



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τομέας Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών

«Μελέτη επίδρασης παραμέτρων σε δοκίμια
εκτυπωμένα μέσω τεχνολογίας
τριδιάστατης εκτύπωσης»

Ελένη Μαντζαβίνου

Επιβλέπων καθηγητής: Κωνσταντίνος Χαριτίδης

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2023

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στην Ερευνητική Μονάδα Προηγμένων, Σύνθετων, Νάνο Υλικών και Νανοτεχνολογίας, R-NanoLab, της σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Τομέας Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, το ακαδημαϊκό έτος 2022-2023. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τα πρόσωπα που με βοήθησαν για την υλοποίηση της εργασίας μου, συγκεκριμένα:

- τον καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Χαριτίδη για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, αλλά και για την εμπιστοσύνη και στήριξη που μου έδωσε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας,
- την υποψήφια διδάκτορα Ελένη Γκάρτζου, για την άψογη συνεργασία μας και την πολύτιμη καθοδήγηση, γνώσεις και βοήθεια που μου προσέφερε κατά την εκπόνηση της εργασίας μου,
- τους υποψήφιους διδάκτορες Κ. Ζαφείρη και Α. Κοντιζά για τη βοήθεια τους με τη χρήση του εξοπλισμού και τη στατιστική ανάλυση της εργασίας,
- την ομάδα του R-Nano Lab, για τη δημιουργία ενός ευχάριστου και φιλικού κλίματος συνεργασίας, αλλά και για το ενδιαφέρον και την ενθάρρυνσή τους,
- τους φίλους και την οικογένεια μου για την στήριξή τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης επιλεγμένων παραμέτρων σε δοκίμια εκτυπωμένα μέσω τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η τεχνολογία 3D εκτύπωσης μέσω Συντηγμένου Νήματος (Fused Filament Fabrication, FFF), στην οποία το αντικείμενο υπό κατασκευή δημιουργείται από πολλαπλές ίνες θερμοπλαστικού, που εξωθούνται, συγκολλούνται και στερεοποιούνται ακαριαία. Για την τεχνολογία FFF, διερευνήθηκε η επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ινών (ύψος και πλάτος ίνας) και της ογκομετρικής παροχής ως προς συγκεκριμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά, όπως η διαστατική ακρίβεια (απόκλιση πραγματικής/ονομαστικής γεωμετρίας) και η διακύμανση αυτής, για εμπορικό θερμοπλαστικό υλικό με βάση το πολύ(γαλακτικό οξύ) (PLA). Η ανάλυση έγινε ποιοτικά αλλά και ποσοτικά, χρησιμοποιώντας την μέθοδο μικροϋπολογιστικής τομογραφίας ακτινών X (X-ray Micro-computed Tomography, mCT). Αρχικά έγινε μια βιβλιογραφική ανασκόπηση για τις παραμέτρους και ακολούθησαν πειράματα για τον προσδιορισμό της μέγιστης ογκομετρικής παροχής του συστήματος 3D εκτύπωσης. Το πειραματικό πλάνο ορίστηκε για τη μελέτη των τριών παραμέτρων σε τρία επίπεδα (27 συνδυασμοί παραμέτρων). Για τον σχεδιασμό δοκιμών χρησιμοποιήθηκε το FullControl GCode Designer, που αποτελεί ένα λογισμικό ανοικτού κώδικα για τον άμεσο σχεδιασμό της τροχιάς της κεφαλής του εκτυπωτή και των παραμέτρων εκτύπωσης σε κάθε βήμα της κατασκευής. Σχεδιάστηκε η δομή των εκτυπωμένων δοκιμών, βασισμένη σε προηγούμενες βιβλιογραφικές μελέτες, τα οποία να καλύπτουν τρία επίπεδα δομών (1D – μεμονωμένες ίνες, 2D – λεπτές στρώσεις, 3D – τελικό αντικείμενο). Έπειτα από στατιστική ανάλυση και ποιοτική αξιολόγηση των επιπέδων 1D-2D δοκιμών για τους 3³ συνδυασμούς παραμέτρων, προέκυψε ο συνδυασμός παραμέτρων με την καλύτερη συνολική απόδοση, ο οποίος μελετήθηκε συνδυαστικά με τη συμβατική ροή εργασιών CAD/CAM για την κατασκευή και αποτίμηση 3D δοκιμών. Δεδομένου του ολοένα αυξανόμενου αριθμού νέων θερμοπλαστικών υλικών για τη τεχνολογία FFF, σε συνδυασμό με την ιδιαίτερα απαιτητική παραμετροποίηση του συστήματος που απαιτείται για κάθε υλικό, η συγκεκριμένη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε αποτελεί ολοκληρωμένο πλαίσιο μελέτης της απόκρισης ενός υλικού ως προς τη μεταβολή των παραμέτρων FFF, επιτρέποντας παράλληλα το προσδιορισμό κατάλληλων συνδυασμών παραμέτρων ανάλογα με τους στόχους της τελικής κατασκευής (π.χ. προφίλ παραμέτρων που ελαχιστοποιούν τον χρόνο εκτύπωσης ή μεγιστοποιούν τη διαστατική ακρίβεια). Τα δοκίμια που σχεδιάστηκαν επιτρέπουν την ομαδοποίηση πολλαπλών σετ παραμέτρων σε μικρό αριθμό δοκιμών, που απαιτούν μικρή ποσότητα υλικού και κατασκευάζονται σε σύντομο χρονικό διάστημα, παρέχοντας ένα γρήγορο και ευέλικτο σχήμα αξιολόγησης. Μελλοντικά, η μεθοδολογία αυτή μπορεί να επεκταθεί σε μεγάλο εύρος υλικών και να εμπλουτιστεί περαιτέρω με εργαλεία πειραματικού σχεδιασμού και βελτιστοποίησης.

Abstract

This thesis studies the effect of selected parameters on specimens produced by 3D printing. Specifically, Fused Filament Fabrication (FFF) 3D printing technology was studied, in which the object is created from multiple thermoplastic fibers, which are extruded, welded and solidified instantly. The effect of geometrical characteristics of fibers (fiber height and width), along with material volumetric flow rate, was studied using specific quality characteristics, such as fiber dimensional accuracy (actual/nominal geometry deviation) and its variation. A commercial thermoplastic material with poly(lactic acid) (PLA) was used for this purpose. The analysis was done qualitatively as well as quantitatively, using X-ray Micro-computed Tomography (mCT) and optical inspection. Initially, a literature review on the selected printing parameters was conducted, followed by experiments to determine the maximum volumetric flow rate of the 3D printing system used. The experimental design was set to study the three parameters at three levels (27 parameter combinations). FullControl GCode Designer was used to design the samples, which is an open-source software that allows the direct design of both the trajectory of the printer nozzle and printing parameters at each step of manufacturing. The structure of the printed samples was designed based on previous literature studies, covering three structural levels (1D – individual fibers, 2D – thin layers, 3D – final object). After statistical analysis and qualitative evaluation of the 1D-2D levels of the 3^3 parameter combinations, the parameter combination with the best overall performance was concluded. This combination was studied with the conventional CAD/CAM workflow for 3D specimen fabrication and evaluation. Given the ever-increasing number of new thermoplastic materials for FFF technology combined with the particularly demanding parameterization of the system required for each material, the specific methodology developed in this study constitutes an integrated framework for studying the effect of FFF parameters on a printed material, while allowing the selection of appropriate combinations of parameters depending on the goals of the project (e.g. parameter profiles that minimize print time or maximize dimensional accuracy). The design of the printed parts in this study allows grouping of several parameter combinations in a small number of tests, which require a small amount of material and are quickly fabricated, providing a fast and flexible evaluation system. In the future, this methodology can be extended to a wide range of materials and further enriched with further experimental design and optimization tools.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	7
2. Θεωρητικό μέρος.....	8
2.1 Τεχνολογίες 3D εκτύπωσης μέσω Fused Filament Fabrication (FFF)	8
2.1.1 Τεχνολογία FFF - Βασικές αρχές λειτουργίας.....	8
2.1.2 Υλικά FFF	14
2.1.3 Χαρακτηριστικά FFF δομών	16
2.1.4 Εφαρμογές.....	19
2.2 Σχεδιασμός και καθορισμός παραμέτρων FFF εκτύπωσης.....	21
2.2.1 Βασικά στάδια σχεδιασμού	21
2.2.2 Λογισμικά σχεδιασμού.....	22
2.2.3 Λογισμικά Καθορισμού παραμέτρων FFF.....	26
2.3 Μέθοδοι ποιοτικής αξιολόγησης FFF δομών	28
2.3.1 Είδη κατασκευαστικών σφαλμάτων	28
2.3.2 Μέθοδοι αξιολόγησης in-situ	34
2.3.3 Μέθοδοι αξιολόγησης μετά το στάδιο της κατασκευής	35
3. Πειραματικό Μέρος	40
3.1 Προσδιορισμός παραμέτρων εκτύπωσης.....	41
3.1.1 Ύψος στρώσης.....	41
3.1.2 Πλάτος ίνας	41
3.1.3 Ογκομετρική παροχή.....	42
3.2 Σχεδιασμός και εκτύπωση	47
3.2.1 1D	47
3.2.2 2D	50
3.2.3 3D	52
3.3 Τεχνικές χαρακτηρισμού.....	53
3.3.1 1D – mCT	53
3.3.2 2D - Στερεοσκόπιο.....	60
3.3.3 3D – Στερεοσκόπιο	61
4. Επεξεργασία αποτελεσμάτων	62
5. Συμπεράσματα.....	80
6. Βιβλιογραφία	81

1. Εισαγωγή

Στη σφαίρα της σύγχρονης κατασκευής και της ταχείας δημιουργίας πρωτοτύπων, η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει αναδειχθεί ως μια τεχνολογία με τη δυνατότητα να αναδιαμορφώσει τις βιομηχανίες, από την αεροδιαστημική έως την υγειονομική περίθαλψη και από τα καταναλωτικά αγαθά έως την τέχνη. Αυτή η διαδικασία, γνωστή και ως προσθετική κατασκευή επιτρέπει τη δημιουργία τρισδιάστατων αντικειμένων μέσω της εναπόθεσης υλικού στρώμα προς στρώμα, ζωντανεύοντας τα ψηφιακά σχέδια με απaráμιλλη ακρίβεια και αποτελεσματικότητα. Τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για 3D εκτύπωση είναι θερμοπλαστικά πολυμερή, κεραμικά, μεταλλικά ή σύνθετα και, ανάλογα με τη τεχνολογία που χρησιμοποιείται, αυτά μπορεί να είναι σε μορφή νήματος, σκόνης και ποικίλων άλλων [1].

Η 3D εκτύπωση αντιπροσωπεύει ένα ορόσημο στην εξέλιξη της τεχνολογίας καθώς, σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους αφαιρετικής κατασκευής, οι οποίες περιλαμβάνουν την κοπή και τη διαμόρφωση υλικών για τη δημιουργία αντικειμένων, η προσθετική κατασκευή δημιουργεί αντικείμενα στρώμα προς στρώμα, προσφέροντας πρωτοφανή ελευθερία σχεδίασης και αποδοτικότητα υλικού. Αυτή η θεμελιώδης αλλαγή στη μεθοδολογία παραγωγής έχει ωθήσει την καινοτομία σε πολλούς κλάδους, επιτρέποντας την ταχεία δημιουργία πρωτοτύπων, εξατομικευμένων καταναλωτικών προϊόντων και πολύπλοκων γεωμετριών για διάφορες εφαρμογές.

Η έρευνα για τις τρισδιάστατες τεχνολογίες είναι συνεχώς αυξανόμενη, διευρύνοντας ακόμα παραπάνω τις δυνατότητές της. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ο τομέας της 3D εκτύπωσης είναι εξαιρετικά διεπιστημονικός, με συνεισφορές από την επιστήμη των υλικών, τη μηχανική και την επιστήμη των υπολογιστών, μεταξύ άλλων. Η έρευνα, επίσης, καθοδηγείται από τις τεχνολογικές εξελίξεις αλλά και από τις απαιτήσεις της αγοράς.

Η παρούσα εργασία στοχεύει στη μελέτη της επίδρασης ορισμένων παραμέτρων εκτύπωσης, αφού οι παράμετροι εκτύπωσης έχουν σημαντική επίδραση στην ποιότητα του τελικού αποτελέσματος. Στόχος επίσης είναι η ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αντίστοιχες μελλοντικές έρευνες. Η τεχνολογία 3D εκτύπωσης που μελετάται είναι η τεχνολογία κατασκευής μέσω συντηγμένου νήματος (FFF), οι βασικές αρχές λειτουργίας της οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια.

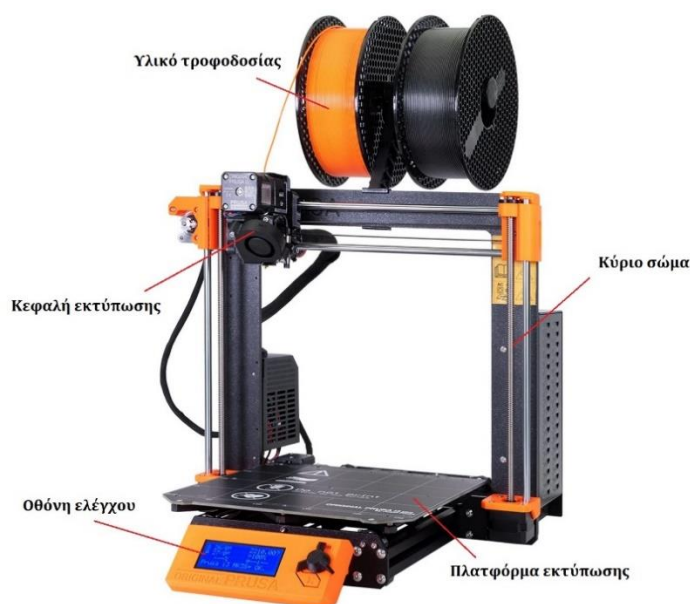
2. Θεωρητικό μέρος

2.1 Τεχνολογίες 3D εκτύπωσης μέσω Fused Filament Fabrication (FFF)

2.1.1 Τεχνολογία FFF - Βασικές αρχές λειτουργίας

Η τεχνολογία 3D εκτύπωσης Fused Filament Fabrication (FFF), ανήκει στην κατηγορία των τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής (ΠΚ, Additive Manufacturing AM), η οποία είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται σε ποικίλους ερευνητικούς και βιομηχανικούς τομείς, κυρίως για τις κατασκευές πρωτοτύπων και τελικών αντικειμένων. Στην τεχνολογία FFF, το υλικό τροφοδοτείται υπό μορφή νήματος σε μια κεφαλή εκτύπωσης, όπου θερμαίνεται, τήκεται και εξωθείται από ένα μεταλλικό ακροφύσιο πάνω σε ένα επίπεδο, την πλατφόρμα εκτύπωσης. Μέσω της σχετικής κίνησης ανάμεσα στην κεφαλή και την πλατφόρμα εκτύπωσης γίνεται δυνατή η ελεγχόμενη εναπόθεση ινών του υλικού, ύψους και πλάτους μερικών δεκάδων μμ. Οι ίνες αυτές συγκολλούνται και στερεοποιούνται ακαριαία, σχηματίζοντας μία στρώση παράλληλη στο επίπεδο της πλατφόρμας, η οποία αντιστοιχεί σε μία εγκάρσια τομή του αντικειμένου υπό κατασκευή. Με την ολοκλήρωση της εναπόθεσης της στρώσης, γίνεται μετακίνηση της κεφαλής στον Z άξονα προς τα πάνω και ξεκινά η εναπόθεση της επόμενης στρώσης έως να ολοκληρωθεί το τρισδιάστατο αντικείμενο, το οποίο «χτίζεται» από κάτω προς τα πάνω. Τα κύρια υλικά που χρησιμοποιούνται για αυτή τη μέθοδο είναι θερμοπλαστικά πολυμερή [2].

Ο εκτυπωτής FFF αποτελείται από τέσσερα μέρη: το κύριο σώμα, την πλατφόρμα εκτύπωσης (print bed), την κεφαλή εκτύπωσης και το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου (Σχήμα 1).



Σχήμα 1. Η δομή ενός εκτυπωτή FFF (Prusa MK3)

Το κύριο σώμα περιλαμβάνει τον σκελετό του εκτυπωτή με τον οποίο στηρίζονται και να προστατεύονται όλα τα μέρη του, καθώς και τα στοιχεία μετάδοσης κίνησης και τους κινητήρες. Η πλατφόρμα εκτύπωσης είναι η επιφάνεια πάνω στην οποία γίνεται η εναπόθεση του υλικού, η οποία αποτελείται από τζάμι ή φύλλο αλουμινίου και έχει τη δυνατότητα να κινείται στον Y άξονα. Η πλατφόρμα αυτή θερμαίνεται σε θερμοκρασία ανάλογη με το υλικό, έτσι ώστε να πραγματοποιείται η συγκόλληση της στρώσης σε εκείνη. Το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου περιλαμβάνει τους αισθητήρες θερμοκρασίας, τα κυκλώματα των βηματικών κινητήρων καθώς και το σύστημα ηλεκτρικής τροφοδοσίας του εκτυπωτή, απαραίτητο για τη λειτουργία των θαλάμων τήξης της κεφαλής και των ανεμιστήρων. Η πλακέτα ελέγχου, επίσης, είναι υπεύθυνη για τη μετατροπή των εντολών κατασκευής του αντικειμένου που δίνονται από τον χρήστη σε μορφή κώδικα.

Η κεφαλή εκτύπωσης (print head) εδράζεται πάνω σε εργαλειοφορείο, το οποίο έχει τη δυνατότητα αμφίδρομης κίνησης κατά μήκος του άξονα X, μέσω γραμμικών ρουλεμάν πάνω σε άξονες/οδηγούς κυκλικής διατομής. Αποτελείται από το σύστημα εξώθησης (που αναφέρεται και ως σύστημα τροφοδοσίας του υλικού), τον θάλαμο τήξης με το ακροφύσιο (hot end), καθώς και το σύστημα ψύξης [3].

Συγκεκριμένα:

(1) Σύστημα τροφοδοσίας - εξώθησης (extruder)

Σε έναν συμβατικό εκτυπωτή FFF, χρησιμοποιείται ένας βηματικός κινητήρας που συνδέεται με ένα γρανάζι κίνησης, το οποίο βρίσκεται σε άμεση επαφή με το νήμα και το μετακινεί. Η πίεση που προκαλείται από αυτή τη διαμόρφωση στο νήμα πρέπει να ρυθμίζεται σωστά, έτσι ώστε η μετακίνηση αυτή να γίνεται χωρίς εμπόδια. Το ίδιο το νήμα λειτουργεί και ως έμβολο, καθώς ασκεί την απαραίτητη πίεση ώστε να γίνει η εξώθηση του τήγματος από το ακροφύσιο. Ορισμένοι εκτυπωτές χρησιμοποιούν κεφαλή έμμεσης τροφοδοσίας (Bowden extruder), όπου ένας σωλήνας PTFE μεσολαβεί μεταξύ του συστήματος τροφοδοσίας και του θερμαινόμενου άκρου, μειώνοντας έτσι το συνολικό βάρος της κεφαλής, αφού το σύστημα τροφοδοσίας τοποθετείται σε σταθερή βάση εκτός του χώρου εργασίας [4].

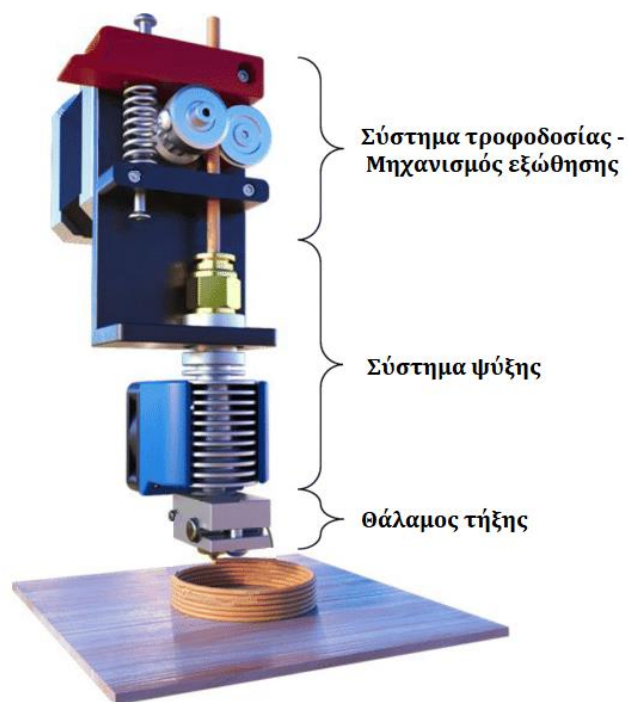
(2) Θάλαμος τήξης

Είναι το τμήμα του εξωθητήρα στο οποίο το υλικό τήκεται. Στην FFF χρησιμοποιούνται θερμοπλαστικά πολυμερή ή σύνθετα υλικά, τα οποία παρουσιάζουν μια αναστρέψιμη αλλαγή στη φυσική τους κατάσταση κατά τη θέρμανση πάνω από μια ορισμένη θερμοκρασία, τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (T_g) στα άμορφα ή την θερμοκρασία τήξης στα ημικρυσταλλικά πολυμερή. Ο σχεδιασμός του θαλάμου τήξης θα πρέπει να εξασφαλίζει επαρκή θέρμανση του υλικού ώστε να επιτυγχάνεται ο απαιτούμενος βαθμός τήξης του (π.χ. αυξάνοντας το μήκος του θερμαντικού μπλοκ για να αυξηθεί ο χρόνος παραμονής του υλικού κατά την εξώθηση). Το υλικό θερμαίνεται ακριβώς πάνω από το σημείο τήξης του.

Αυτό είναι πολύ σημαντικό, ώστε να αποφευχθεί η υπερβολική θέρμανση του υλικού που μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητη διαρροή ή υπερβολική εξώθηση κατά τη διάρκεια μη εκτυπωτικών και εκτυπωτικών κινήσεων, αντίστοιχα. Στο κάτω μέρος του θαλάμου τήξης προσαρμόζεται ένα μεταλλικό ακροφύσιο κυκλικής διατομής, στο οποίο πραγματοποιείται η μορφοποίηση του νήματος σε λεπτές ίνες πλαστικού που αποτελούν τα δομικά στοιχεία των FFF δομών. Στους περισσότερους εκτυπωτές FFF, το υλικό τροφοδοσίας έχει διάμετρο διατομής 1,75 ή 2,85 mm. Η είσοδος του ακροφυσίου έχει διάμετρο αντίστοιχη με το νήμα, ενώ η έξοδος του ακροφυσίου ποικίλλει μεταξύ 0,15 και 1,00 mm, ανάλογα με τις ανάγκες της κατασκευής. Το μέγεθος της διαμέτρου του ακροφυσίου έχει μεγάλη επίδραση στην πίεση εξώθησης που απαιτείται για μια συνεχή ροή υλικού.

(3) Σύστημα ψύξης

Στο κάτω μέρος του συστήματος τροφοδοσίας και πριν τον θάλαμο τήξης, προσδένεται μεταλλική ψύκτρα που λειτουργεί ως φράγμα μεταξύ των θερμών και των ψυχρών μερών του συστήματος εξώθησης, εξοπλισμένο με ανεμιστήρα. Ο βέλτιστος σχεδιασμός του είναι ζωτικής σημασίας για την πρόληψη της διαφυγής θερμότητας προς τα πάνω από το θερμό στο κρύο τμήμα. Από τη μία ο θάλαμος τήξης πρέπει να παραμένει στη θερμοκρασία τήξης του υλικού, ώστε να γίνεται ομαλά η εξώθηση και από την άλλη, το μη τηγμένο τμήμα του νήματος πρέπει να παραμένει σε στερεή κατάσταση, καθώς χρησιμοποιείται ως έμβολο για να ωθήσει το λιωμένο μέρος μέσα στο ακροφύσιο.



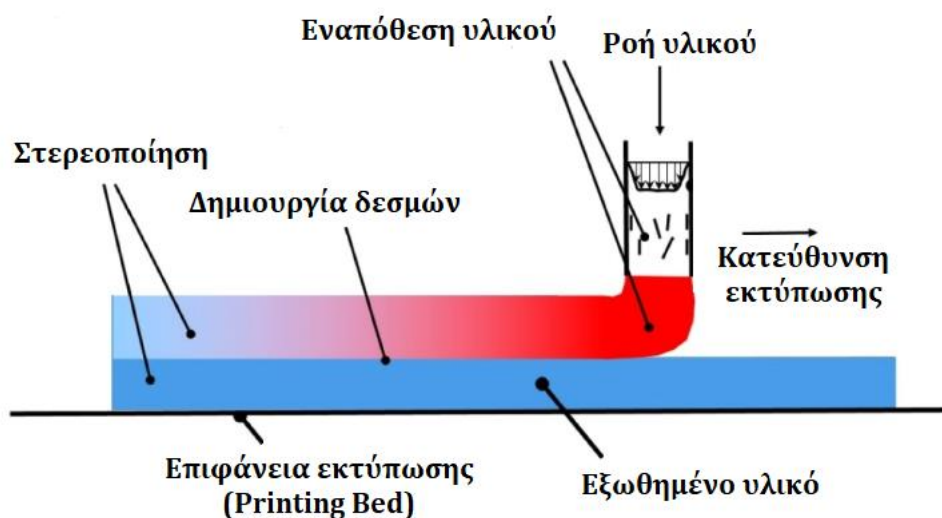
Σχήμα 2. Τα μέρη της κεφαλής εκτύπωσης

Η διαδικασία εναπόθεσης κάθε στρώσης είναι η ακόλουθη [5]:

1) Ροή υλικού μέσα από το ακροφύσιο και εναπόθεση πάνω στην πλατφόρμα εκτύπωσης ή στην προηγούμενη στρώση υλικού.

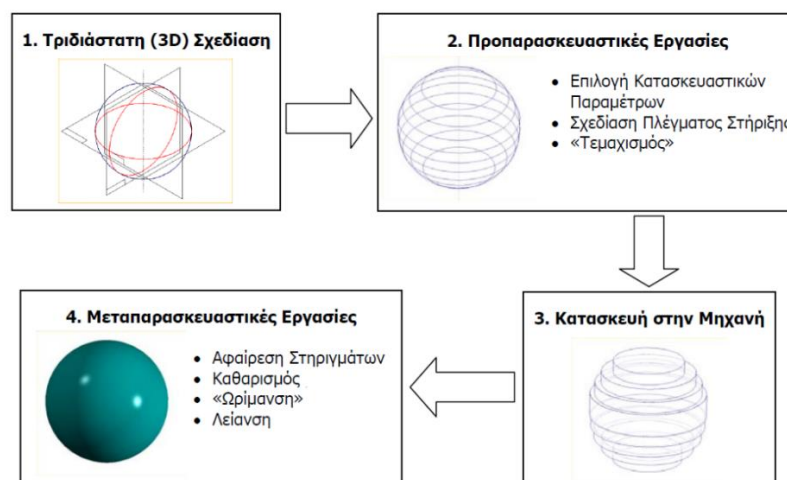
2) Σχηματισμός λαίμωσης ανάμεσα στις ίνες μέσω διάχυσης των πολυμερικών αλυσίδων για όσο χρόνο η θερμοκρασία παραμένει πάνω από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης. Η σύνδεση μεταξύ των ινών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από φαινόμενα διαβροχής, τα οποία ρυθμίζουν την περιοχή επαφής μεταξύ των εναποτιθέμενων νημάτων.

3) Διαδικασία ψύξης (στερεοποίηση). Το φαινόμενο αυτό συνδέεται άμεσα με την ταχύτητα της εκτύπωσης, καθώς υψηλότερη ταχύτητα μπορεί να μην επιτρέψει στο προ-εναποτιθέμενο στρώμα να κρυώσει επαρκώς πριν από την απόθεση του επόμενου στρώματος, οδηγώντας σε αστοχία εκτύπωσης.



Σχήμα 3. Η διαδικασία εναπόθεσης υλικού σε FFF printer (Brenken, B. et al. 2018)

Στη συνήθη ροή εργασιών, ένα τρισδιάστατο (3D) αντικείμενο δημιουργείται από ένα ψηφιακό μοντέλο. Τα στάδια για την δημιουργία αντικειμένου μέσω της συμβατικής διαδικασίας προσθετικής μηχανικής είναι τα ακόλουθα [4]:



Σχήμα 4. Τα στάδια προσθετικής μηχανικής

Συγκεκριμένα:

1) Τρισδιάστατη σχεδίαση

Είναι η σχεδίαση του τρισδιάστατου (3D) ψηφιακού μοντέλου του αντικειμένου μέσω ενός συστήματος μηχανολογικής ή βιομηχανικής σχεδίασης (CAD). Η τρισδιάστατη σχεδίαση είναι μία σχετικά συνηθισμένη πλέον εργασία για ένα πλήθος εφαρμογών που εκτείνονται από την απλή απεικόνιση μιας ιδέας μέχρι τον λειτουργικό, μηχανικό και υδροδυναμικό έλεγχο εξαρτημάτων και προϊόντων.

2) Προπαρασκευαστικές εργασίες

Για την αναπαράσταση του 3D μοντέλου και την μεταφορά των γεωμετρικών δεδομένων χρησιμοποιείται το πρότυπο STL. Πρόκειται ουσιαστικά για πολυεδρικό πρότυπο στο οποίο οι επιφάνειες του τρισδιάστατου μοντέλου προσεγγίζονται μέσω τριγώνων, κατά την απλούστερη δηλαδή πολυεδρική προσέγγιση/ψηφιδωτή αναπαράσταση. Καθώς πρόκειται για ένα απλό μοντέλο επιφανειών, το μοντέλο STL δεν περιέχει επιπλέον πληροφορίες που αφορούν στο χρώμα των επιφανειών, το υλικό, τις κατασκευαστικές ανοχές κλπ.

Με βάση το STL μοντέλο του αντικειμένου γίνεται επιλογή προσανατολισμού και παραμέτρων κατασκευής. Ως προσανατολισμό κατασκευής (build orientation) ορίζουμε την θέση του αντικειμένου σε σχέση με το σύστημα συντεταγμένων της μηχανής και ειδικά τον άξονα κατασκευής Z, ο οποίος ορίζει την κατεύθυνση κατά την οποία προστίθενται τα διαδοχικά στρώματα.

Στη συνέχεια, ανάλογα με το είδος της τεχνολογίας Προσθετικής Κατασκευής (ΠΚ), υπολογίζονται αυτόματα τα σημεία που χρειάζονται στήριξη και δημιουργείται η αντίστοιχη υποστηρικτική δομή. Η υποστηρικτική δομή (support structure) είναι απαραίτητη σε αρκετές τεχνολογίες ΠΚ, έτσι ώστε να διασφαλισθεί ότι η κατασκευή θα παραμείνει σταθερή και στέρεα κατά την διάρκεια του «χτισίματος» και ότι τμήματα του αντικειμένου που προεξέχουν σύμφωνα με τον επιλεγθέντα προσανατολισμό δε θα καμφθούν λόγω βάρους ή θα παρασυρθούν από τα κινούμενα μέρη της μηχανής.

Ακολουθεί η διαδικασία του τεμαχισμού (slicing) όπου το αντικείμενο και η αντίστοιχη υποστηρικτική δομή τέμνονται σε διαδοχικά επίπεδα, τα οποία είναι παράλληλα σε αυτό της πλατφόρμας (επίπεδο XY). Σημαντική σε αυτή τη φάση είναι η επιλογή του πάχους στρώματος (layer thickness) το οποίο ορίζει την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών οριζόντιων επιπέδων. Η απόσταση αυτή επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια του τελικού αντικείμενου. Αποτέλεσμα της διαδικασίας τεμαχισμού είναι το αρχείο διατομών (sliced file), το οποίο αποτελεί μία «στοίβα» δισδιάστατων τομών, από κάτω προς τα πάνω, που περιγράφουν γεωμετρικά τα στρώματα τα οποία πρέπει να κατασκευασθούν από τη μηχανή για να «χτισθεί» το αντικείμενο. Από εκεί προκύπτει και ο τελικός κώδικας [4]. Στη διαδικασία τεμαχισμού περιλαμβάνεται και ο καθορισμός όλων των παραμέτρων εκτύπωσης, όπως η ταχύτητα ή η θερμοκρασία εκτύπωσης.

Το σύστημα FFF αναγνωρίζει αρχεία σε μορφή GCode. Είναι μια γλώσσα προγραμματισμού για τον έλεγχο της κίνησης του εξωθητήρα FFF στον χώρο [6].

3) Στάδιο Κατασκευής

Στην τρίτη φάση της διαδικασίας, τα αρχεία κώδικα των αντικειμένων εισάγονται στη μηχανή ΠΚ, όπου ξεκινά η κατασκευή του αντικειμένου. Στους περισσότερους εκτυπωτές FFF ο εξωθητήρας κινείται σε οριζόντιο επίπεδο κατά την εκτύπωση σύμφωνα με την προδιαγεγραμμένη διαδρομή για την απόθεση ενός στρώματος. Μόλις αποθεθεί ένα στρώμα η κεφαλή εκτύπωσης κινείται στον άξονα Z. Η επόμενη στρώση εναποτίθεται στις προηγούμενες στρώσεις και επαναλαμβάνεται η διαδικασία μέχρι να ολοκληρωθεί η κατασκευή του εξαρτήματος. Η αντοχή του κατασκευασμένου αντικειμένου εξαρτάται από τη συγκόλληση μεταξύ δύο διαδοχικών στρωμάτων. Απαιτείται επαρκής θερμική ενέργεια ώστε να προκληθεί ένωση μεταξύ της ενεργοποιημένης επιφάνειας και του πρόσφατα αποτιθέμενου στρώματος.

4) Διεργασίες αποπεράτωσης

Με την ολοκλήρωση της κατασκευαστικής φάσης το αντικείμενο απομακρύνεται είτε με την βοήθεια ειδικών εργαλείων είτε με το χέρι, ώστε να καθαρισθεί από το τυχόν υπάρχοντα στηρίγματα ή/και υπολείμματα πρώτης ύλης. Επίσης, ανάλογα με την φύση της χρησιμοποιούμενης τεχνολογίας ΠΚ, ίσως απαιτηθούν επιπλέον μετα-παρασκευαστικές εργασίες όπως η τοποθέτηση του κομματιού εντός κατάλληλου θαλάμου «ωρίμανσης», όπου εκτίθεται σε κατάλληλες συνθήκες προκειμένου να αποκτήσει αντοχή τέτοια που θα επιτρέπει την εκτέλεση των τελικών εργασιών τελειοποίησής του, όπως την λείανση και το βάψιμο των επιφανειών του [4].

Οι παράμετροι της διαδικασίας FFF επηρεάζουν σημαντικά τις ιδιότητες των αντικειμένων υπό κατασκευή. Συνοπτικά, οι βασικές παράμετροι εκτύπωσης παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 1. Βασικές παράμετροι εκτύπωσης FFF [6]

Κατηγορία	Παράμετροι
Παράμετροι τεμαχισμού (slicing)	Πλάτος - ύψος ίνας, ογκομετρική παροχή, ταχύτητα εκτύπωσης, ποσοστό πλήρωσης (infill), προσανατολισμός ινών, μοτίβο πλήρωσης, πλάτος περιγράμματος
Προσανατολισμός	Προσανατολισμός εκτύπωσης
Θερμοκρασιακές συνθήκες	Θερμοκρασία εξώθησης, θερμοκρασία πλατφόρμας εκτύπωσης

2.1.2 Υλικά FFF

Τα υλικά νήματος FFF έχουν σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του παραγόμενου τελικού τμήματος, όπως μηχανικές ιδιότητες, θερμική αγωγιμότητα και ηλεκτρική αγωγιμότητα. Μέχρι σήμερα, υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι υλικών νήματος FFF που έχουν αναπτυχθεί, από καθαρά θερμοπλαστικά έως σύνθετα πολυμερή και βιοπλαστικά [6].

Πολλές κατηγορίες θερμοπλαστικών υλικών είναι διαθέσιμες με τη μορφή FFF νήματος. Η επιλογή γίνεται με βάση κριτήρια της τελικής εφαρμογής, όπως χημική αντοχή, αντοχή στη θερμότητα, ευκαμψία, ανάλογα με τις απαιτήσεις της τελικής εφαρμογής. Τα πιο συνηθισμένα είναι: συμπολυμερές ακρυλονιτριλίου-βουταδιενίου-στυρενίου (ABS), πολυγαλακτικό οξύ (PLA), πολυανθρακικά πολυμερή (PC), πολυαιθερική κετόνη (PEEK), πολυαιθεριμίδιο (PEI), νάιλον, πολυστυρένιο υψηλής αντοχής σε κρούση (HIPS). Τα χαρακτηριστικά τους συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 2. Βασικά υλικά εκτύπωσης FFF [6]

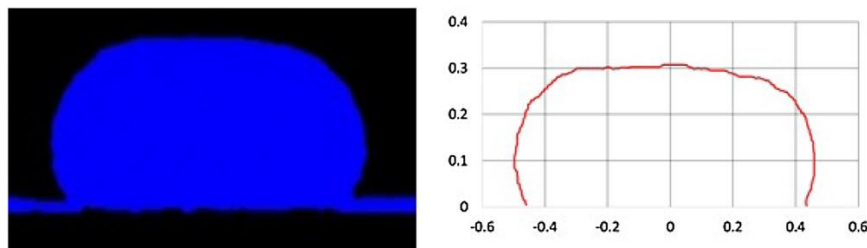
Υλικό	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Θερμοκρασιακό εύρος εκτύπωσης
ABS	Σκληρό, υψηλή αντοχή στην κρούση, χαμηλό κόστος, ανθεκτικό	Συρρίκνωση και παραμορφώσεις, παραγωγή δυσάρεστων αερίων	210-250 °C
PLA	Βιοαποικοδομήσιμο υπό συγκεκριμένες συνθήκες, χαμηλές παραμορφώσεις, χαμηλού κόστους	Κακές μηχανικές ιδιότητες, τραχιά υφή, ευαίσθητο	190-230 °C
PC	Σκληρό, ευέλικτο, καλά οπτικά χαρακτηριστικά	Υψηλή θερμοκρασία εκτύπωσης, απορρόφηση υγρασίας	260-310 °C
PEEK	Σκληρό, ελαφρύ, υψηλή μηχανική, θερμική, χημική αντοχή	Υψηλή θερμοκρασία εκτύπωσης, ακριβό, παραμορφώσεις	360-420 °C
PEI	Καλή αντοχή σε θερμότητα, χημική σταθερότητα, καλές μηχανικές ιδιότητες, δυνατό, βιοσυμβατό	Υψηλή θερμοκρασία εκτύπωσης, ακριβό, παραμορφώσεις, δύσκολη εκτύπωση	340-380 °C
Nylon	Καλές μηχανικές ιδιότητες, οικονομικό, ανθεκτικό στη χρήση και στη θερμοκρασία, εύκαμπτο	Παραμορφώσεις, υψηλή θερμοκρασία εκτύπωσης, απορρόφηση υγρασίας	240-270 °C
HIPS	Διαλυτότητα, μεγάλη αντοχή στην κρούση	Παραμορφώνεται, απαιτεί θερμαινόμενη επιφάνεια εκτύπωσης, εκπέμπει στυρένιο κατά την εκτύπωση	220-250 °C

Άλλα υλικά όπως η θερμοπλαστική πολυουρεθάνη (TPU), η πολυβινυλική αλκοόλη (PVA) και το τροποποιημένο τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET-G) είναι επίσης δημοφιλή στην καταναλωτική αγορά [7].

Τα σύνθετα υλικά προσελκύουν την προσοχή των ερευνητών για τα νήματα FFF, λόγω των μοναδικών ιδιοτήτων και του χαμηλού κόστους τους [6]. Ένα σύνθετο νήμα ή σύνθετο υλικό γενικά, είναι ένας συνδυασμός δύο ή περισσότερων υλικών με μοναδικές ιδιότητες οι οποίες δεν μπορούν να επιτευχθούν από κανένα από τα δύο συστατικά μόνο. Στα σύνθετα υλικά, το κύριο συστατικό ονομάζεται μήτρα (matrix) και ο στόχος της ανάπτυξης σύνθετων υλικών είναι συχνά η βελτίωση των ιδιοτήτων της. Τα σύνθετα υλικά πολυμερούς μήτρας είναι κατάλληλα για τη διεργασία FFF καθώς αυτή έχει αναπτυχθεί για να χρησιμοποιεί θερμοπλαστικά για την παραγωγή εξαρτημάτων. Σε πολλές περιπτώσεις, προστίθενται ενισχυτικά υλικά για μείωση του κόστους, αλλά οι ενισχύσεις μπορούν επίσης να βελτιώσουν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των αντικειμένων εκτυπωμένων με FFF. Ίνες όπως γυαλί, φλοιός ρυζιού και άνθρακα χρησιμοποιούνται συχνά ως υλικά ενίσχυσης σε πολυμερικές μήτρες. Η ετερογενής φύση των σύνθετων υλικών καθιστά δύσκολη την ανακύκλωση στο τέλος της ωφέλιμης ζωής τους. Φιλικά προς το περιβάλλον σύνθετα νήματα μπορούν να παρασκευαστούν χρησιμοποιώντας βιοαποδομήσιμα πολυμερή υλικά, τα οποία έχουν χαμηλότερα αποτυπώματα άνθρακα στο τέλος του κύκλου ζωής τους [6].

2.1.3 Χαρακτηριστικά FFF δομών

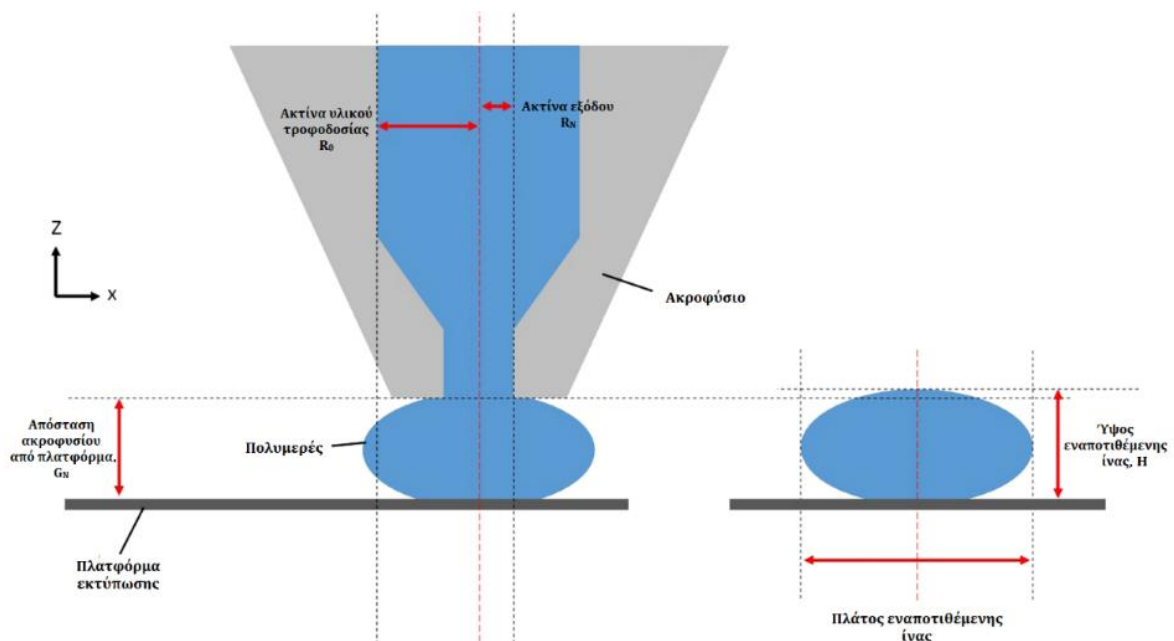
Στη ενότητα αυτή παρουσιάζονται συνοπτικά μελέτες που ερευνούν την δομή των ινών που τυπώνονται με FFF. Οι Hebda et al. [8] μελέτησαν πειραματικά την επίδραση της απόστασης του ακροφυσίου από την πλατφόρμα εκτύπωσης στην μορφολογία ινών PLA εκτυπωμένων με FFF. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5, η κάθε ίνα έχει ελλειπτικό σχήμα με ύψος H .



Σχήμα 5. Μορφολογία ίνας όπως σκιαγραφήθηκε από σάρωση στο mCT (Hebda et al.)

Ωστόσο, το τελικό ύψος των ινών που εκτυπώνονται πάνω στην πλατφόρμα εκτύπωσης, δηλαδή του πρώτου στρώματος, επηρεάζεται από την απόσταση G_N του ακροφυσίου από εκείνη (Σχήμα 6). Συνήθως $G_N < H$, λόγω του περιβάλλοντος εξώθησης του υλικού, οπότε το εξωθημένο νήμα περιορίζεται σε έναν πεπερασμένο χώρο και το τελικό ύψος είναι μικρότερο από αυτό που θα ήταν θεωρητικά και παράλληλα, το πλάτος εξώθησης είναι μεγαλύτερο από την διάμετρο του ακροφυσίου.

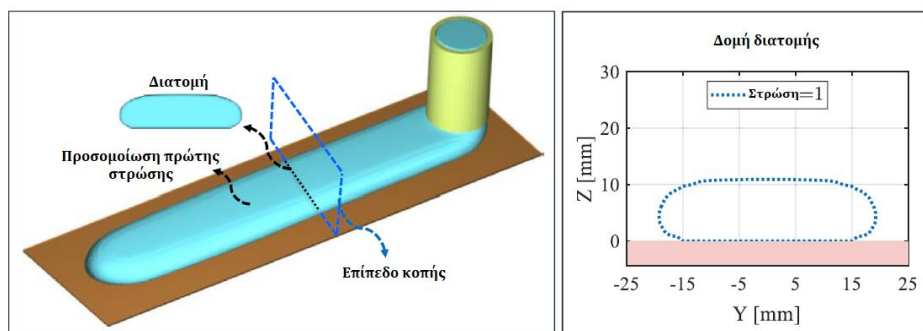
Το τελικό ύψος επηρεάζεται από ποικίλες παραμέτρους, όπως η ογκομετρική παροχή, η ταχύτητα εξώθησης, η ταχύτητα εκτύπωσης και ο συνδυασμός τους.



Σχήμα 6. Μορφολογία των ινών κατά την εξώθηση

Για να αποφευχθεί αυτή η «συμπίεση» του υλικού στο πρώτο στρώμα, πολλά λογισμικά τεμαχισμού έχουν μια λειτουργία που αφήνει ένα κενό στην Z-κατεύθυνση κατά την εκτύπωση του πρώτου στρώματος. Τα στρώματα μετά το πρώτο δεν επηρεάζονται τόσο από αυτό το φαινόμενο, καθώς τυπώνονται πάνω σε στρώμα πολυμερούς, το οποίο δεν είναι απόλυτα στερεό, αλλά γίνεται ένα τηγμένο πολυμερές.

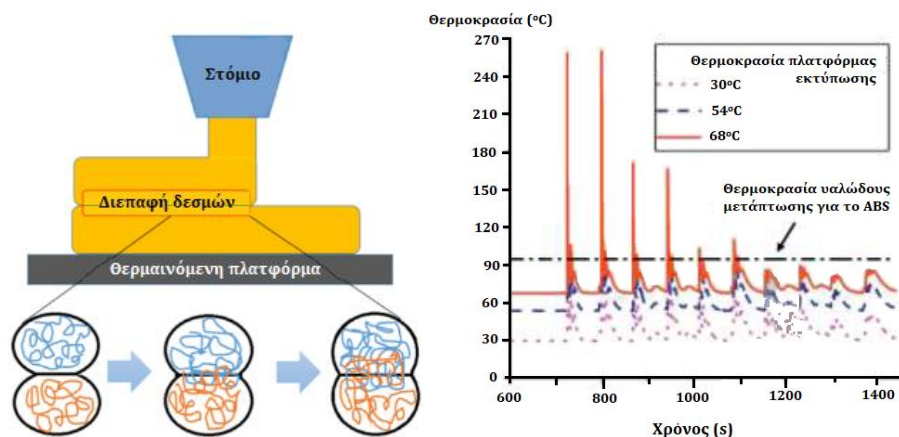
Οι Mollah et al. [9] καταλήγουν μέσω προσομοίωσης σε αντίστοιχα συμπεράσματα για την μορφολογία των ινών (Σχήμα 7).



Σχήμα 7. Η μορφολογία των ινών (Mollah et al., 2023)

Συνεπώς η κάθε ίνα έχει ελλειπτικό σχήμα και έχει διαφορά ανάμεσα στην πρώτη και τις επόμενες στρώσεις, καθώς η πρώτη στρώση επηρεάζεται από την απόσταση του ακροφυσίου από την πλατφόρμα εκτύπωσης.

Η ανάπτυξη των συγκολλήσεων ανάμεσα στις εναποτιθέμενες ίνες συμβαίνει κάτω από συγκεκριμένη θερμοκρασία. Οι Gao et al. διερεύνησαν τις θερμοκρασιακές συνθήκες κατά την ανάπτυξη του «λαιμού» (neck growth), δηλαδή των συγκολλήσεων ανάμεσα στις ίνες και κατέληξαν στο ότι κατά την εναπόθεση μιας νέας ίνας υπάρχει θερμοκρασιακή μεταβλητότητα [10], όπως φαίνεται και στο Σχήμα 8. Συγκεκριμένα, η θερμοκρασία κατά την εναπόθεση έχει μια περιοδική συμπεριφορά ανάμεσα στην θερμοκρασία δημιουργίας συγκόλλησης και στη θερμοκρασία της του περιβάλλοντος υλικού.

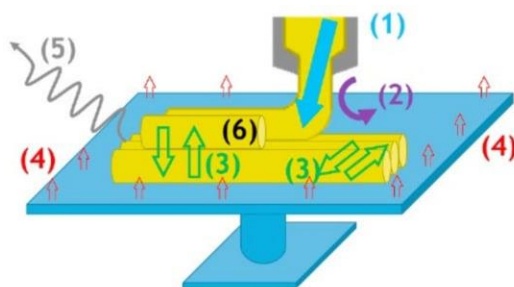


Σχήμα 8. Το θερμοκρασιακό προφίλ της δημιουργίας συγκόλλησης (Gao et al., 2021)

Ως αποτέλεσμα, ο χρόνος δημιουργίας συγκόλλησης είναι πολύ μικρός, της τάξης δευτερολέπτων, πριν αρχίσει η στερεοποίηση των ινών. Για τον λόγο αυτό, είναι σύνηθες στις FFF δομές να υπάρχουν κενά ή ατελείς συγκολλήσεις μεταξύ των διαδοχικών ινών, ενώ οι παράμετροι όπως η θερμοκρασία, η ταχύτητα εκτύπωσης και η ογκομετρική παροχή του υλικού επηρεάζουν άμεσα την ποιότητα των συγκολλήσεων (βλ. Κεφάλαιο 2.3.1).

Κατά την εκτύπωση, το ζεστό νήμα εναποτίθεται στα προηγουμένως εναποτιθέμενα νημάτια τα οποία βρίσκονται σε διαδικασία ψύξης. Η επαφή με το ζεστό νήμα προκαλεί την εκ νέου θέρμανσή τους, ορίζοντας ένα χρόνο κατά τον οποίο οι διεπιφάνειες των νημάτων που έρχονται σε επαφή είναι πάνω από τη θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου (T_g) στην περίπτωση άμορφων υλικών ή τη θερμοκρασία κρυστάλλωσης (T_c) για ημικρυσταλλικά υλικά, κατά τον οποίο λαμβάνει χώρα η δημιουργία συγκολλήσεων. Οι Vanaei et al. μελέτησαν τους ποικίλους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας στις τεχνολογίες FFF [11] και αυτοί είναι οι ακόλουθοι:

- (1) Θερμότητα που προκαλείται από τον θάλαμο τήξης
- (2) Ψύξη του υλικού με αέρα
- (3) Μεταφορά θερμότητας ανάμεσα στις ίνες
- (4) Θερμότητα από την θερμαινόμενη επιφάνεια εκτύπωσης
- (5) Απώλειες λόγω ακτινοβολίας μεταξύ των ινών και του περιβάλλοντος
- (6) Θερμότητα από την εξώθερμη κρυστάλλωση των ημικρυσταλλικών πολυμερών



Σχήμα 9. Οι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας κατά την εκτύπωση

Κάθε νήμα πρέπει να είναι αρκετά ζεστό για να σχηματιστούν οι συγκολλήσεις, αλλά όχι πολύ ζεστό, ώστε να αποτρέπεται η παραμόρφωση λόγω του βάρους των νημάτων που εναποτίθενται στα επόμενα στρώματα.

2.1.4 Εφαρμογές

Οι τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής υιοθετήθηκαν αρχικά ως μέσο κατασκευής πρωτοτύπων και μοντέλων νέων προϊόντων που βρίσκονται στη φάση του σχεδιασμού και της ανάπτυξης. Η ΠΚ είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην κατασκευή πρωτοτύπων, καθώς μειώνεται η δυσκολία παραγωγής μορφολογικά περίπλοκων αντικειμένων, μειώνεται το κόστος παραγωγής και δοκιμάζονται-διορθώνονται καινοτομίες μέσα σε ήδη υπάρχοντα προϊόντα με ταχύ και αυτοματοποιημένο τρόπο [4].

Σύμφωνα με στατιστικές έρευνες, η τεχνολογία FFF είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία ΠΚ, κατέχοντας περίπου 69% μερίδιο της αγοράς [12]. Οι τεχνολογίες FFF έχουν εξαιρετικά ευέλικτες κατασκευαστικές ικανότητες, που επιτρέπουν στον χρήστη να κατασκευάζει προϊόντα σύμφωνα με τις ειδικές απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής. Πράγματι, το FFF είναι η μόνη τεχνολογία κατεργασίας πλαστικών που αποτελείται από δεκάδες παραμέτρους για τον ακριβή έλεγχο του τελικού αποτελέσματος [7].

Πέρα από την κατασκευή πρωτύπων, η κατασκευή συντηγμένου νήματος (FFF) έχει βρει μεγάλο αριθμό εφαρμογών σε όλους τους τύπους μεταποιητικών τομέων, συμπεριλαμβανομένου του βιοϊατρικού, της αεροδιαστημικής, του αυτοκινήτου, αλλά και σε φαρμακευτικά, ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά, τρόφιμα, υφάσματα, κοσμήματα, παιχνίδια, αθλητικά και διάφορα άλλα [7].

Όσον αφορά τον ιατρικό τομέα, η ζήτηση για την ανάπτυξη εξατομικευμένων προϊόντων είναι υψηλή καθώς κάθε ασθενής χρειάζεται μοναδικά εμφυτεύματα, εργαλεία, υποστηρικτικούς οδηγούς και προσθετικά. Οι διαδικασίες ΠΚ είναι κατάλληλες για την παραγωγή προσαρμοσμένων προϊόντων με υψηλή απόδοση, ακρίβεια και χαμηλό κόστος [6]. Συγκεκριμένα, η FFF χρησιμοποιείται για την κατασκευή εξατομικευμένων μοσχευμάτων, ιατρικών εργαλείων και ιατρικών συσκευών χορήγησης φαρμάκων, μεταξύ άλλων [4].

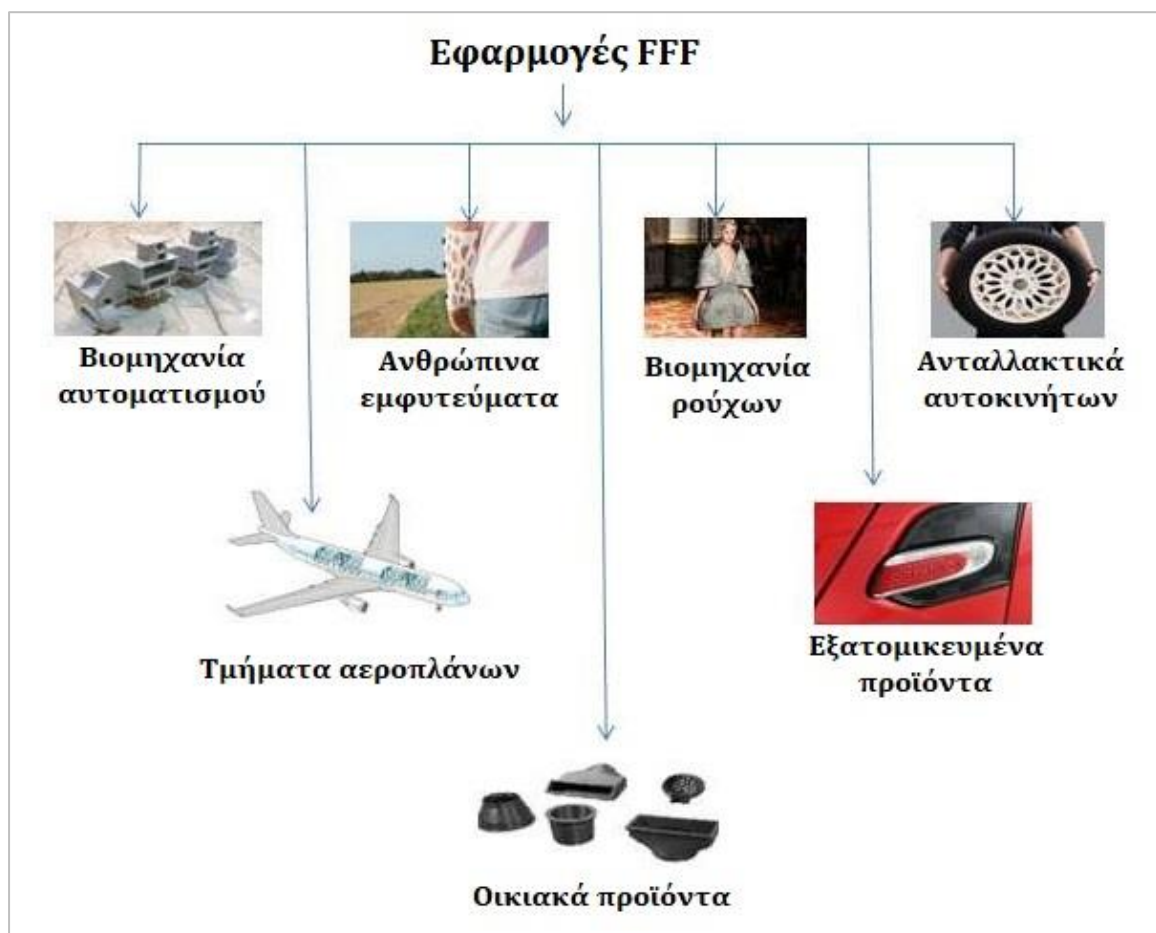
Αντίστοιχα, οι εφαρμογές της διαδικασίας FFF στα αυτοκίνητα και την αεροδιαστημική αυξάνονται λόγω του χαμηλού κόστους, της πολύπλοκης παραγωγής ανταλλακτικών και του προσαρμοσμένου σχεδιασμού [6].

Εκτυπωμένο PEEK συγκεκριμένα έχει εφαρμογές στον αεροδιαστημικό τομέα, αφού είναι ελαφρύ και έχει καλές μηχανικές ιδιότητες, ισχυρή θερμική σταθερότητα, αντοχή σε υπεριώδη ακτινοβολία και χημικά. Επίσης έχει εφαρμογές στη χημική βιομηχανία, στην κατασκευή εξαρτημάτων για εφαρμογές υγρής χρωματογραφίας και στην κατασκευή αντιδραστήρων [13].

Συνοψίζονται, τα κύρια υλικά που χρησιμοποιούνται στις βασικές εφαρμογές FFF [14]:

Πίνακας 3. Βασικά υλικά εφαρμογών FFF

Κατηγορία	Εφαρμογές	Υλικά
Ιατρική	ΙΚριώματα, όργανα, ιστοί	Πολυκαπρολακτόνη (PCL), Πολυουρεθάνες (PURs), Πολύ L- λακτίδιο (L-PLA) κ.α.
Αεροδιαστημική	Κεραμικά και μεταλλικά εξαρτήματα	Zirconia, Πολυπροπυλένιο (PP), Σίδηρος/Nylon, Σύμπλοκο ακριλονιτρίου – βουταδιενίου – στυρενίου (ABS) κ.α.
Ηλεκτρολογικά	Αγώγιμα προϊόντα	ABS/ατσάλι κ.α.
Διατάξεις ανίχνευσης	Σένσορες	Πολυγαλακτικό οξύ (PLA), ABS, Nylon κ.α.

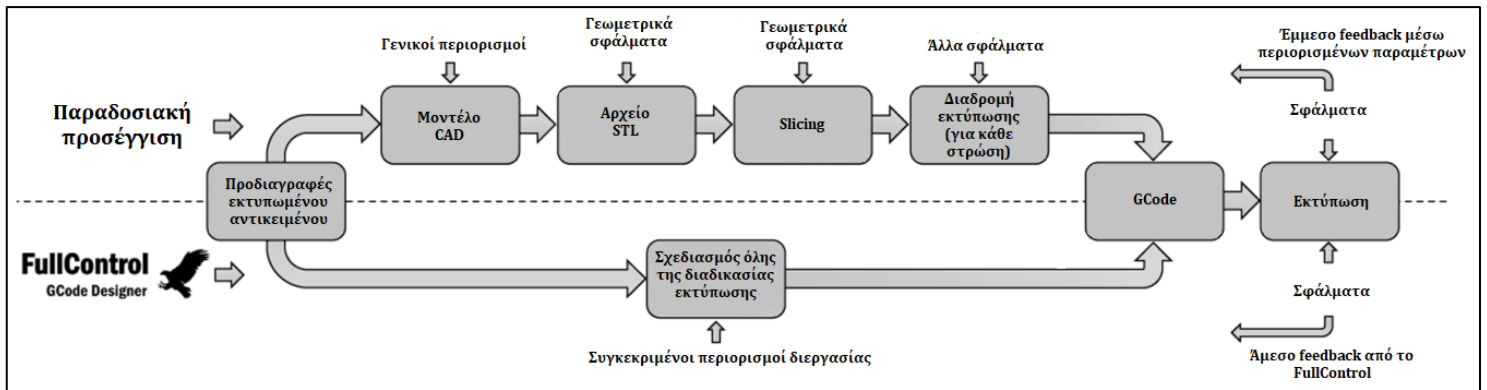


Σχήμα 10. Βασικές εφαρμογές FFF (Vinay Shah, 2021)

Ωστόσο, παρά τα διάφορα πλεονεκτήματα των τεχνολογιών FFF για τον κατασκευαστικό και βιομηχανικό τομέα, η μέθοδος έχει πολλές προκλήσεις που δεν έχουν επιλυθεί μέχρι σήμερα, όπως η τραχύτητα επιφάνειας, η ανακρίβεια κατασκευής (που οδηγεί συχνά σε κακή επαναληψιμότητα), η χαμηλή ταχύτητα εκτύπωσης και οι παραμορφώσεις [7] (βλ. Κεφάλαιο 2.3.1).

2.2 Σχεδιασμός και καθορισμός παραμέτρων FFF εκτύπωσης

2.2.1 Βασικά στάδια σχεδιασμού



Σχήμα 11. Οι δύο εναλλακτικές «διαδρομές» σχεδιασμού (Gleadall, 2021)

Η κανονική ροή εργασίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι:

- Δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου CAD (Computer Aided Design) και εξαγωγή του σε μορφή STL.
- Εισαγωγή και επεξεργασία του STL σε ένα πρόγραμμα slicing, υπολογισμός των διαδρομών του εργαλείου εκτυπωτή με βάση το τρισδιάστατο μοντέλο.
- Εξαγωγή του αρχείου σε μορφή κώδικα (G-Code).
- Μεταφορά του αρχείου στον printer και εκτύπωση.

Ωστόσο, υπάρχει μια εναλλακτική ροή, μέσω του προγράμματος FullControl, κατά την οποία σχεδιάζεται σε ένα βήμα όλη η διαδικασία εκτύπωσης από τον χρήστη και εξάγεται απευθείας ο κώδικας (G-Code) [15].

2.2.2 Λογισμικά σχεδιασμού

2.2.2.1 Fusion 360 (CAD)

Το Fusion 360 είναι ένα τρισδιάστατο πρόγραμμα CAD (Computer Aided Design) που κυκλοφόρησε από την Autodesk το 2013. Το πρόγραμμα έχει πολλές διαφορετικές χρήσεις, συμπεριλαμβανομένης της 3D μοντελοποίησης [16], και χρησιμοποιείται κυρίως στον βιομηχανικό τομέα, καθώς ενσωματώνει βιομηχανικό σχεδιασμό, δομικό σχεδιασμό και μηχανική προσομοίωση. Αποτελεί μια πλατφόρμα σχεδιασμού που δίνει τη δυνατότητα συνεργασίας και κοινής χρήσης των αρχείων τόσο σε άλλες πλατφόρμες όσο και μέσω του Cloud.

Το Fusion360 περιλαμβάνει διάφορα περιβάλλοντα εργασίας και ενότητες, συγκεκριμένα μοντελοποίηση, rendering, συναρμολόγηση, επιδιορθώσεις επιφανειών, animation, προσομοίωση και ούτω καθεξής. Πραγματοποιεί την κατασκευή με τη βοήθεια υπολογιστή (Computer Aided Manufacturing, CAM), καθιστώντας την επεξεργασία πιο ολοκληρωμένη.

Όσον αφορά τη χρήση στο 3D printing, οι χρήστες μπορούν να σχεδιάσουν το εκτυπωμένο δοκίμιο απευθείας στο Fusion360 και να εξάγουν από εκεί το αρχείο STL [17].

2.2.2.2 Full Control XYZ (Algorithmic Design)

Το FullControl [18] προτείνει μια νέα σχεδιαστική προσέγγιση, στην οποία ο χρήστης ορίζει κάθε τμήμα της διαδρομής εκτύπωσης μαζί με όλες τις παραμέτρους εκτύπωσης (που βασίζονται σε γεωμετρικούς ή μη γεωμετρικούς παράγοντες).

Ο GCode δημιουργείται απευθείας από το λογισμικό, χωρίς την ανάγκη προγραμματιστικών δεξιοτήτων και χωρίς τη χρήση λογισμικών σχεδίασης (CAD), αρχείων STL ή λογισμικών slicing. Χρησιμοποιείται Excel το οποίο έχει προγραμματιστεί με Visual Basic (περίπου =2500 γραμμές κώδικα). Πρόσφατα εκδόθηκε και μια μορφή του FullControl που χρησιμοποιεί το Python ως περιβάλλον σχεδιασμού.

Με το συγκεκριμένο λογισμικό μπορούν να σχεδιαστούν μαθηματικά καθορισμένες δομές και 3D γεωμετρίες που είναι αδύνατο να επιτευχθούν με τον παραδοσιακό τρόπο σχεδίασης 3D δοκιμίων. Η προσέγγιση σχεδίασης FullControl επιτρέπει να σχεδιάζονται προσεκτικά οι κινήσεις των ακροφυσίων - τόσο κατά τη διάρκεια της εξώθησης όσο και κατά τη διαδρομή μεταξύ αποσυνδεδεμένων εξωθημένων όγκων. Έτσι, υπάρχει η δυνατότητα να ξεπεραστούν οι εγγενείς περιορισμοί της διαδικασίας εκτύπωσης και να βελτιωθούν οι δυνατότητες σε δύσκολα υλικά.

Τα αρχεία έχουν μικρό μέγεθος, γεγονός που βελτιώνει σημαντικά τη δυνατότητα κοινής χρήσης τους, εξαλείφοντας τον κίνδυνο εμφάνισης σφαλμάτων κατά τη μετατροπή του αρχείου STL ή λόγω διαφορετικών ασυνεπών ρυθμίσεων slicing. Τα σχέδια παράγονται άμεσα, αντί της επίπονης παραδοσιακής ρουτίνας που χρησιμοποιεί πολλαπλά λογισμικά και μετατροπές αρχείων. Στην τυπική προσέγγιση, η δημιουργία GCode είναι μια διαδικασία πολλαπλών βημάτων και κάθε βήμα περιλαμβάνει περιορισμούς και εισάγει σφάλματα. Στο FullControl έχει αναπτυχθεί ένα πρακτικό πλαίσιο που επιτρέπει τον ρητό καθορισμό της διαδρομής εκτύπωσης μαζί με όλες τις παραμέτρους για κάθε μεμονωμένο τμήμα της διαδρομής αυτής, συμπεριλαμβανομένων της κατεύθυνσης, της ταχύτητας εκτύπωσης, του ρυθμού εξώθησης και άλλες σχετικές παραμέτρους. Ο χρήστης ορίζει κάθε βήμα του σχεδίου κατασκευής με διαδοχικό τρόπο.

Για κάθε τμήμα-διαδρομή εκτύπωσης, ο χρήστης ορίζει:

- Συντεταγμένες της έναρξης του τμήματος (mm) (καρτεσιανές ή πολικές)
- Συντεταγμένες του τέλους του τμήματος (mm)
- Πληροφορίες σχετικά με την ποσότητα εξώθησης κατά την κίνηση της κεφαλής εκτύπωσης για αυτό το τμήμα
- Ταχύτητα της κεφαλής εκτύπωσης κατά την εκτύπωση του τμήματος ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)
- Αναγνωριστικό κεφαλής εκτύπωσης (για εκτυπωτές πολλαπλών υλικών ή εργαλείων)

Πέρα τις κινήσεις της κεφαλής εκτύπωσης, ο χρήστης μπορεί να ορίσει μη γεωμετρικές παραμέτρους όπως: θερμοκρασία (ακροφύσιο, πλατφόρμα εκτύπωσης, θάλαμος), επιτάχυνση και τράνταγμα, ταχύτητα ανεμιστήρα, παύση της εκτύπωσης για επιθεώρηση ή εισαγωγή προκατασκευασμένων εξαρτημάτων, προσθήκη γραμμών σχολίων στο GCode για βελτίωση της αναγνωσιμότητας από τον άνθρωπο, έλεγχος βοηθητικού εξοπλισμού όπως κάμερες ή υπεριώδεις λυχνίες πολυμερισμού).

Μόλις ο χρήστης ορίσει όλες τις παραμέτρους στη σχεδιάσή του, δημιουργείται ο GCode και μπορεί να γίνει προεπισκόπηση του τελικού σχεδίου σε όποιο λογισμικό προτιμά ο χρήστης (π.χ. Repetier Host).

Το FullControl ενσωματώνει επίσης ορισμένες απαραίτητες λειτουργίες που δεν σχετίζονται με το σχεδιασμό της τυπωμένης δομής. Συγκεκριμένα, οι οδηγίες στην αρχή και στο τέλος του αρχείου GCode είναι συγκεκριμένες για έναν δεδομένο εκτυπωτή και διασφαλίζουν ότι αρχίζει να εκτυπώνει σωστά και ολοκληρώνει τη διαδικασία εκτύπωσης με ασφάλεια (π.χ. απενεργοποίηση θερμαντήρων).

Άλλες λειτουργίες έχουν συμπεριληφθεί στο FullControl για τη βελτίωση της χρηστικότητάς του, όπως αποθήκευση/ φόρτωση σχεδίων, απενεργοποίηση/ ενεργοποίηση τμημάτων της εκτύπωσης, δημιουργία ρυθμιζόμενων παραμέτρων, περιγραφή συντεταγμένων με απόλυτους ή σχετικούς τρόπους και προσθήκη αυτόματων κινήσεων εάν ο χρήστης δημιουργεί αποσυνδεδεμένα τμήματα διαδρομής εκτύπωσης.

Το FullControl επιτρέπει εύκολα την άμεση σύγκριση διαφορετικών τρισδιάστατων εκτυπωτών, επειδή ένα μοναδικό σχέδιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για όλους τους εκτυπωτές που χρησιμοποιούν G-κώδικα, δηλαδή για την πλειοψηφία των εκτυπωτών.

Μια βασική ευκαιρία που παρέχεται από την προσέγγιση σχεδίασης FullControl είναι η απεριόριστη ικανότητα σχεδίασης μονοπατιών εκτύπωσης χρησιμοποιώντας και τις τρεις διαστάσεις, σε αντίθεση με τη συμβατική προσέγγιση ολοκλήρωσης κινήσεων X-Y (επίπεδο εκτύπωσης-πλατφόρμας) πριν τη μετακίνηση προς την κατεύθυνση Z. Επίσης, σε πιο σύνθετες γεωμετρικές δομές (π.χ. πλέγματα), η δημιουργία ενός μοντέλου CAD θα ήταν εξαιρετικά αναποτελεσματική και προκλητική και θα είχε ως αποτέλεσμα κακή ποιότητα προϊόντος, καθώς θα εισήχθησαν σφάλματα (από τη μετατροπή του αρχείου STL και από τη δημιουργία μιας διαδρομής εκτύπωσης).

Αντίθετα, περίπλοκες γεωμετρικές δομές μπορούν να δημιουργηθούν στο FullControl χρησιμοποιώντας επαναλαμβανόμενα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Γενικά, η προσέγγιση FullControl ταιριάζει περισσότερο σε δομές όπου οι συντεταγμένες μπορούν να προσδιοριστούν συστηματικά ή μαθηματικά.



Σχήμα 12. Δομές που έχουν δημιουργηθεί με μαθηματικές συναρτήσεις μέσω FullControl

Στον ακόλουθο πίνακα συνοψίζονται τα βασικά πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί του σχεδιασμού με FullControl.

Πίνακας 4. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του FullControl

Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί
<ul style="list-style-type: none"> • Οι συντεταγμένες X, Y και Z, καθώς και ο όγκος, η ταχύτητα και άλλες ρυθμίσεις εξώθησης λαμβάνονται υπόψη ταυτόχρονα για κάθε τμήμα της διαδρομής εκτύπωσης (π.χ. ο ρυθμός εξώθησης μπορεί να σχεδιαστεί ώστε να ποικίλλει ανάλογα με το ύψος του στρώματος). • Η κίνηση χωρίς εξώθηση είναι πλήρως σχεδιασμένη. Επομένως, τα σχετικά ελαττώματα μπορούν να εξαλειφθούν ή να ελαχιστοποιηθούν. • Οποιαδήποτε πτυχή της διαδικασίας που είναι ελεγχόμενη με το GCode μπορεί να εφαρμοστεί στη σχεδίαση. Για παράδειγμα, οι παύσεις μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να επιτρέπουν τη σταθεροποίηση και την εστίαση ενός εργαλείου μικροσκοπίου. • Κάθε τμήμα διαδρομής εκτύπωσης ή οδηγία GCode μπορεί να τροποποιηθεί μετά την αρχική δημιουργία. • Δεν απαιτούνται δεξιότητες προγραμματισμού για τη δημιουργία του GCode. • Το πλήρες σχέδιο μπορεί να μεταφερθεί απευθείας μεταξύ των εκτυπωτών χωρίς τον κίνδυνο ασυνέπειας λόγω των ρυθμίσεων του slicer διαφορετικών χρηστών. • Δεν υπάρχουν σφάλματα μεταφοράς δεδομένων, λόγω της εξάλειψης των συμβατικών διαδικασιών μετατροπής από CAD σε STL σε κομμένα επίπεδα σε διαδρομές εκτύπωσης. 	<ul style="list-style-type: none"> • Απαιτείται υψηλό επίπεδο τεχνογνωσίας για τον σχεδιασμό μιας διαδρομής εκτύπωσης και τον καθορισμό όλων των παραμέτρων. Ο χρήστης πρέπει να γνωρίζει παράγοντες που συχνά ρυθμίζονται αυτόματα στο λογισμικό slicing (π.χ. ταχύτητα του ανεμιστήρα ψύξης). • Ποικίλες διαδρομές εκτύπωσης είναι τεχνικά προκλητικές για τον σχεδιασμό. Πολλά τυπικά στοιχεία θα ήταν δύσκολο να σχεδιαστούν χρησιμοποιώντας την μέθοδο. • Ορισμένα συστήματα 3D εκτύπωσης χρησιμοποιούν μια ιδιόκτητη μορφή κώδικα ελέγχου μηχανής (όχι GCode) ή χρησιμοποιούν λογισμικό που δεν μπορεί να εεπεξεργαστεί τροποποιημένο GCode. Αυτά τα συστήματα είναι προς το παρόν ακατάλληλα για το FullControl. • Ο κίνδυνος ανθρώπινου λάθους πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη, αφού ο σχεδιαστής έχει περισσότερο έλεγχο.

Όσο αφορά τη βιομηχανική εφαρμογή του λογισμικού παρατηρείται αυξημένη απόδοση προϊόντος (αύξηση της ταχύτητας του εκτυπωτή), μειωμένος χρόνος μετά την παραγωγή λόγω της βελτιωμένης ποιότητας συμπεριλαμβανομένου του φινιρίσματος της επιφάνειας, μείωση πρώτων υλών μέσω βελτιστοποίησης βάρους και γενική βελτίωση αξιοπιστίας του εκτυπωτή καθώς τα μηχανήματα λειτουργούν πιο ομαλά [18].

2.2.3 Λογισμικά Καθορισμού παραμέτρων FFF

Η διαδικασία υπολογισμού της διαδρομής εκτύπωσης με βάση το αρχείο τρισδιάστατου μοντέλου CAD ονομάζεται slicing. Αυτό γίνεται με ξεχωριστά λογισμικά, τους λεγόμενους slicers ή λογισμικά τεμαχισμού. Για τον υπολογισμό της διαδρομής εκτύπωσης (printer tool path), οι slicer προσπαθούν να βρουν όλα τα συμπαγή σχήματα του μοντέλου [19].

Το λογισμικό 3D slicer αναλύει το σχέδιο που έχει δημιουργηθεί για εκτύπωση, καθορίζει την ταχύτητα εξώθησης, βελτιστοποιεί τη διαδρομή του εξωθητήρα για την εκτύπωση του αντικειμένου και ελέγχει τον προσανατολισμό του αντικειμένου και τον σχηματισμό των στρωμάτων. Συνεπώς, ένα καλό λογισμικό 3D slicer είναι πολύ σημαντικό. Εάν χρησιμοποιηθεί ένα καλό εργαλείο slicing, σίγουρα θα προκύψουν καλύτερα αποτελέσματα, ακόμη και από έναν μέτριο εκτυπωτή. Ο slicer υπολογίζει πόσο υλικό θα χρειαστεί και πόσο χρόνο θα χρειαστεί για να το κάνει. Όλες οι επεξεργασμένες πληροφορίες δημιουργούνται σε ένα αρχείο GCode που μεταφέρεται στον εκτυπωτή [20].

Η διαδικασία slicing έχει ως εξής: τα συμπαγή σχήματα κόβονται σε στρώματα, τόσο παχιά όσο το ύψος του στρώματος του εκτυπωτή. Σε κάθε στρώμα υπολογίζονται οι απαραίτητες διαστάσεις διαδρομής εργαλείου για την εκτύπωση αυτού του επιπέδου. Αυτό περιλαμβάνει την κίνηση σε δύο άξονες και τον ρυθμό τροφοδοσίας του εξωθητήρα. Στη συνέχεια, ο εκτυπωτής εκτυπώνει στρώμα - στρώμα διαστάσιμα και μετακινείται στην τρίτη διάσταση μεταξύ των στρωμάτων κατά το ύψος του στρώματος [19].

Κάποια από τα πιο ευρέως διαδεδομένα λογισμικά παρατίθενται παρακάτω:

- Το Cura είναι ένα δωρεάν λογισμικό ανοιχτού κώδικα (open-source) που αναπτύχθηκε από την Ultimaker και περιλαμβάνει όλες τις ρυθμίσεις για την εφαρμογή τεμαχισμού για 3D εκτυπωτή. Το μενού βασικών ρυθμίσεων έχει δυνατότητες τη λειτουργία προβολής Layers, Transparent, Overhang και Normal που κατανομούνται σε διαφορετικές καρτέλες ως και τις ακόλουθες λειτουργίες: περιστροφή, κλίμακα και καθρέφτης [14]. Το Cura προσφέρει μέτριο αριθμό ρυθμίσεων, συνεπώς υπάρχουν λιγότερες διαθέσιμες ρυθμίσεις σε σύγκριση με τα άλλα εργαλεία κοπής. Η εστίασή του είναι σε ένα φιλικό προς το χρήστη περιβάλλον εργασίας [19].
- Το Slic3r είναι ένα δωρεάν λογισμικό ανοιχτού κώδικα, που αναπτύχθηκε από τον Alessandro Ranellucci και υποστηρίζεται από πολλούς συνεργάτες. Η επεξεργασία του μοντέλου πραγματοποιείται μέσω μιας διεπαφής τεσσάρων καρτελών: Platter, Print Settings, Filament Settings και Printer Settings. Είναι πιο δύσκολη η εξοικείωση με την επεξεργασία μοντέλου στο Slic3r λόγω της περίπλοκης ρύθμισης των κουμπιών. Παρέχει ξεχωριστές καρτέλες για την εκτύπωση, το υλικό και τον εκτυπωτή που χρησιμοποιείται. Στην πιο «προχωρημένη» λειτουργία του, το Slic3r προσφέρει πολλές λεπτομερείς ρυθμίσεις [19].

- Το Simplify3D αποτελεί ένα από τα πιο κοινά λογισμικά τεμαχισμού στην αγορά. Το λογισμικό επιτρέπει μια τεράστια ποικιλία επιλογών στις ρυθμίσεις που προσφέρει: έλεγχος στρώσης, διάφορες μέθοδοι πλήρωσης, ρυθμίσεις θερμοκρασίας και ψύξης, εισαγωγή αρχείων STL, OBJ ή 3MF, κλίμακα, περιστροφή και επισκευή τρισδιάστατου μοντέλου. Το λογισμικό είναι συμβατό με πολλούς διαφορετικούς εκτυπωτές και παρέχει πολύ καλή ταχύτητα και έλεγχο [20].
- Το Prusa slicer είναι επίσης ένα open source λογισμικό, που είναι εύκολο για τον χρήστη και επιτρέπει τον καθορισμό πολλών παραμέτρων εκτύπωσης, ενώ στηρίζει μια πληθώρα υλικών εκτύπωσης. Είναι συμβατό με διαφορετικούς εκτυπωτές αλλά ιδανικό για τους εκτυπωτές της Prusa.

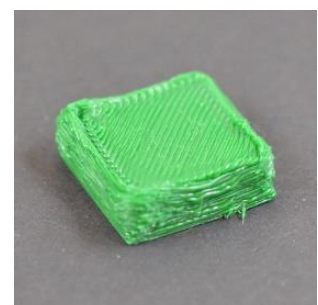
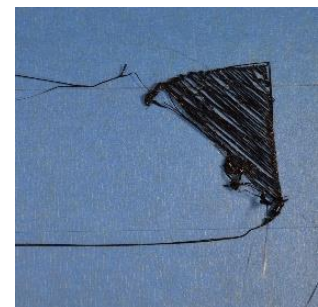
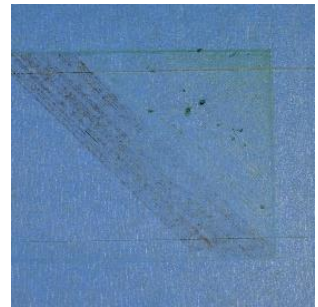
Αν χρησιμοποιηθεί λογισμικό όπως το FullControl, δεν υπάρχει το βήμα τεμαχισμού, καθώς όλες οι παράμετροι ορίζονται κατά τη διαδικασία σχεδιασμού.

2.3 Μέθοδοι ποιοτικής αξιολόγησης FFF δομών

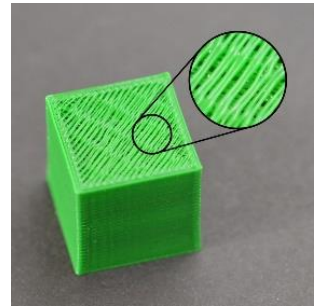
2.3.1 Είδη κατασκευαστικών σφαλμάτων

Όπως αναφέρθηκε, η διαδικασία FFF περιλαμβάνει ποικίλα κατασκευαστικά σφάλματα, τα οποία μειώνουν την ποιότητα του εκτυπωμένου δοκιμίου. Τα πιο συνήθη σφάλματα αυτά περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων [21]:

- Μη επαρκής εξώθηση στην αρχή της εκτύπωσης: μπορεί να οφείλεται σε μη επαρκή θέρμανση του εξωθητήρα (αν έμεινε σε αδράνεια πολλή ώρα πριν την εκτύπωση), σε βουλωμένο εξωθητήρα, σε υπερβολικά μικρή απόσταση του ακροφυσίου από την επιφάνεια εκτύπωσης ή σε αποκόλληση του νήματος από το γρανάζι κίνησης.
- Κακή προσκόλληση ινών στην επιφάνεια εκτύπωσης (print bed): συμβαίνει όταν η πλατφόρμα εκτύπωσης δεν είναι επίπεδη ή αν το ακροφύσιο βρίσκεται πολύ μακριά από εκείνη. Επίσης τέτοιο σφάλμα σχετίζεται και με την ταχύτητα εκτύπωσης του πρώτου στρώματος, η οποία δε πρέπει να είναι πολύ γρήγορη, και με τις θερμοκρασιακές συνθήκες που επικρατούν. Πολλοί εκτυπωτές έχουν θερμαινόμεν πλατφόρμα, προς την καλύτερη προσκόλληση των ινών. Υπάρχουν επίσης ειδικές ταινίες και ειδικά σχεδιασμένες πλατφόρμες για την βέλτιστη προσκόλληση ορισμένων υλικών.
- Υπο-εξώθηση: ενώ προσδιορίζεται θεωρητικά κατά τον τεμαχισμό η ποσότητα πλαστικού που εξωθεί ο printer (ογκομετρική παροχή), δεν υπάρχει κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης κάποια ανατροφοδότηση σχετικά με το πόσο πλαστικό φεύγει πραγματικά από το ακροφύσιο. Συνεπώς, είναι πιθανό να υπάρχει λιγότερο πλαστικό που εξέρχεται από το ακροφύσιο από αυτό που περιμένει το λογισμικό, με αποτέλεσμα να υπάρχουν κενά μεταξύ των παρακείμενων εξωθήσεων κάθε στρώσης. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε ανακρίβειες στη διάμετρο του νήματος που τροφοδοτείται.
- Υπέρ-εξώθηση: αντίστοιχα με την υπό-εξώθηση, εάν οι ρυθμίσεις εξώθησης δεν έχουν διαμορφωθεί σωστά, ο εκτυπωτής μπορεί να εξωθήσει περισσότερο πλαστικό από αυτό που αναμένει το λογισμικό. Αυτή η υπερβολική εξώθηση θα οδηγήσει σε περίσσεια πλαστικού που μπορεί να καταστρέψει τις εξωτερικές διαστάσεις του εξαρτήματος.



- Κενά στις πάνω στρώσεις: Για την εξοικονόμηση πλαστικού, τα περισσότερα εξαρτήματα που εκτυπώνονται έχουν ένα συμπαγές κέλυφος που περιβάλλει ένα μερικώς κοίλο εσωτερικό (π.χ. το εσωτερικό του εξαρτήματος μπορεί να χρησιμοποιεί ποσοστό πλήρωσης 30%, που σημαίνει ότι μόνο το 30% του εσωτερικού είναι συμπαγές πλαστικό, ενώ το υπόλοιπο είναι αέρας). Κατά τον τεμαχισμό καθορίζεται πόσα συμπαγή στρώματα θα τυπωθούν στο επάνω και στο κάτω μέρος του εξαρτήματος. Ωστόσο, ανάλογα με τις ρυθμίσεις που χρησιμοποιούνται, τα επάνω στρώματα της εκτύπωσης ενδέχεται να μην είναι εντελώς συμπαγή, οπότε ενδέχεται να υπάρχουν κενά μεταξύ των εξωθήσεων, αν τα στρώματα δεν είναι αρκετά σε αριθμό ή το ποσοστό πλήρωσης πολύ χαμηλό, δημιουργώντας κενά.



- Stringing: Το stringing συμβαίνει όταν μικρές «χορδές» πλαστικού αφήνονται πίσω όταν ο εξωθητήρας μετακινείται από μία θέση σε άλλη. Για την καταπολέμηση αυτού του φαινομένου γίνεται «ανάκληση (retraction)» του νήματος ώστε ο εξωθητήρας να «τραβάει» το νήμα πίσω μέχρι να πάει στο επόμενο σημείο και να ξαναρχίσει την εξώθηση. Είναι σημαντικό να ορίζονται σωστά η ταχύτητα και η απόσταση ανάκλησης ώστε να μη δημιουργηθεί stringing αλλά και να μη καταστραφεί το νήμα. Πέρα από το retraction, αυτό που επηρεάζει τις «χορδές» είναι η θερμοκρασία του εξωθητήρα, το μήκος της απόστασης κίνησης του χωρίς εξώθηση και η ταχύτητα κίνησης του.



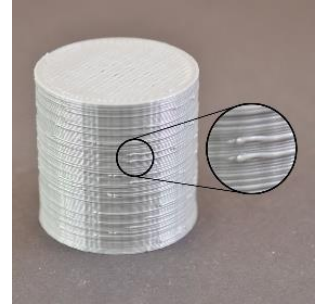
- Υπερθέρμανση: οδηγεί σε κακή στερεοποίηση του εκτυπωμένου στερεού και μπορεί να οφείλεται σε ανεπαρκή ψύξη, σε πολύ γρήγορη εκτύπωση (οπότε δεν υπάρχει χρόνος για στερεοποίηση) ή σε εκτύπωση σε πολύ ψηλή θερμοκρασία.



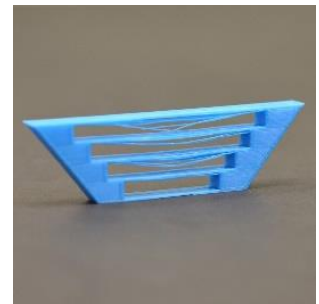
- Διαχωρισμός και διάσπαση στρωμάτων: στο 3DP η εκτύπωση γίνεται συνήθως ένα στρώμα τη φορά, με το κάθε νέο στρώμα να εναποτίθεται πάνω στο προηγούμενο. Εάν τα διαδοχικά στρώματα δε συνδέονται καλά, το τελικό τμήμα μπορεί να χωριστεί. Αίτια του φαινομένου είναι μεγάλη απόσταση ανάμεσα στα στρώματα ή πολύ χαμηλή θερμοκρασία εκτύπωσης, με αποτέλεσμα να μη συνδέονται επαρκώς τα στρώματα μεταξύ τους.



- Σημάδια στο εξωτερικό της επιφάνειας: κάθε φορά που ο εξωθητήρας απενεργοποιείται και ενεργοποιείται ξανά, ενώ κινείται, μπορεί να δημιουργηθούν διακυμάνσεις στη ροή. Ως αποτέλεσμα, μπορεί να υπάρχει ένα μικρό σημάδι στο εξωτερικό κέλυφος της τρισδιάστατης εκτύπωσης που αντιπροσωπεύει τη θέση όπου ο εξωθητήρας άρχισε να εκτυπώνει αυτό το τμήμα πλαστικού (γνωστά ως blobs ή zits). Με κατάλληλη ρύθμιση των σημείων εξώθησης καθώς και των κινήσεων του εξωθητήρα αυτά μπορούν να περιοριστούν.



- Κακή γεφύρωση: Γεφύρωση (bridging) είναι ένας όρος που αναφέρεται σε πλαστικό που πρέπει να εξωθείται μεταξύ δύο σημείων χωρίς καμία υποστήριξη από κάτω. Για μεγαλύτερες γέφυρες, μπορεί να χρειαστεί να προστεθούν δομές στήριξης, αλλά οι μικρές γέφυρες μπορούν συνήθως να εκτυπωθούν χωρίς στηρίγματα για εξοικονόμηση υλικού και χρόνου εκτύπωσης. Εάν ο εκτυπωτής δεν είναι σωστά βαθμονομημένος με τις καλύτερες ρυθμίσεις για αυτά τα τμήματα, ενδέχεται να υπάρχει χαλάρωση, πτώση ή κενά μεταξύ των εξωθημένων τμημάτων.



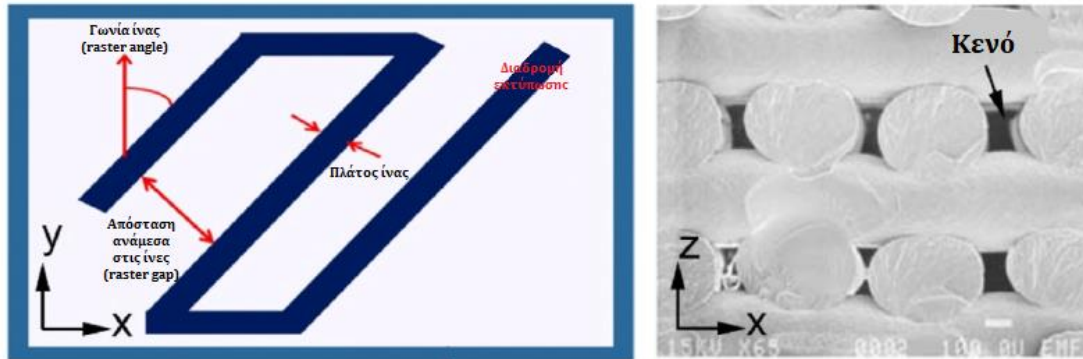
- Λοιπά σφάλματα: κενά ανάμεσα σε πλήρωση και περίγραμμα, κενά σε λεπτούς τοίχους, κακή εκτύπωση μικρών λεπτομερειών, στρεβλώσεις (warping), δόνηση εξωθητήρα κ.α.

Πολλά από τα κατασκευαστικά αυτά σφάλματα υπεισέρχονται μέσω του λογισμικού slicer, τα οποία εισάγουν αστάθμητους παράγοντες που δεν επιτρέπουν μία κοινή βάση αξιολόγησης των ιδιοτήτων των FFF δομών. Για το σκοπό αυτό στην παρούσα ΔΕ αναπτύχθηκαν εργαλεία και πρωτόκολλα αξιολόγησης υλικών FFF με στόχο την εξάλειψη αστάθμητων παραγόντων και ακριβή έλεγχο της διαδικασίας της εκτύπωσης.

Πέρα από τα κατασκευαστικά σφάλματα που αναφέρθηκαν, στις 3D-printed δομές υπάρχουν διάφορα επιθυμητά και ανεπιθύμητα κενά που σχηματίζονται. Η επιθυμία των κενών στα εξαρτήματα FFF εξαρτάται από την καθορισμένη εφαρμογή. Τα επιθυμητά κενά είναι τρισδιάστατα δομικά στοιχεία που έχουν σχεδιαστεί για τη μείωση του βάρους ή/και τη βελτίωση της λειτουργικότητας. Τα κενά είναι ανεπιθύμητα για εφαρμογές που απαιτούν βέλτιστη μηχανική απόδοση.

Συνολικά, τα κενά FFF θα μπορούσαν να ταξινομηθούν σε πέντε κατηγορίες με βάση τον μηχανισμό σχηματισμού τους [22]:

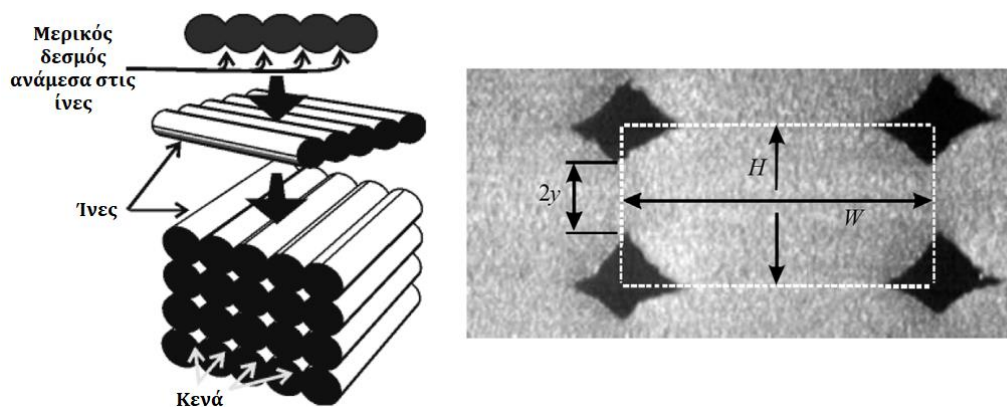
(1) Κενά ανάμεσα στις ίνες (raster gap voids)



Σχήμα 13. Κενά ράστερ

Τα κενά ανάμεσα στις ίνες (ονομάζονται επίσης κενά αέρα) προκύπτουν από τον διαχωρισμό μεταξύ παρακείμενων ινών. Ανεπιθύμητα κενά υποβαθμίζουν τη μηχανική απόδοση των τυπωμένων μερών. Ωστόσο, όταν χρησιμοποιείται επικοδομητικά, η εκτύπωση με μεγαλύτερα κενά μπορεί να μειώσει τον συνολικό χρόνο κατασκευής και την χρήση υλικού τροφοδοσίας.

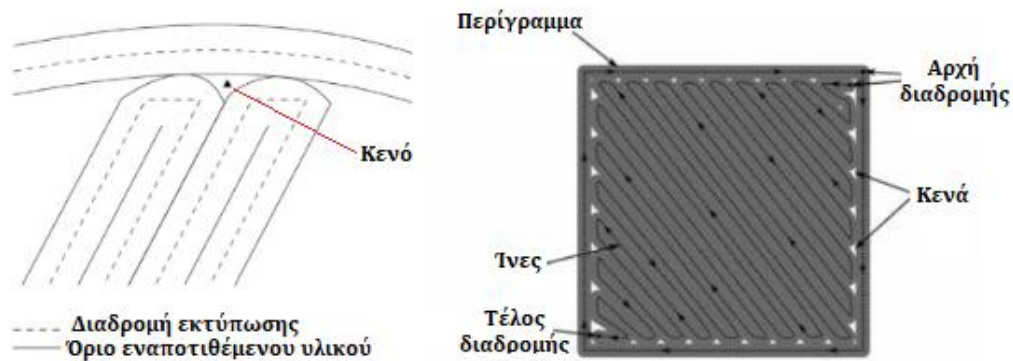
(2) Κενά μερικής ανάπτυξης λαιμού (partial neck growth voids)



Σχήμα 14. Κενά ανάπτυξης λαιμού

Τα εσωτερικά κενά θα μπορούσαν να σχηματιστούν ως αποτέλεσμα της ατελούς ανάπτυξης σύνδεσης μεταξύ των παρακείμενων ινών εντός και μεταξύ των στρωμάτων. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, οι συνθήκες κατά τη διάρκεια της διαδικασίας FFF δεν είναι ικανές να διατηρήσουν τον σχηματισμό λαιμού πέρα από λίγα δευτερόλεπτα μετά την εναπόθεση υλικού, οπότε ποτέ δεν είναι δυνατή η 100% ένωση ινών. Δηλαδή οι ίνες στερεοποιούνται πριν ολοκληρώσουν τη συνένωση. Τα κενά μερικής ανάπτυξης του λαιμού, συνεπώς, είναι αδύνατο να εξαλειφθούν εξ ολοκλήρου λόγω ορισμένων εγγενών, αναπόφευκτων χαρακτηριστικών της διαδικασίας FFF.

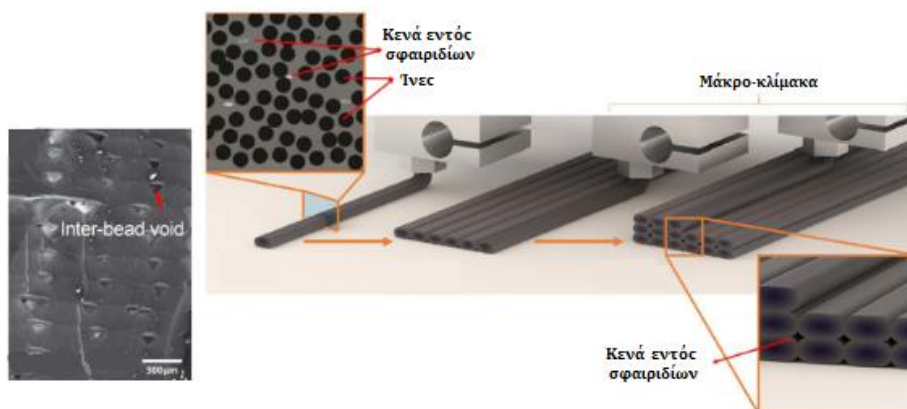
(3) Υπό-περιμετρικά κενά (sub-perimeter voids)



Σχήμα 15. Υποπεριμετρικά κενά

Σχηματίζονται υποπεριμετρικά κενά μεταξύ των ινών κατά μήκος της περιμέτρου ενός στρώματος FFF λόγω φυσικών περιορισμών. Σε μια τυπική διαδρομή εκτύπωσης μια περιοχή γεμίζεται με κατεύθυνσή αντίστροφη από την περίμετρο.. Προκειμένου να μειωθούν οι δυσμενείς επιπτώσεις των φυγόκεντρων δυνάμεων στους βηματικούς κινητήρες χωρίς σημαντικές επιπτώσεις στο χρόνο κατασκευής, οι εκτυπωτές FFF πρέπει να αντισταθμίσουν αντικαθιστώντας όλες τις αιχμηρές γωνίες με κατά προσέγγιση καμπύλες. Κατά συνέπεια, ως αποτέλεσμα αυτών των πιο μαλακών καμπυλών, η ανεπαρκής ροή υλικού κατά την εναπόθεση αφήνει πίσω κενά στα στρώματα FFF. Αυτά τα υποπεριμετρικά κενά είναι οπτικά αναγνωρίσιμα.

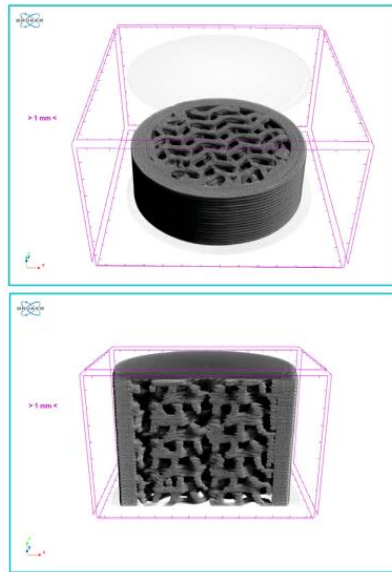
(4) Κενά εντός ινών (intra bead voids)



Σχήμα 16. Κενά εντός σφαιριδίων

Τα κενά εντός ινών προκύπτουν κυρίως σε σύνθετα υλικά και παραμένουν στην δομή FFF και μετά την εναπόθεση.

(5) Κενά πλήρωσης (infill)



Σχήμα 17. Κενά πλήρωσης στην διατομή ενός εκτυπωμένου δοκιμίου

Σε αντίθεση με τις προαναφερθείσες κατηγορίες, τα κενά πλήρωσης είναι ελεγχόμενοι και επιθυμητοί σχηματισμοί κενών. Τα λογισμικά τεμαχισμού γενικά ενσωματώνουν πυκνότητες πλήρωσης που ορίζονται από το χρήστη και μια ποικιλία μοτίβων πλήρωσης που επιλέγονται από το χρήστη, όπως πλέγμα, γραμμές, τρίγωνα, ομόκεντρα, ζιγκ-ζαγκ κ.α. Για λιγότερο μηχανικά, λειτουργικά ή οπτικά απαιτητικές εφαρμογές, οι χαμηλότερες πυκνότητες πλήρωσης είναι ιδανικές για τη μείωση της χρήσης υλικού και του συνολικού χρόνου κατασκευής. Οι υψηλότερες πυκνότητες πλήρωσης οδηγούν σε πιο συμπαγείς και γενικά πιο δυνατές εκτυπώσεις, με κόστος υλικών και μεγαλύτερο χρόνο κατασκευής. Τα μοτίβα πλήρωσης της επιλογής έχουν ευεργετικά αποτελέσματα στη μείωση του βάρους και στην αύξηση της αντοχής των εξαρτημάτων FFF.

2.3.2 Μέθοδοι αξιολόγησης in-situ

Η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο (in-situ) της διαδικασίας κατασκευής προσθέτων προσφέρει την υπόσχεση εγγύησης της ποιότητας του προϊόντος και αυξάνει την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας εκτύπωσης. Παρά τα πλεονεκτήματά του, το FFF έχει χαμηλότερη αξιοπιστία από άλλες διαδικασίες παραγωγής και είναι μια μέθοδος πολύ ευαίσθητη στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Η παρακολούθηση και η ανάλυση της διαδικασίας εκτύπωσης είναι μια διαδικασία που επιτρέπει τον ποιοτικό έλεγχο σε πραγματικό χρόνο, καθώς βοηθά στην παρατήρηση πιθανών ανωμαλιών και ελαττωμάτων της εκτύπωσης. Η ποιότητα του προϊόντος FFF επηρεάζεται από πολλές παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένης της τραχύτητας της επιφάνειας, των ελαττωμάτων πλήρωσης εκτύπωσης και της ακρίβειας διαστάσεων και γεωμετρίας.

Μια in situ μέθοδος είναι η παρακολούθηση διακυμάνσεων θερμοκρασίας εκτύπωσης κατά τη διαδικασία. Στη διάρκεια της εκτύπωσης FFF είναι σημαντικό να διατηρηθεί η θερμική ενέργεια για να διασφαλιστεί ότι υπάρχει σωστή σύνδεση μεταξύ των στρωμάτων. Όπως έχει αναφερθεί, όταν το θερμοπλαστικό νήμα εξωθείται από το θερμό άκρο του ακροφυσίου, λιώνει και κολλάει στην επιφάνεια. Ωστόσο, αυτός ο μηχανισμός συγκόλλησης δεν υπάρχει πλέον όταν η θερμοκρασία του νήματος πέσει κάτω από ορισμένη θερμοκρασία. Κακή σύνδεση μεταξύ των στρωμάτων επηρεάζει την απόδοση του εξαρτήματος και τη γεωμετρική ακρίβεια.

Επομένως, η παρακολούθηση της θερμοκρασίας του προϊόντος κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκτύπωσης αποτελεί μέσο διασφάλισης της ποιότητας των εκτυπωμένων εξαρτημάτων. Οι κάμερες υπερύθρων είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την παρακολούθηση της θερμοκρασίας των εξαρτημάτων που εκτυπώνονται με τεχνολογίες προσθετικής μηχανικώς [23].

Το 3D-DIC είναι μια άλλη μη καταστροφική in situ τεχνική μέτρησης (οπτική), η οποία συλλαμβάνει στερεοσκοπικές εικόνες και στη συνέχεια τις συσχετίζει χωρικά για την εξαγωγή της γεωμετρίας της επιφάνειας. Ανιχνεύει και εντοπίζει ελαττώματα σε δοκίμια που εκτυπώνονται με FFF. Αυτά τα ελαττώματα περιλαμβάνουν τόσο τοπικά ελαττώματα, όπως μια κηλίδα στο νήμα, όσο και γενικά ελαττώματα, όπως χαμηλή ροή. Λόγω της γενικευμένης φύσης του 3D-DIC, αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μια μεγάλη ποικιλία μεθόδων AM [24].

2.3.3 Μέθοδοι αξιολόγησης μετά το στάδιο της κατασκευής

2.3.3.1 Καταστροφικές

Οι καταστροφικές δοκιμές (Destructive Testing - DT) αξιολογούν τις ιδιότητες και την απόδοση των υλικών και των προϊόντων υποβάλλοντάς τα σε ελεγχόμενες συνθήκες μέχρι να «αστοχήσουν». Αυτός ο τύπος δοκιμών είναι απαραίτητος για τον προσδιορισμό των φυσικών ιδιοτήτων των υλικών, όπως η αντοχή και η ανθεκτικότητα. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικοί τύποι καταστροφικών μεθόδων ανάλογα με τη φύση του υλικού ή του προϊόντος που δοκιμάζεται.

Για τις εκτυπωμένες δομές, η ευρέως διαδεδομένη καταστροφική μέθοδος αξιολόγησης τους είναι τα τεστ εφελκυσμού (tensile). Σε αυτά, ένα κομμάτι του υλικού πιάνεται και από τα δύο άκρα από μια συσκευή, η οποία τραβά αργά κατά μήκος το κομμάτι μέχρι να σπάσει. Από τη δύναμη της έλξης και την αλλαγή μήκους του υλικού προκύπτει η τιμή τάσης και η τιμή παραμόρφωσης. Η μέθοδος αυτή είναι πολύ δημοφιλής στη βιομηχανική πρακτική. Αυτό συμβαίνει επειδή η διαδικασία είναι σχετικά εύκολη και σύντομη, δεν χρειάζονται σημαντική ποσότητα υλικού δείγματος και ο απαιτούμενος εξοπλισμός είναι σχετικά προσιτός και μικρός, πράγμα που σημαίνει ότι δεν απαιτεί μεγάλες εγκαταστάσεις και πολλά εργαστήρια έρευνας και ανάπτυξης (R&D) στη βιομηχανία και τον ακαδημαϊκό χώρο μπορούν να εκτελέσουν τις δοκιμές τους εσωτερικά. Από την άλλη πλευρά, εάν διενεργηθούν και ερμηνευθούν σωστά, οι δοκιμές εφελκυσμού παρέχουν πλούσιες πληροφορίες σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες ενός υλικού, συμπεριλαμβανομένης της εύθραυστης ή όλκιμης συμπεριφοράς του, της «ακαμψίας» (μέτρο του Young), της αντοχής διαρροής (αν υπάρχει), της μέγιστης αντοχής εφελκυσμού και επιμήκυνσης στη θραύση. Παρόλο που υπάρχουν αρκετές εξαιρέσεις (για παράδειγμα, οι ίνες και τα σύνθετα υλικά μπορεί να αποτύχουν πρόωρα), τα περισσότερα υλικά παρουσιάζουν υψηλότερη αντοχή υπό θλιπτική τάση από ό,τι υπό τάση εφελκυσμού, και επομένως η αντοχή σε εφελκυσμό μπορεί συχνά να θεωρηθεί ως ένα κατώτερο όριο για τη θλιπτική αντοχή. Ιδίως για τη τεχνολογία FFF η δοκιμή εφελκυσμού είναι πολύ σημαντική, καθώς αποτελεί μια αξιόπιστη μέθοδο χαρακτηρισμού, ώστε να καταστεί δυνατή η ασφαλής παραγωγή και χρήση των εκτυπωμένων εξαρτημάτων [25].

Μια άλλη μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση των θερμικών ιδιοτήτων είναι η Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης (Differential Scanning Calorimetry - DSC). Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για τη μελέτη μεταβάσεων φάσης σε ευρύ φάσμα υλικών όπως κεραμικά, πολυμερή, κ.ά. Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου στηρίζεται στη μέτρηση της διαφοράς ροής θερμότητας προς μία ουσία-δείγμα και μία ουσία αναφοράς, συναρτήσει της θερμοκρασίας, όταν οι δύο ουσίες υπόκεινται σε ελεγχόμενο πρόγραμμα θέρμανσης ή/και ψύξης [26].

Επίσης χρησιμοποιείται και η χημική ανάλυση, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί για την επαλήθευση της ακεραιότητας και της καθαρότητας των υλικών και των συνθηκών επεξεργασίας που χρησιμοποιούνται στην ΑΜ. Εντοπίζονται τα επίπεδα προσμίξεων με χημικά στοιχεία όπως οξυγόνο, υδρογόνο, άζωτο ή ιχνοστοιχεία όπως σίδηρος, βανάδιο ή αλουμίνιο. Αυτή η ανάλυση μπορεί να είναι χρήσιμη για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης ρύπων ή της απώλειας συστατικών κράματος [27].

Μια άλλη μερικώς καταστροφική μέθοδος είναι το Acoustic emission testing (δοκιμή ακουστικών εκπομπών). Είναι μια από τις πιο απαιτητικές τεχνικές που μπορούν να εφαρμοστούν. Η ακουστική εκπομπή είναι το φαινόμενο κατά το οποίο η ταχεία απελευθέρωση ενέργειας από τοπικές πηγές δημιουργεί παροδικά ελαστικά κύματα. Μπορούν να ληφθούν πληροφορίες σχετικά με τη θέση των ασυνεχειών και τη δομική ακεραιότητα του υλικού. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της ακουστικής εκπομπής είναι η μη αναστρεψιμότητά της. Αυτό οφείλεται στη στενή σχέση της ακουστικής εκπομπής με την πλαστική παραμόρφωση και θραύση. Η παρακολούθηση των ακουστικών εκπομπών είναι, δηλαδή, καταστροφική λόγω φθοράς που προκαλείται στο υλικό, ωστόσο οι βλάβες είναι σε επίπεδο μικροκλίμακας, σε σύγκριση με την ενδεχόμενη αστοχία του υλικού. Acoustic emission χρησιμοποιείται και στο στάδιο της μετα-επεξεργασίας καθώς και *in situ* (κατά τη διάρκεια) κατά τη διάρκεια κατασκευής μέσω FFF. Η αναγνώριση ελαττωμάτων επιτυγχάνεται συγκρίνοντας το προφίλ σήματος δείγματος αναφοράς και του μετρημένου προφίλ σήματος του υπό μελέτη δοκιμίου [28].

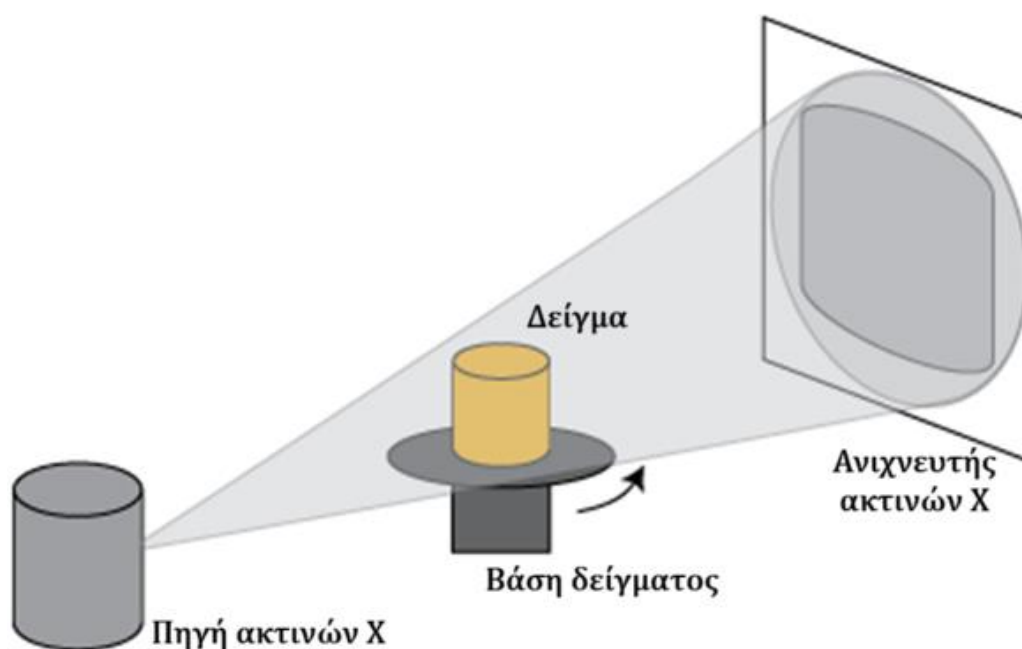
2.3.3.2 Μη καταστροφικές

Οι μη καταστροφικές δοκιμές (Non-Destructive Testing, NDT) είναι μια ομάδα τεχνικών ανάλυσης που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των ιδιοτήτων ενός εξαρτήματος χωρίς να προκαλείται ζημιά. Επειδή το NDT δεν αλλοιώνει μόνιμα το αντικείμενο που επιθεωρείται, είναι μια πολύτιμη τεχνική που μπορεί να εξοικονομήσει χρήματα και χρόνο στην αξιολόγηση του προϊόντος, στην αντιμετώπιση προβλημάτων και στην έρευνα [29].

Μια βασική μη καταστροφική μέθοδος είναι η Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (Scanning Electron Microscopy, SEM), το οποίο είναι ένα ισχυρό αναλυτικό εργαλείο για τη μελέτη της χημικής σύνθεσης, της δομής και της μορφολογίας του υλικού και ως εκ τούτου έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για τον χαρακτηρισμό νέων υλικών με ευρύ φάσμα εφαρμογών [30]. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης χρησιμοποιεί μια εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας για να δημιουργήσει μια ποικιλία σημάτων στην επιφάνεια στερεών δειγμάτων. Τα δείγματα πρέπει να είναι συμπαγή και να χωρούν στο θάλαμο του μικροσκοπίου.

Τα σήματα που προέρχονται από τις αλληλεπιδράσεις του ηλεκτρονίου με το δείγμα αποκαλύπτουν πληροφορίες για την επιφανειακή μορφολογία, χημική σύνθεση και κρυσταλλική δομή των υλικών που αποτελούν το δείγμα. Η ανάλυση SEM θεωρείται «μη καταστροφική», με την έννοια ότι οι ακτίνες X που παράγονται από αλληλεπιδράσεις ηλεκτρονίων δεν οδηγούν σε απώλεια όγκου του δείγματος, επομένως είναι δυνατή η επανειλημμένη ανάλυση των ίδιων δειγμάτων [31]. Παρόλα αυτά, η προετοιμασία δειγμάτων μικρού μεγέθους συχνά απαιτεί κατάτμηση και επιχρύσωση, συνεπώς ο μη καταστρεπτικός χαρακτήρας της μεθόδου είναι περιορισμένος.

Η μη καταστροφική μέθοδος που χρησιμοποιείται στη παρούσα εργασία είναι η Μικροτομογραφία με ακτίνες X (micro-CT/Mct), η οποία δημιουργεί ακριβείς τρισδιάστατες απεικονίσεις των αντικειμένων που σαρώνονται και αναλύεται στη συνέχεια.



Σχήμα 18. Διάταξη micro-CT

Η τομογραφία είναι μια διαδικασία ψηφιακής διάτμησης ενός δείγματος, χρησιμοποιώντας τις ακτίνες X, οι οποίες δίνουν πληροφορίες για το εσωτερικό του. Χρησιμοποιείται μια σημειακή πηγή που παράγει μια κωνική δέσμη ακτινών X που περικλείει το αντικείμενο. Οι ακτίνες που περνούν από το μπροστινό και το πίσω μέρος του αντικειμένου δεν θα προβάλλονται στην ίδια σειρά του ανιχνευτή. Κατά τη διάρκεια της σάρωσης το αντικείμενο περιστρέφεται κατά 180 ή 360 μοίρες με ένα σταθερό βήμα περιστροφής.

Σε κάθε γωνιακή θέση θα λαμβάνεται μια σκιάδης δισδιάστατη (2D) εικόνα. Το πρόγραμμα αποθηκεύει όλες αυτές τις εικόνες προβολής στη μνήμη του. Στη συνέχεια, μέσω εξειδικευμένων αλγόριθμων, γίνεται ο υπολογισμός του συντελεστή εξασθένησης ακτίνων X για κάθε χωρικό σημείο στο εσωτερικό του δοκιμίου, ο οποίος διαφοροποιείται ανάλογα με τη σύσταση και την ύπαρξη διαφορετικών φάσεων, π.χ. πολυμερές και αέρας. Προκύπτει συνεπώς μια τρισδιάστατη αναπαράσταση του δοκιμίου, στην οποία μπορεί να γίνει ποιοτική και ποσοτική αξιολόγηση της εσωτερικής του δομής. Ενώ μια τυπική ψηφιακή εικόνα αποτελείται από pixels (στοιχεία εικόνας) μια εικόνα υπολογιστικής τομογραφίας αποτελείται από Voxels (διακριτά στοιχεία όγκου). Η αναλογία σήματος προς θόρυβο στη σκιάδη εικόνα μπορεί να βελτιωθεί βελτιστοποιώντας τον χρόνο έκθεσης προκειμένου να ληφθούν οι πιο αντιπροσωπευτικές πληροφορίες.

Ο αριθμός των αρχείων μετά από αυτήν την απόκτηση εξαρτάται από το βήμα περιστροφής που έχει επιλεγεί και τη συνολική περιστροφή που έχει επιλεγεί. Τα αποτελέσματα ανακατασκευής μπορούν να αποθηκευτούν απευθείας ή μετά από μετατροπή σε εικόνες 8 bit ή 16 bit (πιο σύνηθες), αφού έχει προηγηθεί ένα «παράθυρο» πυκνότητας, όπου επιλέγονται οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές. Όλες οι τιμές μεταξύ αυτών θα εμφανίζονται ως ημίτονη εικόνα. Ανάλογα με την επιλογή του χρήστη, όλες οι τιμές εξασθένησης κάτω από το ελάχιστο θα είναι μαύρες ενώ ό,τι είναι πάνω από το μέγιστο θα εμφανίζεται στη συνέχεια ως λευκό [32].

Οι διαφορετικές αποχρώσεις του γκρι σε μια τέτοια εικόνα, οφείλονται στην εξασθένιση των ακτίνων X η οποία με την σειρά της, οφείλεται στην αναλογία των ακτίνων X που έχουν σκεδαστεί ή απορροφηθεί καθώς διέρχονται μέσα από το δείγμα. Η εξασθένιση των ακτίνων X είναι μια συνάρτηση που εξαρτάται από την ενέργεια, την πυκνότητα και του ατομικού αριθμού του υλικού που απεικονίζεται. Μια εικόνα υπολογιστικής τομογραφίας δημιουργείται κατευθύνοντας ακτίνες X διαμέσου του υλικού από πολλαπλούς προσανατολισμούς και μετρώντας την προκύπτουσα μείωση στην ένταση. Στην συνέχεια με την χρήση ενός ειδικού αλγορίθμου, ανακατασκευάζεται η διανομή της εξασθένησης των ακτίνων X πάνω στο υλικό. Με την διαδοχική απόκτηση στοιβαγμένων δεδομένων απεικόνισης, μπορεί να ληφθεί ένα πλήρης όγκος περιγραφόμενος από τα παραπάνω δεδομένα.

Η δημοτικότητά της μεθόδου μπορεί να αποδοθεί στην ικανότητά του να παρέχει ακριβείς ποσοτικές και ποιοτικές πληροφορίες σχετικά με την τρισδιάστατη μορφολογία του δείγματος. Το εσωτερικό του δείγματος μπορεί να μελετηθεί με μεγάλη λεπτομέρεια χωρίς να καταφύγουμε σε φυσική τομή ή να χρησιμοποιήσουμε τοξικά χημικά. Επιπλέον, μετά τη σάρωση, τα άθικτα δείγματα μπορούν να υποβληθούν σε άλλες δοκιμές, επιλύοντας επομένως το πρόβλημα της σπανιότητας του δείγματος.

Με την mCT, δοκίμια με περίπλοκες εσωτερικές δομές μπορούν να εξεταστούν προσεκτικά καθώς οποιαδήποτε χωρική τοποθεσία της αρχιτεκτονικής μπορεί να απομονωθεί ψηφιακά. Αυτό είναι ζωτικής σημασίας για αντικείμενα που παρουσιάζουν διαφορετικές γεωμετρικές διατάξεις σε διαφορετικές χωρικές θέσεις.

Η τρισδιάστατη απεικόνιση επιτρέπει μια κοντινή προβολή οποιασδήποτε συγκεκριμένης τοποθεσίας, επομένως γίνεται δυνατή η παρατήρηση του σχήματος και του μεγέθους των πόρων. Η ανάλυση Micro CT δεν είναι κατάλληλη για αντικείμενα που περιέχουν μέταλλα καθώς οι ακτίνες X εξασθενούν πολύ από αυτά τα μέταλλα. Η παρουσία μετάλλων έχει ως αποτέλεσμα σκοτεινά και φωτεινά κοκκώδη τεχνουργήματα που κρύβουν σημαντικές λεπτομέρειες στις εικόνες σάρωσης. Καθώς το micro CT είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία, αναμένονται βελτιωμένοι αλγόριθμοι και ρυθμίσεις, επιλύοντας έτσι τέτοια σφάλματα απεικόνισης [33].

Μετά την τρισδιάστατη σάρωση είναι δυνατή η ψηφιακή επεξεργασία των δεδομένων για τη σύγκριση της πραγματικής γεωμετρίας με την ονομαστική. Αυτό γίνεται με λογισμικό όπως το CloudCompare. Το λογισμικό CloudCompare επιτρέπει τη δημιουργία ενός χρωματομετρικού χάρτη της απόκλισης στην επιφάνεια του πλέγματος STL σε σύγκριση με το κύριο STL, ποσοτικοποιημένο σε συγκεκριμένα σημεία επιτρέποντας μια συνολική σύγκριση απόκλισης 3D ή ανάλυση από σημείο σε σημείο. Ο χρωματικός χάρτης υποδεικνύει απόκλιση προς τα μέσα (μπλε) ή προς τα έξω (κόκκινο), ενώ ο πράσινος υποδεικνύει την ελάχιστη απόκλιση. Το λογισμικό επιτρέπει την απόκλιση μέτρησης. σε επίπεδα του XYZ [34].

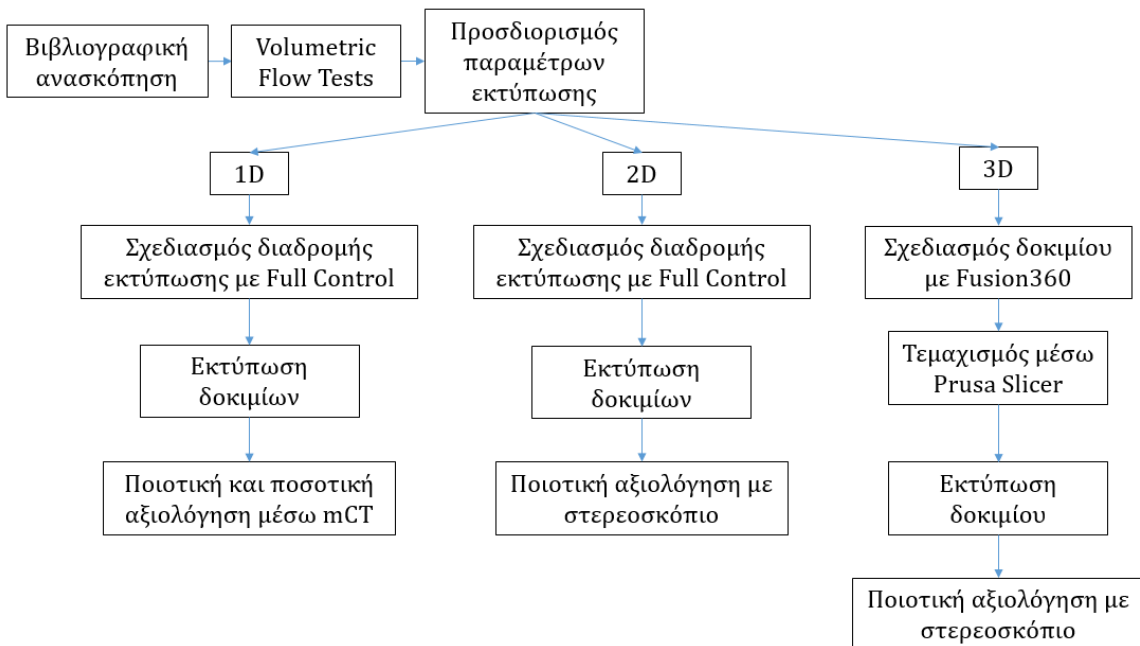
3. Πειραματικό Μέρος

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης ορισμένων παραμέτρων εκτύπωσης στο εκτυπωμένο δοκίμιο. Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν προς μελέτη είναι οι ακόλουθες:

- Layer height (ύψος ίνας)
- Extrusion width (πλάτος ίνας)
- Volumetric flow rate (ογκομετρική παροχή), η οποία επηρεάζει την ταχύτητα εκτύπωσης.

Για κάθε παράμετρο επιλέγονται 3 τιμές (δύο οριακές και μία ενδιάμεση), οπότε γίνεται μελέτη σε ένα σύστημα 3 x 3, δηλαδή 27 διαφορετικά σετ παραμέτρων.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε συνοψίζεται στο ακόλουθο διάγραμμα ροής:



Σχήμα 19. Το διάγραμμα ροής της παρούσας μελέτης

Η διαδικασία έχει ως εξής: Αρχικά έγινε μια βιβλιογραφική ανασκόπηση, κατά την οποία επιλέχθηκαν οι συνθήκες εκτύπωσης, το υλικό και το εύρος τιμών των παραμέτρων. Έπειτα έγιναν τεστ προσδιορισμού της μέγιστης ογκομετρικής παροχής του εκτυπωτή ώστε να προσδιοριστεί το εύρος των τιμών της, και επιλέχθηκαν τα τελικά σετ παραμέτρων. Στη συνέχεια έγιναν τα τεστ για το 1D, όπου σχεδιάστηκε η διαδρομή εκτύπωσης για κάθε δείγμα μέσω του FullControl και έπειτα τα εκτυπωμένα δοκίμια τοποθετήθηκαν στο mCT για scanning. Τα αποτελέσματα αξιολογήθηκαν τόσο ποιοτικά, όσο ποσοτικά, συγκρίνοντας το πλάτος των ινών με το ονομαστικό.

Μετά το 1D, έγιναν τα τεστ για το 2D, όπου αντίστοιχα σχεδιάστηκε η διαδρομή εκτύπωσης. Τα εκτυπωμένα δοκίμια αξιολογήθηκαν ποιοτικά έπειτα από μελέτη με στερεοσκόπιο. Τέλος, εκτυπώθηκε ένα 3D δοκίμιο με τον συμβατικό τρόπο (αρχείο CAD → STL → slicing) και αξιολογήθηκε ποιοτικά.

Για τις εκτυπώσεις χρησιμοποιήθηκε ο εκτυπωτής Prusa i3 MK3S+, με διάμετρο ακροφυσίου 0.4 mm. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι FormFutura PLA σε διάφανο χρώμα. Το πολυγαλακτικό οξύ (PLA) είναι ένα ευρέως χρησιμοποιημένο βιοδιασπώμενο πολυμερές. Είναι ένα φιλικό προς το περιβάλλον πολυμερές που προέρχεται από τον πολυμερισμό του μονομερούς γαλακτικού οξέος (2-υδροξυπροπιονικό οξύ, LA).

Τα tests επιλέχθηκε να γίνουν σε θερμοκρασία 205 °C, η οποία είναι μια μέση τιμή στο βιβλιογραφικό εύρος θερμοκρασιών για το PLA, το οποίο είναι 190-220 °C.

3.1 Προσδιορισμός παραμέτρων εκτύπωσης

Όπως αναφέρθηκε, οι παράμετροι που μελετώνται είναι το ύψος ίνας, το πλάτος ίνας και η ογκομετρική παροχή.

3.1.1 Ύψος στρώσης

Όσον αφορά το ύψος της ίνας για να βρεθούν τα σετ τιμών χρησιμοποιούνται βιβλιογραφικά δεδομένα της Prusa, σύμφωνα με τα οποία για ακροφύσιο 0.4 mm:

Layer height = 20%-80% της διαμέτρου του ακροφυσίου [35].

Συνεπώς προκύπτει εύρος τιμών 0.08-0.32 mm.

Επιλέγονται οι 3 τιμές: 0.08 (nozzle diameter x 0.2) , 0.2 (nozzle diameter x 0.5) και 0.32 (nozzle diameter x 0.8), δηλαδή οι δύο ακραίες και η μεσαία τιμή.

3.1.2 Πλάτος ίνας

Για το εύρος τιμών χρησιμοποιούνται πάλι βιβλιογραφικά δεδομένα της Prusa για ακροφύσιο 0.4 mm, όπου:

Fiber width = 60%-180% της διαμέτρου του ακροφυσίου

Συνεπώς προκύπτει εύρος τιμών 0.24-0.72 mm.

Επιλέγονται οι 3 τιμές: 0.24 (nozzle diameter x0.6), 0.48 (nozzle diameter x1,2) και 0.72 (nozzle diameter x 1.8), δηλαδή οι δύο ακραίες και η μεσαία τιμή.

3.1.3 Ογκομετρική παροχή

Όσον αφορά την ογκομετρική παροχή, πριν επιλεχθούν οι τιμές προσδιορίζεται πειραματικά η μέγιστη ογκομετρική παροχή του printer που χρησιμοποιείται. Γίνεται, λοιπόν μια σειρά από Max Volumetric flow tests.

Η ογκομετρική παροχή Q (mm^3/s) αφορά τον όγκο του πλαστικού που εξωθείται από το σύστημα τροφοδοσίας του 3D εκτυπωτή ανά μονάδα χρόνου. Δύο βασικές παράμετροι του G κώδικα που επηρεάζουν άμεσα την ογκομετρική παροχή είναι η παράμετρος E , που ορίζει την ονομαστική απόσταση (σε mm) γραμμικής κίνησης του θερμοπλαστικού νήματος για να εισέλθει στην κεφαλή εκτύπωσης και η παράμετρος F (σε mm/min), που ορίζει την ταχύτητα τροφοδοσίας.

Η σχέση που τις συνδέει είναι:

$$Q = A_f * \left(\frac{F}{60}\right) \quad (1)$$

όπου A_f η διατομή του FFF νήματος ίση με 2.40 mm^2 , για νήμα διαμέτρου 1.75 mm . Στην περίπτωση της ελεύθερης εξώθησης καθ' ύψος (κάθετη κίνηση της κεφαλής κατά τον άξονα Z), η ταχύτητα τροφοδοσίας ισούται με

$$F = \frac{Z * Q * 60}{E * A_f} \quad (2)$$

όπου Z η συνολική απόσταση κίνησης κατά τον Z (σε mm).

Για $Z = 10 \text{ mm}$ και $E = 200 \text{ mm}$, προκύπτουν οι ακόλουθοι συνδυασμοί ονομαστικής ταχύτητας τροφοδοσίας - ογκομετρικής παροχής (κάνοντας στρογγυλοποίηση στο 2^ο δεκαδικό ψηφίο):

Πίνακας 5. Πίνακας ονομαστικών ταχυτήτων τροφοδοσίας - ογκομετρικής παροχής

Q (mm^3/s)	F (mm/min)
2	2.49
4	4.99
6	7.48
8	9.98
10	12.47
12	14.97
14	17.46
16	19.96
18	22.45
20	24.95
22	27.44
24	29.93

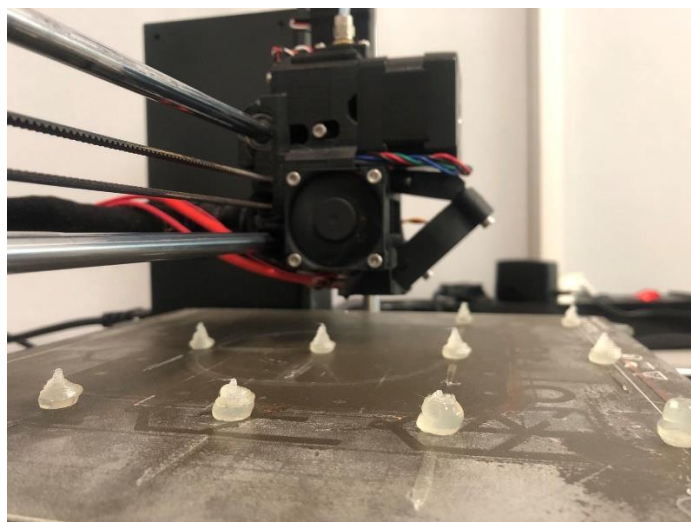
Για όλους τους παραπάνω συνδυασμούς τροφοδοσίας - ογκομετρικής παροχής ο συνολικός, ονομαστικός όγκος του υλικού που εξωθείται είναι σταθερός και ίσος με $V_f = A_f * E = 0.480 \text{ cm}^3$, που αντιστοιχεί σε ονομαστική τιμή μάζας υλικού ίση με 0.595 g .

Για τους υπολογισμούς θεωρείται κατά προσέγγιση ότι έχει επέλθει ομοιόμορφη τήξη στο υλικό και ότι η πυκνότητά του είναι σταθερή και ίση με την πυκνότητα του υλικού σε στερεά κατάσταση (1.24 g/cm^3). Συνεπώς, στους υπολογισμούς δεν λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή της πυκνότητας του υλικού σε κατάσταση τήγματος, συγκριτικά με την πυκνότητα στερεάς κατάστασης, η οποία μπορεί να παρουσιάσει μείωση της τάξης του 10% για άμορφα πολυμερή. Η προσέγγιση αυτή προϋποθέτει ότι το υλικό έχει χαμηλό ποσοστό κρυσταλλικότητας πριν και μετά την κατεργασία, δηλαδή κατά την ταχεία ψύξη και στερεοποίηση που υφίσταται. Το PLA καλύπτει αυτήν την προϋπόθεση [36].

Καθώς το υλικό διέρχεται από το ακροφύσιο υπό την επίδραση της πίεσης που του ασκείται από το σύστημα τροφοδοσίας και το στερεό κομμάτι του νήματος που δρα ως έμβολο, η ροή του κυριαρχείται από την ισορροπία των δυνάμεων πίεσης και διατμητικών τάσεων, που οδηγούν σε διαφορετικούς ρυθμούς παραμόρφωσης και πτώση της πίεσης ΔP . Η πίεση που ασκεί ο κινητήρας πρέπει να ξεπεράσει την τιμή του ΔP , η οποία σε πρώτη προσέγγιση είναι ανάλογη της παραμέτρου Q (σχέση Hagen-Poiseuille). Για αυξημένες τιμές της παραμέτρου Q , η ισχύς του κινητήρα τροφοδοσίας δεν μπορεί να ξεπεράσει την ολοένα αυξανόμενη πτώση πίεσης, με αποτέλεσμα την δημιουργία απόκλισης μεταξύ της ονομαστικής και της πραγματικής ογκομετρικής παροχής.

Στόχος της πειραματικής διαδικασίας είναι ο καθορισμός του κατάλληλου εύρους της τιμής της ογκομετρικής παροχής για διαφορετικές ταχύτητες εξώθησης. Μετρούμενο μέγεθος είναι η μάζα του υλικού που εξωθείται, για προκαθορισμένη διάμετρο ακροφυσίου (0.4 mm), μήκος νήματος (200 mm) και θερμοκρασία εκτύπωσης (205 °C).

Η πειραματική διαδικασία βασίζεται σε αντίστοιχο βιβλιογραφικό πείραμα [37]. Γίνεται εκτύπωση 100 mm από filament κάθετα σε 12 διαφορετικούς ρυθμούς ροής. Για τη δημιουργία του κώδικα χρησιμοποιήθηκε το Flow Test GCode generator [38].



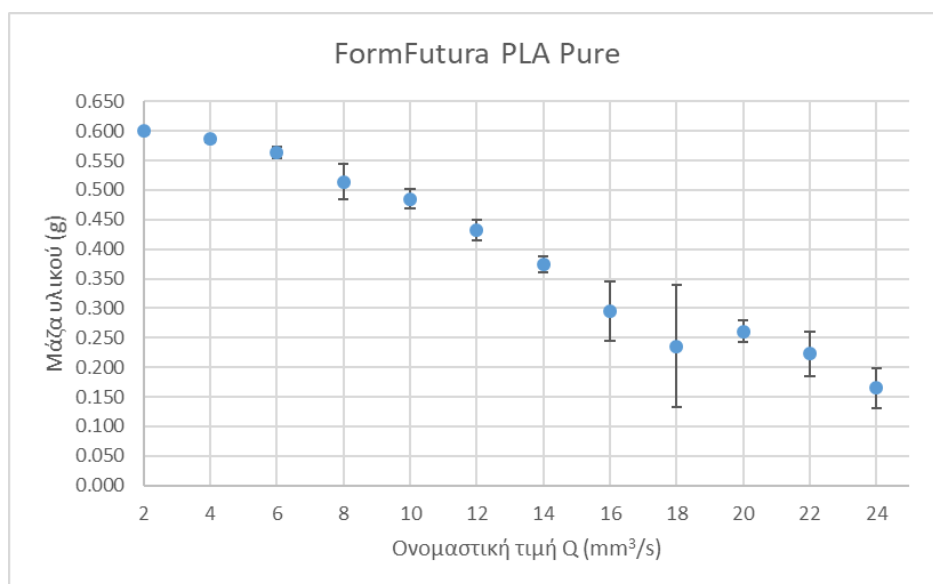
Σχήμα 20. Τα εκτυπωμένα δοκίμια

Έπειτα από δύο επαναλήψεις (3 σετ συνολικά), τα εκτυπωμένα δοκίμια, που έχουν το σχήμα «σταγόνας» (Σχήμα 20) ζυγίζονται και επιλέγεται η μέση τιμή.

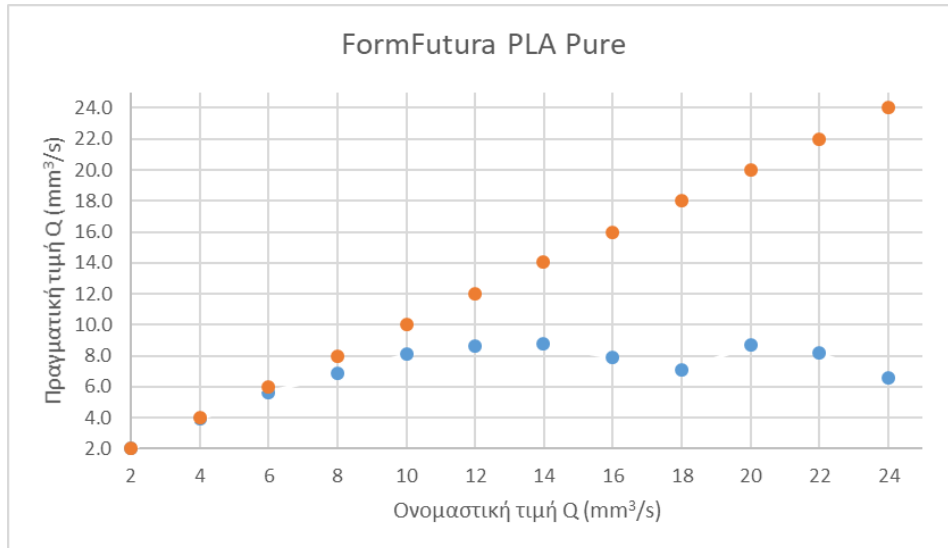
Πίνακας 6. Τα αποτελέσματα των max volumetric flow tests

Θερμοκρασία / °C	205	205	205	205	
Ρυθμός ροής / mm ³ /s	Βάρος / g				
	Run 1	Run 2	Run 3	Μέσος όρος	SD
2	0.603	0.602	0.593	0.599	0.0055
4	0.590	0.587	0.581	0.586	0.0046
6	0.573	0.566	0.553	0.564	0.0102
8	0.549	0.495	0.498	0.514	0.0304
10	0.502	0.484	0.469	0.485	0.0165
12	0.420	0.425	0.451	0.432	0.0166
14	0.388	0.361	0.375	0.375	0.0135
16	0.320	0.327	0.237	0.295	0.0501
18	0.296	0.116	0.295	0.236	0.1036
20	0.239	0.271	0.271	0.260	0.0185
22	0.179	0.245	0.245	0.223	0.0381
24	0.158	0.202	0.134	0.165	0.0345

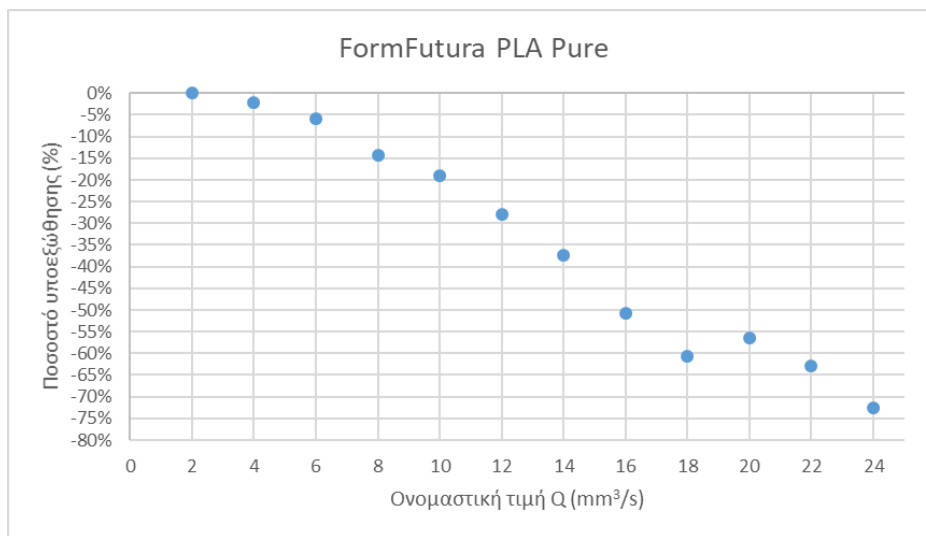
Από τα αποτελέσματα σχεδιάζονται τα ακόλουθα διαγράμματα:



Σχήμα 21. Διάγραμμα μάζας υλικού – ονομαστικής τιμής ογκομετρικής παροχής



Σχήμα 22. Διάγραμμα πραγματικής – ονομαστικής τιμής ογκομετρικής παροχής



Σχήμα 23. Διάγραμμα ποσοστού υποεξώθησης – ονομαστικής τιμής Q

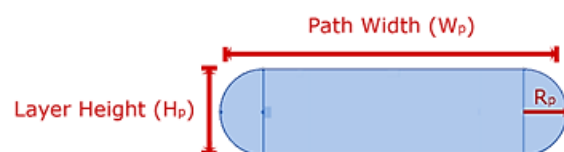
Αναζητείται το σημείο όπου η ροή «πέφτει» σημαντικά (flow droppoff section). Σε εκείνο το σημείο βρίσκεται η μέγιστη ογκομετρική παροχή του printer.

Από την μελέτη των διαγραμμάτων, προκύπτει πως το άνω όριο της ογκομετρικής παροχής με απόκλιση $\leq 2\%$ της ονομαστικής τιμής είναι τα $4 \text{ mm}^3/\text{s}$. Βάση της τιμής αυτής, επιλέγονται 3 τιμές της παραμέτρου Q για τον υπολογισμό των 3 επιπέδων ταχύτητας εκτύπωσης:

$$Q = 1 \text{ mm}^3/\text{s}, Q = 2 \text{ mm}^3/\text{s}, Q = 4 \text{ mm}^3/\text{s}$$

Για τη κάθε ένα ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$A_p = W_p H_p - \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) H_p^2 \quad (3)$$



Συνεπώς υπολογίζεται το A_p για κάθε σετ τιμών πλάτους – ύψους.

Η ταχύτητα είναι:

$$speed \left(\frac{mm}{s} \right) = \frac{Q \left(\frac{mm^3}{s} \right)}{A_p \left(mm^2 \right)} \quad (4)$$

Ωστόσο ο printer χρειάζεται τη ταχύτητα σε (mm/min), οπότε γίνονται οι ανάλογες μετατροπές και υπολογίζεται το feedrate, οπότε προκύπτουν τα τελικά σετ παραμέτρων για τα εκτυπωμένα δοκίμια. Αυτά συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας Ζ. Πίνακας υπολογισμού του ρυθμού τροφοδοσίας για κάθε σετ παραμέτρων

Q (mm ³ /s)	Width (mm)	Height (mm)	A_p (mm ²)	Speed (mm/s)	Feedrate (mm/min)
1	0,24	0,08	0,017827	56	3366
	0,24	0,2	0,039416	25	1522
	0,24	0,32	0,054825	18	1094
	0,48	0,08	0,037027	27	1620
	0,48	0,2	0,087416	11	686
	0,48	0,32	0,131625	8	456
	0,72	0,08	0,056227	18	1067
	0,72	0,2	0,135416	7	443
2	0,24	0,08	0,017827	112	6732
	0,24	0,2	0,039416	51	3044
	0,24	0,32	0,054825	36	2189
	0,48	0,08	0,037027	54	3241
	0,48	0,2	0,087416	23	1373
	0,48	0,32	0,131625	15	912
	0,72	0,08	0,056227	36	2134
	0,72	0,2	0,135416	15	886
4	0,24	0,08	0,017827	224	13463*
	0,24	0,2	0,039416	101	6089
	0,24	0,32	0,054825	73	4378
	0,48	0,08	0,037027	108	6482
	0,48	0,2	0,087416	46	2745
	0,48	0,32	0,131625	30	1823
	0,72	0,08	0,056227	71	4268
	0,72	0,2	0,135416	30	1772
	0,72	0,32	0,208425	19	1151

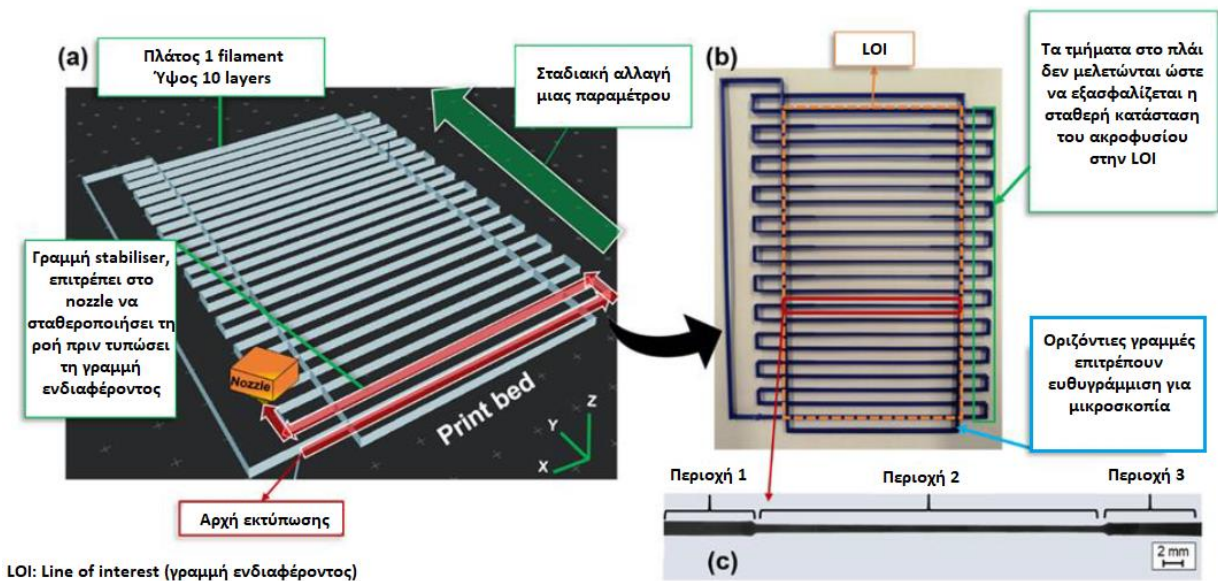
* Σε αυτό το σημείο η τιμή της ταχύτητας ξεπερνά το ανώτατο όριο της ταχύτητας εκτύπωσης του FFF συστήματος. Επιλέγεται να εκτυπωθεί στο 85% της ταχύτητας, δηλαδή στα 11444 mm/min.

3.2 Σχεδιασμός και εκτύπωση

Η θερμοκρασία εκτύπωσης για όλα τα δοκίμια είναι 205 °C. Ο G-code περιλαμβάνει, πέρα από το κύριο μέρος έναν κώδικα έναρξης (Start G-Code) και αντίστοιχα κώδικα τέλους (End G-Code), οι οποίοι περιλαμβάνουν τις διαδικασίες που πρέπει να γίνουν στην αρχή και στο τέλος της εκτύπωσης αντίστοιχα. Το FullControl δίνει τη δυνατότητα χρήσης Custom κώδικα για την έναρξη και το τέλος, οπότε προσαρμόστηκαν οι κώδικες ώστε να είναι συμβατοί με τον εκτυπωτή που χρησιμοποιήθηκε.

3.2.1 1D

Το σύστημα που μελετάται είναι 3x3 (27 σετ παραμέτρων). Για τη δομή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε μια δομή που έχει χρησιμοποιηθεί σε αντίστοιχα βιβλιογραφικά πειράματα και σχεδιάστηκε με Fullcontrol [39] [8].



Σχήμα 24. Η διαδρομή εκτύπωσης βάσει Moetazediana et al.

Πιο συγκεκριμένα, στη μελέτη των Amirpasha Moetazediana et al., σχεδιάζεται το παραπάνω σχήμα με FullControl. Σε κάθε LOI (γραμμή ενδιαφέροντος) υπάρχουν 3 περιοχές. Οι περιοχές 1 και 3 έχουν τις ίδιες παραμέτρους ενώ στην περιοχή 2 μεταβάλλεται μια παράμετρος. Αρχικά μελετάται η ταχύτητα εκτύπωσης, μετά η επιτάχυνση, το retraction (ανάκληση νήματος), η θερμοκρασία εκτύπωσης και το ύψος της ίνας.

Στην παρούσα μελέτη σχεδιάστηκε μια δομή αντίστοιχη με τη παραπάνω, καθώς οι παράλληλες οριζόντιες γραμμές καθιστούν ευκολότερο το scanning των ινών και τη σύγκρισή τους. Κάθε εκτυπωμένο δοκίμιο περιλαμβάνει 3 περιοχές, δηλαδή 3 σετ παραμέτρων. Οι 3 περιοχές έχουν το ίδιο πλάτος και ύψος ινών, ενώ μεταβάλλεται η ογκομετρική παροχή. Οπότε συνολικά εκτυπώνονται 9 δοκίμια, που το καθένα περιλαμβάνει 3 τεστ.

Συγκεντρωτικά:

Πίνακας 8. Τα σετ παραμέτρων για το 1D

Print	Width (mm)	Height (mm)	Feedrate (mm/min)	Width (mm)	Height (mm)	Feedrate (mm/min)	Width (mm)	Height (mm)	Feedrate (mm/min)
1	0.24	0.08	3366	0.24	0.08	6732	0.24	0.08	11444
2	0.24	0.2	1522	0.24	0.2	3044	0.24	0.2	6089
3	0.24	0.32	1094	0.24	0.32	2189	0.24	0.32	4378
4	0.48	0.08	1620	0.48	0.08	3241	0.48	0.08	6482
5	0.48	0.2	686	0.48	0.2	1373	0.48	0.2	2745
6	0.48	0.32	456	0.48	0.32	912	0.48	0.32	1823
7	0.72	0.08	1067	0.72	0.08	2134	0.72	0.08	4268
8	0.72	0.2	443	0.72	0.2	886	0.72	0.2	1772
9	0.72	0.32	288	0.72	0.32	576	0.72	0.32	1151

Οι εντολές που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι ακόλουθες:

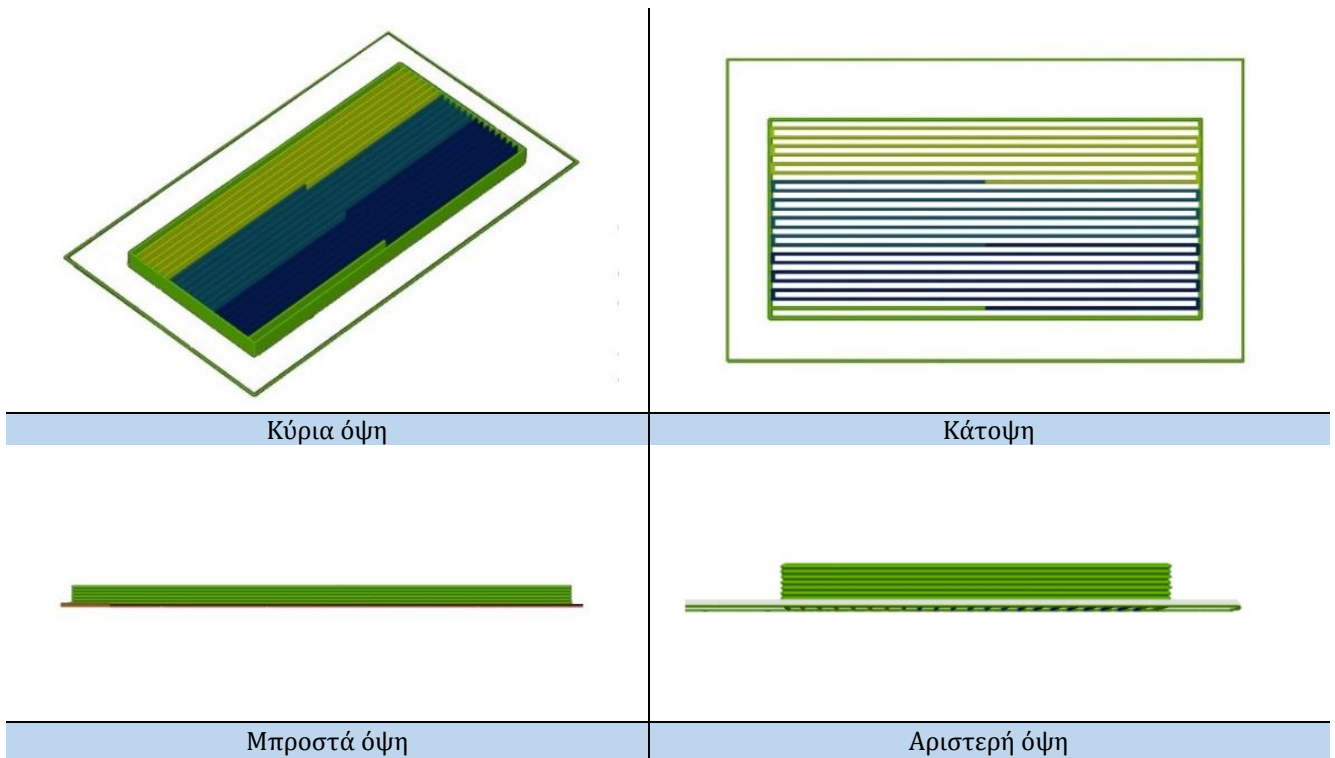
Πίνακας 9. Οι εντολές που χρησιμοποιήθηκαν στο FullControl

Rectangle	X1	Y1	X2	Y2	Z	CW or anti-CW	NomWidth	NomHeight	E=?;F=?;T=?	EvaluePerSegmentOverride;F-SpeedOverride	
Line	Cartesian	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	"Print" or "Travel"	NomWidth	NomHeight	E=?;F=?;T=?
Cartesian repeat	Repeated feature(s)	X-disp	Y-disp	Z-disp	Repeats (excl. original)						

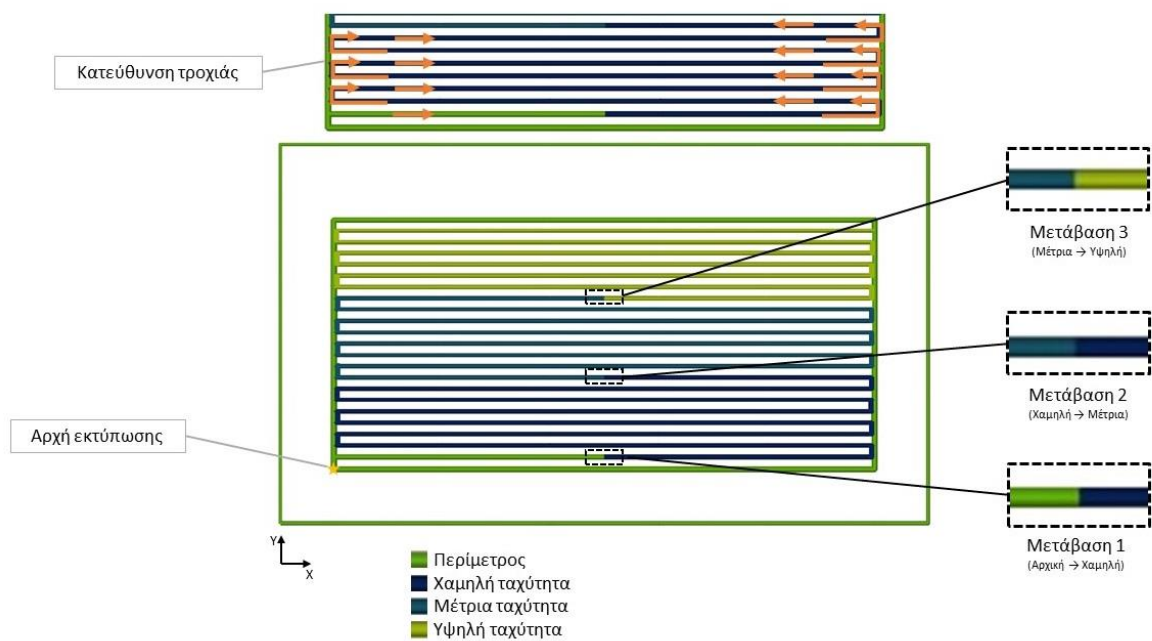
Αρχικά σχεδιάζεται ένα ορθογώνιο σταθεροποίησης της ροής. Έπειτα γίνεται η ακόλουθη διαδικασία:

- Σχεδιάζεται ένα ορθογώνιο το οποίο βοηθά στη στήριξη των ινών (περίμετρος).
- Σχεδιάζεται μια Stabilisation-Transition line στην οποία γίνεται η πρώτη αλλαγή ταχύτητας (μετάβαση 1).
- Σχεδιάζονται 6 γραμμές ενδιαφέροντος με την ταχύτητα στη τιμή 1 χρησιμοποιώντας την εντολή Cartesian repeat του FullControl στον άξονα y.
- Σχεδιάζεται η δεύτερη transition line.
- Γίνονται 6 γραμμές ενδιαφέροντος με την ταχύτητα στη τιμή 2 αντίστοιχα με πριν.
- Σχεδιάζεται η τρίτη transition line.
- Σχεδιάζονται 6 γραμμές ενδιαφέροντος με την ταχύτητα στη τιμή 3.
- Όλα τα παραπάνω βήματα επαναλαμβάνονται στον άξονα z με Cartesian repeat. Γίνονται όσες επαναλήψεις χρειάζονται ώστε τα δοκίμια να έχουν ίδιο ύψος ίσο με 2 mm. Συγκεκριμένα στα δοκίμια με layer height 0.08 γίνονται 25, με 0.2 γίνονται 10 layers και με 0.32 γίνονται 7 layers. Στην ανάλυση θα μελετηθούν 7 layers από το καθένα, ώστε να υπάρχει ίδιος αριθμός δεδομένων για κάθε σετ παραμέτρων.

Το τελικό σχήμα είναι το ακόλουθο:



Σχήμα 25. Η εκτυπωμένη 1D δομή από διαφορετικές όψεις



Σχήμα 26. Η διαδρομή εκτύπωσης για τα 1D δοκίμια



Σχήμα 27. Φωτογραφία εκτυπωμένου 1D δοκιμίου

3.2.2 2D

Στο 2D επιλέχθηκε ένα αντίστοιχο σχήμα, με τις επιμέρους γραμμές, όμως, να μην έχουν κενό μεταξύ τους. Τα δοκίμια τυπώθηκαν σε μορφή πλέγματος, με 9 σετ παραμέτρων το καθένα. Συνεπώς, εκτυπώθηκαν 3 δοκίμια συνολικά. Κάθε δοκίμιο περιλαμβάνει σετ παραμέτρων με το ίδιο ύψος ίνας και μεταβαλλόμενα το πλάτος ίνας και η ογκομετρική παροχή.

Συγκεντρωτικά:

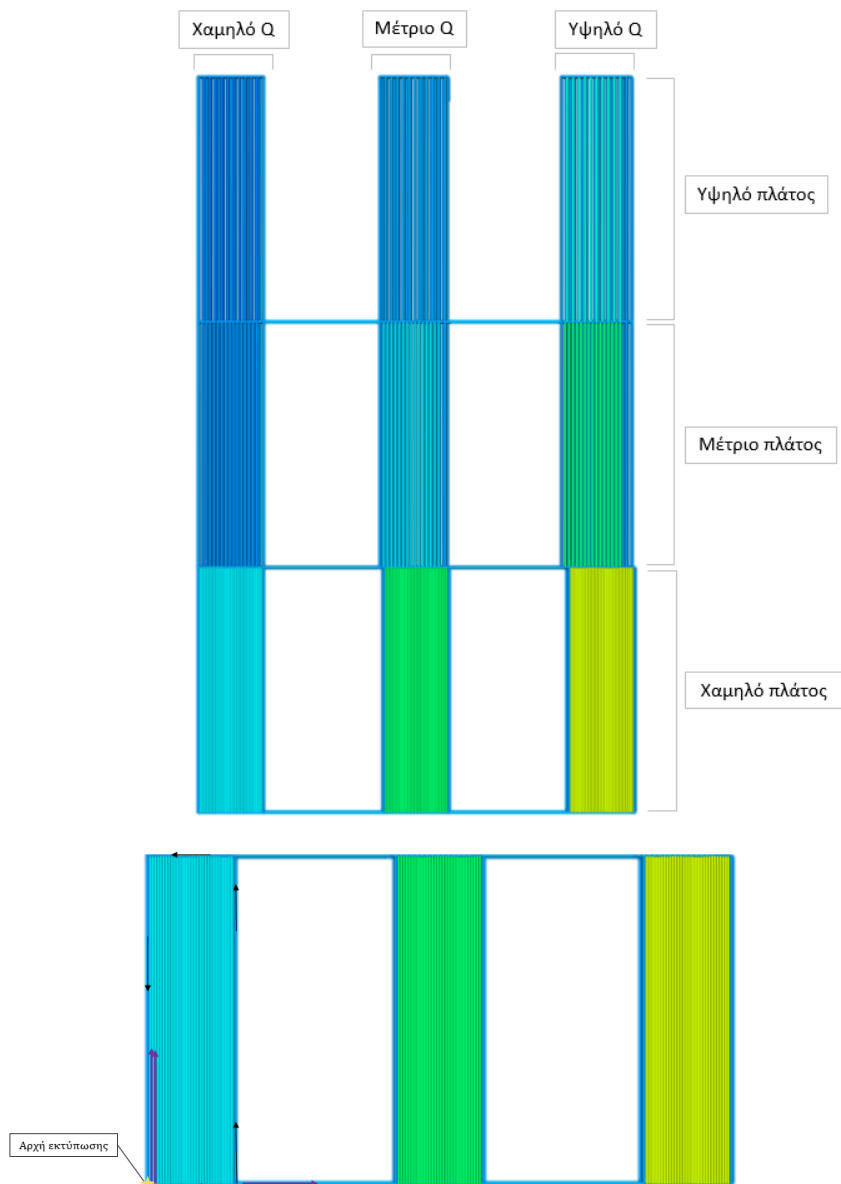
Πίνακας 10. Τα σετ παραμέτρων για το 2D

Print	Width (mm)	Height (mm)	Feedrate (mm/min)	Width (mm)	Height (mm)	Feedrate (mm/min)	Width (mm)	Height (mm)	Feedrate (mm/min)
1	0.24	0.08	3366	0.24	0.08	6732	0.24	0.08	11444
	0.48	0.08	1620	0.48	0.08	3241	0.48	0.08	6482
	0.72	0.08	1067	0.72	0.08	2134	0.72	0.08	4268
2	0.24	0.2	1522	0.24	0.2	3044	0.24	0.2	6089
	0.48	0.2	686	0.48	0.2	1373	0.48	0.2	2745
	0.72	0.2	443	0.72	0.2	886	0.72	0.2	1772
3	0.24	0.32	1094	0.24	0.32	2189	0.24	0.32	4378
	0.48	0.32	456	0.48	0.32	912	0.48	0.32	1823
	0.72	0.32	288	0.72	0.32	576	0.72	0.32	1151

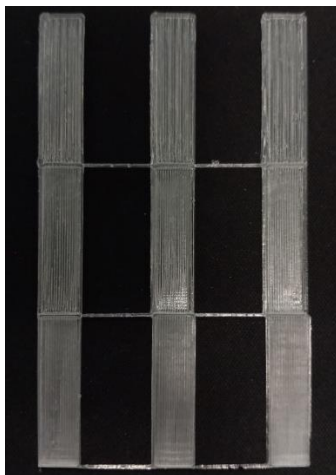
Για τον κώδικα χρησιμοποιούνται οι ίδιες εντολές με το 1D. Η ακολουθία των εντολών είναι:

- Σχεδιάζεται ένα ορθογώνιο το οποίο βοηθά στη στήριξη των ινών (περίμετρος).
- Σχεδιάζεται μια κάθετη γραμμή με το εκάστοτε σετ παραμέτρων
- Με την εντολή Cartesian repeat επαναλαμβάνεται η γραμμή στο επίπεδο XY έτσι ώστε να δημιουργηθεί γεμίσει το περίγραμμα και να δημιουργηθεί ένα στερεό ορθογώνιο με διαστάσεις 8x30 mm. - Σχεδιάζεται μια γραμμή σύνδεσης και επαναλαμβάνεται η διαδικασία για το 2^ο σετ παραμέτρων κ.ο.κ.

Το τελικό σχήμα είναι το ακόλουθο:



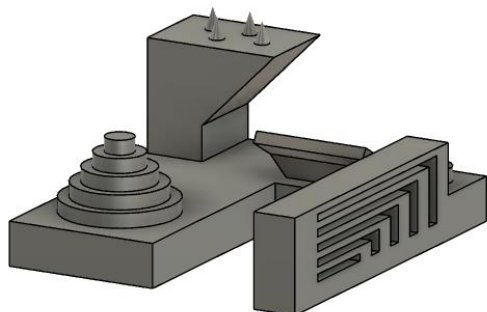
Σχήμα 28. Η εκτυπωμένη 2D δομή και η διαδρομή εκτύπωσης



Σχήμα 29. Φωτογραφία εκτυπωμένου 2D δοκιμίου

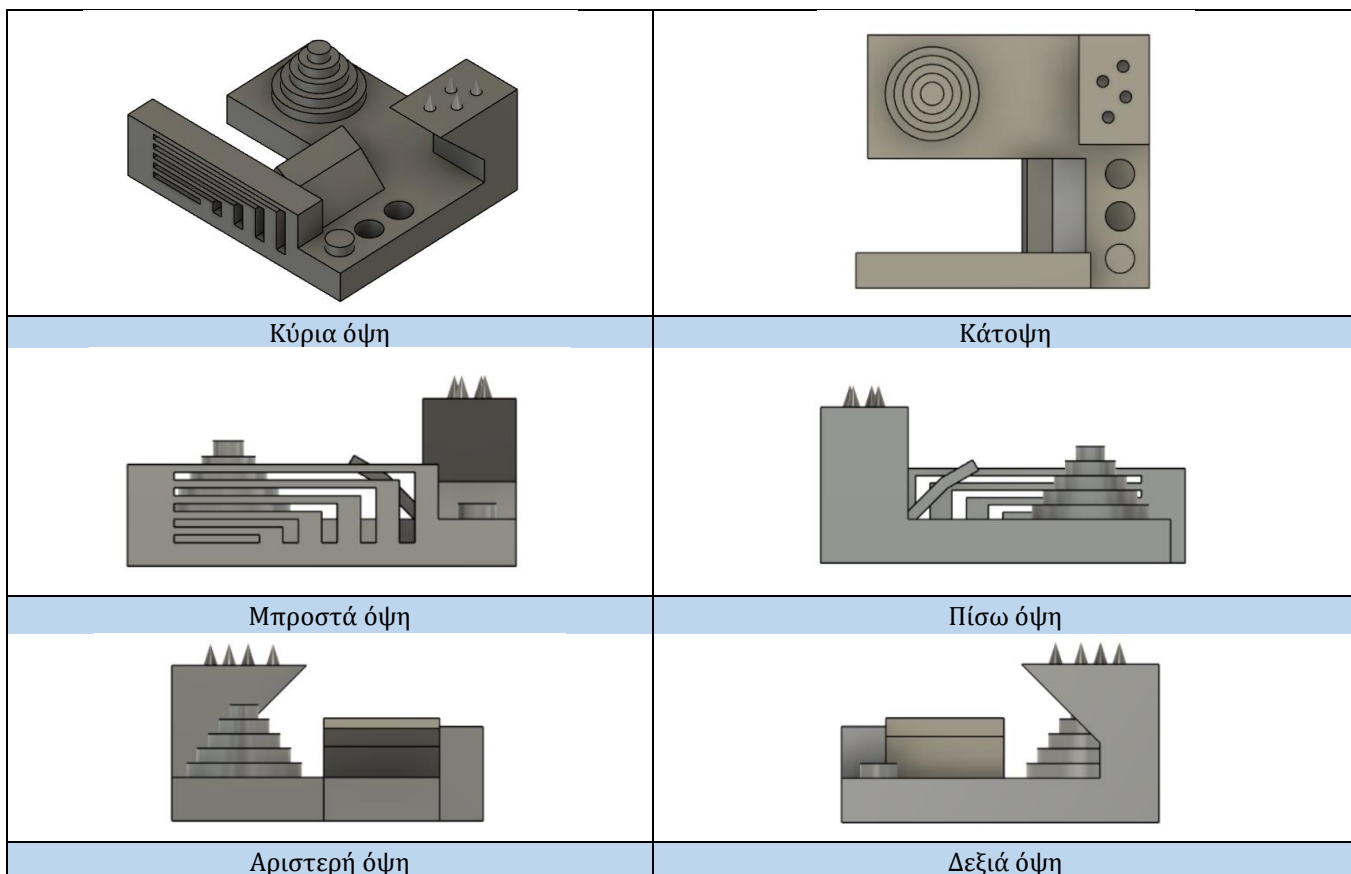
3.2.3 3D

Το 3D δοκίμιο σχεδιάστηκε με τον συμβατικό τρόπο, έτσι ώστε να δοκιμαστεί η εφαρμογή των σετ παραμέτρων που επιλέχθηκαν μέσα από την ανάλυση.



Σχήμα 30. Η 3D εκτυπωμένη δομή

Το σχέδιο είναι εμπνευσμένο από αντίστοιχα τεστ που είχε κάνει η Autodesk [40]. Η δομή από διαφορετικές γωνίες παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 31).



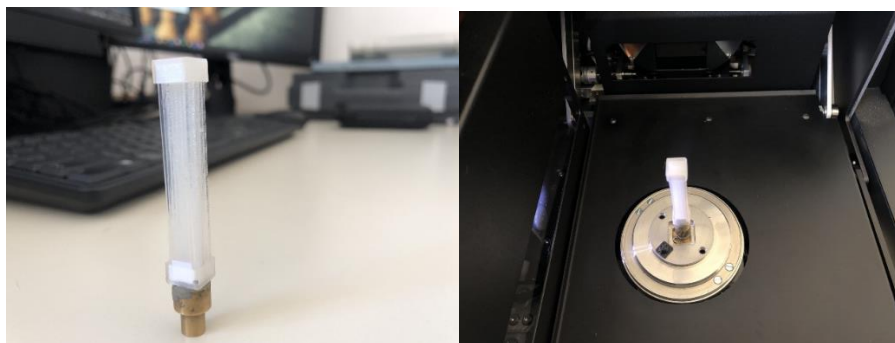
Σχήμα 31. Η εκτυπωμένη 3D δομή από διαφορετικές όψεις

Οι παράμετροι εκτύπωσης για το 3D δοκίμιο (πλάτος ίνας, ύψος στρώματος και ταχύτητα εκτύπωσης) επιλέγονται μετά την ανάλυση 1D και 2D.

3.3 Τεχνικές χαρακτηρισμού

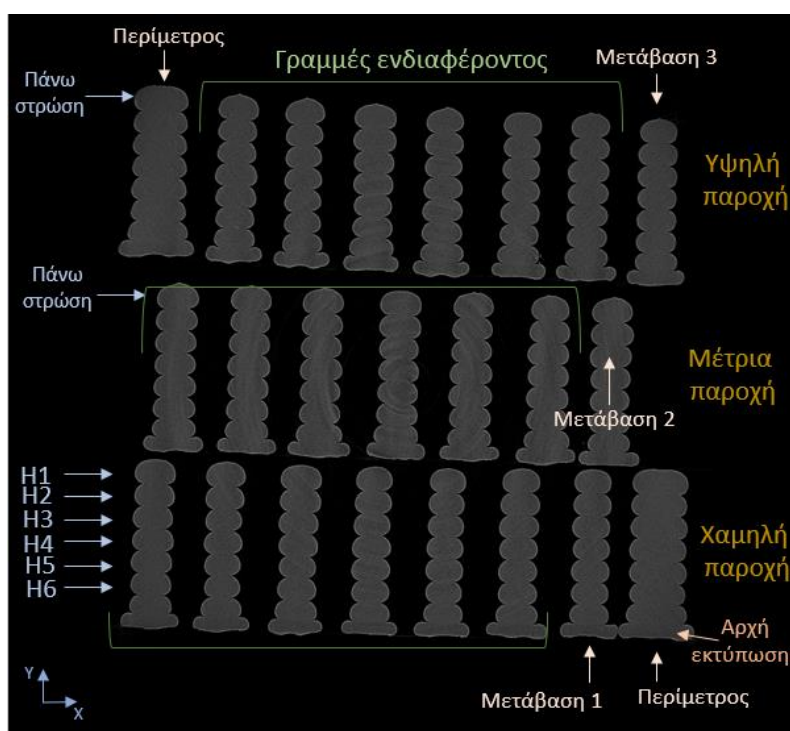
3.3.1 1D – mCT

Τα εκτυπωμένα δοκίμια σαρώνονται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο μαγνητικής τομογραφίας ακτίνων Χ (micro-CT). Για την επίτευξη μεγαλύτερης ποιότητας (resolution) τα δοκίμια κόβονται σε 3 μέρη και σαρώνονται το ένα δίπλα στο άλλο, τοποθετημένα σε μια βάση (Σχήμα 30). Η ποιότητα που επιλέγεται είναι 5.5 pixel size.

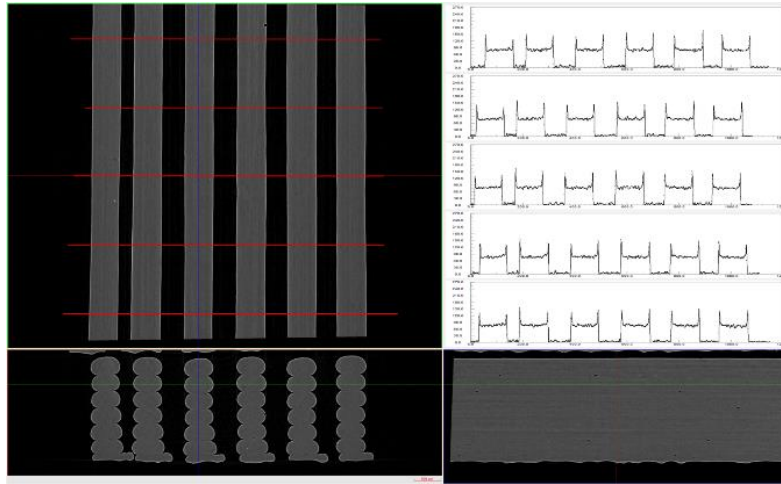


Σχήμα 32. Τα δοκίμια προετοιμασμένα για scan με mCT

Το micro-CT δίνει ένα σετ δεδομένων που χρειάζεται επεξεργασία. Γίνεται χρήση του λογισμικού DataViewer, όπου γίνεται ανακατασκευή και ευθυγράμμιση των δεδομένων, ώστε να ληφθούν τα απαραίτητα δεδομένα. Τα δεδομένα μετά από επεξεργασία έχουν την ακόλουθη μορφή:



Σχήμα 33. Δομή ψηφιακών δεδομένων από mCT έπειτα από επεξεργασία



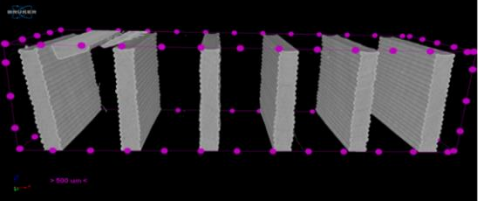
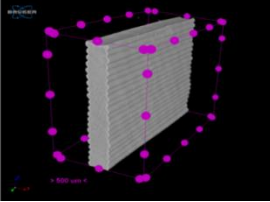
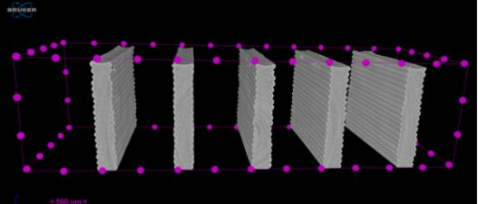
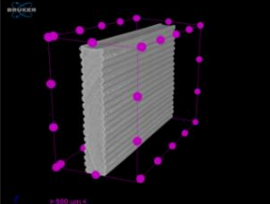
Σχήμα 34. Η μέθοδος λήψης τιμών από το mCT

Λόγω μικρών διακυμάνσεων προσανατολισμού μεταξύ των 3 δειγμάτων που σαρώνονται κάθε φορά, για κάθε δοκίμιο αλλάζει ο προσανατολισμός των δεδομένων, κρατώντας σταθερές τις διαστάσεις. Για κάθε δείγμα λαμβάνονται τιμές για τις 6 γραμμές ενδιαφέροντος (lines of interest). Σε κάθε γραμμή ενδιαφέροντος μελετώνται 6 ίνες από πάνω προς τα κάτω και 3 necks (περιοχή ανάμεσα στις ίνες). Σε κάθε ίνα λαμβάνονται τιμές σε 5 «ύψη» της ίνας (στον z άξονα). Συνολικά για κάθε δείγμα λαμβάνονται 180 τιμές για το πλάτος της ίνας. Από τα δεδομένα που λαμβάνονται υπολογίζεται ο μέσος όρος του πλάτους και για τις ίνες και για τους «λαιμούς».

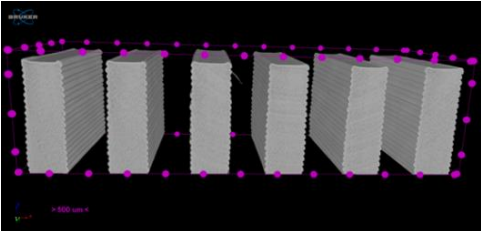
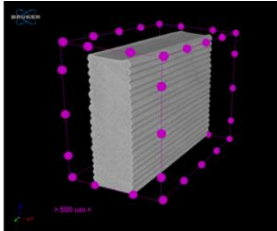
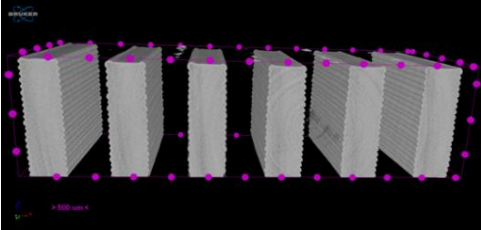
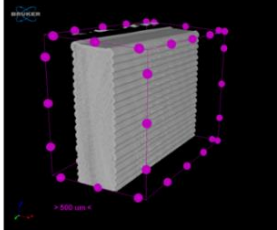
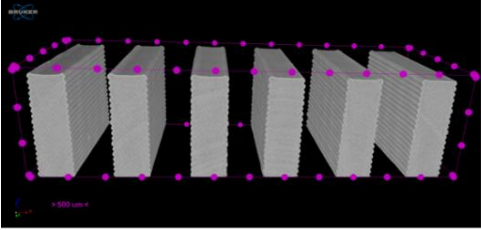
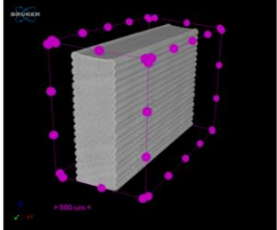
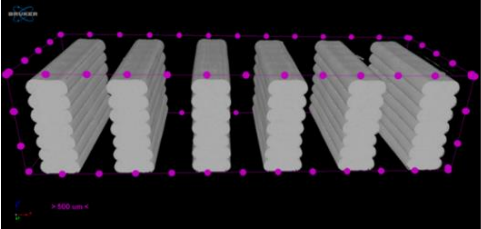
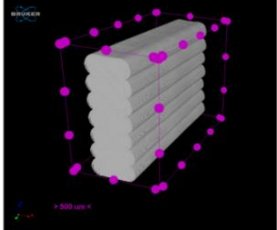
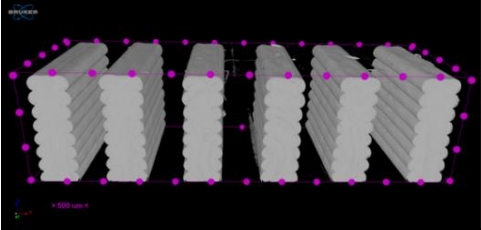
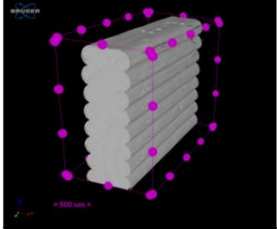
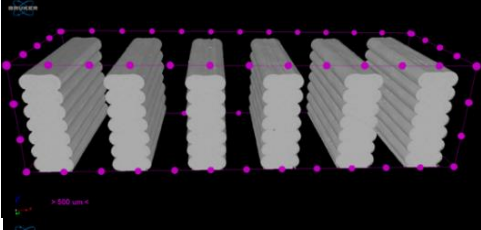
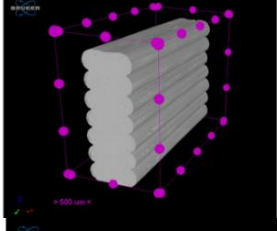
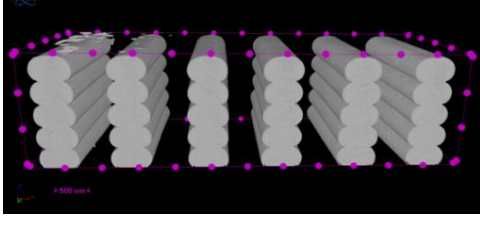
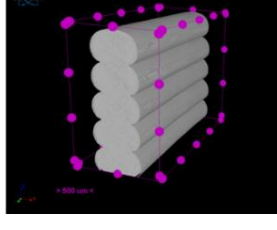
Η μέθοδος λήψης τιμών από τα δεδομένα του mCT (profile lines) φαίνεται στο Σχήμα 34. Η κάθε κορυφή αντιπροσωπεύει την αρχή και το τέλος κάθε ίνας οπότε η διαφορά τους αποτελεί το πλάτος της. Η επεξεργασία των δεδομένων για τον αυτόματο υπολογισμό του πλάτους κάθε ίνας έγινε μέσω κώδικα python που έχει αναπτυχθεί από το εργαστήριο RNano.

Τα σαρωμένα δοκίμια παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 11. Τα σαρωμένα δοκίμια 1D

TRIAL	Παράμετροι	mCT	
1	W= 0.24 mm H= 0.08 mm Q= 1 mm ³ /s		
	W= 0.24 mm H= 0.08 mm Q= 2 mm ³ /s		

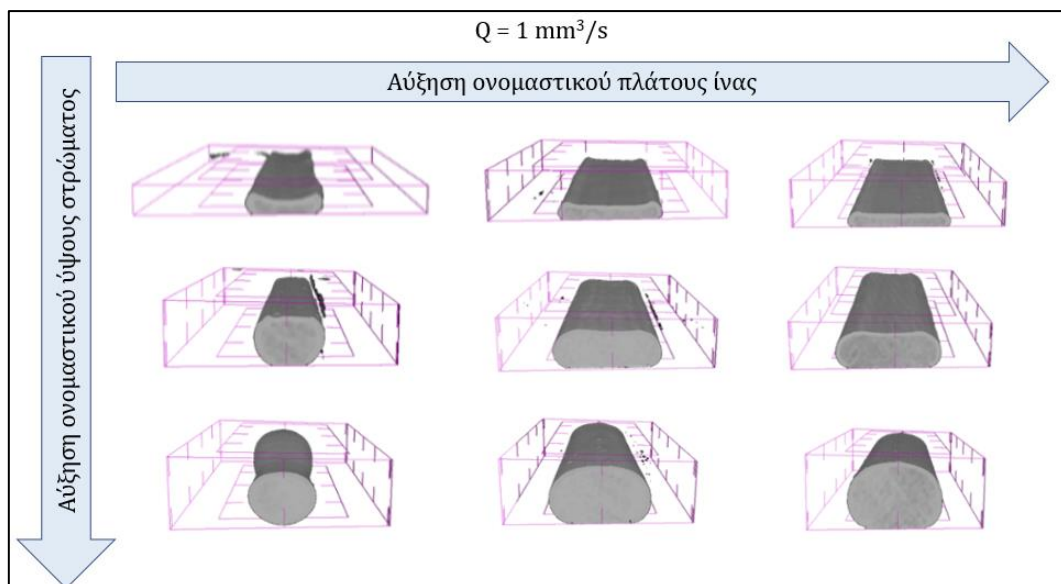
	<p>W= 0.24 mm H= 0.08 mm Q= 4 mm³/s</p>		
2	<p>W= 0.24 mm H= 0.2 mm Q= 1 mm³/s</p>		
	<p>W= 0.24 mm H= 0.2 mm Q= 2 mm³/s</p>		
	<p>W= 0.24 mm H= 0.2 mm Q= 4 mm³/s</p>		
	<p>W= 0.24 mm H= 0.2 mm Q= 4 mm³/s</p>		
3	<p>W= 0.24 mm H= 0.32 mm Q= 1 mm³/s</p>		
	<p>W= 0.24 mm H= 0.32 mm Q= 2 mm³/s</p>		
	<p>W= 0.24 mm H= 0.32 mm Q= 4 mm³/s</p>		

4	$W = 0.48 \text{ mm}$ $H = 0.08 \text{ mm}$ $Q = 1 \text{ mm}^3/\text{s}$		
	$W = 0.48 \text{ mm}$ $H = 0.08 \text{ mm}$ $Q = 2 \text{ mm}^3/\text{s}$		
	$W = 0.48 \text{ mm}$ $H = 0.08 \text{ mm}$ $Q = 4 \text{ mm}^3/\text{s}$		
5	$W = 0.48 \text{ mm}$ $H = 0.2 \text{ mm}$ $Q = 1 \text{ mm}^3/\text{s}$		
	$W = 0.48 \text{ mm}$ $H = 0.2 \text{ mm}$ $Q = 2 \text{ mm}^3/\text{s}$		
	$W = 0.48 \text{ mm}$ $H = 0.2 \text{ mm}$ $Q = 4 \text{ mm}^3/\text{s}$		
6	$W = 0.48 \text{ mm}$ $H = 0.32 \text{ mm}$ $Q = 1 \text{ mm}^3/\text{s}$		

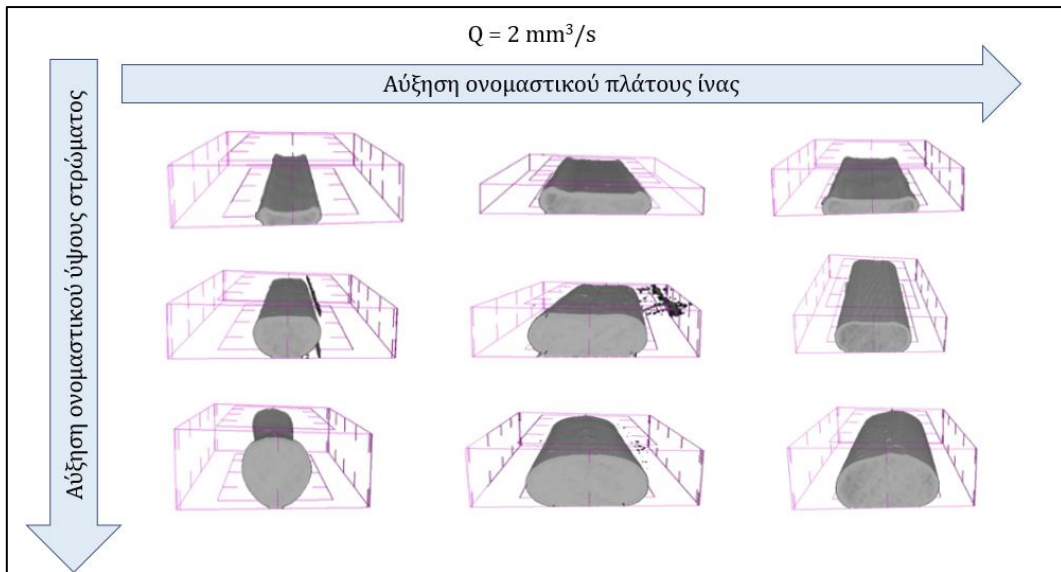
	<p>W= 0.48 mm H= 0.32 mm Q= 2 mm³/s</p>	
	<p>W= 0.48 mm H= 0.32 mm Q= 4 mm³/s</p>	
7	<p>W= 0.72 mm H= 0.08 mm Q= 1 mm³/s</p>	
	<p>W= 0.72 mm H= 0.08 mm Q= 2 mm³/s</p>	
	<p>W= 0.72 mm H= 0.08 mm Q= 4 mm³/s</p>	
8	<p>W= 0.72 mm H= 0.2 mm Q= 1 mm³/s</p>	
	<p>W= 0.72 mm H= 0.2 mm Q= 2 mm³/s</p>	

	$W = 0.72 \text{ mm}$ $H = 0.2 \text{ mm}$ $Q = 4 \text{ mm}^3/\text{s}$	
	$W = 0.72 \text{ mm}$ $H = 0.32 \text{ mm}$ $Q = 1 \text{ mm}^3/\text{s}$	
9	$W = 0.72 \text{ mm}$ $H = 0.32 \text{ mm}$ $Q = 2 \text{ mm}^3/\text{s}$	
	$W = 0.72 \text{ mm}$ $H = 0.32 \text{ mm}$ $Q = 4 \text{ mm}^3/\text{s}$	

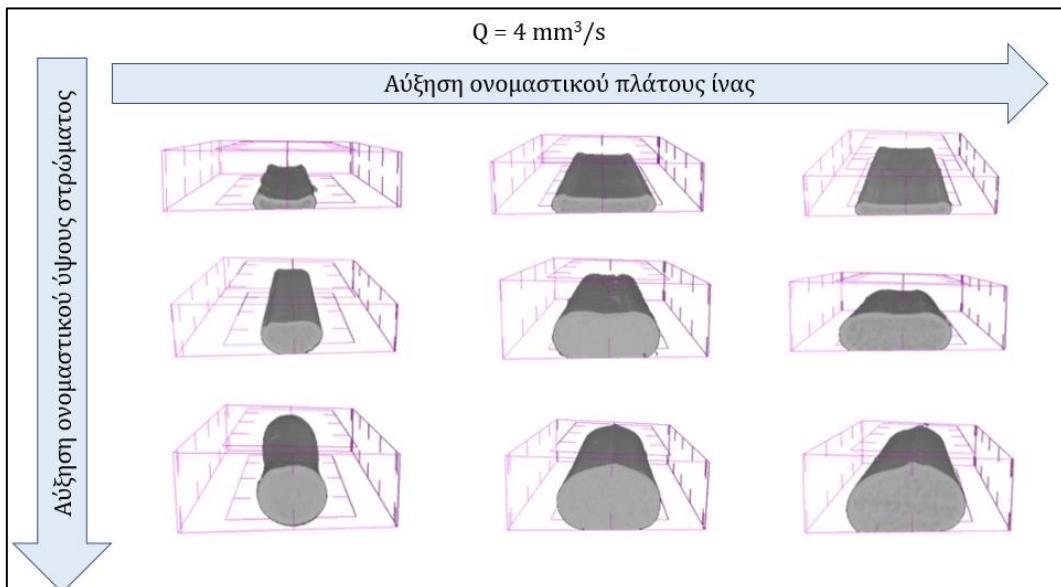
Η μορφολογία των ινών μεταβάλλεται με την αύξηση του πλάτους και του ύψους αντίστοιχα όπως φαίνεται στα ακόλουθα σχήματα.



Σχήμα 35. Μεταβολή της μορφολογίας των ινών για ογκομετρική παροχή $1 \text{ mm}^3/\text{s}$



Σχήμα 36. Μεταβολή της μορφολογίας των ινών για ογκομετρική παροχή $2 \text{ mm}^3/\text{s}$



Σχήμα 37. Μεταβολή της μορφολογίας των ινών για ογκομετρική παροχή $4 \text{ mm}^3/\text{s}$

Από τις εικόνες είναι εμφανής η επίδραση των παραμέτρων υπό μελέτη στην μορφολογία των ινών.

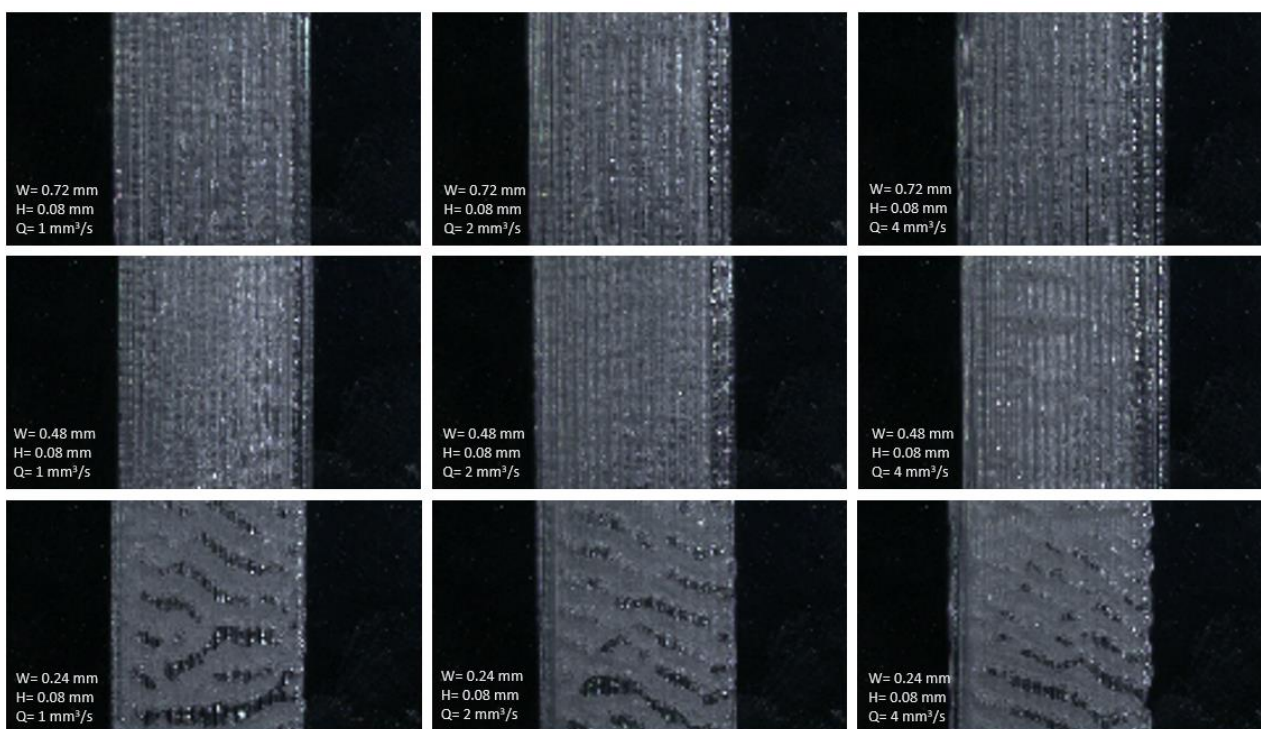
3.3.2 2D - Στερεοσκόπιο

Για το 2D χρησιμοποιήθηκε στερεοσκόπιο για την λήψη εικόνων προς ποιοτική αξιολόγηση των δοκιμών.

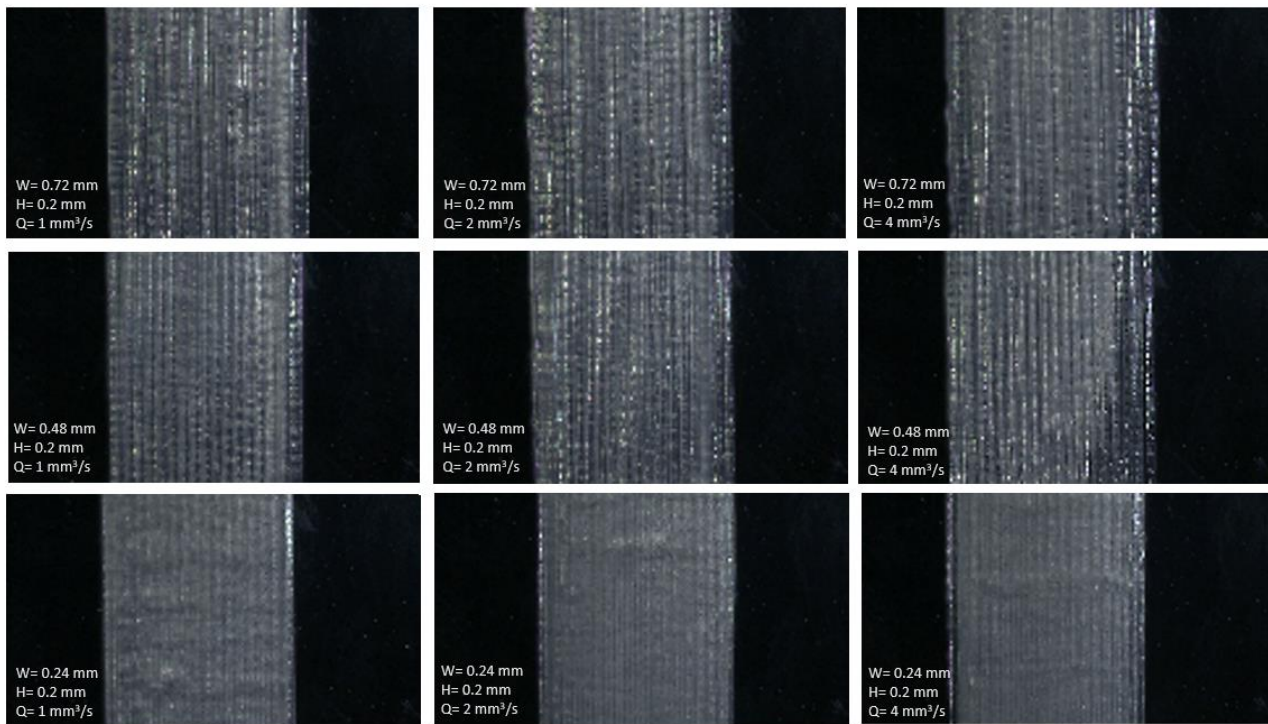


Σχήμα 38. Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε

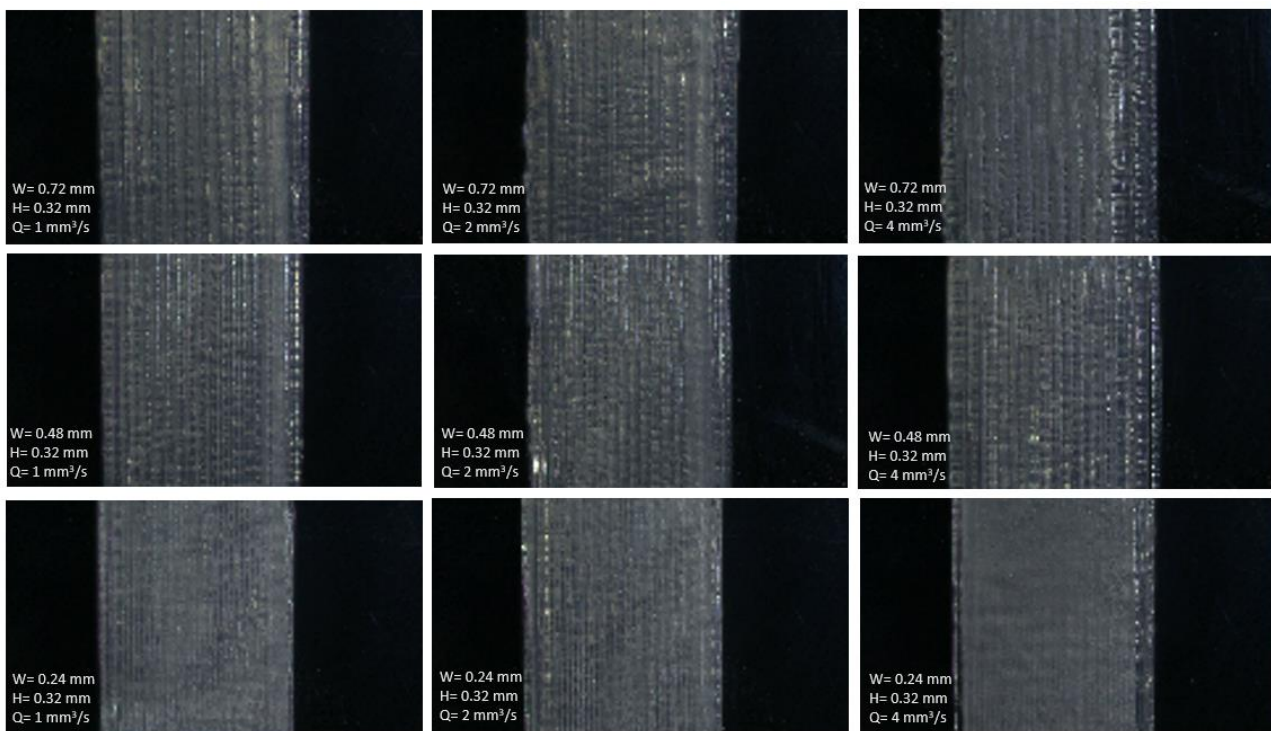
Οι εικόνες που λήφθηκαν για τα δοκίμια είναι οι ακόλουθες:



Σχήμα 39. Οι εικόνες από το στερεοσκόπιο για το Grid 1



Σχήμα 40. Οι εικόνες από το στερεοσκόπιο για το Grid 2



Σχήμα 41. Οι εικόνες από το στερεοσκόπιο για το Grid 3

3.3.3 3D – Στερεοσκόπιο

Αντίστοιχα με το 2D, χρησιμοποιήθηκε και στο 3D στερεοσκόπιο για την λήψη εικόνων προς ποιοτική αξιολόγηση. Οι εικόνες παρατίθενται στο Κεφάλαιο 4.

4. Επεξεργασία αποτελεσμάτων

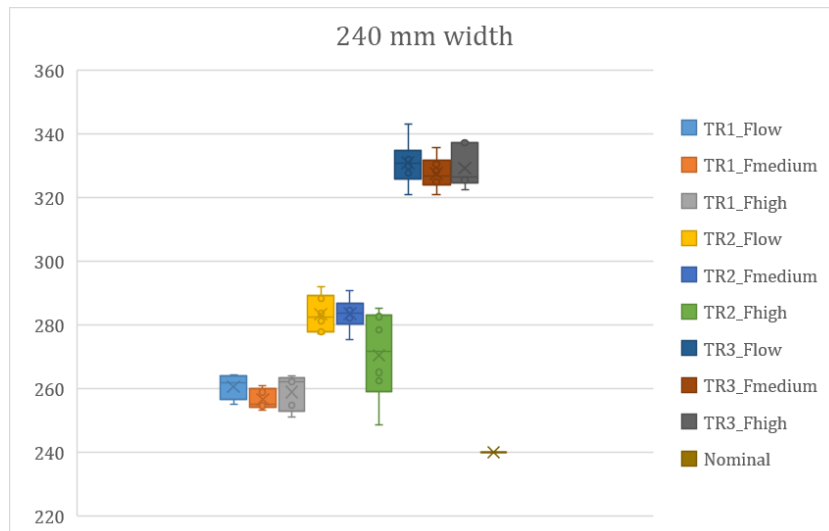
Από τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από το mCT, υπολογίζονται οι μέσοι όροι των τιμών για το πλάτος της ίνας σε κάθε δείγμα. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 12. Τα αποτελέσματα για τα width από το mCT

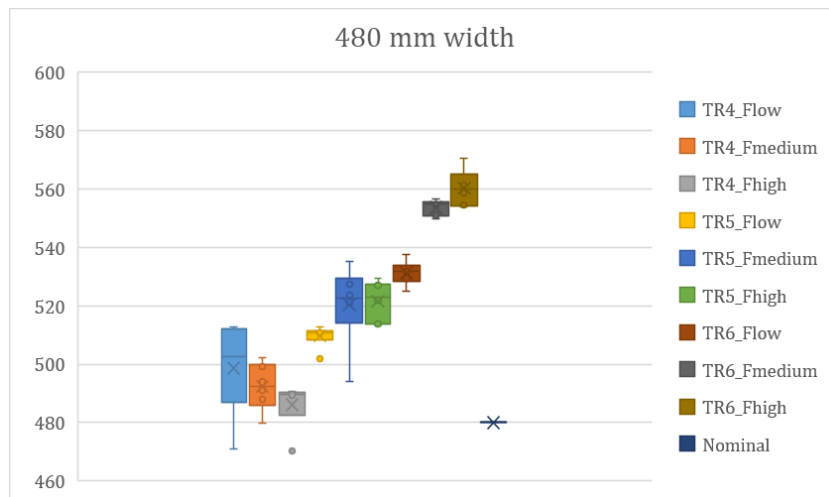
TRIAL	Value 1 (mm)	Value 2 (mm)	Value 3 (mm)	Value 4 (mm)	Value 5 (mm)	Value 6 (mm)	Average (mm)	SD (mm)	Nominal (mm)
TR1_Flow	262	255	263	264	258		261	3.5	240
TR1_Fmedium	255	253	255	259	261		257	2.8	240
TR1_Fhigh	255	264	263	251	262		259	5.1	240
TR2_Flow	292	284	278	288	277	281	283	4.9	240
TR2_Fmedium	275	285	291	285	283	282	283	4.2	240
TR2_Fhigh	249	285	263	278	265	283	270	11.9	240
TR3_Flow	343	332	328	321	332	330	331	6.2	240
TR3_Fmedium	328	336	325	330	321	325	328	4.4	240
TR3_Fhigh	327	337	322	325	326	337	329	5.4	240
TR4_Flow	471	492	513	512	500	505	499	13.2	480
TR4_Fmedium	480	491	488	494	499	502	492	6.8	480
TR4_Fhigh	470	491	486	490	490	490	486	6.6	480
TR5_Flow	502	511	513	511	511	511	510	3.3	480
TR5_Fmedium	494	527	535	521	524	522	520	11.8	480
TR5_Fhigh	527	513	514	522	524	529	521	5.6	480
TR6_Flow	532	538	529	533	525	532	531	3.5	480
TR6_Fmedium	556	555	550	551	555	555	554	2.3	480
TR6_Fhigh	570	558	554	563	554	561	560	5.2	480
TR7_Flow	488	480	493	495	495	510	494	8.4	720
TR7_Fmedium	496	490	493	485	490	478	489	5.4	720
TR7_Fhigh	526	522	518	506	503	498	512	9.6	720
TR8_Flow	528	536	537	535	533	504	529	10.6	720
TR8_Fmedium	548	523	528	512	514	522	524	11.0	720
TR8_Fhigh	535	494	523	538	529	531	525	13.3	720
TR9_Flow	535	542	525	528	538	518	531	7.3	720
TR9_Fmedium	528	561	542	549	557	560	550	10.9	720
TR9_Fhigh	538	540	525	529	540	519	532	7.5	720

*Στο TR1 λείπουν τιμές επειδή σε εκείνα τα σημεία δεν ήταν ευδιάκριτα τα όρια των ινών στο mCT.

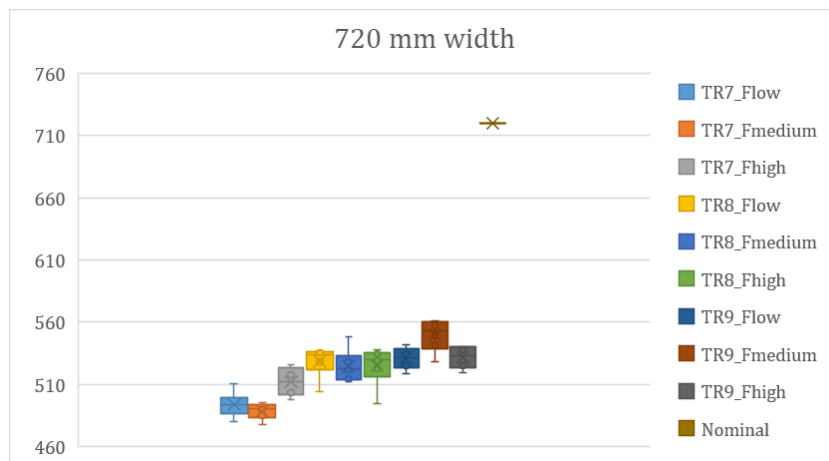
Για καλύτερη οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων, έγιναν τα ακόλουθα διαγράμματα, τα οποία απεικονίζουν το εύρος των τιμών. Η ονομαστική τιμή του πλάτους σχεδιάζεται ως σημείο.



Σχήμα 42. Το πειραματικό πλάτος δοκιμίων με ονομαστικό πλάτος 240mm σε σχέση με αυτό



Σχήμα 43. Το πειραματικό πλάτος δοκιμίων με ονομαστικό πλάτος 480mm σε σχέση με αυτό



Σχήμα 44. Το πειραματικό πλάτος δοκιμίων με ονομαστικό πλάτος 720mm σε σχέση με αυτό

Προτού εξαχθεί κάποιο συμπέρασμα, ωστόσο, αξιολογείται η επίδραση της κάθε παραμέτρου στο αποτέλεσμα.

Γι' αυτόν τον λόγο, έγινε ανάλυση διακύμανσης (ANOVA – Analysis Of VAriance), η οποία αποτελεί μια μέθοδο ερμηνείας πειραματικών δεδομένων, όσον αφορά την εξέταση και τον προσδιορισμό των πηγών των αποκλίσεων που παρατηρούνται σε δειγματικά δεδομένα. Μέσω της ανάλυσης προσδιορίζεται η ποσοστιαία % συμβολή κάθε ποιοτικής μεταβλητής στο αποτέλεσμα.

Κάθε ποιοτική μεταβλητή ονομάζεται παράγοντας (factor) και οι τιμές της ονομάζονται στάθμες ή επίπεδα (levels) του παράγοντα. Η εξαρτημένη μεταβλητή Y ονομάζεται μεταβλητή απόκρισης (response variable) γιατί στις τιμές της αντανακλώνται οι αλλαγές στις τιμές του παράγοντα.

Η συνολική διακύμανση αναλύεται σε δύο προσθετικές συνιστώσες. Σε αυτήν που μπορεί να αποδοθεί σε διαφορές "μεταξύ" των επιδράσεων (between treatments) και σε εκείνη που αποδίδεται σε διάφορες "μέσα" σε κάθε επίδραση ("within" treatments), δηλαδή τα τυχαία λάθη. Η μέθοδος στηρίζεται στο να βρει κανείς αν οι διαφορές που παρατηρούνται ανάμεσα στους μέσους των διαφόρων "επιδράσεων" οφείλονται σε τυχαίους λόγους ή σε συστηματική διαφορά ανάμεσα στις διαφορετικές επιδράσεις. Έτσι, αξιολογείται η σημαντικότητα (significance) των κύριων παραγόντων και των αλληλεπιδράσεων τους, συγκρίνοντας το μέσο τετράγωνο με μία εκτίμηση των πειραματικών σφαλμάτων σε συγκεκριμένα επίπεδα εμπιστοσύνης (confidence levels). Τα σχεδιαγράμματα που προκύπτουν, αναπαριστούν τις κύριες επιδράσεις (main effects plots) και επιτρέπουν τον προσδιορισμό του επιπέδου του κάθε παράγοντα που παρέχει την ελάχιστη τιμή απόκρισης.

Πίνακας 13. Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA)

Αιτία Διασποράς	Αθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας DF	Μέσα Τετραγωνικά Λάθη MS	F (κάτω από την H_0)
Μεταξύ Επιδράσεων (between treatments)	SSTr	k - 1	$S_0^2 = \frac{SSTr}{k - 1}$	$F = \frac{S_0^2}{S_p^2}$
Μέσα στις Επιδράσεις (λάθος) (within treatments)	SSE	N - k	$S_p^2 = \frac{SSE}{N - k}$	
Σύνολο	SST	N - 1		

Βασικές έννοιες που χρειάζονται για την κατανόηση των αποτελεσμάτων είναι οι ακόλουθες:

- F-value: Μια μεγάλη τιμή F (F-value) σημαίνει ότι η επίδραση αυτού του παράγοντα είναι μεγάλη σε σύγκριση με τη διακύμανση του σφάλματος. Επίσης, όσο μεγαλύτερη η τιμή, τόσο πιο σημαντικός είναι αυτός ο παράγοντας να επηρεάζει την απόκριση της διαδικασίας. Έτσι, οι τιμές F μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ταξινόμηση των παραγόντων. Μια τιμή F μικρότερη από τη μονάδα σημαίνει ότι η επίδραση του παράγοντα είναι μικρότερη από το σφάλμα του μοντέλου. Μια τιμή F μεγαλύτερη από δύο σημαίνει ότι ο παράγοντας δεν είναι αρκετά μικρός, ενώ μεγαλύτερη από τέσσερα σημαίνει ότι η επίδραση του παράγοντα είναι αρκετά μεγάλη.

- P-value: Η τιμή P (P-value) είναι μια πιθανότητα που μετράει την ένδειξη κατά της μηδενικής υπόθεσης (null hypothesis), δηλαδή της υπόθεσης ότι δεν υπάρχει σχέση μεταξύ του όρου και της απόκρισης. Όσο πιο χαμηλή η τιμή P, τόσο πιο ισχυρή είναι η ένδειξη κατά της μηδενικής υπόθεσης.

Για να προσδιοριστεί εάν η σχέση μεταξύ της απόκρισης και κάθε όρου στο μοντέλο είναι στατιστικά σημαντική, συγκρίνεται η τιμή P του όρου με το επίπεδο σημαντικότητας. Συνήθως επιλέγεται ένα επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$, το οποίο υποδεικνύει κίνδυνο 5% για να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι υπάρχει σχέση, ενώ στη πραγματικότητα δεν υφίσταται. Έτσι, εάν η τιμή p είναι μικρότερη ή ίση με το επίπεδο σημαντικότητας ($P\text{-value} \leq 0.05$), μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι υπάρχει στατιστικά σημαντική σχέση μεταξύ της μεταβλητής απόκρισης και του όρου. Αντίθετα, αν η τιμή p είναι μεγαλύτερη από το επίπεδο σημαντικότητας ($P\text{-value} > 0.05$), δεν μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι υπάρχει στατιστικά σημαντική σχέση μεταξύ της μεταβλητής απόκρισης και του όρου. Μπορεί να γίνει επανατοποθέτηση του μοντέλου χωρίς τον όρο.

Για την ανάλυση διακύμανσης χρησιμοποιήθηκε το Minitab, το οποίο αποτελεί ένα λογισμικό στατιστικής ανάλυσης. Σχεδιάστηκε Full Factorial Design, δηλαδή ανάλυση που μελετά όλους τους δυνατούς παράγοντες σε ένα τεστ, μεταβάλλοντας τους ταυτόχρονα. Έχουμε 3 διαφορετικούς παράγοντες (πλάτος, ύψος στρώματος και VFR). Κάθε παράγοντας μελετήθηκε σε 3 διαφορετικά επίπεδα (όλα αριθμητικά) και κάθε εκτέλεση διεξήχθη 4 φορές (4 επαναλήψεις). Ο συνδυασμός 3 παραγόντων σε 3 διαφορετικά επίπεδα οδηγεί στη δημιουργία 27 σειρών. Αφού κάθε εκτέλεση διεξάγεται 4 φορές, ο συνολικός αριθμός είναι $27 * 4 = 108$ εκτελέσεις.

Συνοπτικά

Πίνακας 14. Σύνοψη των δεδομένων του Full Factorial Design

Παράγοντες:	3	Επαναλήψεις:	4
Σειρές:	27	Συνολικός αριθμός εκτελέσεων:	108

Παράγοντας	Επίπεδα	Τιμές
Πλάτος - Width (mm)	3	0.24; 0.48; 0.72
Ύψος στρώματος - Layer Height (mm)	3	0.08; 0.20; 0.32
Ογκομετρική παροχή - VFR (mm ³ /s)	3	1; 2; 4

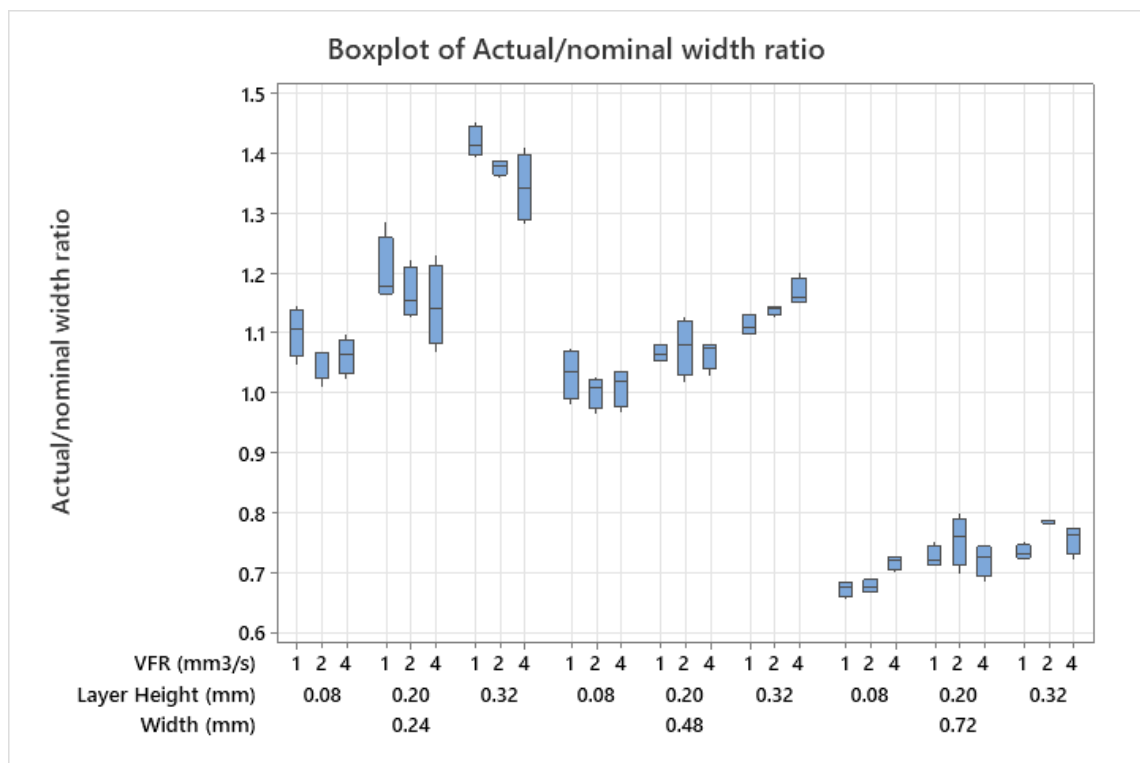
Οι μεταβλητές απόκρισης που επιλέγονται για την ανάλυση είναι:

- 1) Width avg/nominal: Μέσος όρος πλάτους ίνας/ ονομαστικό πλάτος
- 2) Neck avg/width avg: Μέσος όρος πλάτους λαιμού/ μέσος όρος πλάτους ίνας
- 3) Sdwidth (mm): Τυπική απόκλιση του πλάτους ίνας

Αυτές μελετώνται σε σχέση με τους τρεις παράγοντες (W, LH, VFR), αλλά και σε σχέση με τους πιθανούς συνδυασμούς παραγόντων (W-LH, W-VFR, LH-VFR):

- Μεταβλητή απόκρισης 1: Actual/nominal width ratio vs Width (mm); Layer Height (mm); VFR (mm³/s)

Αρχικά, προκύπτει το διάγραμμα που αναπαριστά συνοπτικά την αναλογία πραγματικού/ονομαστικού πλάτους για κάθε συνδυασμό πλάτους – ύψους – ογκομετρικής παροχής.



Σχήμα 45. Διάγραμμα αναλογίας πραγματικού – ονομαστικού πλάτους ίνας

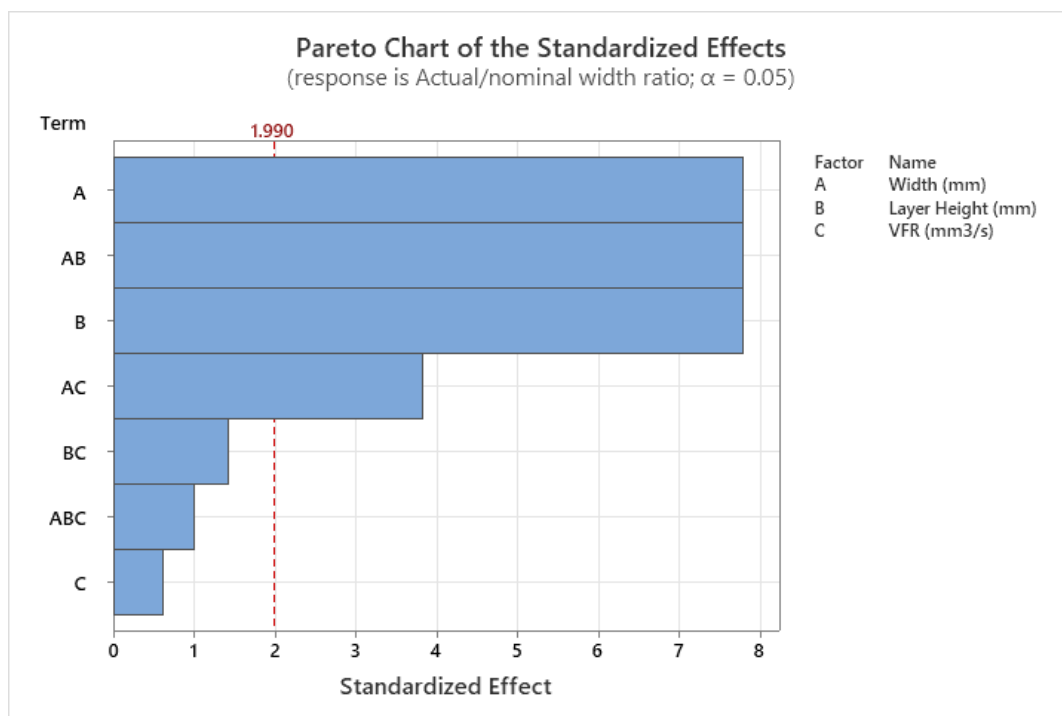
Καλύτερα αποτελέσματα δίνουν τα δείγματα που το εύρος τιμών του είναι πιο κοντά στο 1, δηλαδή που η αναλογία πραγματικού/ονομαστικού πλάτους είναι κοντά στο 1.

Γίνεται και ανάλυση διασποράς, τα αποτελέσματα της οποίας φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 15. Ανάλυση διακύμανσης για την 1^η μεταβλητή απόκρισης

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	26	5.17253	0.19894	190.66	0.000
Linear	6	4.92584	0.82097	786.78	0.000
Width (mm)	2	4.41665	2.20833	2116.36	0.000
Layer Height (mm)	2	0.50788	0.25394	243.37	0.000
VFR (mm ³ /s)	2	0.00131	0.00065	0.63	0.537
2-Way Interactions	12	0.23681	0.01973	18.91	0.000
Width (mm)*Layer Height (mm)	4	0.20441	0.05110	48.98	0.000
Width (mm)*VFR (mm ³ /s)	4	0.02535	0.00634	6.07	0.000
Layer Height (mm)*VFR (mm ³ /s)	4	0.00705	0.00176	1.69	0.161
3-Way Interactions	8	0.00987	0.00123	1.18	0.320
Width (mm)*Layer Height (mm)*VFR (mm ³ /s)	8	0.00987	0.00123	1.18	0.320
Error	81	0.08452	0.00104		
Total	107	5.25705			

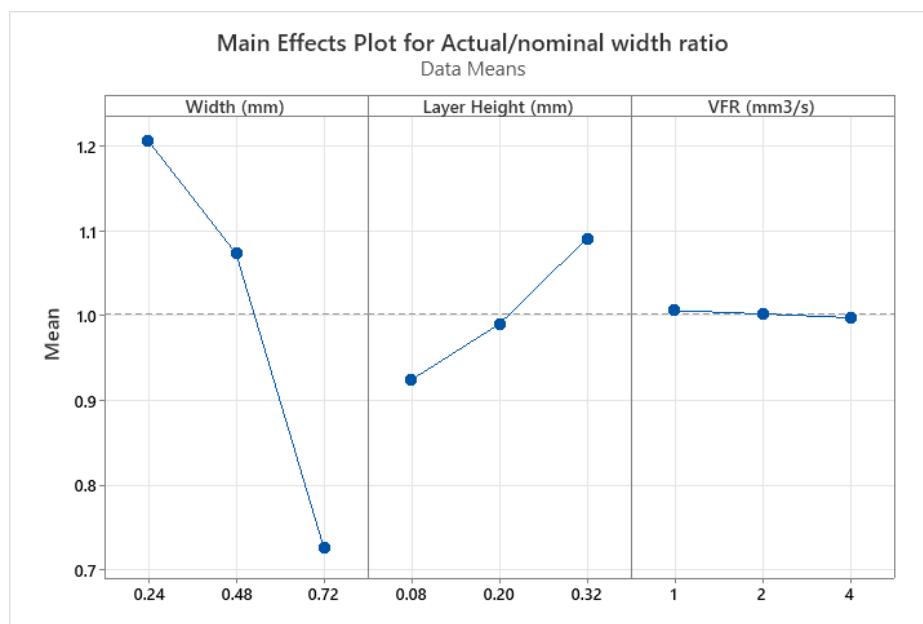
Από τη τιμή του παράγοντα F, φαίνεται ότι στον λόγο πραγματικής - ονομαστικής τιμής του κλάσματος μεγαλύτερη επίδραση έχει το πλάτος, αμέσως μετά το ύψος του στρώματος και σε μικρότερο βαθμό ο συνδυασμός πλάτους - ύψους και ο συνδυασμός πλάτους - παροχής. Αυτά οπτικοποιούνται καλύτερα στα παρακάτω διαγράμματα:



Σχήμα 46. Διάγραμμα Pareto για την 1^η μεταβλητή απόκρισης

Στο διάγραμμα Pareto, όποιος όρος πάει σε τιμή μεγαλύτερη του 1.99 έχει υπολογίσιμη επίδραση στο αποτέλεσμα. Φαίνεται ότι από μόνη της η ογκομετρική παροχή, καθώς και ο συνδυασμός ύψους- παροχής ή των 3 παραγόντων μαζί δεν έχουν επίδραση στο αποτέλεσμα (για το επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0.05$ που έχουμε δώσει).

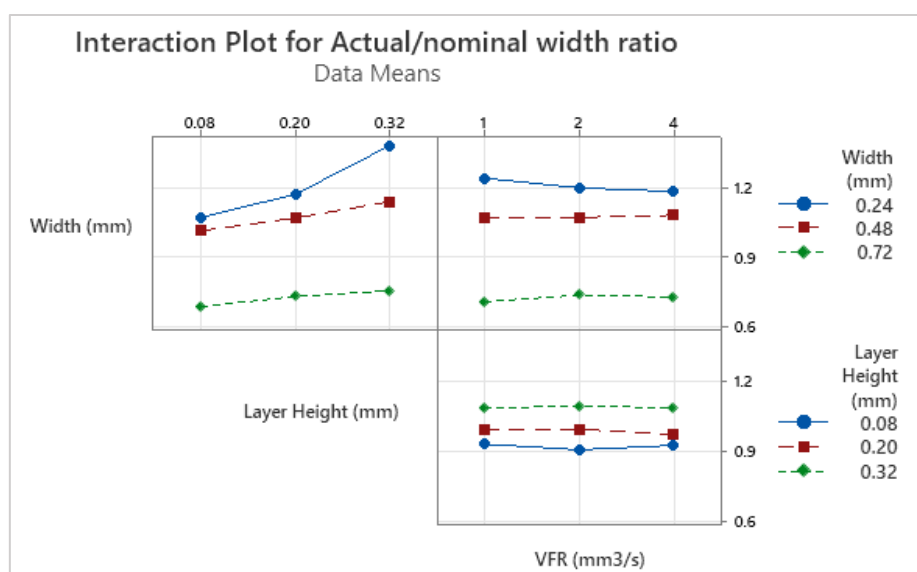
Αντίστοιχα σημαντικά είναι τα Main Effects Plot και Interaction Plot. Το πρώτο οπτικοποιεί την επίδραση κάθε παράγοντα στη συγκεκριμένη μεταβλητή απόκρισης. Όσο μεγαλύτερη η κλίση που έχει η γραμμή, τόσο μεγαλύτερη η επίδραση.



Σχήμα 47. Διάγραμμα επίδρασης κύριων παραγόντων για την 1^η μεταβλητή απόκρισης

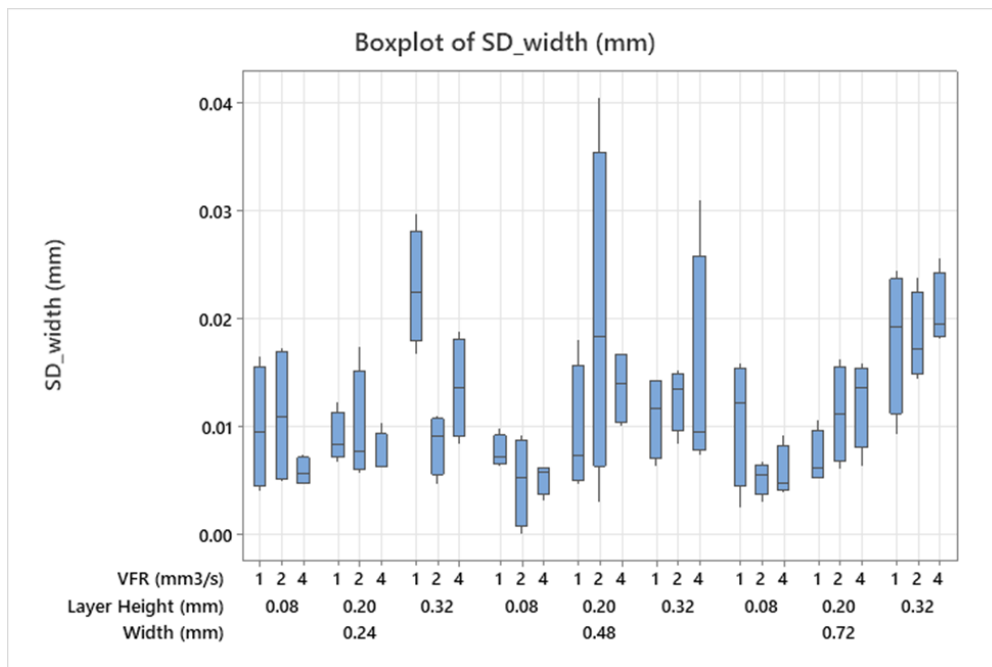
Είναι εμφανές ότι η επίδραση του πλάτους είναι πιο σημαντική σε σχέση με τις άλλες παραμέτρους.

Στο δεύτερο παρουσιάζεται η συνδυαστική επίδραση των παραγόντων. Όταν οι γραμμές τείνουν να τέμνουν έχουν επίδραση στο αποτέλεσμα. Αν είναι παράλληλες, η συνδυαστική επίδραση είναι μηδαμινή. Φαίνεται ότι κυρίως ο συνδυασμός Width- Height και, δευτερευόντως, ο συνδυασμός Width – VFR, έχουν επίδραση.



Σχήμα 48. Διάγραμμα επίδρασης συνδυαστικών παραγόντων για την 1^η μεταβλητή απόκρισης

- Μεταβλητή απόκρισης 2: SD_width (mm) vs Width (mm); Layer Height (mm); VFR (mm³/s)



Σχήμα 49. Διάγραμμα τυπικής απόκλισης του πλάτους

Καλύτερα αποτελέσματα δίνουν τα δείγματα που το εύρος τιμών του είναι πιο κοντά στο 0, δηλαδή που η τυπική απόκλιση του πλάτους είναι κοντά στο 0.

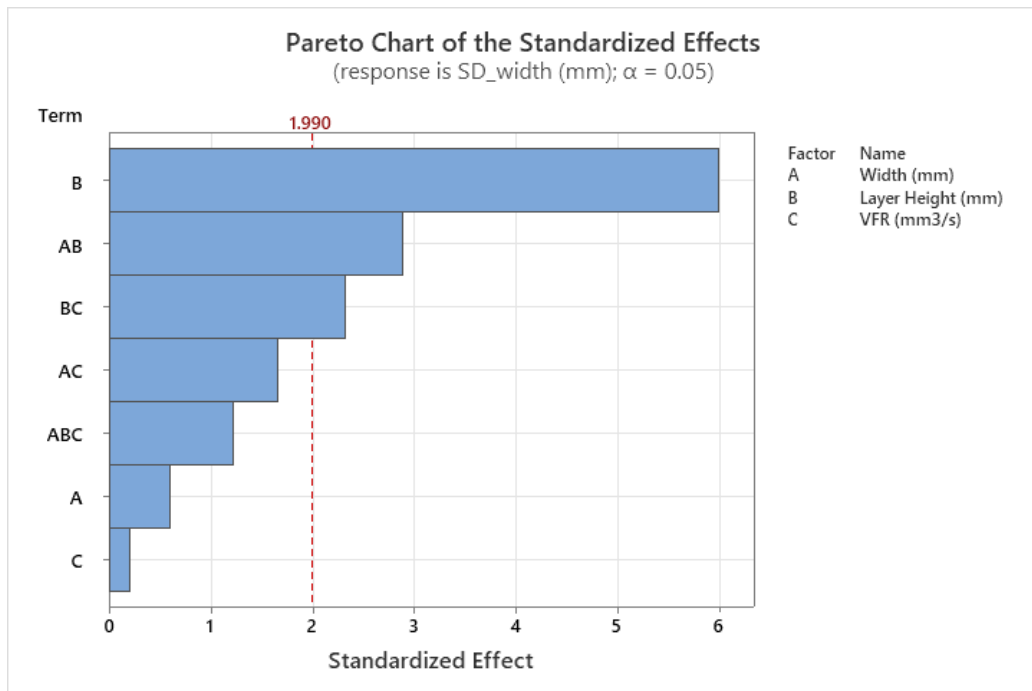
Η ανάλυση διασποράς έχει ως εξής:

Πίνακας 16. Ανάλυση διακύμανσης για την 2^η μεταβλητή απόκριση

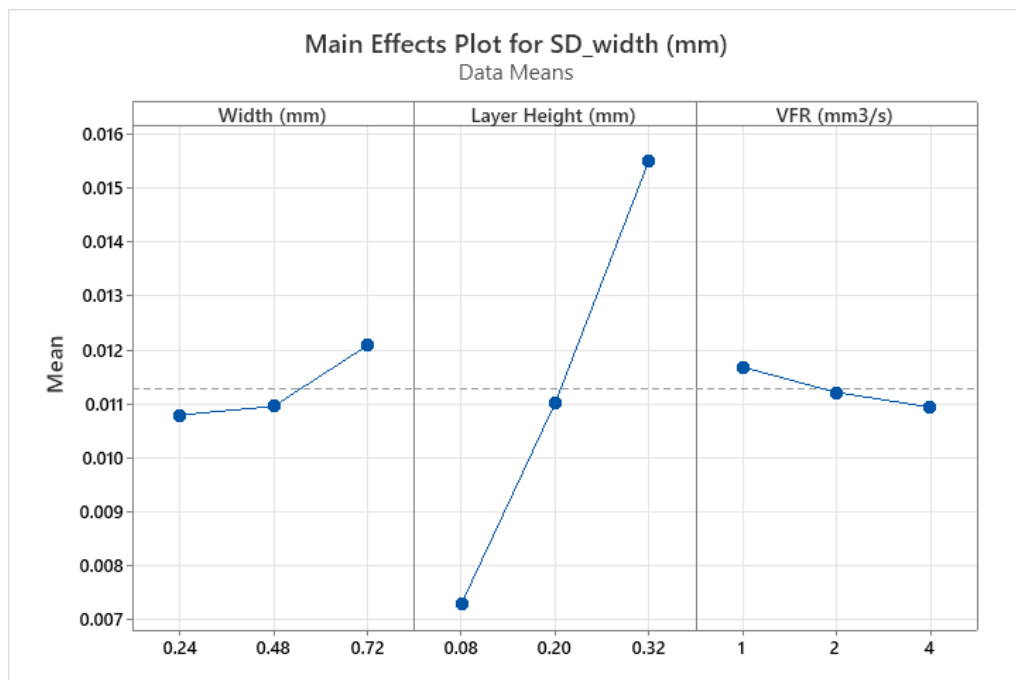
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	26	0.002644	0.000102	3.45	0.000
Linear	6	0.001261	0.000210	7.14	0.000
Width (mm)	2	0.000036	0.000018	0.61	0.548
Layer Height (mm)	2	0.001216	0.000608	20.65	0.000
VFR (mm ³ /s)	2	0.000010	0.000005	0.17	0.842
2-Way Interactions	12	0.001062	0.000088	3.01	0.002
Width (mm)*Layer Height (mm)	4	0.000473	0.000118	4.02	0.005
Width (mm)*VFR (mm ³ /s)	4	0.000236	0.000059	2.01	0.101
Layer Height (mm)*VFR (mm ³ /s)	4	0.000353	0.000088	3.00	0.023
3-Way Interactions	8	0.000321	0.000040	1.36	0.226
Width (mm)*Layer Height (mm)*VFR (mm ³ /s)	8	0.000321	0.000040	1.36	0.226
Error	81	0.002384	0.000029		
Total	107	0.005028			

Προκύπτει ότι στην απόκλιση δεν έχει επίδραση το πλάτος ή η ογκομετρική παροχή. Μεγαλύτερη επίδραση έχει το ύψος της ίνας και σε μικρότερο βαθμό ο συνδυασμός πλάτους – ύψους και ο συνδυασμός ύψους – παροχής.

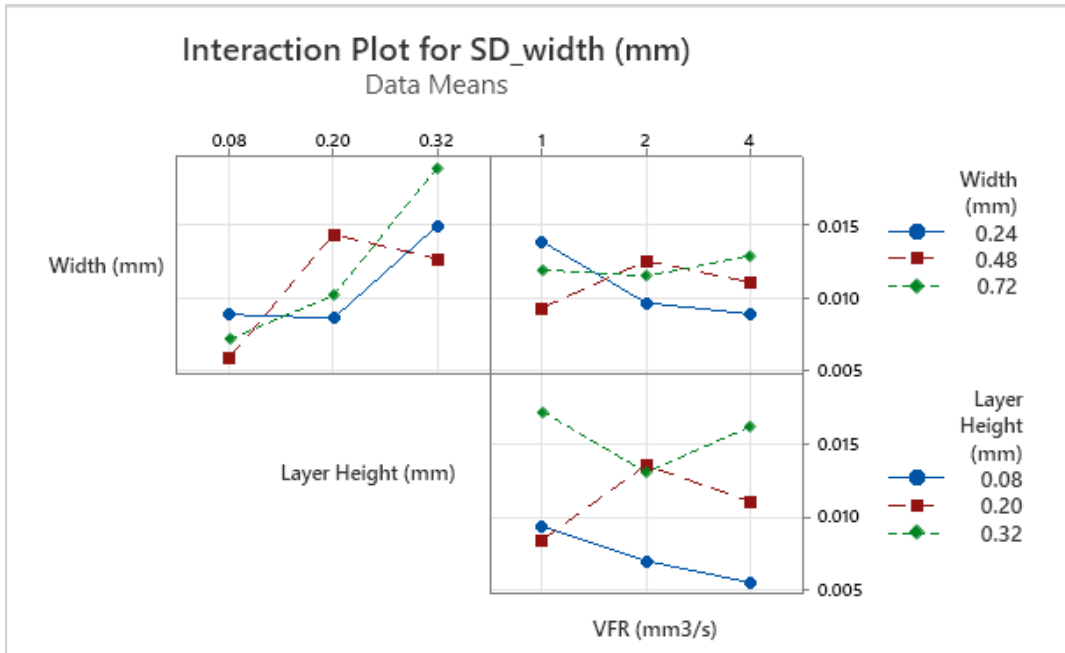
Αυτό είναι εμφανές και στα ακόλουθα διαγράμματα:



Σχήμα 50. Διάγραμμα Pareto για την 2^η μεταβλητή απόκρισης



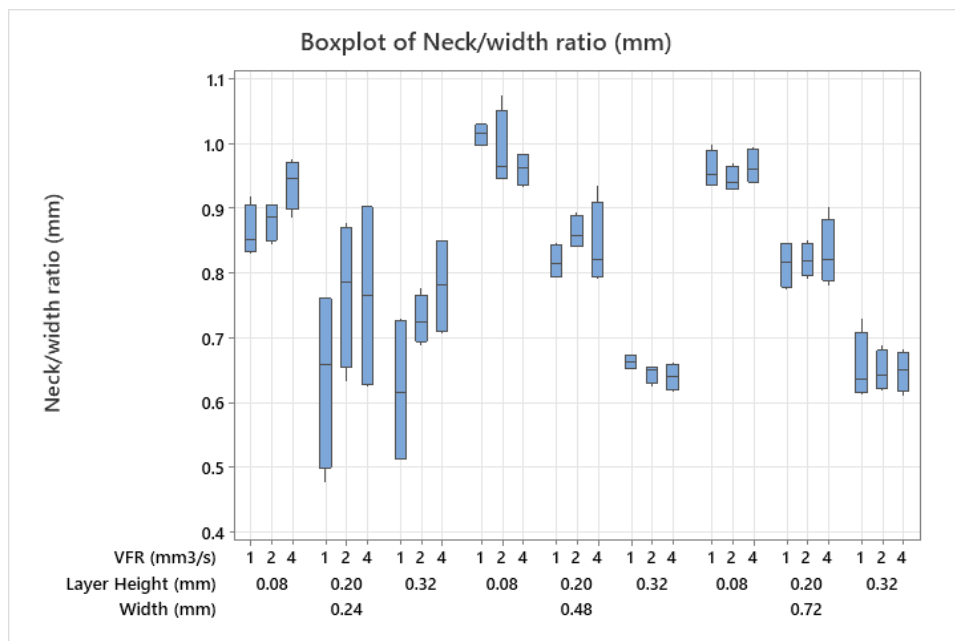
Σχήμα 51. Διάγραμμα επίδρασης κύριων παραγόντων για την 2^η μεταβλητή απόκρισης



Σχήμα 52. Διάγραμμα επίδρασης συνδυαστικών παραγόντων για την 2^η μεταβλητή απόκρισης

Φαίνεται ότι έχουν interaction όλες οι παράμετροι μεταξύ τους, ωστόσο μόνο οι συνδυασμοί Width-Height και Height-VFR έχουν στατιστικά σημαντική επίδραση, αφού ο συνδυασμός Width-VFR έχει P-value>0.005

- Μεταβλητή απόκρισης 3: Neck/width ratio (mm) vs Width (mm); Layer Height (mm); VFR (mm³/s)



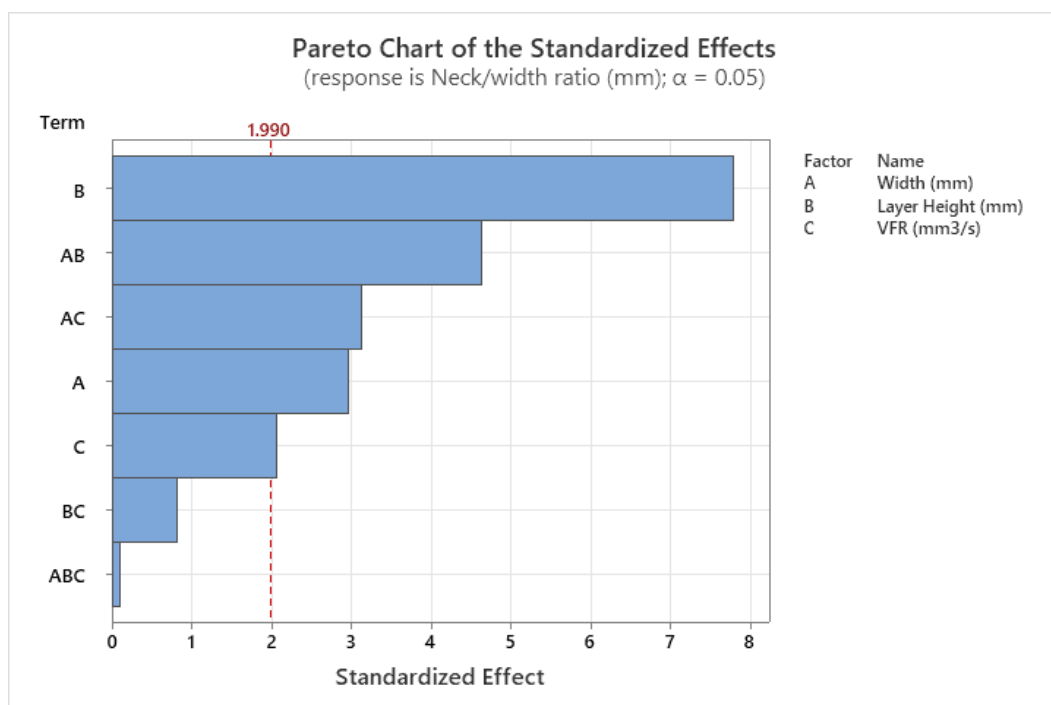
Σχήμα 53. Διάγραμμα αναλογίας λαιμού - πλάτους ίνας

Η ανάλυση διασποράς έχει ως εξής:

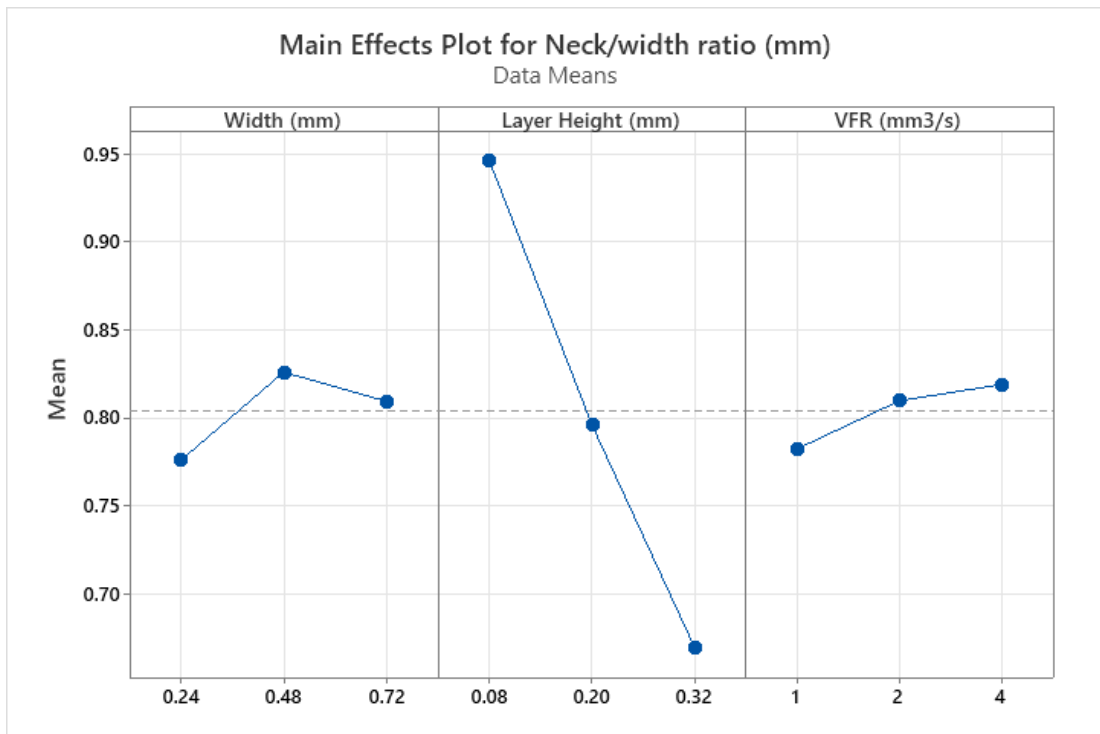
Πίνακας 17. Ανάλυση διακύμανσης για την 3^η μεταβλητή απόκρισης

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	26	1.68228	0.064703	16.46	0.000
Linear	6	1.45490	0.242484	61.69	0.000
Width (mm)	2	0.04651	0.023257	5.92	0.004
Layer Height (mm)	2	1.38254	0.691268	175.87	0.000
VFR (mm3/s)	2	0.02585	0.012926	3.29	0.042
2-Way Interactions	12	0.21531	0.017942	4.56	0.000
Width (mm)*Layer Height (mm)	4	0.12887	0.032217	8.20	0.000
Width (mm)*VFR (mm3/s)	4	0.07080	0.017700	4.50	0.002
Layer Height (mm)*VFR (mm3/s)	4	0.01564	0.003910	0.99	0.415
3-Way Interactions	8	0.01207	0.001508	0.38	0.926
Width (mm)*Layer Height (mm)*VFR (mm3/s)	8	0.01207	0.001508	0.38	0.926
Error	81	0.31837	0.003931		
Total	107	2.00065			

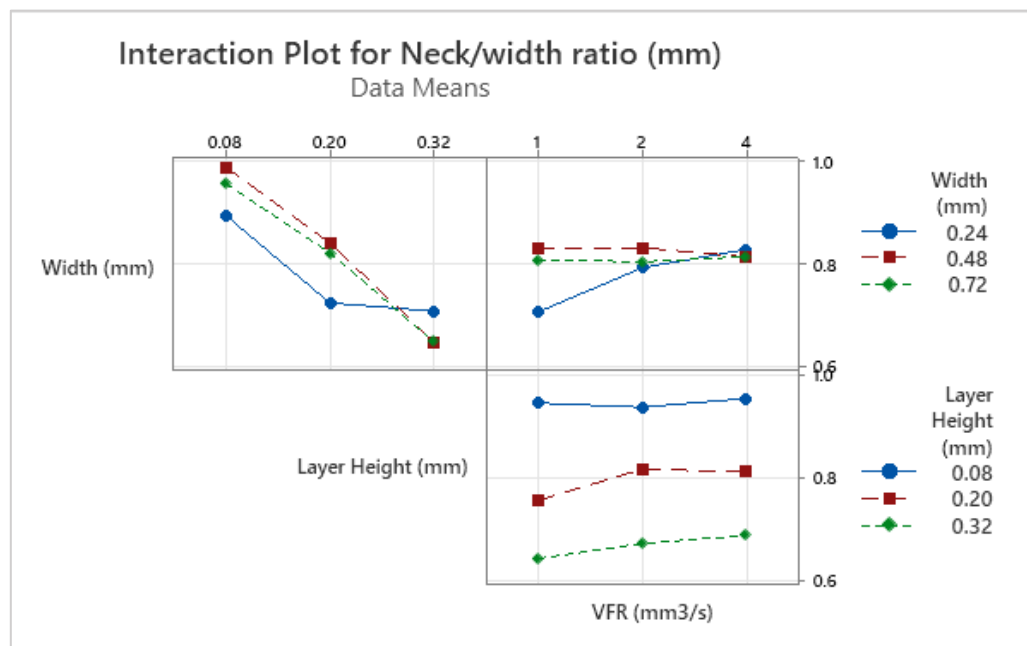
Προκύπτει ότι στο μήκος λαιμού έχει επίδραση αρχικά το ύψος και δευτερευόντως το πλάτος, η ογκομετρική παροχή και οι συνδυασμοί Width-Height και Width-VFR.



Σχήμα 54. Διάγραμμα Pareto για την 3^η μεταβλητή απόκρισης

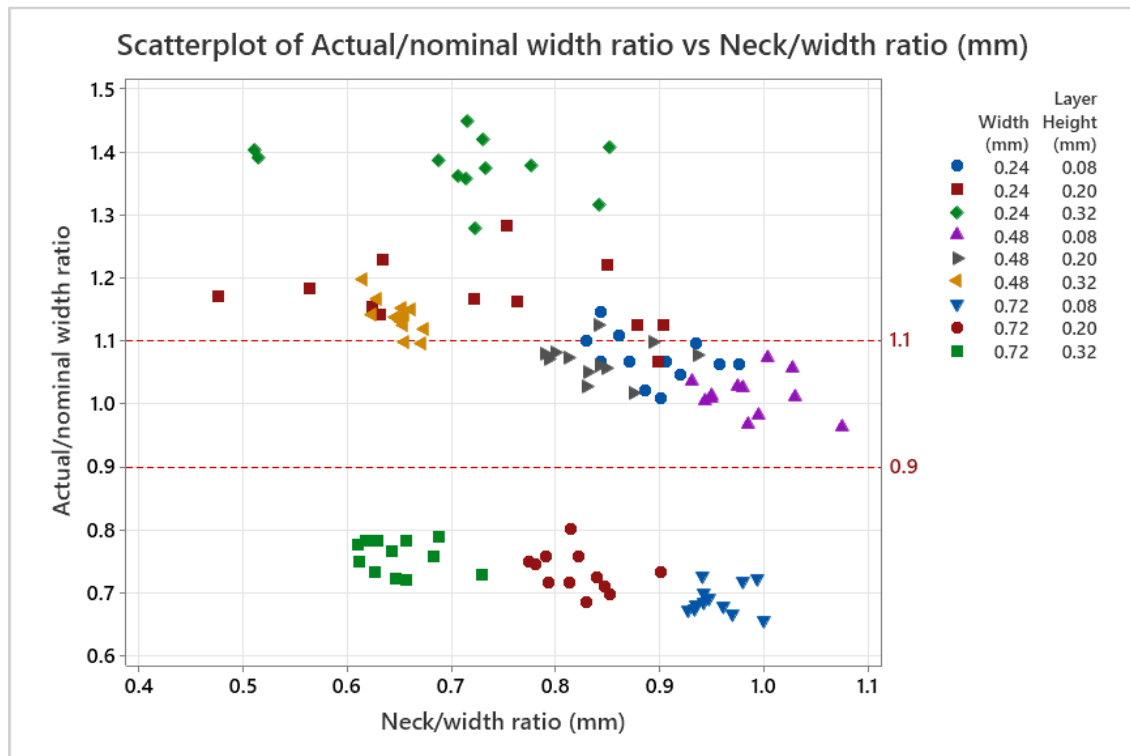


Σχήμα 55. Διάγραμμα επίδρασης κύριων παραγόντων για την 3^η μεταβλητή απόκρισης



Σχήμα 56. Διάγραμμα επίδρασης συνδυαστικών παραγόντων για την 3^η μεταβλητή απόκρισης

Εφόσον το VFR έχει $P\text{-value} > 0.05$ στις μεταβλητές απόκλισης 1 και 2 και έχει οριακή τιμή στην 3, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι δεν έχει στατιστικά σημαντική επίδραση. Συνδυάζοντας λοιπόν τους άλλους δύο παράγοντες (width, height), σχεδιάζεται το ακόλουθο διάγραμμα που παρουσιάζει το πώς απλώνονται οι τιμές στις μεταβλητές απόκλισης 1 και 3.



Σχήμα 57. Συνδυαστικό διάγραμμα των παραγόντων

Τα σετ παραμέτρων που είναι αποδεκτά είναι αυτά που βρίσκονται ανάμεσα στις κόκκινες γραμμές. Πρόσθετα βοηθητικά διαγράμματα βρίσκονται στο Παράρτημα.

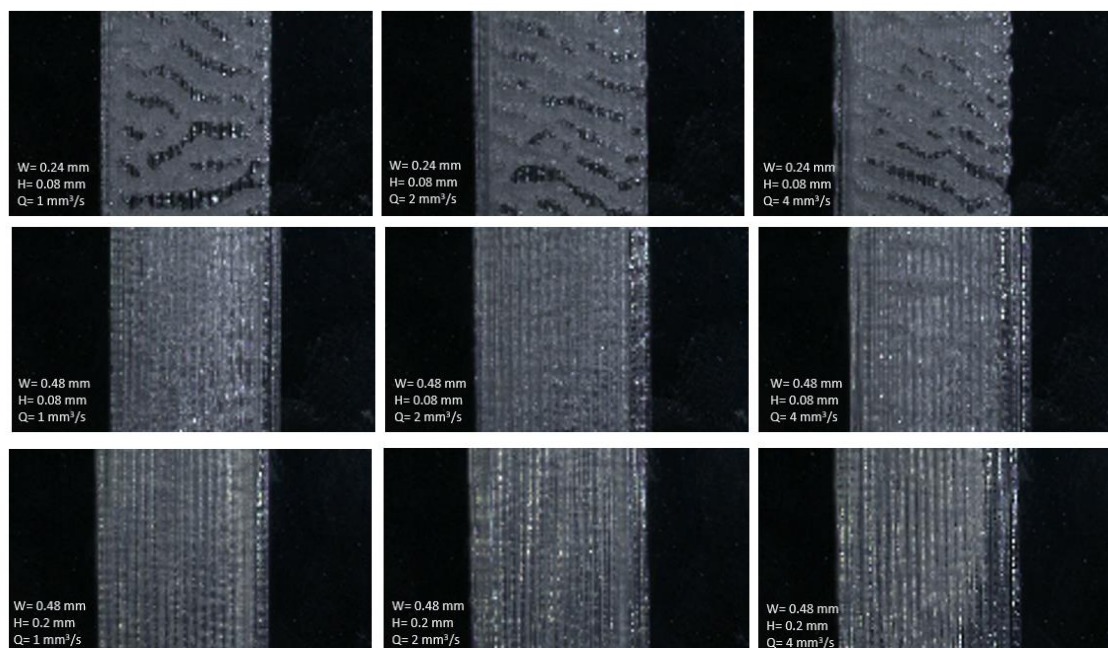
Τα τελικά σετ παραμέτρων που προκύπτουν από την ανάλυση σε επίπεδο 1D είναι:

Πίνακας 18. Τα σετ παραμέτρων από 1D

#	Width (mm)	Layer Height (mm)
1	0.24	0.08
2	0.48	0.08
3	0.48	0.20

με βέλτιστα αποτελέσματα να έχει ο συνδυασμός 2.

Ακολουθεί ποιοτική αξιολόγηση μέσω των εικόνων από στερεοσκόπιο των εκτυπωμένων 2D δοκιμίων (Σχήμα 49). Μελετώνται τα σετ παραμέτρων που έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα στην ανάλυση σε επίπεδο 1D.



Σχήμα 58. Οι εικόνες από στερεοσκόπιο για τα 2D δοκίμια των επιλεγμένων σετ παραμέτρων

Είναι εμφανές ότι το σετ παραμέτρων 1, με πλάτος ίνας 0.24 mm και ύψος ίνας 0.08 mm, ενώ δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα στο 1D, σε επίπεδο 2D έχει ανομοιόμορφη εκτύπωση.

Συνεπώς, τα τελικά σετ παραμέτρων είναι:

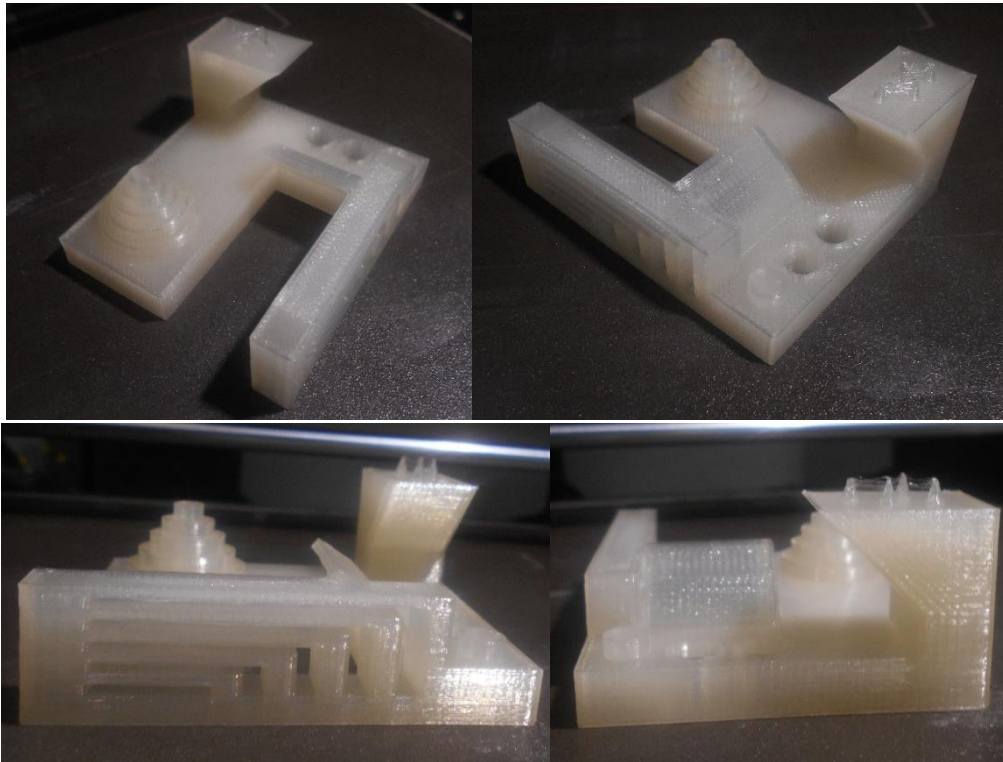
Πίνακας 19. Τα τελικά σετ παραμέτρων

Width (mm)	Layer Height (mm)	VFR (mm ³ /s)
0.48	0.08	2
0.48	0.20	4

Από τα σετ παραμέτρων που προκύπτουν επιλέχθηκε η τιμή της ογκομετρικής παροχής βάσει το Σχήμα 41 (actual/nominal width ratio), όπου επιλέγεται το σετ με τιμή πιο κοντά στο 1.

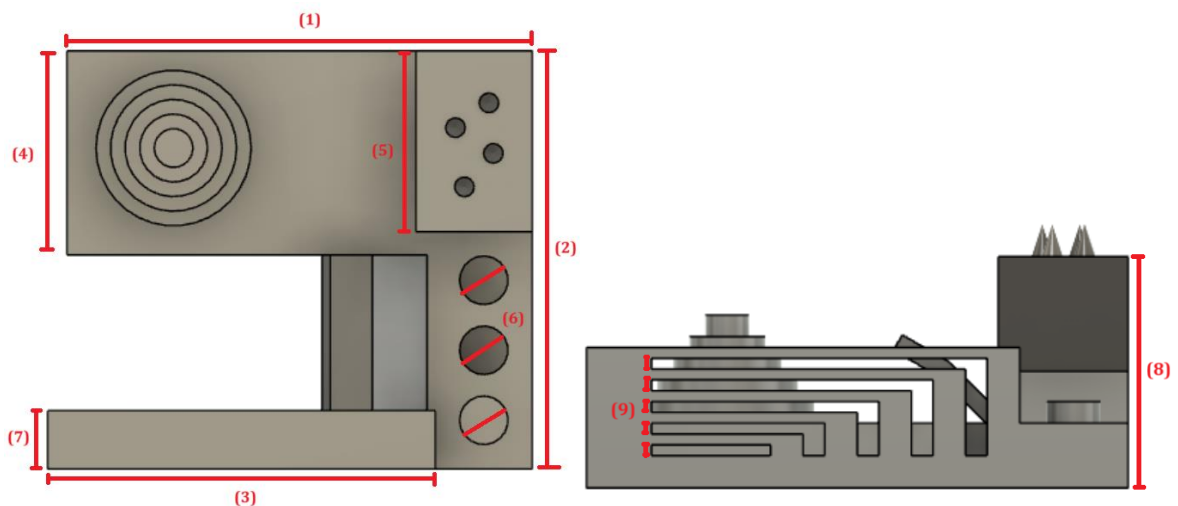
Από τα τελικά σετ, επιλέχθηκε να εκτυπωθεί ο συνδυασμός πλάτους 0.48 mm / ύψους 0.2 mm / παροχής 4 mm³/s σε 3D δοκίμιο που σχεδιάστηκε με την συμβατική διαδικασία (CAD). Η εκτύπωση έγινε στις ίδιες συνθήκες με τα δοκίμια 1D και 2D και το μέγεθος που επιλέχθηκε είναι 65 x 56 mm.

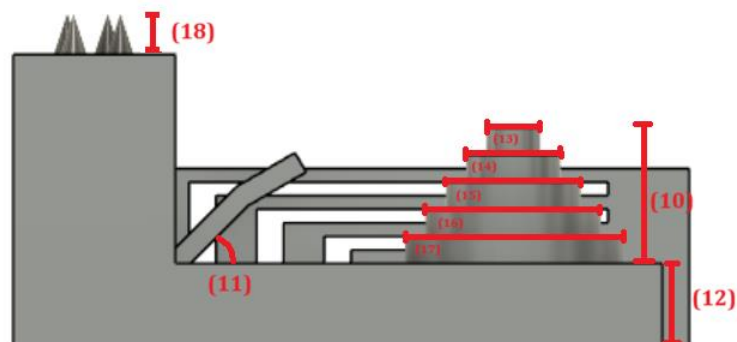
Η ογκομετρική παροχή για τις συγκεκριμένες συνθήκες αντιστοιχεί σε ταχύτητα εκτύπωσης 2745 mm/min (Πίνακας 8) ή 46 mm/s. Ο χρόνος εκτύπωσης είναι 2 ώρες και 41 λεπτά.



Εικόνα 56. Το εκτυπωμένο 3D δοκίμιο

Έγινε λήψη κάποιων μετρήσεων με παχύμετρο για σύγκριση των πραγματικών αποστάσεων με τις ονομαστικές.





Σχήμα 5Z. Οι μετρούμενες αποστάσεις

Αυτές συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

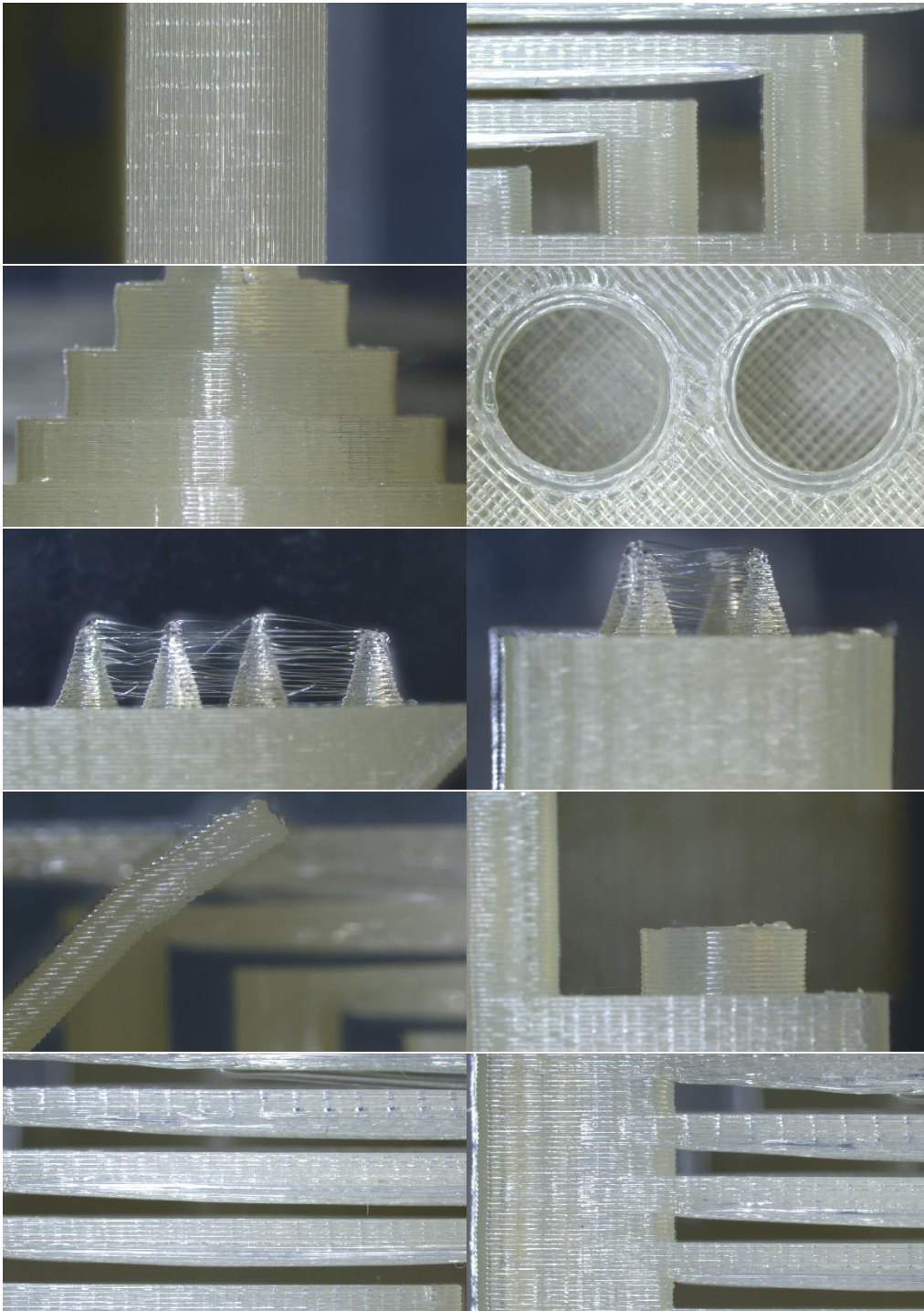
Πίνακας 20. Σύγκριση ονομαστικών – πραγματικών μεγεθών

Μέτρηση	Ονομαστικό μέγεθος	Πραγματικό μέγεθος
(1)	65.0 mm	62.2 mm
(2)	55.9 mm	55.7 mm
(3)	52.0 mm	51.9 mm
(4)	27.3 mm	27.2 mm
(5)	24.2 mm	23.8 mm
(6)	6.5 mm	6.2 mm
	6.5 mm	6.3 mm
	6.5 mm	6.4 mm
(7)	7.8 mm	7.8 mm
(8)	27.8 mm	27.8 mm
(9)	1.3 mm	0.6 mm - 1.0 mm
(10)	13 mm	12.8 mm
(11)	45°	45°
(12)	7.8 mm	7.8 mm
(13)	5.2 mm	5.2 mm
(14)	9.1 mm	9.1 mm
(15)	13.0 mm	12.8 mm
(16)	16.9 mm	16.7 mm
(17)	20.8 mm	20.6 mm
(18)	3.9 mm	3.7 mm

* Αυτή η τιμή λαμβάνεται για να μελετηθεί η ελεύθερη εκτύπωση μεταξύ 2 προεξοχών (bridging) και πόσο επιτυχές ήταν. Σε όλη την έκταση τους, τα κενά ανάμεσα στις γέφυρες πρέπει να έχουν ίδιο μέγεθος ίσο με 1.3 mm. Ωστόσο, στην πράξη υπάρχει συνεχής μεταβλητότητα και οι πειραματικές τιμές κυμαίνονται σε αυτό το εύρος.

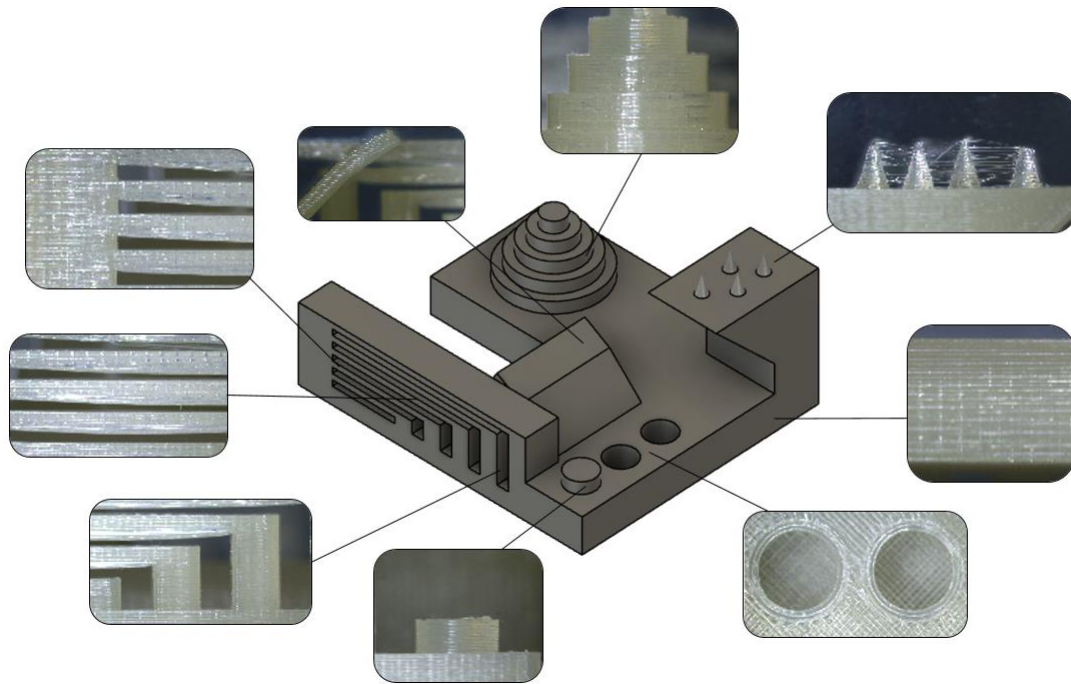
Παρατηρείται ικανοποιητική ακρίβεια στα περισσότερα μεγέθη, με τιμές κοντά στις ονομαστικές διαστάσεις. Κυρίως στην περίπτωση της διάστασης (1) παρατηρήθηκε σημαντική απόκλιση που αποδίδεται στο λογισμικό slicer, για την οποία υπάρχει δυνατότητα εφαρμογής διορθωτικού παράγοντα για την % προσαρμογή του μήκους κατά τον X άξονα.

Το δοκίμιο μελετήθηκε και ποιοτικά χρησιμοποιώντας στερεοσκόπιο. Οι εικόνες που λήφθηκαν από το στερεοσκόπιο είναι οι ακόλουθες:



Σχήμα 58. Εικόνες από τις λεπτομέρειες του δοκίμιου W: 0.48, LH: 0.2

Οι εικόνες αυτές αντιστοιχούν στα ακόλουθα σημεία του δοκιμίου:



Σχήμα 59. Σχηματική αναπαράσταση των λεπτομερειών της εκτύπωσης

Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τις 1D και 2D δομές είναι πολύ ικανοποιητικά, η αλληλοεπικάλυψη των ινών είναι στα επιθυμητά επίπεδα και δεν παρατηρούνται φαινόμενα υπερ/υπο εξώθησης στις εξωτερικές επιφάνειες του δοκιμίου. Όσον αφορά τα επιμέρους γεωμετρικά χαρακτηριστικά με πιο σύνθετη γεωμετρία, είναι αναμενόμενο να χρειάζεται τοπικά προσαρμογή των παραμέτρων (όπως συνηθίζεται στο FFF) συγκεκριμένα για το κάθε γεωμετρικό χαρακτηριστικό, συνεπώς μπορεί να γίνει περαιτέρω παραμετρική μελέτη και βελτιστοποίηση, τα οποία όμως είναι πέρα από το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

5. Συμπεράσματα

Η τεχνολογία 3D εκτύπωσης FFF είναι μια ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία προσθετικής κατασκευής. Το επίκεντρο της παρούσας έρευνας ήταν η μελέτη της επίδρασης βασικών παραμέτρων εκτύπωσης και συγκεκριμένα του πλάτους της ίνας, του ύψους στρώματος και του ογκομετρικού ρυθμού ροής, στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των τελικών εκτυπωμένων δοκιμίων. Μέσα από μια σειρά πειραμάτων και αναλύσεων προέκυψαν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την σχέση μεταξύ αυτών των παραμέτρων και της ποιότητας των εκτυπώσεων FFF, καθώς και δύο σετ βελτιστοποιημένων παραμέτρων που δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα για το δεδομένο υλικό και τις δεδομένες συνθήκες.

Επιπλέον, αυτή η έρευνα προτείνει μια μεθοδολογία παραμετρικής βελτιστοποίησης για τεχνολογίες 3D εκτύπωσης. Τα δοκίμια που σχεδιάστηκαν επιτρέπουν την ομαδοποίηση πολλαπλών σετ παραμέτρων σε μικρό αριθμό δοκιμίων, που απαιτούν μικρή ποσότητα υλικού και κατασκευάζονται σε σύντομο χρονικό διάστημα, παρέχοντας ένα γρήγορο και ευέλικτο σχήμα αξιολόγησης. Μελλοντικά, η μεθοδολογία αυτή μπορεί να επεκταθεί σε μεγάλο εύρος υλικών και να εμπλουτιστεί περαιτέρω με εργαλεία πειραματικού σχεδιασμού και βελτιστοποίησης. Έτσι, μπορεί να αποτελέσει πολύτιμο εργαλείο τόσο για μελλοντικούς ερευνητές όσο και για επαγγελματίες, καθιστώντας πιο εύκολη τη διαδικασία επιλογής παραμέτρων και επιταχύνοντας τον ρυθμό της καινοτομίας του FFF.

Από την τρέχουσα κατάσταση της έρευνας στο FFF, είναι προφανές ότι η τεχνολογία συνεχίζει να εξελίσσεται γρήγορα. Με τις αυξανόμενες απαιτήσεις για προσαρμοσμένα και υψηλής απόδοσης ανταλλακτικά σε διάφορους κλάδους, η σημασία της παραμετρικής βελτιστοποίησης δεν μπορεί να υπερεκτιμηθεί. Η επίτευξη των επιθυμητών γεωμετρικών χαρακτηριστικών, μηχανικών ιδιοτήτων και φινιρίσματος επιφανειών σε εκτυπωμένα αντικείμενα είναι κρίσιμης σημασίας για τις εφαρμογές τους στον πραγματικό κόσμο. Η εργασία αυτή υπογραμμίζει τον κεντρικό ρόλο της επιλογής παραμέτρων στην επίτευξη αυτών των στόχων καθώς και την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα σε αυτό το πεδίο. Το επόμενο επίπεδο της παρούσας μελέτης θα ήταν η μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας στην ποιότητα των εκτυπωμένων δοκιμίων.

6. Βιβλιογραφία

1. Shahrubudin, N.; Lee, T. C.; Ramlan, R. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. *Procedia Manuf.* **2019**, *35*, 1286–1296.
2. Hebda, M.; Mcllroy, C., Whiteside, B., Caton-Rose, F., Coates, P. A Method for Predicting Geometric Characteristics of Polymer Deposition during Fused-Filament-Fabrication. *Addit. Manuf.* **2019**, *27*, 99–108.
3. Shaqour, B.; Abuabiah, M.; Abdel-Fattah, S.; Juaidi, A.; Abdallah, R.; Abuzaina, W.; Qarout, M.; Verleije, B.; Cos, P. Gaining a Better Understanding of the Extrusion Process in Fused Filament Fabrication 3D Printing: A Review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2021**, *114* (5–6), 1279–1291.
4. Ι. Γιαννάτσης; Β. Δεδούτσης; Β. Κανελλίδης. Σύγχρονες Τεχνολογίες Κατασκευής Με τη Βοήθεια Η/Υ. *ΣΕΑΒ*, **2015**.
5. Rashid, A. A.; Κοç, M. Fused Filament Fabrication Process: A Review of Numerical Simulation Techniques. *Polymers (Basel)* **2021**, *13* (20), 3534.
6. Ι. Γιαννάτσης; Β. Δεδούτσης; Β. Κανελλίδης. Σύγχρονες Τεχνολογίες Κατασκευής Με τη Βοήθεια Η/Υ. *ΣΕΑΒ*, **2015**.
7. Dey, A., Roan Eagle, I. N., Yodo, N. A Review on Filament Materials for Fused Filament Fabrication. *J. Manuf. Mater. Process.* **2021**, *5* (3), 69.
8. Singh, S., Singh, G., Prakash, C., Ramakrishna, S. Current Status and Future Directions of Fused Filament Fabrication. *J. Manuf. Process.* **2020**, *55*, 288–306.
9. Hebda, M.; Mcllroy, C.; Whiteside, B.; Caton-Rose, F.; Coates, P. A Method for Predicting Geometric Characteristics of Polymer Deposition during Fused-Filament-Fabrication. *Addit. Manuf.* **2019**, *27*, 99–108.
10. Mollah, M. T.; Comminal, R.; Serdeczny, M. P.; Šeta, B.; Spangenberg, J. Computational Analysis of Yield Stress Buildup and Stability of Deposited Layers in Material Extrusion Additive Manufacturing. *Addit. Manuf.* **2023**, *71* (103605), 103605.
11. Gao, X.; Qi, S.; Kuang, X.; Su, Y.; Li, J.; Wang, D. Fused Filament Fabrication of Polymer Materials: A Review of Interlayer Bond. *Addit. Manuf.* **2021**, *37*(101658), 101658.

12. Vanaei, H. R.; Shirinbayan, M.; Deligant, M.; Khelladi, S.; Tcharkhtchi, A. In-Process Monitoring of Temperature Evolution during Fused Filament Fabrication: A Journey from Numerical to Experimental Approaches. *Thermo* **2021**, *1* (3), 332–360.
13. <https://www.statista.com/statistics/560304/worldwide-survey-3d-printing-top-technologies/>
14. Dua, R.; Rashad, Z.; Spears, J.; Dunn, G.; Maxwell, M. Applications of 3D-Printed PEEK via Fused Filament Fabrication: A Systematic Review. *Polymers (Basel)* **2021**, *13* (22), 4046.
15. Gao, X.; Qi, S.; Kuang, X.; Su, Y.; Li, J.; Wang, D. Fused Filament Fabrication of Polymer Materials: A Review of Interlayer Bond. *Addit. Manuf.* **2021**, *37* (101658), 101658.
16. Harris, M., Potgieter, J., Archer, R., Arif, K. M. Effect of Material and Process Specific Factors on the Strength of Printed Parts in Fused Filament Fabrication: A Review of Recent Developments. *Materials (Basel)* **2019**, *12* (10), 1664
17. <https://all3dp.com/2/what-is-fusion-360-simply-explained/>
18. Song, P. P.; Qi, Y. M.; Cai, D. C. Research and Application of Autodesk Fusion360 in Industrial Design. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2018**, *359*, 012037.
19. Gleadall, A. FullControl GCode Designer: Open-Source Software for Unconstrained Design in Additive Manufacturing. *Addit. Manuf.* **2021**, *46* (102109), 102109.
20. Baumann, F.; Bugdayci, H.; Grunert, J.; Keller, F.; Roller, D. Influence of Slicing Tools on Quality of 3D Printed Parts. *Comput. Aided Des. Appl.* **2016**, *13* (1), 14–31.
21. Šljivic, M.; Pavlovic, A.; Krašnik, M.; Ilić, J. Comparing the Accuracy of 3D Slicer Software in Printed Enduse Parts. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2019**, *659* (1), 012082.
22. <https://www.simplify3d.com/resources/print-quality-troubleshooting/>
23. Tao, Y., Kong, F., Li, Z.; Zhang, J., Zhao, X., Yin, Q., Xing, D., Li, P. A Review on Voids of 3D Printed Parts by Fused Filament Fabrication. *J. Mater. Res. Technol.* **2021**, *15*, 4860–4879.
24. Fu, Y.; Downey, A.; Yuan, L.; Pratt, A.; Balogun, Y. In Situ Monitoring for Fused Filament Fabrication Process: A Review. *Addit. Manuf.* **2021**, *38* (101749), 101749.

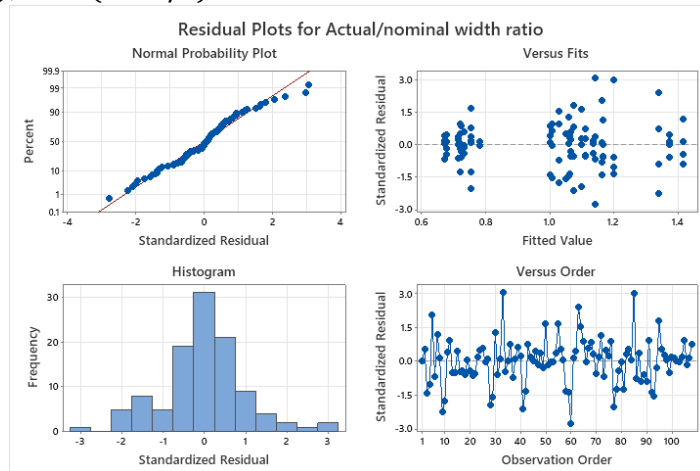
25. Holzmond, O.; Li, X. In Situ Real Time Defect Detection of 3D Printed Parts. *Addit. Manuf.* **2017**, *17*, 135–142.
26. Sola, A.; Chong, W. J.; Pejak Simunec, D.; Li, Y.; Trinchi, A.; Kyratzis, I. (louis); Wen, C. Open Challenges in Tensile Testing of Additively Manufactured Polymers: A Literature Survey and a Case Study in Fused Filament Fabrication. *Polym. Test.* **2023**, *117*(107859), 107859.
27. Pooria Gill; Tahereh Tohidi Moghadam; Bijan Ranjbar. Differential Scanning Calorimetry Techniques: Applications in Biology and Nanoscience. *J Biomol Tech.* **2010**, *21*(4), 167–193.
28. https://ebrary.net/158232/engineering/destructive_test_methods
29. Lu, Q. Y.; Wong, C. H. Additive Manufacturing Process Monitoring and Control by Non-Destructive Testing Techniques: Challenges and in-Process Monitoring. *Virtual Phys. Prototyp.* **2018**, *13* (2), 39–48.
30. Sathishkumar N, Udayakumar ASM, Vincent B et.al. Study and analysis of 3D printed FDM components by non-destructive testing techniques. *International Journal of Research and Review.* 2020; *7*(5): 217-222
31. Meloni, G. N.; Bertotti, M. 3D Printing Scanning Electron Microscopy Sample Holders: A Quick and Cost Effective Alternative for Custom Holder Fabrication. *PLoS One* **2017**, *12* (7), e0182000
32. https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/SEM.html
33. INTRODUCTION IN X-RAY MICROTOMOGRAPHY, SkyScan1272 User Manual V1.1 12/2013
34. Ho, S. T.; Hutmacher, D. W. A Comparison of Micro CT with Other Techniques Used in the Characterization of Scaffolds. *Biomaterials* **2006**, *27*(8), 1362–1376
35. Nulty, A. A Comparison of Trueness and Precision of 12 3D Printers Used in Dentistry. *BDJ Open* **2022**, *8*(1), 14.
36. https://help.prusa3d.com/article/layers-and-perimeters_1748
37. Zhai, W.; Ko, Y.; Zhu, W.; Wong, A.; Park, C. A Study of the Crystallization, Melting, and Foaming Behaviors of Polylactic Acid in Compressed CO₂. *Int. J. Mol. Sci.* **2009**, *10*(12), 5381–5397.

38. https://github.com/AndrewEllis93/Print-Tuning-Guide/blob/main/articles/determining_max_volumetric_flow_rate.md#method
39. <https://hotend-flow-tester.netlify.app/>
40. Moetazedian, A.; Budisuharto, A. S.; Silberschmidt, V. V.; Gleadall, A. CONVEX (CONtinuously Varied EXtrusion): A New Scale of Design for Additive Manufacturing. *Addit. Manuf.* **2021**, *37*(101576), 101576.
41. <https://www.kickstarter.com/blog/toward-better-3d-printers-a-new-test-from-autodesk-and-kickstart>

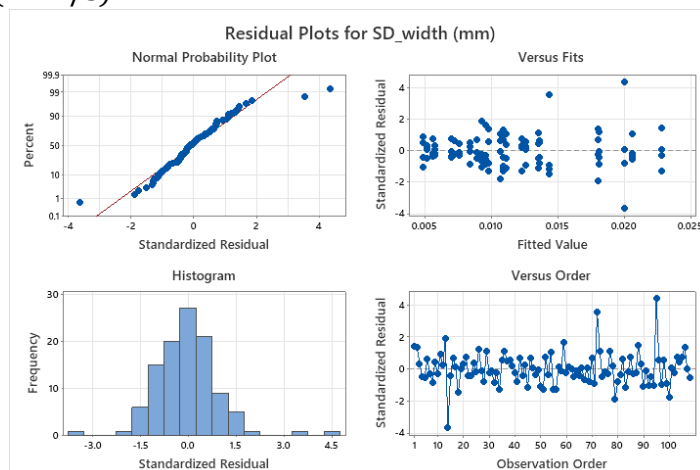
Παράρτημα

Βοηθητικά διαγράμματα για την ανάλυση ANOVA.

- Μεταβλητή απόκρισης 1: Actual/nominal width ratio vs Width (mm); Layer Height (mm); VFR (mm³/s)



- Μεταβλητή απόκρισης 2: SD_width (mm) versus Width (mm); Layer Height (mm); VFR (mm³/s)



- Μεταβλητή απόκρισης 3: Neck/width ratio (mm) versus Width (mm); Layer Height (mm); VFR (mm³/s)

