης που παράγεται από φυτά εσπεριδοειδών) και όχι σε ακετόνη, όπως το ABS. Το νήμα HIPS είναι σχετικά νέο και η χρήση του είναι ακόμα πειραματική. Όπως το PVA, το HIPS χρησιμοποιείται κυρίως ως διαλυτό υλικό στήριξης σε συνδυασμό με άλλους τύπους θερμοπλαστικών [1], [2], [3].

Μερικά πλεονεκτήματα από την χρήση του HIPS:

- Παρόμοιο, αλλά συνήθως εκτυπώνει καλύτερα από το ABS και είναι λιγότερο πιθανό να παραμορφωθεί..
- Πολύ άκαμπτο

Μερικά μειονεκτήματα από την χρήση του HIPS:

- Έχει προβλήματα πρόσφυσης παρόμοια με το ABS.
- Η χρήση είναι δύσκολη αν δεν υπάρχει θερμαινόμενο κρεβάτι.

2.5 Επίλογος 2^{ου} Κεφαλαίου

Σε αυτό το κεφάλαιο έγινε αναλυτική αναφορά στα περισσότερα, αν όχι όλα, είδη εκτυπωτών αφού βέβαια υπήρξε ο διαχωρισμός τους σε δύο μεγάλες κατηγορίες, αυτούς εναποθέτουν στρώματα πρώτης ύλης και αυτούς που δεσμεύουν πρώτες ύλες για την δημιουργία αντικειμένων. Επίσης, ένας ακόμα διαχωρισμός ανάμεσα στους εκτυπωτές ήταν οι οικιακοί και οι βιομηχανικοί εκτυπωτές. Παρά την παραπάνω κατηγοριοποίηση όμως έγινε ξεκάθαρο ότι η επιλογή ενός 3D εκτυπωτή τόσο για την αγορά όσο και για την κατασκευή του δεν είναι καθόλου εύκολη μιας και εκτός από το είδος του εκτυπωτή υπάρχουν και διάφορα είδη τρισδιάστατης εκτύπωσης που κάνουν τα πράγματα ακόμα πιο περίπλοκα μιας και κάθε εκτυπωτής έχει έναν ειδικό σκοπό που τον καθορίζει ο χρήστης και οι άμεσες ανάγκες του. Επιπλέον, στο κεφάλαιο αυτό περιεγράφηκαν αναλυτικά τα περισσότερα υλικά που μπορεί να εκτυπώσει ένας FDM 3D εκτυπωτής, επισημαίνοντας τόσο τα πλεονεκτήματα όσο και τα μειονεκτήματα ενώ παράλληλα έγινε ενδελεχής αναφορά σε όλες τις σημαντικές προϋποθέσεις πριν την αγορά του νήματος εκτύπωσης. Τέλος, υπάρχουν διάφορα ακόμα υλικά που υποστηρίζουν οι FDM 3D εκτυπωτές, όπως υβριδικές μορφές PLA και άλλες πιο εξειδικευμένες παραλλαγές, ωστόσο τα περισσότερα από αυτά είτε δεν είναι τόσο διαδεδομένα είτε είναι ακόμα σε πειραματικό στάδιο οπότε δεν αναφέρθηκαν στην παρούσα Π.Ε..

Κεφάλαιο 3: Υλοποίηση και λειτουργία του 3D εκτυπωτή

3.1 Εισαγωγή στο πρότζεκτ

Στην παρούσα ΠΕ στόχος είναι η κατασκευή ενός 3D εκτυπωτή, με το είδος, το μέγεθος, την χρήση εξαρτημάτων αλλά και την εκτύπωση υλικών να μην περιορίζεται από κανέναν παράγοντα. Με βάση τις πληροφορίες που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα εισαγωγικά κεφάλαια, είναι σχετικά εύκολο να κατηγοριοποιηθεί ο εκτυπωτής που υλοποιήθηκε στην παρούσα πτυχιακή εργασία. Συγκεκριμένα, ο εκτυπωτής είναι καρτεσιανός, δηλαδή το εύρος κίνησης κατά την διάρκεια της εκτύπωσης επιχειρείται και στους τρεις άξονες (X,Y,Z). Επιπλέον, έχει τις ιδιότητες ενός FDM εκτυπωτή, δηλαδή κάποιο είδος θερμοπλαστικού λιώνει από την θερμοκρασία που παράγεται στην μύτη και εξάγεται σε στρώματα ώστε να αποδοθεί ένα ομοιογενές και επιθυμητό αποτέλεσμα. Επιπλέον, μία άλλη ονομασία που θα μπορούσε να προστεθεί είναι αυτή του RepRap (Replicating Rapid Prototyper) εκτυπωτή, δηλαδή ενός εκτυπωτή που μπορεί να εκτυπώσει κομμάτια για την κατασκευή άλλων εκτυπωτών. Η χρήση της συγκεκριμένης ονομασίας δεν είναι και τόσο συχνή μιας και οι παραπάνω ιδιότητα ισχύει για τους περισσότερους

εκτυπωτές οπότε τα ευκόλως εννοούμενα παραλείπονται. Τέλος, τα υλικά εκτύπωσης στον συγκεκριμένο εκτυπωτή περιορίζονται στο PLA καθώς, όπως θα επισημανθεί παρακάτω, η εκτύπωση χωρίς θερμαινόμενο κρεβάτι είναι αρκετά δύσκολη.

3.2 Δομικά υλικά και υλικά στήριξης

Ξεκινώντας ακριβώς με την σειρά που τοποθετήθηκαν τα υλικά, αρχικά χρειάστηκε να γίνει η κατασκευή ενός στιβαρού πλαισίου στήριξης και υποδοχής των υπόλοιπων υλικών, στο οποίο θα έπρεπε, όσο το δυνατόν περισσότερο, να επικρατεί η σταθερότητα και η ακρίβεια κατά την διάρκεια της κίνησης των επιμέρους στοιχείων αλλά και γενικότερα σε μία κανονική εκτύπωση. Ίσως να ακούγεται απλό, αλλά ο σχεδιασμός μπορεί στην πραγματικότητα να είναι αρκετά περίπλοκος και αυτό οφείλεται στις πολλές διαφορετικές σχεδιαστικές δυνατότητες. Συγκεκριμένα ένα πλαίσιο θα πρέπει να:

- Υποστηρίζει όλα τα μηχανικά και ηλεκτρικά εξαρτήματα που λειτουργούν στην πραγματική διάρκεια της εκτύπωσης.
- Καθορίζει τον όγκο κατασκευής του 3D εκτυπωτή.
- Δίνει στον εκτυπωτή τόσο μία στιβαρή όσο και μία αισθητική εμφάνιση.

Για την δημιουργία του μέρους του πλαισίου που αποτελεί την βάση (το κάτω μέρος) του εκτυπωτή επιλέχθηκαν 2x2040 (20mm ύψος, 40mm πλάτος) Vslot αλουμίνια τα οποία όπως φαίνεται από μπροστά ο εκτυπωτής, τοποθετήθηκαν παράλληλα, αριστερά και δεξιά, ενώ για να ολοκληρωθεί το παραλληλόγραμμο προστέθηκαν πάνω και κάτω (δηλαδή στα άκρα των δύο ήδη υπάρχοντων αλουμινίων) 2x2020 Vslot αλουμίνια. Η σύνδεση μεταξύ των αλουμινίων έγινε με “Σύνδεσμο Τύπου L με 5 οπές” τα οποία με την σειρά τους ενώθηκαν με παξιμάδια “Tee Nut 2020 – Drop in M5” και με βίδες “M5-L8mm”.



Εικόνα 3.1. Οι συνδέσεις των εξαρτημάτων σε μία από τις τέσσερις γωνίες του πλαισίου

Για την δημιουργία του υπόλοιπου σκελετού του πλαισίου τοποθετήθηκαν 2x2040 Vslot αλουμίνια κάθετα, πάνω στα ήδη υπάρχοντα 2040 Vslot αλουμίνια τα οποία συνδέθηκαν με “Σύνδεσμο Τύπου T με 5 οπές”. Στο πάνω μέρος των δύο αυτών αλουμινίων τοποθετήθηκε άλλο ένα 2020 Vslot αλουμίνιο ώστε να ολοκληρώσει την σύνδεση όλων των κομματιών που αποτελούσαν το αρχικό πλαίσιο. Επίσης, για να προσδίδει μεγαλύτερη σταθερότητα στο επερχόμενο βάρος που θα τοποθετηθεί πάνω στον εκτυπωτή, προστέθηκαν 4xLeveling Foot M8x100mm και στις τέσσερις γωνίες της κάτω επιφάνειας του πλαισίου. Τα συγκεκριμένα Leveling Foot έρχονταν σε πολύ μεγάλο μέγεθος οπότε έγινε ηλεκτροκόλληση μιας μικρότερης βίδας (M5) στην κεφαλή της υπάρχουσας (M8) ώστε να χωράει στο παξιμάδι με υποδοχή βίδας M5. Όπως παρατηρείται (Εικόνα 37) η σύνδεση των αλουμινίων είναι

λίγο περιέργη καθώς αποτελεί την επίλυση ενός προβλήματος που προέκυψε οπότε θα αναλυθεί αργότερα, στο κεφάλαιο με τα προβλήματα. Τέλος, στον πίνακα που ακολουθεί έχουν προστεθεί όλα τα υλικά που παίζουν κάποιο δομικό ρόλο στην παρούσα ΠΕ (βίδες, παξιμάδια και άλλα συνδετικά μέρη) δεν υπάρχουν απαραίτητα στο πλαίσιο που μόλις αναλύθηκε, έτσι ώστε να γίνει ο κατάλληλος διαχωρισμός ανάμεσα σε δομικά/λειτουργικά υλικά και εξαρτήματα.

Πίνακας 3.1. Δομικά υλικά

ΥΛΙΚΑ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ	ΚΟΣΤΟΣ ΣΕ € (ΧΩΡΙΣ ΦΠΑ)
TEE NUT 2020 – SLIDING M5	Παξιμάδι σύνδεσης με βίδες M5	80	10.32
UNIVERSAL “L” BRACKET	Για την σύνδεση του πλασίου	6	3.8712
V-SLOT 2020 500MM – BLACK ANODIZED	Αλουμίνιο για την κατασκευή του πλασίου	6	28.9836
V-SLOT 2040 500MM – BLACK ANODIZED	Αλουμίνιο για την κατασκευή του πλασίου	2	11.2742
V-SLOT 2040 1000MM – BLACK ANODIZED	Για κάθετη τοποθέτηση μετά από κόψιμο στην μέση	1	10.4758
V-SLOT 2020 1000MM – BLACK ANODIZED	Για το πλαίσιο και τον Χ άξονα	2	12.58
ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΤΥΠΟΥ “L” 5 ΟΠΕΣ	Για την σύνδεση του πλασίου	4	5.8064
ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΤΥΠΟΥ “T” 5 ΟΠΕΣ	Για την σύνδεση του πλασίου	4	5.8064
ΒΙΔΕΣ M5 – L6MM ΧΑΜΗΛΟΥ ΠΡΟΦΙΛ	Για τις συνδέσεις πάνω στο πλαίσιο	25	2.0968
ΒΙΔΕΣ M5 – L8MM ΧΑΜΗΛΟΥ ΠΡΟΦΙΛ	Για τις συνδέσεις πάνω στο πλαίσιο	80	4.128
ΒΙΔΕΣ ΚΑΙ ΠΑΞΙΜΑΔΙΑ M3	Για τις συνδέσεις των μοτέρ	300	4.3548
ΡΟΔΕΛΑ M3 PRESSBOARD	Για τις βίδες M3	20	0.484

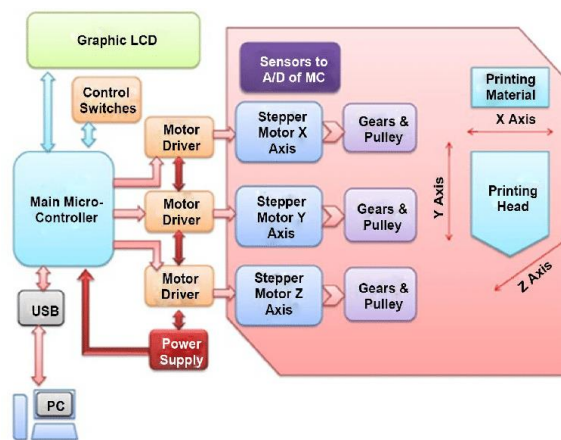
3.3 Λειτουργικά υλικά και εξαρτήματα

Μετά την δημιουργία του αρχικού πλαισίου, το επόμενο βήμα είναι ο κατάλληλος συνδυασμός τόσο του hardware όσο και του software για την επίτευξη μιας ομαλής κίνησης των αξόνων και έπειτα μία ολοκληρωμένη εκτύπωση. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι άξονες κίνησης είναι τρεις, X, Y και Z με τον καθέναν από αυτούς να έχει τις ιδιαιτερότητες του και πάρα το πλήθος των διαφορετικών τρόπων υλοποίησής τους, πρέπει αν δοθεί μεγάλη προσοχή ώστε να αποφευχθούν οι αστοχίες. Τέλος, να επισημανθεί ότι η τροφοδοσία όλων των εξαρτημάτων έγινε με ένα απλό τροφοδοτικό 24V 15A 360W ώστε να είναι επαρκές σε περίπτωση μελλοντικής προσθήκης ενός θερμαινόμενου κρεβατιού.

3.3.1 Κίνηση στον άξονα Z

Ο κατακόρυφος άξονας, που ονομάζεται άξονας Z σε έναν καρτεσιανό 3D εκτυπωτή, συνήθως οδηγείται αργά για την επίτευξη και της παραμικρής λεπτομέρειας κατά το δημιουργία των στρωμάτων. Πολλοί εκτυπωτές πρέπει να σηκώσουν ολόκληρο το κινούμενο άξονα X, συμπεριλαμβανομένου του εξωθητήρα, του κινητήρα αλλά και της μύτης και για να επιτευχθεί αυτό για την κατακόρυφη κίνηση του άξονα Z επιλέχθηκε η χρήση δύο βηματικών κινητήρων (stepper motors).

Οι βηματικοί κινητήρες είναι ειδικοί κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες που επιτυγχάνουν υψηλό επίπεδο ακρίβειας σε μικρές κινήσεις και μπορούν να περιστρέφονται σταδιακά δίνοντάς τους ακριβή έλεγχο της θέσης και της ταχύτητάς τους. Χρησιμοποιούνται για τη μετακίνηση όλων των τμημάτων του εκτυπωτή που συνδέονται με γρανάζια, ιμάντες και βίδες. Στην συγκεκριμένη ΠΕ χρησιμοποιήθηκαν 5 κινητήρες τύπου NEMA 17 με ροπή 0.59Nm για την επίτευξη όλων των αναγκών.



Εικόνα 3.2. Block διάγραμμα λειτουργίας

Οι δύο κινητήρες, όπως είναι φυσιολογικό, πρέπει να παραμένουν συγχρονισμένοι σε κάθε περίπτωση. Η κίνηση των δύο κατακόρυφων Z επιτυγχάνει την ανύψωση του εκάστοτε φορτίου μέσω ενός ζεύγους απλών ράβδων με σπείρωμα που συνδέονται στον άξονα και δύο βηματικών κινητήρων. Η σύνδεση των ράβδων με τα άκρα των κινητήρων γίνεται μέσω ειδικών συζευκτών (clamping shaft coupler). Έτσι, ο κινητήρας περιστρέφεται μαζί με την ράβδο και με την σειρά του μετακινούν πάνω κάτω τα δύο παξιμάδια, τα οποία είναι υπεύθυνα για την κίνηση του άξονα X (αντί για παξιμάδια χρησιμοποιήθηκαν δύο NUT BLOCK ANTI-BACKLASH).

Το κύριο μειονέκτημα είναι ότι ένα τυπικό παξιμάδι και μια τυπική ράβδος με σπείρωμα δεν είναι αρκετά βελτιστοποιημένα για όλη την κίνηση που απαιτεί η τρισδιάστατη εκτύπωση οπότε πρέπει να περιοριστεί προσεκτικά η ταχύτητα με την οποία οδηγούνται τους κινητήρες για να μην υπάρξουν

προβλήματα όπως η παράλειψη βημάτων. Ευτυχώς, ένας αργός κατακόρυφος άξονας Z δεν αποτελεί σημαντικό περιοριστικό παράγοντα για τους περισσότερους τύπους τρισδιάστατης εκτύπωσης. Η κεφαλή εκτύπωσης αφιερώνει πολύ περισσότερο χρόνο στην κίνηση στους άξονες X και Y για να εκτυπώσει κάθε στρώμα από ό,τι κινείται κάθετα. Ωστόσο, αυτός ο τύπος κίνησης, ράβδος με σπείρωμα δεν χρησιμοποιείται για τους άξονες X και Y ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή, επειδή η κίνηση θα ήταν τρομερά αργή. Επιπλέον, η μεταφορά του φορτίου στον άξονα X μετατοπίζεται πάνω και κάτω στον άξονα Z μέσω δύο μεταλλικών πλακών (Openrail Gantry Plates), οι οποίες κινούνται κάθετα πάνω στα 2x2040 Vslot αλουμίνια. Τέλος, έχει ενεργοποιηθεί μια λειτουργία ανύψωσης του Z που κάνει το φορέα του εξωθητήρα να πηδά προς τα πάνω κάθε φορά που το μηχάνημα πρέπει να μετακινείται σε νέο σημείο εκτύπωσης. Αυτό ονομάζεται Z lift, και μπορεί να εμποδίσει το ακροφύσιο εκτύπωσης να χτυπήσει ένα κομμάτι ήδη εκτυπωμένου πλαστικού, κάτι που μπορεί να φέρει το μοντέλο εκτός ευθυγράμμισης.

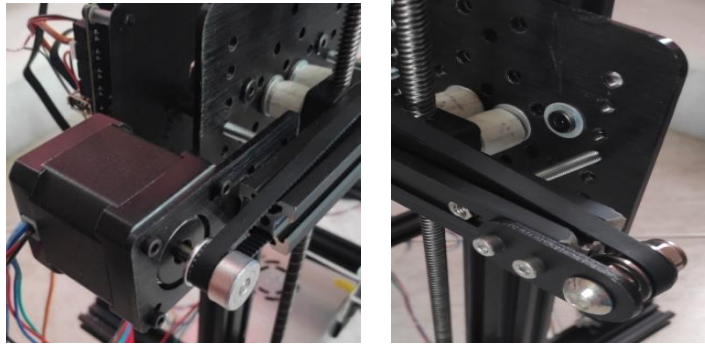


Εικόνα 3.3. Η σύνδεση των εξαρτημάτων για την κίνηση στον άξονα Z

3.3.2 Κίνηση στους άξονες X και Y

Η κίνηση X και Y ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο γρήγορη. Όσο πιο γρήγορα μπορείτε να τοποθετήσετε την κεφαλή εκτύπωσης σε διάφορα σημεία γύρω από την πλάκα κατασκευής, τόσο πιο γρήγορα μπορείτε να δημιουργήσετε τρισδιάστατα μοντέλα. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούμε συνήθως μίαντες χρονισμού ακριβείας και οδοντωτές τροχαλίες που συνδέονται απευθείας στον άξονα του κινητήρα. Όπως και με τον άξονα Z, χρειάζεται μεγάλη ακρίβεια των ρυθμίσεων για αυτές τις κινήσεις. Αυτοί οι μίαντες χρονισμού έχουν λεπτά σύρματα από χάλυβα που

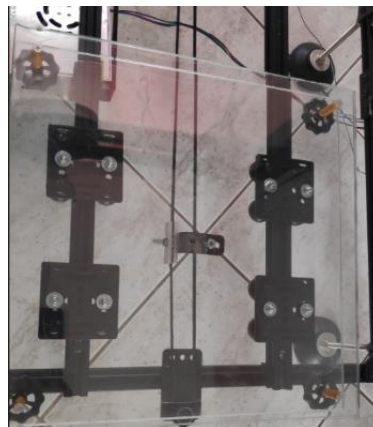
εμποδίζουν το τέντωμα του ιμάντα, φθείρονται τελικά, αλλά θα πρέπει να προσφέρουν μερικά καλά χρόνια εκτύπωσης.



Εικόνα 3.4. Η σύνδεση των εξαρτημάτων για την κίνηση του ιμάντα χρονισμού και στις δύο πλευρές του άξονα X

Η κίνηση στον άξονα X αποτελείται από:

- **1x2020 Vslot αλουμίνιο** - το οποίο στηρίζεται πάνω στις δύο μεταλλικές πλάκες του άξονα Z ενώ και αυτό με την σειρά του κουβαλάει όλα τα εξαρτήματα κίνησης του άξονα X.
- **1xVslot Gantry Set 2020** – το “βαγόνι” είναι μία μεταλλική επιφάνεια με ροδάκια κατάλληλα σχεδιασμένη για την κίνηση πάνω σε αλουμίνιο τύπου 2020 Vslot και για την υποδοχή του συστήματος εξώθησης και ακροφυσίου.
- **1xNEMA 17** - ο βηματικός κινητήρας που είναι υπεύθυνος για την κίνηση του βαγονιού σε όλη την επιφάνεια του αλουμινίου και σε γρήγορες ταχύτητες.
- **1xTiming Belt**– η ζώνη χρονισμού η οποία, από την μεριά που είναι ο κινητήρας, γυρνάει μαζί με την οδοντωτή τροχαλία ενώ από την απέναντι πλευρά, γλιστράει πάνω στην λεία τροχαλία έτσι ώστε να γίνεται ομοιόμορφα η κίνηση και να καθορίζεται μόνο από τον κινητήρα. Τέλος, η σταθεροποίηση της ζώνης έγινε πάνω από το βαγόνι με την βοήθεια μιας μεταλλικής γωνίας έτσι ώστε να μην έρχεται σε επαφή με τα ροδάκια κίνησης.



Εικόνα 3.5. Το κρεβάτι και η σύνδεση των εξαρτημάτων για την κίνηση στον άξονα Y

Η κίνηση στον άξονα Y αποτελείται από:

- **4xVslot Gantry Set 2020** - πάνω στα οποία στηρίζεται το κρεβάτι εκτύπωσης.
- **2x2020 Vslot αλουμίνια** - πάνω στα οποία κινούνται τα τέσσερα βαγόνια.
- **1xNEMA 17** - ο βηματικός κινητήρας που είναι υπεύθυνος για την κίνηση των τεσσάρων βαγονιών μπροστά και πίσω αντίστοιχα.
- **1xTiming Belt** – η ζώνη χρονισμού
- **Το κρεβάτι εκτύπωσης** – το οποίο με την σειρά του συγκροτείται από δύο Plexiglas και ένα τζάμι σαν επιφάνεια εκτύπωσης. Το ένα Plexiglas είναι στερεωμένο πάνω στα τέσσερα βαγόνια, το άλλο βρίσκεται από πάνω με την λεπτομέρεια ότι μεταξύ τους υπάρχουν σουσέτες οι οποίες καθορίζουν το bed leveling , δηλαδή πόσο επίπεδο είναι το κρεβάτι. Επιπρόσθετα, στην κορυφή του συγκεκριμένου “σάντουιτς” βρίσκεται ένα κομμάτι γυαλί διαστάσεων 320mmx320mm το οποίο είναι κολλημένο πάνω στο Plexiglas με σιλικόνη και αποτελεί την κύρια επιφάνεια εκτύπωσης. Λόγω της έλλειψης θερμαινόμενου κρεβατιού η εκτύπωση περιορίζεται στο υλικό PLA και για την καλή πρώτη επαφή κατά την εξαγωγή του χρειάζεται να τοποθετηθεί λίγη κόλλα ή μερικά κομμάτια ειδικής αυτοκόλλητης ταινίας.

3.3.3 Κίνηση του νήματος

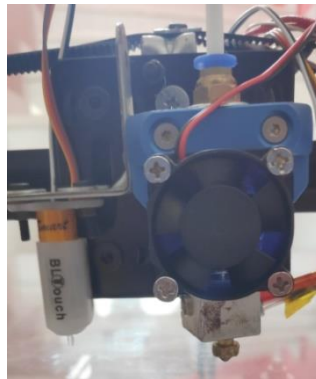
Μέχρι στιγμής έχουν χρησιμοποιηθεί τέσσερις κινητήρες για την κίνηση στους τρεις άξονες, ωστόσο αναφέρθηκε ότι έγινε χρήση πέντε κινητήρων. Ο πέμπτος κινητήρας είναι υπεύθυνος για την κίνηση του νήματος μέχρι την εξαγωγή του από το ακροφύσιο όπου μετά τοποθετείται σε στρώματα. Συγκεκριμένα, το καρούλι έχει τοποθετηθεί πάνω στον εκτυπωτή με μία αυτοσχέδια βάση και από εκεί το νήμα με διάμετρο 1.75mm περνάει μέσα από έναν μηχανισμό εξώθησης τύπου MK8 Extruder, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με τον πέμπτο κινητήρα και έτσι γυρνάνε τα γρανάζια του μηχανισμού εξώθησης ώστε να περάσει από μέσα το νήμα . Έπειτα, το νήμα διέρχεται μέσα από ένα σωληνάκι πλαστικού PTFE. Η διαδικασία αυτή όπου ο κινητήρας είναι απομακρυσμένος από το ακροφύσιο και το νήμα χρειάζεται να περνάει μέσα από τον σωλήνα PTFE ονομάζεται Bowden Extruder, ενώ η άλλη περίπτωση όπου ο κινητήρας έχει άμεση επαφή με το σύστημα της μύτης ονομάζεται Direct Drive Extruder. Τέλος, το νήμα φτάνει στην θερμαινόμενη μύτη όπου και εξάγεται με τις εργοστασιακές του προδιαγραφές να κάνουν λόγο για ιδανική θερμοκρασία λιωσίματος τους 180-220 βαθμούς Κελσίου.



Εικόνα 3.6. Ο μηχανισμός εξώθησης του νήματος πριν εισέλθει στο σωληνάκι PTFE

Το σύστημα του nozzle, όπως ονομάζεται συνήθως, είναι της εταιρίας E3D η οποία αποτελεί ένα αρκετά γνωστό όνομα στον κόσμο της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Αναλυτικότερα, το σύστημα αυτό αποτελείται από αρκετά και μικρά μέρη, τα οποία τροφοδοτούνται με 24V, όπως:

- **Το στόμιο ασφαλείας** - που υποδέχεται και ασφαλίζει του σωλήνα PTFE.
- **Την ψύκτρα** - για την διατήρηση της θερμοκρασίας αλλά και την γρήγορη ψύξη της μύτης όταν χρειάζεται.
- **Το ανεμιστηράκι** - το οποίο βρίσκεται πάνω στην ψύκτρα.
- **Το θερμόφρενο** - το οποίο εκλεπτυσμένο φινιρίσμα στην εσωτερική του επιφάνεια για μείωση της δύναμης εξώθησης και βελτιωμένη αξιοπιστία με τις συστολές λόγω την θερμοκρασίας.
- **Τον θερμοστάτη** - ένα block αλουμινίου πάνω στο οποίο συνδέεται η τροφοδοσία της μύτης αλλά και το thermistor και έτσι διαμορφώνεται το σύστημα ελέγχου της θερμοκρασίας.
- **Το ακροφύσιο (ή μύτη ή nozzle)** - στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι κατασκευασμένο από ορείχαλκο (με διάμετρο 0.4mm) το οποίο συνεπάγεται ότι, έχει βέλτιστες θερμικές ιδιότητες για καθημερινή εκτύπωση, παρέχοντας λείες στρώσεις για τυπικές εφαρμογές και εκτιμάται σε μέγιστη θερμοκρασία 300°C.



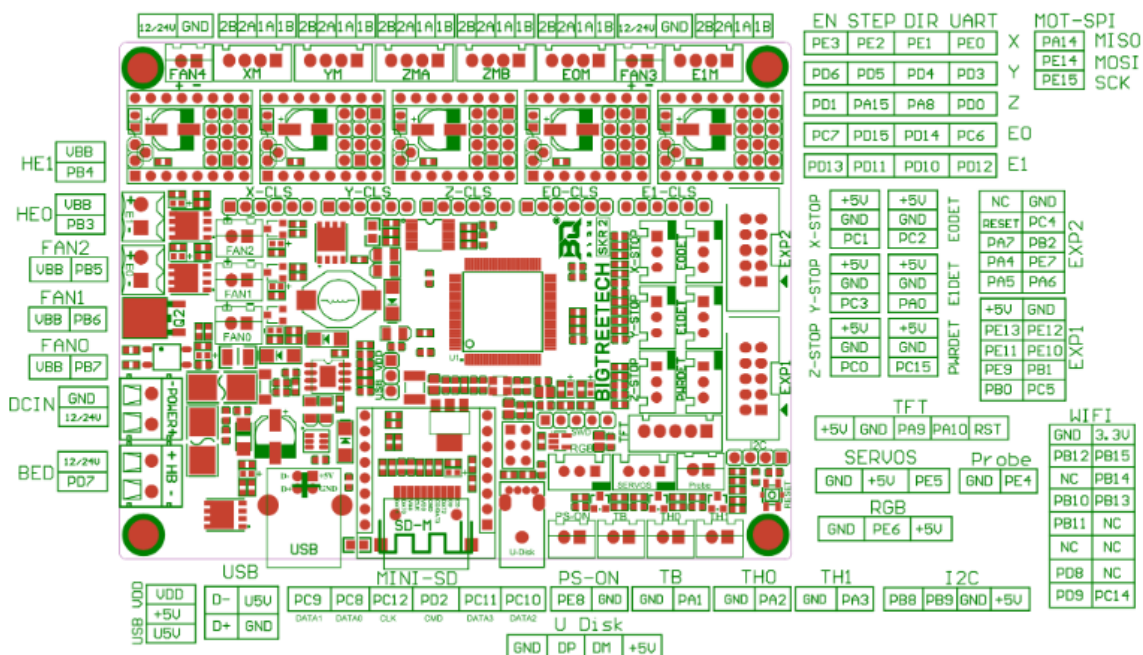
Εικόνα 3.7. Όλο το σύστημα του nozzle μαζί με το BLtouch

3.3.4 BIGTREETECH SKR2 REVB (Motherboard)

Για τον έλεγχο όλων των παραπάνω κινήσεων και λειτουργιών απαιτείται η επιλογή της ιδανικής μητρικής πλακέτας ανάλογα με τις επιθυμίες του χρήστη καθώς τα πάντα συνδέονται πάνω σε αυτήν. Μετά από μελέτη όλων των πιθανών “ιδανικών” μητρικών πλακετών επιλέχθηκε η χρήση της SKR2 REVB μίας σχετικά καινούργιας πλακέτας η οποία έχει αρκετά πρωτότυπα χαρακτηριστικά. Ωστόσο, υπήρξε μία αναμονή επιβεβαίωσης πριν της αγορά της μιας και η προηγούμενη έκδοση (SKR2 REVA) είχε κάποια προβλήματα και έκαψε τους drivers των κινητήρων όταν αυτοί ήταν τύπου TMC. Η επιβεβαίωση ήρθε από την εταιρεία όπου και διαβεβαίωσαν ότι οι πλακέτες με FET που ξεκινάει με “HY1904” αποτελούν την διορθωμένη έκδοση. Αναλυτικά τα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης μητρικής πλακέτας είναι [6]:

- Χρησιμοποιεί ένα κύριο τσιπ ελέγχου σειράς 32-bit ARM Cortex-M4 STM32F407VGT6 με συχνότητα πυρήνα 168 MHz που προσφέρει αρκετή απόδοση για να τρέξει ακόμα και το πιο απαιτητικό περιβάλλον του χρήστη, ενώ παράλληλα εξασφαλίζει εκτύπωση χωρίς κολλήματα.

- Ενσωματώνει έναν ρυθμιστή ισχύος AOZ1284PI που υποστηρίζει είσοδο ισχύος 12-24V και μέγιστο ρεύμα εξόδου 4A – αρκετό για να τροφοδοτήσει εξωτερικά εξαρτήματα όπως LED και ακόμη και ένα raspberry pi.
- Υποστήριξη όλων των εκδόσεων σειριακής οθόνης της εταιρείας, SPI και LCD οθόνες.
- Αναβάθμιση λογισμικού μέσω κάρτας SD το οποίο είναι απλή, βολική και αποτελεσματική μέθοδος.
- Τα προγράμματα οδήγησης κινητήρα TMC μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε λειτουργία SPI ή UART ρυθμίζοντας απλώς τους βραχυκυκλωτήρες που βρίσκονται κάτω από κάθε οδηγό κινητήρα.
- Υποστηρίζει λειτουργίες όπως, ανίχνευση εξάντλησης νήματος, τερματισμό λειτουργίας μετά την εκτύπωση, αισθητήρες BLtouch, φάτα RGB κ.λπ. 7) Χρησιμοποιήστε MOSFET υψηλής απόδοσης για να μειώσετε την παραγωγή θερμότητας.
- Η χρήση αντικαταστάσιμων ασφαλειών καθιστά τη διαδικασία αντικατάστασης πιο βολική.
- Περιλαμβάνει κύκλωμα προστασίας στις εισόδους του thermistor που προστατεύει από βραχυκυκλώματα μεταξύ του θερμαντήρα και του θερμαντικού στοιχείου του κρεβατιού.
- Περιλαμβάνει ένα πρόσθετο κύκλωμα προστασίας του θερμαντήρα που προστατεύει από την ανεξέλεγκτη θέρμανση στο κρεβάτι και στα θερμαντικά σώματα.
- Παρουσιάζει μια νέα προστασία βηματικού προγράμματος οδήγησης "anti-reversal" που επιτυγχάνεται μέσω ενός συνδυασμού νέου υλικού και του λογισμικού Marlin. Αυτό προστατεύει τη μητρική πλακέτα λόγω λανθασμένης εισαγωγής του προγράμματος οδήγησης.
- Διασύνδεση μονάδας WIFI ESP8266 (ESP12S ή ESP-07)
- Ενσωματωμένη υποδοχή κάρτας push-pull TF (λειτουργία SDIO) και διεπαφή δίσκου U.
- Ένα κύκλωμα φίλτρου προστίθεται στον ακροδέκτη εισόδου ισχύος για τη μείωση των κυματισμών και των παρεμβολών θορύβου.
- Υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου μέχρι και τριών ανεμιστήρων μέσω PWM.

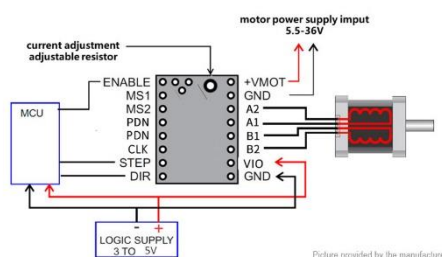


Εικόνα 3.8. Όλες οι διαθέσιμες θύρες σύνδεσης σε μία SKR2 μητρική πλακέτα

3.3.5 TMC2209 V2.0 (Stepper Motor Drivers)

Οι οδηγοί των πέντε, σε αυτή την περίπτωση, κινητήρων παίζουν μεγάλο ρόλο στον τρόπο διαμόρφωσης του λογισμικού, άρα και στην εκτύπωση. Τα δύο διαδεδομένα πρωτόκολλα στους οδηγούς κινητήρων είναι το SPI (Serial Peripheral Interface) και το UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter). Η επιλογή οδηγών με το πρωτόκολλο UART έγινε καθώς είναι πιο διαδεδομένο από το SPI και παρέχει Full-Duplex επικοινωνία μεταξύ των συσκευών, δηλαδή επικοινωνία όπου τα δεδομένα μπορούν να μεταδοθούν και προς τις δύο κατευθύνσεις σε έναν φορέα σήματος ταυτόχρονα. Ωστόσο, η επιλογή συγκεκριμένα για τους οδηγούς των κινητήρων TMC2209 έγινε για τους παρακάτω λόγους [7]:

- **Αθόρυβη λειτουργία κινητήρα StealthChop2** - το οποίο μειώνει πάρα πολύ τον θόρυβο των βηματικών κινητήρων που προκαλείται από τη μη συγχρονισμένη λειτουργία του πηνίου του κινητήρα, το τρέμουλο των PWM και τον θόρυβο ρύθμισης λίγων millivolt στις αισθητήριες αντιστάσεις.
- **StallGuard4** - το οποίο κάνει ανίχνευση φόρτωσης και παύσης για το StealthChop.
- **Έλεγχος ρεύματος CoolStep** - για εξοικονόμηση ενέργειας έως και 75%.
- **Χαμηλό RDSon** - δηλαδή αντίσταση μεταξύ drain-source όταν ενεργοποιείται το MOSFET.
- **Εύρος τάσης** - από 4,75V μέχρι 29V DC.
- **Αυτόματη απενεργοποίηση** - σε περίπτωση που μείνει ανοιχτή.
- **Ενσωματωμένη γεννήτρια παλμών** - για αυτόνομη κίνηση
- **Έρχονται με μεγάλη ψύκτρα** - οπότε κάνουν καλή απαγωγή θερμότητας
- **Υποστηρίζουν την λειτουργία sensorless-homing** - δηλαδή επιτρέπει το homing ενός άξονα χωρίς την ανάγκη φυσικού διακόπτη που θα καθορίζει τα όρια. Αντίθετα, ο άξονας μετακινείται μέχρι να βρει εμπόδιο (στην συγκεκριμένη περίπτωση έχουν τοποθετηθεί βίδες για τον καθορισμό των ορίων) με αποτέλεσμα ο βηματικός κινητήρας να χάνει βήματα και να γνωρίζει ότι έχει φτάσει στο τέλος της κίνησης. Η ενεργοποίηση αυτού του χαρακτηριστικού γίνεται πολύ απλά βγάζοντας μερικούς βραχυκυκλωτήρες (jumpers) από την μητρική πλακέτα.



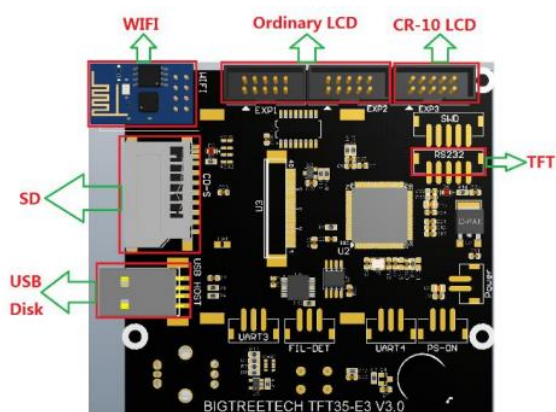
Εικόνα 3.9. Τα pins και η συνδεσμολογία του driver TMC2209

3.3.6 BIGTREETECH TFT-E3 V3.0 (LCD Display)

Παρόλο που η λειτουργία και διαχείριση ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή μπορεί να γίνει και μέσω προγραμμάτων σε κάποιον ηλεκτρονικό υπολογιστή, η αγορά μιας οθόνης άμεσα συνδεδεμένης με τον εκτυπωτή θεωρείται απαραίτητη. Οι πιο διαδομένες οθόνες στον κόσμο της 3D εκτύπωσης είναι οι TFT (Thin-Film Transistor) Displays πράγμα που σημαίνει ότι κάθε pixel στη συσκευή έχει ένα τρανζίστορ λεπτής μεμβράνης συνδεδεμένο σε αυτό. Τα τρανζίστορ ενεργοποιούνται από ηλεκτρικά ρεύματα που

έρχονται σε επαφή με τα pixels για να παράγουν άψογη ποιότητα εικόνας στην οθόνη. Οι οθόνες αυτές χρησιμοποιούνται σχεδόν σε κάθε εκτυπωτή καθώς προσφέρουν εξαιρετικά χρώματα, έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και γρήγορη απόκριση. Η επιλογή της συγκεκριμένης TFT οθόνης για αρκετούς λόγους όπως [8]:

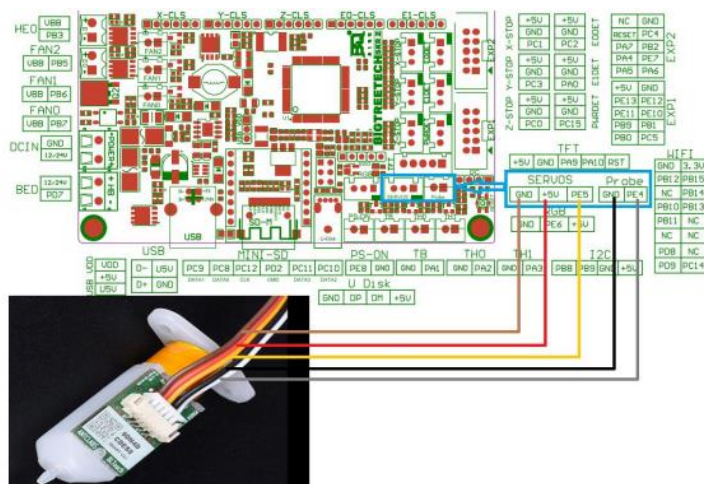
- Δυνατότητα δύο προφίλ λειτουργίας - μπορεί να λειτουργήσει και με αφή αλλά και με το κουμπί που διαθέτει.
- Διαστάσεις 93*87mm - αρκετά μεγάλη οθόνη, 3.5 ιντσών, ώστε να είναι ευδιάκριτες όλες οι εντολές και ρυθμίσεις του εκτυπωτή.
- Ευκολία στην εκτύπωση - υποστηρίζει την εκτύπωση και από USB αλλά και μέσω SD κάρτας.
- Σύνδεση με Wi-Fi - υποστηρίζει την εκτύπωση και παρακολούθηση του εκτυπωτή μέσω Wi-Fi, ωστόσο ο εκτυπωτής είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο οπότε η συγκεκριμένη λειτουργία προβλέπεται να αξιοποιηθεί μελλοντικά.



Εικόνα 3.10. Διάγραμμα συνδεσιμότητας της οθόνης TFT35-E3 V3.0

3.3.7 BLTOUCH V3.1 (Leveling Sensor)

Ο εκτυπωτής της παρούσας ΠΕ αποτελεί μία ανθρώπινη κατασκευή, και όχι εργοστασιακή, που πέρασε μέσα από ένα πλήθος προβλημάτων για φτάσει τελικά να λειτουργεί ορθά. Για την αποφυγή περαιτέρω δυσκολιών, και με την προϋπόθεση ότι υπάρχουν και αρκετές, άλλες αμελητέες άλλες όχι, ατέλειες στην κατασκευή, πάρθηκε η απόφαση για την αγορά ενός βοηθού ρύθμισης και διόρθωσης του κρεβατιού του εκτυπωτή. Το BLtouch λοιπόν αποτελεί έναν αυθεντικό αισθητήρα ισορροπίας και όχι κάποια απομίμηση και τοποθετείται κοντά στο ακροφύσιο [9].



Εικόνα 3.11. Ο τρόπος σύνδεσης του BLtouch πάνω στην SKR2

Με το BLtouch ουσιαστικά έχουμε την αντικατάσταση του μηχανικού διακόπτη για τον άξονα Z, καθώς όταν βρίσκει η ακίδα του στο κρεβάτι δίνει σήμα στον εκτυπωτή να σταματήσει. Όταν η ακίδα επεκτείνεται το BLtouch ανάβει σε χρώμα μπλε, ενώ όταν η ακίδα βρίσκει σε κάποιο εμπόδιο και μαζεύεται τότε ανάβει κόκκινο χρώμα. Επιπλέον, ο αισθητήρας χρησιμοποιώντας την ακίδα παίρνει μετρήσεις σε όσο σημεία του ζητηθεί σε όλο την επιφάνεια του κρεβατιού και στο τέλος τα εμφανίζει όλα αναλυτικά ώστε να γνωρίζει ο χρήστης ποια γωνία του κρεβατιού να ρυθμίσει ώστε να ισοροπήσει σχεδόν τέλεια. Μετά από πολλές προσπάθειες έχει επιτευχθεί το κρεβάτι να διαφέρει από το ύψος του κεντρικού σημείου μέτρησης λιγότερο από ένα δέκατο του χιλιοστού. Τέλος, το BLtouch μπορεί να βοηθήσει και σε ένα από τα πιο σημαντικά πράγματα στην αρχή μιας εκτύπωσης και αυτό είναι το Z offset, δηλαδή την απόσταση που πρέπει να έχει η μύτη πριν βγάλει το πρώτο στρώμα υλικού ώστε να κολλήσει τέλεια πάνω στο κρεβάτι. Ωστόσο, αυτό δεν είναι τόσο απλό καθώς χρειάζεται δοκιμές αλλά και σωστή μέτρηση της απόστασης του BLtouch από την μύτη εκτύπωσης και στους τρεις άξονες [9].

Πίνακας 3.2. Λειτουργικά υλικά και εξαρτήματα

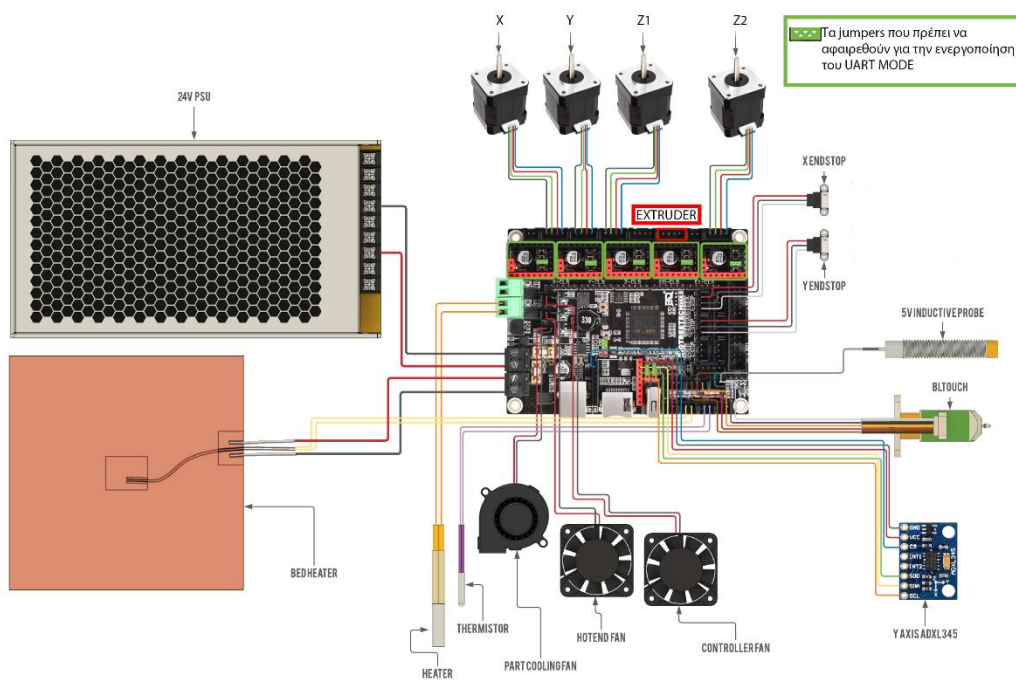
ΥΛΙΚΑ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ	ΚΟΣΤΟΣ ΣΕ € (ΧΩΡΙΣ ΦΠΑ)
BLTOUCH LEVELING SENSOR	Αισθητήρας ισορρόπησης του κρεβατιού	1	32.1774
BOWDEN EXTRUDER FEED KIT MK8 RED	Μηχανισμός εξώθησης του νήματος	1	7.9839
CLAMPING SHAFT COUPLER SOLID 5MM-8MM	Σφιγκτήρας σύνδεσης του κινητήρα και της ράβδου	2	5.8064
IDLER PULLEY PLATE	Βάση για τον αντικριστό μηχανισμό κίνησης του μιάντα στον άξονα Y	1	3.3871

MOTOR MOUNT PLATE FOR NEMA 17 - 4MM	Βάση τοποθέτησης του κινητήρα στον άξονα Y	2	5.8064
OPENBUILD SMOOTH IDLER KIT	Κιτ συναρμολόγησης του αντικριστού μηχανισμού κίνησης στον άξονα Y	1	3.2177
V-SLOT GANTRY SET 2020	Βαγόνια κίνησης στους άξονες X και Y	5	31.4515
ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΗΣ ΚΟΧΛΙΑΣ T8 500MM	Η ράβδος με το σπείρωμα για την κίνηση στον άξονα Z	2	15.9678
ALL METAL V6 MULTI-MOUNT	Βάση τοποθέτησης του συστήματος του nozzle πάνω σε βαγόνι στον άξονα X	1	25
V6 24V BOWDEN PRINT J-HEAD HOTEND	Το σύστημα του nozzle μαζί με τον σωληνάκι PTFE και το ανεμιστηράκι	1	15
BIGTREETECH SKR2 MAINBOARD	Η μητρική πλακέτα	1	54.20
COLORFUL TFT DISPLAY 3.5" - TOUCH SCREEN	Η οθόνη TFT	1	32.1774
ECCENTRIC SPACER - 6MM	Εκκεντρικός αποστάτης για την ακριβή ρύθμιση των βαγονιών πάνω στα αλουμίνια	10	3.226
NUT BLOCK ANTI-BACKLASH FOR 8MM LEAD SCREW	Πλαστικό μπλοκ στήριξης και κίνησης του άξονα X μέσω της ράβδου	2	5.8064
OPENRAIL GANTRY PLATE 40MM	Μεταλλικές πλάκες για την αυτοσχέδια δημιουργία βαγονιών	2	9.5162
SOLID V WHEEL KIT - BLACK	Ροδάκια σε κιτ συναρμολόγησης	8	10.3224
AC CONNECTOR FOR PANEL WITH SWITCH & WIRING	Διακόπτης τροφοδοσίας για το τροφοδοτικό	1	3.871
X-AXIS PASSIVE BLOCK KIT	Ο αντικριστός μηχανισμός κίνησης του μάντα στον άξονα X	1	6.371
MOTOR MOUNT PLATE FOR NEMA 17	Βάση του κινητήρα στον άξονα X	1	3.871
STEPPER MOTOR MOUNT - NEMA 17	Βάση του κινητήρα στον άξονα Z	2	3.0646
ΠΑΞΙΜΑΔΙΑ LEVELING - KIT	Παξιμάδια και σούστες για την ρύθμιση της	1	5.1613

	ισορροπίας του κρεβατιού		
BLTOUCH EXTENSION CABLE SM-DU 1.5M	Καλώδιο επέκτασης για το BLtouch	1	6.371
DELOCK FAN EXTENSION CABLE 3PIN 60CM	Καλώδιο επέκτασης για το ανεμιστηράκι	1	3.9
DC COOLING BLOWER FAN 4010 24V	Επιπλέον ανεμιστηράκια για την ψύξη του υλικού και την μητρικής	2	4.2904
ΘΕΡΜΟΣΥΣΤΕΛΛΟΜΕΝΟ ΜΕ ΚΟΛΛΑ 4/1MM	Για την ένωση των επεκτάσεων των καλωδίων	1	1.4516
GIANTARM PLZ FILAMENT 1.75MM	Το καρούλι με το υλικό εκτύπωσης	1	18.56
REDREX 24V 15A POWER SUPPLY	Το τροφοδοτικό	1	23.52
NEMA 17 BIPOLAR MOTORS 2.0	Οι βηματικοί κινητήρες	5	44.53
SUPER PRINT TMC2209 V2.0 STEPPER MOTOR DRIVER 2.5A UART ULTRA SILENT	Οι οδηγοί των κινητήρων	5	28.98
5 METRES GT2 2MM PITCH 6MM WIDE RUBBER TIMING BELT	Ο ιμάντα χρονισμού μαζί με οδοντωτές τροχαλίες	1	10

3.4 Λογισμικό και επικοινωνία

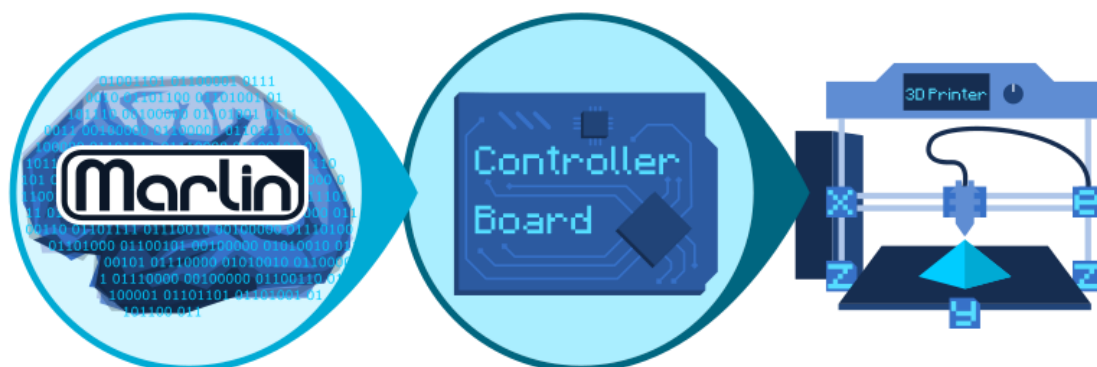
Μπορεί να αναφέρθηκαν μέχρι τώρα όλα τα εξαρτήματα και τα υλικά που απαρτίζουν τον συγκεκριμένο τρισδιάστατο εκτυπωτή, ωστόσο μεγάλη βαρύτητα πρέπει να δοθεί και στο λογισμικό του κώδικα γιατί με βάση αυτόν κρίνεται όλη η συμπεριφορά του εκτυπωτή. Οι επιλογές είναι πολλές, όπως Marlin, Klipper, RepRap, Prusa κ.α. με την κάθε μία έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της, με το μόνο σίγουρο να είναι ότι αν χρησιμοποιηθούν σωστά μπορούν να αποδώσουν εξίσου αποτελεσματικά. Όσον αφορά τα προγράμματα τεμαχισμού του μοντέλου, δοκιμάστηκαν το Cura, το Simplify3D και το SuperSlicer, με την πιο ελκυστική δοκιμή να αποτελεί το Cura για λόγους που θα αναλυθούν παρακάτω.



Εικόνα 3.12. Ηλεκτρονικό σχέδιο συνδεσμολογίας σε μία SKR2 μητρική πλακέτα

3.4.1 Marlin Firmware

Το Marlin είναι ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα για την οικογένεια RepRap και αποτελεί το πιο διαδεδομένο λογισμικό στον κόσμο της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Από την αρχή το Marlin κατασκευάστηκε από και για τους λάτρεις του RepRap για να είναι ένα απλό, αξιόπιστο και προσαρμόσιμο πρόγραμμα οδήγησης εκτυπωτή. Ως απόδειξη της ποιότητάς του, το Marlin χρησιμοποιείται από αρκετούς αξιόπιστους εμπορικούς τρισδιάστατους εκτυπωτές. Το Marlin χρησιμοποιείται επίσης αποτελεσματικά σε μηχανές CNC και χαράκτες λέιζερ [27].



Εικόνα 3.13. Όλη η διαδικασία σε τρία βήματα: 1) Ρύθμιση του Marlin, 2) Εγκατάσταση του λογισμικού στην μητρική πλακέτα και 3) Εκτύπωση

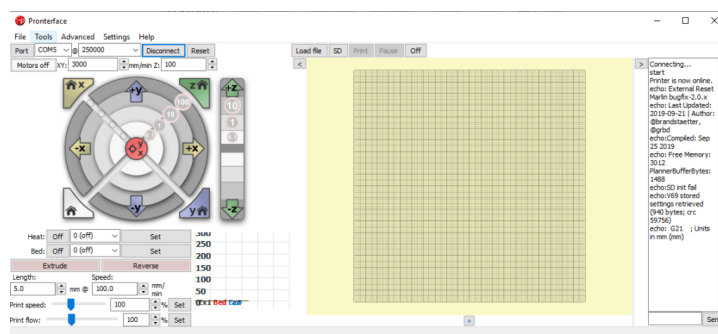
Ένα κλειδί για τη δημοτικότητα του Marlin είναι ότι τρέχει σε φθηνούς μικροελεγκτές Atmel AVR 8-bit - και η δεύτερη έκδοση του Marlin έχει προσθέσει υποστήριξη για πλακέτες 32 bit. Αυτά τα τσιπ βρίσκονται στο κέντρο της δημοφιλούς πλατφόρμας ανοιχτού κώδικα Arduino/Genuino. Οι πλατφόρμες αναφοράς για το Marlin είναι ένα Arduino Mega2560 με RAMPS 1.4 και Re-Arm με

Ramps 1.4. Ως κοινοτικό προϊόν, το Marlin στοχεύει να είναι προσαρμόσιμο σε όσο το δυνατόν περισσότερες πλακέτες και διαμορφώσεις. Θέλει να είναι διαμορφώσιμο, επεκτάσιμο και οικονομικό τόσο για χομπίστες όσο και για πωλητές. Το Marlin εκτελείται στην κύρια πλακέτα του τρισδιάστατου εκτυπωτή, διαχειρίζοντας όλες τις δραστηριότητες του μηχανήματος σε πραγματικό χρόνο. Συντονίζει τους θερμαντήρες, τους κινητήρες, τους αισθητήρες, τα φώτα, την οθόνη LCD, τα κουμπιά και οτιδήποτε άλλο εμπλέκεται στη διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Επιπλέον, η εγκατάσταση του λογισμικού στην πλακέτα έγινε με την χρήση του Visual Studio Code. Εκτός του ότι το Marlin αποτελεί το πιο διαδεδομένο λογισμικό, άρα υπάρχουν και περισσότερες πληροφορίες για την χρήση του, επιλέχθηκε για αρκετούς λόγους όπως:

- Πλήρης δυνατότητα υποστήριξης του G-code που διαθέτει περισσότερες από 150 εντολές.
- Ολοκληρωμένη σουίτα κίνησης G-code, που περιλαμβάνει γραμμές, τόξα και καμπύλες Bézier.
- Έξυπνο σύστημα κίνησης με γραμμική επιτάχυνση.
- Έλεγχος θερμαντήρα PID κλειστού βρόχου με αυτόματη ρύθμιση και θερμική προστασία.
- Υποστήριξη για έως και 5 εξωθητήρες συν ένα θερμαινόμενο κρεβάτι εκτύπωσης.
- UI ελεγκτή LCD με περισσότερες από 30 μεταφράσεις γλωσσών.
- Εκτύπωση μέσω κεντρικού υπολογιστή και κάρτας SD με αυτόματη εκκίνηση.
- Αντιστάθμιση ισοπέδωσης κρεβατιού — με ή χωρίς αισθητήρα κίνησης.
- Υποστηρίζει Linear Advance για εξώθηση με βάση την πίεση.
- Υποστήριξη ογκομετρικής εξώθησης.
- Υποστήριξη για μίξη υλικών και πολλαπλών εξωθητήρων ταυτόχρονα (Cyclops, Chimera, Diamond)
- Υποστήριξη για αισθητήρες διαρροής νήματος.
- Ενημερώνεται συχνά
- Είναι συμβατό με πάρα πολλές 8-bit και 32-bit μητρικές.

3.4.2 Pronterface

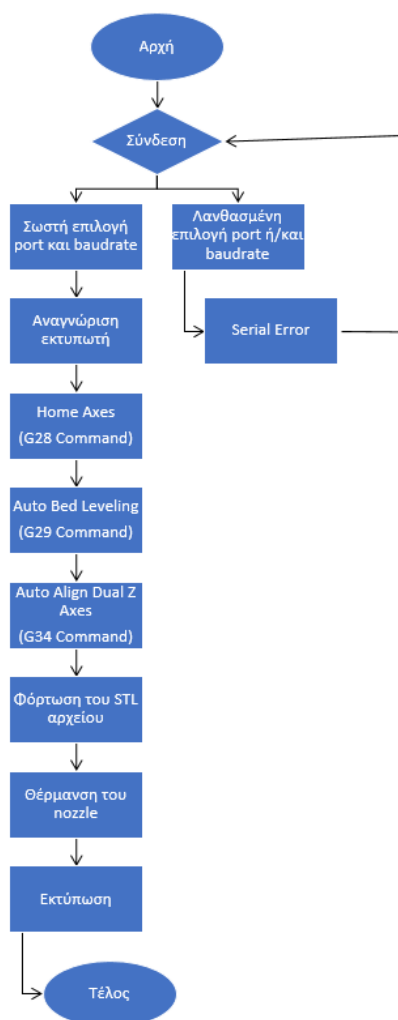
Το Pronterface είναι ένα απλοποιημένο προφίλ χρήστη με γραφικά που επιτρέπει την παρακολούθηση και τον έλεγχο του εκτυπωτή από έναν υπολογιστή συνδεδεμένο σε USB. Η σύνδεση είναι πολύ απλή και για την επιτυχή επικοινωνία ανάμεσα στον πρόγραμμα και τον εκτυπωτή, χρειάζεται να έχουν το ίδιο Baudrate μέσω την σειριακής θύρας. Με αυτό μπορεί ο χρήστης να μετακινήσει απευθείας τους βηματικούς κινητήρες, να ελέγξει τις θερμοκρασίες του κρεβατιού και των ακροφυσίων, να στείλει εντολές με G-Code απευθείας μέσω ενός τερματικού και πολλά άλλα. Δηλαδή αποτελεί μία πιο βολική λύση για την λειτουργία του εκτυπωτή από αυτήν της μικρής LCD TFT οθόνης [28].



Εικόνα 3.14. Το interface του προγράμματος Pronterface

Το Pronterface κυκλοφορεί εδώ και πολύ καιρό και αποτελεί αναπόσπαστο εργαλείο για τη διαχείριση και τον έλεγχο τόσο των τρισδιάστατων εκτυπωτών όσο και των μηχανών CNC. Το πρόγραμμα εκτελείται σε μηχανές Windows, Mac και Linux και παρά τον αρκετά βασικό σχεδιασμό, με τα ελάχιστα γραφικά, είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο που διατηρεί μια ισχυρή θέση στην κοινότητα της τρισδιάστατης εκτύπωσης [28].

Αρχικά σχεδιασμένο για τον έλεγχο της ροής εργασιών τρισδιάστατης εκτύπωσης από άκρο σε άκρο, συμπεριλαμβανομένου του τεμαχισμού (χρησιμοποιώντας Slic3r), το Pronterface τείνει να εκπληρώνει έναν απλούστερο ρόλο σήμερα. Ωστόσο, παρά τις άλλες επιλογές λογισμικού, συμπεριλαμβανομένου του OctoPrint και των διάφορων «αποστολέων G-code», που παρέχουν πολλές από τις ίδιες λειτουργίες, το Pronterface έχει αρκετά ευδιάκριτα πλεονεκτήματα. Εκτός από την εκτέλεση σε πολλές πλατφόρμες υπολογιστών, είναι απλό στην εγκατάσταση, εύκολο στην εκμάθηση (τουλάχιστον για τη βασική λειτουργικότητα), μπορεί να προσαρμοστεί γρήγορα για να αυτοματοποιήσει επαναλαμβανόμενες εργασίες και είναι γραμμένο σε Python, επιτρέποντας σε περισσότερους χρήστες να κάνουν τις δικές τους τροποποιήσεις [28].

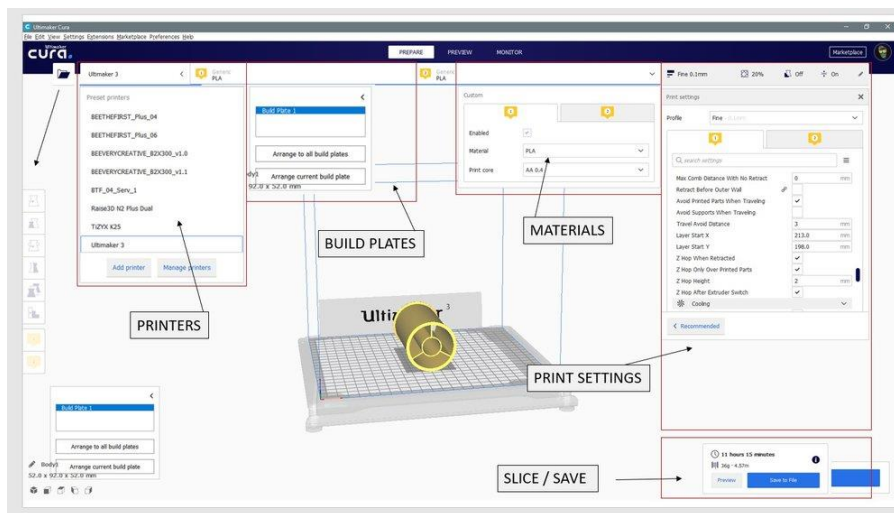


Εικόνα 3.15. Διάγραμμα ροής της επικοινωνίας του εκτυπωτή με το Pronterface

3.4.3 Ultimate-Cura Slicer

Το Cura είναι μια επιλογή για την επεξεργασία και τον τεμαχισμό τρισδιάστατων μοντέλων. Το Cura είναι ένα πρόγραμμα ανοιχτού κώδικα που αναπτύχθηκε και συντηρείται από τους Ultimaker και David Bramm μαζί με πολλά μέλη της κοινότητας της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Οι προσαρμοσμένες εκδόσεις του Cura περιλαμβάνονται σε πολλούς τρισδιάστατους εκτυπωτές ως σημείο εκκίνησης για την επεξεργασία μοντέλων. Το Ultimaker είναι ο κύριος υποστηρικτής του Cura, το οποίο διασφαλίζει ότι το λογισμικό λαμβάνει συνεχή ανάπτυξη και μοιράζεται με οποιονδήποτε θέλει να χρησιμοποιήσει την πλατφόρμα. Το Cura μπορεί να αποθηκεύσει προφίλ μηχανημάτων, υλικών και κοινών διαμορφώσεων εκτύπωσης για να διευκολύνει στην επιλογή των ρυθμίσεων. Οι εκτυπωτές 3D RepRap χρησιμοποιούν μια γλώσσα ελέγχου που ονομάζεται G-code, όπως και οι εμπορικοί τρισδιάστατοι εκτυπωτές που κοστίζουν πάνω από 50.000 \$ [1], [2], [3].

Το G-code είναι ένα βιομηχανικό σύνολο εντολών και κωδικών που χρησιμοποιούνται για τη γραφή της διαδρομής που χρησιμοποιεί ένας τρισδιάστατος εκτυπωτής (ή ακόμα και μια μηχανή φρεζαρίσματος CNC) για την παραγωγή ενός τρισδιάστατου αντικειμένου. Έτσι, όλα τα εργαλεία λογισμικού που χρησιμοποιούνται για το RepRap μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για μηχανήματα υψηλής τεχνολογίας. Η διαφορά με το RepRap είναι ότι η περαιτέρω ανάπτυξη του G-code είναι εξαιρετικά δυναμική. Νέοι κώδικες και εντολές μπορούν να προστεθούν στο σετ G-code καθώς εξελίσσεται η τεχνολογία. Υπάρχουν πολλά προγράμματα κοπής για τρισδιάστατη εκτύπωση, αλλά το συγκεκριμένο προτιμήθηκε καθώς περιλαμβάνει ένα πολύ φιλικό προφίλ για κάποιον αρχάριο χρήστη προσφέροντας μόνο τις απαραίτητες ρυθμίσεις, αλλά διαθέτει για προφίλ με αμέτρητες ρυθμίσεις για πειραματισμούς των πιο εξειδικευμένων χρηστών [1], [2], [3].



Εικόνα 3.16. Το interface του προγράμματος Ultimate-Cura

3.5 Επίλογος 3^{ου} κεφαλαίου

Ανακεφαλαιώνοντας, ο τρισδιάστατος εκτυπωτής της παρούσας Π.Ε. αποτέλεσε μία κατασκευή από πάρα πολλά κομμάτια. Τα μέρη του διαχωρίστηκαν σε δύο βασικές κατηγορίες, τα δομικά υλικά που έχουν περισσότερο ρόλο στήριξης και αποτελούν κομμάτι του πλαισίου, και τα λειτουργικά υλικά και εξαρτήματα που έχουν μία πιο ενεργή συμπεριφορά κατά την διάρκεια της εκτύπωσης και αποτελούν κομμάτια της συνδεσιμότητας, της τροφοδοσίας και της κίνησης. Επίσης, αναφέρθηκε η τελική επιλογή λογισμικού για τον τρόπο επικοινωνίας και για τον κώδικα. Για το λογισμικό της πλακέτας επιλέχθηκε το λογισμικό Marlin, για τον τεμαχισμό των μοντέλων επιλέχθηκε το πρόγραμμα Ultimate-Cura, ενώ για περεταίρω ευκολία και λειτουργικότητα του εκτυπωτή επιλέχθηκε το πρόγραμμα Pronterface που δίνει άμεση πρόσβαση μέσω ενός απλού ηλεκτρονικού υπολογιστή. Αναφορικά με το μεγάλο κόστος της πτυχιακής, υπήρξαν αρκετά προβλήματα, τα οποία θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο, που κόστισαν και οικονομικά και χρονικά. Συνοψίζοντας το κόστος του εκτυπωτή, έγινε μια προσπάθεια αναλυτικής καταγραφής των αντικειμένων όσων υλικών αγοράστηκαν ηλεκτρονικά για αυτόν τον λόγο άλλωστε το αναφερόμενο κόστος δεν περιλάμβανε το Φ.Π.Α.. Συμπεριλαμβανομένου του Φ.Π.Α. , των μεταφορικών ,καθώς υπήρξαν αστοχίες και χρειάστηκαν να γίνουν αρκετές διαφορετικές αγορές, και των υλικών που αγοράστηκαν από τοπικά καταστήματα για επιδιορθώσεις του εκτυπωτή, το συνολικό κόστος ξεπερνάει τα 650-700€.

Κεφάλαιο 4: Προβλήματα και συμπεράσματα

4.1 Εισαγωγή 4^{ου} κεφαλαίου

Η κατασκευή ενός DIY 3D εκτυπωτή αποτελεί μία αρκετά περίπλοκη διαδικασία παρόλο που υπάρχει μεγάλη ποσότητα εκπαιδευτικού υλικού στο διαδίκτυο. Το μεγαλύτερο μέρος από ενημερωτικά βίντεο και άρθρα αποτελεί κομμάτι των βιομηχανικών εκτυπωτών (έτοιμων ή σε kit) οπότε επικρατεί σχετικά μία ικανοποίηση λόγω των γρήγορων και επιθυμητών αποτελεσμάτων. Ωστόσο, ο χρήστης που θα φτιάξει μόνος τον εκτυπωτή του από την αρχή, θα πέσει πάνω σε υλικό που δεν τον αντιπροσωπεύει, που ξεπερνάει το κοστολόγιο του και που χρειάζεται την λήψη αποφάσεων από κάποιο έμπειρο άτομο. Μέχρι να γίνει η καταληκτική επιλογή τύπου, μεγέθους, υλικών και εξαρτημάτων, μπορεί να περάσει αρκετός καιρός και να χρειαστεί εκ νέου μετατροπή/βελτίωση όλη η ιδεολογία και σκέψη πίσω από την υλοποίηση, με κάτι παρόμοιο να συμβαίνει και στην παρούσα Π.Ε..

4.2 Προβλήματα, λύσεις και μελλοντικές βελτιώσεις

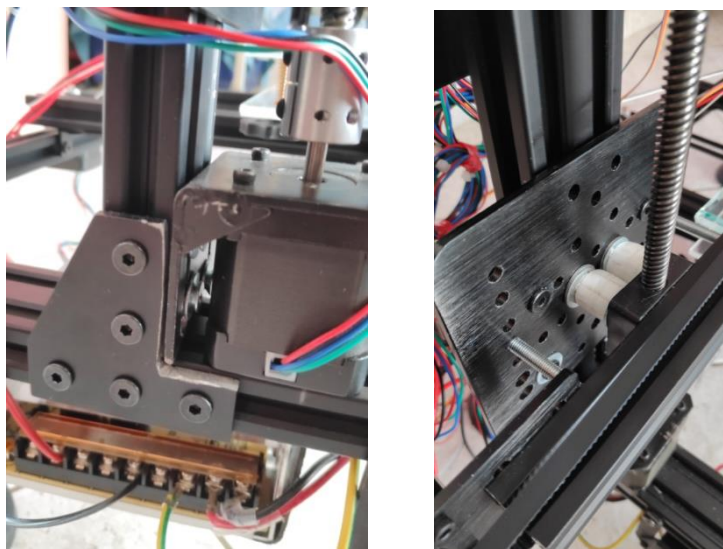
Τα προβλήματα που προέκυψαν ήταν απογοητευτικά πολλά ,τόσο για το κόστος των υλικών, μιας και υπήρξε οι πεποίθηση ότι ξοδεύοντας χρήματα για ποιοτικά υλικά θα λειτουργούν όλα σχετικά καλά χωρίς πολλές διορθώσεις, όσο και για την εκτενή μελέτη που προηγήθηκε, από την στιγμή που πολλά πράγματα έπρεπε να αγοραστούν πρώτα για να υπάρξει ολοκληρωμένη άποψη των αναγκών της σωστής λειτουργίας τους. Ξεκινώντας από την δημιουργία του πλαισίου το μόνο πρόβλημα που υπήρξε και διορθώθηκε επιτυχώς ήταν το γλίστρημα του αλουμινίου πάνω σε οποιαδήποτε επιφάνεια τοποθέτησης

κατά την διάρκεια της εκτύπωσης, δηλαδή από την συνεχή κίνηση των αξόνων. Η λύση βρέθηκε χρησιμοποιώντας 4xLeveling Foot στις τέσσερις γωνίες του κάτω μέρους του πλαισίου. Επιπρόσθετα, ο εκτυπωτής έχει διαστάσεις 80x50x90cm (X,Y,Z) μαζί με όλα τα εξαρτήματα τοποθετημένα, που συνεπάγεται το μεγάλο βάρος του, οπότε για την βελτίωση της σταθερότητας του θα ήταν ιδανική η προσθήκη περισσότερων ποδιών στήριξης ή ακόμα και κάποια στερέωση του σκελετού με σίδερα π.χ. στον τοίχο.



Εικόνα 4.1. Το Leveling Foot σε μία από τις τέσσερις γωνίες

Συνεχίζοντας με τον άξονα Z, οι κινητήρες που αγοράστηκαν δεν χωρούσαν να μπουν κολλητά με τα κάθετα 2040 Vslot αλουμίνια καθώς αποδείχθηκαν λίγο μεγαλύτερα και τα υλικά σύνδεσης “Σύνδεσμος τύπου T” και χρειάστηκαν να κοπούν με τροχό από την μία τους πλευρά έτσι ώστε να γίνει εφαρμοστή τοποθέτηση των κινητήρων. Επίσης, οι βάσεις που ήρθαν πακέτο μαζί με τους κινητήρες υποτίθεται ότι ήταν ιδανικές για αλουμίνια μεγέθους 2040, ωστόσο και αυτές αποδείχθηκαν πολύ μεγαλύτερες και έγινε η διαμόρφωση τους με τροχό. Ένα άλλο πρόβλημα στον άξονα Z ήταν η αγορά μεταλλικών πλακών για την δημιουργία βαγονιών στα 2 κάθετα αλουμίνια, δηλαδή την κίνηση του οριζώντιου αλουμινίου στον άξονα Z. Οι εργοστασιακές τρύπες, ενώ θα έπρεπε σύμφωνα με τις προδιαγραφές δεν ταίριαζαν ακριβώς για την είσοδο των ροδιών στις ράγες των κάθετων αλουμινίων μεγέθους 2040. Έτσι, με την χρήση ενός τρυπανιού ανοίχτηκαν τέσσερις νέες τρύπες (δύο σε κάθε πλάκα), ωστόσο όπως ήταν φυσικό οι τρύπες δεν είναι τέλεια ευθυγραμμισμένες (το άνοιγμα έγινε ερασιτεχνικά με το χέρι) και δεν εφαρμόζουν σωστά και τα οχτώ ροδάκια (τέσσερα σε κάθε πλάκα), παραδόξως όμως η κίνηση στον άξονα Z φαίνεται να γίνεται ομαλά. Ένα άλλο λάθος, αποδείχθηκε να είναι ο κακός υπολογισμός τοποθέτησης και απόστασης των κινητήρων από τα αλουμίνια στον άξονα Z. Συγκεκριμένα, οι ράβδοι με το σπείρωμα ήταν αρκετά έξω μετά την τοποθέτηση των κινητήρων στις βάσεις οπότε έπρεπε να βρεθεί ένας τρόπος να μπουν αποστάτες στο αλουμίνιο του άξονα X ώστε να έρθει ακριβώς πάνω από την ράβδο και συνεπώς να μπορεί να κάνει σταθερά και ίσια την κίνηση στον άξονα Z. Η λύση βρέθηκε με την χρησιμοποίηση αυτοσχέδιων αποστατών από σωλήνα καλοριφέρ. Επίσης, η προτεινόμενη ουσία για την λίπανση της ράβδου είναι το σπρέι με γράσο λευκού λιθίου και παρόλο που δεν βρέθηκε το συγκεκριμένο, το απλό γράσο λιθίου φαίνεται να κάνει εξίσου καλή δουλειά. Για την μελλοντική βελτίωση του άξονα Z, θα χρειαστεί η αλλαγή των βάσεων των κινητήρων για να εφαρμόζουν και να κουμπώνουν σωστά πάνω στα αλουμίνια καθώς ακόμα και η αλλαγή των αποστατών από καλοριφέρ με τρισδιάστατα εκτυπωμένους αποστάτες για το ακριβές μέγεθος τους. Τέλος, η ιδανική λύση θα ήταν η αλλαγή των δύο κάθετων 2040 Vslot αλουμινίων με δύο C-Beam αλουμίνια που υποστηρίζουν την συγκεκριμένη διάταξη της ράβδου.



Εικόνα 4.2. Η επίλυση των προβλημάτων στον άξονα Z

Στον άξονα X υπήρξαν κυρίως δύο προβλήματα. Πρώτον, το βαγόνι που χρησιμοποιήθηκε για την κυκλοφορία του συστήματος του nozzle δεξιά και αριστερά, ναι μεν ήταν σχεδιασμένο για την κίνηση πάνω σε αλουμίνιο μεγέθους 2020, αλλά δεν ήταν ικανό να υποδεχτεί το σύστημα του nozzle κατάλληλα με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν δύο τρύπες με τρυπάνι ώστε να κουμπώσει η βάση του nozzle πάνω του. Δεύτερον, η διαδρομή, για την κίνηση του βαγονιού στον άξονα X, αρχικά γινόταν με τον ιμάντα να περνάει κάτω από τις ρόδες του βαγονιού και ανάμεσα στις ράγες του αλουμινίου. Ωστόσο, ο ιμάντας εμπόδιζε την ομαλή κίνηση των ροδιών οπότε με μία μεταλλική γωνία βιδωμένη πάνω στο βαγόνι, ο ιμάντας πλέον περνάει πάνω από τις ρόδες και δεν εμποδίζει καθόλου. Με την συγκεκριμένη μέθοδο επιλύθηκε εξ ολοκλήρου το πρόβλημα, ενώ για την άλλη περίπτωση, χρειάζεται στο μέλλον να γίνει αλλαγή και να τοποθετηθεί ένα νέο βαγόνι κατάλληλα σχεδιασμένο για την υποδοχή του συστήματος του nozzle.

Στον άξονα Y παρουσιάστηκε γενικότερα ένα σημαντικό πρόβλημα. Αυτό ήταν ότι το κρεβάτι ήταν πολύ χαμηλά οπότε η μύτη ακουμπούσε ίσα ίσα για την εκτύπωση και έτσι δεν υπήρχε η δυνατότητα σφιξίματος κάποιας γωνίας του κρεβατιού για να γίνει σωστά και με ακρίβεια το bed leveling. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος τοποθετήθηκε ένα μικρό κομμάτι αλουμινίου σε κάθε γωνία (Εικόνα 38).

Όσον αφορά το ίδιο το κρεβάτι, παρατηρήθηκαν δύο προβλήματα. Αρχικά, η επιφάνεια εκτύπωσης που είναι από γυαλί έπρεπε με κάποιον τρόπο να παραμένει κολλητά με το στρώμα Plexiglas που βρίσκεται ακριβώς από κάτω. Δοκιμαστικά, τοποθετήθηκαν συνδετήρες οι οποίοι έκανα σωστά την δουλειά τους, ωστόσο μειώθηκε αρκετά το εύρος κίνησης της μύτης πάνω στο κρεβάτι (το αρχικό κρεβάτι έχει διαστάσεις 320x320mm) και επιπλέον υπήρχε κίνδυνος να χτυπήσει το BLtouch πάνω σε κάποιον συνδετήρα και να προκληθεί ζημιά μιας και είναι αρκετά ευαίσθητο. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε σιλικόνη στο κενό ανάμεσα στο Plexiglas και το γυαλί. Το άλλο πρόβλημα αφορά το ίδιο το γυαλί μιας και υπάρχει δυσκολία εκτύπωσης του πρώτου στρώματος του υλικού. Συγκεκριμένα, το πρώτο στρώμα PLA δεν κολλάει σωστά πάνω στο μη θερμαινόμενο γυαλί και έτσι μπορεί να καταστραφούν όλα τα επόμενα στρώματα. Προσωρινά, το πρόβλημα επιλύθηκε με την χρήση κόλλας πριν από την εκτύπωση πάνω στο γυαλί, ωστόσο η μελλοντική λύση απαιτεί την αγορά και τοποθέτηση

θερμαινόμενου κρεβατιού πράγμα που θα ανοίξει τον δρόμο και την χρησιμοποίηση περισσότερων υλικών.

Φτάνοντας στο BLtouch ξαφνικά, κατά το άνοιγμα του εκτυπωτή η ακίδα σταμάτησε να λειτουργεί και το BLtouch αναβόσβηνε με κόκκινο χρώμα, πράγμα που σήμαινε ότι είχε μπει σε Error Mode. Στην αρχή δοκιμάστηκε η εναλλαγή από τα 5V (μία ρύθμιση που είχε μπει δοκιμαστικά καθώς το BLtouch V3.1 το υποστήριζε) στα 3.3V με την προσωρινή λύση του προβλήματος καθώς μετά από μερικές μέρες εμφανίστηκε και πάλι το πρόβλημα. Μετά από μελέτη, εντοπίστηκε ότι η βίδα ρύθμισης της ακίδας του BLtouch ήταν μαγνητική και σε συνδυασμό με την αυτοσχέδια μεταλλική βάση, οπού ερχόταν σε επαφή η βίδα, προκαλούσε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές στο ίδιο το BLtouch. Έτσι τοποθετήθηκαν ροδέλες από συμπιεσμένο χαρτόνι (με τον ρόλο του αποστάτη) ώστε να δημιουργηθεί μία επαρκής απόσταση και να επιλυθεί το ζήτημα. Μελλοντικά καλό θα ήταν να εκτυπωθεί μία πλαστική βάση για το BLtouch για να μην υπάρξει ξανά κάποιο πρόβλημα.



Εικόνα 4.3. Η επίλυση του προβλήματος με το BLtouch

Κλείνοντας τον κύκλο των προβλημάτων, δεν θα μπορούσαν να λείπουν μερικά και από την τελική εκτύπωση. Συγκεκριμένα, εκτός από την πρώτη στρώση λόγω του μη θερμαινόμενου κρεβατιού που αναλύθηκε προηγουμένως, η απώλεια βάσης τοποθέτησης ανεμιστήρα για το άμεσο πάγωμα του εξαγόμενου υλικού δημιουργεί προβλήματα σε όλα τα στρώματα. Απουσιάζει η ομοιομορφία των στρωμάτων τόσο στις γωνίες όσο και στα τοιχώματα μιας και όταν η καυτή μύτη περνάει πολύ κοντά από το προηγούμενο στρώμα για να εξάγει το επόμενο, δεν το αφήνει να παγώσει αποτελεσματικά ή ακόμα και σε κάποιες περιπτώσεις να το ξαναλιώσει με αποτέλεσμα αυτό να παραμορφώνεται. Για αυτό τον λόγο, χρειάζεται η αγορά μιας βάσης για ανεμιστήρα τύπου E3D (όπως δηλαδή και ο τύπος του συστήματος του nozzle) ή ακόμα καλύτερα η εκτύπωση μιας βάσης με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά. Ακόμα και αν η βάση δεν βγει τέλεια λόγω του παραπάνω προβλήματος, σίγουρα η χρήση της θα βελτιώσει τις μελλοντικές εκτυπώσεις.

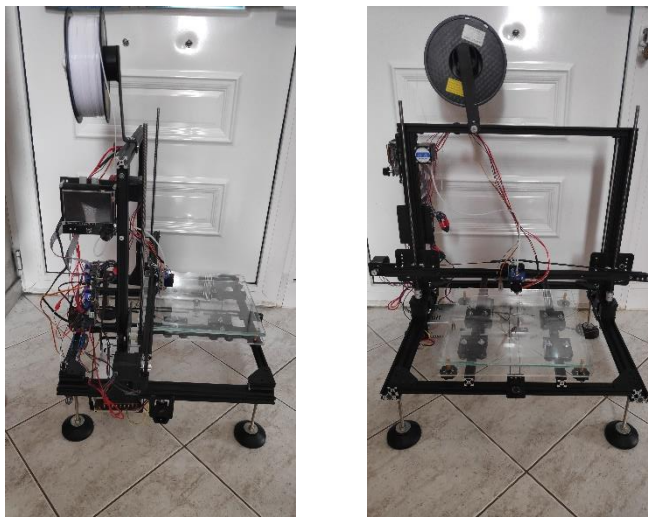


Εικόνα 4.4. Τα προβλήματα στην εκτύπωση χωρίς ανεμιστηράκι

4.2 Επίλογος 4^{ου} κεφαλαίου - Συμπεράσματα

Κατά την υλοποίηση της παρούσας Π.Ε. εξήχθησαν ποικίλα συμπεράσματα, τα οποία κρίνεται αναγκαίο να καταγραφούν. Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές, ενώ στην αρχή προορίζονταν μόνο για βιομηχανική χρήση, έχουν εισχωρήσει για τα καλά στην καθημερινότητα των ανθρώπων με μεγάλη επιτυχία. Η ευκολία με την οποία ο απλός πολίτης μπορεί να σχεδιάσει και να εκτυπώσει πράγματα που ούτε καν είχε σκεφτεί στο παρελθόν, έχει δημιουργήσει μία τεράστια κοινότητα ενθουσιωδών καταναλωτών που το μόνο σίγουρο είναι ότι θα συνεχίσει να επεκτείνεται.

Είναι γενικά αποδεκτό ότι η 3D εκτύπωση θα είναι μια επαναστατική δύναμη στην κατασκευή, είτε θετική είτε αρνητική. Παρά τις ανησυχίες για την παραχάραξη, πολλές εταιρείες χρησιμοποιούν ήδη την τεχνολογία για να παράγουν επανειλημμένα περίπλοκα εξαρτήματα, για παράδειγμα στην αυτοκινητοβιομηχανία και την αεροδιαστημική κατασκευή. Καθώς οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές γίνονται πιο προσιτοί, θα χρησιμοποιηθούν αναπόφευκτα για τοπική, μικρής κλίμακας κατασκευή, εξαλείφοντας σε μεγάλο βαθμό τις αλυσίδες εφοδιασμού για πολλούς τύπους προϊόντων. Οι μονάδες καταναλωτών για οικιακή χρήση θα γίνουν ακόμη και εφικτές, επιτρέποντας στους τελικούς χρήστες να κατεβάσουν απλώς ένα σχέδιο για το προϊόν που χρειάζονται και να το εκτυπώσουν. Θα υπάρξουν μεγάλες προκλήσεις για τη συμβατική μεταποιητική βιομηχανία να προσαρμοστεί σε αυτές τις αλλαγές. Οι ευκαιρίες για τεχνολογία και μηχανική είναι σαφώς τεράστιες, ωστόσο, και οι δημιουργικές δυνατότητες στο σχεδιασμό προϊόντων και τη διαμόρφωση του υλικού εκτύπωσης είναι σχεδόν ατελείωτες.



Εικόνα 4.5. Το τελικό αποτέλεσμα από δύο γωνίες λήψης

Παρά το γεγονός ότι η συγκεκριμένη κατασκευή αποτελεί μία από τις πιο βασικές μορφές FDM 3D εκτυπωτή, για την επίτευξη των επιθυμητών εκτυπώσεων χρειάστηκε εκτενής μελέτη τόσο για την λεπτομερή κατανόηση της λειτουργίας του όσο και για την επιλογή υλικών που θα έχουν δευτερεύων σκοπό και θα αφορούν εξ' ολοκλήρου τις ανάγκες του χρήστη. Ωστόσο, η κατάσταση της αγοράς μπορεί να διαφοροποιήσει την αρχική μελέτη και, δυστυχώς, να αναγκάσει τον χρήστη στην επιλογή παρεμφερών υλικών και εξαρτημάτων, που θα πολλαπλασιάσουν τις δυσκολίες και τα εμπόδια, με επιπτώσεις το κόστος και την αναποτελεσματικότητα.

Για την επιθυμητή και αποτελεσματική εκτύπωση κύριος στόχος είναι η δημιουργία ενός στιβαρού πλαισίου, ενός πλαισίου που θα εγγυάται την σταθερότητα αλλά και την αποτελεσματική σύνδεση όλων των επιμέρους στοιχείων τόσο πάνω στο πλαίσιο όσο και μεταξύ τους. Το πιο δύσκολο σημείο για κάθε DIY 3D εκτυπωτή είναι ο αψεγάδιαστος συνδυασμός κινήσεων που πρέπει να υφίσταται ανάμεσα στους άξονες. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, και στους τρεις άξονες επιλύθηκε πλήθος προβλημάτων και παρά την πρόχειρη-αυτοσχέδια (σε κάποιες περιπτώσεις) αντιμετώπιση, το τελικό αποτέλεσμα ήταν ικανοποιητικό. Τα πάρα πολλά προβλήματα και το κόστος επιδιορθώσεων μπορεί να εντείνουν την απαισιοδοξία και την απογοήτευση, ωστόσο τα ενθαρρυντικά αποτελέσματα επαναφέραν τον ενθουσιασμό και άνοιξαν τον δρόμο για μελλοντικές βελτιώσεις και εντατική ενασχόληση με το συγκεκριμένο αντικείμενο.

Τέλος, χωρίς αμφιβολία, η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης αλλάζει γρήγορα τον κόσμο. Είναι πέρα για πέρα εκπληκτικό πώς υιοθετείται η τρισδιάστατη εκτύπωση για πολλούς βιομηχανικούς σκοπούς. Είναι, ωστόσο, άγνωστο τι επιφυλάσσει το μέλλον, αλλά ένα είναι βέβαιο, ότι η τεχνολογία κατασκευής προσθέτων θα συνεχίσει να επιλύει τα περισσότερα εταιρικά προβλήματα σε μεγάλο βαθμό. Οι δυνατότητες της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι ατελείωτες, καθώς μέχρι στιγμής έχει εμφανιστεί μόνο η επιφάνεια ενός τεράστιου παγόβουνου. Υπάρχουν τόσα πολλά που δεν έχουν ανακαλυφθεί ακόμη, ωστόσο η συνεχής βελτίωση της τεχνολογίας θα συνεχίσει να αποκαλύπτει πολλούς τρόπους με τους οποίους μπορεί να βελτιωθεί ο τρόπος ζωής σε παγκόσμιο επίπεδο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλία

- [1] J. Richard, 3D printing guide: the complete user's guide for learning the fundamentals of 3D printing, maintenance & troubleshooting common problems. United States: Dorween Publishing House, 2020.
- [2] S. Torta and J. Torta, 3D printing: an introduction. Dulles, Virginia: Mercury Learning and Information, 2019.
- [3] R. Horne and K. K. Hausman, 3D printing for dummies, 2nd edition. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc, 2017.
- [4] H. Lipson and M. Kurman, Fabricated: the new world of 3D printing. Indianapolis, Indiana: John Wiley & Sons, 2013.
- [5] R. Sheng, 3D printing: a revolutionary process for industry applications. London, United Kingdom: Academic Press, 2022.

Data Sheet

- [6] Shenzhen BIGTREE technology co., LTD., "SKR2 User Guide", April 2021
- [7] TRINAMIC Motion Control GmbH & Co. KG, "TMC2209 DATASHEET", June 2019 [Rev. 1.03].
- [8] Shenzhen BIGTREE Technology CO., LTD., "TFT35 V3.0 User Guide", Nov. 2019
- [9] ANTCLABS Inc., "BLTouch: Auto Bed Leveling Sensor for 3D Printers"

Internet Site

- [10] "3D printing," Wikipedia. Jul. 29, 2022. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=3D_printing&oldid=1101109676
- [11] Alexandra, "When Was 3D Printing Invented? The History of 3D Printing -," BCN3D Technologies, May 15, 2020. <https://www.bcn3d.com/the-history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>
- [12] "Slicer (3D printing)," Wikipedia. Jan. 30, 2022. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Slicer_\(3D_printing\)&oldid=1068854181](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Slicer_(3D_printing)&oldid=1068854181)
- [13] "What are Polar 3D Printers and Best Models to Consider," 3D Insider, Jul. 24, 2019. <https://3dinsider.com/polar-3d-printers/>
- [14] "Robotic Arm 3D Printing – The Ultimate Guide," All3DP Pro, Jul. 12, 2022. <https://all3dp.com/1/robotic-arm-3d-printing-platforms-software/>
- [15] M. P, "SLA vs DLP: Which Resin 3D Printing Process Should You Choose?," 3Dnatives, Apr. 08, 2021. <https://www.3dnatives.com/en/sla-vs-dlp-3d-printing-080420215/>

- [16] “Seven Types of 3D Printers - Different printing and extruder technologies,” 2022. <https://penandplastic.com/3d-printer-types/>
- [17] “Powder Bed Fusion | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University.” <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion/>
- [18] “DMLM Technology | GE Additive.” <https://www.ge.com/additive/direct-metal-laser-melting>
- [19] “What is Selective Heat Sintering (SHS), and how does it work?,” Additive- X, Apr. 06, 2016. <https://www.additive-x.com/blog/selective-heat-sintering-shs-work/>
- [20] “Binder Jetting | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University.” <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>
- [21] “What is Binder Jetting 3D printing? | Hubs.” <https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing/#what>
- [22] “Material Jetting | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University.” <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialjetting/>
- [23] “Directed Energy Deposition | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University.” <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/directedenergydeposition/>
- [24] “Material Extrusion | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University.” <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialextrusion/>
- [25] “Sheet Lamination | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University.” <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/sheetlamination/>
- [26] “VAT Photopolymerisation | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University.” <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/vatphotopolymerisation/>
- [27] “What is Marlin? | Marlin Firmware.” <https://marlinfw.org/docs/basics/introduction.html>
- [28] “Pronterface: How to Download, Install, & Set It Up,” All3DP, Feb. 04, 2022. <https://all3dp.com/2/pronterface-how-to-download-install-and-set-it-up/>