



INTERNATIONAL
HELLENIC
UNIVERSITY

DEPARTMENT OF INDUSTRIAL ENGINEERING AND MANAGEMENT

Κατασκευή Λειτουργικών Μικροδομών με Τεχνολογία Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

3D Printing of Functional Microstructures

Ελληνούδης Πελοπίδας-Ελευθέριος

Επιβλέπων καθηγητής: Μιχαήλ Κιζήρογλου

Θεσσαλονίκη 2025

Abstract

The subject addressed in this thesis is 3D printing. The first chapters provide an analysis of the concept, including its definition and the printing process. Subsequently, the methodology of the work is presented, along with an introduction to 3D printing technologies, printing materials, and a detailed overview of the printing process and methods. The characteristics, properties, and tools of the Creator 3 printer are then examined, while at the same time instructions for its use are also mentioned. Additionally, the software employed during the project is analyzed, and the experimental process, including the printed models and the purpose of their creation, is thoroughly described. Finally, potential future applications of the printer are proposed, as well as the conclusions that emerged from the implementation of this thesis.

Περίληψη

Το θέμα το οποίο πραγματεύεται η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία είναι η τρισδιάστατη εκτύπωση. Στα πρώτα κεφάλαια, γίνεται ανάλυση της έννοιας δηλαδή ο ορισμός της καθώς και η διαδικασία της. Στην συνέχεια, αναφέρεται ο τρόπος εκπόνησης της εργασίας και μια εισαγωγή στις τεχνολογίες του 3D Printing, στα υλικά εκτύπωσης και γενικότερα μια ανάλυση στη διαδικασία και στους τρόπους εκτύπωσης. Έπειτα, εξετάζονται τα χαρακτηριστικά, οι ιδιότητες και τα εργαλεία του Creator 3, ενώ παράλληλα αναφέρονται και οδηγίες χρήσης του. Ακόμη, αναλύονται τα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια της διπλωματικής και όλη η πειραματική διαδικασία με τα εκτυπωμένα μοντέλα και τον λόγο κατασκευής τους. Τέλος προτείνονται ορισμένες ιδέες για την μελλοντική χρήση του εκτυπωτή αλλά και τα συμπεράσματα που προέκυψαν μέσα από την υλοποίηση της διπλωματικής αυτής εργασίας.

Ευχαριστίες

Για την περάτωση αυτής της εργασίας οφείλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Κύριο Κιζήρογλου Μιχαήλ για την εμπιστοσύνη του καθώς και για την σωστή καθοδήγηση του αλλά και τις χρήσιμες συμβουλές που μου υπέδειξε. Επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για όσα μου έχουν προσφέρει αλλά και για την στήριξη τους σε όλη την διάρκεια της διπλωματικής αυτής εργασίας.

Επεξήγηση Ακρωνύμων

Ακρόνυμο	Αγγλική Ορολογία
3D	Three-Dimensional
AM	Additive Manufacturing
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
SLA	Stereolithography apparatus
DED	Direct energy deposition
LOM	Laminated object manufacturing
SLS	Selective Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting
SLM	Selective Laser Melting
TPP	Two-photon polymerization
DLP	Digital Light Processing
DIW	Direct Ink Writing
BJ3DP	Binder Jet 3D Printing

Περιεχόμενα

Abstract	2
Περίληψη	3
Ευχαριστίες	4
Επεξήγηση Ακρωνύμων.....	5
Κεφάλαιο 1	8
1.1 Σκοπός και συνεισφορά της διπλωματικής εργασίας.....	8
1.2 Μεθοδολογία.....	8
1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας	8
Κεφάλαιο 2	10
2.1.1 Ορισμός Τρισδιάστατης Εκτύπωσης.....	10
2.1.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης.....	10
2.1.3 Τρόποι Εκτύπωσης.....	11
2.2.1 Εξώθηση υλικού (FDM/FFF).....	12
2.2.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Εξώθησης υλικού.....	13
2.2.3 Υλικά εκτύπωσης	13
2.2.4 ABS	14
2.3.1 Διάφορα Πολυμερή	15
2.3.2 Διαδικασία του 3d Printing	15
2.3.3 Η μετάβαση από CAD (Computer Aided Design) σε CAM (Computer Aided Manufacturing).....	16
Κεφάλαιο 3	18
3.1.1 Ο Flashforge Creator 3	18
3.1.2 Μια γενική ματιά.....	19
3.2.1 Προετοιμασία για εκτύπωση	20
3.2.2 Η διαδικασία του Homing.....	22
3.3.1 Διαδικασία ισοστάθμισης (leveling)	23
3.4 Διάφορα σημαντικά εξαρτήματα του τρισδιάστατου εκτυπωτή	24

3.5 Τα εργαλεία του Creator 3 και η χρήση τους	26
Κεφάλαιο 4	29
4.1.1 Το πρόγραμμα SOLIDWORKS	29
4.2.1 Το πρόγραμμα FLASHPRINT	31
4.2.2 Διαδικασία προετοιμασίας μοντέλου και τελική εκτύπωση.....	31
4.3.1 Τοποθέτηση του μοντέλου επάνω στην βάση	34
4.3.2 Χρήση βοηθημάτων (supports)	35
Κεφάλαιο 5	37
5.1 Πειραματική διαδικασία.....	37
5.2 Κατασκευή κύριας βάσης και των εξαρτημάτων συναρμολόγησης	37
5.3 Προσδιορισμός κατάλληλων ανοχών (Fit Test)	39
Κεφάλαιο 6	43
6.1 Συμπεράσματα και προτάσεις	43
Βιβλιογραφία	44

Κεφάλαιο 1

1.1 Σκοπός και συνεισφορά της διπλωματικής εργασίας

Με την απόφαση μου να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο αντικείμενο ως θέμα της διπλωματικής μου εργασίας, επιδιώκεται η κατανόηση της διαδικασίας της 3D εκτύπωσης, των υλικών που χρησιμοποιούνται καθώς και της συμβολής της στην παραγωγή, στον σχεδιασμό αλλά και στην ποικιλία λύσεων σε διάφορους τομείς της βιομηχανίας.

Σκοπός της εργασίας είναι η χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας αλλά και τις δυνατότητες που προσφέρει μέσα από διάφορες τεχνικές καθώς και η ανάλυση των πλεονεκτημάτων και περιορισμών που παρουσιάζει.

1.2 Μεθοδολογία

Η συγκεκριμένη διπλωματική αποτελείται από 2 μέρη. Την έρευνα και τα πειράματα. Αρχικά πραγματοποιείται η βιβλιογραφική επισκόπηση μέσα από την οποία αναλύονται οι βασικές αρχές της τρισδιάστατης εκτύπωσης αλλά και οι τεχνικές και τα υλικά που χρησιμοποιούνται. Στην συνέχεια, παρουσιάζεται η πειραματική μελέτη κατά την οποία πραγματοποιούνται οι δοκιμές εκτύπωσης στον χώρο του εργαστηρίου όπου μέσα από τον σχεδιασμό και την κατασκευή των μοντέλων η οποία γίνεται μέσα από εξειδικευμένο λογισμικό, δίνεται η δυνατότητα κατανόησης της διαδικασίας. Τέλος, τα δεδομένα που προκύπτουν από την πειραματική διαδικασία συγκρίνονται με τις πληροφορίες της βιβλιογραφίας προκειμένου να αντληθούν ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με τις δυνατότητες της 3D εκτύπωσης.

1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Η δομή της διπλωματικής εργασίας αναλύεται ως εξής:

Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύονται ο σκοπός και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για να υλοποιηθεί η διπλωματική εργασία και η δομή που ακολουθήθηκε. Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνεται ο ορισμός της τρισδιάστατης εκτύπωσης και η αρχές της καθώς και οι τρόποι με τους οποίους πραγματοποιείται, τα υλικά χρησιμοποίησης και τα χαρακτηριστικά τους αλλά και η διαδικασία εκτύπωσης ενός αντικειμένου.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναφέρονται τα χαρακτηριστικά του εκτυπωτή του εργαστηρίου αλλά και φύλλο δεδομένων του σχετικά με την χρήση και την συντήρηση του. Στην συνέχεια στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται το λογισμικό και τα εργαλεία σχεδιασμού που χρησιμοποιήθηκαν. Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων ενώ το έκτο και τελευταίο κεφάλαιο περιέχει τα συμπεράσματα και τις μελλοντικές προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Κεφάλαιο 2

2.1.1 Ορισμός Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

Η τρισδιάστατη εκτύπωση (3D Printing) είναι γνωστή και ως πρόσθετη κατασκευή (Additive Manufacturing AM) η οποία είναι η πιο σύγχρονη τεχνική που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία περίπλοκων κατασκευασμένων εξαρτημάτων για μια ποικιλία εφαρμογών. Γενικώς, η (AM) κατασκευάζει μια τρισδιάστατη (3D) δομή προσθέτοντας συνεχώς το υλικό στρώμα προς στρώμα με την καθοδήγηση ενός μοντέλου σχεδίασης με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD Computer Aided Design). Τέλος, στη τρισδιάστατη εκτύπωση χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι υλικών, συμπεριλαμβανομένων πολυμερών, μετάλλων, κεραμικών, γυαλιών, βιοϋλικών και σύνθετων υλικών[1].

2.1.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

Η χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης έχει φέρει επανάσταση στη βιομηχανία αλλά και σε πολλούς άλλους τομείς. Παρά τα σημαντικά της πλεονεκτήματα παρουσιάζει και ορισμένα μειονεκτήματα. Στον παρακάτω πίνακα θα αναλυθούν ορισμένα από αυτά.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
Γρήγορος και ελεύθερος σχεδιασμός	Περιορισμένο μέγεθος εκτύπωσης
Οικονομικά οφέλη	Ανακρίβειες σχεδίασης
Μειωμένος χρόνος παράδοσης	Όριο στο μέγεθος της κατασκευής λόγω του μεγέθους θαλάμου του εκτυπωτή
Περιβαλλοντικά οφέλη	Ανισότροπη ιδιότητα υλικού
Δημιουργία ελαφριών μοντέλων εκτύπωσης	Η ταχύτητα εκτύπωσης μειώνεται με την αύξηση της ανάλυσης. Για αυτό οι σύγχρονες τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης δεν είναι κατάλληλες για μαζική παραγωγή

Πίνακας 2.1: Οφέλη και προκλήσεις της τρισδιάστατης εκτύπωσης [2], [3], [4], [5].

2.1.3 Τρόποι Εκτύπωσης

Οι τρόποι εκτύπωσης ανάλογα με τον τύπο του βασικού υλικού που χρησιμοποιείται μπορούν να ταξινομηθούν σε 3 διακριτές κατηγορίες:

1. Στερεάς βάσης (solid-based)
2. Με βάση την σκόνη (powder-based)
3. Με βάση το υγρό (liquid-based)

Η κάθε μία από αυτές αποτελείται από υποκατηγορίες και είναι η εξής:

Η solid-based υποδιαιρείται σε:

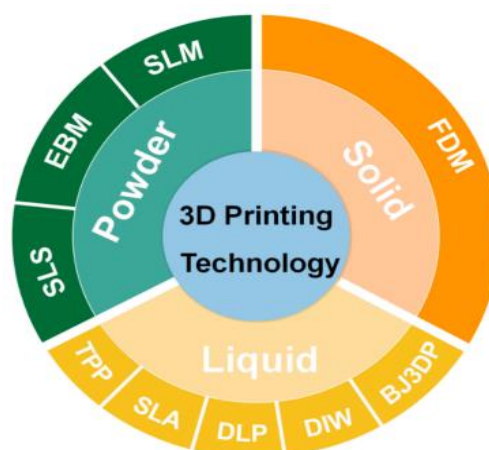
- Μοντελοποίηση Συντηγμένης Εναπόθεσης (FDM)

Η powder-based υποδιαιρείται σε:

- Συσσωμάτωση με Λείζερ (SLS)
- Τήξη Δέσμης ηλεκτρονίων (EBM)
- Επιλεκτική Τήξη με Λείζερ (SLM)

Η liquid-based υποδιαιρείται σε:

- Πολυμερισμό δύο φωτονίων (2PP)
- Συσκευή Στερεολιθογραφίας (SLA)
- Ψηφιακή Επεξεργασία Φωτός (DLP)
- Απευθείας Γραφή Μελανιού (DIW)
- Εκτύπωση Τρισδιάστατης Εκτύπωσης Binder Jet (BJ3DP)
- Εκτύπωση Inkjet 3D

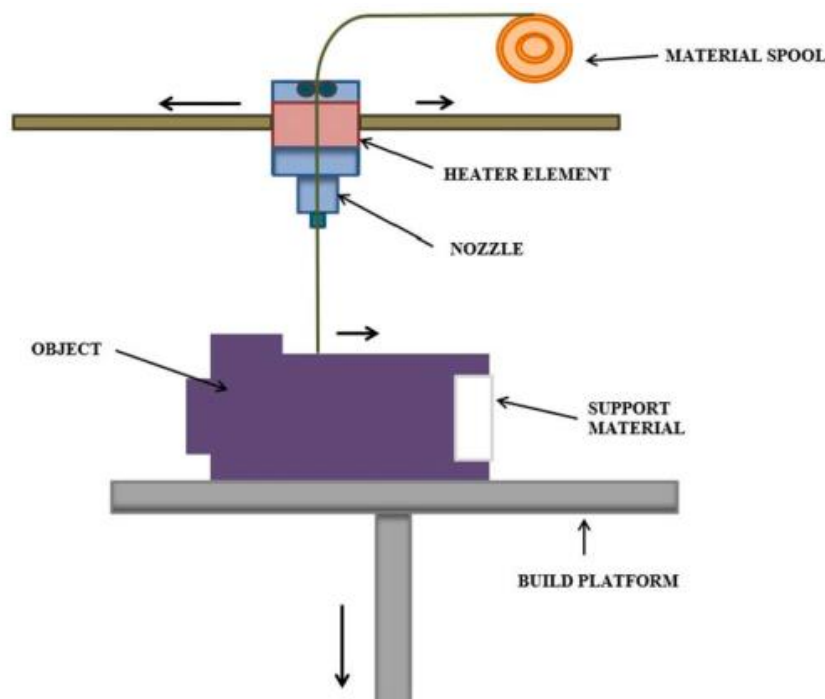


Σχήμα 2.1: Ταξινόμηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης [6], [7].

Οι κύριοι όμως μέθοδοι της (AM) τεχνολογίας είναι η εξώθηση υλικού (FDM), η σύντηξη υποστρώματος σκόνης (Powder bed fusion), η Inkjet printing and contour crafting, η στερεολιθογραφία (SLA), η κατευθυνόμενη ενεργειακή εναπόθεση (Direct energy deposition) και τέλος τα ελάσματα σε φύλλα (LOM) [8].

2.2.1 Εξώθηση υλικού (FDM/FFF)

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για να εκτυπωθούν τα μοντέλα αυτής της διπλωματικής είναι η εξώθηση υλικού. Είναι μία μέθοδος που χρησιμοποιεί ένα συνεχές θερμοπλαστικό πολυμερές νήμα ως κύριο υλικό. Αρχικά, το ακροφύσιο του extruder πρέπει να θερμανθεί σωστά ώστε το λιωμένο υλικό να ωθηθεί προς τα έξω στην πλατφόρμα ή πάνω από τα στρώματα που έχουν ήδη εκτυπωθεί. Η θερμοπλαστικότητα του νήματος του πολυμερούς είναι μια βασική ιδιότητα για αυτή τη μέθοδο, η οποία επιτρέπει στα νήματα να ενώνονται μεταξύ τους κατά την εκτύπωση και στη συνέχεια να στερεοποιούνται σε θερμοκρασία δωματίου μετά την εκτύπωση [8], [9].



Σχήμα 2.2: Απεικόνιση εξώθησης υλικού [10].

2.2.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Εξώθησης υλικού

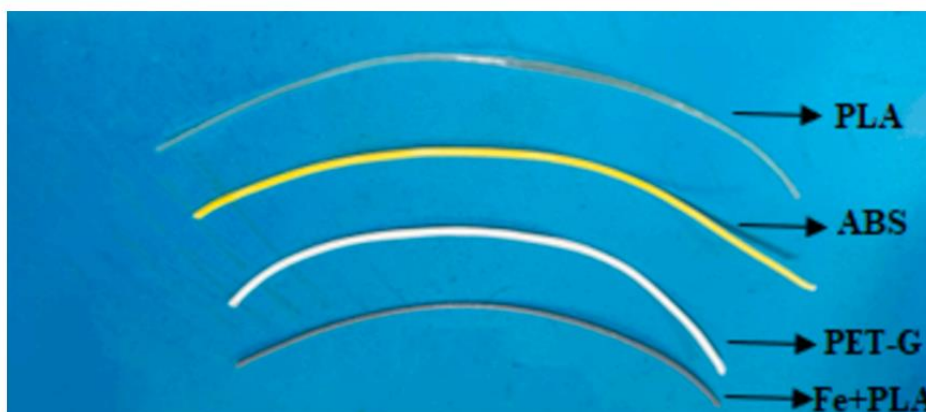
Η τεχνολογία εξώθησης υλικού (FDM) όπως είναι λογικό παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα κατά την χρήση της. Αυτά είναι:

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
Χαμηλό κόστος λειτουργίας	Περιορισμό υλικών
Υψηλή ταχύτητα και ακρίβεια εκτύπωσης	Ασθενείς μηχανικές ιδιότητες
Φιλικό προς τον χρήστη	Αποκόλληση υλικού από την πλατφόρμα
Απλότητα (εύκολη στην χρήση)	Θερμική υποβάθμιση που οδηγεί στην απώλεια χρήσιμων ιδιοτήτων του τελικού μοντέλου
Καλή ποιότητα επιφάνειας	Φινίρισμα στρώμα-στρώμα (χαμηλή ποιότητα και ανάλυση στην κατακόρυφη διεύθυνση).

Πίνακας 2.2: Σύνοψη πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της εξώθησης υλικού (FDM) [6], [8].

2.2.3 Υλικά εκτύπωσης

Όπως κάθε διαδικασία κατασκευής έτσι και η τρισδιάστατη εκτύπωση χρειάζεται υλικά υψηλής ποιότητας που πληρούν σταθερές προδιαγραφές για την κατασκευή σταθερών συσκευών υψηλής ποιότητας. Όμως, ανάλογα με τη μέθοδο και τα χαρακτηριστικά του εκτυπωτή η εκάστοτε τεχνολογία χρησιμοποιεί ορισμένα υλικά εκτύπωσης. Έτσι, η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι σε θέση να παράγει πλήρως λειτουργικά μέρη σε ένα ευρύ φάσμα υλικών, όπως κεραμικά, μέταλλα και πολυμερή αλλά και συνδυασμούς τους σε μορφή σύνθετων υλικών. Στην μέθοδο FDM η οποία είναι η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για να υλοποιηθεί η διπλωματική εργασία τα υλικά είναι τα πολυμερή συμπεριλαμβανομένου το ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), το PLA (Polylactic Acid), το PETG (Polyethylene terephthalate glycol), το polyamide-nylon κ.α. πολλά υλικά [11].



Σχήμα 2.3: Υλικά εκτύπωσης (filaments) [12].

2.2.4 ABS

Στον 3D εκτυπωτή του εργαστηρίου χρησιμοποιήθηκε το ABS υλικό και συγκεκριμένα σε χρώμα κίτρινο. Το ABS τυπώνεται σε θερμαινόμενο κρεβάτι εκτύπωσης με ειδική κόλλα κρεβατιού, καθώς είναι επιρρεπές σε στρέβλωση. Είναι ένα άμορφο πολυμερές τριών μονομερών που αποτελείται από ακρυλονιτρίλιο, βουταδιένιο, στυρένιο και ένα αδιαφανές θερμοπλαστικό με βάση το λάδι. Η χημική και θερμική σταθερότητα παρέχεται από το ακρυλονιτρίλιο, ενώ η σκληρότητα και η αντοχή προστίθενται από το βουταδιένιο.

Τέλος, το στυρένιο δίνει στο τελικό πολυμερές ένα ωραίο γυαλιστερό φινίρισμα. Γι' αυτό λόγο του χαμηλού σημείου τήξης που έχει του επιτρέπεται να χρησιμοποιείται στην τρισδιάστατη εκτύπωση με ευκολία [13].

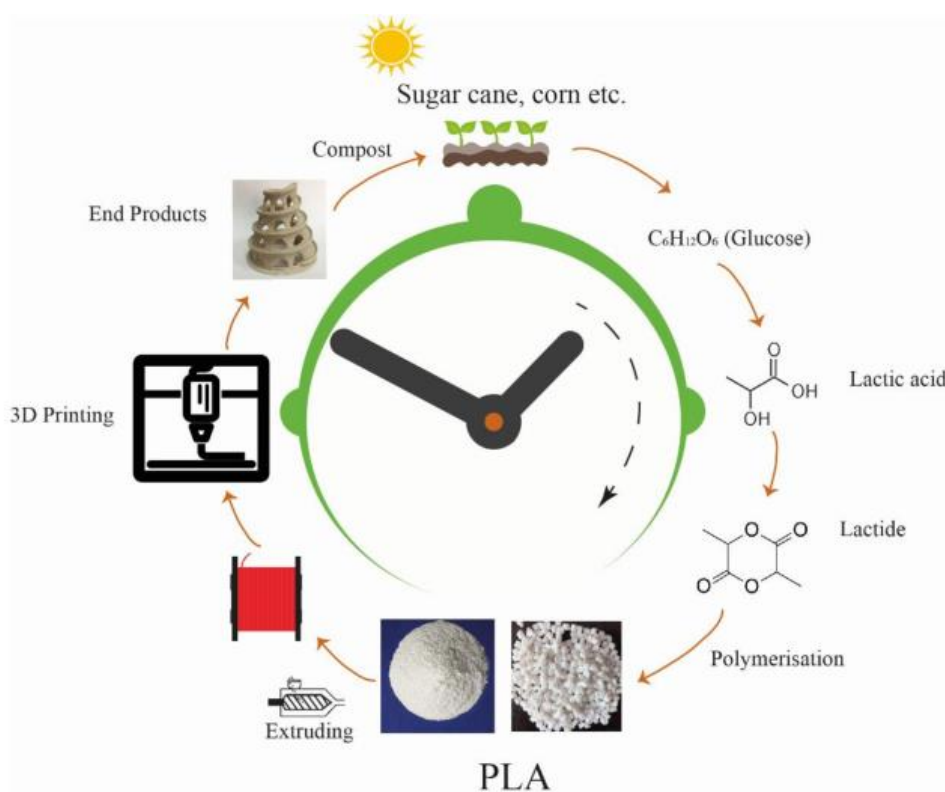
Παρακάτω φαίνεται ένας πίνακας για το συγκεκριμένο υλικό:

Υλικό	Θερμοκρασία ακροφυσίου (°C)	Θερμοκρασία πλατφόρμας (°C)	Ταχύτητα εκτύπωσης (mm/s)	Γεωμετρικό μοτίβο	Ποσοστό πλήρωσης (%)	Προσανατολισμός απόθεσης (Degrees)	Πάχος στρώσης (mm)
ABS	210	50	35	Τρισδιάστατο	33	0°/90° και ±45°	0,14
				Εξαγωνικό	66		0,18
				και Γραμμικό	100		

Πίνακας 2.3: Παράμετροι εκτύπωσης ABS υλικού [14].

2.3.1 Διάφορα Πολυμερή

Όπως προαναφέρθηκε υπάρχουν και άλλα πολυμερή εκτός του ABS. Τα παρακάτω αναφέρονται λόγω των διαφορετικών χαρακτηριστικών και της διαφοροποίησης που έχουν κατά την διαδικασία της 3D εκτύπωσης. Ας ξεκινήσουμε από το PLA που είναι ένας βιοεστέρας που προέρχεται από γαλακτικό οξύ (2-υδροξυπροπιονικό οξύ), του οποίου η παραγωγή προτιμάται περιβαλλοντικά καθώς λαμβάνεται γενικά από ανανεώσιμες πηγές όπως το καλαμπόκι, το σιτάρι και το ρύζι καθώς και από μεγάλες ποσότητες αερίου διοξειδίου του άνθρακα. Γι' αυτό επειδή παρουσιάζει καλή μηχανική αντοχή, βιοσυμβατότητα, βιοαποδομησιμότητα και κυρίως υψηλή κομποστοποίηση, αποτελεί την ιδανική εναλλακτική στα πολυμερή με βάση το πετρέλαιο [15], [16].



Σχήμα 2.4: Ο κύκλος δημιουργίας ενός γαλακτικού οξέος (PLA) [16].

2.3.2 Διαδικασία του 3d Printing

Η τρισδιάστατη εκτύπωση πραγματοποιείται μέσω της διαίρεσης (slicing) ενός αρχείου CAD σε ξεχωριστά επίπεδα, τα οποία στη συνέχεια κατασκευάζονται διαδοχικά, το ένα πάνω στο άλλο. Συγκεκριμένα, ο 3D εκτυπωτής δημιουργεί το αντικείμενο σε λεπτές "φέτες", γνωστές ως στρώματα (layers).

Ο slicer λαμβάνει ένα αρχείο STL, το αναλύει σε στρώσεις και υπολογίζει την πορεία που θα ακολουθήσει η κεφαλή εξώθησης (extruder) για κάθε μία από αυτές. Καθώς ξεκινά η εκτύπωση κάθε στρώματος, η βάση μετακινείται στο αντίστοιχο ύψος, ενώ το σύστημα κίνησης κατευθύνει την κεφαλή εκτύπωσης κατά μήκος της προκαθορισμένης πορείας, αποθέτοντας το υλικό μέσω της εξώθησης. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία, το εκτυπωμένο αντικείμενο αφαιρείται από την επιφάνεια εκτύπωσης και μπορεί να υποστεί περαιτέρω επεξεργασία, αν χρειάζεται. Αυτό συμβαίνει επειδή, παρόλο που τα εκτυπωμένα μοντέλα είναι συνήθως ακριβή και με λεία επιφάνεια, πολλές φορές περιλαμβάνουν υποστηρικτικές δομές (supports) που πρέπει να αφαιρεθούν μετά την εκτύπωση.

2.3.3 Η μετάβαση από CAD (Computer Aided Design) σε CAM (Computer Aided Manufacturing)

Η διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι ιδιαίτερα ευνοϊκή για την ενσωμάτωσή της στο σύστημα CAD/CAM (Computer-Aided Design / Computer-Aided Manufacturing). Τα σύγχρονα προγράμματα CAD προσφέρουν ένα ευρύ φάσμα προηγμένων δυνατοτήτων σχεδίασης, επιτρέποντας την ακριβή αναπαράσταση σύνθετων γεωμετριών και τη δημιουργία αντικειμένων υψηλής ακρίβειας.

Σε αντίθεση με την συμβατική αφαιρετική κατεργασία, η οποία απαιτεί πολύπλοκη προγραμματιστική παρέμβαση για τον καθορισμό της ακολουθίας διαμόρφωσης και της τελικής επεξεργασίας, η προσθετική κατασκευή μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης χαρακτηρίζεται από σημαντικά απλούστερη ροή εργασίας. Η διαδικασία κατασκευής πραγματοποιείται σταδιακά, μέσω της απόθεσης υλικού σε διαδοχικές στρώσεις, γεγονός που μειώνει την ανάγκη για εξειδικευμένες στρατηγικές κατεργασίας και ελαχιστοποιεί τη σπατάλη υλικού. Ως έξοδος του λογισμικού CAD χρησιμοποιείται ένα αρχείο τύπου *.stl (stereolithography), το οποίο περιγράφει την επιφάνεια του αντικειμένου με χρήση ενός πλέγματος τριγώνων. Το αρχείο αυτό αποτελεί την είσοδο στο CAM σύστημα, στο οποίο λαμβάνει χώρα ο τεμαχισμός του μοντέλου σε στρώσεις (slicing) και ο καθορισμός των παραμέτρων εκτύπωσης (π.χ. ταχύτητα, θερμοκρασία, υποστηρικτικές δομές). Τέλος, ένα σημαντικό πλεονέκτημα της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η δυνατότητα κατασκευής ενός αντικειμένου σε έναν ενιαίο, συνεχόμενο κύκλο παραγωγής, χωρίς την ανάγκη για ενδιάμεσες κατεργασίες ή

αλλαγές εργαλείων, όπως συμβαίνει στις αφαιρετικές μεθόδους. Η ιδιότητα αυτή καθιστά την προσθετική κατασκευή ιδανική για την υλοποίηση πρωτοτύπων, αλλά και για παραγωγή μικρής κλίμακας, με υψηλό βαθμό προσαρμογής [17].

Κεφάλαιο 3

3.1.1 Ο Flashforge Creator 3

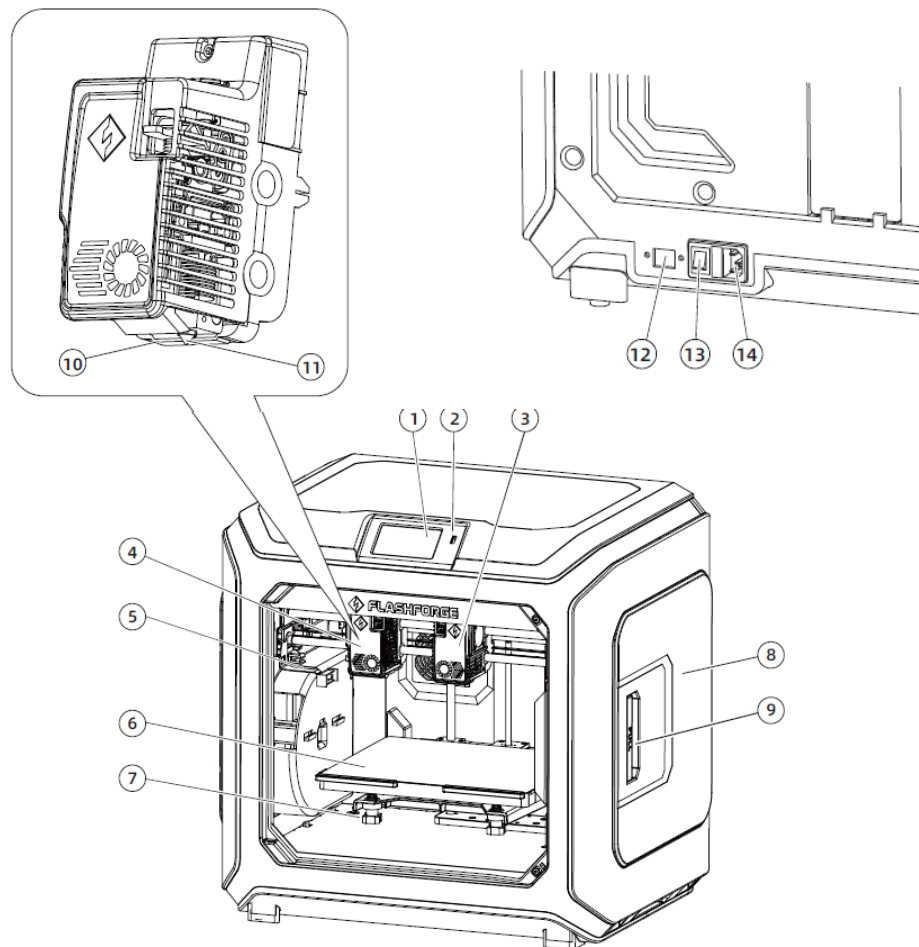


Σχήμα 3.1 (Πηγή: Flashforge) : Ο εκτυπωτής Flashforge Creator 3 που υπάρχει στο εργαστήριο για την εκπόνηση της διπλωματικής

Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής που υπάρχει στο εργαστήριο της σχολής είναι ο Creator 3 της FlashForge. Η τεχνολογία εκτύπωσης που χρησιμοποιεί ο συγκεκριμένος εκτυπωτής είναι η τεχνική εξώθησης υλικού έχοντας δύο ανεξάρτητες κεφαλές εξώθησης (extruders), όπου θα αναλυθούν τόσο τα χαρακτηριστικά τους όσο και ορισμένες οδηγίες χρήσης για την ασφάλεια του χρήστη αλλά και του ίδιου του εκτυπωτή. Αρχικά θα αναλυθούν πρώτα οι ενέργειες που πραγματοποιούνται όταν χρησιμοποιείται ο εκτυπωτής από κάποιον χρήστη, όταν χρειαστεί να γίνει αλλαγή του υλικού τροφοδοσίας του ακόμα και όταν ο ίδιος ο εκτυπωτής δεν δουλεύει σωστά. Όλες αυτές οι ενέργειες συμβάλλουν στην βαθμονόμηση της πλατφόρμας εκτύπωσης (bed), της κεφαλής εξώθησης καθώς και του αρχικού σημείου εκτύπωσης. Στον συγκεκριμένο εκτυπωτή τα προαναφερθέντα γίνονται αυτοματοποιημένα πράγμα που τον καθιστά εύκολο στην χρήση του.

3.1.2 Μια γενική ματιά

Όταν ο χρήστης αντικρίζει τον εκτυπωτή αντιλαμβάνεται πως πρόκειται για μια συσκευή με διάφορες λεπτομέρειες τόσο στο εσωτερικό της όσο και στο εξωτερικό της. Διαθέτει μια πληθώρα πλήκτρων, λαβών αλλά και πολλών χαρακτηριστικών, όπου χρειάζεται η εξοικείωση τους πριν την χρήση της. Παρακάτω, φαίνονται διάφορες οπτικές γωνίες του εκτυπωτή.



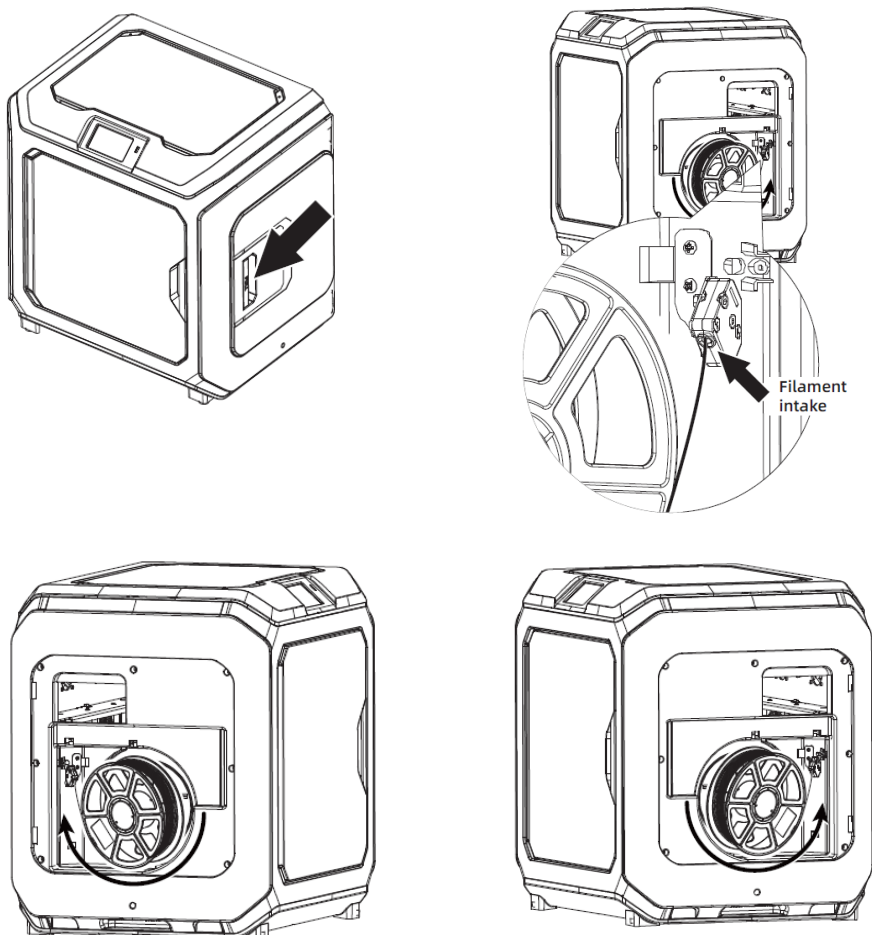
Σχήμα 3.2: Όψεις του εκτυπωτή

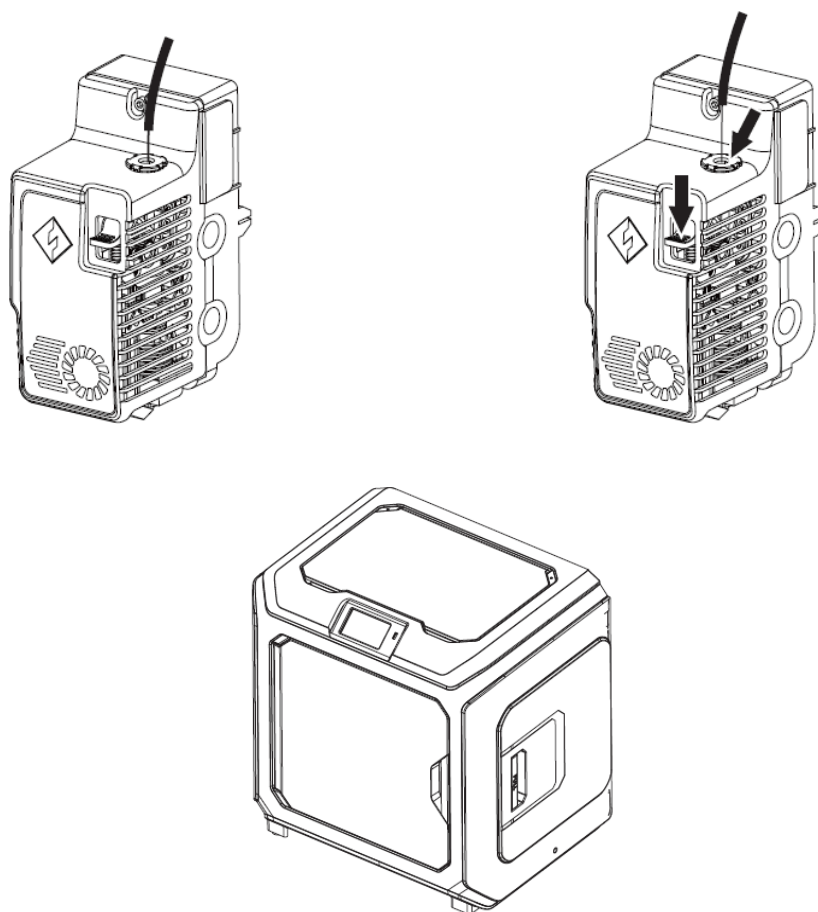
- 1) Οθόνη αφής
- 2) Εισαγωγή USB
- 3) Δεξιός extruder
- 4) Αριστερός extruder
- 5) Βούρτσα ακροφυσίου
- 6) Πλατφόρμα εκτύπωσης
- 7) Παξιμάδια ανύψωσης
- 8) Κάλυμμα νήματος

- 9) Λαβή καλύμματος νήματος
- 10) Οδηγός νήματος
- 11) Μύτη νήματος
- 12) Είσοδος καλωδίου Ethernet
- 13) Διακόπτης ισχύος ρεύματος
- 14) Είσοδος ισχύος

3.2.1 Προετοιμασία για εκτύπωση

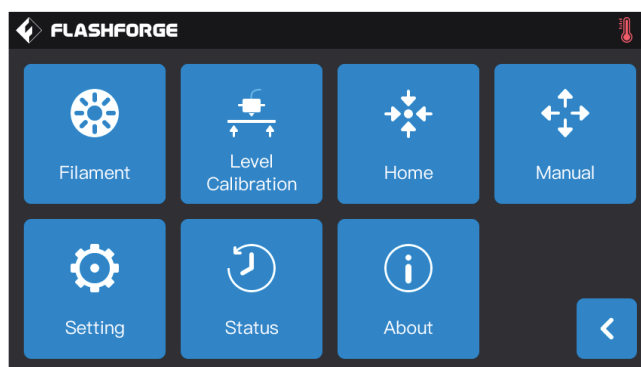
Αρχικά, ανοίγουμε το κάλυμμα του νήματος βγάζουμε έξω το καρούλι και τοποθετούμε το υλικό εκτύπωσης μέσα στην είσοδο συνεχόμενα μέχρι το υλικό να περάσει μέσα από τον σωλήνα ώστε να περάσει μέσα στον θάλαμο του εκτυπωτή. Στην συνέχεια πιέζουμε το κουμπί που υπάρχει μπροστά από τον εξωθητήρα (extruder) για να εισέλθει το υλικό μέχρι να μην μπορεί να μπει πιο μέσα το υλικό και τέλος κλείνουμε το κάλυμμα του νήματος.



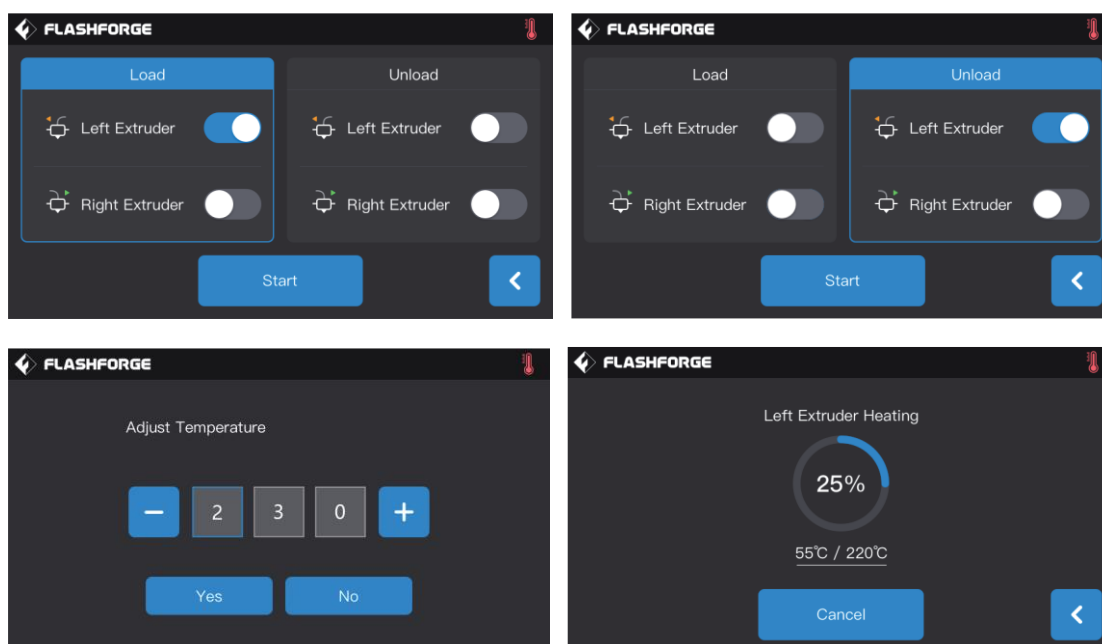


Σχήμα 3.3 (Πηγή: FlashForge): Τοποθέτηση του νήματος στον εκτυπωτή

Η διαδικασία τοποθέτησης και αφαίρεσης του νήματος (υλικού) είναι βασικό βήμα διότι για να πραγματοποιηθεί μια εκτύπωση πρέπει να υπάρχει εκτυπώσιμο υλικό. Έτσι η σωστή τοποθέτηση του είναι κύριο μέλημα για να μην υπάρξουν ανωμαλίες καθ' όλη την διάρκεια της εκτύπωσης. Βλέποντας το μενού της οθόνης του εκτυπωτή ο χρήστης πρέπει να επιλέξει το εικονίδιο “Tools” για να προχωρήσει στο μενού του Σχήματος 3.4. Στην συνέχεια, διαλέγει το εικονίδιο “Filament” και ορίζει μια λογική θερμοκρασία θέρμανσης σύμφωνα με την απαιτούμενη τιμή θερμοκρασίας του υλικού. Είναι απαραίτητο να λειτουργήσει σύμφωνα με τις οδηγίες της οθόνης και να περιμένει έως ότου το ακροφύσιο εξάγει ομαλά το ομοιόμορφο νήμα. Πάντοτε μετά από τέτοιες διαδικασίες θα πρέπει να γίνονται σωστά και οι διαδικασίες “Homing” και “Leveling” για τη σωστή λειτουργία του εκτυπωτή.



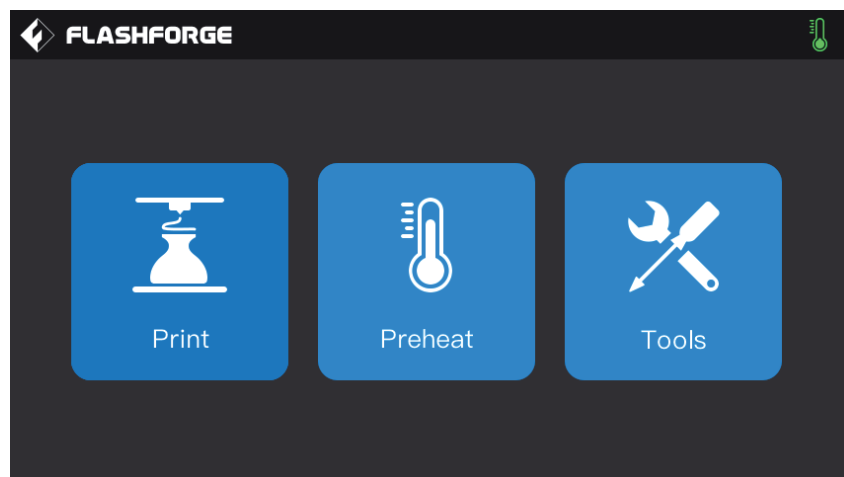
Σχήμα 3.4 (Πηγή: FlashForge): Η επιλογή Filament στην οθόνη του εκτυπωτή



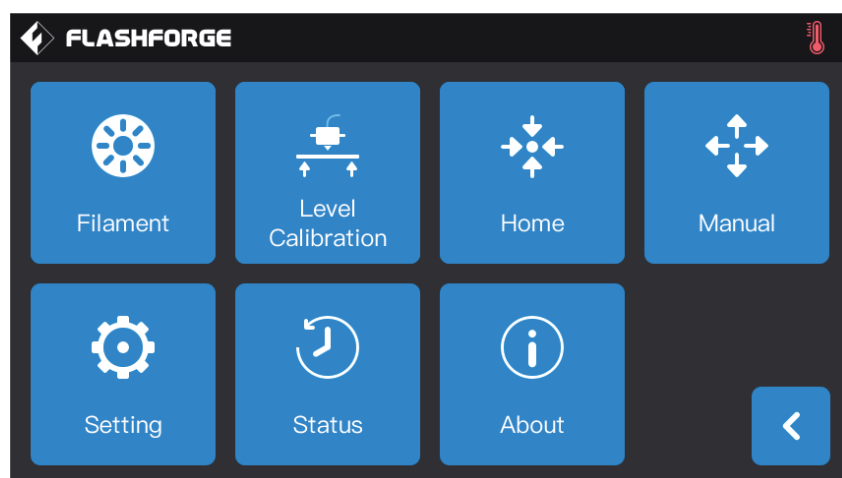
Σχήμα 3.5 (Πηγή: FlashForge): Τοποθέτηση-Αφαίρεση υλικού καθώς και ορισμός θερμοκρασίας

3.2.2 Η διαδικασία του Homing

Η διαδικασία του Homing είναι αυτή η οποία καθορίζει την θέση του ακροφύσιου. Είναι μια διαδικασία που πρέπει να πραγματοποιείται πρώτη αλλά και μετά το πέρας μιας εκτύπωσης. Αρχικά, μόλις ενεργοποιηθεί ο εκτυπωτής και εμφανισθεί το μενού του Σχήματος 3.6 στην οθόνη ο χρήστης πρέπει να επιλέξει το εικονίδιο “Tools” για να προχωρήσει στο μενού του Σχήματος 3.7. Στην συνέχεια, διαλέγει το εικονίδιο “Home” και ακολουθεί τα βήματα που του εμφανίζει στην οθόνη.



Σχήμα 3.6 (Πηγή: FlashForge manual): Αρχικό μενού στην οθόνη του εκτυπωτή

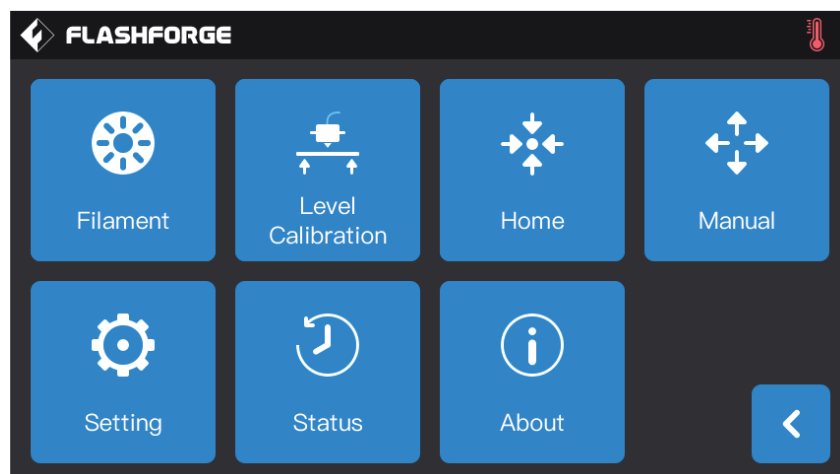


Σχήμα 3.7 (Πηγή: FlashForge): Η επιλογή Home στην οθόνη του εκτυπωτή

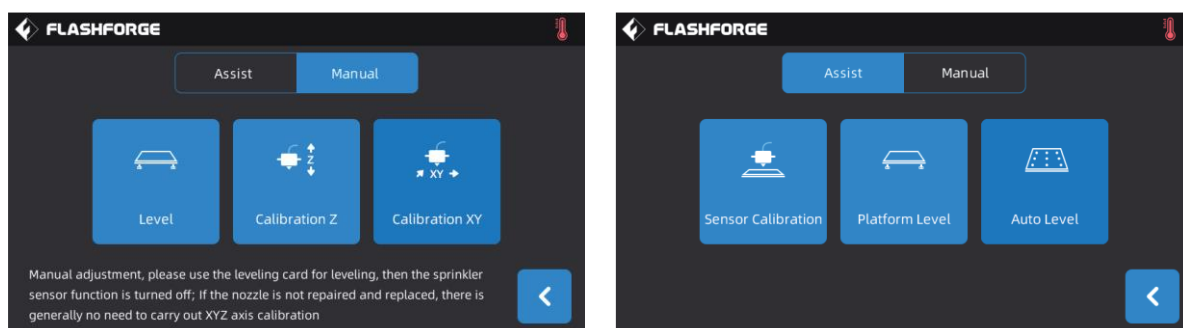
3.3.1 Διαδικασία ισοστάθμισης (leveling)

Ο εξοπλισμός έχει προσαρμοστεί και βαθμονομηθεί σωστά πριν φύγει από το εργοστάσιο. Ωστόσο, η απόσταση μεταξύ extruder και πλατφόρμας ενδέχεται να υποστεί ζημιά λόγω των κραδασμών που δημιουργούνται κατά τη μεταφορά. Έτσι, συνιστάται η διαδικασία ισοστάθμισης πριν από την πρώτη εκτύπωση. Υπάρχουν δύο λειτουργίες ισοστάθμισης, η βοηθητική λειτουργία και η χειροκίνητη. Στη βοηθητική λειτουργία, όλες οι εκτελέσεις θα ολοκληρωθούν με τη βοήθεια του αισθητήρα του εξωθητήρα και των βοηθητικών προτροπών, ενώ στη χειροκίνητη λειτουργία η ισοστάθμιση της πλατφόρμας δεν θα ενεργοποιήσει τη λειτουργία του αισθητήρα.

Οπότε, από το αρχικό μενού πρέπει να επιλέξει το εικονίδιο “Tools” για να προχωρήσει στο μενού του Σχήματος 3.8. Στην συνέχεια, επιλέγει το εικονίδιο “Level Calibration” και διαλέγει αυτό που θέλει να ισοσταθμίσει.



Σχήμα 3.8 (Πηγή: FlashForge): Η επιλογή Level Calibration στην οθόνη του εκτυπωτή

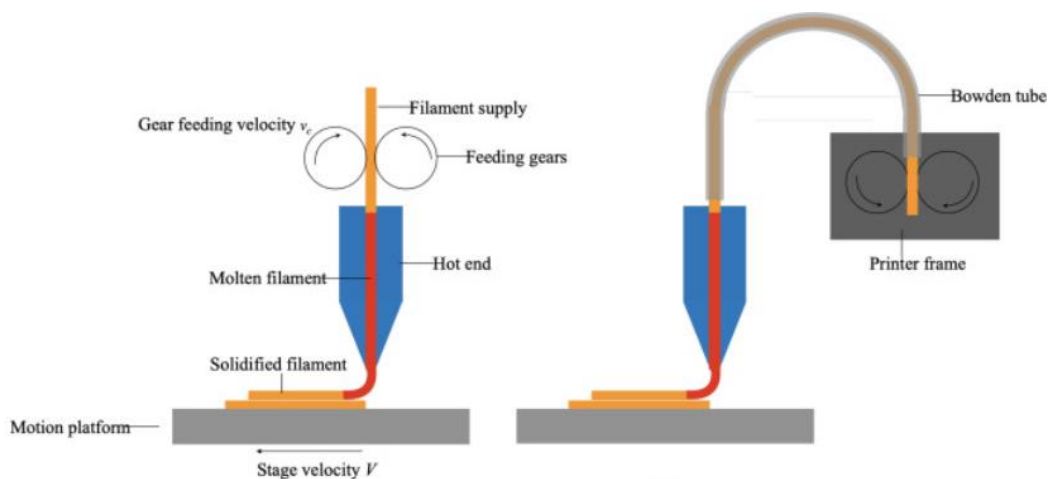


Σχήμα 3.9 (Πηγή: FlashForge): Χειροκίνητη ή Βοηθητική λειτουργία

3.4 Διάφορα σημαντικά εξαρτήματα του τρισδιάστατου εκτυπωτή

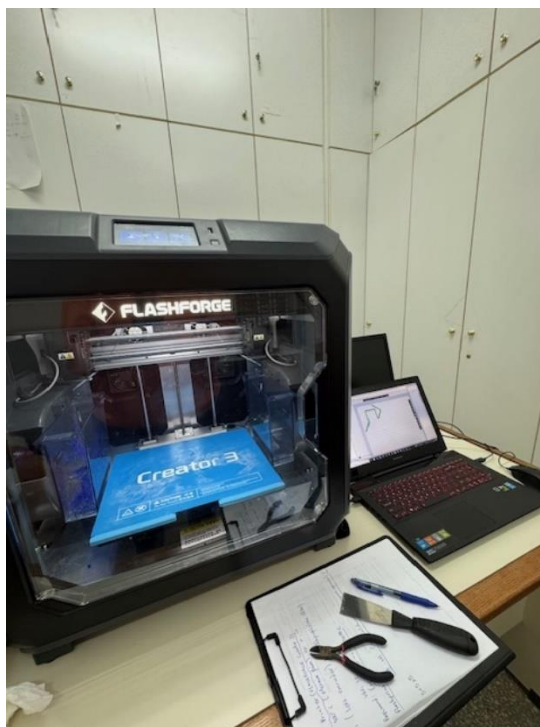
Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής είναι μια πολύπλοκη συσκευή η οποία αποτελείται από έναν μεγάλο αριθμό διαφόρων εξαρτημάτων. Όλα μεταξύ τους συμβάλλουν για την επίτευξη μιας σωστής εκτύπωσης, από τους εξωθητήρες, τα δοχεία απορριμμάτων νήματος μέχρι και τον φωτισμό του θαλάμου και την στεγανοποίηση στις πόρτες. Παρακάτω, αναλύονται κάποια από αυτά:

- Κεφαλή εκτύπωσης ή εξωθητής (extruder):** Σε έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή απαραίτητο εξάρτημα για την εκτύπωση ενός αντικειμένου είναι ο extruder. Υπάρχουν δύο τύποι extruder, ένας είναι ο Direct extruder ο οποίος είναι και ο τύπος που βρίσκεται στον εκτυπωτή του εργαστηρίου και ο άλλος είναι ο Bowden extruder. Η διαφοροποίηση μεταξύ τους γίνεται λόγω του τρόπου όπου τροφοδοτούνται το εκτυπώσιμο υλικό.



Σχήμα 3.10: Η διαφορά μεταξύ ενός Direct και Bowden extruder [18], [19]

- Πλατφόρμα εκτύπωσης ή (βάση) εκτύπωσης:** Ένα άλλο απαραίτητο εξάρτημα είναι η βάση εκτύπωσης ή αλλιώς τραπέζι θαλάμου. Ο εκτυπωτής δεν μπορεί να εναποθέσει το λιωμένο νήμα σε οποιαδήποτε επιφάνεια χρειάζεται η κατάλληλη. Η βασική λειτουργία της βάσης είναι για να κολλήσει το πρώτο στρώμα υλικού επάνω της ώστε να μπορέσει να δημιουργήσει και τα υπόλοιπα στρώματα (layers) έτσι ώστε να μην μετακινείται το αντικείμενο εκτύπωσης, γι' αυτό και χρειάζεται να είναι στην σωστή θερμοκρασία. Η κίνηση της πλατφόρμας είναι κάθετη δηλαδή μετακινείται πάνω-κάτω και η επιλογή της βασίζεται ανάλογα με το υλικό εκτύπωσης που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί.

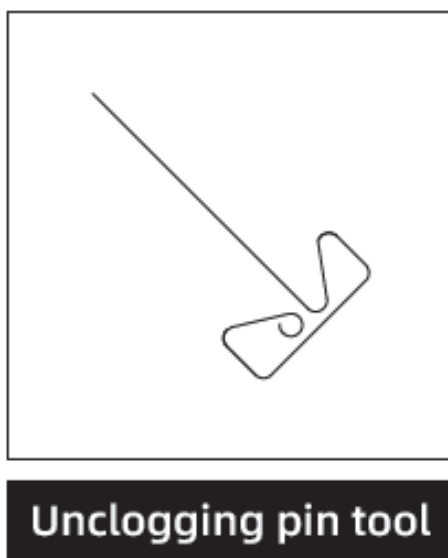


Σχήμα 3.11 (Πηγή: Φωτογραφίες συγγραφέα): Η βάση εκτύπωσης του FlashForge Creator 3

3.5 Τα εργαλεία του Creator 3 και η χρήση τους

Καθώς κάποιος είναι σε διαδικασία εκτύπωσης είναι πολύ πιθανόν να συμβούν φαινόμενα που θα δημιουργήσουν πρόβλημα σε αυτήν και θα την καταστήσουν λίγο πιο περίπλοκη. Ένα πολύ σύννηθες πρόβλημα είναι η φραγή της μύτης του extruder. Αυτό μπορεί να συμβαίνει για διάφορους λόγους. Ένας από αυτούς είναι ότι η ρύθμιση του Leveling δεν έχει γίνει σωστά ή η θερμοκρασία που έχει δοθεί στο πρόγραμμα του slicing δεν είναι η κατάλληλη. Όταν το Leveling δεν είναι σωστό πιθανόν ο extruder να είναι πολύ κοντά στην βάση του εκτυπωτή με αποτέλεσμα να μαζεύεται περίσσιο υλικό στην κεφαλή και να μην μπορεί να βγει. Στην λανθασμένη θερμοκρασία σημαίνει ότι ο χρήστης έχει καταχωρήσει μικρότερη θερμοκρασία από την απαιτούμενη στον extruder και έτσι δεν μπορεί να λιώσει το υλικό και να παραμένει φραγμένο μέσα στον εξωθητήρα. Για την επίλυση αυτών των προβλημάτων ο χρήστης μπορεί να προβεί σε μερικές ενέργειες η οποίες θα αποδειχθούν σωτήριες. Στην περίπτωση του Leveling ο χρήστης για να είναι πιο σίγουρος ότι θα πετύχει η διαδικασία συνίσταται να γίνει χειροκίνητα (παρ. 3.3.1), σε περίπτωση που στην βοηθητική λειτουργία κάποιος αισθητήρας δεν δουλεύει σωστά.

Παράλληλα, μπορεί επίσης να θερμάνει τον εξωθητήρα σε θερμοκρασία παραπάνω από την συνηθισμένη ώστε να μπορεί να λιώσει ότι υλικό έχει απομείνει μέσα και να προχωρήσει στο μενού του εκτυπωτή (παρ. 3.2.1) και να επιλέξει το εικονίδιο “Load”. Μόλις το ακροφύσιο πιάσει την θερμοκρασία που έχει επιλέξει, ο χρήστης πρέπει να ασκήσει πίεση στο νήμα με το χέρι έως ότου το υλικό φανεί στην μύτη του extruder. Εάν το υλικό εναποθέεται σε κανονική ροή από τον extruder τότε σημαίνει ότι το πρόβλημα έχει επιλυθεί. Μία άλλη μέθοδος η οποία βέβαια προϋποθέτει εμπειρία αλλά είναι και πιο χρονοβόρα, είναι να χρησιμοποιήσει ένα ειδικό εργαλείο που συμπεριλαμβάνεται στον εξοπλισμό του εκτυπωτή ώστε να αποφράξει το περίσσιο υλικό που έχει μαζευτεί στην κεφαλή.



Σχήμα 3.12 (Πηγή: FlashForge): Εργαλείο καθαρισμού φραγμένου ακροφύσιου

Η ιδιαιτερότητα αυτής της μεθόδου είναι ότι ο χρήστης πρέπει να αποσυναρμολογήσει την κεφαλή βγάζοντας ότι προστατευτικά καπάκια έχει αλλά και βίδες για να φανεί ο μηχανισμός μέσα. Στην συνέχεια μέσα από το μενού θα ορίσει μια θερμοκρασία κατάλληλη για να μπορεί να αποφράξει το περίσσιο υλικό και αυτήν την φορά να ασκήσει πίεση με το ειδικό εργαλείο. Όταν βεβαιωθεί ότι ο extruder έχει φυσιολογική ροή υλικού τότε ο χρήστης πρέπει να ξανασυνδέσει ότι κομμάτια έχει βγάλει και να κάνει μια δοκιμαστική εκτύπωση για να είναι σίγουρος ότι εκτυπώνει σωστά.

Εάν συνεχίζει μετά από όλα αυτά η κεφαλή να μην εκτυπώνει σωστά τότε ο χρήστης είτε θα προμηθευτεί από το εμπόριο είτε κάποιο άλλο εργαλείο καθαρισμού για την μύτη είτε θα προβεί στην αντικατάσταση της που υπάρχει ανταλλακτικό στον αρχικό εξοπλισμό που δίνεται μαζί με τον εκτυπωτή.

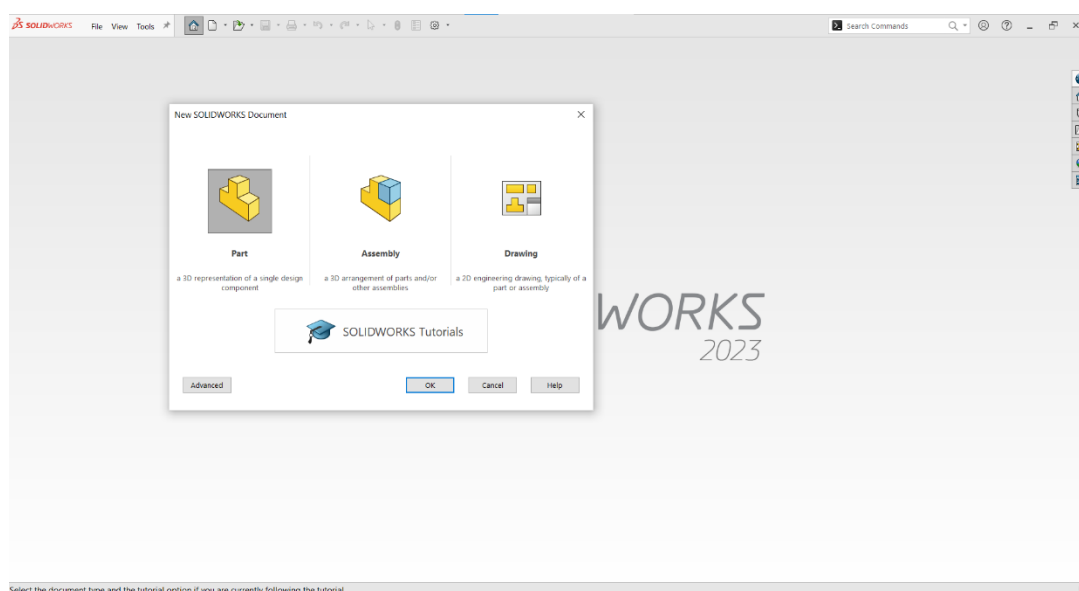


Σχήμα 3.13 (Πηγή: FlashForge): Ανταλλακτικό μύτης του extruder

Κεφάλαιο 4

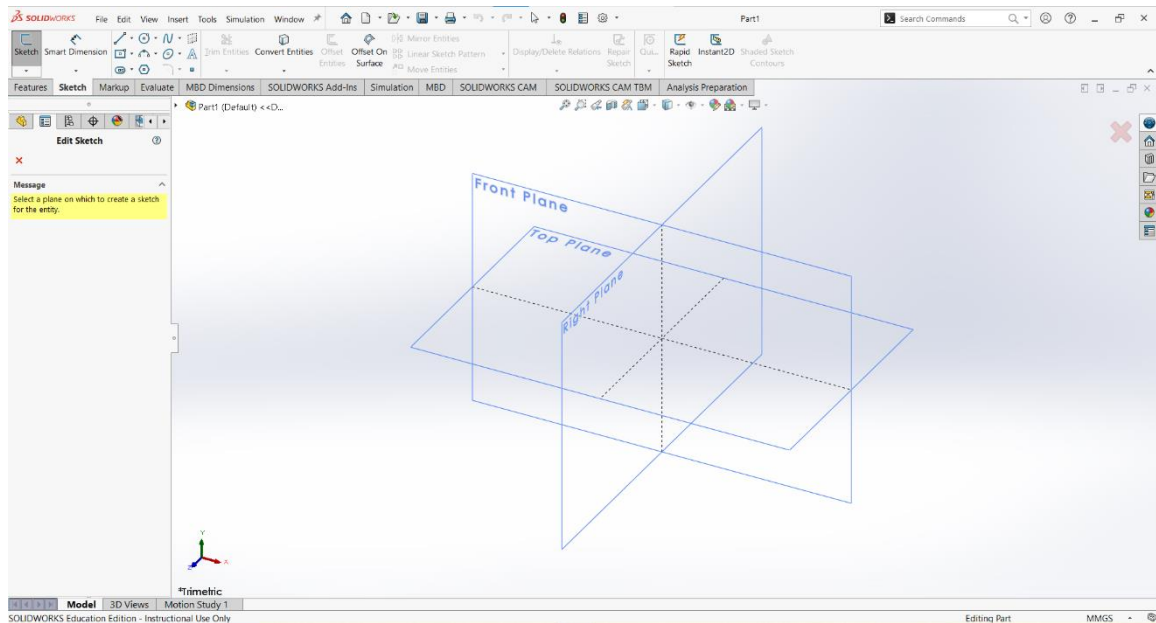
4.1.1 Το πρόγραμμα SOLIDWORKS

Για την σχεδίαση ενός αντικειμένου πριν φτάσει ο χρήστης στην διαδικασία της εκτύπωσης χρειάζεται να επιλέξει κάποιο πρόγραμμα CAD. Αυτό που επιλέχθηκε για την υλοποίηση αυτής της διπλωματικής είναι το SolidWorks. Είναι ένα πρόγραμμα όπου δίνονται στον χρήστη πολλαπλές δυνατότητες σχεδίασης σε επίπεδο όπου κάποιος δεν χρειάζεται να διαθέτει εμπειρία πάνω σε αυτό δηλαδή η εκμάθηση του είναι σχετικά εύκολη ενώ παράλληλα το χρησιμοποιούν και επαγγελματίες σε βιομηχανικό επίπεδο. Αρχικά, μόλις εγκαταστήσει ο χρήστης το πρόγραμμα στον υπολογιστή του και ξεκινήσει την εκκίνηση του θα του εμφανισθεί το παράθυρο του Σχήματος 4.1 και εκεί θα επιλέξει το εικονίδιο “Part” για να προβεί στην σελίδα σχεδίασης.

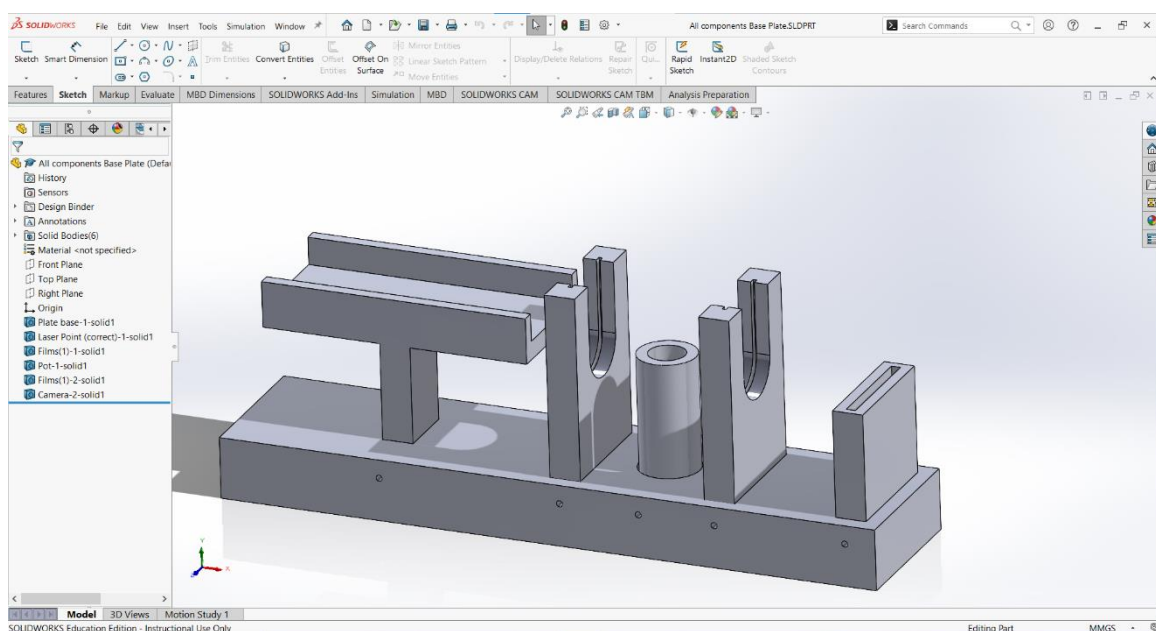


Σχήμα 4.1 (Πηγή: Στιγμιότυπο οθόνης συγγραφέα) : Αρχική οθόνη στο SolidWorks

Μόλις μεταφερθεί στην σελίδα σχεδίασης το πρώτο βήμα που πρέπει να κάνει είναι να επιλέξει σε ποια όψη επιθυμεί να σχεδιάσει. Τα εργαλεία που διαθέτει για την σχεδίαση ενός αντικειμένου είναι πάρα πολλά που κάποιος δεν μπορεί να τα αναλύσει γραπτώς. Εάν κάποιος χρήστης δυσκολεύεται στην εύρεση κάποιου από αυτά, υπάρχουν στο διαδίκτυο διάφορα βίντεο που θα τον διευκολύνουν αλλά υπάρχει και η δυνατότητα παρακολούθησης σεμιναρίων για να γίνει κάποιος καλύτερος στο πρόγραμμα.



Σχήμα 4.2 (Πηγή: Στιγμιότυπο οθόνης συγγραφέα) : Επιλογή επιπέδου σχεδίασης στο SolidWorks



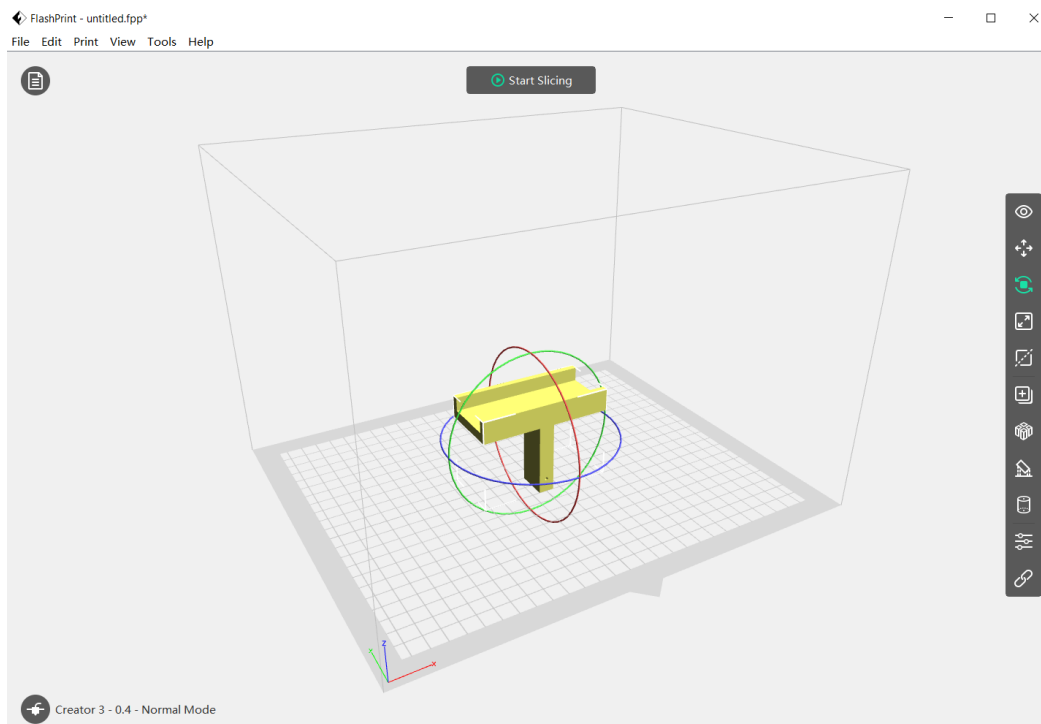
Σχήμα 4.3 (Πηγή: Στιγμιότυπο οθόνης συγγραφέα) : Τελική βάση μετά από σχεδίαση στο SolidWorks

4.2.1 Το πρόγραμμα FLASHPRINT

Παράλληλα, το πρόγραμμα τεμάχισης (slicing) που χρησιμοποιήθηκε είναι το FlashPrint. Ο λόγος που επιλέχθηκε αυτό το πρόγραμμα είναι επειδή είναι της ίδιας εταιρείας του εκτυπωτή της Flashforge και συστήνεται σε όλους τους χρήστες αυτού του εκτυπωτή η επιλογή του. Εάν ο χρήστης έχει τελειώσει με την σχεδίαση του αντικείμενου-μοντέλου και το έχει αποθηκεύσει σε αρχείο .stl (stereolithography), το μεταφέρει στο FlashPrint για να το επεξεργαστεί πριν την τελική εκτύπωση του. Μέσα σε αυτό το πρόγραμμα το ετοιμάζει για τεμάχιση (slicing) αλλά έχει και την δυνατότητα να ρυθμίσει τις παραμέτρους του εκτυπωτή. Μπορεί να ρυθμίσει την θερμοκρασία του extruder, την θερμοκρασία του τραπέζιού του εκτυπωτή, την ταχύτητα εκτύπωσης, το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί κ.α. Τέλος, μόλις έχει κάνει όλα τα προηγούμενα, συνδέει τον εκτυπωτή στο ίδιο δίκτυο με αυτό που είναι και ο υπολογιστής που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα και έτσι το πρόγραμμα είναι έτοιμο να ξεκινήσει την τεμάχιση (slicing) του μοντέλου και να δημιουργήσει τον G-κώδικα αυτόματα και να τον «περάσει» στον εκτυπωτή.

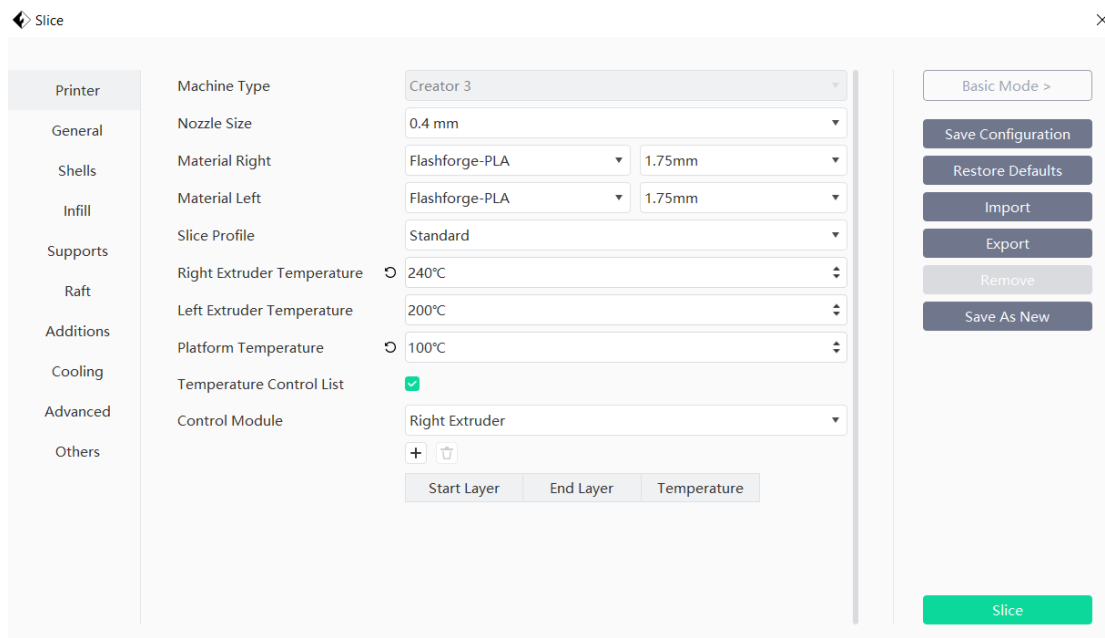
4.2.2 Διαδικασία προετοιμασίας μοντέλου και τελική εκτύπωση

Έχοντας εκκινήσει ο χρήστης το πρόγραμμα FlashPrint και βρίσκεται μέσα στο περιβάλλον του, επιλέγει επάνω αριστερά “File”> “Load File” και διαλέγει το αρχείο .stl που έχει ήδη αποθηκεύσει το αντικείμενο-μοντέλο του. Μόλις κάνει αυτά τα βήματα θα του εμφανισθεί το μοντέλο του στο πρόγραμμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4 και μετά θα πρέπει να πατήσει το κουμπί “Start Slicing” που βρίσκεται στο κέντρο της οθόνης



Σχήμα 4.4 (Πηγή: Στιγμιότυπο οθόνης συγγραφέα) : Το περιβάλλον του FlashPrint πριν την τεμάχιση (slicing) του μοντέλου)

Το συγκεκριμένο παράθυρο (Σχήμα 4.5) που θα εμφανισθεί στην συνέχεια είναι για την ρύθμιση όλων των παραμέτρων εκτύπωσης.

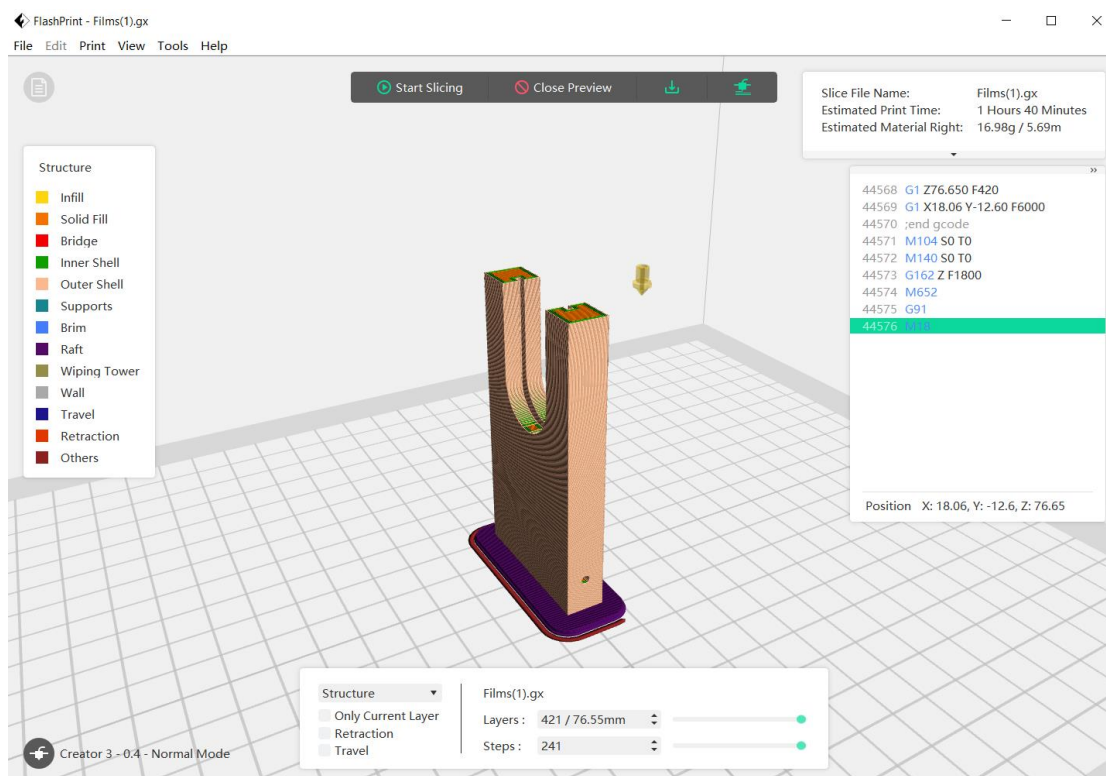


Σχήμα 4.5 (Πηγή: Στιγμιότυπο οθόνης του συγγραφέα) : Ρυθμίσεις παραμέτρων εκτύπωσης

Τις συγκεκριμένες ρυθμίσεις ο εκάστοτε χρήστης μπορεί να τις αλλάξει ανάλογα με τις ανάγκες εκτύπωσης και το τι επιθυμεί να κάνει. Επειδή όμως είναι αρκετές θα αναφερθούν μερικές από αυτές. Πρώτον, ο χρήστης υποχρεούται να επιλέξει ποιον από τους δύο extruder θέλει να χρησιμοποιήσει και με τι υλικό θα εκτυπώσει. Παράλληλα, μαζί με το υλικό εκτύπωσης μπορεί να ορίσει και τα χιλιοστά διαμέτρου της κεφαλής. Δεύτερον, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκτύπωσης του, του δίνεται η δυνατότητα να αλλάξει την θερμοκρασία του extruder αλλά και της βάσης του θαλάμου. Μπορεί επίσης να ρυθμίσει εάν χρειάζονται στηρίγματα (supports), σε τι ταχύτητα θα δουλεύουν οι ανεμιστήρες κ.α. Γενικώς υπάρχουν πολλές καρτέλες ρυθμίσεων που μπορεί να αλλάξει με βάση της ανάγκες του.

Εφόσον έχει ολοκληρώσει ότι ρυθμίσεις ήθελε μεταβαίνει στο επόμενο στάδιο που είναι το slicing. Του εμφανίζεται το παράθυρο του Σχήματος 4.4 που είχε και στην αρχή όταν άνοιξε το πρόγραμμα, με την αλλαγή ότι τώρα μπορεί να προβεί και σε άλλες επιλογές όπως Slice Preview, Save to Local και Send to Printer. Εκεί επιλέγει το Slice Preview για να μπορέσει να δει πως θα τεμαχιστεί το αντικείμενο-μοντέλο του με περισσότερη λεπτομέρεια. Κλείνοντας, για να μπορέσει το αντικείμενο-μοντέλο να σταλθεί στον εκτυπωτή, επιλέγει την επιλογή Send to Printer και εάν υπάρχει συνδεδεμένο το ίδιο δίκτυο μπορεί να ξεκινήσει η εκτύπωση.

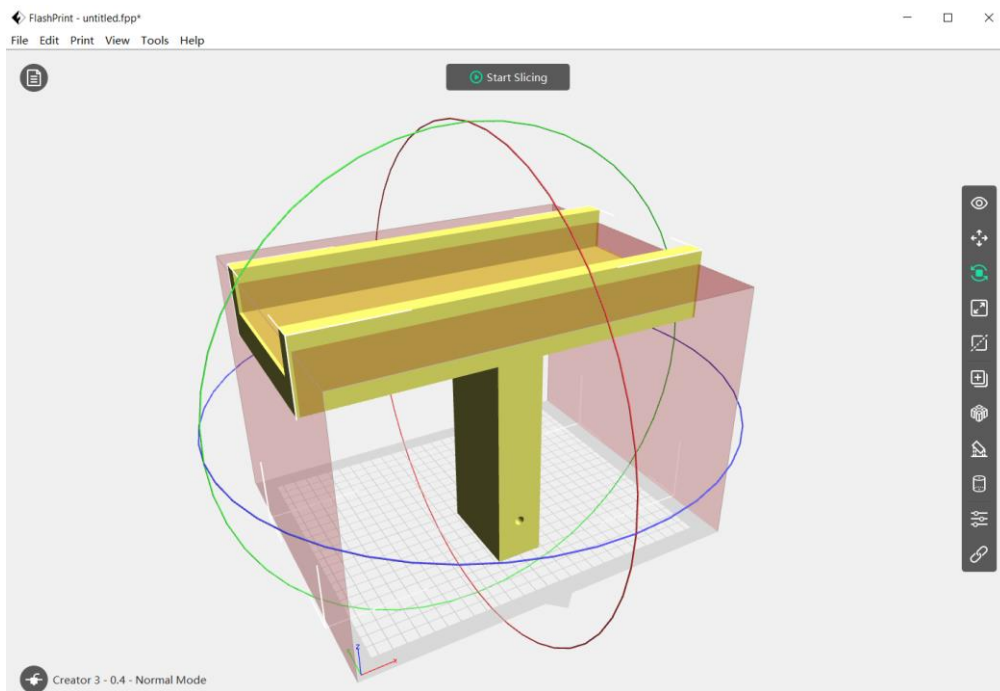
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4 ο χρήστης μετά το βήμα του τεμαχισμού, μπορεί να δει όλες τις λεπτομέρειες όπως είναι η διάρκεια της εκτύπωσης του μοντέλου, το πόσο ζυγίζει το μοντέλο, όλες τις στρώσεις (layers) και τι βήματα θα κάνει ο extruder για την εκτύπωση καθώς και όλο τον κώδικα του προγράμματος αναλυτικά.



Σχήμα 4.6 (Πηγή: Στιγμιότυπο οθόνης του συγγραφέα) : Slice Preview μαζί με τις πληροφορίες εκτύπωσης

4.3.1 Τοποθέτηση του μοντέλου επάνω στην βάση

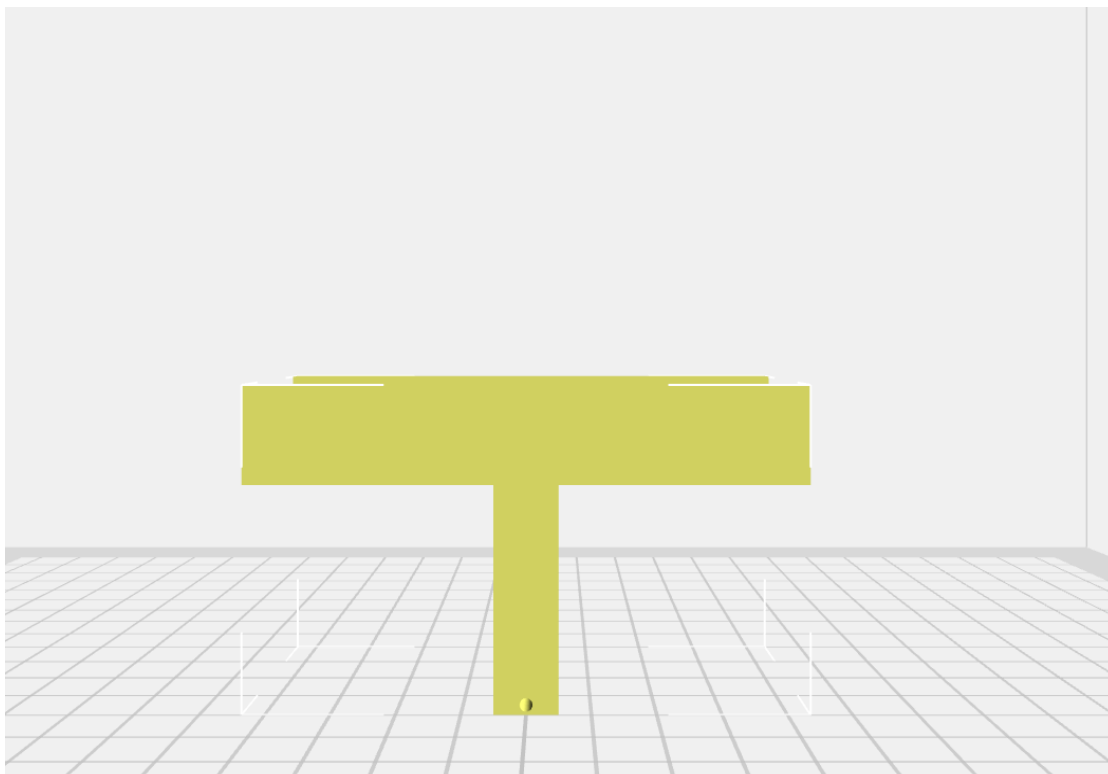
Στα δεξιά του προγράμματος υπάρχει μία μπάρα κάθετη όπου εκεί βλέπει και μπορεί να τοποθετήσει το μοντέλο επάνω στην βάση, τους X,Y,Z άξονες που υπάρχουν, να κάνει rotate το μοντέλο, να το κάνει upscale αν επιθυμεί αλλά και πολλές άλλες λειτουργίες. Όλα αυτά προϋποθέτουν ο χρήστης να μην ξεπερνάει τις γραμμές του πλέγματος που είναι τα όρια της βάσης του εκτυπωτή. Εάν συμβεί κάτι τέτοιο το πρόγραμμα προειδοποιεί με μήνυμα ERROR όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7.



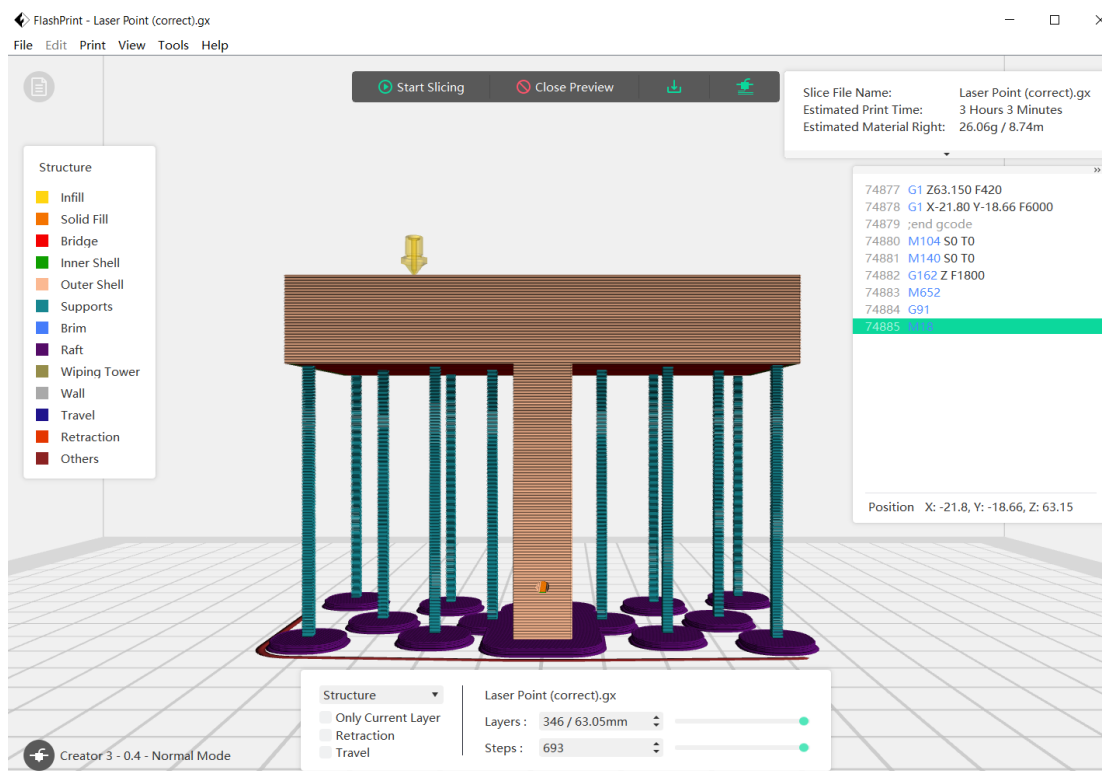
Σχήμα 4.7 (Πηγή: Στιγμιότυπο οθόνης συγγραφέα) : Αδυναμία τεμάχισης λόγω τοποθέτησης μοντέλου εκτός των ορίων του εκτυπωτή

4.3.2 Χρήση βοηθημάτων (supports)

Κάτι πολύ σημαντικό που προσφέρει το FlashPrint είναι η προσθήκη βοηθημάτων (supports). Είναι βοηθητικά στηρίγματα τα οποία διευκολύνουν ορισμένα μοντέλα με δύσκολες-πολύπλοκες δομές να εκτυπωθούν σωστά χωρίς προβλήματα πτώσης. Τοποθετούνται είτε αυτόματα από το ίδιο το πρόγραμμα σε σημεία που υπάρχει κίνδυνος είτε χειροκίνητα από τον ίδιο τον χρήστη. Για την χρησιμοποίηση αυτών πρέπει τα μοντέλα να έχουν κλίση μεγαλύτερη των 35 μοιρών μεταξύ με την βάση του εκτυπωτή.



Σχήμα 4.8 (Πηγή: Στιγμιότυπο οθόνης συγγραφέα) : Μοντέλο με πολύπλοκη δομή δίχως τοποθέτηση supports



Σχήμα 4.9 (Πηγή: Στιγμιότυπο οθόνης συγγραφέα) : Μοντέλο με πολύπλοκη δομή και με τοποθέτηση supports

Κεφάλαιο 5

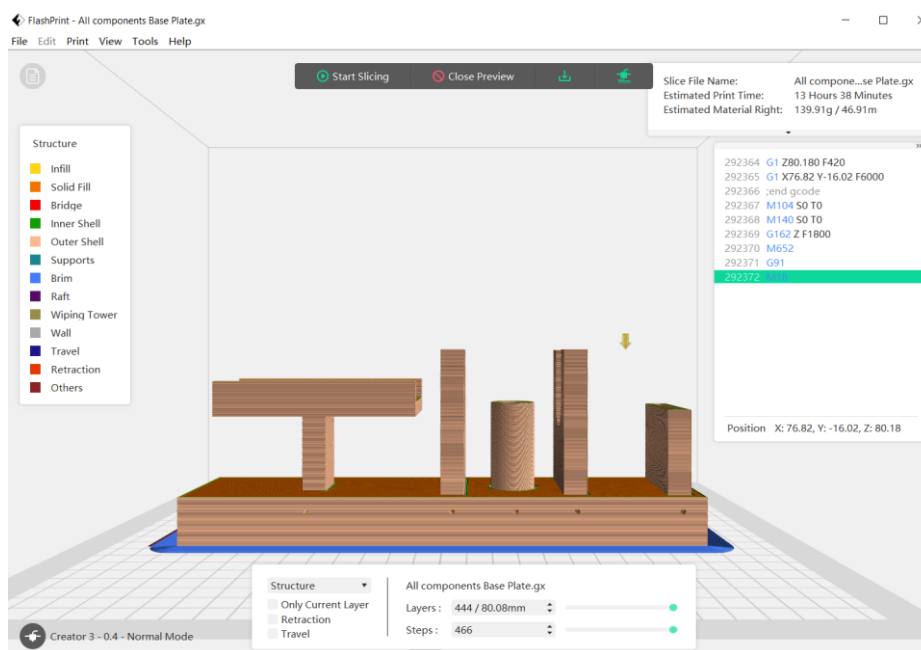
5.1 Πειραματική διαδικασία

Καθ' όλη την διάρκεια της διπλωματικής αυτής εργασίας πραγματοποιήθηκαν διάφορες εκτυπώσεις με σκοπό την εκμάθηση τόσο του εκτυπωτή όσο και όλης της διαδικασίας εκτύπωσης. Μόλις ολοκληρώθηκε η πρώτη φάση, ξεκίνησαν οι εκτυπώσεις μοντέλων τα οποία θα είναι λειτουργικά και θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πρακτικές εφαρμογές. Όλες οι εκτυπώσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο ηλεκτρονικής του Διεθνές Πανεπιστημίου Ελλάδος (ΔΙΠΑΕ) με την χρήση του FlashForge Creator 3. Το υλικό εκτύπωσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν το ABS σε κίτρινο χρώμα. Με βάση τα χαρακτηριστικά του υλικού αυτού αλλά και με το τι προτείνει ο κατασκευαστής, οι θερμοκρασίες του extruder κυμαίνονται από 220 °C έως 240 °C. Συγκεκριμένα, η θερμοκρασία που επιλέχτηκε ήταν 240 °C ενώ για την θερμοκρασία της πλατφόρμας εκτύπωσης 100-110 °C. Παρακάτω θα αναλυθούν τα πειράματα που υλοποιήθηκαν σε όλη την διάρκεια της διπλωματικής.

5.2 Κατασκευή κύριας βάσης και των εξαρτημάτων συναρμολόγησης

Ο στόχος αυτού του πειράματος ήταν η κατασκευή μίας κεντρικής βάσης με πέντε εσοχές στο Block της ώστε να στερεωθούν κάποια εξαρτήματα επάνω της για να υλοποιηθούν κάποιες μετρήσεις χρησιμοποιώντας τα φιλμ πόλωσης της έτσι ώστε να έχουμε καλύτερες φωτογραφίες ως αποτέλεσμα, στις οποίες θα φαίνεται πιο ξεκάθαρα η διάθλαση του φωτός που προκαλείται από τα σωματίδια.

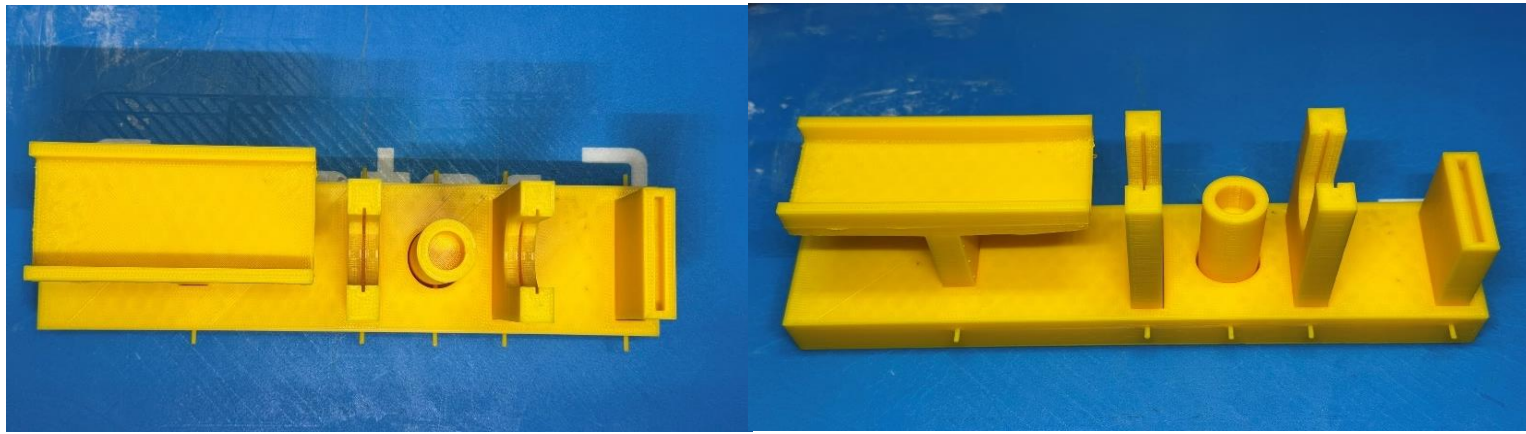
Η βάση που σχεδιάστηκε και εκτυπώθηκε χρησιμοποιήθηκε και ως υποστηρικτικό εξάρτημα για τη διπλωματική εργασία συνεργαζόμενης συμφοιτήτριας, η οποία αφορούσε την ανάπτυξη μίας συσκευής-αισθητήρα για την παρακολούθηση αιματολογικών δεικτών χωρίς τη λήψη φυσικού δείγματος. Η συσκευή βασίζεται στην λήψη στη λήψη φωτογραφιών και στην ανάλυση της σκέδασης φωτός μέσα από διαφανή δοχεία με δείγματα. Για την ακριβή και σταθερή τοποθέτηση αυτών των δοχείων απαιτείται μια αξιόπιστη μηχανική υποδομή, την οποία καλύπτει η δική μου βάση. Έτσι, η παρούσα κατασκευή συνέβαλε στη σωστή ευθυγράμμιση και στερέωση των δοχείων, εξασφαλίζοντας επαναληψιμότητα στις μετρήσεις και στα δεδομένα σκέδασης που απαιτούνταν για την ανάλυση[20].



Σχήμα 5.1 (Πηγή: Στιγμιότυπο οθόνης συγγραφέα) : Ολοκληρωμένο το μοντέλο με όλα τα εξαρτήματα στερέωσης

Αρχικά όλα τα εξαρτήματα καθώς και η βάση εκτυπώθηκαν ξεχωριστά, καθώς το καθένα παρουσιάζει διαφορετική γεωμετρία και μορφολογία. Η ταυτόχρονη εκτύπωση τους θα οδηγούσε σε ανομοιογενή ψύξη και παραμόρφωση λόγω διαφορών στην επιφάνεια επαφής, με αποτέλεσμα την αλλοίωση των διαστάσεων και τη μείωση την ακρίβειας των μετρήσεων. Στην εκτύπωση της βάσης παρατηρήθηκε μετά από κάποιες ώρες wrapping λόγω της μεγαλύτερης επιφάνειας, οπότε έγιναν κάποιες προσαρμογές όπως η αλλαγή από raft σε brim μεταξύ του bed και του μοντέλου αλλά και η απενεργοποίηση των ventilation fans για χρήση σταθερής θερμοκρασίας μέσα στον θάλαμο. Αντίθετα, τα ξεχωριστά εξαρτήματα εκτυπώθηκαν με τις τυπικές ρυθμίσεις.

Κατά την διαδικασία συναρμολόγησης όλου του μοντέλου παρατηρήθηκε ότι η ποιότητα εφαρμογής (fit) των εξαρτημάτων επάνω στην βάση επηρεάζεται σημαντικά από τις ανοχές που προκύπτουν λόγω της φύσης της εκτύπωσης με ABS, όπως η θερμική συρρίκνωση και η ανομοιομορφία διαστάσεων μεταξύ σχεδίου και πραγματικού αντικειμένου.



Σχήμα 5.2: (Πηγή: Φωτογραφίες συγγραφέα): Εκτύπωση ολόκληρης της βάσης και στερέωση εξαρτημάτων στις εσοχές της

Πιο συγκεκριμένα εφαρμόστηκε ανοχή 0.25 χιλιοστών μεταξύ των επιφανειών επαφής. Επιπλέον στο επάνω πρόσωπο κάθε εσοχής της βάσης δημιουργήθηκε και chamfer διαστάσεων 0.8 χιλιοστών υπό γωνία 45°, με σκοπό την διευκόλυνση της εισαγωγής του αντίστοιχου εξαρτήματος και την μείωση πιθανότητας φθοράς των ακμών κατά την συναρμολόγηση.

Παρά τις παραπάνω τροποποιήσεις κρίθηκε απαραίτητο να πραγματοποιηθεί και ένα δεύτερο πείραμα με σκοπό τον προσδιορισμό της κατάλληλης ανοχής μεταξύ εξαρτημάτων και ανοχών. Το πείραμα αυτό περιγράφεται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

5.3 Προσδιορισμός κατάλληλων ανοχών (Fit Test)

Επιλέχθηκαν τρεις βασικοί τύποι γεωμετρίας εσοχών (ορθογώνια, κυκλική, τριγωνική) καθώς αυτοί αντιπροσωπεύουν τις συνηθέστερες μορφές σύνδεσης. Για το κάθε σχήμα σχεδιάστηκαν και εκτυπώθηκαν 5 δοκίμια (Block) και 5 (Inserts) με διαφορετική ανοχή, με βήμα 0.2 χιλιοστά (0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8). Ο στόχος κάθε εκτύπωσης ήταν όχι μόνο να εξεταστεί η ποιότητα εφαρμογής των Inserts μέσα στην εκάστοτε εσοχή, αλλά και να διερευνηθεί η επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων. Έτσι αξιολογήθηκε η ικανότητα του εκτυπωτή να αναπαράγει με συνέπεια την ίδια διαστασιακή ακρίβεια σε διαδοχικές εκτυπώσεις, στοιχείο καθοριστικό για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων σχετικά με τις ιδανικές ανοχές συναρμογής.

Με τον τρόπο αυτό κατέστη δυνατή η πειραματική αντιστοίχιση μεταξύ της θεωρητικής ανοχής και της πραγματικής συμπεριφοράς κατά την συναρμολόγηση. Τα αποτελέσματα του πειράματος παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες και αποτυπώνουν τη μεταβολή της εφαρμογής συναρμογής σε συνάρτηση με το μέγεθος της ανοχής για κάθε γεωμετρία.

Gap total (mm)	Αποτέλεσμα (Fit)	Σχόλια
0	No Fit	Το insert δεν χωράει μέσα στο Block
0.2	Tight press-fit	Χρειάζεται μεγάλη πίεση και εάν το Block έχει υποστεί παραμόρφωση μπορεί να μην χωρέσει
0.4	Sung slip-fit	Κρατιέται σταθερά, αλλά εάν τα τοιχώματα του gap έχουν ribbing θα υπάρξει δυσκολία εισόδου
0.6	Easy slip-fit	Εφαρμόζει άνετα, ιδανικό για μονταριστό τεμάχιο
0.8	Loose fit	Κουνιέται μέσα στο Block, θα χρειαστεί κάποιο μέσο στερέωσης (βίδα, κόλλα)

Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα συναρμογής ορθογώνιων εσοχών για διαφορετικά gaps

Gap total (mm)	Αποτέλεσμα (Fit)	Σχόλια
0	No Fit	Το insert δεν χωράει μέσα στο Block
0.2	Tight press-fit	Χρειάζεται μεγάλη πίεση για να χωρέσει στο Block ή περιστροφή
0.4	Sung slip-fit	Κρατιέται μέσα σταθερά αλλά μπορεί να βγει κιόλας
0.6	Easy slip-fit	Είναι καλό για κινούμενα μέρη μπαίνει άνετα
0.8	Loose fit	Μπορεί να στραβώσει με φορτίο, θα χρειαστεί κάποιο μέσο στερέωσης (βίδα, κόλλα)

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα συναρμογής κυκλικών εσοχών για διαφορετικά gaps

Gap total (mm)	Αποτέλεσμα (Fit)	Σχόλια
0	No Fit	Το insert χωράει μέσα στο Block
0.2	Tight press-fit	Μπορεί να μπει αλλά οι γωνίες αποτελούν παρεμπόδιση για το insert
0.4	Sung slip-fit	Τα κοφτερά σημεία δηλαδή η κορυφές θα δημιουργήσουν πρόβλημα (binding)
0.6	Easy slip-fit	Μπαίνει εύκολα μέσα στο Block
0.8	Loose fit	Το insert παίζει μέσα στο Block δηλαδή περιστρέφεται, θα χρειαστεί κάποιο μέσο στερέωσης (βίδα, κόλλα)

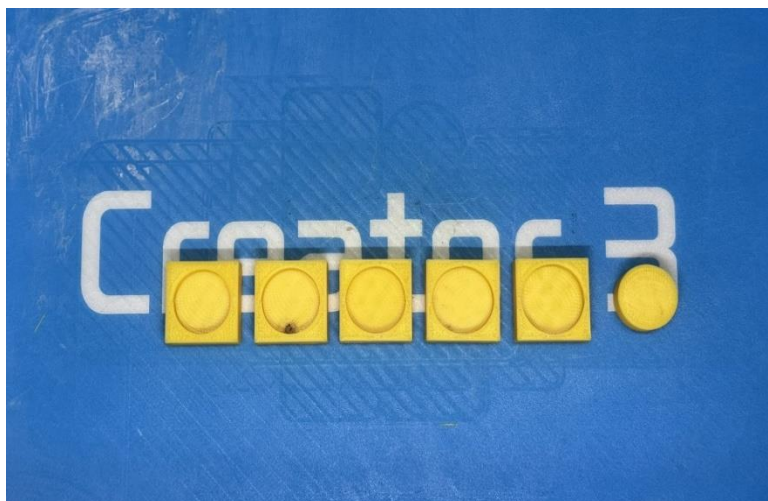
Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα συναρμογής τριγωνικών εσοχών για διαφορετικά gaps

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι οι βέλτιστες τιμές ανοχών για εκτυπώσεις ABS στον εκτυπωτή Flashforge κυμαίνονται μεταξύ 0.25-0.4 χιλιοστά για κυκλικές και ορθογώνιες εσοχές, ενώ για τριγωνικές απαιτείται ελαφρώς μεγαλύτερη ανοχή, 0.4-0.6 χιλιοστά λόγω των κορυφών που δημιουργούν τοπικές παρεμποδίσεις. Οι τιμές αυτές είναι ιδανικές για ομαλή συναρμολόγηση χωρίς υπερβολική δύναμη-τριβή ή χαλαρότητα.

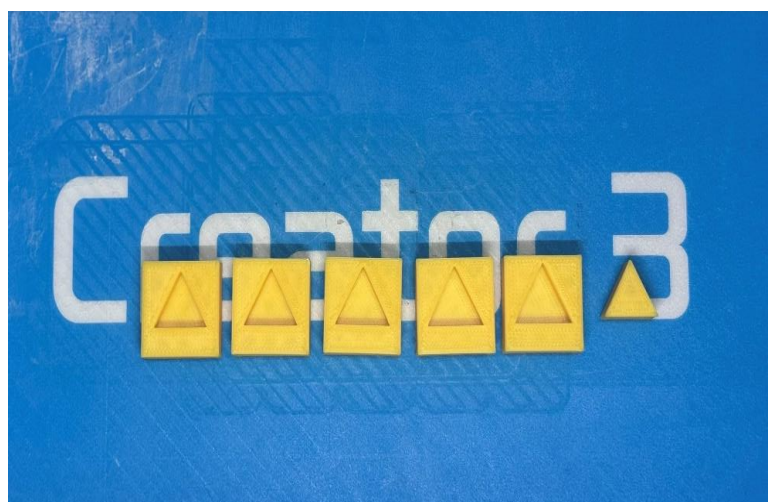
Στις παρακάτω φωτογραφίες παρουσιάζονται τα εκτυπωμένα δοκίμια για κάθε περίπτωση, με σκοπό την αποτίμηση των αποτελεσμάτων που παρατέθηκαν στους προηγούμενους πίνακες. Η διάταξη των δειγμάτων, από αριστερά προς τα δεξιά αντιστοιχεί σε αύξουσα τιμή ανοχής (0.0-0.8 mm), ενώ το κοινό insert τοποθετείται δίπλα για λόγους σύγκρισης.



Σχήμα 5.3: (Πηγή: Φωτογραφίες συγγραφέα): Εκτύπωση δοκιμαστικών Blocks με ορθογώνια εσοχή 0.0-0.8 και κοινό insert για έλεγχο ανοχών



Σχήμα 5.4: (Πηγή: Φωτογραφίες συγγραφέα): Εκτύπωση δοκιμαστικών Blocks με κυκλική εσοχή 0.0-0.8 και κοινό insert για έλεγχο ανοχών



Σχήμα 5.5: (Πηγή: Φωτογραφίες συγγραφέα): Εκτύπωση δοκιμαστικών Blocks με τριγωνική εσοχή 0.0-0.8 και κοινό insert για έλεγχο ανοχών

Κεφάλαιο 6

6.1 Συμπεράσματα και προτάσεις

Η τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί κρίσιμο εργαλείο για την σύγχρονη βιομηχανία και την ανάπτυξη καινοτομιών σε πολλούς τομείς. Επιτρέπει τη δημιουργία σύνθετων γεωμετριών που είναι δύσκολο ή αδύνατο να παραχθούν με παραδοσιακές μεθόδους, μειώνει τον χρόνο παραγωγής και τα απορρίμματα υλικού, ενώ προσφέρει σημαντική ευελιξία στον σχεδιασμό και την προσαρμογή προϊόντων.

Κατά την υλοποίηση της διπλωματικής αυτής εργασίας, τα πειράματα απέδειξαν ότι ο εκτυπωτής κατάφερε να υλοποιήσει με ακρίβεια και επιτυχία όλες τις εκτυπώσεις, ανταποκρινόμενος σωστά στις παραμετροποιήσεις και στις ρυθμίσεις που εφαρμόστηκαν για κάθε περίπτωση, παρά το γεγονός ότι τα μοντέλα ήταν απαιτητικά και δοκίμασαν τα όρια της τεχνολογίας του. Συνολικά η διαδικασία έδειξε επίσης ότι η συστηματική παραμετροποίηση και ο έλεγχος των παραμέτρων εκτύπωσης είναι κρίσιμα για την αξιοπιστία και την επαναληψιμότητα των εκτυπωμένων εξαρτημάτων, επιβεβαιώνοντας την σημασία του συνδυασμού σχεδιασμού, υλικού και τεχνολογίας για λειτουργικά αποτελέσματα.

Κλείνοντας, προτείνεται η διερεύνηση της χρήσης πιο εύκολων και ευέλικτων υλικών αντί του ABS, τα οποία μπορούν να προσφέρουν διαφορετικά χαρακτηριστικά εκτύπωσης και μεγαλύτερη άνεση στην διαδικασία παραγωγής. Επιπλέον, η αξιοποίηση και των δύο κεφαλών (extruders) του εκτυπωτή για ταυτόχρονη εκτύπωση, όπου μία κεφαλή χρησιμοποιείται για υλικό υποστήριξης (support), μπορεί να επιταχύνει την διαδικασία, να μειώσει την ανάγκη για μεταγενέστερο καθάρισμα και να επιτρέψει την εκτύπωση πιο σύνθετων γεωμετριών με μεγαλύτερη αξιοπιστία. Αυτές οι βελτιώσεις θα διευρύνουν τις δυνατότητες εφαρμογής της 3D εκτύπωσης και θα ενισχύσουν την παραγωγικότητα και την ποιότητα των μοντέλων.

Βιβλιογραφία

- [1] G. Liu *et al.*, “Additive manufacturing of structural materials,” Jul. 01, 2021, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.mser.2020.100596.
- [2] Y. Hu, “Recent progress in field-assisted additive manufacturing: Materials, methodologies, and applications,” Mar. 01, 2021, *Royal Society of Chemistry.* doi: 10.1039/d0mh01322f.
- [3] C. M. Watson and G. R. Francis, “Three dimensional printing as an effective method of producing anatomically accurate models for studies in thermal ecology,” *J Therm Biol*, vol. 51, pp. 42–46, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.jtherbio.2015.03.004.
- [4] R. Seede *et al.*, “An ultra-high strength martensitic steel fabricated using selective laser melting additive manufacturing: Densification, microstructure, and mechanical properties,” *Acta Mater*, vol. 186, pp. 199–214, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.actamat.2019.12.037.
- [5] J. E. Behm, B. R. Waite, S. T. Hsieh, and M. R. Helmus, “Benefits and limitations of three-dimensional printing technology for ecological research,” *BMC Ecol*, vol. 18, no. 1, p. 32, Sep. 2018, doi: 10.1186/s12898-018-0190-z.
- [6] Q. Zhao, C. Gao, Y. Zhang, and Y. Zhang, “Advances and application potential in the research of silicate mineral-based 3D printing materials,” Jun. 01, 2025, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.pmatsci.2025.101450.
- [7] E. MacDonald and R. Wicker, “Multiprocess 3D printing for increasing component functionality,” Sep. 30, 2016, *American Association for the Advancement of Science.* doi: 10.1126/science.aaf2093.
- [8] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, “Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges,” Jun. 15, 2018, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
- [9] V. J. Kharat *et al.*, “Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges,” *Mater Today Proc*, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.11.033.
- [10] A. Al Rashid, S. A. Khan, S. G. Al-Ghamdi, and M. Koç, “Additive manufacturing: Technology, applications, markets, and opportunities for the built environment,” Oct. 01, 2020, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.autcon.2020.103268.
- [11] R. Ranjan, D. Kumar, M. Kundu, and S. Chandra Moi, “A critical review on Classification of materials used in 3D printing process,” in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, Jan. 2022, pp. 43–49. doi: 10.1016/j.matpr.2022.03.308.
- [12] M. Memiş and D. A. Gök, “Development of Fe-reinforced PLA-based composite filament for 3D printing: Process parameters, mechanical and microstructural characterization,” *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 16, no. 2, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.asej.2025.103279.

- [13] M. Moradi, R. Beygi, N. Mohd. Yusof, A. Amiri, L. F. M. da Silva, and S. Sharif, “3D Printing of Acrylonitrile Butadiene Styrene by Fused Deposition Modeling: Artificial Neural Network and Response Surface Method Analyses,” *J Mater Eng Perform*, vol. 32, no. 4, pp. 2016–2028, Feb. 2023, doi: 10.1007/s11665-022-07250-0.
- [14] S. L. Rodríguez-Reyna, C. Mata, J. H. Díaz-Aguilera, H. R. Acevedo-Parra, and F. Tapia, “Mechanical properties optimization for PLA, ABS and Nylon + CF manufactured by 3D FDM printing,” *Mater Today Commun*, vol. 33, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.mtcomm.2022.104774.
- [15] E. Balla *et al.*, “Poly(lactic acid): A versatile biobased polymer for the future with multifunctional properties-from monomer synthesis, polymerization techniques and molecular weight increase to PLA applications,” Jun. 01, 2021, *MDPI AG*. doi: 10.3390/polym13111822.
- [16] E. H. Tümer and H. Y. Erbil, “Extrusion-based 3d printing applications of pla composites: A review,” Apr. 01, 2021, *MDPI AG*. doi: 10.3390/coatings11040390.
- [17] T. Mikolajczyk, T. Malinowski, L. Moldovan, H. Fuwen, T. Paczkowski, and I. Ciobanu, “CAD CAM System for Manufacturing Innovative Hybrid Design Using 3D Printing,” in *Procedia Manufacturing*, Elsevier B.V., 2019, pp. 22–28. doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.178.
- [18] P. Wu, K. S. Ramani, and C. E. Okwudire, “Accurate linear and nonlinear model-based feedforward deposition control for material extrusion additive manufacturing,” *Addit Manuf*, vol. 48, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.102389.
- [19] P. Wu, C. Qian, and C. E. Okwudire, “Design, modeling and feedforward control of a hybrid extruder for material extrusion additive manufacturing,” *Addit Manuf*, vol. 92, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.addma.2024.104378.
- [20] Κ. Γ. Ελένη, “Μετρήσεις Σκέδασης με Κάμερα για Φορητούς Οπτικούς Βιοϊατρικούς Αισθητήρες Scattering Measurements Using Cameras for Portable Biomedical Sensors.”