



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΚΑΜΨΗΣ ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΑ  
ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΚΟΤΣΑΝΑΣ ΜΑΡΙΟΣ (Α.Μ. 45881)**

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ: ΣΑΓΙΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ  
ΓΙΑΝΝΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**

**ΑΘΗΝΑ 2020**

## Συνομογραφίες

RP	Ταχεία Πρωτοτυποποίηση
CAD	Σχεδίαση με τη βοήθεια υπολογιστή
CAM	Κατασκευή με τη βοήθεια υπολογιστή
CNC	Μηχανή αριθμητικού ελέγχου μέσω υπολογιστή
AM	Τεχνολογία Προσθετικής Κατασκευής
SLA	Στερεολιθογραφία
FDM	Μοντελοποίηση Συντηκόμενης Εναπόθεσης
LOM	Ελασματοποιημένη Κατασκευή Αντικειμένων
DED	Τεχνολογίες Άμεσης Ενεργειακής Τοποθέτησης
LENS	Μηχανική Ελασματοποίηση χωρίς Διαμόρφωση
EBM	Τεχνολογία Τήξης με χρήση Ακτίνας Ηλεκτρονίου
3DP	Τεχνολογία Τρισδιάστατης Εκτύπωσης
SLS	Επιλεκτική Πυροσυσσωμάτωση με Λέιζερ
ASTM	Αμερικανικός Σύλλογος Ελέγχου και Υλικών
AMSC	Οργανισμός Συνεργατικής Τυποποίησης των Τεχνολογιών AM
ISO	Διεθνής Οργανισμός Πιστοποίησης
ASME	Αμερικανική Εταιρεία Μηχανολόγων Μηχανικών
AWS	Αμερικανική Εταιρεία Συγκόλλησης
FFF	Κατασκευή Ελεύθερης Μορφής / Κατασκευή με Σύντηξη Νήματος
DDM	Άμεση Ψηφιακή Κατασκευή
NIST	Εθνικό Ινστιτούτο Πιστοποιήσεων και Τεχνολογίας
DMLS	Τεχνολογία Άμεσης Σύντηξης Μετάλλου με χρήση Λέιζερ
CMB	Μηχανή Ελεγχόμενων Μεταλλικών Κατασκευών
MIM	Διεργασία Μορφοποίησης με Έγχυση Μετάλλου

- DMD Συστήματα Άμεσης Απόθεσης Μετάλλων
- SLM Μέθοδος Επιλεκτικής Τήξης με χρήση Λέιζερ
- PBF Σύντηξη Σκόνης σε Κλίνη
- LENS Καθαρή Μηχανική Μορφοποίηση με χρήση Λέιζερ
- FEM Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων
- FEA Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων
- FAA Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας των ΗΠΑ
- AFRL Εργαστήριο Έρευνας Πολεμικής Αεροπορίας
- GD&T Γεωμετρικές διαστάσεις και ανοχές
- Q&C Ποιότητα και Πιστοποίηση
- R&D Έρευνα και Ανάπτυξη
- NDI Μέθοδος μη Καταστροφικών Επιθεωρήσεων
- PM Σκόνη για Μεταλλουργικές Διεργασίες
- IMTS Διεθνή Παρουσίαση Κατασκευαστικής Τεχνολογίας
- SEM Μικροσκόπιο Σάρωσης Ηλεκτρονίου
- RPI Εταιρία Rapid Product Innovations
- POM Εταιρία Precision Optical Manufacturing
- LPF Διαμόρφωση Σκόνης με χρήση Λέιζερ
- LC Σταθεροποίηση με χρήση Λέιζερ
- EBDM Άμεση Κατασκευή με χρήση Ακτίνας Ηλεκτρονίου
- DPM Ψηφιακή Υλοποίηση Μερών
- PTA-SFFF Μεταφορά Τόξου Πλάσματος με Επιλεκτική Κατασκευή Ελεύθερης Μορφής
- IFF Διαμόρφωση με Σύντηξη Ιόντων
- UAM Προσθετική Κατασκευή με Υπερήχους
- SMD Εναπόθεση Σχηματιζόμενου Μετάλλου
- GTAW Συγκόλληση Τόξου Αερίου Βολφραμίου
- HW-GTAW Συγκόλληση Τόξου Αερίου Βολφραμίου με Ζεστό Σύρμα

MMC	Σύνθετα Μεταλλικά Πλέγματα
Ra	Μονάδα Μέτρηση Σκληρότητας Επιφάνειας (surface roughness)
EBAM	Προσθετική Κατασκευή με χρήση Ακτίνας Ηλεκτρονίου
VHP-UAM	Πολύ Υψηλής Ενέργειας Προσθετική Κατασκευή με Υπερήχους
DMP	Άμεση Εκτύπωση Μετάλλων
SBIR	Έρευνα για Καινοτομίες Μικρών Επιχειρήσεων
LCF	Χαμηλός Κύκλος Ρωγμών
HCF	Υψηλός Κύκλος Ρωγμών
FM	Μηχανισμοί Κόπωσης
ICME	Οργανισμός Ολοκληρωμένης Υπολογιστικής Μηχανικής Υλικών
NDT	Μη Καταστροφικές Δοκιμές
LEAP	Προωθητική Τεχνολογία Αιχμής της Αεροπορίας
NDT	Μη Καταστροφικές Δοκιμές
LOF	Έλλειψη Σύντηξης
MET	Οπτική Μετρολογία
PCRT	Δοκιμή Αντιστάθμισης Συντονισμού της Μεθόδου
PT	Δοκιμή Διείσδυσης
RT	Δοκιμή Ακτινογραφίας
UT	Υπερηχητική Δοκιμή
CT	Υπολογιστική Τομογραφία
CMM	Μηχανή Μέτρησης Συντονισμού
EMF	Ηλεκτρομαγνητική Συχνότητα
CIFS	Κρίσιμα Αρχικά Μεγέθη Ελαττωμάτων
NNSA	Τμήμα Διοίκησης Εθνικής Ενεργειακής Πυρηνικής Ασφάλειας
CFD	Υπολογιστική Ρευστότητα
ICME	Ενσωματωμένα Εργαλεία Υπολογιστικής Μηχανικής των Υλικών
NSF	Εθνικό Επιστημονικό Ίδρυμα

- GA Ψεκασμός Αερίου
- RA Περιστροφικός Ψεκασμός
- PREP Διαδικασία Περιστροφής Ηλεκτροδίων Πλάσματος
- PA Ψεκασμός Πλάσματος
- SEM Μικροσκόπιο Ηλεκτρονικής Σάρωσης

## Πίνακες και εικόνες

Εικόνα 1.1: Darwin, ο πρώτος RepRap εκτυπωτής Darwin.

Εικόνα 1.2: Κάμψη τριών σημείων.

Εικόνα 1.3: Διαδικασία εκτόξευσης συνδετικού υλικού

Εικόνα 1.4: Διαδικασία προσθετικής κατεργασίας με φωτοπολυμερισμό σε δεξαμενές

Εικόνα 1.5: Διαδικασία προσθετικής κατεργασίας με πίεση ακροφυσίου.

Εικόνα 1.6: Διαδικασία προσθετικής κατεργασίας με σύντηξη στρώματος σκόνης.

Εικόνα 1.7: Διαδικασία προσθετικής κατεργασίας με εξώθηση υλικών.

Εικόνα 1.8: Διαδικασία προσθετικής κατεργασίας με κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας.

Εικόνα 1.9: Διαδικασία προσθετικής κατεργασίας με συγκόλληση φύλλων.

Εικόνα 2.1: το δοκίμιο στο πρόγραμμα Inventor της Autodesk

Πίνακας 1: Taguchi ορθογωνικής συστοιχίας L9

Εικόνα 2.2: Κοινά εσωτερικά γεμίσματα τρισδιάστατης εκτύπωσης

Εικόνα 2.3: ο τρόπος εκτύπωσης των δοκιμίων

Πίνακας 2: επιλογή δοκιμίων

Εικόνα 2.4: τρόπος εκτύπωσης δοκιμίου 1

Εικόνα 2.5: θερμοκρασία και ταχύτητα δοκιμίου 1

Εικόνα 2.6: εσωτερικό μοτίβο δοκιμίου 1

Εικόνα 2.7: Αποτέλεσμα FlashPrint με χρόνο και μέτρα υλικού δοκιμίου 1

Εικόνα 2.8: τρόπος εκτύπωσης δοκιμίου 2

Εικόνα 2.9: θερμοκρασία και ταχύτητα δοκιμίου 2

Εικόνα 2.10: εσωτερικό μοτίβο δοκιμίου 2

Εικόνα 2.11: Αποτέλεσμα FlashPrint με χρόνο και μέτρα υλικού δοκιμίου 2

Εικόνα 2.12: τρόπος εκτύπωσης δοκιμίου 3

Εικόνα 2.13: θερμοκρασία και ταχύτητα δοκιμίου 3

Εικόνα 2.14: εσωτερικό μοτίβο δοκιμίου 3

Εικόνα 2.15: Αποτέλεσμα FlashPrint με χρόνο και μέτρα υλικού δοκιμίου 3

Εικόνα 2.16: τρόπος εκτύπωσης δοκιμίου 4

Εικόνα 2.17: θερμοκρασία και ταχύτητα δοκιμίου 4

Εικόνα 2.18: εσωτερικό μοτίβο δοκιμίου 4

Εικόνα 2.19: Αποτέλεσμα FlashPrint με χρόνο και μέτρα υλικού δοκιμίου 4

Εικόνα 2.20: τρόπος εκτύπωσης δοκιμίου 5

Εικόνα 2.21: θερμοκρασία και ταχύτητα δοκιμίου 5

Εικόνα 2.22: εσωτερικό μοτίβο δοκιμίου 5

Εικόνα 2.23: Αποτέλεσμα FlashPrint με χρόνο και μέτρα υλικού δοκιμίου 5

Εικόνα 2.24: τρόπος εκτύπωσης δοκιμίου 6

Εικόνα 2.25: θερμοκρασία και ταχύτητα δοκιμίου 6

Εικόνα 2.26: εσωτερικό μοτίβο δοκιμίου 6

Εικόνα 2.27: Αποτέλεσμα FlashPrint με χρόνο και μέτρα υλικού δοκιμίου 6

Εικόνα 2.28: τρόπος εκτύπωσης δοκιμίου 7

Εικόνα 2.29: θερμοκρασία και ταχύτητα δοκιμίου 7

Εικόνα 2.30: εσωτερικό μοτίβο δοκιμίου 7

Εικόνα 2.31: Αποτέλεσμα FlashPrint με χρόνο και μέτρα υλικού δοκιμίου 7

Εικόνα 2.32: τρόπος εκτύπωσης δοκιμίου 8

Εικόνα 2.33: θερμοκρασία και ταχύτητα δοκιμίου 8

Εικόνα 2.34: εσωτερικό μοτίβο δοκιμίου 8

Εικόνα 2.35: Αποτέλεσμα FlashPrint με χρόνο και μέτρα υλικού δοκιμίου 8

Εικόνα 2.36: τρόπος εκτύπωσης δοκιμίου 9

Εικόνα 2.37: θερμοκρασία και ταχύτητα δοκιμίου 9

Εικόνα 2.38: εσωτερικό μοτίβο δοκιμίου 9

Εικόνα 2.39: Αποτέλεσμα FlashPrint με χρόνο και μέτρα υλικού δοκιμίου 9

Εικόνα 2.40: Κατά την διαδικασία εκτύπωσης μέσω του FlashForge Creator 3

Εικόνα 2.41: Οι ενδείξεις και τα χαρακτηριστικά εκτύπωσης μέσω της οθόνης του FlashForge Creator 3

Πίνακας 3: Αποτελέσματα υπολογισμών

Εικόνα 3.1: Αποτελέσματα του προγράμματος στατιστικής ανάλυσης για την αντοχή.

Εικόνα 3.2: Αποτελέσματα του προγράμματος στατιστικής ανάλυσης για το βέλος κάμψης

Εικόνα 3.3: Αποτελέσματα του προγράμματος στατιστικής ανάλυσης για το μέτρο ελαστικότητας.



## Περιεχόμενα

Εισαγωγή.....	11
Ιστορική αναδρομή.....	12
Θεωρητικό υπόβαθρο .....	16
Προσθετική κατασκευή .....	16
Η γεωμετρία της προσθετικής κατασκευής.....	18
Σχεδιασμός του πειράματος.....	19
Κάμψη.....	21
Γενικά η διεργασία της AM.....	22
Υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης .....	25
Γενικά.....	25
PLA .....	25
ABS .....	25
HIPS .....	26
PVA.....	26
Από ξύλο .....	27
Από νάυλον .....	27
PETG .....	27
Τεχνολογίες προσθετικής κατεργασίας.....	28
Γενικά.....	28
Συνδεδετική με πίεση ακροφυσίου (Binder Jetting).....	29
Φωτοπολυμερισμό σε δεξαμενές (Vat Photopolymerisation).....	30
Υλικά με πίεση ακροφυσίου (Material Jetting) .....	31
Νανοσωματίδια με Πίεση Ακροφυσίου (NanoParticle Jetting - NPJ).....	32
Σύντηξη στρώματος σκόνης (Powder Bed Fusion) .....	32
Επιλεκτική Σύντηξη με την Χρήση Ακτίνων Λείζερ (Selective Laser Sintering – SLS).....	33
Λιώσιμο με Δέσμη Ηλεκτρονίων (Electron Beam Melting – EBM).....	35
Εξώθηση υλικών (Material Extrusion) .....	36
Μοντελοποίηση Εναπόθεσης Τηγμένου Υλικού (Fused Deposition Modeling - FDM), Κατασκευή Τηγμένου Νήματος (Fused Filament Fabrication - FFF) και Κατασκευή Σύνθετου Νήματος (Composite Filament Fabrication - CFF). .....	37
Robocasting ή Κατευθυνόμενη Γραφή Μελανιού (Direct Ink Writing -DIW), Βιοεξώθηση (Bioextrusion).38	

Κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας (Directed Energy Deposition).....	39
Απόθεση Μετάλλου Βασισμένη σε Λείζερ (Laser- Based Metal Deposition - LBMD).....	40
Απόθεση Μετάλλου Βασισμένη σε Δέσμη Ηλεκτρονίων (Electron Beam Based Metal Deposition).	41
Συγκόλληση φύλλων (Sheet Lamination) .....	42
Συγκόλληση ή Κόλληση (Gluing or Adhesive Bonding). .....	43
Παραγωγή Αντικειμένων με Συγκόλληση (Laminated Object Manufacturing – LOM). .....	43
Επιλεκτική Συγκόλληση Εναπόθεσης (Selective Deposition Lamination – SDL). .....	44
Πειραματικό μέρος .....	45
Σκοπός.....	45
Διαδικασία πειράματος .....	46
Συζήτηση αποτελεσμάτων.....	84
Αναφορές.....	87

## Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία σκοπός είναι η ανάλυση των μηχανικών ιδιοτήτων πολυμερών δοκιμίων, τα οποία υποβλήθηκαν σε τάση κάμψης μεταβάλλοντας ορισμένες τιμές παραμέτρων κατά τη διαδικασία κατασκευής τους. Η δημιουργία των δοκιμίων στηρίχθηκε στην τρισδιάστατη εκτύπωση τεχνολογίας FDM (Fused Deposition Modeling). Η τεχνολογία FDM βασίζεται στην τήξη και την επιλεκτική εναπόθεση μιας λεπτής ίνας θερμοπλαστικού για τον σχηματισμό αλληπάληλων στρώσεων οι οποίες και θα δημιουργήσουν το τελικό αντικείμενο.

Ο σχεδιασμός του πειράματος (DOE) έγινε σύμφωνα με την ορθογωνική συστοιχία Taguchi. Τα δοκίμια φτιάχτηκαν βάσει τεσσάρων παραγόντων (θερμοκρασία εξωθητή, ταχύτητα εκτύπωσης, μοτίβο γεμίσματος, τρόπος εκτύπωσης). Πρωταρχικός στόχος της εργασίας αυτής είναι η επιλογή του δοκιμίου με τις βέλτιστες μηχανικές ιδιότητες καθώς και την ελάχιστη χρήση υλικού. Για τον εντοπισμό του καλύτερου συνδυασμού παραμέτρων και την εύρεση του δοκιμίου με τις βέλτιστες μηχανικές ιδιότητες χρειάστηκαν συνολικά 81 πειράματα και συγκεκριμένα από 9 δοκίμια με 4 διαφορετικές παραμέτρους και από 3 τιμές η κάθε παράμετρος  $3^4 = 81$ .

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων έγινε με χρήση προγράμματος στατιστικής ανάλυσης και το δοκίμιο που επιλέχθηκε ως βέλτιστο είχε τη μέγιστη παραμόρφωση και τη μέγιστη αντοχή σε κάμψη τριών σημείων. Τέλος, από την ανάλυση δεδομένων ήταν φανερό πως κάθε παράμετρος επηρεάζει σε διαφορετικό βαθμό τις μηχανικές ιδιότητες.

## Ιστορική αναδρομή

Το 1981 μπορεί να θεωρεί ως η πρώτη φορά που κάποιος ανέφερε κάτι σχετικό με την ταχεία πρωτοτυποποίηση (Rapid Prototyping – RP) γνωστή ως σήμερα με την ονομασία προσθετική μορφοποίηση (Additive Manufacturing - AM) και στο ευρύ κοινό ως τρισδιάστατη εκτύπωση (3D Printing – 3DP), συγκεκριμένα ο Hideo Kodama του Δημοτικού Ινστιτούτου Βιομηχανικής Έρευνας της Nagoya δημοσίευσε ένα λειτουργικό σύστημα ταχείας πρωτοτυποποίησης χρησιμοποιώντας φωτοπολυμερή. Ένα συμπαγές, τυπωμένο μοντέλο δημιουργήθηκε από στρώματα, το καθένα από τα οποία αντιστοιχούσε σε μια εγκάρσια τομή στο μοντέλο.

Τρία χρόνια αργότερα, το 1984, ο Charles Hull, συνιδρυτής της εταιρείας 3D Systems, πραγματοποίησε την αρχή της τρισδιάστατης εκτύπωσης όπως την ξέρουμε σήμερα, μιας και είναι μια από τις πιο συνηθισμένες τεχνικές εκτύπωσης, επινοώντας τη στερεολιθογραφία. Η στερεολιθογραφία επιτρέπει στους σχεδιαστές να δημιουργήσουν τρισδιάστατα μοντέλα χρησιμοποιώντας ψηφιακά δεδομένα, τα οποία στη συνέχεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δημιουργήσουν ένα απτό αντικείμενο, μία από τις πιο συνηθισμένες τεχνικές εκτύπωσης 3D σήμερα.

Η μαγεία στη στερεολιθογραφία βρίσκεται στο φωτοπολυμερές το οποίο είναι ένα είδος ακρυλικού υλικού. Χτυπώντας το σε μία δεξαμενή υγρού με μια ακτίνα λέιζερ υπεριωδών ακτίνων, το εκτεθειμένο στο φως τμήμα θα μετατραπεί αμέσως σε στερεό κομμάτι πλαστικού, διαμορφωμένο στο επιθυμητό σχήμα τρισδιάστατου μοντέλου (3D). Αυτή η νέα τεχνολογία ήταν μεγάλη είδηση για τους εφευρέτες, οι οποίοι θα μπορούσαν τώρα να έχουν πολύ εύκολα στη διάθεσή τους πρωτότυπα και να δοκιμάσουν τα σχέδιά τους χωρίς να χρειαστεί να επενδύουν στην κατασκευή.

Το 1987, ο Carl Deckard κατέθεσε μια πατέντα ευρεσιτεχνίας η οποία εκδόθηκε ύστερα από δύο χρόνια για μία μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης, την επιλεκτική σύντηξη με την χρήση ακτίνων λέιζερ (SLS) πλέον έχει γίνει η πιο δημοφιλής τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης 3D και χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών για μοντέλα και εξαρτήματα τελικής χρήσης.

Το έτος 1989 έγινε η άφιξη της γερμανικής εταιρείας παραγωγής προσθέτων EOS GmbH. Επικεντρώθηκαν κυρίως στην τεχνολογία της επιλεκτικής σύντηξης με την χρήση ακτίνων λέιζερ (SLS) και σύντομα επινόησαν τη μέθοδο της άμεσης έγχυσης με λέιζερ (DMLS). Με το DMLS, η

(SLS) θα γίνει η μόνη τεχνολογία 3D εκτύπωσης ικανή να παράγει εξολοκλήρου μεταλλικά μέρη. Αυτό επέκτεινε σημαντικά το φάσμα των εφαρμογών για τις οποίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν 3D εκτυπωτές, καθώς σύνθετα εξαρτήματα θα μπορούσαν πλέον να δημιουργηθούν από πραγματικά και ανθεκτικά μέταλλα. Την ίδια χρονιά ο Scott Crump, μαζί με τη σύζυγό του και την εφευρέτη Lisa Crump, κατέθεσε και κατοχύρωσε μια πατέντα ευρεσιτεχνίας πάνω σε μια νέα μέθοδο παρασκευής προσθέτων που ονομάζεται μοντελοποίηση με εναπόθεση τηγμένου υλικού (FDM). Αυτή η τεχνική περιλαμβάνει τήξη ενός νήματος πολυμερούς και την εναπόθεσή του πάνω σε ένα υπόστρωμα, έπειτα στρώμα με στρώμα, για να δημιουργηθεί ένα 3D αντικείμενο.

Το 1992 η εταιρία του Charles Hull δημιούργησε την πρώτη μηχανή στερεολιθογραφικών συσκευών (SLA) στον κόσμο, η οποία κατέστησε δυνατή την κατασκευή πολύπλοκων μερών, στρώμα σε στρώμα σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα. Την ίδια χρονιά, η DTM παρήγαγε την πρώτη μηχανή επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης με λέιζερ (SLS) παγκοσμίως η οποία πυροβολεί ένα λέιζερ σε σκόνη αντί για υγρό.

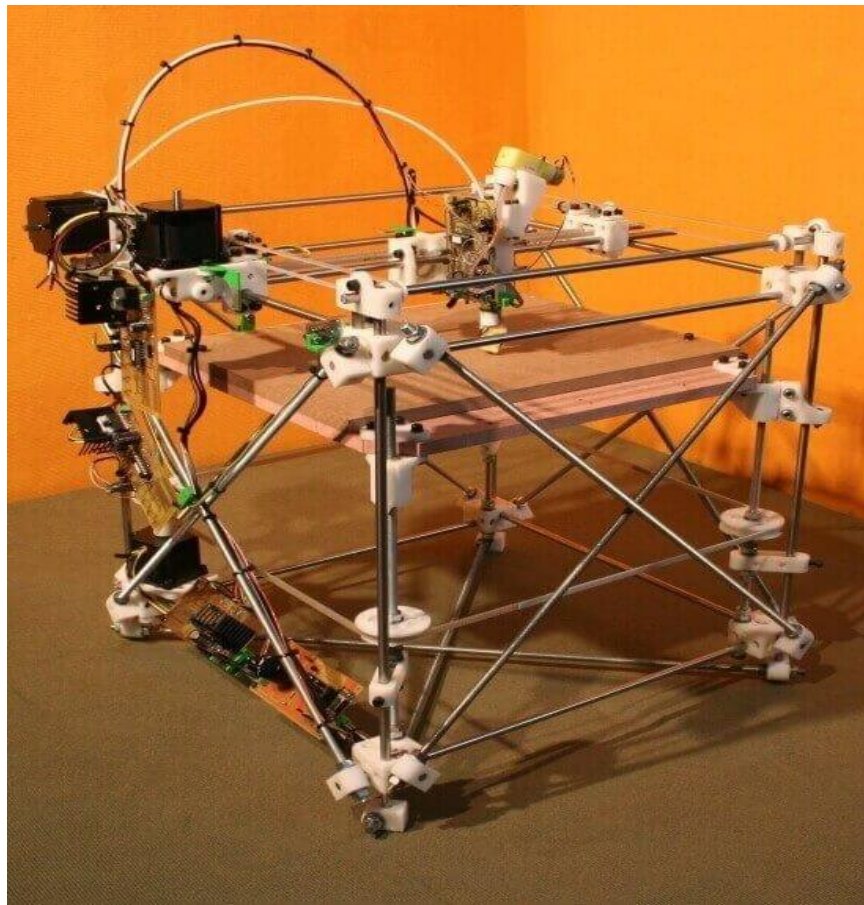
Όλες αυτές οι τεχνολογίες μαζί με άλλες που δημιουργήθηκαν εκείνη την περίοδο βρίσκονταν σε μικρή ηλικία και δεν ήταν τέλειες, υπήρχαν πολλοί περιορισμοί όπως στρεβλώσεις στα υλικά, απαγορευτικά δαπανηρά, αλλά το δυναμικό τους ήταν αναμφισβήτητο. Δεκαετίες αργότερα, το ιστορικό τρισδιάστατης εκτύπωσης έδειξε ότι το δυναμικό αυτό εξακολουθεί να εκτυλίσσεται. (Wikipedia, 2020)

Το 1999 έγινε η πρώτη χρήση τρισδιάστατου τυπωμένου οργάνου σε χειρουργική επέμβαση σε ασθενή και αυτό γίνεται πραγματικότητα όταν μια εργαστηριακή καλλιέργεια ουροδόχου κύστης μεταμοσχεύεται με επιτυχία σε έναν ασθενή, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία που αναπτύχθηκε από το Wake Forest Institute για την Αναγεννητική Ιατρική. Συγκεκριμένα η τεχνητή κύστη δημιουργείται με τη λήψη μίας CT ανίχνευσης της ουροδόχου κύστης του ασθενούς και μετά την εκτύπωση ενός βιοαποικοδομήσιμου ικρίωματος χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες στη συνέχεια εκτύπωσαν συνθετικά ικρίωματα μιας ανθρώπινης ουροδόχου κύστης και στη συνέχεια επικάλυψαν με τα κύτταρα ανθρώπινων ασθενών. Ο νεοσχηματισμένος ιστός στη συνέχεια εμφυτεύτηκε στους ασθενείς, με ελάχιστη ή μηδενική πιθανότητα το ανοσοποιητικό τους σύστημα να τις απορρίψει, καθώς ήταν κατασκευασμένες από τα κύτταρα τους.

Το 2005 ο Adrian Bowyer ιδρύει το έργο RepRap, ένα έργο ανοιχτού κώδικα που στοχεύει στην κατασκευή ενός 3D εκτυπωτή που μπορεί να εκτυπώσει τα περισσότερα από τα δικά του

στοιχεία, ουσιαστικά ήθελε να δημιουργήσει έναν προσιτό τρισδιάστατο εκτυπωτή που θα μπορούσε να αναδιπλασιαστεί.

Το έργο της εισαγωγής πρόσθετων υλών στο σπίτι έρχεται πραγματικά με το έργο RepRap. Ξεκίνησε το 2005, η πρωτοβουλία RepRap θέλησε να δημιουργήσει έναν προσιτό τρισδιάστατο εκτυπωτή που θα μπορούσε να αναδιπλασιαστεί. Το RepRap σημαίνει Replicated Rapid Prototyper. Με άλλα λόγια, ένας εκτυπωτής RepRap μπορεί να εκτυπώσει άλλους εκτυπωτές RepRap φέρνοντας έτσι την τρισδιάστατη εκτύπωση από το εργοστάσιο στο σπίτι. Το έργο RepRap υιοθέτησε την τεχνολογία FDM και έχει εμπνεύσει πολλούς επιτραπέζιους εκτυπωτές 3D που έχουν επίσης χρησιμοποιήσει εξώθηση. Ο σχεδιασμός του πρώτου εκτυπωτή RepRap 3D, που ονομάζεται "Darwin", κυκλοφορεί λίγα χρόνια αργότερα τον Μάρτιο του 2007. Άλλες εκδόσεις, όπως οι "Mendel", "Prusa Mendel" και "Huxley", ακολουθούν τα επόμενα χρόνια. (All3DP, 2016)



**Εικόνα 1.1: Darwin, ο πρώτος RepRap εκτυπωτής Darwin.**

Το 2008 η Shapeways, μια υπηρεσία εκτύπωσης 3D, κυκλοφορεί στην Ολλανδία. Όπως η RepRap, η Shapeways κάνει την τρισδιάστατη εκτύπωση διαθέσιμη σε ένα ευρύτερο κοινό. Αντί όμως να παράγουν τρισδιάστατους εκτυπωτές για το κοινό, ωστόσο, η Shapeways επιτρέπει στους χρήστες να αποστείλουν τα δικά τους 3D αρχεία, τα οποία τότε η εταιρεία εκτυπώνει και επιστρέφει.

Τα επόμενα χρόνια αναπτύσσεται περισσότερο στο κομμάτι της ιατρικής όπως προσθετικά μέλη, εμφυτεύσεις, όπως για παράδειγμα εμφύτευση τρισδιάστατης τυπωμένης κάτω σιαγόνας, ενώ παράλληλα γίνεται εκτύπωση των πρώτων αιμοφόρων αγγείων και καρδιάς προκειμένου να ενισχυθεί η δυνατότητα έρευνας.

Το 2009 βγαίνουν για πρώτη φορά προς πώληση οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές DIY kits από την εταιρία Maker Bot Industries.

Τα επόμενα χρόνια η τιμή των τρισδιάστατων εκτυπωτών πέφτει σημαντικά και έτσι ένας 3D εκτυπωτής μπορεί να βρεθεί σε κάθε σπίτι. (Elizabeth Matias, 2015)

## Θεωρητικό υπόβαθρο

### Προσθετική κατασκευή

Προσθετική κατασκευή (Additive Manufacturing) είναι ο καθιερωμένος πλέον όρος αυτού που τα προηγούμενα χρόνια αποκαλούσαμε Ταχεία Πρωτοτυποποίηση (Rapid Prototyping - RP), σήμερα γνωστό στο ευρύ κοινό ως τριδιάστατη εκτύπωση (3D printing). Ο όρος RP ουσιαστικά δηλώνει την ταχεία φυσική αναπαράσταση ενός συστήματος ή ενός αντικειμένου πριν από την εισαγωγή του στην αγορά ως εμπορικό προϊόν. Φτιάχνοντας ένα πρωτότυπο με έναν πολύ εύκολο και γρήγορο τρόπο επιταχύνει όλη την διαδικασία και μειώνει το αρχικό κόστος στην έρευνα, μελέτη και κατασκευή ενός προϊόντος αφού μπορεί να δοκιμαστεί κατευθείαν. Στην περιοχή της ανάπτυξης προϊόντων, ο όρος «RP» έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για να δηλώσει τεχνολογίες που δίνουν τη δυνατότητα δημιουργίας φυσικών πρωτοτύπων με τη χρησιμοποίηση απευθείας ψηφιακών δεδομένων. Σήμερα όμως έχει αντικατασταθεί με τον όρο Προσθετική κατασκευή (Additive Manufacturing) γιατί καλύπτει πολύ περισσότερες εφαρμογές λόγω της ραγδαίας ανάπτυξής του σε πολύ περισσότερες εφαρμογές. Συγκεκριμένα οι χρήστες της τεχνολογίας RP αντελήφθησαν ότι ο όρος «RP» είναι ανεπαρκής, κυρίως διότι δεν μπορεί να περιγράψει τις πλέον σύγχρονες εφαρμογές αυτής της τεχνολογίας. Η ποιότητα των κατασκευαζόμενων αντικειμένων από τις μηχανές αυτής της τεχνολογίας έχει βελτιωθεί σε τέτοιο βαθμό, ώστε πλέον τα αντικείμενα αυτά να προσομοιάζουν στα τελικά προϊόντα σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό. Σήμερα, πολλά τελικά προϊόντα παράγονται απευθείας από τέτοιες μηχανές, που προφανώς δεν είναι δυνατόν να χαρακτηριστούν «πρωτότυπα». Επίσης, ο όρος «RP» δεν μας λέει τίποτα αναφορικά με την προσθετικού χαρακτήρα κατασκευαστική αρχή αυτών των τεχνολογιών. Μια τεχνική επιτροπή που έχει πρόσφατα συσταθεί στην ASTM International απεφάνθη ότι πρέπει να υιοθετηθεί διαφορετική ορολογία για την τεχνολογία αυτή. Αν και η συζήτηση γύρω από το θέμα αυτό δεν έχει ολοκληρωθεί, τα πρότυπα που έχουν πρόσφατα συμφωνηθεί και υιοθετηθεί από την ASTM χρησιμοποιούν τον όρο «προσθετική κατασκευή» (additive manufacturing) γι' αυτήν την τεχνολογία.

Συντομογραφικά αναφερόμαστε σε αυτή την τεχνολογία ως AM, βασική αρχή της οποίας είναι το ότι ένα μοντέλο, που αρχικά δημιουργείται με τη χρησιμοποίηση ενός τριδιάστατου συστήματος Computer-Aided Design (3D CAD), μπορεί να κατασκευαστεί απευθείας χωρίς να απαιτείται προηγουμένως ο προγραμματισμός της διαδικασίας παραγωγής του. Παρόλο που τα πράγματα στην πραγματικότητα δεν είναι τόσο απλά όσο κατ' αρχάς θα νόμιζε κάποιος, η AM απλοποιεί σε σημαντικό βαθμό τη διαδικασία κατασκευής 3D αντικειμένων απευθείας



από τα ψηφιακά δεδομένα CAD. Άλλες κατασκευαστικές διεργασίες απαιτούν προσεκτική και λεπτομερή ανάλυση της γεωμετρικής μορφής του κομματιού, ώστε να καθοριστεί, για παράδειγμα, η σειρά κατασκευής των διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών του, το ποια εργαλεία και ποιες κατασκευαστικές διεργασίες πρέπει να χρησιμοποιηθούν, καθώς και το τι διατάξεις συγκράτησης του κομματιού θα απαιτηθούν επιπροσθέτως για την ολοκλήρωσή του. Αντιθέτως, με την AM απαιτούνται μόνο μερικές βασικές διαστασιακές λεπτομέρειες και μικρή κατανόηση του τρόπου λειτουργίας της μηχανής AM και του χρησιμοποιούμενου υλικού κατασκευής του κομματιού.

Το «κλειδί» για να κατανοήσουμε πώς λειτουργεί η AM είναι το ότι το κομμάτι δημιουργείται με τη διαδοχική πρόσθεση υλικού σε στρώσεις (layers) η κάθε στρώση αντιστοιχεί σε μια λεπτή διατομή (cross-section) του κομματιού που προκύπτει από τα αρχικά δεδομένα CAD. Προφανώς, στην πραγματικότητα, κάθε στρώση έχει συγκεκριμένο πάχος, οπότε το δημιουργούμενο κομμάτι θα αποτελεί προσέγγιση των αρχικών δεδομένων, όπως φαίνεται στην . Όσο λεπτότερη είναι η κάθε στρώση, τόσο πλησιέστερα προς το αρχικό είναι το τελικά δημιουργούμενο κομμάτι. Η λειτουργία όλων των συγχρόνων εμπορικά διαθέσιμων μηχανών AM στηρίζεται στη στρωματική προσέγγιση, ενώ τα κύρια σημεία διαφοροποίησής των είναι το υλικό που μπορούν να χρησιμοποιήσουν, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο δημιουργούνται και συγκολλούνται μεταξύ τους οι στρώσεις. Οι παραπάνω διαφορές καθορίζουν στοιχεία του τελικού κομματιού όπως τη γεωμετρική ακρίβειά του και τις υλικές και μηχανικές ιδιότητές του. Καθορίζουν, επίσης, παράγοντες όπως τον χρόνο κατασκευής, την έκταση της απαιτούμενης μετεπεξεργασίας, το μέγεθος της χρησιμοποιούμενης μηχανής AM και το συνολικό κόστος της μηχανής και της όλης κατασκευαστικής διαδικασίας. (Ian Gibson, 2015)

## Η γεωμετρία της προσθετικής κατασκευής

Το θεώρημα του Fubini, που πήρε το όνομά του από τους Ιταλούς μαθηματικούς Guido Fubini, δηλώνει ότι ένα αντικείμενο όπου οι διαστάσεις μπορούν να αναπαρασταθούν ως ένα φάσμα από στρώματα σχημάτων των  $n-1$  διαστάσεων. Αυτό σημαίνει ότι ένα τρισδιάστατο σχήμα (οποιασδήποτε μορφής στον πραγματικό κόσμο) μπορεί να αναπαρασταθεί ως στρώματα σχημάτων 2 διαστάσεων. Για να αναλύσουμε το θεώρημα, υποθέτουμε ότι τα  $A$  και  $B$  είναι πλήρους μετρήσιμοι χώροι. Υποτίθεται ότι το  $f(x, y)$  είναι  $A \times B$  μετρήσιμο.

$$\int_{A \times B} |f(x, y)| d(x, y) < \infty,$$

όπου το ολοκλήρωμα λαμβάνεται σε σχέση με ένα μέτρο γινομένου από το χώρο  $A \times B$ , τότε

$$\int_A \left( \int_B f(x, y) dy \right) dx = \int_B \left( \int_A f(x, y) dx \right) dy = \int_{A \times B} f(x, y) d(x, y),$$

Τα δύο πρώτα ολοκληρώματα είναι επαναλαμβανόμενα ολοκληρώματα σε σχέση με τα δύο μέτρα, αντίστοιχα, και το τρίτο είναι ένα ολοκλήρωμα σε σχέση με ένα γινόμενο από αυτά τα δύο μέτρα. Εάν η απόλυτη τιμή του παραπάνω ολοκληρώματος δεν είναι πεπερασμένη, τότε τα δύο επαναλαμβανόμενα ολοκληρώματα μπορεί στην πραγματικότητα να έχουν διαφορετικές τιμές. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα παράδειγμα αυτής της δυνατότητας. Αν  $f(x, y) = g(x)h(y)$  για κάποιες συναρτήσεις  $g$  και  $h$ , τότε:

$$\int_A g(x) dx \int_B h(y) dy = \int_{A \times B} f(x, y) d(x, y),$$

Μια άλλη εκδοχή του θεωρήματος Fubini δηλώνει ότι αν  $A$  και  $B$  έχουν πεπερασμένο μέτρο χώρου, όχι απαραίτητα πλήρεις, και εάν είτε

$$\int_A \left( \int_B |f(x, y)| dy \right) dx < \infty \quad \text{είτε} \quad \int_B \left( \int_A |f(x, y)| dx \right) dy < \infty \quad \text{τότε}$$

$$\int_{A \times B} |f(x, y)| d(x, y) < \infty$$

και

$$\int_A \left( \int_B f(x, y) dy \right) dx = \int_B \left( \int_A f(x, y) dx \right) dy = \int_{A \times B} f(x, y) d(x, y).$$

Σε αυτή την εκδοχή είναι απαραίτητη η προϋπόθεση ότι τα μέτρα αυτά είναι πεπερασμένα. (Anastasiou, et al., 2013)

## Σχεδιασμός του πειράματος

Η μέθοδος Taguchi σχεδιασμό των πειραμάτων (DOE) περιλαμβάνει τη μείωση της διακύμανσης σε μια διαδικασία μέσω του σχεδιασμού των πειραμάτων. Ο γενικός στόχος της μεθόδου είναι να παράγει υψηλής ποιότητας προϊόν με χαμηλό κόστος για τον κατασκευαστή. Η μέθοδος αναπτύχθηκε από τον Genichi Taguchi. Ανέπτυξε μια μέθοδο με την οποία διερευνάται ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζουν οι διαφορετικές παράμετροι την κάθε διαδικασία ενός πειράματος. Ουσιαστικά με αυτή την μέθοδο είναι δυνατόν να εντοπίσουμε τους πιο σημαντικούς παράγοντες μίας πειραματικής διαδικασίας. Παράλληλα με αυτή την διαδικασία βελτιστοποιείται η διαδικασία τροποποιώντας κάθε παράγοντα για την επίτευξη βέλτιστων αποτελεσμάτων. Ο πειραματικός σχεδιασμός που πρότεινε ο Taguchi περιλαμβάνει τη χρήση ορθογώνιων συστοιχιών για την οργάνωση των παραμέτρων που επηρεάζουν την

διαδικασία και τα επίπεδα στα οποία πρέπει να ποικίλουν δοκιμάζοντας όλα τα πιθανά ζεύγη συνδυασμών. Αυτό επιτρέπει τη συλλογή των απαραίτητων δεδομένων χρησιμοποιώντας ελάχιστο ποσό πειραματισμού, εξοικονομώντας έτσι χρόνο και πόρους.

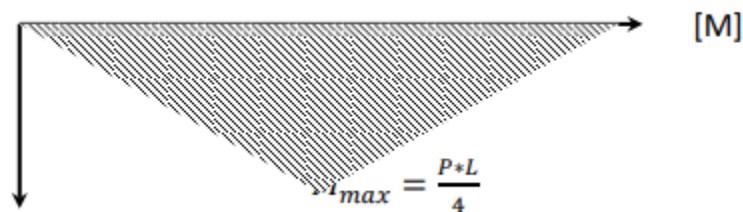
Οι κλασικές πειραματικές μέθοδοι σχεδιασμού είναι πολύ περίπλοκες και δεν είναι εύχρηστες. Επίσης ένας μεγάλος αριθμός πειραμάτων πρέπει να πραγματοποιηθεί όταν αυξάνεται ο αριθμός των παραμέτρων της διαδικασίας του πειράματος. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα, η μέθοδος Taguchi χρησιμοποιεί έναν ειδικό σχεδιασμό ορθογώνιων συστοιχιών για τη μελέτη το συνόλου των παραμέτρων με μικρό αριθμό πειραματικών διαδικασιών. Κάθε παράμετρος έχει τρία επίπεδα - δηλαδή χαμηλό, μεσαίο και υψηλό, συμβολίζεται με 1, 2 και 3 αντίστοιχα. Σύμφωνα με την μέθοδο Taguchi με ορθογωνική συστοιχία L9 υπάρχουν τρεις παράμετροι και 3 επίπεδα για κάθε παράμετρο και αντί για  $3^3 = 27$  δοκιμές πραγματοποιούνται μόνο 9 δοκιμές (L9). Στην συγκεκριμένη διαδικασία χρησιμοποιήθηκε σχεδιασμός τριών επιπέδων με τέσσερις παράγοντες  $3^4 = 81$  με χρησιμοποιώντας μόνο 9 δοκίμια. (Roy, 1990) (Vuchkov & Boyadjieva, 2001)

Experiment No.	Parameter 1 (Level)	Parameter 2 (Level)	Parameter 3 (Level)	Parameter 4 (Level)
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

**Πίνακας 1: Taguchi ορθογωνικής συστοιχίας L9**

## Κάμψη

Στην παρούσα μελέτη θα χρησιμοποιήσουμε κάμψη τριών σημείων που είναι τελείως διαφορετική από την καθαρή κάμψη. Στην κάμψη τριών σημείων έχουμε μια δύναμη  $P$  να δρα στο μέσο μιας πλάκας και κάθετα στο διαμήκη άξονα. Η κατανομή της τάσης  $\sigma'$  αυτή την περίπτωση είναι απλή ακτινική. Συγκεκριμένα η δοκός στηρίζεται αμφιέριστα ή ως αμφιπροέχουσα και φέρει στο μέσον της σημειακό φορτίο  $P$ , στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι αμφιπροέχουσα. Κατά την ανωτέρω φόρτιση και από την επίλυση των στερεοστατικών εξισώσεων ισορροπίας καθώς και από τον προσδιορισμό και τον σχεδιασμό του διαγράμματος καμπτικών ροπών, προκύπτουν τα ακόλουθα:



**Εικόνα 1.2: Κάμψη τριών σημείων.**

Οι βασικές παραδοχές της καθαρής κάμψης είναι οι ακόλουθες:

1. Το ύψος  $h$  της διατομής της δοκού είναι μικρότερο από το μισό του ανοίγματος  $A$  ( $h < A/2$ ).
2. Υπάρχει τουλάχιστον ένας άξονας συμμετρίας .
3. Ο ουδέτερος άξονας της δοκού (διαμήκης), ο οποίος διέρχεται από τα κέντρα βάρους των διατομών, είναι ευθύγραμμος, όταν η δοκός είναι αφόρτιστη.
4. Τα εξωτερικά φορτία είναι κάθετα στον άξονα της δοκού και βρίσκονται στο επίπεδο φόρτισης ή καμπτόμενο επίπεδο, που συμπίπτει με το επίπεδο συμμετρίας της δοκού (διαφορετικά θα έχουμε σύνθετη κατάσταση).
5. Η δοκός είναι από υλικό με ίδιο μέτρο ελαστικότητας ( $E$ ) σε εφελκυσμό και θλίψη και οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι μικρότερες του ορίου αναλογίας του υλικού, άρα ισχύει ο Νόμος του Hooke.
6. Οι διατομές (κάθετες τομές στον άξονα είναι επίπεδες, όταν η δοκός είναι απαραμόρφωτη και παραμένουν επίπεδες και κάθετες στον άξονα, ακόμα κι όταν αυτός καμπυλώνεται μετά τη φόρτιση (υπόθεση των Bernoulli Navier) (Ι.Γιαννακόπουλος, 2011).

## Γενικά η διεργασία της AM

**Βήμα 1:** CAD Όλα τα κομμάτια που κατασκευάζονται με AM αρχίζουν από ένα ψηφιακό μοντέλο με το οποίο περιγράφεται η εξωτερική γεωμετρία τους. Προς τούτο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σχεδόν οποιοδήποτε επαγγελματικό λογισμικό CAD στερεάς μοντελοποίησης, το αποτέλεσμα, όμως, του οποίου πρέπει οπωσδήποτε να είναι μια 3D στερεά ή επιφανειακή αναπαράσταση. Συσκευές αντίστροφης μηχανικής (reverse engineering) (π.χ. laser και οπτικής σάρωσης) μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία αυτής της αναπαράστασης.

**Βήμα 2:** Μετατροπή σε αρχείο STL Σχεδόν όλες οι μηχανές AM δέχονται ως δεδομένα αρχεία της μορφής STL, που έχει καθιερωθεί ως το de facto πρότυπο. Όλα σχεδόν τα συστήματα CAD σήμερα μπορούν να εξαγωγή δεδομένα σε μορφή αρχείου STL. Το αρχείο αυτό περιγράφει την κλειστή εξωτερική επιφάνεια του αρχικού μοντέλου CAD και αποτελεί τη βάση για τον υπολογισμό των στρώσεων.

**Βήμα 3:** Μεταφορά στη μηχανή AM και επεξεργασία του αρχείου STL Το αρχείο STL που περιγράφει το κομμάτι πρέπει να μεταφερθεί στη μηχανή AM. Εδώ, θα πρέπει το αρχείο να υποστεί μια σχετική επεξεργασία, ώστε το κομμάτι να έχει το κατάλληλο μέγεθος για την κατασκευή του, θέση και προσανατολισμό. 22 / Τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής Εικόνα 1.2 Η γενική διεργασία AM, από το σύστημα CAD ως το τελικό κομμάτι: Παρουσιάζονται και τα οκτώ βήματα 1 CAD 2 Μετατροπή σε αρχείο STL 3 Μεταφορά του αρχείου στη μηχανή 4 Προετοιμασία της μηχανής 5 Κατασκευή 6 Απομάκρυνση 7 Μετεπεξεργασία 8 Εφαρμογή

**Βήμα 4:** Η μηχανή AM πρέπει να προετοιμαστεί κατάλληλα, προτού να αρχίσει η διαδικασία κατασκευής. Η προετοιμασία αυτή αναφέρεται σε κατασκευαστικές παραμέτρους όπως είναι οι περιορισμοί που εξαρτώνται από το υλικό κατασκευής, η συγκεκριμένη πηγή ενέργειας, το πάχος της στρώσης, οι διάφορες επιλογές χρονισμού κ.λπ.

**Βήμα 5:** Η κατασκευή του κομματιού είναι κυρίως μια αυτοματοποιημένη διαδικασία που εκτελείται χωρίς ουσιαστική επίτηρηση. Απαιτείται στοιχειώδης μόνο παρακολούθηση της

μηχανής από καιρού εις καιρόν, ώστε να είμαστε βέβαιοι ότι δεν έχει συμβεί κάποιο λάθος, όπως, για παράδειγμα, να έχει εξαντληθεί το υλικό κατασκευής ή να υπάρχει κάποιο σφάλμα στην ηλεκτρική τροφοδοσία της μηχανής και το λογισμικό κ.λπ.

**Βήμα 6:** Απομάκρυνση Όταν η μηχανή AM ολοκληρώσει την κατασκευή, το κομμάτι πρέπει να απομακρυνθεί από τη μηχανή. Τούτο απαιτεί, κατά κάποιο τρόπο, αλληλεπίδραση με τη μηχανή, η οποία μπορεί να διαθέτει ασφαλιστικές δικλίδες/μηχανισμούς που να εξασφαλίζουν, για παράδειγμα, ότι η θερμοκρασία της είναι αρκούντως χαμηλή ή ότι δεν βρίσκονται σε κίνηση κάποια μέρη της.

**Βήμα 7:** Μετεπεξεργασία Όταν τα κομμάτια απομακρυνθούν από τη μηχανή μπορεί να μην είναι κατάλληλα να χρησιμοποιηθούν αμέσως και να χρειάζονται κάποιο επιπλέον καθάρισμα. Τα κομμάτια ενδέχεται κατά το στάδιο αυτό να μη διαθέτουν την απαιτούμενη μηχανική αντοχή ή να έχουν ακόμη τα στηρίγματα τα οποία πρέπει να αφαιρεθούν. Τούτο πολλές φορές απαιτεί χρόνο, καθώς και προσεκτική χειρωνακτική εργασία από έμπειρο προσωπικό.

**Βήμα 8:** Εφαρμογή Στο στάδιο αυτό τα κομμάτια μπορεί να είναι έτοιμα για χρήση. Εντούτοις, είναι δυνατόν να μην έχουν την αποδεκτή ποιότητα για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα και να απαιτείται περαιτέρω μικροεπεξεργασία. Για παράδειγμα, μπορεί να απαιτείται αστάρωμα ή βαφή, ώστε να έχουν μια αποδεκτή επιφανειακή υφή και φινίρισμα. Εάν το απαιτούμενο φινίρισμα είναι ιδιαίτερα απαιτητικό, τότε οι επεξεργασίες αυτές μπορεί να είναι περίπλοκες και χρονοβόρες. Μπορεί, επίσης, τα κομμάτια να πρέπει να συναρμολογηθούν μαζί με άλλα μηχανικά ή ηλεκτρονικά εξαρτήματα και κομμάτια, προκειμένου να σχηματίσουν το τελικό μοντέλο ή προϊόν. Έχοντας εξαντλήσει την παρουσίαση όλων των σταδίων που συνιστούν την AM, είναι σημαντικό να γίνει αντιληπτό ότι οι μηχανές AM απαιτούν σχολαστική συντήρηση. Επειδή πολλές από τις μηχανές AM χρησιμοποιούν ευαίσθητα laser ή τεχνολογία εκτυπωτών, δεν πρέπει να λειτουργούν σε ρυπαρό ή θορυβώδες περιβάλλον και χωρίς προσεκτική παρακολούθηση. Μολονότι έχουν γενικά σχεδιαστεί για να λειτουργούν χωρίς επιτήρηση, είναι πολύ σημαντικό να έχουν προβλεφτεί τακτικοί έλεγχοι στο πλάνο συντήρησής τους, με το επίπεδο συντήρησης να διαφέρει σημαντικά ανάλογα με την τεχνολογία της κάθε μηχανής AM. Πρέπει, ακόμα, να τονιστεί ότι τα περισσότερα από τα υπάρχοντα διεθνή πρότυπα υλικών και διαδικασιών δεν καλύπτουν τη διεργασία της AM, γεγονός που δικαιολογεί το ιδιαίτερο ενδιαφέρον της τεχνικής επιτροπής F42 της ASTM

αναφορικά με τις τεχνολογίες της ΑΜ, η οποία καταβάλλει προσπάθειες, προκειμένου να αντιμετωπιστεί και να ξεπεραστεί το συγκεκριμένο πρόβλημα [1]. Πολλοί προμηθευτές όμως, συστήνουν στους πελάτες τους περιοδικούς ελέγχους των μηχανών, σύμφωνα με συγκεκριμένα πλάνα συντήρησης, ώστε να είναι εξασφαλισμένο ότι αυτές λειτουργούν εντός των αποδεκτών ορίων. Εκτός από τις μηχανές, τα υλικά κατασκευής μπορεί να απαιτούν και αυτά ειδική μεταχείριση. Η πρώτη ύλη που χρησιμοποιούν ως υλικό κατασκευής ορισμένες από τις διεργασίες ΑΜ έχει περιορισμένη διάρκεια ζωής, ενώ ίσως να χρειάζεται να φυλάσσεται υπό ειδικές συνθήκες, ώστε να αποφεύγονται ανεπιθύμητες χημικές αντιδράσεις. Πρέπει, εκτός των άλλων, να αποφεύγεται η έκθεσή τους στην υγρασία, το πολύ φως και, εν γένει, σε ρύπους. Στις περισσότερες διεργασίες ΑΜ το υλικό κατασκευής μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί σε περισσότερες από μία κατασκευαστικές εργασίες. Ωστόσο, η χρησιμοποίηση του ίδιου υλικού σε πολλές διαφορετικές κατασκευαστικές εργασίες είναι δυνατόν να οδηγήσει σε υποβάθμιση των ιδιοτήτων του. Προκειμένου, λοιπόν, να κατασκευάζονται αντικείμενα με καθορισμένη και σταθερή ποιότητα υλικού, μέσω ανακυκλωμένης πρώτης ύλης, θα πρέπει να ακολουθείται αυστηρά συγκεκριμένη διαδικασία. (Ian Gibson, 2015)



## Υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης

### Γενικά

Τα δύο πιο συχνά υλικά είναι με διαφορά το ABS (acrylonitrile butadiene styrene) και το PLA (poly-lactic acid). Τα δύο αυτά υλικά έχουν κάποιες μικροδιαφορές στις ιδιότητές τους. Για παράδειγμα το ABS είναι πιο ελαστικό από το PLA, λιώνει σε υψηλότερες θερμοκρασίες και χρειάζεται προθέρμανση της πλατφόρμας εκτύπωσης. Το PLA έχει καλύτερη υφή αλλά είναι λιγότερο ανθεκτικό. Ανάλογα με την πυκνότητα του υλικού ποικίλουν οι τιμές κόστους τους.

### PLA

Το PLA (Polylactic Acid) είναι το άλλο δημοφιλές νήμα 3D εκτύπωσης μετά το ABS και είναι πολύ διαδεδομένο λόγω της ευκολίας χρήσης του. Παράγεται από ανανεώσιμες πηγές όπως ζαχαρότευτλα, καλαμπόκι και σόγια και είναι βιοδιασπώμενο και οικολογικό. Η θερμοκρασία εξώθησης που απαιτείται για την εκτύπωση είναι χαμηλότερη από το ABS και έχει μικρό συντελεστή συρρίκνωσης με αποτέλεσμα να μην πάσχει από στρέβλωση όσο άλλα αναλώσιμα. Το PLA έχει πολύ καλή πρόσφυση σε κρύα πλατφόρμα και συνήθως αρκεί η κάλυψή της με μπλε ταινία. Λόγω της μικρότερης θερμοκρασίας εκτύπωσης και της πιο εύκολης ψύξης του, έχει πλεονέκτημα σε μοντέλα με μικρολεπτομέρειες και αιχμηρές άκρες. Η επιφάνειά του είναι σχετικά γυαλιστερή και μπορεί να δεχτεί κανονικά εξωτερική επεξεργασία. Είναι πιο σκληρό από το ABS αλλά και πιο εύθραυστο.

### ABS

Το ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) είναι παράγωγο πετρελαίου και αποτελεί ένα από τα πιο δημοφιλή υλικά 3D εκτύπωσης μαζί με το PLA. Σε σύγκριση έναντι του PLA, το ABS είναι πιο εύκαμπτο και ανθεκτικό σε κρούση, διαθέτει επίσης υψηλότερο σημείο τήξης και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Επίσης είναι διαλυτό σε ακετόνη, κάτι που μας βοηθάει για

συγκόλληση εκτυπώσεων μεταξύ τους ή για την εξομάλυνσή τους. Το ABS χρησιμοποιείται σε πολλά προϊόντα που συναντάμε στην καθημερινότητά μας, ανταλλακτικά αυτοκινήτων, σκεύη, ακόμα και παιχνίδια. Στην 3D εκτύπωση, το ABS νήμα απαιτεί θερμαινόμενη πλατφόρμα για την καλύτερη πρόσφυση των μοντέλων αλλά και για την ελαχιστοποίηση της στρέβλωσής τους καθώς το ABS έχει την ιδιότητα να συρρικνώνεται όταν κρυώσει. Κατά την εκτύπωση αφήνει μια ελαφριά μυρωδιά πλαστικού, από ενοχλητική στα κακής ποιότητας αναλώσιμα έως και σχεδόν αδιόρατη στα πιο καλά. (P., n.d.)

## HIPS

Το HIPS (High Impact Polystyrene) είναι ένα αναλώσιμο γενικής χρήσης που έγινε διάσημο λόγω της ικανότητάς του να διαλυθεί σε Limonene. HIPS και ABS έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά εκτύπωσης, όπως η εκτύπωση θερμοκρασίας, και ως εκ τούτου, προσκολλώνται καλά το ένα στο άλλο. Έτσι προέκυψε η χρήση του παράλληλα με το ABS σε εκτυπωτές 2 κεφαλών, με το HIPS να χρησιμοποιείται αποκλειστικά για υποστηρίγματα τα οποία μετά διαλύονται με εμβάπτιση σε Limonene, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα για σύνθετες εκτυπώσεις μοντέλων που ως και πριν δε γινόταν να τυπωθούν καθώς με αυτή τη μέθοδο είναι πλέον εφικτή η αφαίρεση υποστηριγμάτων από δύσκολα εσωτερικά σημεία και πολύπλοκες εσωτερικές δομές χωρίς σημάδια και ζημιά στο μοντέλο.

## PVA

Το PVA (Polyvinyl Alcohol) αποτελεί ένα ακόμα υδατοδιαλυτό υλικό. Χρησιμοποιείται κυρίως ως μια δομή στήριξης, και διαλύεται πλήρως στο νερό. Ήταν το πρώτο νήμα με αυτή την ιδιότητα και άνοιξε τις πόρτες σε υδατοδιαλυτές εκτυπώσεις. Τα είδη των προϊόντων που μπορούν να εκτυπωθούν με τη χρήση του PVA ποικίλουν από απλές εκτυπώσεις μέχρι και επιστημονικές ή βιοτεχνολογικές εφαρμογές. Είναι σχετικά εύκολο στην εκτύπωση και έχει καλή πρόσφυση στην μπλε ταινία. (Baguley, 2017)

## Από ξύλο

Το ξύλινο νήμα WOOD αποτελεί ένα επαναστατικό υλικό 3D εκτύπωσης. Το νήμα αυτό περιέχει ανακυκλωμένο ξύλο συνήθως κατά 30% και το υπόλοιπο είναι συνήθως μια βάση από PLA. Συνεπώς η συμπεριφορά του κατά την εκτύπωση, η πρόσφυση σε κρύα πλατφόρμα και οι θερμοκρασίες εκτύπωσης είναι ιδιότητες που μοιράζεται με το PLA. Το εντυπωσιακό είναι πως τα εκτυπωμένα αντικείμενα έχουν υφή πολύ κοντά σε αυτή του ξύλου, μέχρι και τη μυρωδιά του. Μάλιστα παίζοντας με διαφορετικές θερμοκρασίες εκτύπωσης επηρεάζουμε ελαφρά και την απόχρωσή του, κάτι που δίνει πολλές δημιουργικές δυνατότητες. Τα εκτυπωμένα μοντέλα δέχονται εύκολα επεξεργασία, κοπή, λείανση, τρόχισμα ή και ζωγραφική αλλά να έχετε υπόψη σας πως η αντοχή τους είναι μικρότερη από αυτή του κοινού PLA καθώς η πρόσμιξη με το ξύλο το κάνει πιο ευπαθές σε σπασίματα.

## Από νάυλον

Τα αναλώσιμα από νάυλον έγιναν πρόσφατα μια δημοφιλής εναλλακτική επιλογή ως υλικό 3D εκτύπωσης καθώς το υλικό αυτό προσφέρει ευελιξία και μεγάλη αντοχή, ενώ έχει εξαιρετικά μικρό βάρος. Τα μοντέλα από νάυλον δεν είναι τόσο εύθραυστα όσο εκείνα που τυπώθηκαν είτε με ABS ή PLA, μάλιστα ένα 3D αντικείμενο από νάυλον μπορεί να είναι έως και δέκα φορές ισχυρότερο. Αποτελεί λοιπόν μια εξαιρετική επιλογή για την εκτύπωση αντικειμένων όπως όπως εργαλεία, γρανάζια ή και προσθετικά μέλη. Το νάυλον είναι πιο απαιτητικό και δύσκολο στην εκτύπωση και καθώς έχει την τάση να απορροφά πολλή υγρασία, θέλει μεγάλη προσοχή στον τρόπο αποθήκευσής του και καλή αφύγρανση σε θερμαντικό θάλαμο πριν τη χρήση.

## PETG

Το PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol-modified) είναι μια αναβαθμισμένη έκδοση του δημοφιλούς νήματος PET. Η διαφορά μεταξύ PET και PETG είναι η προσθήκη γλυκόλης η οποία εμποδίζει την κρυστάλλωση και κάνει το νήμα λιγότερο εύθραυστο. Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του PETG είναι η αντοχή του στην κρούση. Επίσης, έχει πολύ μεγάλη οπτική καθαρότητα και σε σύγκριση με Acetal και Nylon έχει καλύτερη αντοχή σε όξινες συνθήκες, αντοχή στη φθορά και στην τριβή. Λόγω αυτών των ιδιοτήτων του το PETG έχει πολλές χρήσεις και εφαρμογές σε προϊόντα που κυμαίνονται από ιατρικό εξοπλισμό, συσκευασία τροφίμων, σήμανση, και πολλά άλλα. (Übel, n.d.)

## Τεχνολογίες προσθετικής κατεργασίας

### Γενικά

Όλες οι τεχνολογίες προσθετικής κατεργασίας μοιράζονται αρκετά κοινά, γενικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα. Ωστόσο, η ανάπτυξη αλλά και η χρησιμοποίησή τους σε διάφορες εφαρμογές βασίζεται στις επιμέρους δυνατότητες που προσφέρει η εκάστοτε τεχνολογία. Ένας τρόπος που μπορεί να πραγματοποιηθεί είναι εξετάζοντας αν το υλικό κατασκευής, που εφαρμόζεται για την παραγωγή των στρωμάτων, επεξεργάζεται ως σκόνη (Powder-Based Systems), ως λειωμένο υλικό (Molten Material Systems), ως στερεά φύλλα (Solid Sheets Systems) ή ως φωτοπολυμερές υγρό σε δεξαμενή, ή ink-jet εναπόθεση φωτοπολυμερούς (Photopolymer- Based Systems).

Συγκεκριμένα οι μέθοδοι στις οποίες μπορούν να διακριθούν οι τεχνολογίες αυτές σύμφωνα και με το πρότυπο ISO / ASTM52900-15 είναι οι εξής:

Συνδετική με πίεση ακροφυσίου (Binder Jetting)

Φωτοπολυμερισμό σε δεξαμενές (Vat Photopolymerisation)

Υλικά με πίεση ακροφυσίου (Material Jetting)

Σύντηξη στρώματος σκόνης (Powder Bed Fusion)

Εξώθηση υλικών (Material Extrusion)

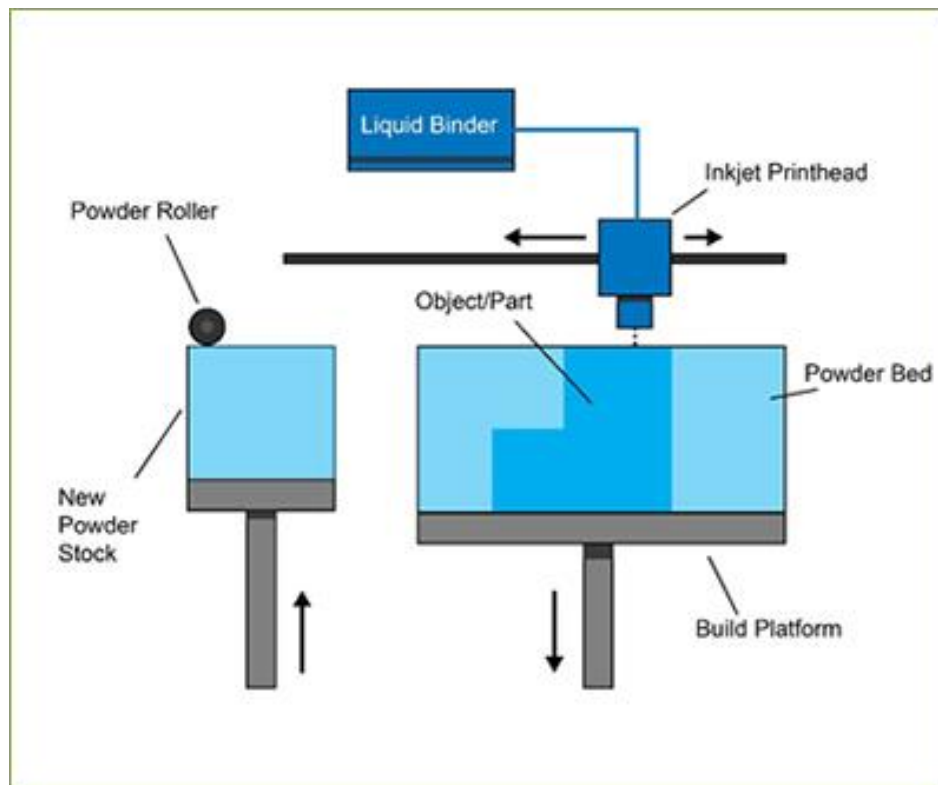
Κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας (Directed Energy Deposition)

Συγκόλληση φύλλων (Sheet Lamination)

Οι κύριες διαφορές μεταξύ των διαδικασιών είναι στον τρόπο με τον οποίο τα στρώματα εναποτίθενται για τη δημιουργία τμημάτων και στα υλικά που χρησιμοποιούνται. Κάθε μέθοδος έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, και γι 'αυτό ορισμένες εταιρείες προσφέρουν μια επιλογή σκόνης και πολυμερούς για το υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του αντικειμένου. (Wikipedia, 2020)

## Συνδεδετική με πίεση ακροφυσίου (Binder Jetting)

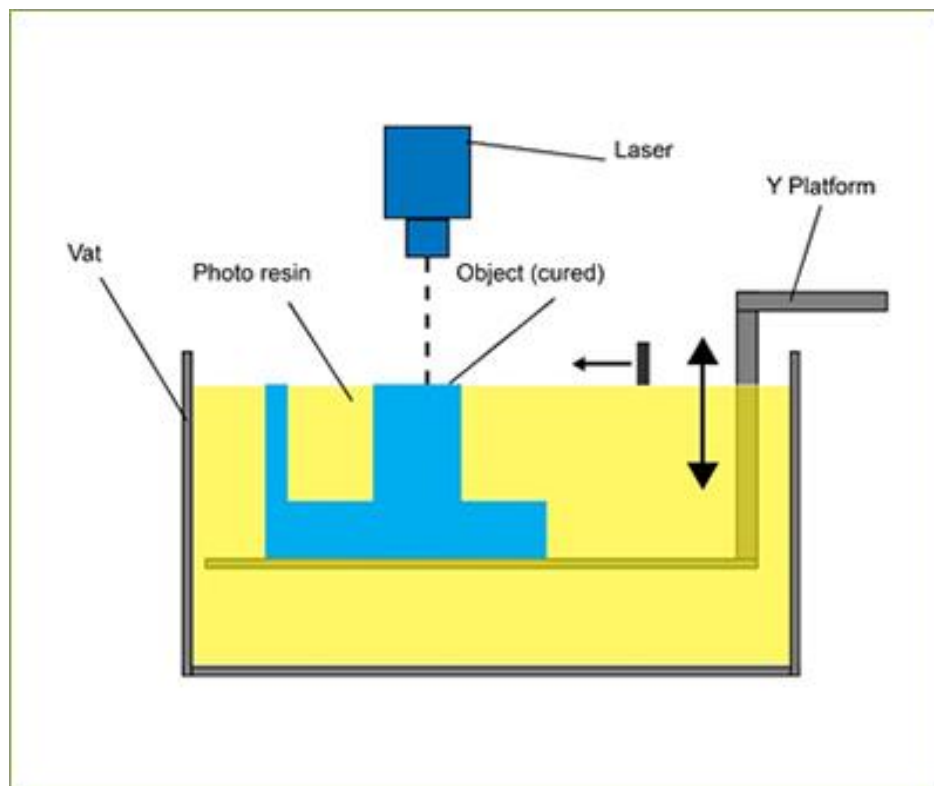
Η διαδικασία εκτόξευσης συνδεδετικού υλικού χρησιμοποιεί δύο υλικά. ένα υλικό με βάση σκόνη και ένα συνδεδετικό υλικό. Το συνδεδετικό υλικό δρα ως συγκολλητικό μεταξύ στρώσεων σκόνης. Το συνδεδετικό υλικό είναι συνήθως σε υγρή μορφή και το δομικό υλικό σε μορφή σκόνης. Μια κεφαλή εκτύπωσης κινείται οριζοντίως κατά μήκος των αξόνων x και y της μηχανής και εναποθέτει εναλλασσόμενα στρώματα του οικοδομικού υλικού και του συνδεδετικού υλικού. Μετά από κάθε στρώμα, το αντικείμενο που εκτυπώνεται χαμηλώνει στην πλατφόρμα κατασκευής του. Λόγω της μεθόδου σύνδεσης, τα χαρακτηριστικά του υλικού δεν είναι πάντα κατάλληλα για κατασκευαστικά μέρη και παρά τη σχετική ταχύτητα εκτύπωσης, η πρόσθετη μεταγενέστερη επεξεργασία (βλέπε παρακάτω) μπορεί να προσθέσει σημαντικό χρόνο στη συνολική διαδικασία. Όπως συμβαίνει με άλλες μεθόδους κατασκευής με βάση σκόνη, το προς εκτύπωση αντικείμενο υποστηρίζεται μόνος του μέσα στην κλίση σκόνης και απομακρύνεται από την μη συνδεδεμένη σκόνη μόλις ολοκληρωθεί. Η τεχνολογία αναφέρεται συχνά ως τεχνολογία 3DP και προστατεύεται από πνευματικά δικαιώματα με αυτό το όνομα.



Εικόνα 1.3: Διαδικασία εκτόξευσης συνδεδετικού υλικού

## Φωτοπολυμερισμό σε δεξαμενές (Vat Photopolymerisation)

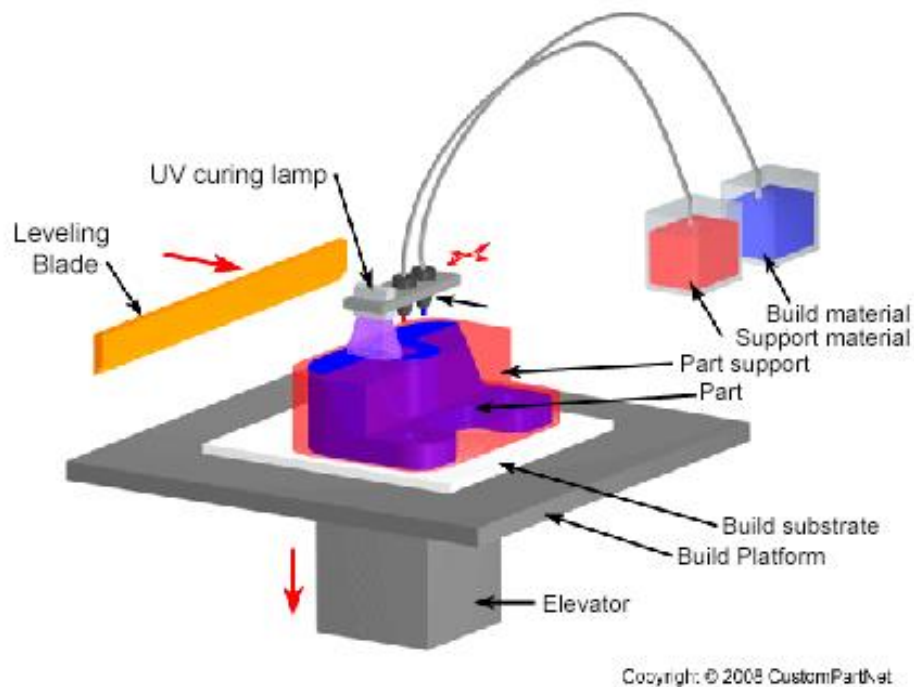
Χρησιμοποιεί μια δεξαμενή υγρής φωτοπολυμερούς ρητίνης, από την οποία το μοντέλο κατασκευάζεται στρώση με στρώση. Χρησιμοποιείται ένα υπεριώδες (UV) φως για να σκληρύνει τη ρητίνη όπου και όσο απαιτείται, ενώ μια πλατφόρμα μετακινεί το αντικείμενο προς τα κάτω μετά από κάθε σκλήρυνση. Καθώς η διαδικασία 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 παρέχεται υποστήριξη από το μη συνδεδεμένο υλικό. Σε αυτήν την περίπτωση, συχνά θα πρέπει να προστεθούν δομές υποστήριξης. Οι ρητίνη σκληραίνεται χρησιμοποιώντας μια διαδικασία πολυμερισμού φωτογραφιών ή UV φως, όπου το φως κατευθύνεται στην επιφάνεια της ρητίνης με τη χρήση ελεγχόμενων από τον κινητήρα κατόπτρων. Όταν η ρητίνη έρχεται σε επαφή με το φως στερεοποιείται.



Εικόνα 1.4: Διαδικασία προσθετικής κατασκευής με φωτοπολυμερισμό σε δεξαμενές

## Υλικά με πίεση ακροφυσίου (Material Jetting)

Η εκτόξευση υλικού δημιουργεί αντικείμενα με παρόμοια μέθοδο με έναν δισδιάστατο εκτυπωτή ψεκασμού μελάνης. Το υλικό σπρώχνεται πάνω σε μια πλατφόρμα κατασκευής χρησιμοποιώντας είτε μια συνεχή προσέγγιση είτε μια προσέγγιση Drop on Demand (DOD on Demand). Το υλικό σπρώχνεται επάνω στην επιφάνεια κατασκευής ή στην πλατφόρμα, όπου στερεοποιείται και το μοντέλο είναι χτισμένο στρώμα από στρώμα. Το υλικό εναποτίθεται από ακροφύσιο το οποίο κινείται οριζόντια κατά μήκος της πλατφόρμας κατασκευής. Οι μηχανές διαφέρουν ως προς την πολυπλοκότητα και τις μεθόδους ελέγχου της εναπόθεσης υλικού. Οι στιβάδες υλικού στη συνέχεια σκληρύνθηκαν χρησιμοποιώντας υπεριώδεις (UV) φως. Καθώς το υλικό πρέπει να εναποτίθεται σε σταγόνες, ο αριθμός των διαθέσιμων προς χρήση υλικών είναι περιορισμένος. Τα πολυμερή και τα κεριά είναι κατάλληλα και συνήθως χρησιμοποιούμενα υλικά, λόγω της ιξώδους φύσης και της ικανότητάς τους να σχηματίζουν σταγόνες.



**Εικόνα 1.5: Διαδικασία προσθετικής καταργασίας με πίεση ακροφυσίου.**

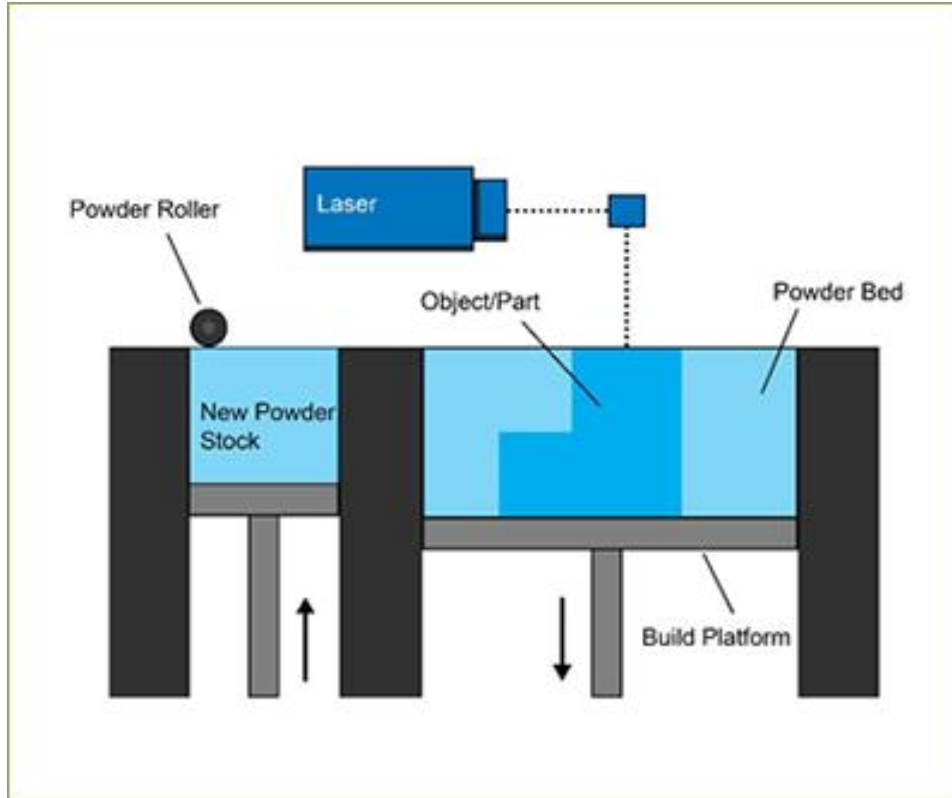
## Νανοσωματίδια με Πίεση Ακροφυσίου (NanoParticle Jetting - NPJ).

Στη διαδικασία αυτή το υλικό κατασκευής είναι μεταλλικά ή κεραμικά νανοσωματίδια, που περιβάλλονται από ελαιώδες ρευστό και δημιουργούν σταγονίδια, τα οποία ψεκάζονται από τα πιεστικά και παράγουν ένα εξαιρετικά λεπτό στρώμα. Το υλικό υποστήριξης ψεκάζεται με τον ίδιο τρόπο. Στην πλατφόρμα εκτύπωσης και σε θερμοκρασία 300oC το ρευστό εξατμίζεται και τα σταγονίδια δένουν μεταξύ τους, όπως οι νιφάδες χιονιού μετατρέπονται σε νερό. Υπάρχει ένα πολύ σύντομο χρονικό διάστημα (σχεδόν ένα μικροδευτερόλεπτο) κατά το οποίο πριν από την εξάτμιση είναι ακόμα σε υγρή μορφή. Αυτό σημαίνει ότι δημιουργείται ένα τέλειο πακέτο, χωρίς πορώδες επιφάνειες. Επιπλέον, το εκτυπωμένο αντικείμενο υποβάλλεται σε μια εύκολη διαδικασία πυροσυσσωμάτωσης σε κλίβανο ως ενιαία μονάδα, εξασφαλίζοντας ομοιομορφία προς όλες τις κατευθύνσεις. Τα στηρίγματα στον κλίβανο μετατρέπονται σε σκόνη και απομακρύνονται απλά.

## Σύντηξη στρώματος σκόνης (Powder Bed Fusion)

Η διαδικασία σύντηξης στρώματος σκόνης περιλαμβάνει τις ακόλουθες συνήθεις τεχνικές εκτύπωσης: Άμεση σύντηξη με μέταλλο λέιζερ (DMLS), τήξη με δέσμη ηλεκτρονίων (EBM), επιλεκτική θερμοσυσσωμάτωση (SHS), επιλεκτική τήξη με λέιζερ (SLM) και επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (SLS). Οι μέθοδοι συγχώνευσης σε σκόνη (PBF) χρησιμοποιούν είτε δέσμη λέιζερ είτε δέσμη ηλεκτρονίων για να λιώσει και να συνενώσει τη σκόνη υλικού μαζί. Η τήξη με δέσμη ηλεκτρονίων (EBM), οι μέθοδοι απαιτούν κενό, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν με μέταλλα και κράματα για τη δημιουργία λειτουργικών τμημάτων. Όλες οι διαδικασίες PBF περιλαμβάνουν την εξάπλωση του υλικού σε σκόνη σε σχέση με τα προηγούμενα στρώματα. Υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί που επιτρέπουν αυτό, συμπεριλαμβανομένου ενός κυλίνδρου ή μιας λεπίδας. Μια χοάνη ή μια δεξαμενή κάτω από την άκρη του κρεβατιού παρέχει φρέσκο υλικό. Η άμεση σύντηξη μετάλλων λέιζερ (DMLS) είναι η ίδια με την SLS, αλλά με τη χρήση μετάλλων και όχι πλαστικών. Η διαδικασία συσσωρεύει τη σκόνη, το στρώμα από το στρώμα. Η επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση διαφέρει από τις άλλες μεθόδους με τη χρήση θερμαινόμενης κεφαλής θερμικής εκτύπωσης για τη συνένωση υλικού σε σκόνη. Όπως και πριν, τα στρώματα προστίθενται με κυλίνδρους ανάμεσα στη σύντηξη των στρωμάτων. Μια πλατφόρμα χαμηλώνει ανάλογα το μοντέλο.





Εικόνα 1.6: Διαδικασία προσθετικής κατασκευής με σύντηξη στρώματος σκόνης.

## Επιλεκτική Σύντηξη με την Χρήση Ακτίνων Λέιζερ (Selective Laser Sintering – SLS).

Στην τεχνική αυτή μια ακτίνα λέιζερ διοξειδίου του άνθρακα CO<sub>2</sub> λιώνει και στερεοποιεί διάφορα υλικά (πλαστικά, κεραμικά ή μέταλλα) τα οποία βρίσκονται σε μορφή σκόνης. Ένας κύλινδρος "στρώνει" μια ποσότητα σκόνης κατάλληλου πάχους (τυπικά 0,075-0,1mm) πάνω σε μια επιφάνεια και μια κεφαλή λέιζερ διαγράφει το σχήμα της πρώτης διατομής με σάρωση σε εγκάρσιες τομές από ένα ψηφιακό 3D αρχείο, λιώνοντας και στερεοποιώντας επιλεκτικά την σκόνη. Κατόπιν η επιφάνεια κατέρχεται κατά το πάχος της επόμενης διατομής, τοποθετείται εκ νέου σκόνη την οποία στρώνει ο κύλινδρος και η κεφαλή λέιζερ διαγράφει την επόμενη διατομή στερεοποιώντας την πάνω στην πρώτη.

Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι την ολοκλήρωση του αντικειμένου. Η περίσσεια της σκόνης κάθε στρώματος λειτουργεί ως υποστήριγμα του κατασκευαζόμενου αντικειμένου. Επειδή, η πυκνότητα του τελικού εξαρτήματος, εξαρτάται από την μέγιστη ισχύ του λέιζερ και όχι από την διάρκεια της ακτινοβολίας, οι μηχανές S.L.S. χρησιμοποιούν συνήθως παλμικό λέιζερ. Η

μηχανή προθερμαίνει το κονιοποιημένο υλικό λίγο κάτω από το σημείο τήξης του, ώστε να καταστεί ευκολότερο για το λέιζερ να αυξήσει την θερμοκρασία των επιλεγμένων περιοχών στο σημείο τήξης του.

Μερικά μηχανήματα S.L.S., χρησιμοποιούν σκόνη ενός συστατικού, (π.χ. άμεση συσσωμάτωση μετάλλου με λέιζερ), ωστόσο οι περισσότερες μηχανές χρησιμοποιούν σκόνη δύο συστατικών, συνήθως είτε επικαλυμμένης σκόνης είτε ένα μείγμα σκόνης. Σε αντίθεση με την SLS, η DMLS και η SLM χρησιμοποιούν ενός συστατικού σκόνης. Σε ενός συστατικού σκόνης, το λέιζερ λιώνει μόνο την εξωτερική επιφάνεια των σωματιδίων, (τήξη επιφανείας) ενώνοντας τους στερεούς μη λιωμένους πυρήνες μεταξύ τους και με το προηγούμενο στρώμα.

Σε σύγκριση με άλλες μεθόδους παραγωγής με πρόσθεση υλικού, οι μηχανές αυτές μπορούν να παράγουν εξαρτήματα από ένα ευρύ φάσμα εμπορικά διαθέσιμων υλικών σε σκόνη. Ανάλογα με την πυκνότητα του υλικού, μπορούμε να πετύχουμε μηχανικές ιδιότητες, ανάλογες με αυτές από τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής. Σε πολλές περιπτώσεις, μεγάλος αριθμός εξαρτημάτων μπορεί να τοποθετηθεί μέσα στην σκόνη επιτρέποντας έτσι πολύ μεγάλη παραγωγικότητα. Αντίθετα με τις μεθόδους που παρουσιάστηκαν πριν, όπου υπάρχει μόνο μία μεταβατική φάση, στην διαδικασία SLS υπάρχουν δύο: από στερεό σε ρευστό και πίσω πάλι σε στερεό.

Ο εξοπλισμός SLS περιλαμβάνει: τον υπολογιστή ελέγχου, τον έλεγχο ατμόσφαιρας και το θάλαμο κατασκευής. Ο υπολογιστής ελέγχου βασίζεται σε λειτουργικό σύστημα UNIX, στο οποίο δημιουργούνται τα αρχεία STL και τα αρχεία τεμαχισμού του μοντέλου. Ο υπολογιστής ελέγχου παρακολουθεί όλη τη διαδικασία κατασκευής. Η μονάδα ελέγχου ατμόσφαιρας περιλαμβάνει τα όργανα φιλτραρίσματος και ανακύκλωσης των αερίων του θαλάμου κατασκευής. Διατηρούν σταθερή τη θερμοκρασία του αέρα μέσα στο θάλαμο και ρυθμίζουν την ποσότητα του αζώτου μέσα στη μονάδα. Ο θάλαμος κατασκευής περιλαμβάνει το laser και το σύστημα διαχείρισης της πούδρας. Το laser εστιάζεται με τα κατάλληλα οπτικά. Η σάρωση της επιφάνειας της πούδρας από την ακτίνα laser γίνεται με καθρέφτες. Στις δύο απέναντι πλευρές του κυλίνδρου υπάρχουν δύο αποθήκες υλικού: η μία τροφοδοτεί με νέο υλικό και η άλλη συλλέγει τα υπολείμματα από το στρώσιμο και την ευθυγράμμιση της επιφάνειας του υλικού. Το κτίσιμο των κομματιών ξεκινάει με την θέρμανση της ατμόσφαιρας του θαλάμου κατασκευής και γεμίζεται με άζωτο.

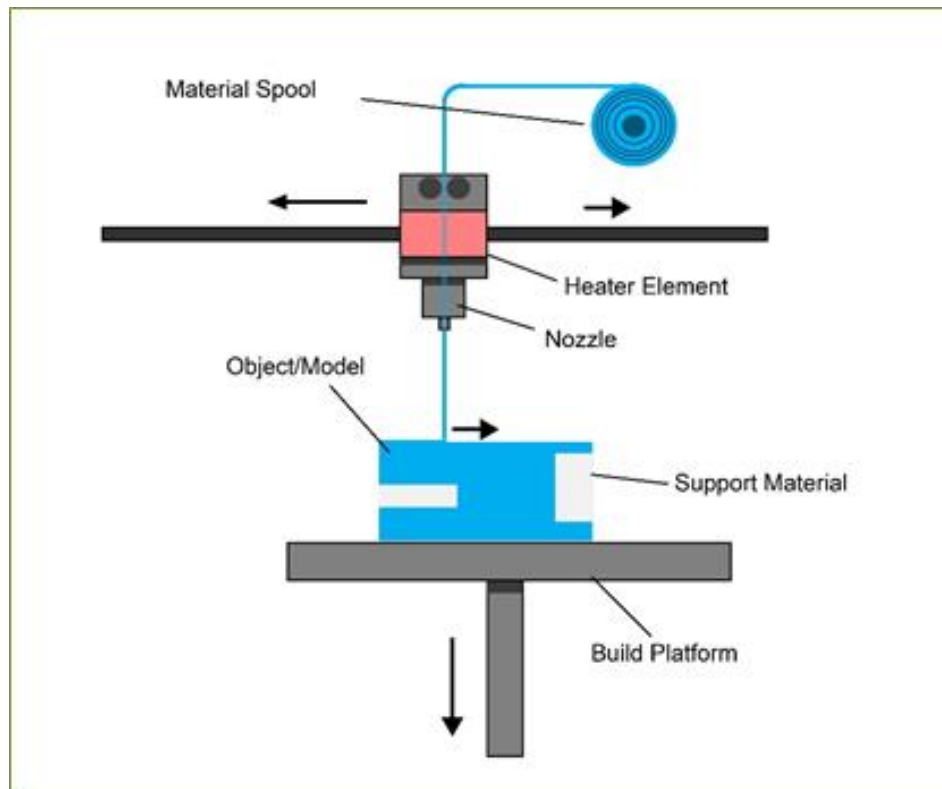
## Λιώσιμο με Δέσμη Ηλεκτρονίων (Electron Beam Melting – EBM).

Κατά τη διαδικασία, ένα θερμαινόμενο νήμα βολφραμίου εκπέμπει ηλεκτρόνια σε υψηλή ταχύτητα, τα οποία στη συνέχεια ελέγχονται από δύο μαγνητικά πεδία, ένα πηνίο εστίασης (focus coil) και ένα πηνίο εκτροπής (deflection coil). Το πηνίο εστίασης ενεργεί ως ένας μαγνητικός φακός και εστιάζει την δέσμη στην επιθυμητή διάμετρο, ενώ το πηνίο εκτροπής εκτρέπει την εστιασμένη δέσμη στο επιθυμητό σημείο σάρωσης του στρώματος σκόνης. Όταν τα υψηλής ενέργειας ηλεκτρόνια χτυπήσουν το στρώμα σκόνης, η κινητική τους ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια η οποία τήκει τη σκόνη. Κάθε στρώμα κρεβατιού σκόνη σαρώνεται σε δύο στάδια, το στάδιο της προθέρμανσης και το στάδιο της τήξης. Στην προθέρμανση, μία υψηλής ενέργειας δέσμη με μια υψηλή ταχύτητα σάρωσης χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του στρώματος σκόνης με πολλαπλά περάσματα. Στην τήξη, μια χαμηλής ενέργειας δέσμη με μία χαμηλή ταχύτητα σάρωσης χρησιμοποιείται για την τήξη της σκόνης. Όταν η σάρωση ένα στρώματος ολοκληρωθεί, η πλατφόρμα χτισίματος χαμηλώνει, μια νέα στρώση σκόνης υλικού απλώνεται και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι τον σχηματισμό του εξαρτήματος.

Η μέθοδος αυτή μπορεί να παράγει πλήρως πυκνά μεταλλικά μέρη, με καλές μηχανικές ιδιότητες και να διατηρεί τα χαρακτηριστικά του υλικού. Θεωρείται μια πολύ αποδοτική διαδικασία με μικρότερο ενεργειακό κόστος. Χρειάζεται να λειτουργεί εν κενό στον θάλαμο κατασκευής, σε αντίθεση με τις ανωτέρω μεθόδους που χρησιμοποιούν αδρανές προστατευτικό αέριο (Gibson, Rosen & Stucker, 2015). Επιπρόσθετα η επιφάνεια φινιρίσματος και η ανάλυση είναι μέτρια σε σχέση με τις ανωτέρω μεθόδους όπου είναι άψογο.

## Εξώθηση υλικών (Material Extrusion)

Η μοντελοποίηση εναπόθεσης τηγμένου υλικού (FDM) είναι μια κοινή διεργασία εξώθησης υλικών και είναι σήμα κατατεθέν από την εταιρεία Stratasys. Το υλικό τραβιέται μέσω ενός ακροφυσίου, όπου θερμαίνεται και κατόπιν εναποτίθεται στρώμα από στρώμα. Το ακροφύσιο μπορεί να κινείται οριζόντια και μια πλατφόρμα να κινείται πάνω και κάτω κατακόρυφα μετά από κάθε εναπόθεση νέου στρώματος. Είναι μια κοινώς χρησιμοποιούμενη τεχνική που χρησιμοποιείται σε πολλούς φθηνούς, οικιακούς και χόμπι 3D εκτυπωτές. Η διαδικασία έχει πολλούς παράγοντες που επηρεάζουν την τελική ποιότητα του μοντέλου, αλλά έχει μεγάλο δυναμικό και βιωσιμότητα όταν αυτοί οι παράγοντες ελέγχονται με επιτυχία. Ενώ το FDM είναι παρόμοιο με όλες τις άλλες διαδικασίες εκτύπωσης 3D, καθώς χτίζει το στρώμα από το στρώμα, ποικίλλει στο γεγονός ότι το υλικό προστίθεται μέσω ακροφυσίου υπό συνεχή πίεση και σε συνεχή ροή. Αυτή η πίεση πρέπει να διατηρείται σταθερή και με σταθερή ταχύτητα ώστε να επιτρέπει ακριβή αποτελέσματα. Οι στιβάδες υλικού μπορούν να συνδεθούν με έλεγχο θερμοκρασίας ή με τη χρήση χημικών παραγόντων. Το υλικό προστίθεται συχνά στο μηχάνημα σε μορφή καρουλιού όπως φαίνεται στο διάγραμμα.



Εικόνα 1.7: Διαδικασία προσθετικής κατασκευής με εξώθηση υλικών.

Μοντελοποίηση Εναπόθεσης Τηγμένου Υλικού (Fused Deposition Modeling - FDM), Κατασκευή Τηγμένου Νήματος (Fused Filament Fabrication - FFF) και Κατασκευή Σύνθετου Νήματος (Composite Filament Fabrication - CFF).

Έχει αναφερθεί μερικές φορές και ως πλαστική εκτύπωση με πίεση ακροφυσίου (Plastic Jet Printing - PJP). Μηχανήματα αυτής της τεχνολογίας μπορούν να κινούνται σε τρεις γραμμικές κατευθύνσεις (x), (y) και (z), γνωστές ως και καρτεσιανές συντεταγμένες. Αποτελούνται από μία ή περισσότερες κεφαλές εξώθησης, μία βάση και από βηματικούς κινητήρες ή κινητήρες σέρβο, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να μετακινήσουν το νήμα, τις κεφαλές και την βάση. Το υλικό σε νηματώδη μορφή ξετυλίγεται από ένα καρούλι και τροφοδοτεί συνεχώς τη μηχανή. Το νήμα σπρώχνεται μέσα στο ακροφύσιο της κεφαλής εξώθησης, όπου θερμαίνεται. Καθώς το ακροφύσιο πετυχαίνει την επιθυμητή θερμοκρασία, ανάλογα με το είδος του υλικού που χρησιμοποιείται, εναποθέτει πάνω στη βάση λεπτές στρώσεις του υλικού, το οποίο βρίσκεται σε ημίρρευστη κατάσταση. Η βάση είναι συνήθως από γυαλί ή αλουμίνιο και θερμαίνεται για την αποφυγή στρέβλωσης ή ραγίσματος της κατασκευής. Το υλικό σκληραίνει αμέσως μετά από την εξώθησή του από το ακροφύσιο, αφενός διότι η βάση βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία, αφετέρου ανεμιστήρας υπάρχει πλησίον της κεφαλής τροφοδοτώντας συνεχώς αέρα για την ψύξη του υλικού. Στο ακροφύσιο γίνεται ενεργοποίηση και απενεργοποίηση της ροής και μετακινείται στο επίπεδο σε οριζόντιες (x) και κάθετες (y) κατευθύνσεις, σύμφωνα με ένα ελεγκτή αριθμητικού ελέγχου (N.C. Controller). Κατόπιν η βάση κατέρχεται στην κατεύθυνση (z) όσο και το πάχος της στρώσης και η κεφαλή εναποθέτει το δεύτερο στρώμα πάνω στο πρώτο.

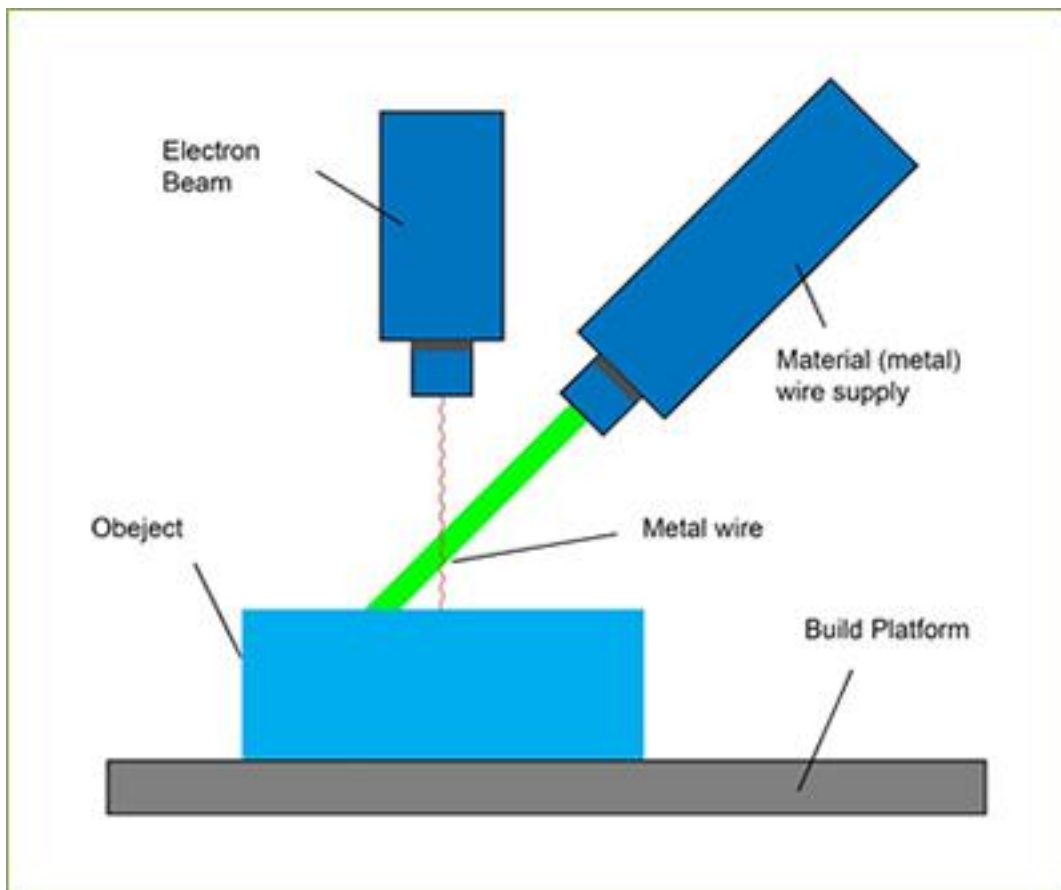
Υπάρχουν διαφορετικές αρχιτεκτονικές σχετικά με τους άξονες κίνησης αλλά η φιλοσοφία είναι ίδια. Μπορεί δηλαδή η βάση να κινείται στον (y) άξονα και η κεφαλή στον (x) και (z) άξονα. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι την ολοκλήρωση του αντικειμένου παίρνοντας τη τελική μορφή από τα διαδοχικά επίπεδα (layers). Για την υποστήριξη των ευαίσθητων θέσεων του αντικειμένου (με μεγάλη κλίση προεξοχής) κατασκευάζονται υποστηρίγματα από το ίδιο υλικό ή διαφορετικού υλικού από μια δεύτερη κεφαλή που αφαιρούνται εύκολα από το τελικό πρωτότυπο. Μπορεί να εκτυπώσει σε πολλά διαφορετικά χρώματα και με πληθώρα υλικών που βρίσκονται σε μορφή νήματος με διαφορετικά χαρακτηριστικά.

## Robocasting ή Κατευθυνόμενη Γραφή Μελανιού (Direct Ink Writing -DIW), Βιοεξώθηση (Bioextrusion).

Στην εξώθηση το υλικό πρέπει να είναι σε ρευστή μορφή που μπορεί γρήγορα να στερεοποιηθεί. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε, όπως στην προηγούμενη μέθοδο, με θερμική διεργασία λιώσιματος είτε χρησιμοποιώντας χημική διεργασία όπου ένα υλικό, που βρίσκεται σε μορφή τζέλ σκληραίνει ή ξεραίνεται (στεγνώνει από υγρασία). Συνήθως ένα ρευστό αναφερόμενο και ως μελάνη, όπως κεραμικός πολτός, διατηρεί το σχήμα του αμέσως μετά την εξώθηση. Είναι συνήθως πολύ εύθραυστο και μαλακό και γι' αυτό ξήρανση και σύντηξη ακολουθούν για να δώσουν τις επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται και στην βιοεξώθηση (Bioextrusion) για την δημιουργία βιοσυμβατών και / ή βιοδιασπώμενων συστατικών που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία πλαισίων, που φιλοξενούνται από ζωικά κύτταρα για τον σχηματισμό ιστών (μηχανική των ιστών). Χρησιμοποιούνται πολυμερικές ουσίες σε μορφή πάστας ή υδρογέλες (hydrogels), που είναι πολυμερή αδιάλυτα στο νερό αλλά μπορούν να διασπαστούν στο νερό. Βασίζονται σε φυσικά ή συνθετικά πολυμερή, αλλά τα φυσικά πολυμερή είναι ίσως πιο βιοσυμβατά. Επιπρόσθετα λόγω των ασθενών δεσμών που αναπτύσσουν μεταξύ τους είναι χρήσιμα για την ανάπτυξη μαλακών ιστών.

## Κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας (Directed Energy Deposition)

Η εναπόθεση κατευθυνόμενης ενέργειας (DED) καλύπτει μια σειρά ορολογιών: «Σχεδιασμός με λέιζερ, κατευθυνόμενη κατασκευή φως, άμεση εναπόθεση μετάλλου, 3D επένδυση με λέιζερ» Πρόκειται για μια πιο σύνθετη διαδικασία εκτύπωσης που χρησιμοποιείται συνήθως για την επιδιόρθωση ή την προσθήκη πρόσθετου υλικού στα υπάρχοντα εξαρτήματα). Μια τυπική μηχανή DED αποτελείται από ένα ακροφύσιο τοποθετημένο σε έναν βραχίονα πολλαπλών αξόνων, ο οποίος αποθέτει τη λιωμένη ύλη πάνω στην καθορισμένη επιφάνεια, όπου στερεοποιείται. Η διαδικασία είναι παρόμοια κατ' αρχήν με την εξώθηση υλικού, αλλά το ακροφύσιο μπορεί να κινηθεί σε πολλές κατευθύνσεις και δεν είναι στερεωμένο σε συγκεκριμένο άξονα. Το υλικό, το οποίο μπορεί να εναποτεθεί από οποιαδήποτε γωνία λόγω μηχανών 4 και 5 αξόνων, τήκεται κατά την εναπόθεση με λέιζερ ή δέσμη ηλεκτρονίων. Η διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί με πολυμερή, κεραμικά, αλλά τυπικά χρησιμοποιείται με μέταλλα, με τη μορφή είτε σκόνης είτε σύρματος.



**Εικόνα 1.8:** Διαδικασία προσθετικής κατασκευής με κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας.

## Απόθεση Μετάλλου Βασισμένη σε Λέιζερ (Laser- Based Metal Deposition - LBMD).

Είναι μία τεχνολογία βασισμένη στην εναπόθεση σκόνης υλικού με χρήση λέιζερ. Η κεφαλή εναποθέσεως είναι συνήθως μια ολοκληρωμένη συλλογή από οπτικά λέιζερ, ακροφύσιο/α σκόνης, σωληνώσεις αδρανούς αερίου, και σε ορισμένες περιπτώσεις αισθητήρες. Το υπόστρωμα μπορεί να είναι είτε μια επίπεδη πλάκα πάνω στην οποία θα κατασκευαστεί το καινούργιο αντικείμενο ή ένα υπάρχον εξάρτημα πάνω στο οποίο θα προστεθεί επιπλέον γεωμετρία. Η εναπόθεση ελέγχεται από μία σχετική διαφορική κίνηση μεταξύ του υποστρώματος και της κεφαλής εναποθέσεως. Αυτή η διαφορική κίνηση επιτυγχάνεται είτε με τη μετακίνηση της κεφαλής εναποθέσεως, είτε μετακινώντας το υπόστρωμα, ή με συνδυασμό των δύο. Υπάρχουν τυπικά συστήματα 3 αξόνων, σύμφωνα με τα οποία η εναπόθεση πραγματοποιείται κατακόρυφα. Ωστόσο υπάρχουν και συστήματα με 4 ή 5 άξονες που χρησιμοποιούν είτε περιστροφικές πλάκες ή ρομποτικούς βραχίονες.

Η Laser Engineered Net Shaping (LENS) αποτελεί μία από τις πρώτες DED διεργασίες, αναπτύχθηκε από τα εθνικά εργαστήρια "Sandia" στις ΗΠΑ, και στο εμπόριο ξεκίνησε το 1997 από την εταιρεία Optomec, με το μοντέλο "LENS 850" και με ικανότητα διπλής κεφαλής. Η επεξεργασία των υλικών πραγματοποιείται μέσα σε ένα κλειστό θάλαμο όπου αφαιρείται το οξυγόνο και ανατροφοδοτείται αδρανές αέριο (συνήθως αργόν).

Η εταιρεία POM, είναι μία άλλη εταιρία κατασκευής LBMD μηχανημάτων, τη τεχνολογία της οποίας έχει αποκτήσει η εταιρεία DM3D Technology. Το σύστημα διαθέτει πέντε (5) άξονες, δυνατότητα ομοαξονικής τροφοδοσίας σκόνης για το χτίσιμο των μερών και χρησιμοποιεί την προσέγγιση θωράκισης με αέριο. Χρησιμοποιεί λέιζερ CO<sub>2</sub>, το οποίο έχει το πλεονέκτημα να είναι μια οικονομική, υψηλής παραγόμενης πηγής θερμότητας. Όμως, η απορροφητικότητα των περισσότερων υλικών είναι πολύ μικρότερη σε μήκη κύματος λέιζερ CO<sub>2</sub>, από ότι για Nd-YAG (neodymium-doped yttrium aluminium garnet; Nd:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>) ή λέιζερ ιών και έτσι σχεδόν όλα τα νέα DED συστήματα χρησιμοποιούν τώρα ίνες, διόδους, ή λέιζερ Nd-YAG. Για συστήματα που εξακολουθούν να χρησιμοποιούν λέιζερ CO<sub>2</sub>, προκειμένου να αντισταθμίσουν την μικρή απορροφητικότητα, εφαρμόζεται μεγαλύτερο ποσό ενέργειας λέιζερ, με αποτέλεσμα μια μεγαλύτερη επηρεασμένη θερμική ζώνη και μία συνολική θερμότητα εισόδου.

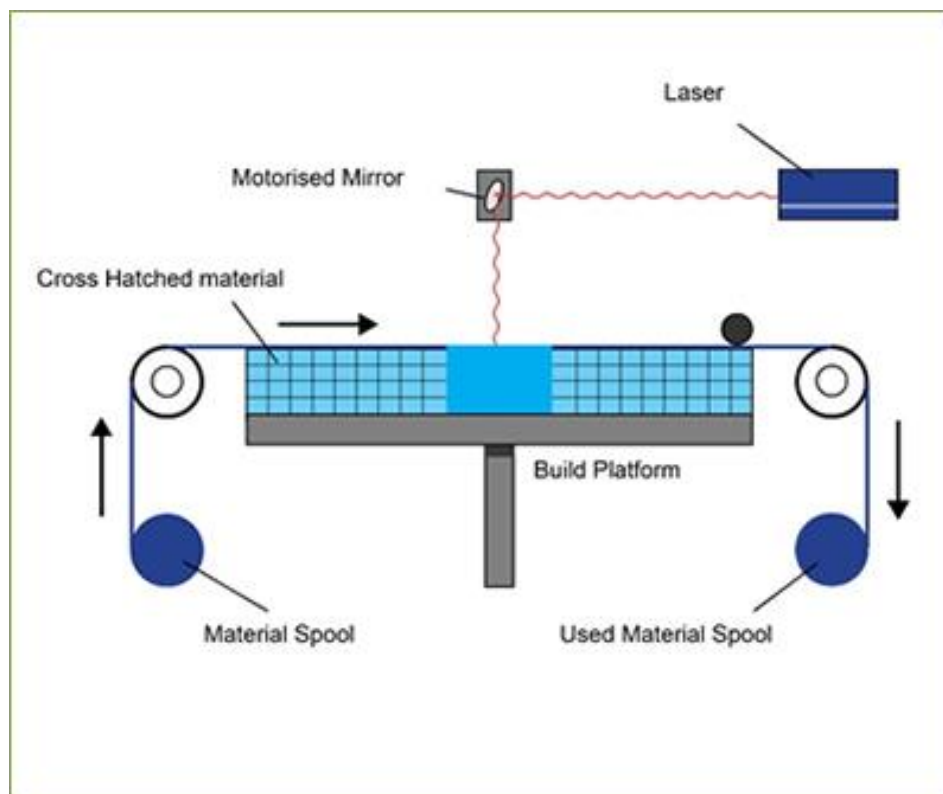


Απόθεση Μετάλλου Βασισμένη σε Δέσμη Ηλεκτρονίων (Electron Beam Based Metal Deposition).

Είναι μία τεχνολογία βασισμένη στην εναπόθεση υλικού σε μορφή σύρματος με χρήση δέσμης ηλεκτρονίων ως πηγή θερμότητας. Η μέθοδος Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM™), η οποία είναι αποκλειστική της Sciaky, Inc. δημιουργεί εξαρτήματα μέσα σε ένα θάλαμο εν κενού (απουσία οξυγόνου). Ξεκινώντας με ένα 3D μοντέλο σε ένα πρόγραμμα CAD, το οποίο μετατρέπεται σε κώδικα CNC, η δέσμη ηλεκτρονίων εναποθέτει μέταλλο, μέσω της τροφοδότησης σύρματος, στρώμα πάνω σε στρώμα, έως ότου το τμήμα φθάσει σχεδόν στο τελικό σχήμα, οπότε και υποβάλλεται στο τελικό στάδιο θερμικής επεξεργασίας και κατεργασίας. Η ίδια η διαδικασία είναι επεκτάσιμη σε μέγεθος, για τα κατασκευαστικά αντικείμενα, από χιλιοστά σε πολλαπλά μέτρα, με μόνο περιορισμό το μέγεθος του θαλάμου εν κενού. Η Electron Beam Freeform Fabrication (EBF3) αναπτύχθηκε στο ερευνητικό κέντρο Langley της NASA, ως ένας τρόπος για την κατασκευή ή / και επιδιόρθωση μεταλλικών μερών ή εργαλείων σε ένα αεροδιαστημικό σύστημα. Είναι μία διαδικασία που χρησιμοποιεί ένα εκτοξευτή δέσμης ηλεκτρονίων, έναν διπλό τροφοδότη σύρματος και έλεγχο από υπολογιστή. Χρησιμοποιείται δέσμη ηλεκτρονίων καθότι αφενός λειτουργεί αποτελεσματικά εν κενό, αλλά όχι με την παρουσία αδρανών αερίων και έτσι είναι κατάλληλοι για την διαστημικό περιβάλλον, αφετέρου είναι πολύ πιο αποτελεσματική στη μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με τα περισσότερα ακτίνες λέιζερ, το οποίο εξοικονομεί τους σπάνιους ηλεκτρικούς πόρους. Επιπρόσθετα προτιμάται η τροφοδοσία σύρματος επειδή οι σκόνες υλικού είναι δύσκολο να διαχειριστούν με ασφάλεια σε περιβάλλοντα χαμηλής βαρύτητας. Η EBF3 χρησιμοποιείται για την κατασκευή δοκών τιτανίου για τις κάθετες ουρές των F-35 Joint Strike Fighter. Λιγότερη σπατάλη τιτανίου και μείωση του χρόνου κατεργασίας οδηγεί σε εξοικονόμηση πόρων.

## Συγκόλληση φύλλων (Sheet Lamination)

Οι διεργασίες στρωματοποίησης φύλλων περιλαμβάνουν την παραγωγή υπερηχητικών προσθέτων (UAM) και την κατασκευή πολυστρωματικών αντικειμένων (LOM). Η διαδικασία κατασκευής προσθέτων υπερήχων χρησιμοποιεί φύλλα ή κορδέλες από μέταλλο, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους με υπερηχητική συγκόλληση. Η διαδικασία απαιτεί επιπλέον κατεργασία με CNC και αφαίρεση του μη συνδεδεμένου μετάλλου, συχνά κατά τη διάρκεια της διαδικασίας συγκόλλησης. Η κατασκευή πλαστικοποιημένου αντικειμένου (LOM) χρησιμοποιεί μια παρόμοια προσέγγιση στρώσεων ανά στρώση, αλλά χρησιμοποιεί χαρτί ως υλικό και συγκολλητική ουσία αντί για συγκόλληση. Η διαδικασία LOM χρησιμοποιεί μια μέθοδο διασταυρούμενης εκκόλαψης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκτύπωσης για να επιτρέψει την εύκολη αφαίρεση μετά την κατασκευή. Τα πλαστικοποιημένα αντικείμενα χρησιμοποιούνται συχνά για αισθητικά και οπτικά μοντέλα και δεν είναι κατάλληλα για δομική χρήση. Το UAM χρησιμοποιεί μέταλλα και περιλαμβάνει αλουμίνιο, χαλκό, ανοξείδωτο χάλυβα και τιτάνιο. Η διαδικασία είναι χαμηλή θερμοκρασία και επιτρέπει την δημιουργία εσωτερικών γεωμετριών. Η διαδικασία μπορεί να συνδέει διαφορετικά υλικά και απαιτεί σχετικά μικρή ενέργεια, καθώς το μέταλλο δεν τήκεται.



Εικόνα 1.9: Διαδικασία προσθετικής κατεργασίας με συγκόλληση φύλλων.

Συγκόλληση ή Κόλληση (Gluing or Adhesive Bonding).

Παραγωγή Αντικειμένων με Συγκόλληση (Laminated Object Manufacturing – LOM).

Μία από τις πρώτες τεχνικές που εμπορευματοποιήθηκε το 1991, βασίζεται στην κατασκευή αντικειμένων με τη συγκόλληση λεπτών φύλλων (σε μορφή ρολών χαρτιού) υλικού. Υπάρχουν ουσιαστικά δύο ρολά χαρτιού όπου το ένα απελευθερώνει υλικό (χαρτί) και το άλλο μαζεύει. Το πρώτο υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν το χαρτί, ενώ αργότερα χρησιμοποιήθηκαν και άλλα υλικά (αδιάβροχο χαρτί, πλαστικά αλλά και λεπτές ταινίες κεραμικών υλικών ή μετάλλων υπό μορφή σκόνης). Οι συσκευές LOM λειτουργούν ως εξής: Μια διάταξη τροφοδοσίας τοποθετεί το πρώτο φύλλο χαρτιού, που φέρει επίστρωση θερμοκολλητικής ουσίας (heat-activated glue), πάνω σε μια βάση και κατόπιν ένας θερμαινόμενος κύλινδρος περνά πάνω από αυτό πιέζοντάς το ώστε να κολλήσει πάνω σε αυτήν. Στη συνέχεια μια κεφαλή λέιζερ CO2 "κόβει" το σχήμα της διατομής πάνω στο χαρτί και κατόπιν χαράζει μικρές εγκοπές στο υπόλοιπο τμήμα του ώστε να διευκολύνεται η απόσπαση του αντικειμένου όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία της κατασκευής του. Αφού κοπεί το πρώτο στρώμα, η βάση κατέρχεται, ένα νέο φύλλο προωθείται από τη διάταξη τροφοδοσίας και κατόπιν η βάση ανέρχεται λίγο ώστε ο θερμαινόμενος κύλινδρος να πιέσει και να κολλήσει το δεύτερο φύλλο στο πρώτο. Ακολουθεί η κοπή της νέας διατομής από την κεφαλή λέιζερ και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την ολοκλήρωση του αντικειμένου.

Το πάχος του χαρτιού δεν είναι σταθερό. Συνεπώς, ένας αισθητήρας μετράει το πάχος του παρόντος χαρτιού και το μοντέλο κόβεται ανάλογα. Σε πολλές περιπτώσεις απαιτείται η επικάλυψη του αντικειμένου με χρώμα ή βερνίκι ώστε να μη προσβάλλεται και παραμορφώνεται από την υγρασία. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου, μοιάζουν με αυτά του ξύλου. Όταν χρησιμοποιούνται ταινίες κεραμικών υλικών ή μετάλλων υπό μορφή σκόνης το αντικείμενο πρέπει να υποστεί μια διαδικασία "σύντηξης" (sintering) για την αύξηση της αντοχής του.

## Επιλεκτική Συγκόλληση Εναπόθεσης (Selective Deposition Lamination – SDL).

Στην διαδικασία αυτή πραγματοποιείται επιλεκτική κατάθεση της κόλλας για να συνδέσει τα φύλλα χαρτιού. Μια πολύ υψηλότερης πυκνότητας σταγόνων κόλλας εναποτίθενται στην περιοχή που θα γίνει το τμήμα, και μία πολύ χαμηλότερης πυκνότητας εφαρμόζεται στη γύρω περιοχή που θα χρησιμεύσει ως το υπόστρωμα. Αυτό οδηγεί σε πολύ γρήγορη και εύκολη ανασκαφή του τμήματος από το χαρτί υποστήριξης όταν ολοκληρωθεί η εκτύπωση. Στην παλιά διαδικασία LOM, όλα ήταν κολλημένα μαζί, συμπεριλαμβανομένου και του υλικού υποστήριξης γύρω από το μοντέλο με την ίδια ένταση. Η εκσκαφή του μοντέλου συχνά είχε αποτέλεσμα την εν μέρει θραύση. Επιπρόσθετα η κόλλα δεν προ εφαρμόζεται στο φύλλο, όπως στην LOM, αλλά εφαρμόζεται μετά την κοπή του προφίλ. Μπορεί να παράγει έγχρωμες 3D εκτυπώσεις. Δεδομένου ότι τα προϊόντα είναι ξύλινα, μπορούν περαιτέρω να επεξεργαστούν χρησιμοποιώντας κάποια τεχνική φινιρίσματος ξύλου.

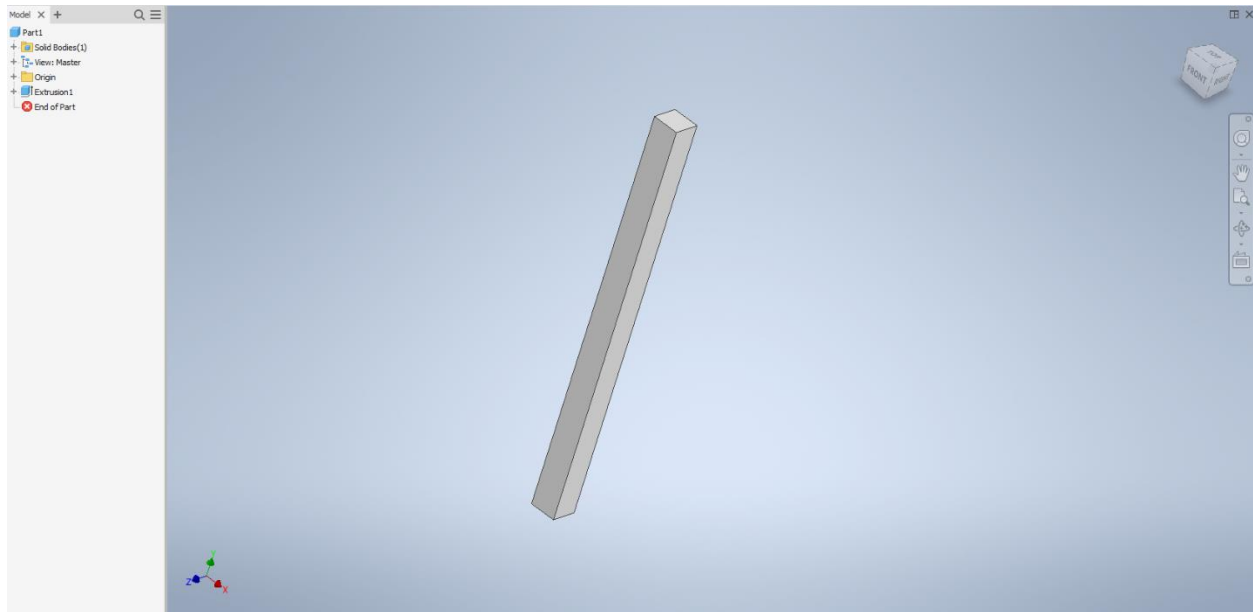
## Πειραματικό μέρος

### Σκοπός

Σκοπός του πειράματος είναι η διερεύνηση του τρόπου τρισδιάστατης εκτύπωσης υλικού PLA με τον οποίο θα έχουμε τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες σε κάμψη. Συγκεκριμένα θα εξεταστεί αυτό δημιουργώντας δοκίμια με διαφορετική τιμή θερμοκρασίας εκτύπωσης, ταχύτητα εκτύπωσης, διαφορετικό μοτίβο γεμίσματος και με διαφορετικό τρόπο εκτύπωσης. Το υλικό PLA είναι πολυμερές το οποίο κατασκευάζεται από ανανεώσιμους πόρους (αραβόσιτο, σακχαρότευτλα). Το θερμοπλαστικό υλικό αυτό είναι μη τοξικό, βιοδιασπώμενο και έτσι δεν επιβαρύνει το περιβάλλον. Προσφέρει αντοχή και εκτυπώνεται σε θερμοκρασίες 180-220c. Η τεχνολογία εκτύπωσης που χρησιμοποιήθηκε είναι η FDM η οποία βασίζεται στην τήξη και την επιλεκτική εναπόθεση μιας λεπτής ίνας θερμοπλαστικού για τον σχηματισμό αλληπάλληλων στρώσεων οι οποίες και θα δημιουργήσουν το τελικό αντικείμενο. Τέλος οι τιμές των παραμέτρων που επιλέχθηκαν είναι 180-195-210 για την θερμοκρασία εξωθητή, 25mm/s-38mm/s-50mm/s για την ταχύτητα εκτύπωσης, ευθύγραμμο-τριγωνικό-κυψελωτό για το μοτίβο γεμίσματος και x-y-z για τον άξονα με τον οποίο εκτυπώθηκαν.

## Διαδικασία πειράματος

1. Αρχικά σχεδιάστηκε το δοκίμιο με διαστάσεις 8mm πλάτος, 8mm πάχος και 120mm μήκος με την βοήθεια του μηχανολογικού σχεδιαστικού προγράμματος Inventor της εταιρίας Autodesk.



**Εικόνα 2.1: το δοκίμιο στο πρόγραμμα Inventor της Autodesk**

2. Μετατροπή του αρχείου σε .stl ώστε να μπορεί να διαβαστεί και να φορτωθεί στο λογισμικό του εκτυπωτή.

3. Από το λογισμικό του εκτυπωτή FlashPrint το δοκίμιο ρυθμίστηκε σε 9 διαφορετικά προφίλ. Συγκεκριμένα τα 9 αυτά προφίλ ρυθμίστηκαν ανάλογα με τις εξής παραμέτρους:

- Θερμοκρασία

Θερμοκρασίες εξωθητή: **180°C - 195°C - 210°C**

Η θερμοκρασία του τραπεζιού ήταν ορισμένη σε όλα τα δοκίμια **45°C**

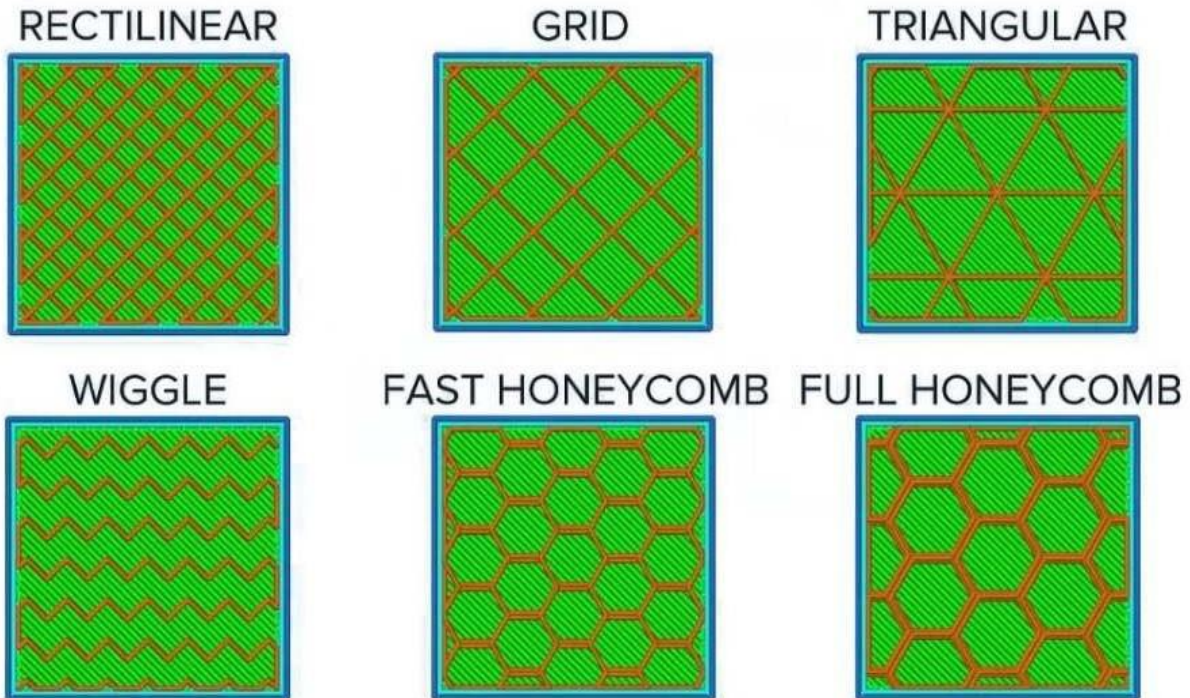
- ταχύτητα εκτύπωσης

Ταχύτητα εκτύπωσης εξωθητή: **25mm/s - 38mm/s - 50mm/s**

- μοτίβο γεμίσματος

Το εσωτερικό των δοκιμών είχαν τα εξής μοτίβα:

Ευθύγραμμο - Τριγωνικό - κυψελωτό

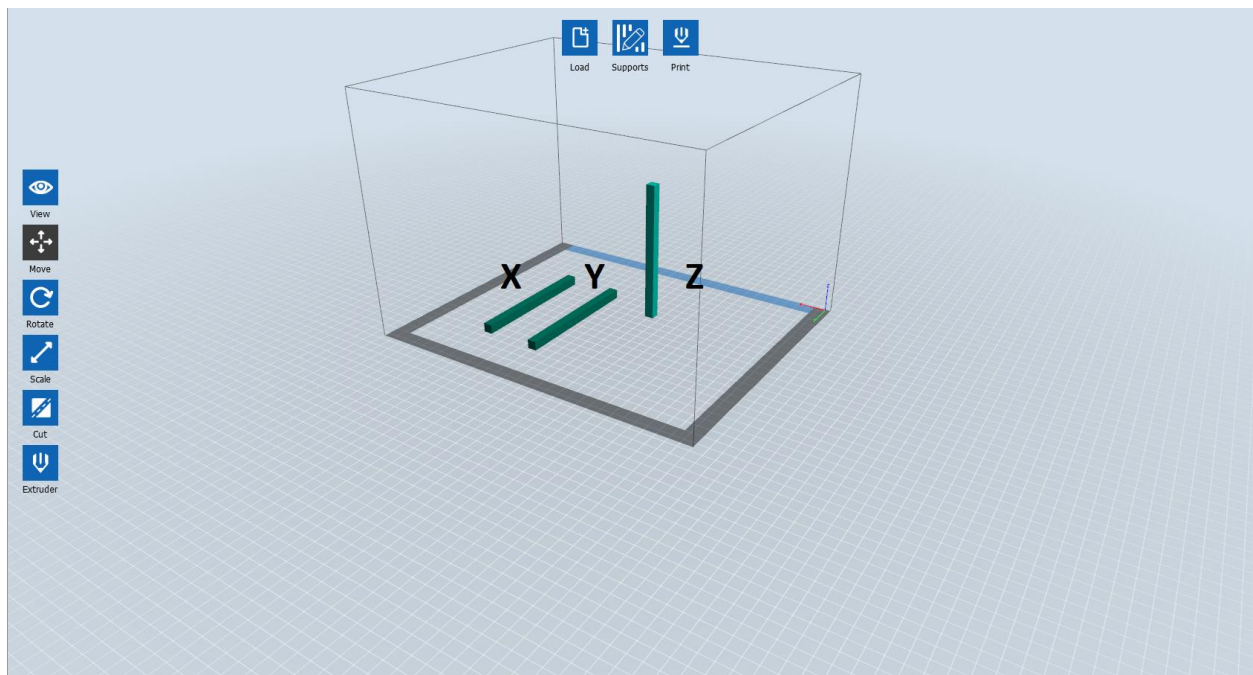


Εικόνα 2.2: Κοινά εσωτερικά γεμίσματα τρισδιάστατης εκτύπωσης

➤ τρόπος εκτύπωσης

Ο άξονας με τον οποίο θα εκτυπωθούν :

X - Y - Z



**Εικόνα 2.3: ο τρόπος εκτύπωσης των δοκιμίων**

Σύμφωνα με αυτή τη παράμετρο η εκτύπωση στον X,Y άξονα είναι με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, όμως κατά την διαδικασία ελέγχου κάμψης τα δοκίμια που έχουν ως παράμετρο Y θα περιστραφούν κατά 90°.



#### 4.Επιλογή των δοκιμών

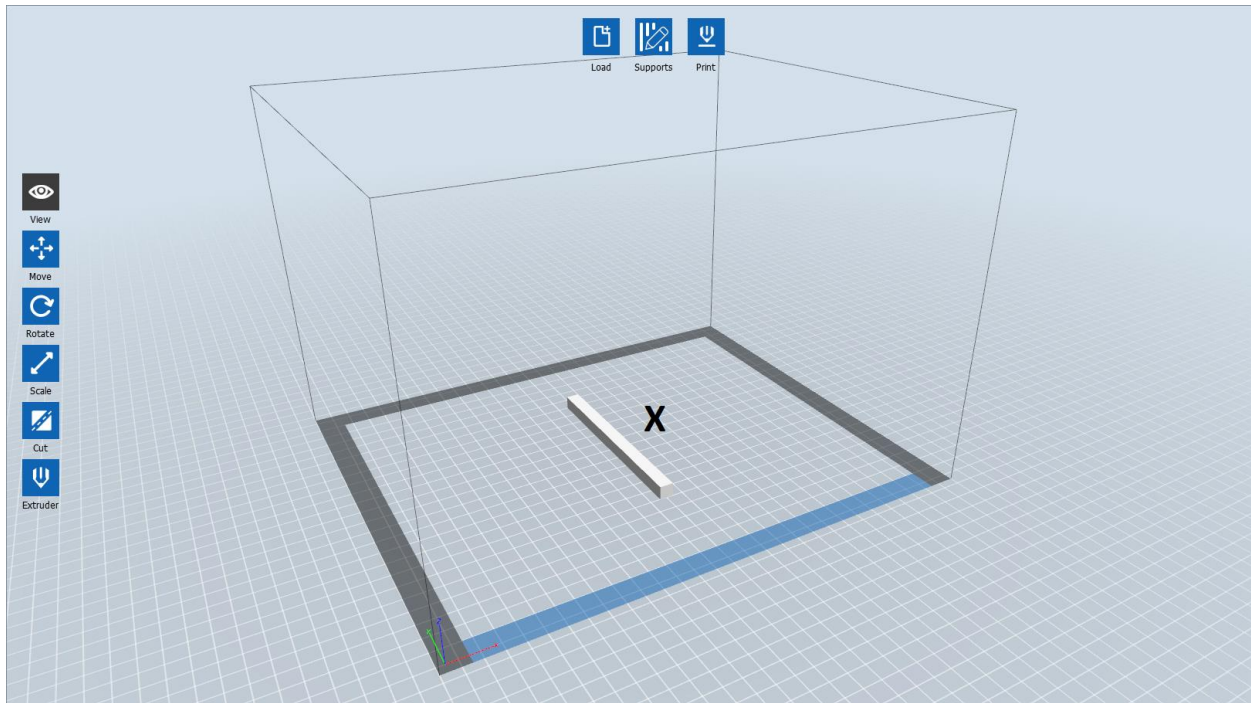
Η επιλογή έγινε σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα με βάση τις τέσσερις παραμέτρους:

Α.ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ( $^{\circ}\text{C}$ )	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ( $\text{mm/s}$ )	ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΓΕΜΙΣΜΑ	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ
1	180	25	Ευθύγραμμο	X
2	180	38	κυψελωτό	Y
3	180	50	Τριγωνικό	Z
4	195	25	κυψελωτό	Z
5	195	38	Τριγωνικό	X
6	195	50	Ευθύγραμμο	Y
7	210	25	Τριγωνικό	Y
8	210	38	Ευθύγραμμο	Z
9	210	50	κυψελωτό	X

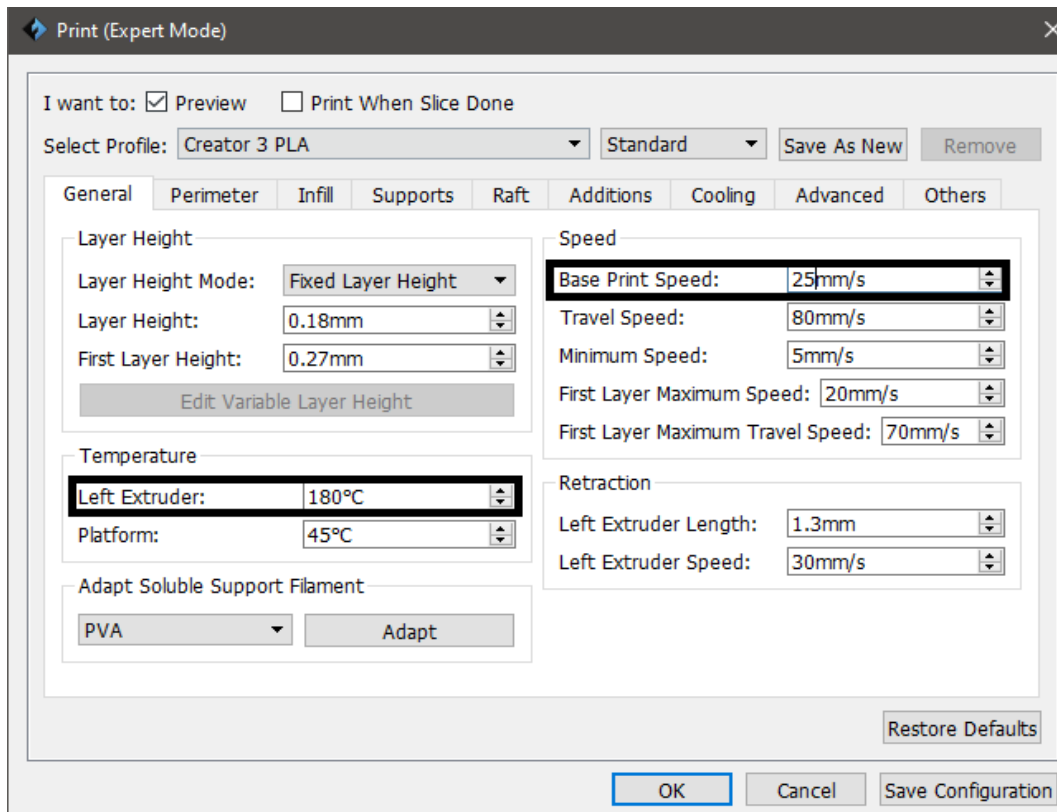
Πίνακας 2: επιλογή δοκιμών

Τα δοκίμια επιλέχθηκαν σύμφωνα με τον σχεδιασμό των πειραμάτων (DOE). Για το πείραμα αυτό για τον εντοπισμό του καλύτερου συνδυασμού παραμέτρων και την εύρεση του δοκιμίου με τις βέλτιστες μηχανικές ιδιότητες χρειάστηκαν συνολικά 81 πειράματα και συγκεκριμένα από 9 δοκίμια με 4 διαφορετικές παραμέτρους και από 3 τιμές η κάθε παράμετρος  $3^4 = 81$ .

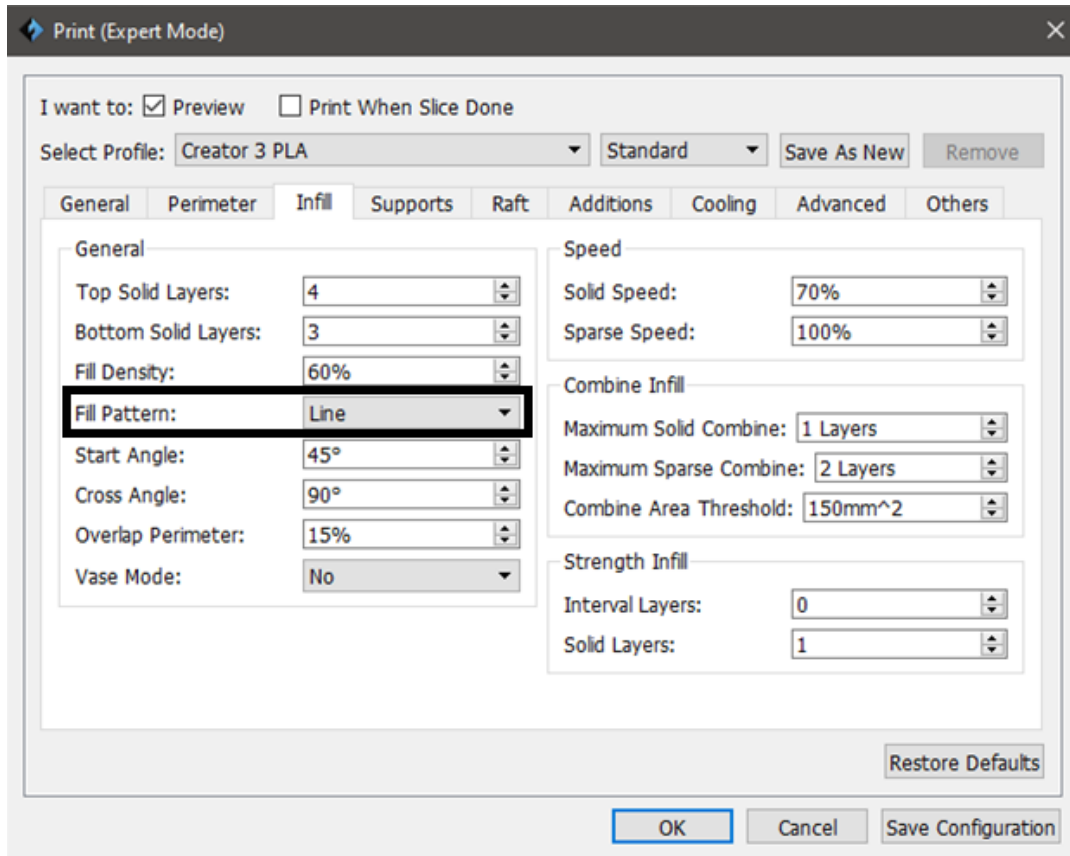
### Δοκίμιο 1



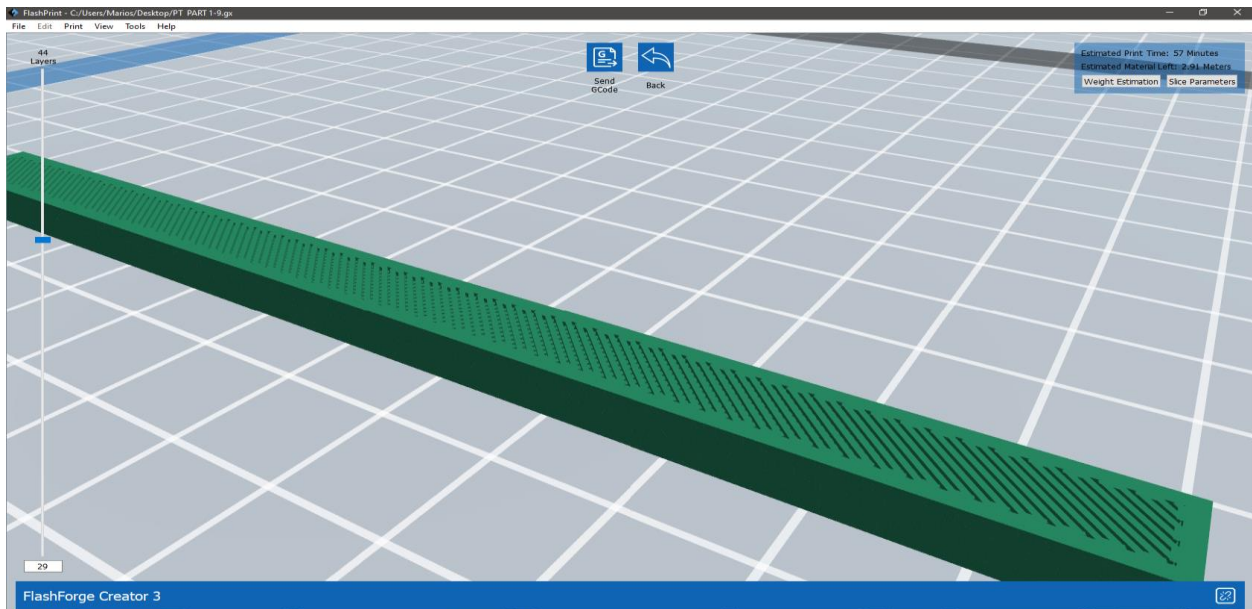
Εικόνα 2.4: τρόπος εκτύπωσης δοκιμίου 1



Εικόνα 2.5: θερμοκρασία και ταχύτητα δοκιμίου 1

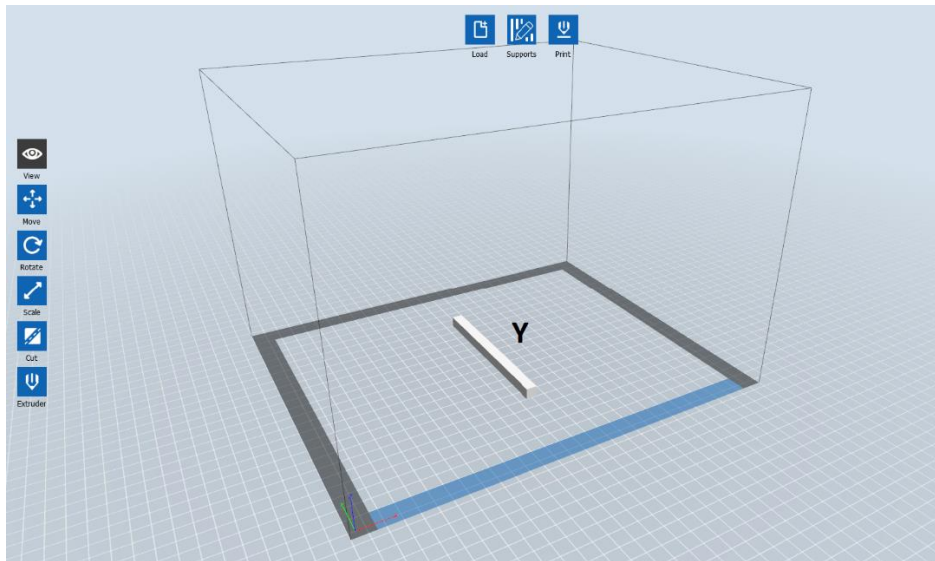


Εικόνα 2.6: εσωτερικό μοτίβο δοκιμίου 1

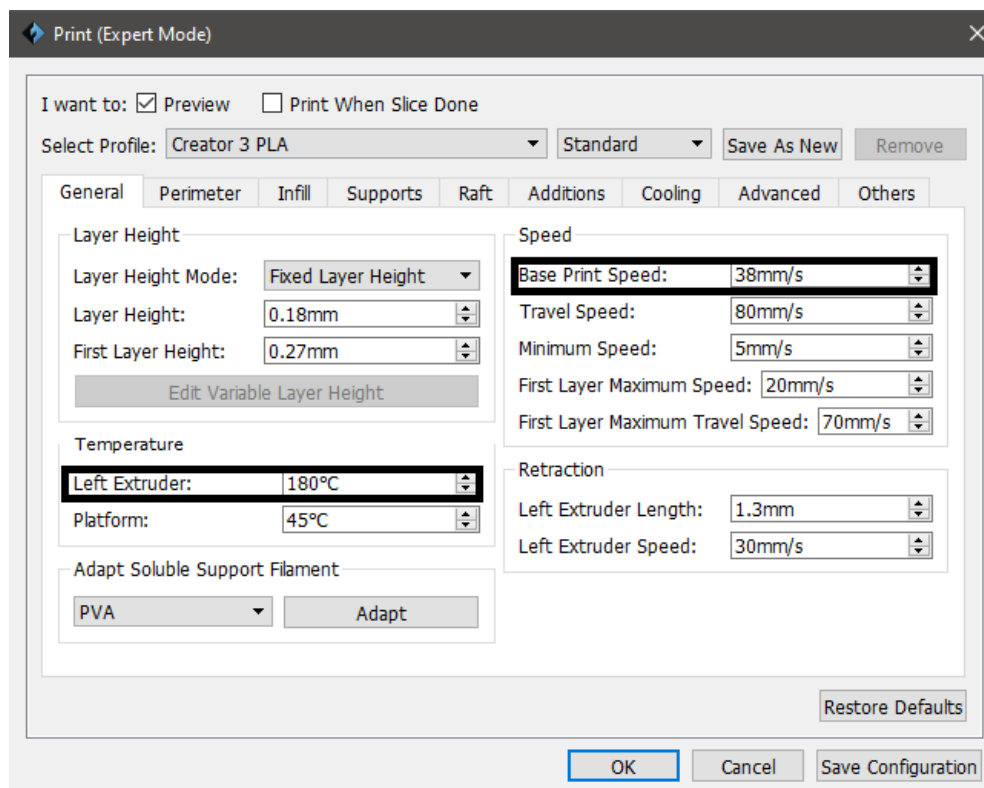


Εικόνα 2.7: Αποτέλεσμα FlashPrint με χρόνο και μέτρα υλικού δοκιμίου 1

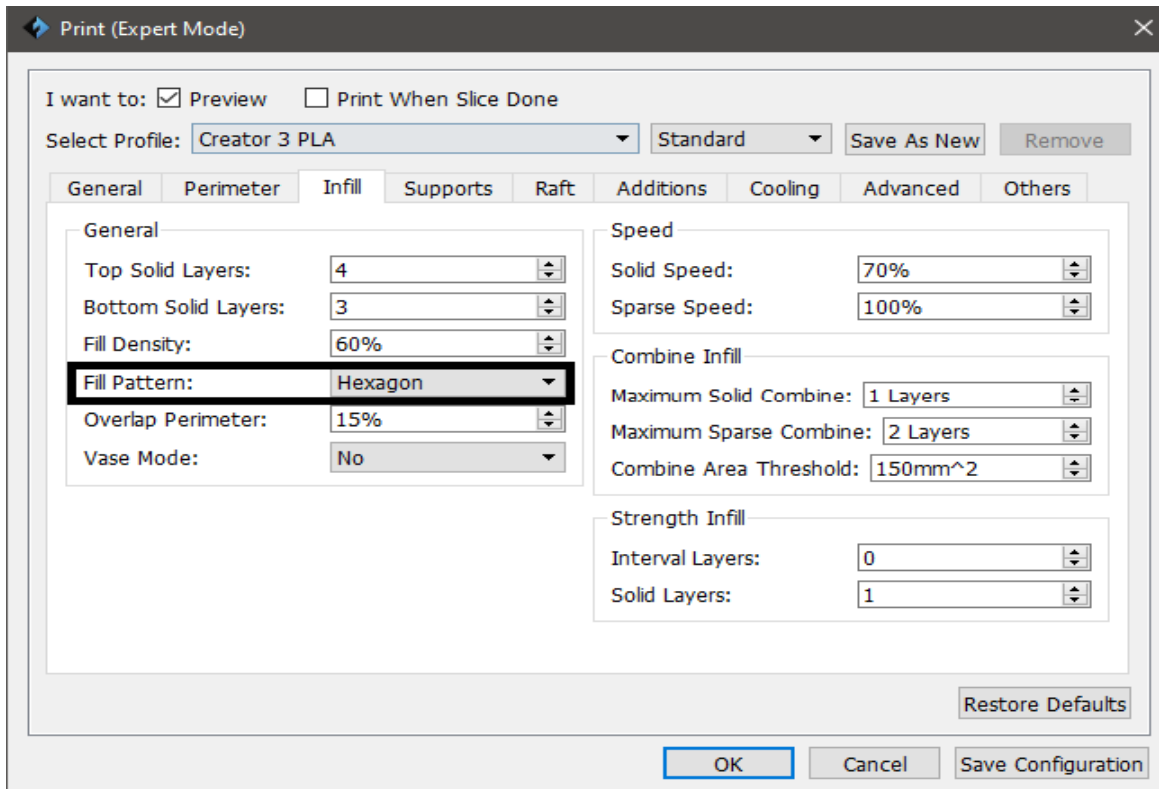
## Δοκίμιο 2



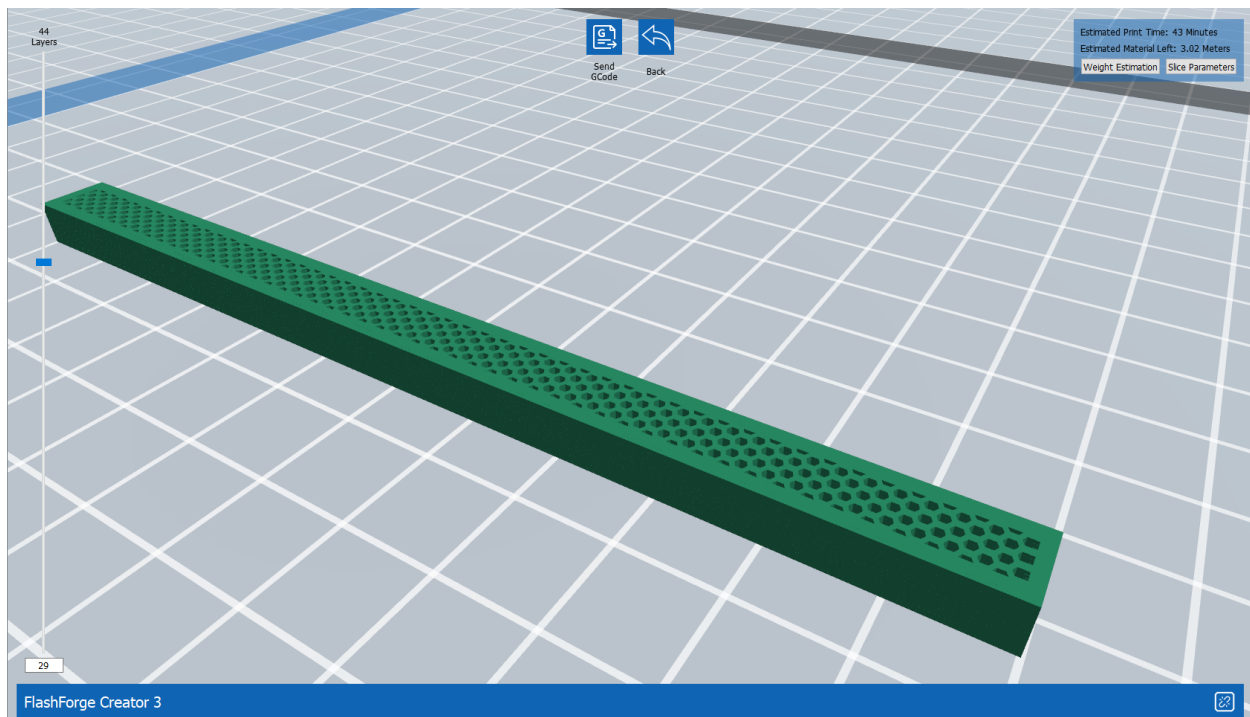
Εικόνα 2.8: τρόπος εκτύπωσης δοκιμίου 2



Εικόνα 2.9: θερμοκρασία και ταχύτητα δοκιμίου 2

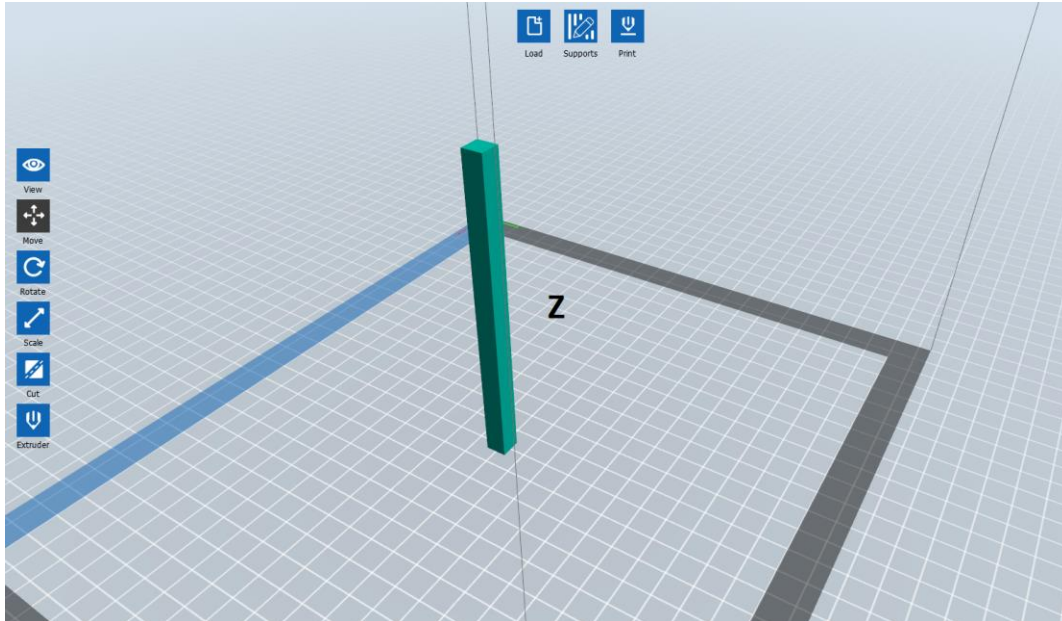


Εικόνα 2.10: εσωτερικό μοτίβο δοκιμίου 2

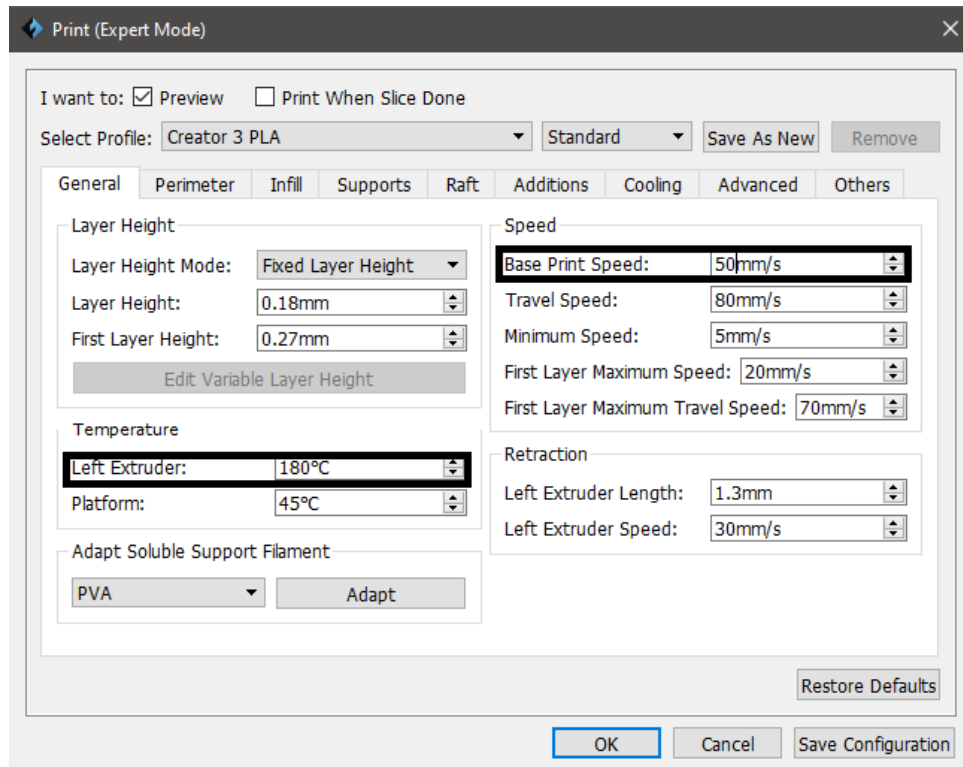


Εικόνα 2.11: Αποτέλεσμα FlashPrint με χρόνο και μέτρα υλικού δοκιμίου 2

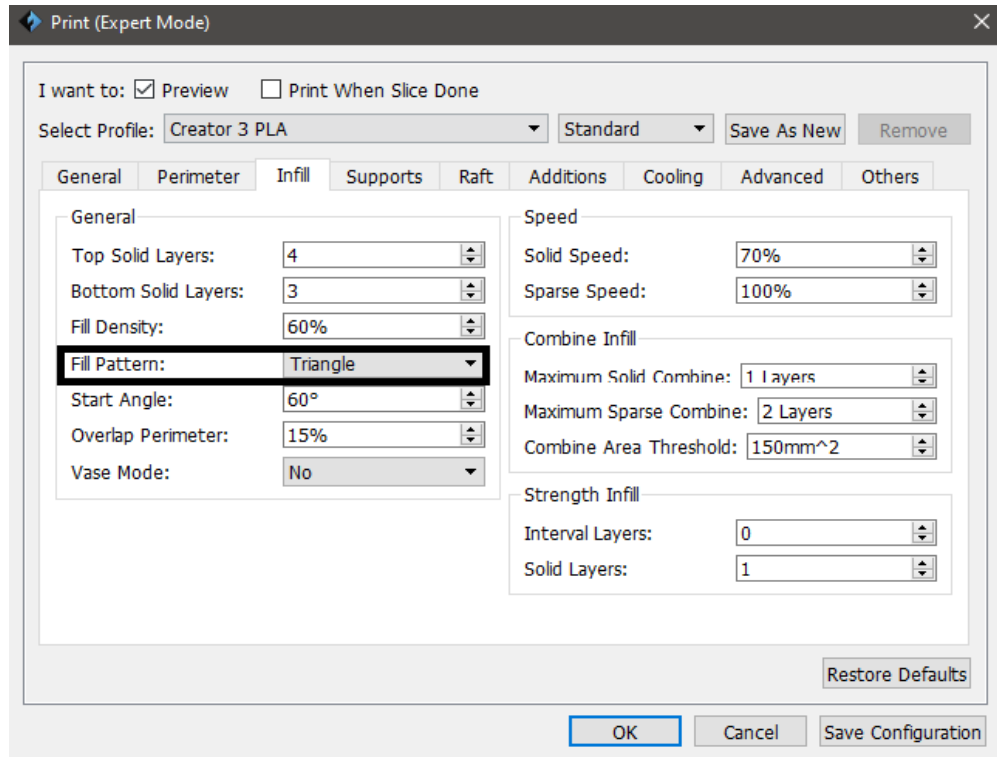
### Δοκίμιο 3



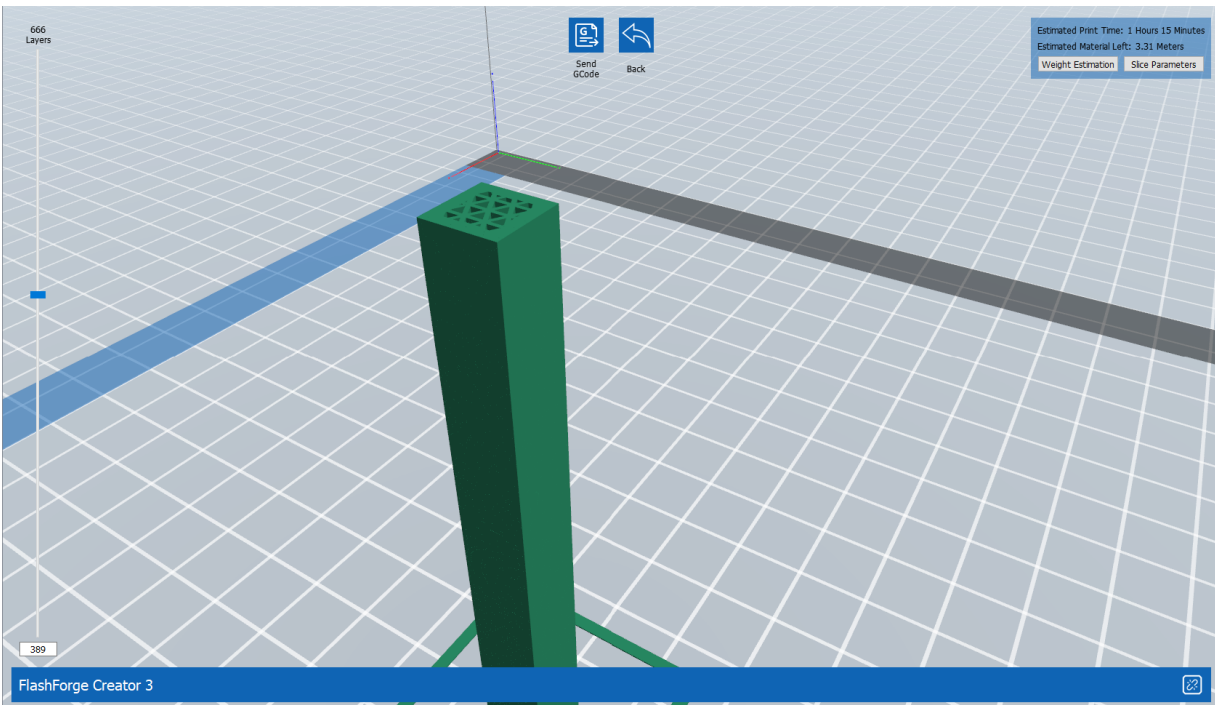
Εικόνα 2.12: τρόπος εκτύπωσης δοκιμίου 3



Εικόνα 2.13: θερμοκρασία και ταχύτητα δοκιμίου 3

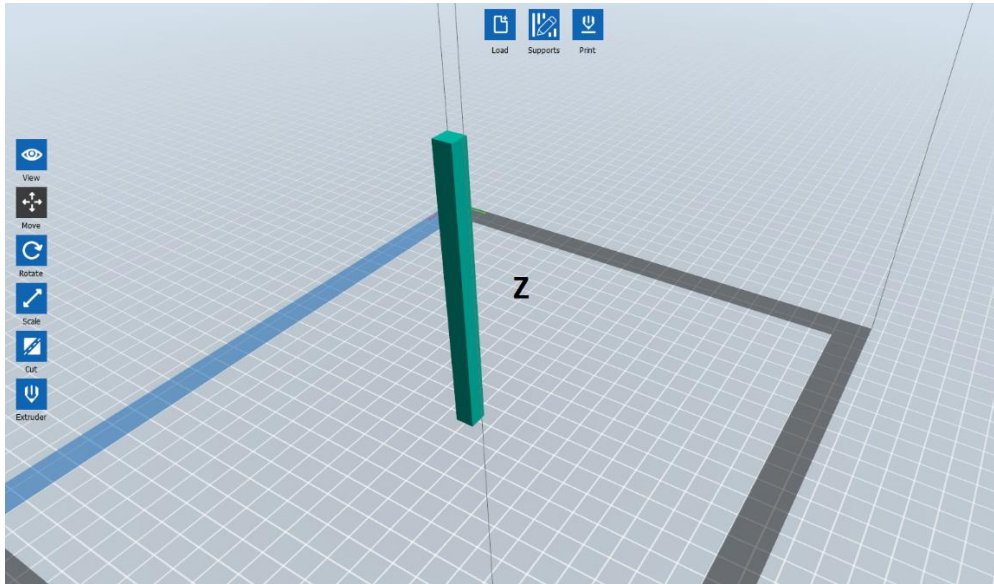


Εικόνα 2.14: εσωτερικό μοτίβο δοκιμίου 3

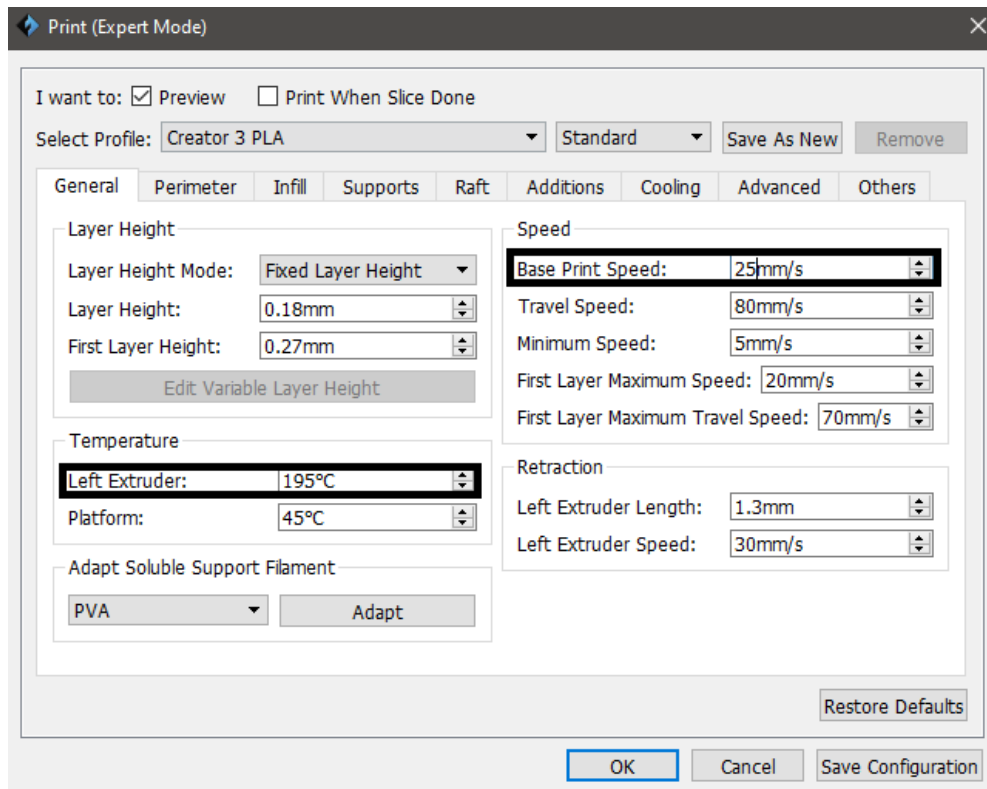


Εικόνα 2.15: Αποτέλεσμα FlashPrint με χρόνο και μέτρα υλικού δοκιμίου 3

### Δοκίμιο 4

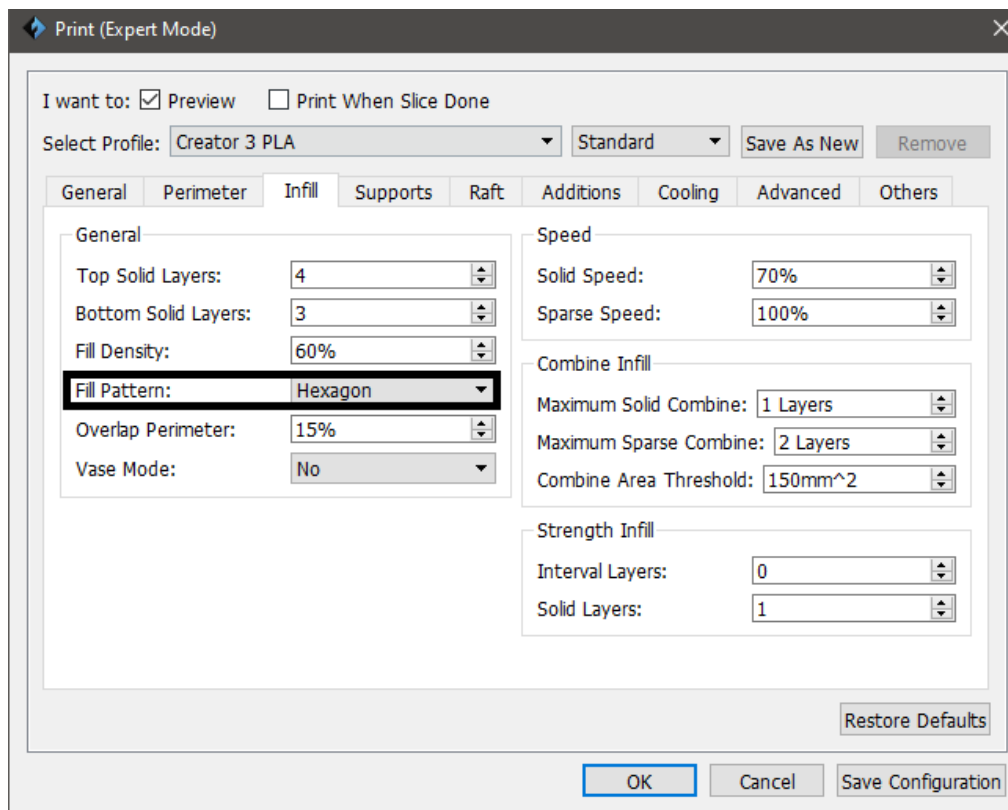


Εικόνα 2.16: τρόπος εκτύπωσης δοκιμίου 4

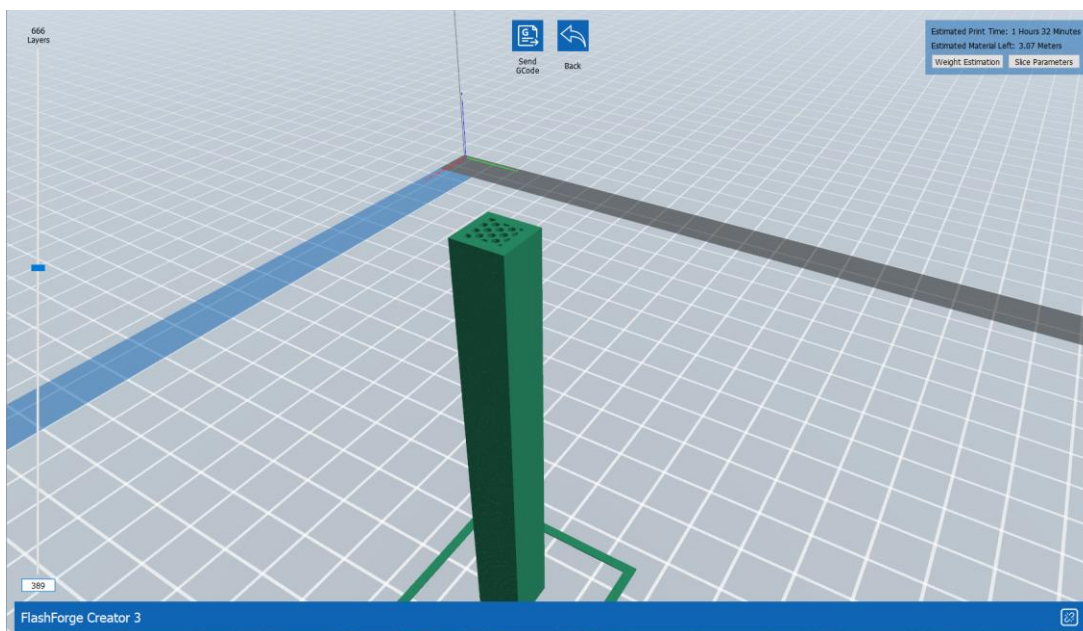


Εικόνα 2.17: θερμοκρασία και ταχύτητα δοκιμίου 4



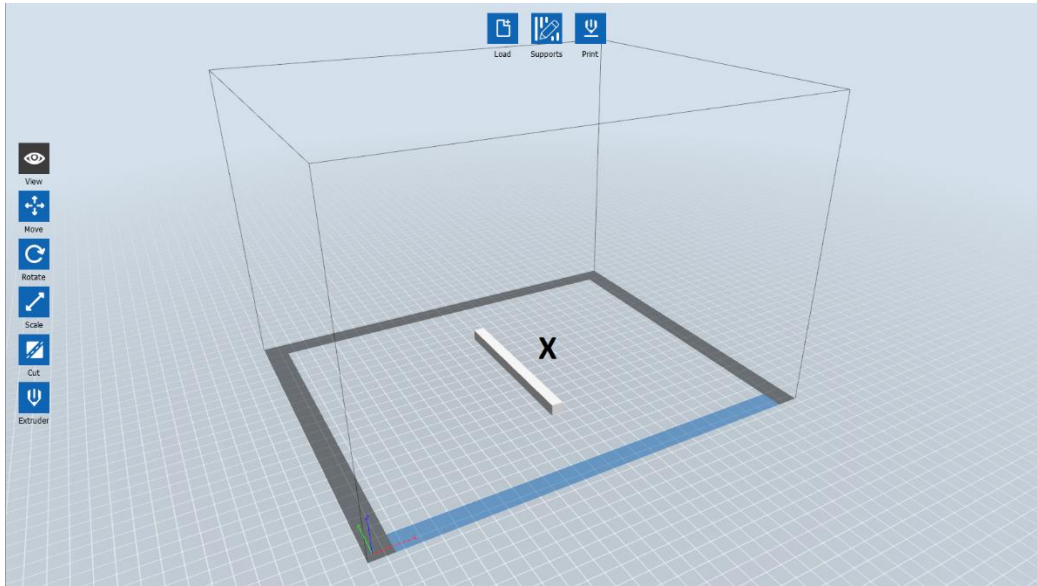


Εικόνα 2.18: εσωτερικό μοτίβο δοκιμίου 4

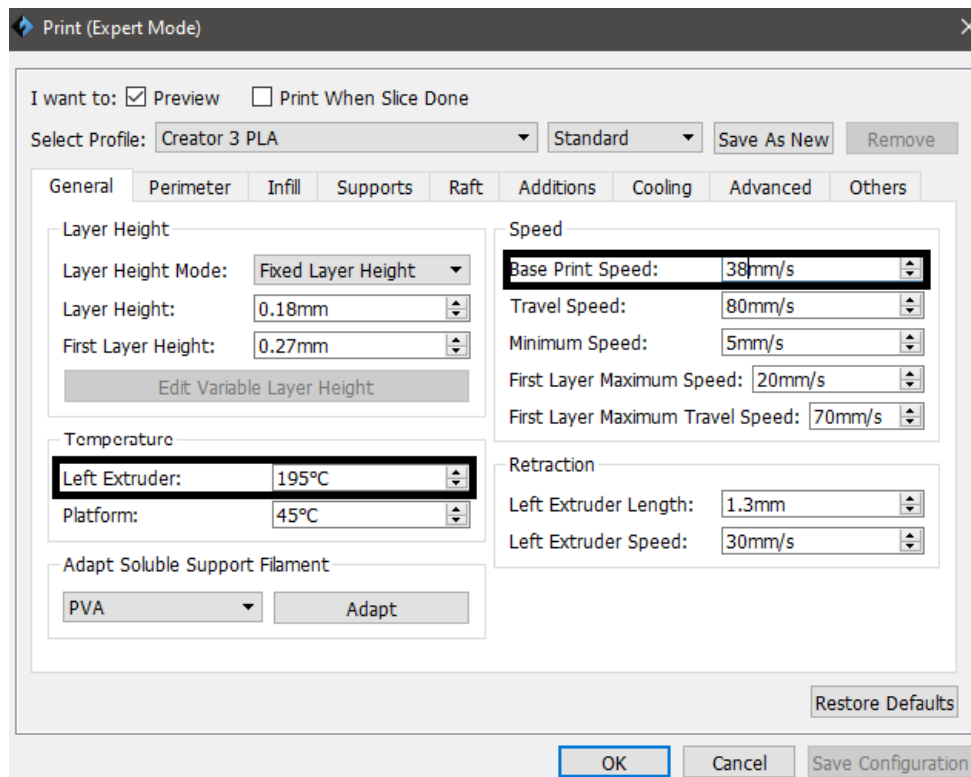


Εικόνα 2.19: Αποτέλεσμα FlashPrint με χρόνο και μέτρα υλικού δοκιμίου 4

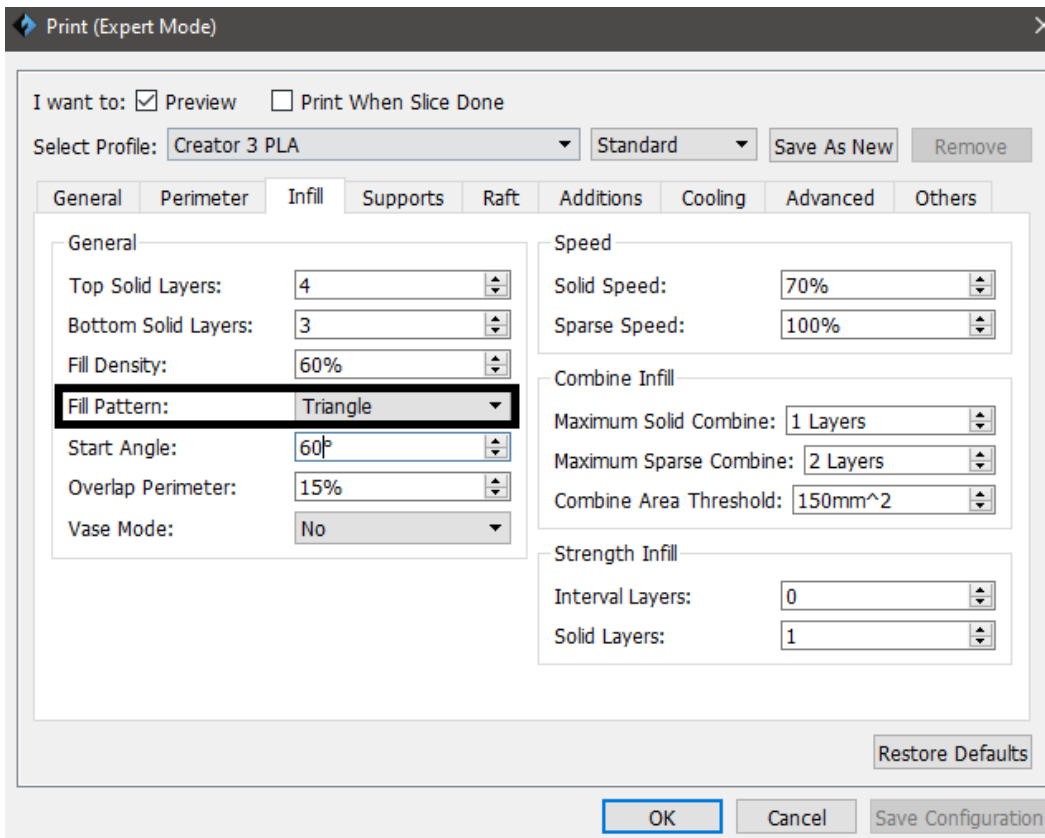
## Δοκίμιο 5



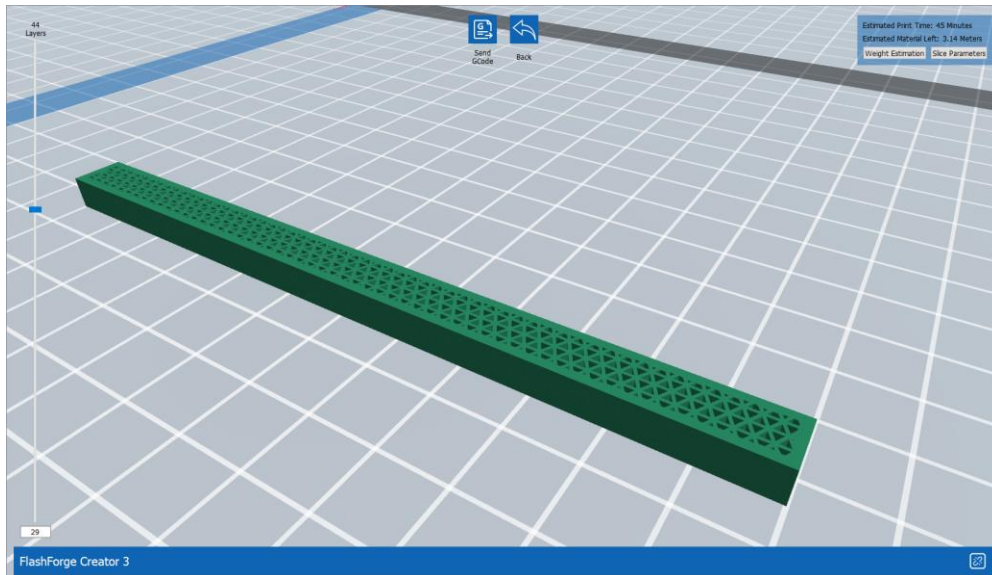
Εικόνα 2.20: τρόπος εκτύπωσης δοκιμίου 5



Εικόνα 2.21: θερμοκρασία και ταχύτητα δοκιμίου 5

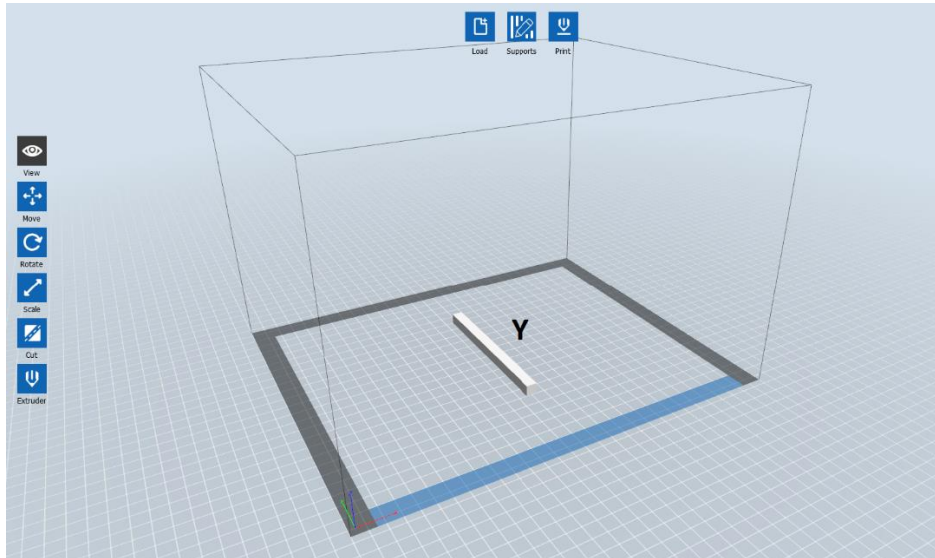


Εικόνα 2.22: εσωτερικό μοτίβο δοκιμίου 5

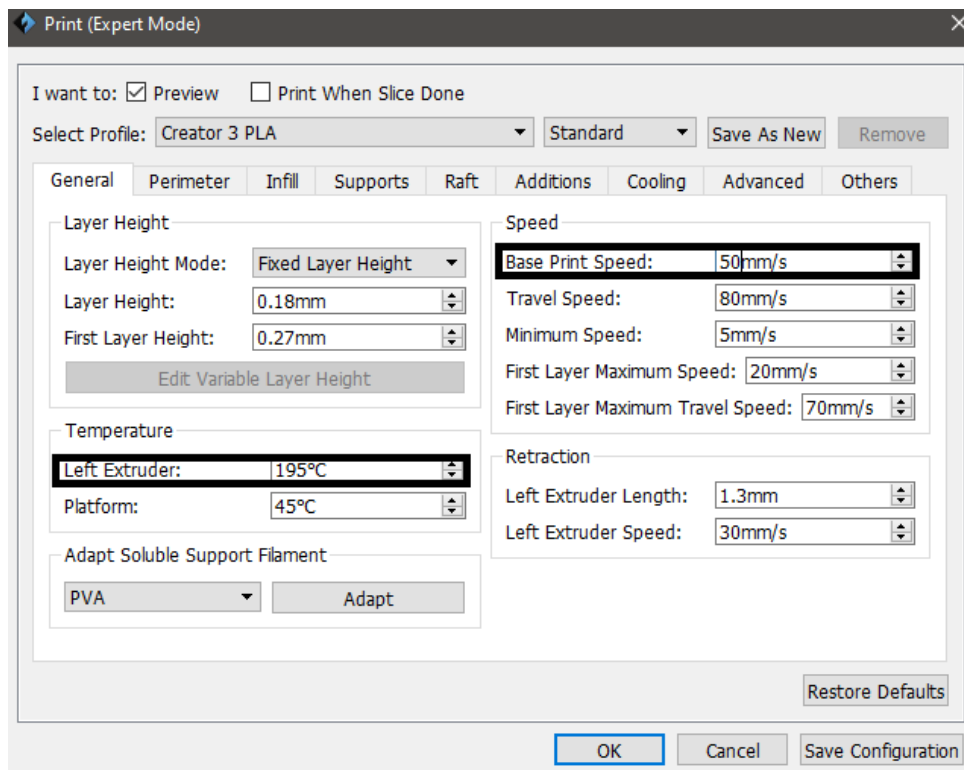


Εικόνα 2.23: Αποτέλεσμα FlashPrint με χρόνο και μέτρα υλικού δοκιμίου 5

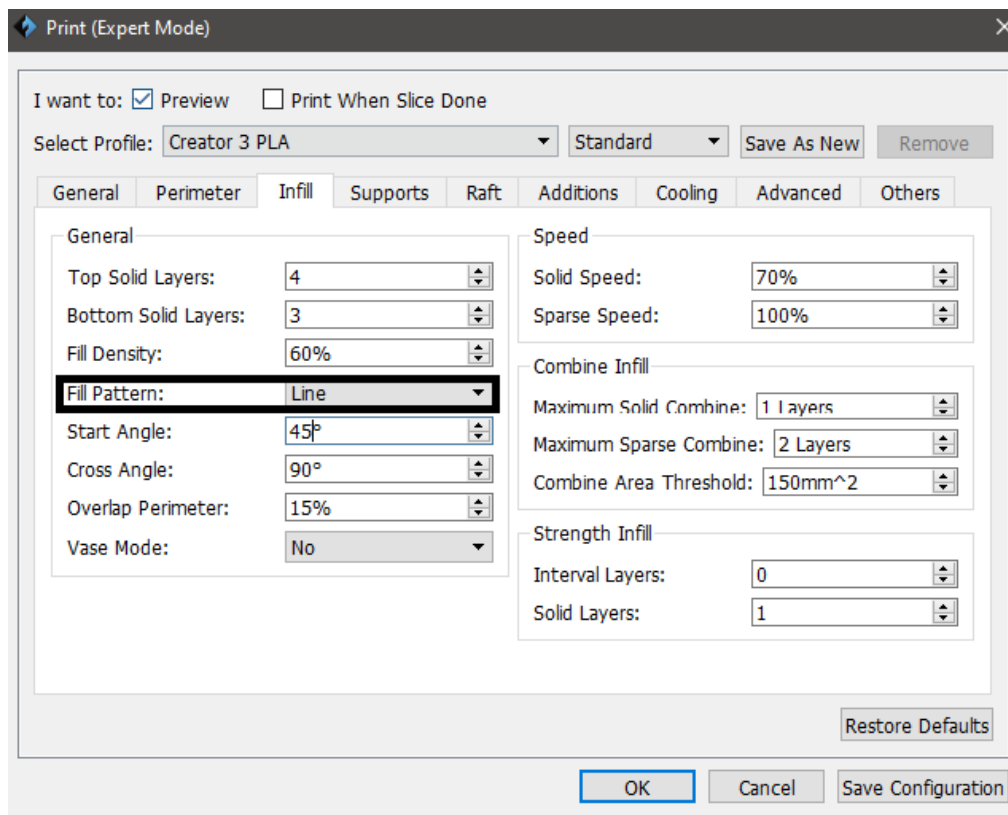
## Δοκίμιο 6



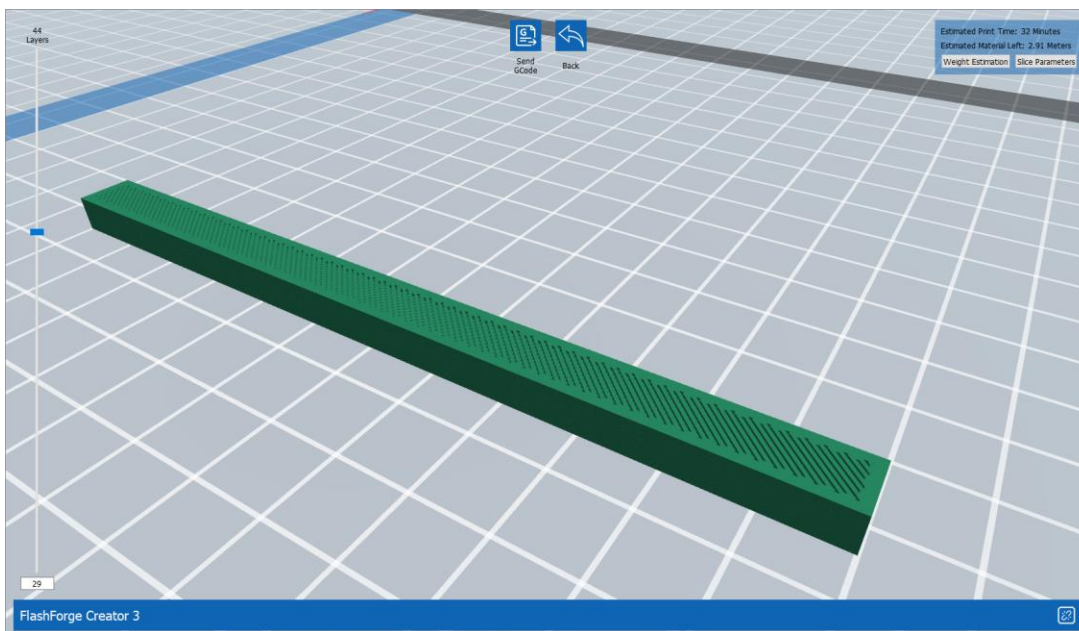
Εικόνα 2.24: τρόπος εκτύπωσης δοκιμίου 6



Εικόνα 2.25: θερμοκρασία και ταχύτητα δοκιμίου 6

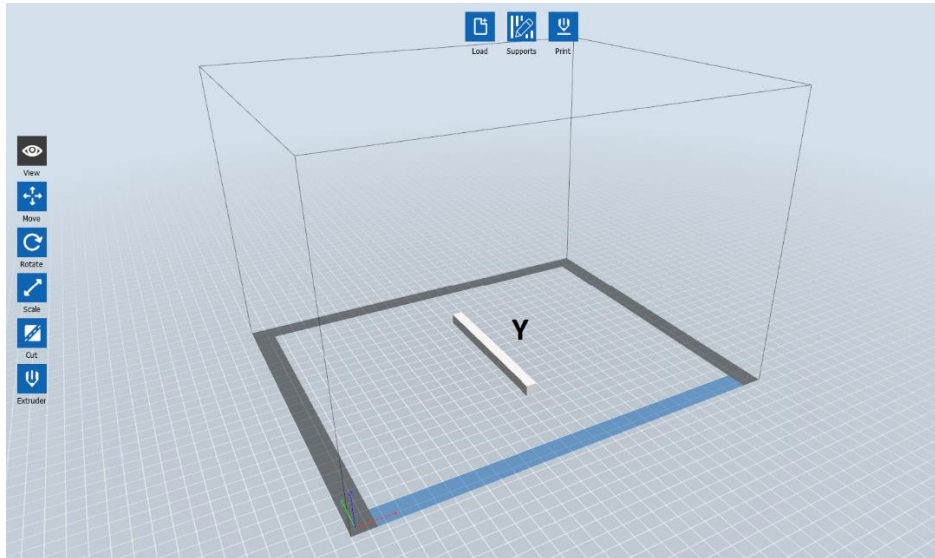


Εικόνα 2.26: εσωτερικό μοτίβο δοκιμίου 6

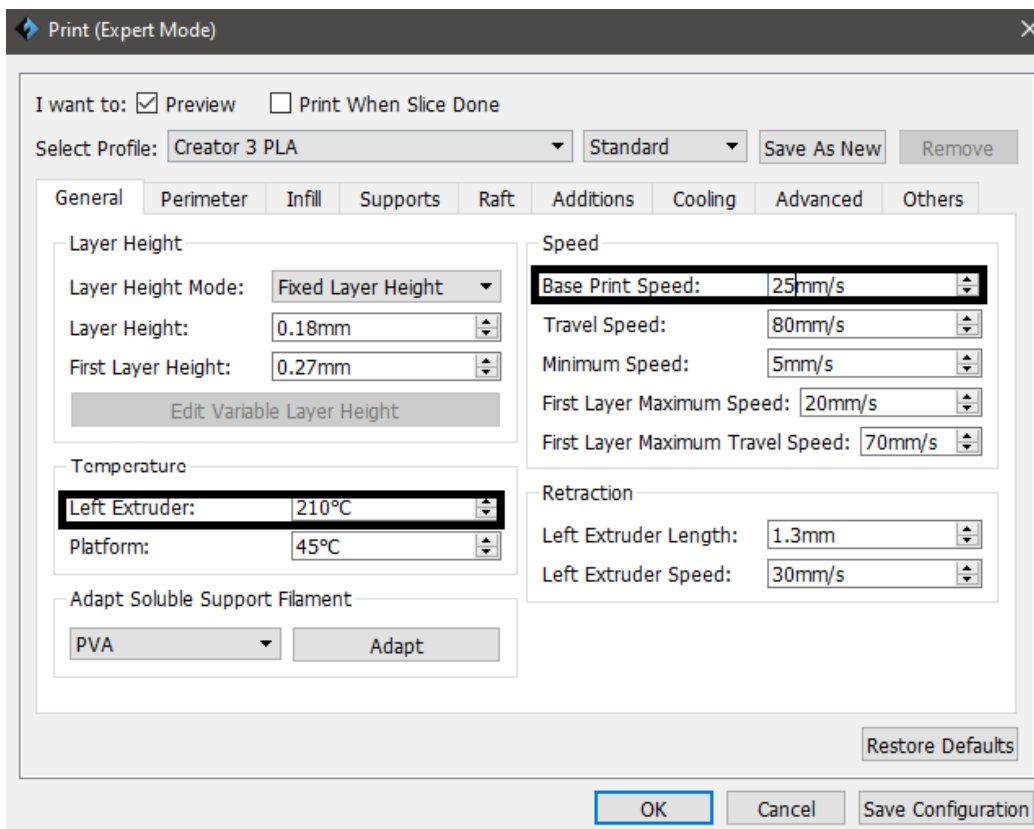


Εικόνα 2.27: Αποτέλεσμα FlashPrint με χρόνο και μέτρα υλικού δοκιμίου 6

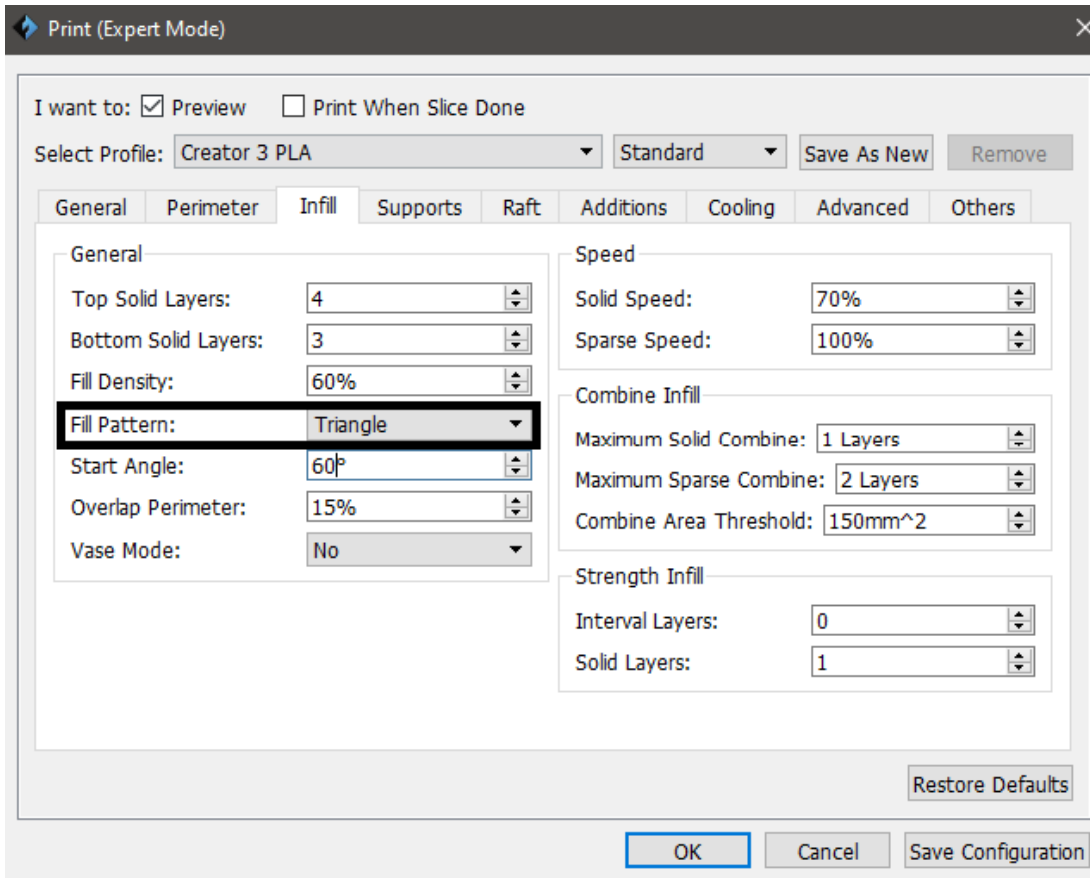
### Δοκίμιο 7



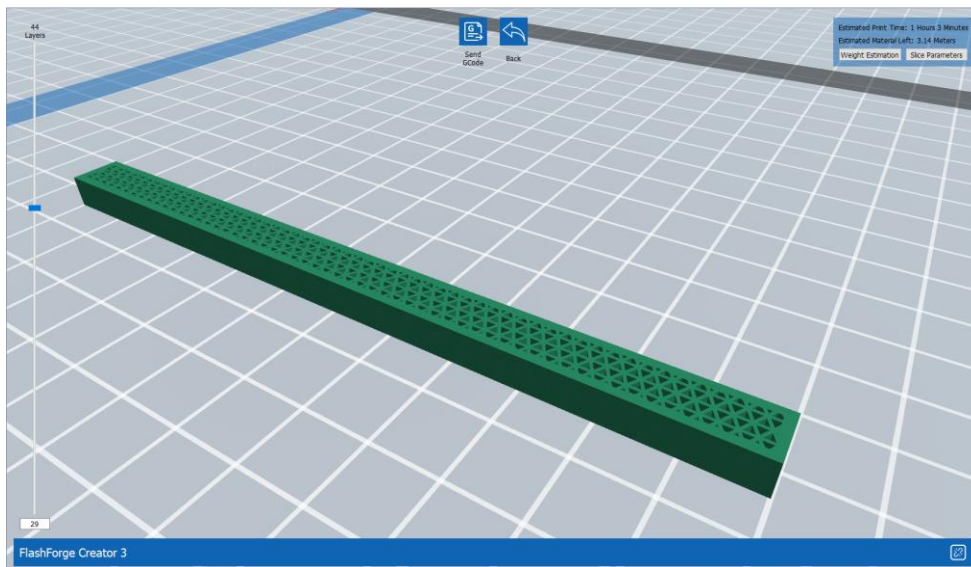
Εικόνα 2.28: τρόπος εκτύπωσης δοκιμίου 7



Εικόνα 2.29: θερμοκρασία και ταχύτητα δοκιμίου 7

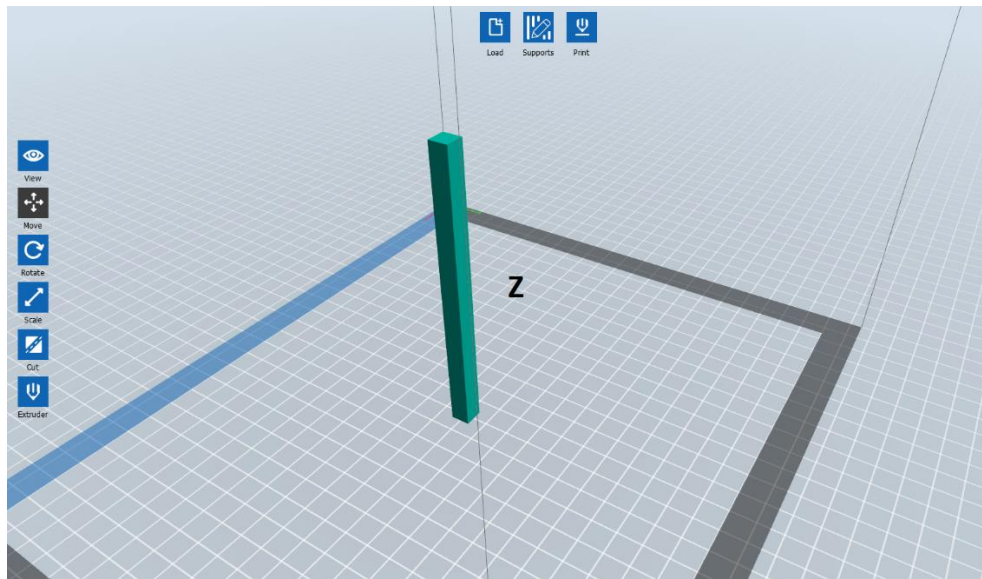


Εικόνα 2.30: εσωτερικό μοτίβο δοκιμίου 7

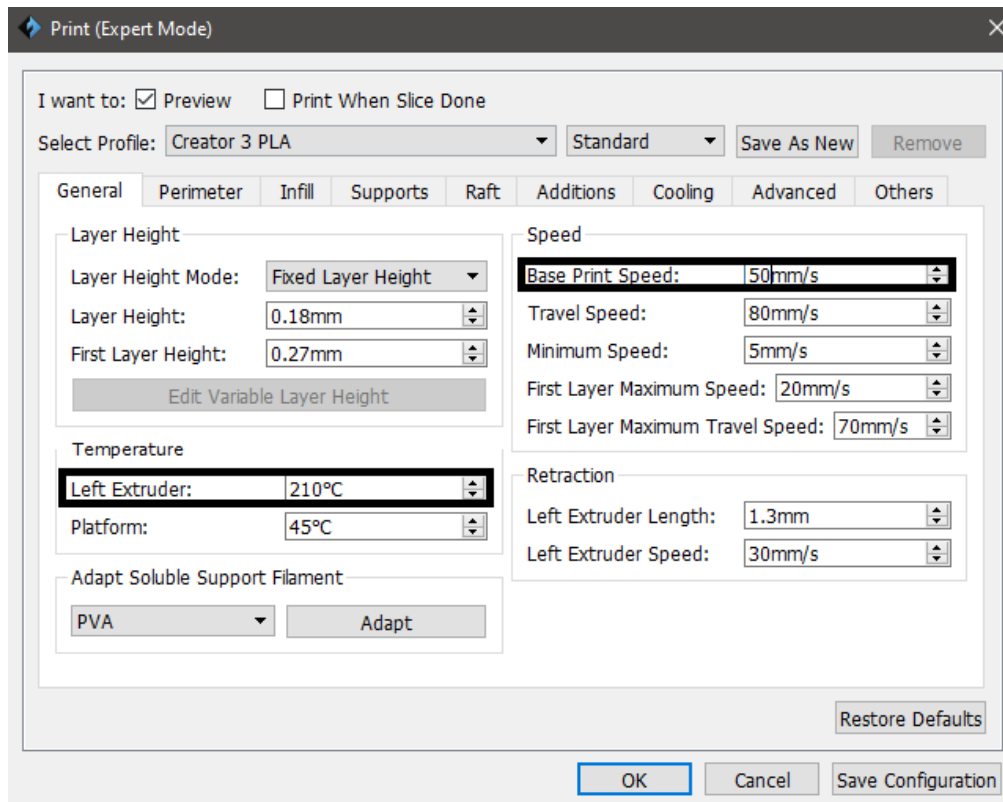


Εικόνα 2.31: Αποτέλεσμα FlashPrint με χρόνο και μέτρα υλικού δοκιμίου 7

### Δοκίμιο 8

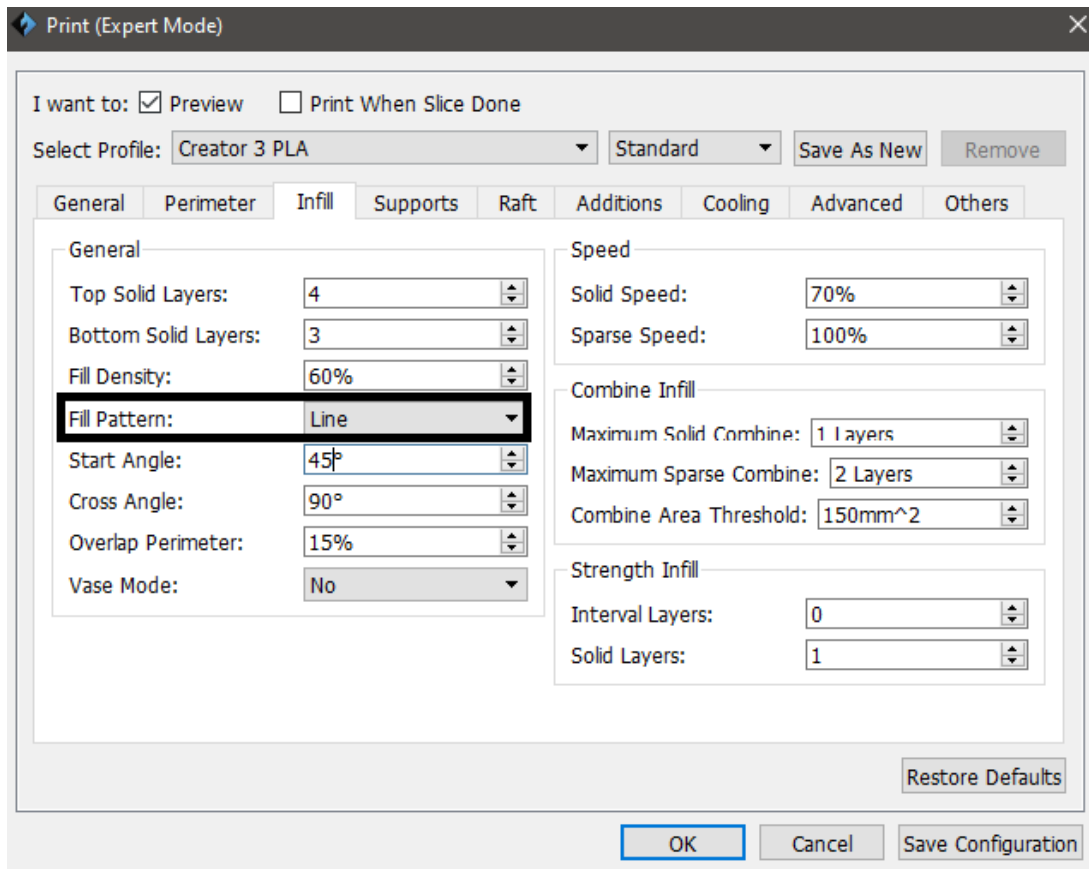


Εικόνα 2.32: τρόπος εκτύπωσης δοκιμίου 8

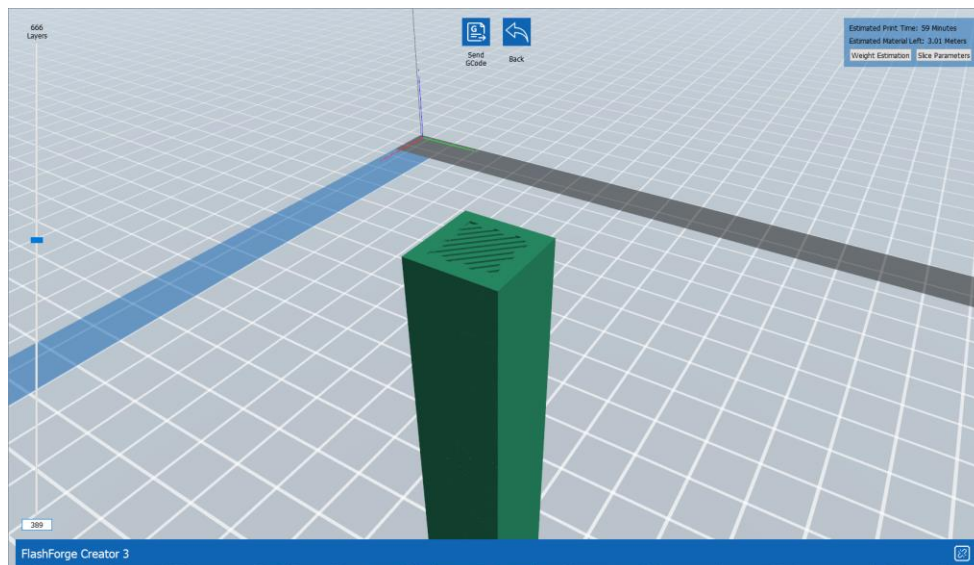


Εικόνα 2.33: θερμοκρασία και ταχύτητα δοκιμίου 8



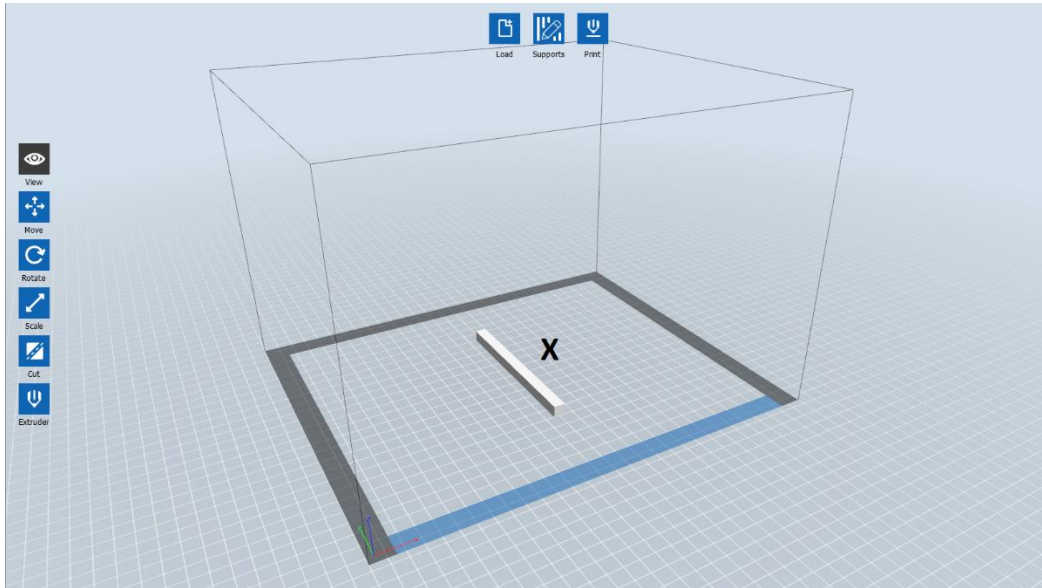


Εικόνα 2.34: εσωτερικό μοτίβο δοκιμίου 8

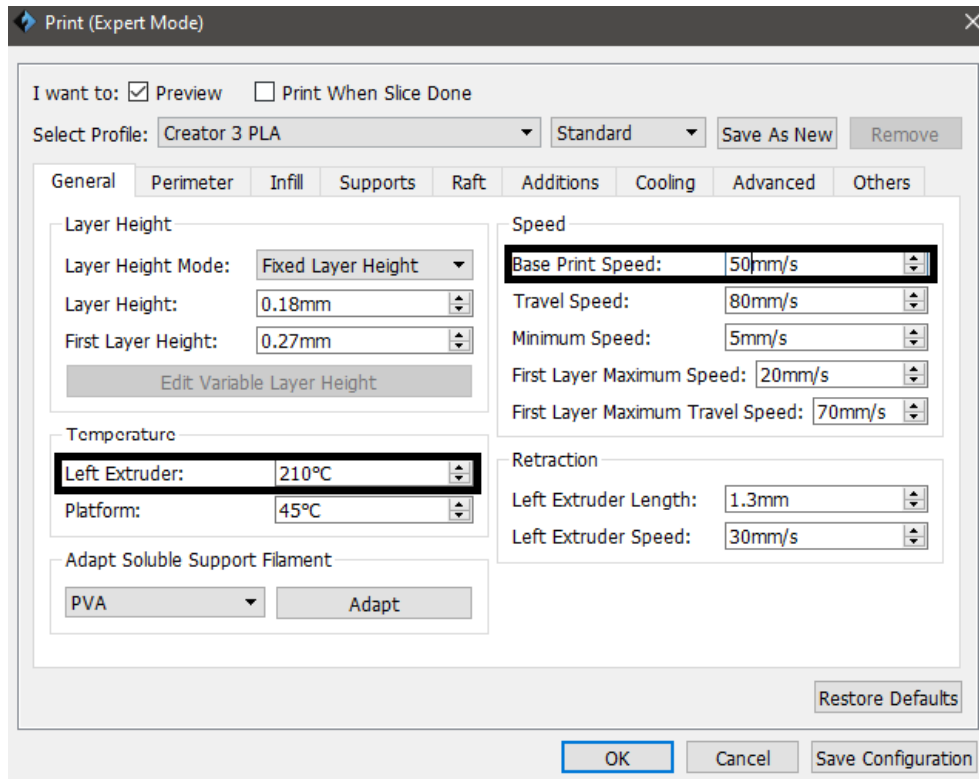


Εικόνα 2.35: Αποτέλεσμα FlashPrint με χρόνο και μέτρα υλικού δοκιμίου 8

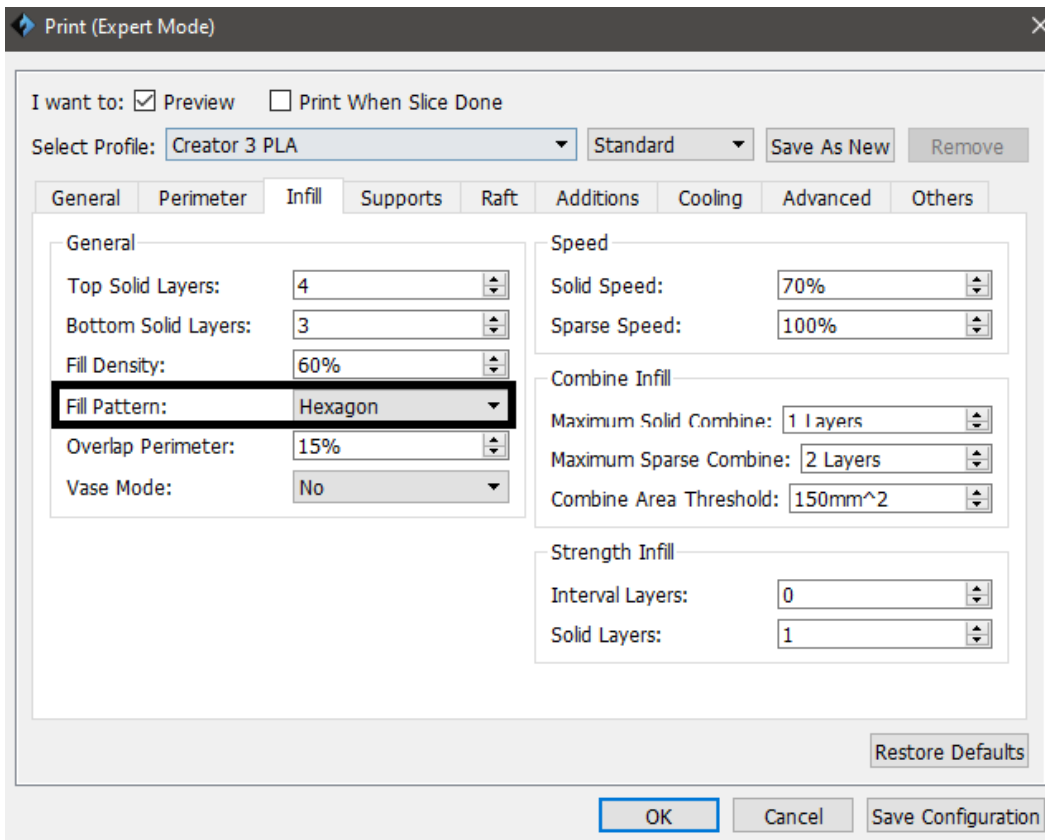
## Δοκίμιο 9



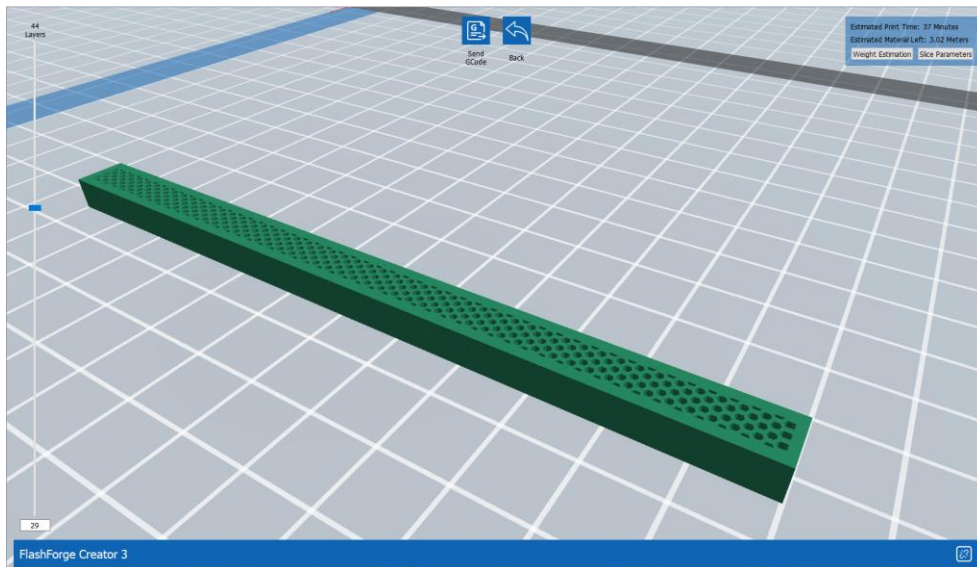
Εικόνα 2.36: τρόπος εκτύπωσης δοκιμίου 9



Εικόνα 2.37: θερμοκρασία και ταχύτητα δοκιμίου 9



Εικόνα 2.38: εσωτερικό μοτίβο δοκιμίου 9



Εικόνα 2.39: Αποτέλεσμα FlashPrint με χρόνο και μέτρα υλικού δοκιμίου 9

## 5. Εκτύπωση των δοκιμίων

Ο εκτυπωτής που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο FlashForge Creator 3 με σύστημα δύο κεφαλών με ανεξάρτητη κίνηση και δυνατότητα ανάμειξης υλικών. Επιφάνεια εκτύπωσης 300mm x 250mm x 200mm. Δυνατότητα εκτύπωσης υλικών PLA/ ABS/ TPU/ PVA/ HIPS/ PETG/ WPC/ Nylon και πάχους 1.75mm.

Υλικό: PLA 1.75mm

### Παρατηρήσεις

Σε όλα τα δοκίμια χρησιμοποιήθηκε σχεδία(raft) για υποβοήθηση στην επιτυχή τύπωση των δοκιμίων. Τα όρθια δοκίμια (εκτύπωση κατά τον Z άξονα) χρειάστηκε και τοίχος γύρω γύρω για να εκτυπωθούν πιο σταθερά. Σε κάποια από τα όρθια δοκίμια ήταν πιο δύσκολη η εκτύπωση και πιο συγκεκριμένα το δοκίμιο 3 χρειάστηκε να επανεκτυπωθεί τουλάχιστον 4 ώστε να έχουμε ένα επιτυχές αποτέλεσμα μιας και κατά την εκτύπωση η κεφαλή σε κάποια φάση χτυπούσε το δοκίμιο με αποτέλεσμα να το ρίχνει κάτω. Το δοκίμιο 4 χρειάστηκε μόνο μια φορά επανεκτύπωση για τον ίδιο λόγο. Το δοκίμιο 7 όπου εκτυπώθηκε και αυτό σε όρθια κατάσταση δεν υπήρξε κάποιο σχετικό θέμα λόγω υψηλότερης θερμοκρασίας και χαμηλότερης ταχύτητας κεφαλής από τα άλλα δύο δοκίμια.



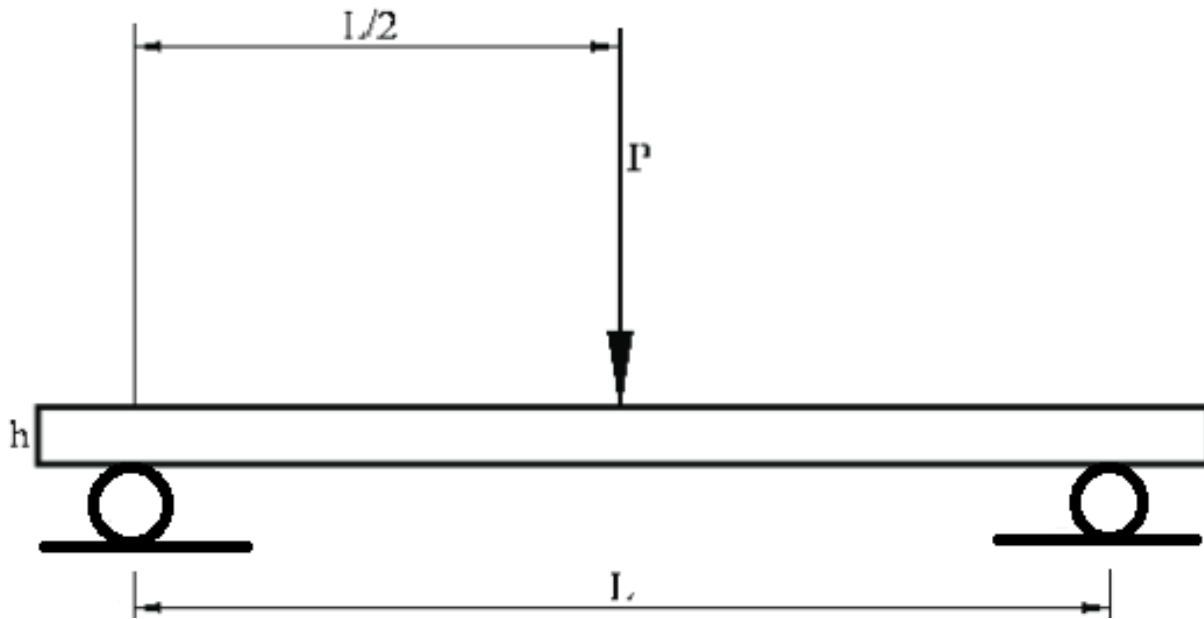
Εικόνα 2.40: Κατά την διαδικασία εκτύπωσης μέσω του FlashForge Creator 3



Εικόνα 2.41: Οι ενδείξεις και τα χαρακτηριστικά εκτύπωσης μέσω της οθόνης του FlashForge Creator 3

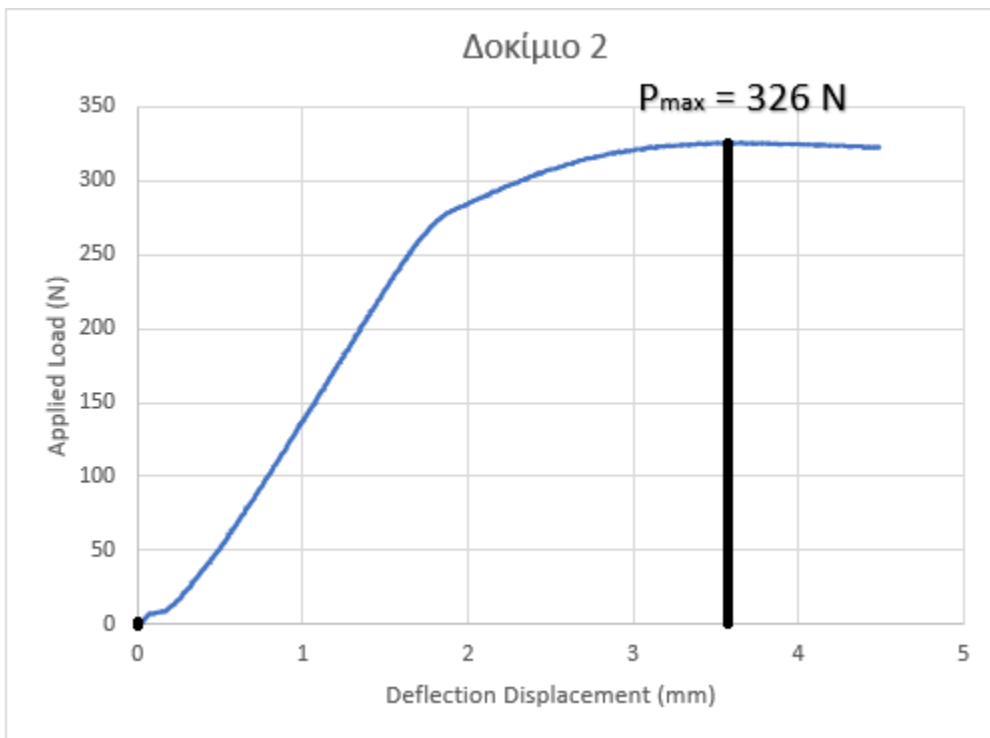
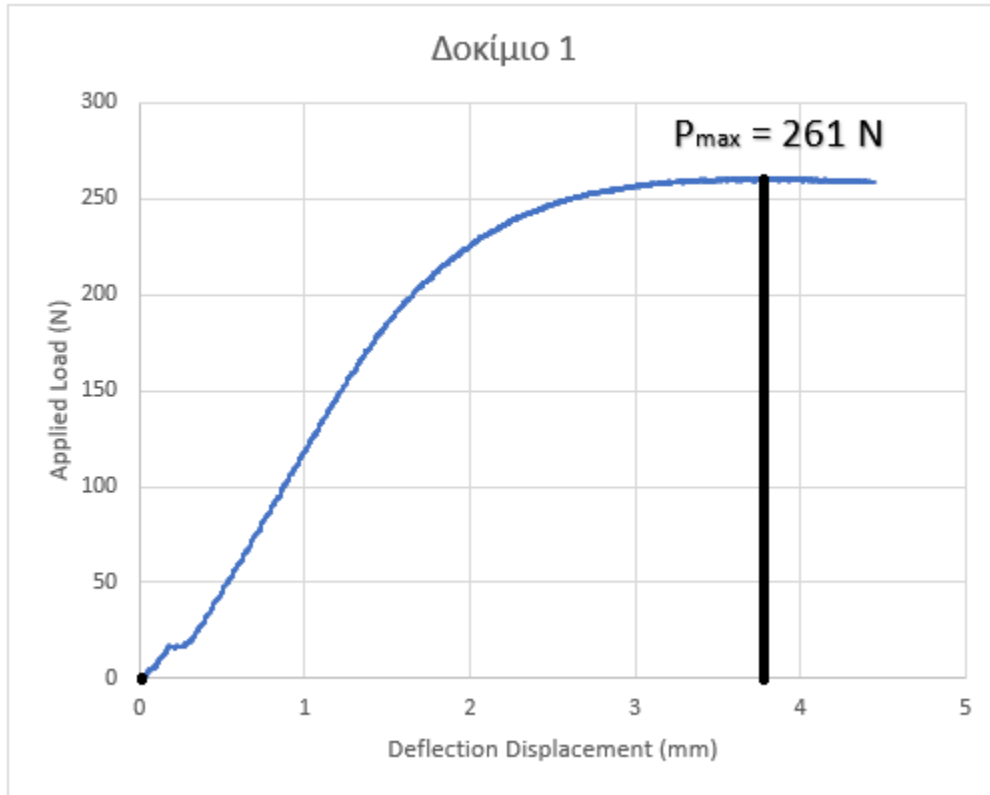
### 6. Υποβολή των δοκιμίων σε κάμψη

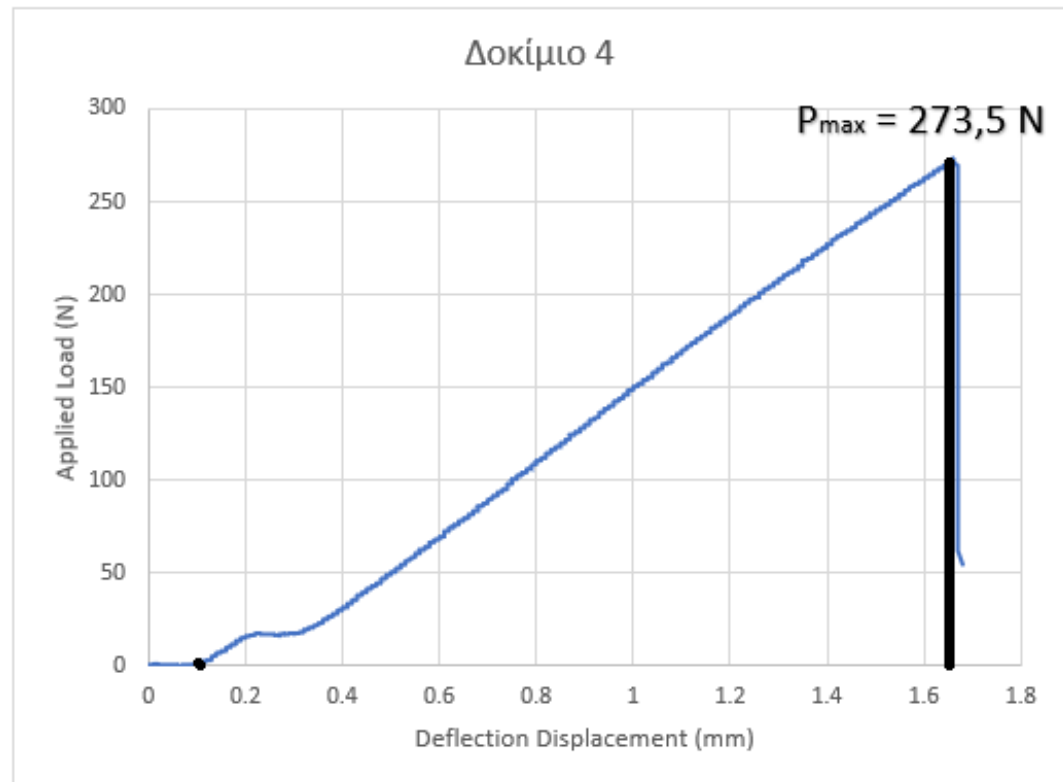
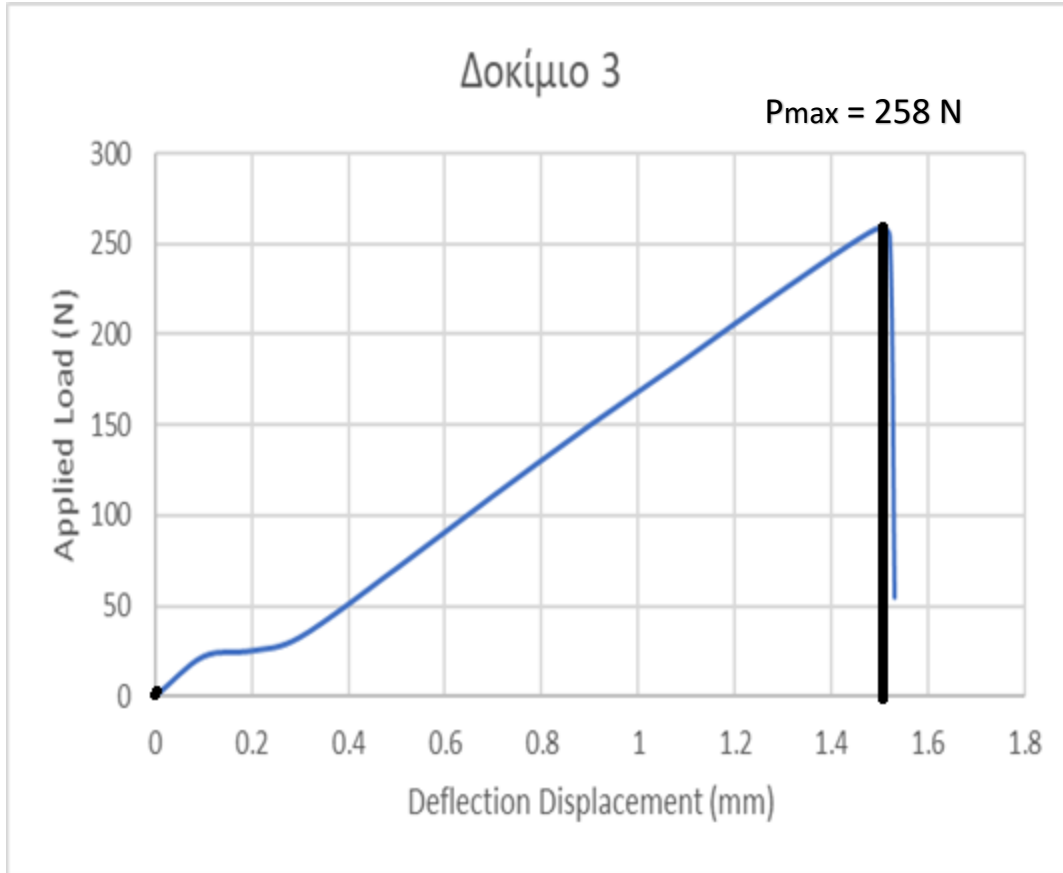
Η υποβολή των δοκιμίων έγινε σε κάμψη τριών σημείων, τα άκρα στήριξης των δοκιμίων με αυτές τις διαστάσεις (8x8x120mm) πρέπει να προκύπτει  $L=95\text{mm}$ . Ουσιαστικά το  $L$  δηλώνει την απόσταση μεταξύ των δύο στηριγμάτων σχηματίζοντας μεταξύ τους ορθές γωνίες με τα στηρίγματα και το έμβολο που θα ασκήσει το φορτίο. Πριν την εκκίνηση επιβολής του φορτίου βεβαιωνόμαστε για την συμμετρία ως προς το φορτίο ώστε να πέφτει το έμβολο στη μέση του δοκιμίου και κατεβάζουμε το έμβολο ώστε να ακουμπάει ίσα ίσα το δοκίμιο. Τέλος ρυθμίζουμε την ταχύτητα του εμβόλου  $1\text{mm/min}$  και πατάμε εκκίνηση.



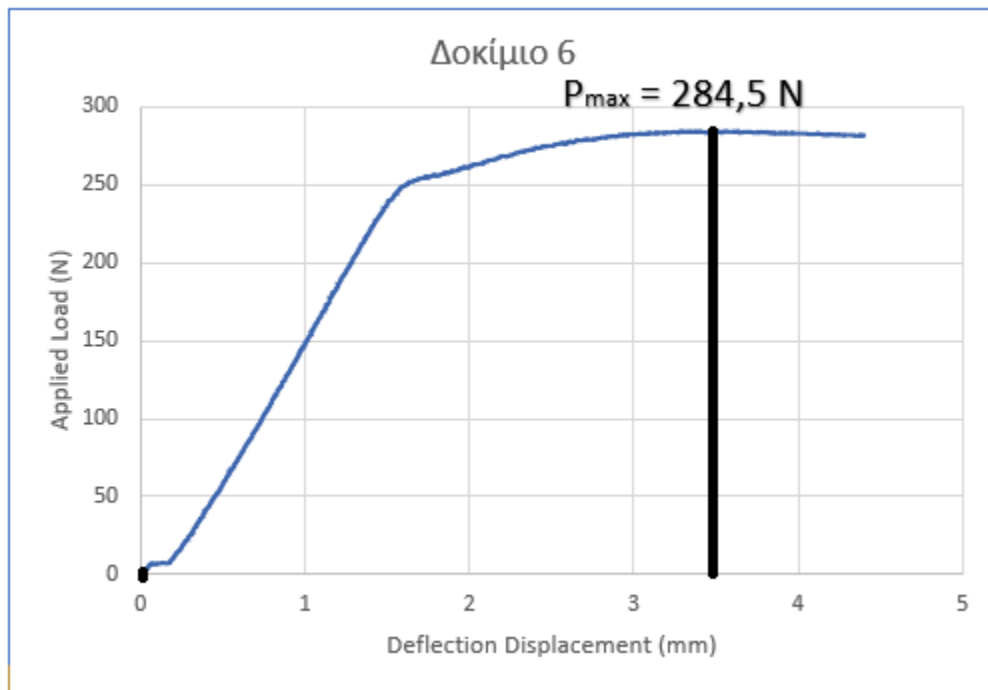
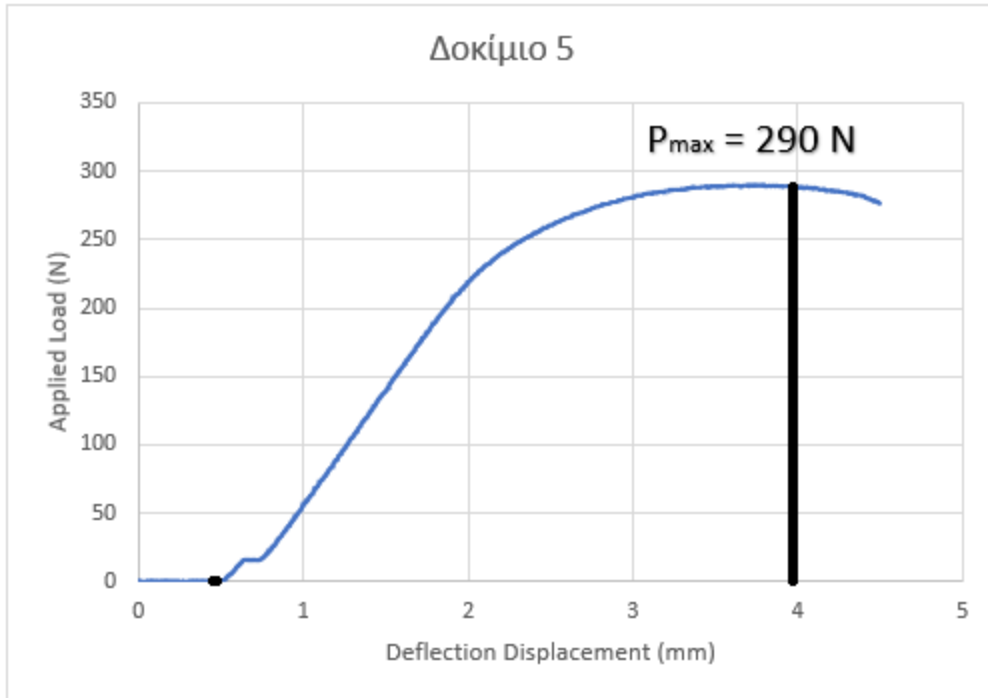
### 7.Ανάλυση μετρήσεων

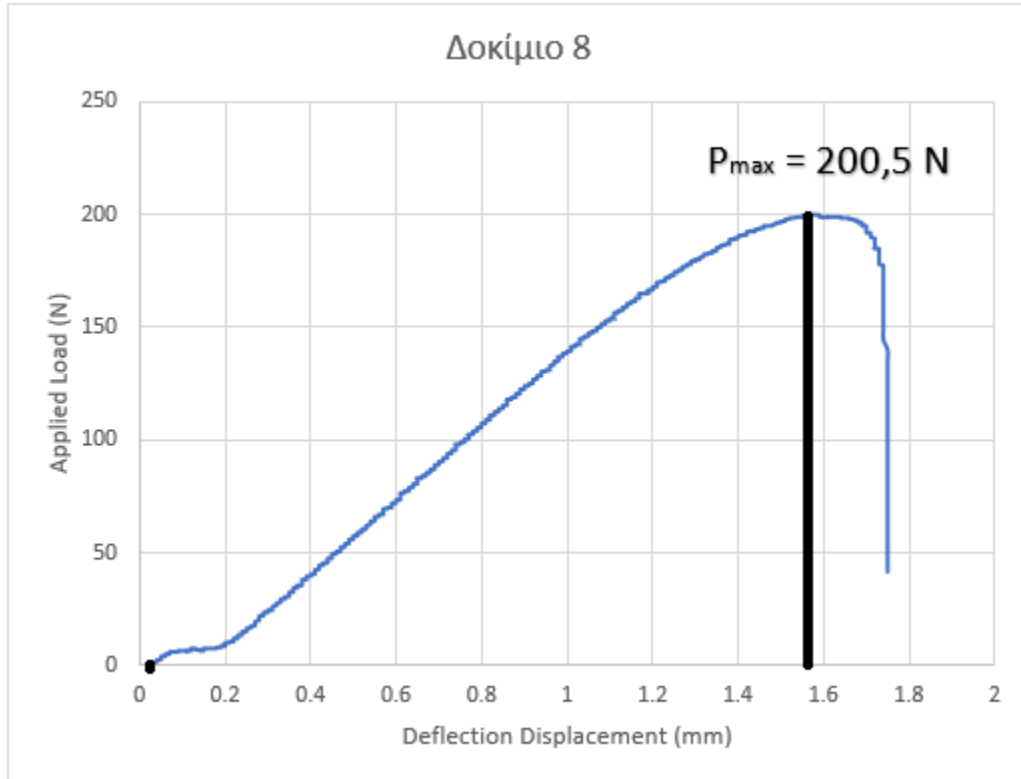
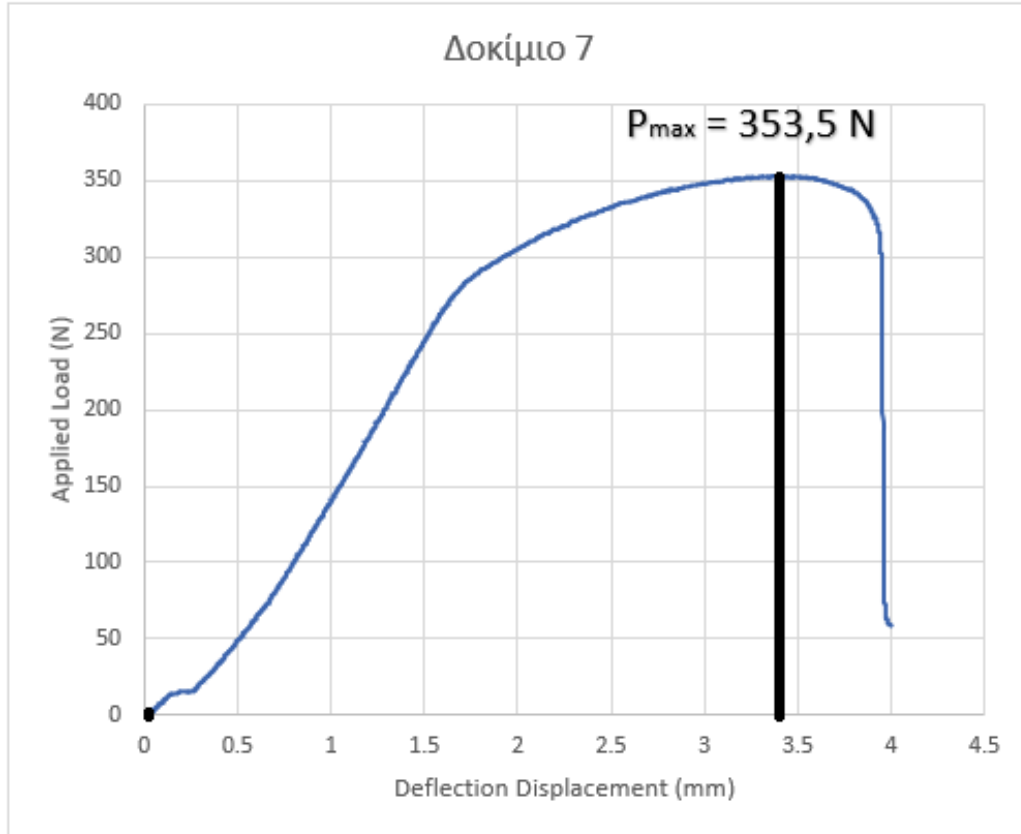
Μετατροπή των αρχείων που περιέχουν τις μετρήσεις ώστε να καταλήξουν σε διαγράμματα από τα οποία διακρίνονται το μέγιστο φορτίο ( $P_{max}$ ) και το βέλος κάμψης ( $\gamma_{max}$ ).

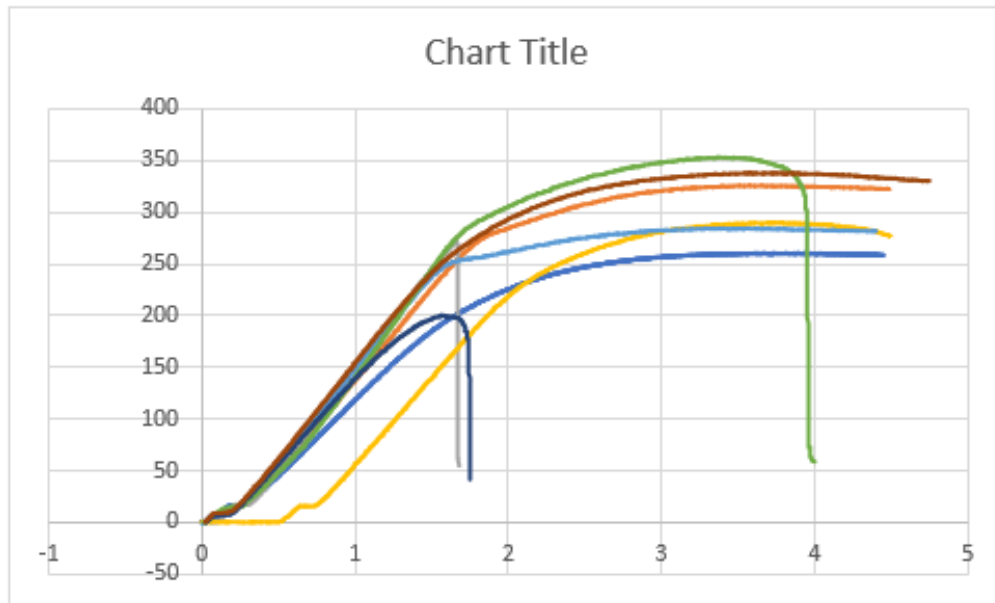
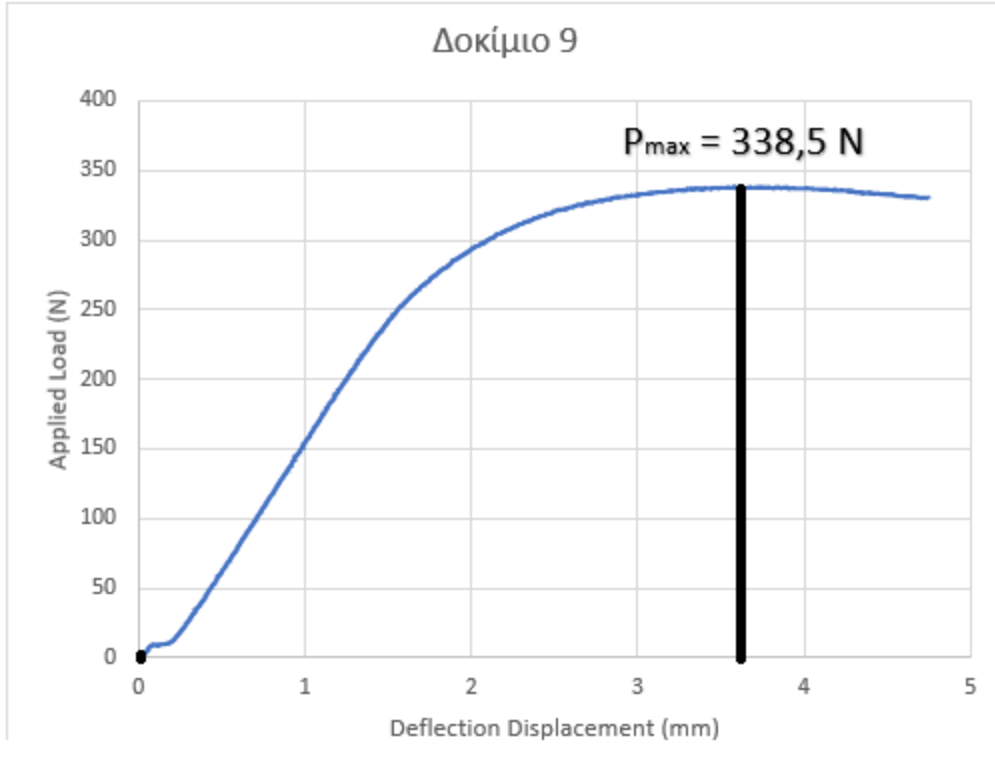












**8. Υπολογισμοί μετρήσεων**

Μέσω των παραπάνω διαγραμμάτων βρέθηκαν οι τιμή του μέγιστου φορτίου και το βέλος κάμψης του κάθε δοκιμίου.

Σύμφωνα με τον τύπο του βέλους κάμψης αμφιπροέχουσας δοκού έχω:

$$y(\max) = \frac{P_{\max} * L^3}{48 * E * I}$$

Αντιστρέφοντας τον πάνω τύπο μπορώ να λύσω ως προς το μέτρο ελαστικότητας (E):

$$E = \frac{P_{\max} * L^3}{48 * y_{\max} * I} = \frac{261 * 95^3}{48 * 3,82 * 341,33} = 3575,43 \text{ Μρα}$$

$$I = \frac{1}{12} * b * h^3 = \frac{1}{12} * 8 * 8^3 = 341,33 \text{ mm}^4$$

P : η ασκούμενη δύναμη (N)

L : το μήκος στήριξης του δοκιμίου (mm)

E : μέτρο ελαστικότητας (Μρα)

I : η γεωμετρική ροπή αδράνειας του δοκιμίου ( $\text{mm}^4$ )

Α.ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ( $^{\circ}\text{C}$ )	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ( $\text{mm/s}$ )	ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΓΕΜΙΣΜΑ	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ
1	180	25	Ευθύγραμμο	X
2	180	38	κυψελωτό	Y
3	180	50	Τριγωνικό	Z
4	195	25	κυψελωτό	Z
5	195	38	Τριγωνικό	X
6	195	50	Ευθύγραμμο	Y
7	210	25	Τριγωνικό	Y
8	210	38	Ευθύγραμμο	Z
9	210	50	κυψελωτό	X

Α.Δοκμίου	$P_{\max}$ (N)	$\gamma_{\max}$ (mm)	L (mm)	I ( $\text{mm}^2$ )	E(Mpa)
1	261	3.82	95	341,33	3575.43
2	326	3.61			4725.65
3	258	1.49			9061.17
4	273.5	1.48			9670.45
5	290	3.55			4274.85
6	284.5	3.46			4302.86
7	253.5	3.42			3878.85
8	200.5	1.52			6902.74
9	338.5	3.76			4711.09

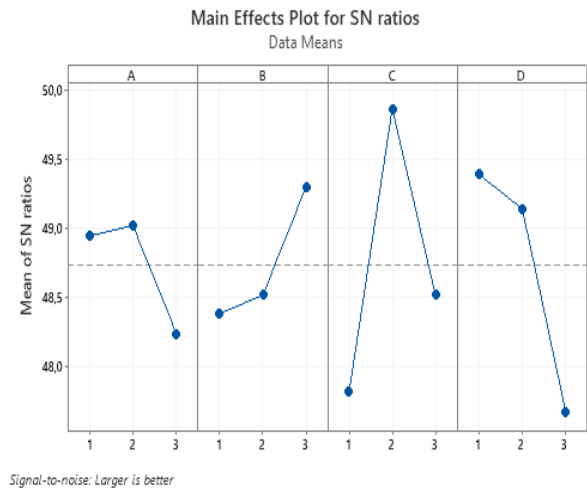
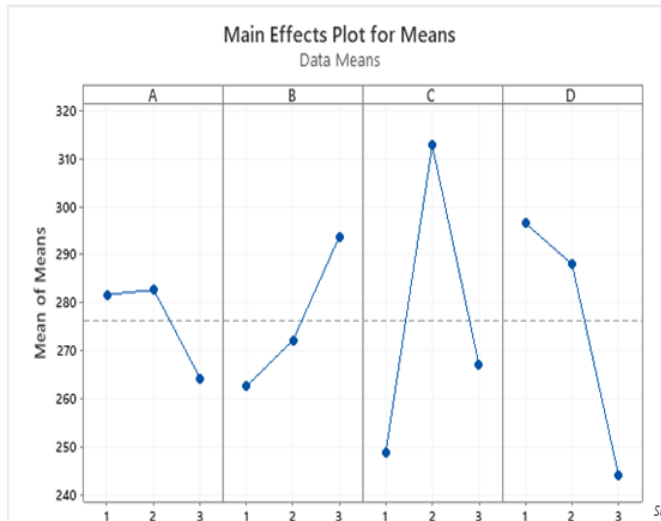
**Πίνακας 3: Αποτελέσματα υπολογισμών**

Αποτελέσματα προγράμματος ανάλυσης δεδομένων για την αντοχή

Taguchi Analysis: P versus A; B; C; D

Response Table for Means

Level	A	B	C	D
1	281,7	262,7	248,7	296,5
2	282,7	272,2	312,7	288,0
3	264,2	293,7	267,2	244,0
Delta	18,5	31,0	64,0	52,5
Rank	4	3	1	2



+	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	A	B	C	D	P				
1	1	1	1	1	261,0				
2	1	2	2	2	326,0				
3	1	3	3	3	258,0				
4	2	1	2	3	273,5				
5	2	2	3	1	290,0				
6	2	3	1	2	284,5				
7	3	1	3	2	253,5				
8	3	2	1	3	200,5				
9	3	3	2	1	338,5				

Εικόνα 3.1: Αποτελέσματα του προγράμματος στατιστικής ανάλυσης για την αντοχή.

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα και με τη βοήθεια του Minitab, πρόγραμμα στατιστικής ανάλυσης, βρέθηκαν οι βέλτιστες επιλογές παραγόντων για την κάθε μηχανική ιδιότητα που αναζητήθηκε. Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα γίνεται φανερό πως για τον κάθε παράμετρο υπάρχει και βέλτιστη τιμή. Για τον πρώτο παράμετρο την θερμοκρασία η βέλτιστη τιμή είναι η (2) με 195C. Για τον δεύτερο παράγοντα την ταχύτητα εκτύπωσης του εξωθητή ήταν η (3) με 50mm/s. Στη συνέχεια για τον τρίτο παράγοντα δηλαδή του μοτίβου γεμίσματος η βέλτιστη τιμή ήταν η (2), το τριγωνικό μοτίβο γεμίσματος και για τον τελευταίο παράγοντα, η τοποθέτηση του δοκιμίου, ήταν η τιμή (3) εκτυπώνοντας το δοκίμιο κατά την διεύθυνση του άξονα Χ. Λαμβάνοντας τις παραπάνω βέλτιστες τιμές του κάθε παράγοντα μπορώ να βρω την θεωρητική μέγιστη τιμή όλης της πειραματικής διαδικασίας, σύμφωνα πάντα με το πρόγραμμα στατιστικής ανάλυσης.

Παράμετροι		
Θερμοκρασία	2	195C
Ταχύτητα εκτύπωσης εξωθητη	3	50mm/s
Μοτίβο γεμίσματος	2	τριγωνικό
Διεύθυνση εκτύπωσης	1	Κατά τον Χ άξονα

Σύμφωνα με τις παραπάνω επιλογές βρέθηκε η θεωρητική μέγιστη τιμή **357N** ενώ παράλληλα βρέθηκε και η παράμετρος που επηρεάζει περισσότερο την αντοχή.

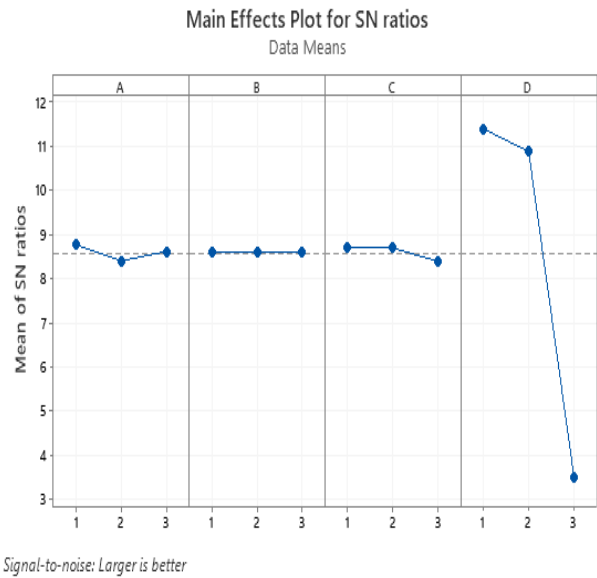
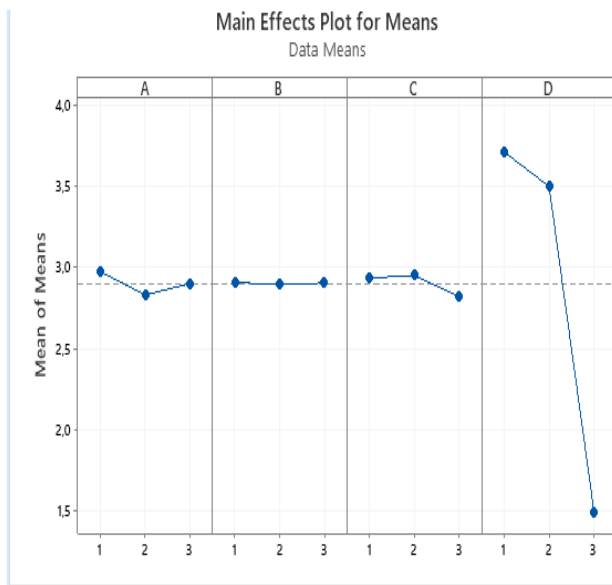
Παράμετροι	
Θερμοκρασία	4
Ταχύτητα εκτύπωσης εξωθητη	3
Μοτίβο γεμίσματος	1
Διεύθυνση εκτύπωσης	2

Μεγαλύτερο αντίκτυπο έχει το μοτίβο γεμίσματος ενώ μικρότερο έχει η θερμοκρασία.

Αποτελέσματα προγράμματος ανάλυσης δεδομένων για το βέλος κάμψης

Taguchi Analysis: y(max) versus A; B; C; D

Level	A	B	C	D
1	2,973	2,907	2,933	3,710
2	2,830	2,893	2,950	3,497
3	2,900	2,903	2,820	1,497
Delta	0,143	0,013	0,130	2,213
Rank	2	4	3	1



↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	A	B	C	D	y(max)	SNRA3	MEAN3		
3	1	3	3	3	1,49	3,4637	1,49		
4	2	1	2	3	1,48	3,4052	1,48		
5	2	2	3	1	3,55	11,0046	3,55		
6	2	3	1	2	3,46	10,7815	3,46		
7	3	1	3	2	3,42	10,6805	3,42		
8	3	2	1	3	1,52	3,6369	1,52		
9	3	3	2	1	3,76	11,5038	3,76		

Εικόνα 3.2: Αποτελέσματα του προγράμματος στατιστικής ανάλυσης για το βέλος κάμψης.



Με την ίδια ακριβώς διαδικασία βρέθηκε η θεωρητική μέγιστη τιμή **3,84mm** και το αντίκτυπο της κάθε παραμέτρου.

Παράμετροι		
Θερμοκρασία	1	180C
Ταχύτητα εκτύπωσης εξωθητη	1	25mm/s
Μοτίβο γεμίσματος	2	τριγωνικό
Διεύθυνση εκτύπωσης	1	Κατά τον X άξονα

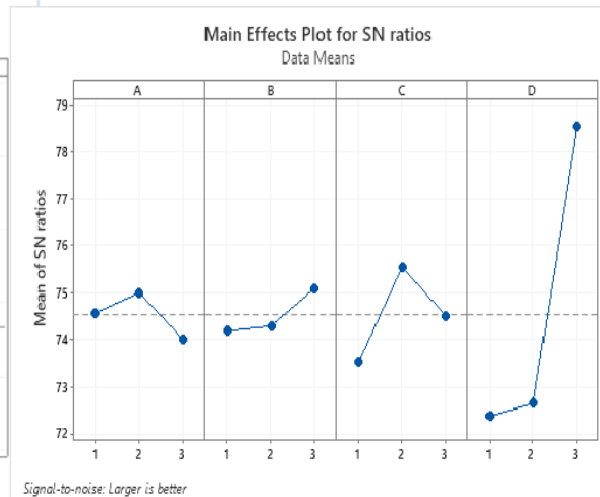
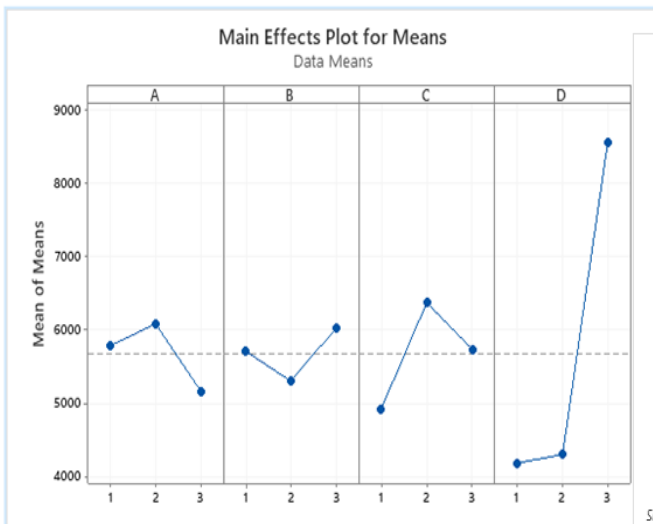
Παράμετροι	
Θερμοκρασία	2
Ταχύτητα εκτύπωσης εξωθητη	4
Μοτίβο γεμίσματος	3
Διεύθυνση εκτύπωσης	1

Μεγαλύτερο αντίκτυπο έχει η διεύθυνση εκτύπωσης ενώ μικρότερο έχει η ταχύτητα εκτύπωσης εξωθητή.

Αποτελέσματα προγράμματος ανάλυσης δεδομένων για το μέτρο ελαστικότητας

Taguchi Analysis: E(Mpa) versus A; B; C; D

Level	A	B	C	D
1	5787	5708	4927	4187
2	6083	5301	6369	4302
3	5164	6025	5738	8545
Delta	918	724	1442	4358
Rank	3	4	2	1



↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	A	B	C	D	E(Mpa)	SNRA4	MEAN4		
3	1	3	3	3	9061,17	79,1437	9061,17		
4	2	1	2	3	9670,45	79,7089	9670,45		
5	2	2	3	1	4274,85	72,6184	4274,85		
6	2	3	1	2	4302,86	72,6751	4302,86		
7	3	1	3	2	3878,85	71,7741	3878,85		
8	3	2	1	3	6902,74	76,7804	6902,74		
9	3	3	2	1	4711,09	73,4624	4711,09		

Εικόνα 3.3: Αποτελέσματα του προγράμματος στατιστικής ανάλυσης για το μέτρο ελαστικότητας.

Με την ίδια ακριβώς διαδικασία βρέθηκε η θεωρητική μέγιστη τιμή για το μέτρο ελαστικότητας **9987,25Μpa** και το αντίκτυπο της κάθε παραμέτρου.

<b>Παράμετροι</b>		
Θερμοκρασία	2	195C
Ταχύτητα εκτύπωσης εξωθητή	3	50mm/s
Μοτίβο γεμίσματος	2	τριγωνικό
Διεύθυνση εκτύπωσης	3	Κατά τον Z άξονα

<b>Παράμετροι</b>	
Θερμοκρασία	3
Ταχύτητα εκτύπωσης εξωθητή	4
Μοτίβο γεμίσματος	2
Διεύθυνση εκτύπωσης	1

Μεγαλύτερο αντίκτυπο έχει η διεύθυνση εκτύπωσης ενώ μικρότερο έχει η ταχύτητα εκτύπωσης εξωθητή.

## Συζήτηση αποτελεσμάτων

Στην εργασία αυτή ακολουθήθηκαν κάποιες διαδικασίες. Αρχικά, έγινε βιβλιογραφική ανασκόπηση, μελέτη πάνω στην τρισδιάστατη εκτύπωση (τεχνολογίες, υλικά, πεπερασμένα στοιχεία, διαδικασία εκτύπωσης). Για την καλύτερη κατανόηση του θέματος μελετήθηκαν άρθρα πάνω σε νέες τεχνολογίες εκτύπωσης καθώς και πειράματα κάμψης για να είναι πιο εύκολη η κατανόηση της διαδικασίας της κάμψης τριών σημείων.

Στη συνέχεια, έγινε διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων και επιλέχθηκαν η μέγιστη παραμόρφωση και η μέγιστη αντοχή σαν πρωταρχικές μηχανικές ιδιότητες. Μέσω του σχεδιασμού πειραμάτων DOE και με την χρήση της μεθοδολογίας Taguchi λήφθηκε πληροφορία πολλών πειραμάτων με τον ελάχιστο αριθμό δοκιμών. Συγκεκριμένα για 81 διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων χρειάστηκαν μόνο 9 δοκίμια, με 4 διαφορετικές παραμέτρους και από 3 τιμές η κάθε παράμετρος  $3^4 = 81$ . Όσον αφορά την επιλογή των δοκιμών έγινε έρευνα σύμφωνα με το σχεδιασμό των πειραμάτων και την μέθοδο Taguchi σειράς 9. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο αυτή επιλέχθηκαν τέσσερις διαφορετικοί παράμετροι (θερμοκρασία εξωθητή, ταχύτητα εκτύπωσης, μοτίβο γεμίματος, τρόπος εκτύπωσης) με τρεις διαφορετικές τιμές κι έτσι δημιουργήθηκαν εννέα δοκίμια. Η επιλογή των τιμών για τις παραμέτρους έγινε με βάση των χαρακτηριστικών του υλικού (PLA) και με βάση του εκτυπωτή που χρησιμοποιήθηκε.

Μέσω του τρισδιάστατου υβριδικού CAD μοντελοποιητή (inventor) έγινε ο τρισδιάστατος ψηφιακός σχεδιασμός του δοκιμίου. Έπειτα, με τη βοήθεια του slicer (flashprint) έγινε η παραμετροποίηση και η δημιουργία του αρχείου που είναι συμβατό με τον τρισδιάστατο εκτυπωτή. Έτσι αφού εκτυπώθηκαν τα εννέα αυτά δοκίμια εξετάστηκαν σε κάμψη. Από τα αποτελέσματα της κάμψης, σχεδιάστηκαν διαγράμματα μέσω excel και από αυτά υπολογίστηκε το μέτρο ελαστικότητας E.

Με τη βοήθεια του προγράμματος στατιστικής ανάλυσης (minitab) και χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων κάμψης πραγματοποιήθηκε η επιλογή του βέλτιστου δοκιμίου με τις βέλτιστες μηχανικές ιδιότητες (μέγιστη τάση, μέγιστη παραμόρφωση). Από την ίδια διαδικασία βρέθηκε και το πόσο επηρεάζει η κάθε παράμετρος τις συγκεκριμένες μηχανικές ιδιότητες.

Κατά τη διαδικασία του πειραματικού μέρους προέκυψαν κάποια ζητήματα, τα οποία έπρεπε να επιλυθούν. Αρχικά, ένα πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε κατά τη διαδικασία κατασκευής

ήταν ότι τα δείγματα που εκτυπώθηκαν κατά μήκος του άξονα Z δεν κατάφεραν να επιτύχουν επαρκή πρόσφυση στο τραπέζι του τρισδιάστατου εκτυπωτή. Ως εκ τούτου πολλές εκτυπώσεις απέτυχαν πάνω από ένα ορισμένο ύψος. Αυτό διορθώθηκε αφενός τοποθετώντας ειδική κόλλα μεταξύ του δοκιμίου και της μεταλλικής λάμας του τραπεζιού του εκτυπωτή και αφετέρου επιλέχθηκε η εκτύπωση της σχεδίας από το πρόγραμμα του εκτυπωτή και ύστερα η εκτύπωση του δοκιμίου. Άλλο ένα ζήτημα ήταν η επαναληψιμότητα της τεχνολογίας του Additive Manufacturing (προσθετικής κατεργασίας) που δεν είναι τόσο καλή με αποτέλεσμα να μην είναι τόσο ακριβής όλη αυτή η διαδικασία .

Όσον αφορά την ανάλυση των αποτελεσμάτων, παρατηρήθηκε ότι τα δοκίμια που εκτυπώθηκαν κατά τον άξονα Z είχαν χειρότερες μηχανικές ιδιότητες όχι μόνο ως προς την αντοχή αλλά και ως προς την παραμόρφωση. Συγκεκριμένα, τα δοκίμια αυτά σημείωσαν ελάχιστη παραμόρφωση σε συνδυασμό με χαμηλή αντοχή. Παράλληλα, τα δοκίμια που εκτυπώθηκαν κατά τον άξονα X σημείωσαν τη μέγιστη παραμόρφωση. Άλλος ένας καθοριστικός παράγοντας φαίνεται να είναι το μοτίβο γεμίσματος. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι τα δοκίμια που έχουν εκτυπωθεί με τριγωνικό μοτίβο γεμίσματος έχουν εμφανώς μεγαλύτερη αντοχή και μεγαλύτερη παραμόρφωση σε σχέση με τα άλλα μοτίβα γεμίσματος. Άλλος ένας παράγοντας που επηρέασε ελάχιστα τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων ήταν η ταχύτητα εκτύπωσης του εξωθητή. Επίσης, η θερμοκρασία δεν προκάλεσε σημαντικές αλλαγές στα αποτελέσματα. Το εύρος των τιμών στην αντοχή και στο βέλος κάμψης προέκυψαν αρκετά μεγάλα, αυτό οφείλεται όχι μόνο στο μεγάλο εύρος τιμών που πήραν οι παράμετροι αλλά και στην υπερευαισθησία του τρισδιάστατου εκτυπωτή. Συγκεκριμένα η μεγαλύτερη τιμή αντοχής με την μικρότερη είχαν διαφορά  $338,5 - 200,5 = 138\text{N}$  δηλαδή η μικρότερη είναι το 59,2% της μεγαλύτερης. Ομοίως για το βέλος κάμψης  $3,82 - 1,48 = 2,34\text{mm}$  δηλαδή το μικρότερο βέλος κάμψης είναι το 38,7% του μεγαλύτερου.

Εν κατακλείδι, επειδή οι παράμετροι που επιλέξαμε μπορεί να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους παράγονται διαφορετικά αποτελέσματα ανάλογα με το συνδυασμό τους. Μια πιθανή αλληλεπίδραση είναι μεταξύ ταχύτητας, θερμοκρασίας και γεωμετρίας. Καθώς ο χρόνος για την ολοκλήρωση ενός στρώματος αυξάνεται, η θερμοκρασία στο εξωθημένο στρώμα μειώνεται και συνεπώς η σύνδεση γίνεται ασθενέστερη.

Ένα βήμα για την εξέλιξη αυτής της πειραματικής διαδικασίας θα ήταν η εξέταση και η σύγκριση των θεωρητικών μέγιστων τιμών με τις πειραματικές. Συγκεκριμένα θα εκτυπώνονταν τα δοκίμια με τις παραμέτρους που θα προέκυπταν σύμφωνα με το πρόγραμμα στατιστικών δεδομένων.

Με την εκπόνηση αυτής της εργασίας εμπλουτίστηκαν οι γνώσεις μου πάνω στο αντικείμενο αυτό. Η κατασκευή των δοκιμών με την τρισδιάστατη εκτύπωση σε εργαστηριακό περιβάλλον συνέβαλλε στην ουσιαστική κατανόηση της μεθόδου αυτής. Ένα ακόμη κέρδος που αποκόμισα απ' την εργασία αυτή είναι η γνώση και ο σωστός χειρισμός προγραμμάτων και στατιστικών πακέτων (flashprint, minitab).

## Αναφορές

Alexios Papacharalampopoulos, H. B. P. S., 2018. Path planning for the infill of 3D printed parts utilizing Hilbert curves. *Elsevier*.

All3DP, 2016. *All3DP*. [Online]

Available at: <https://all3dp.com/history-of-the-reprap-project/>  
[Accessed 12 Μάιος 2020].

Anastasiou, A. και συν., 2013. 3D Printing: Basic concepts Mathematics and Technologies. Στο: s.l.:s.n.

Baguley, R., 2017. *Toms Guide*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.tomsguide.com/us/3d-printing-materials,news-24392.html>  
[Πρόσβαση 9 September 2020].

Elizabeth Matias, B. R., 2015. *3D Printing: On Its Historical Evolution and the Implications for Business*. s.l., s.n.

Endi Samba Luamba, J. B. d. P., 2019. A 3D BEM/FEM formulation for the static analysis of piled rafts and capped pile groups subjected to vertical and horizontal loads. In: *Engineering Analysis with Boundary Elements*. s.l.:s.n.

F.Brenne, T. H., 2013. Additively manufactured cellular structures: Impact of microstructure and local strains on the monotonic and cyclic behavior under uniaxial and bending load. In: *Journal of Materials Processing Technology*. s.l.:s.n.

Gabriel Carrilloa, D. K. M.-D., 2019. Mechanical Properties and Process Improvement of Tungsten Carbide Additively Manufactured with Renewable Biopolymers. *ScienceDirect*.

Gabriel Carrillo, D. K.-D., 2019. Mechanical Properties and Process Improvement of Tungsten Carbide Additively Manufactured with Renewable Biopolymers. In: *Procedia Manufacturing*. s.l.:s.n.

John Ryan C. Dizona, b. A. H. E. J. a. Q. C. R. C. A., 2018. Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Elsevier*.

Karthik RMa, B. P. S. K. b. V. L. b. J. R., 2016. A modular cantilever fixture and test methodology for thermoplastics: An alternative bending load case for validation of CAE material models. *Elsevier*.

Krzysztof Koziński, A. W., 2018. Comparison of experimental research and nonlinear advanced FEM analysis. In: *Engineering Structures*. s.l.:s.n.

Loughborough University , 2020. *Material Jetting*. [Online]

Available at:

<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialjetting/>

∟

[Accessed 12 Μάιος 2020].

Loughborough University, 2020. *Binder Jetting*. [Online]

Available at:

<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>  
[Accessed 12 Μάιος 2020].

Loughborough University, 2020. *Directed Energy Deposition*. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/directedenergydeposition/>

[Πρόσβαση 12 Μάιος 2020].

Loughborough University, 2020. *Material Extrusion*. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialextrusion/>

[Πρόσβαση 12 Μάιος 2020].

Loughborough University, 2020. *Powder Bed Fusion*. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion/>

[Πρόσβαση 12 Μάιος 2020].

Loughborough University, 2020. *Sheet Lamination*. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/sheetlamination/>

[Πρόσβαση 12 Μάιος 2020].

Loughborough University, 2020. *VAT Photopolymerisation*. [Online]

Available at:

<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/vatphotopolymerisation/>

[Accessed 12 Μάιος 2020].

M. Kotobi, H. M. M. H., 2019. Investigation of laser bending parameters on the residual stress and bending. Στο: *Optics and Laser Technology*. s.l.:s.n.

Mehrshad Mehrpouya, A. D. ,, B. F. ,, 2019. The Potential of Additive Manufacturing in the Smart Factory Industrial 4.0: A Review. *Applied sciences*.

P., A., χ.χ. *3D natives*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.3dnatives.com/en/plastics-used-3d-printing110420174/#!>

[Πρόσβαση 9 September 2020].

Qiuyu Miao1, D. W. D. C. Y. Z. G. B. F. N., 2019. Properties of 4043 Aluminum Alloy Fabricated by Wire-based Additive. *Elsevier*.

Roy, R. K., 1990. *A Primer on the Taguchi Method*. New York, Van Nostrand Reinhold Company.

S.Aravind Raja, E. J., 2018. A Case Study of 3D Printed PLA and Its Mechanical Properties. *Elsevier*.



Stephan Rosenthala, M. H. A. E. T., 2019. Simulation approach for three-point plastic bending of additively manufactured Hastelloy X sheets. *ScienceDirect*.

Übel, M. v., n.d. *ALLEDP*. [Online]

Available at: <https://all3dp.com/1/3d-printing-materials-guide-3d-printer-material/>

[Accessed 9 September 2020].

Vuchkov, I. & Boyadjieva, L., 2001. *Quality Improvement with Design of Experiments: A Response Surface Approach*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.

Wang Yangfan, C. X. S. C., 2019. Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 fabricated by wirearc. In: *Surface & Coatings Technology*. s.l.:s.n.

Weimin Yang, R. J., 2019. Research on intelligent manufacturing of 3D printing/copying of. Στο: *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. s.l.:s.n.

Wenzheng Wu, J. J. , J. , L. , L. , W. M. T. J. Z., 2018. Improving bending and dynamic mechanics performance of 3D printing through ultrasonic strengthening. In: *Materials Letters*. s.l.:s.n.

Wikipedia, 2019. *3D printing*. [Online]

Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/3D\\_printing](https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing)

[Accessed 12 Μάιος 2020].

Wikipedia, 2020. *3D printing processes*. [Online]

Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/3D\\_printing\\_processes#cite\\_note-1](https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing_processes#cite_note-1)

[Accessed 12 Μάιος 2020].

Zhenzhen Quan, J. S. , Y. X. Q. C. C. M. M.-W. C., 2018. Printing direction dependence of mechanical behavior of additively manufactured 3D preforms and composites. In: *Composite Structures*. s.l.:s.n.

Ι.Γιαννακόπουλος, Δ. Κ., 2011. *Σημειώσεις Πειραματικής Αντοχής υλικών*, Αθήνα: s.n.

Ian Gibson, D. R. B. S., 2015. *Additive Manufacturing Technologies*. 2η Έκδοση ed. s.l.:Εκδόσεις Springer.