



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

**"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"**

**REVERSE ENGINEERING: 3D-ΕΚΤΥΠΩΣΗ  
ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΜΕ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΕΣ  
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΕΣΩ ΧΡΗΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ  
ΚΑΙ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ  
ΜΙΚΡΟΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΟΦΙΑ Κ. ΤΣΟΛΕΡΙΔΟΥ

Μηχανολόγος Μηχανικός ΠΔΜ

**ΕΠΙΒΛΕΨΗ:**

Κ. Α. Χαριτίδης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Λ. Θ. Ζουμπολάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2018



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

**"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"**

**REVERSE ENGINEERING: 3D-ΕΚΤΥΠΩΣΗ  
ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΜΕ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΕΣ  
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΕΣΩ ΧΡΗΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ  
ΚΑΙ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ  
ΜΙΚΡΟΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΟΦΙΑ Κ. ΤΣΟΛΕΡΙΔΟΥ

Μηχανολόγος Μηχανικός ΠΔΜ

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

Κ. Α. Χαριτίδης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Λ. Θ. Ζουμπουλάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δ. Ε. Μανωλάκος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2018

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	i
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	iii
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ .....	iii
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	iii
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	vii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	viii
ABSTRACT.....	x
<b>1 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Ιστορική αναδρομή .....	1
1.2 Εισαγωγή .....	1
1.3 Λόγοι χρήσης της αντίστροφης μηχανικής .....	2
1.4 Αρχές λειτουργίας της αντίστροφης μηχανικής .....	3
1.4.1 Σάρωση .....	5
1.4.2 Επεξεργασία σημείων .....	6
1.4.3 Ανάπτυξη γεωμετρικού μοντέλου .....	7
1.5 Εφαρμογές της αντίστροφης μηχανικής .....	8
<b>2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΜΙΚΡΟΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ΜΕ ΑΚΤΙΝΕΣ Χ .....</b>	<b>9</b>
2.1 Εισαγωγή .....	9
2.2 Γενική αρχή λειτουργίας ενός μικροτομογράφου.....	10
2.3 Απόκτηση τριδιάστατης ψηφιακής εικόνας .....	12
2.3.1 Προθέρμανση πηγής .....	12
2.3.2 Τοποθέτηση δείγματος.....	13
2.3.3 Σάρωση του δείγματος .....	14
2.3.4 Περιστροφή του δείγματος.....	16
2.3.5 Ανασυγκρότηση των εικόνων προβολής .....	17
2.4 Αστοχίες κατά τη μικροτομογραφία .....	17
2.4.1 Σκλήρυνση της δέσμης ακτίνων Χ .....	17
2.4.2 Εμφάνιση δακτυλίων .....	19
2.5 Δομή του σαρωτή SkyScan 1272 .....	20
<b>3 ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ.....</b>	<b>22</b>
3.1 Εισαγωγή .....	22
3.2 Ιστορική αναδρομή .....	22
3.3 Η τεχνολογία της 3-D εκτύπωσης.....	26

3.3.1	Μορφή πρώτης ύλης.....	27
3.3.2	Τεχνικές τριδιάστατης εκτύπωσης.....	28
3.4	Τριδιάστατη εκτύπωση μέσω της διαδικασίας FDM.....	32
3.4.1	Κατασκευαστική δομή ενός FDM εκτυπωτή .....	32
3.4.2	Στάδια διαδικασίας της ΠΚ.....	39
3.4.3	Ροή του υλικού κατά την εξαγωγή του από το ακροφύσιο.....	49
3.4.4	Αστοχίες κατά την εκτύπωση .....	50
4	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	52
	1 <sup>ο</sup> ΜΕΡΟΣ.....	52
4.1	Ψηφιακή απεικόνιση εμπορικού δείγματος.....	52
4.1.1	Χαρακτηριστικά του δείγματος.....	52
4.1.2	Προετοιμασία του δείγματος για τη διαδικασία της σάρωσης.....	54
4.1.3	Επεξεργασία φετών-Εξαγωγή αρχείου STL .....	54
4.1.4	Επανασχηματισμός ινών στο SolidWorks - Εκτύπωση με διπλή κεφαλή.....	59
	2 <sup>ο</sup> ΜΕΡΟΣ.....	64
4.2	Σύνταξη G-κώδικα.....	64
4.2.1	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κώδικα - Τροχιά κεφαλής .....	64
4.2.2	Δομή/εντολές/παράμετροι G-κώδικα .....	73
4.2.3	Εκτύπωση/Σάρωση των G-κωδικών .....	78
4.2.4	Επανασύνταξη του G-κώδικα .....	92
	3 <sup>ο</sup> ΜΕΡΟΣ.....	94
4.3	Διαδικασία θλίψης.....	94
4.3.1	Δοκίμια προς θλίψη.....	94
4.3.2	Αποτελέσματα θλίψης.....	97
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	102
6	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	107
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	115
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	117

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1: Βασικές εντολές του G-κώδικα.....	46
Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά και ιδιότητες των ινών άνθρακα μέσα στο δείγμα. ....	53
Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά ολόκληρου του εμπορικού δείγματος.....	53
Πίνακας 4.3: Εισαγωγικό κομμάτι του G-κώδικα σε μορφή σημειωματάριου-Κοινό κομμάτι και στις δύο δομές.....	74
Πίνακας 4.4: Δομή πλέγματος για κατεύθυνση 0° υπό τη μορφή του G-κώδικα μέσα στο σημειωματάριο.....	75
Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα θλίψης των Reverse δοκιμίων. ....	97
Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα θλίψης του G-κώδικα, για κατεύθυνση 0°, με διάφορες παραμέτρους εκτύπωσης.....	98
Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα θλίψης του G-κώδικα, για κατεύθυνση 45°, με διάφορες παραμέτρους εκτύπωσης.....	100

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1.1: Γενικευμένη διαδικασία της αντίστροφης μηχανικής. ....	4
Διάγραμμα 4.1: Συνδυασμός παραμέτρων για την εκτύπωση των G-κωδικών. ....	89
Διάγραμμα 4.2: Συνδυασμός παραμέτρων για την εκτύπωση των νέων G-κωδικών. ....	96
Διάγραμμα 4.3: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης για τα Reverse δοκίμια, μετά το πείραμα της θλίψης. ....	97
Διάγραμμα 4.4: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης για τους G-κώδικες, κατεύθυνσης 0°, μετά το πείραμα της θλίψης. ....	98
Διάγραμμα 4.5: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης για τους G-κώδικες, κατεύθυνσης 45°, μετά το πείραμα της θλίψης.....	100

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Σχεδίαση κρανιακού εμφυτεύματος {1}. ....	3
Εικόνα 1.2: Σάρωση με αισθητήρα αφής {2}. ....	5
Εικόνα 1.3: Σάρωση χωρίς επαφή {3}. ....	6
Εικόνα 2.1: Μικροτομογράφος Skyscan 1272.....	10
Εικόνα 2.2: Εικόνα προβολής-Ικρίωμα από υλικό PLA.....	11
Εικόνα 2.3: Ανακατασκευασμένη εικόνα ικρίωματος.....	11
Εικόνα 2.4: 3-D Αναπαράσταση εσωτερικής δομής του ικρίωματος.....	12
Εικόνα 2.5: Αναπαράσταση της εκπομπής των ακτίνων X {4}. ....	13
Εικόνα 2.6: Παράλληλος φωτισμός ακτίνων X {4}. ....	15
Εικόνα 2.7: Αντικείμενο με ένα σημείο απορρόφησης {4}.....	16
Εικόνα 2.8: Λήψη προβολών από διαφορετικές γωνίες {4}.....	16
Εικόνα 2.9: Σύνθετο τσιμέντο με CNTs α)Δείγμα χωρίς σκλήρυνση των ακτίνων X, β) Δείγμα με σκλήρυνση των ακτίνων X-Δημιουργία ραβδώσεων στα σημεία που υποδεικνύουν τα βέλη.....	18

<b>Εικόνα 2.10:</b> Μεταλλική βαλβίδα α) Δείγμα χωρίς εμφάνιση «δακτυλιδιού», β) Δείγμα με έντονη την παρουσία εμφάνισης του «δακτυλιδιού».	19
<b>Εικόνα 2.11:</b> Δομή του σαρωτή SkyScan 1272 {4}.	20
<b>Εικόνα 3.1:</b> α) Τεχνητό νεφρό και άλλα μέλη του σώματος, β) Εκτυπωτής της RepRap {5, 6}.	24
<b>Εικόνα 3.2:</b> Πρώτο μη επανδρωμένο 3-D αεροσκάφος {7, 8}.	25
<b>Εικόνα 3.3:</b> Εκτυπωμένο 3-D εμφύτευμα κάτω γνάθου {9, 10}.	25
<b>Εικόνα 3.4:</b> 3-D εκτυπωτής της εταιρίας Nano Dimensions-Μοντέλο DragonFly 2020 {11, 12, 13}.	26
<b>Εικόνα 3.5:</b> Μέθοδος SLA {14}.	28
<b>Εικόνα 3.6:</b> Μέθοδος LOM {15}.	29
<b>Εικόνα 3.7:</b> Μέθοδος SLS {16}.	29
<b>Εικόνα 3.8:</b> Μέθοδος DMLS {17}.	30
<b>Εικόνα 3.9:</b> Μέθοδος Ink-jet {18}.	30
<b>Εικόνα 3.10:</b> Μέθοδος Poly-jet {19}.	31
<b>Εικόνα 3.11:</b> Μέθοδος FDM {20}.	31
<b>Εικόνα 3.12:</b> 3-D Εκτυπωτής Zmorph 2.0S {21}.	32
<b>Εικόνα 3.13:</b> Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης ενός καρτεσιανού και ενός Delta εκτυπωτή, αντίστοιχα {22}.	33
<b>Εικόνα 3.14:</b> Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας των κεφαλών α) άμεσης και β) έμμεσης τροφοδοσίας {23, 24}.	37
<b>Εικόνα 3.15:</b> Μοντέλο εμφυτεύματος μηριαίου οστού. Αριστερά το αρχικό στερεό μοντέλο και δεξιά το αντίστοιχο ψηφιοποιημένο {25}.	40
<b>Εικόνα 3.16:</b> Αναπαράσταση τριγώνου με βάση το αρχείο STL {26}.	41
<b>Εικόνα 3.17:</b> Στο πάνω μέρος γίνεται ψηφιακή αναπαράσταση του toolpath ενώ στο κάτω μέρος φαίνεται η αντίστοιχη εκτύπωση {27}.	42
<b>Εικόνα 3.18:</b> Στην πάνω εικόνα παρουσιάζεται η κατασκευή του αντικειμένου με 2, 5, 10 και 15 κελύφη, αντίστοιχα, ενώ στην κάτω παρουσιάζονται περιπτώσεις διαφορετικού ποσοστού πλήρωσης {28}.	43
<b>Εικόνα 3.19:</b> Αλγόριθμος τεμαχισμού {29}.	44
<b>Εικόνα 3.20:</b> Διαδρομή της κεφαλής εκτύπωσης σε μορφή G-κώδικα {30}.	45
<b>Εικόνα 3.21:</b> Στην πάνω αριστερή εικόνα γίνεται αναπαράσταση της εναπόθεσης του υλικού πάνω σε μια επιφάνεια. Στην πάνω δεξιά εικόνα γίνεται ανάλυση της γεωμετρίας της ίνας που εναποτίθεται σε μια επιφάνεια. Η κάτω εικόνα αναπαριστά την διάταξη μια διαδρομής μέσα στον χώρο, διατηρώντας το κυκλικό σχήμα, όπως όταν εξάγεται από το ακροφύσιο {31}.	50
<b>Εικόνα 4.1:</b> Εμπορικό δείγμα ινών άνθρακα της εταιρίας Toray.	52
<b>Εικόνα 4.2:</b> Δειγματοφορέας, με ποσότητα κεριού πριν την τοποθέτηση του δείγματος προς σάρωση	54
<b>Εικόνα 4.3:</b> Ανοικοδόμηση των φετών μέσω του λογισμικού NRecon.	55
<b>Εικόνα 4.4:</b> Τυχαία διατομή του εμπορικού δείγματος, στο λογισμικό NRecon.	55
<b>Εικόνα 4.5:</b> Τρεις διαφορετικές περιοχές του δείγματος προς μελέτη, μέσω του λογισμικού CTAn.	56
<b>Εικόνα 4.6:</b> Ένα μικρό τμήμα της διατομής (κόκκινο τετράγωνο) του δείγματος, προς μελέτη, από μία μικρή περιοχή που επιλέχθηκε στην προηγούμενη εικόνα, μέσω του λογισμικού CTAn.	56
<b>Εικόνα 4.7:</b> Στάδιο διακριτοποίησης (Thresholding), μέσω του λογισμικού CTAn.	57

<b>Εικόνα 4.8:</b> Στάδιο αντιστροφής της εικόνας στην εντολή Bitwise operations, στο λογισμικό CTAπ.....	57
<b>Εικόνα 4.9:</b> Αποτέλεσμα της αντιστροφής της μικρής περιοχής σε σχέση με ολόκληρη την περιοχή, στο λογισμικό CTAπ. ....	58
<b>Εικόνα 4.10:</b> Το τελικό τριδιάστατο μοντέλο κατά τη συνένωση των αρχείων των ινών άνθρακα και του πληρωτικού υλικού.-Αναπαράσταση του μοντέλου μέσω του λογισμικού CTVol. ....	58
<b>Εικόνα 4.11:</b> Αναπαράσταση των ινών άνθρακα με την εισαγωγή του αρχείου STL στο σχεδιαστικό λογισμικό SolidWorks.....	59
<b>Εικόνα 4.12:</b> Απομόνωση μιας ίνας από τον χώρο, αλλοιωμένης γεωμετρίας. ....	60
<b>Εικόνα 4.13:</b> Στην αριστερή εικόνα σχηματίζεται το Spline-Στην δεξιά εικόνα σχεδιάζεται ο κύκλος με κέντρο την αρχή του Spline.....	60
<b>Εικόνα 4.14:</b> Σχηματισμός ίνας, με την εντολή Swept Boss/Base.....	61
<b>Εικόνα 4.15:</b> Επανασχηματισμός των ινών άνθρακα και των τριών αρχείων STL. ....	61
<b>Εικόνα 4.16:</b> Αρχικό στάδιο σχηματισμού του καλουπιού.....	62
<b>Εικόνα 4.17:</b> Στάδιο δημιουργίας των κενών, με την αφαίρεση των ινών από το καλούπι-Δημιουργία δύο διαφορετικών αρχείων STL. ....	62
<b>Εικόνα 4.18:</b> Τα STL αρχεία της reverse εκδοχής της εσωτερικής δομής του εμπορικού δείγματος, σε 3-D μορφή. ....	63
<b>Εικόνα 4.19:</b> Πορεία της κεφαλής κατά την εκτύπωση του κελύφους του πλέγματος.....	65
<b>Εικόνα 4.20:</b> Πορεία σχηματισμού του υποστρώματος, μέσα στο κέλυφος.....	66
<b>Εικόνα 4.21:</b> Ομαλή προσέγγιση της ίνας πάνω στο εσωτερικό τμήμα του κελύφους, στη δομή του υποστρώματος. ....	67
<b>Εικόνα 4.22:</b> Πορεία σχηματισμού της δομής των 0°, μέσα στο κέλυφος.....	68
<b>Εικόνα 4.23:</b> Ομαλή προσέγγιση της ίνας πάνω στο εσωτερικό τμήμα του κελυφούς, στη δομή των 0°.....	68
<b>Εικόνα 4.24:</b> Πορεία σχηματισμού της δομής των 45ο, μέσα στο κέλυφος. ....	69
<b>Εικόνα 4.25:</b> Πορεία της κεφαλής πάνω στο κέλυφος, υπό γωνία 45°.....	69
<b>Εικόνα 4.26:</b> Διαφορετική διαδρομή για την πλήρωση του χώρου μέσα στο κέλυφος-Δομή 45°.....	70
<b>Εικόνα 4.27:</b> Τμήμα του επαναλαμβανόμενου μοτίβου του πλέγματος, α) Δομή 0°, β) Δομή 45°.....	70
<b>Εικόνα 4.28:</b> Πορεία της κεφαλής κατά την εκτύπωση του κελύφους του Raft. ....	71
<b>Εικόνα 4.29:</b> α) και β) αποτελούν τις δύο μοναδικές στρώσεις από τις οποίες αποτελείται η δομή του Raft-γ) κάτοψη του κώδικα στην περίπτωση της δομής των 45°, μαζί με τη δομή του Raft. ....	72
<b>Εικόνα 4.30:</b> Κάτοψη ολόκληρου του κώδικα-Δομή Skirt, Raft και πλέγμα. ....	73
<b>Εικόνα 4.31:</b> Αριστερή εικόνα-Αύξηση του μήκους της ίνας, Δεξιά εικόνα-Μείωση του μήκους της ίνας.....	77
<b>Εικόνα 4.32:</b> Ανάγνωση των εντολών από τον εκτυπωτή και αποτύπωση του G-κώδικα σε 3-D μορφή. α) Αρχικό στάδιο του κώδικα-Δομή Skirt & Raft, β) Αρχή δομής του πλέγματος πάνω στο Raft, γ) Ένα βήμα πριν την τελευταία στρώση του πλέγματος προς την ολοκλήρωση του κώδικα. ....	78
<b>Εικόνα 4.33:</b> Ψηφιακή αναπαράσταση του εκτυπωμένου G-κώδικα στο λογισμικό CTVox, κατεύθυνσης 0°, F1200, θερμοκρασία στους 200 °C, 0% ισχύ του ανεμιστήρα.....	79
<b>Εικόνα 4.34:</b> Ψηφιακή αναπαράσταση του εκτυπωμένου G-κώδικα στο λογισμικό CTVox, κατεύθυνσης 0°, F1500, θερμοκρασία στους 200 °C, 0% ισχύ του ανεμιστήρα.....	80

<b>Εικόνα 4.35:</b> Ψηφιακή αναπαράσταση του εκτυπωμένου G-κώδικα στο λογισμικό CTVox, κατεύθυνσης 0°, F1800, θερμοκρασία στους 200 °C, 0% ισχύ του ανεμιστήρα. ....	81
<b>Εικόνα 4.36:</b> Ψηφιακή αναπαράσταση του εκτυπωμένου G-κώδικα στο λογισμικό CTVox από πλάγια όψη-Απεικόνιση των κενών που δημιουργήθηκαν κατά την εκτύπωση του κελύφους. ....	82
<b>Εικόνα 4.37:</b> Ψηφιακή αναπαράσταση του νέου εκτυπωμένου G-κώδικα στο λογισμικό CTVox, κατεύθυνσης 0°, F1500, θερμοκρασία στους 200 °C, 0% ισχύ του ανεμιστήρα. ....	83
<b>Εικόνα 4.38:</b> Ψηφιακή αναπαράσταση του νέου εκτυπωμένου G-κώδικα στο λογισμικό CTVox, κατεύθυνσης 0°, F1800, θερμοκρασία στους 200 °C, 0% ισχύ του ανεμιστήρα. ....	84
<b>Εικόνα 4.39:</b> Διαφορετικοί τρόποι κίνησης της κεφαλής για την ίδια διαδρομή κατά την εκτύπωση. Στην πάνω γραμμή η κεφαλή έχει ένα αρχικό και ένα τελικό σημείο ενώ η κάτω διαδρομή για την ίδια απόσταση χωρίζεται σε τρεις μικρές διαδρομές. ....	85
<b>Εικόνα 4.40:</b> Ψηφιακή αναπαράσταση του εκτυπωμένου G-κώδικα στο λογισμικό CTVox, κατεύθυνσης 45°, F1500, θερμοκρασία στους 200 °C, 0% ισχύ του ανεμιστήρα. ....	86
<b>Εικόνα 4.41:</b> Ψηφιακή αναπαράσταση του εκτυπωμένου G-κώδικα στο λογισμικό CTVox, κατεύθυνσης 45°, F1800, θερμοκρασία στους 200 °C, 0% ισχύ του ανεμιστήρα. ....	87
<b>Εικόνα 4.42:</b> Κατεύθυνση 45°, με μηδενική ισχύ του ανεμιστήρα, στους 200 °C. Οι εικόνες α,β) αντιστοιχούν στα 1500 mm/min και οι γ,δ) στα 1800 mm/min. ....	88
<b>Εικόνα 4.43:</b> Κατεύθυνση 0°, με μηδενική ισχύ του ανεμιστήρα, στους 220 °C. Οι εικόνες α,β) αντιστοιχούν στα 1500 mm/min και οι γ,δ) στα 1800 mm/min. ....	90
<b>Εικόνα 4.44:</b> Κατεύθυνση 0°, με 100% της ισχύς του ανεμιστήρα. Η πάνω σειρά αντιστοιχεί σε ταχύτητα 1500 mm/min ενώ η κάτω σε 1800 mm/min. Οι δύο πρώτες στήλες είναι για κώδικες στους 200 °C ενώ οι δύο τελευταίες στους 220 °C. ....	90
<b>Εικόνα 4.45:</b> Κατεύθυνση 45°, με μηδενική ισχύ του ανεμιστήρα, στους 220 °C. Οι εικόνες α,β) αντιστοιχούν στα 1500 mm/min και οι γ,δ) στα 1800 mm/min. ....	91
<b>Εικόνα 4.46:</b> Κατεύθυνση 45°, με 100% της ισχύς του ανεμιστήρα. Η πάνω σειρά αντιστοιχεί σε ταχύτητα 1500 mm/min ενώ η κάτω σε 1800 mm/min. Οι δύο πρώτες στήλες είναι για κώδικες σε θερμοκρασία 200 °C ενώ οι δύο τελευταίες για θερμοκρασία 220 °C...	91
<b>Εικόνα 4.47:</b> Εκτύπωση του G-κώδικα για 200 °C και F1500. α) Κατεύθυνση 0° με 0% ισχύ του ανεμιστήρα, β) Κατεύθυνση 0° με 100% ισχύ, γ) Κατεύθυνση 45° με 0% ισχύ, δ) Κατεύθυνση 45° με 100% ισχύ, ε) Αφαίρεση δομής Raft-Αθικτη η δομή του πλέγματος. ....	93
<b>Εικόνα 4.48:</b> α-γ) Στάδιο συμπίεσης ενός Reverse δοκιμίου κατά το στάδιο της θλίψης. δ-στ) Reverse δοκίμια μετά το πέρας της θλίψης. ....	94
<b>Εικόνα 4.49:</b> α) Έναρξη και β) πέρας του πειράματος της θλίψης για τους πρώτους κώδικες, γ) Δοκίμια κατεύθυνσης 45° μετά τη θλίψη, για 0% και 100% ισχύ του ανεμιστήρα αντίστοιχα, δ) Πλάγια όψη δοκιμίου 45°, με 0% ισχύ του ανεμιστήρα, ε),στ) Δοκίμιο κατεύθυνσης 0° μετά τη θλίψη, σε πλάγια και μπροστινή όψη με 0% ισχύ του ανεμιστήρα, ζ),η) Δοκίμιο κατεύθυνσης 0° μετά τη θλίψη, από δύο διαφορετικές όψεις με 100% ισχύ του ανεμιστήρα. ....	95
<b>Εικόνα 4.50:</b> Εκτύπωση του G-κώδικα στους 190 °C, πριν τη διαδικασία της θλίψης. α) Κατεύθυνση 45°, F1500 με 0% ισχύ του ανεμιστήρα, β) Κατεύθυνση 45°, F1500 με 100% ισχύ, γ) Κατεύθυνση 45°, F1800 με 0% ισχύ, δ) Κατεύθυνση 45°, F1800 με 100% ισχύ, ε) Κατεύθυνση 0°, F1500 με 0% ισχύ του ανεμιστήρα, στ) Κατεύθυνση 0°, F1500 με 100% ισχύ, ζ) Κατεύθυνση 0°, F1800 με 0% ισχύ, η) Κατεύθυνση 0°, F1800 με 100% ισχύ. ....	96



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στην Ερευνητική Μονάδα Προηγμένων, Σύνθετων, Νάνο Υλικών και Νανοτεχνολογίας (R-NanoLab) του Τομέα Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών της Σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους επιβλέποντες καθηγητές μου κ. Κωνσταντίνο Χαριτίδη και κ. Λουκά Ζουμπουλάκη για την ευκαιρία που μου έδωσαν να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Εν συνεχεία θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Μεταδιδακτορικό κ. Ηλία Κούμουλο για τη διαμόρφωση αυτής της εργασίας καθώς και τους υποψήφιους Διδάκτορες Παναγιώτη Γούλη και Ελένη Γκάρτζου για την καθοδήγηση και τις συμβουλές τους πάνω στη διαδικασία της τριδιάστατης σάρωσης και της εκτύπωσης αντίστοιχα.

Πολύτιμη υπήρξε η βοήθεια της υποψήφιας Διδάκτορος κα. Ειρήνης Κανελλοπούλου και του Μεταδιδακτορικού κ. Ιωάννη Καρτσωνάκη στην εκπλήρωση των τελικών πειραμάτων, που πραγματοποιήθηκαν μέσα σε ένα αρκετά ευχάριστο περιβάλλον.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κα. Ευαγγελία Κοντού που μας παραχώρησε τα εργαστήριά της στο Κτήριο Αντοχής Υλικών προκειμένου να ολοκληρωθούν τα πειράματα.

Τέλος, τη συγκεκριμένη εργασία την αφιερώνω στα σημαντικότερα άτομα της ζωής μου, την πολυαγαπημένη μου οικογένεια και τους φίλους μου – οικογένεια: Μαρίνο, Αχιλλέα, Χοντρό, Φυτό, Κοντή και Ντένη. Η δύναμή μου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με τον όρο τριδιάστατη εκτύπωση (3-D Printing) περιγράφεται ένα σύνολο αυτοματοποιημένων διαδικασιών προσθετικής κατασκευής, μετατρέποντας τριδιάστατα ψηφιακά μοντέλα σε φυσικά αντικείμενα. Στα περισσότερα συστήματα, η προσθετική κατασκευή επιτυγχάνεται μέσω του ελεγχόμενου σχηματισμού και συνένωσης διαδοχικών στρώσεων υλικού, που αντιστοιχούν σε εγκάρσιες τομές του αντικειμένου που κατασκευάζεται. Μέσω μη καταστρεπτικών μεθόδων χαρακτηρισμού όπως η υπολογιστική τομογραφία ακτίνων X (X-ray Computed Tomography) συλλέγονται πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την εσωτερική δομή του αντικειμένου που εξετάζεται. Με τον συνδυασμό αυτών των δύο μεθόδων, μπορεί να πραγματοποιηθεί αντίστροφη μηχανική οποιουδήποτε αντικειμένου, με στόχο την προσέγγιση της εσωτερικής του δομής.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, πραγματοποιήθηκε η μέθοδος της αντίστροφης μηχανικής σε ένα εμπορικό δείγμα ινών άνθρακα με εποξειδική ρητίνη, της εταιρίας Toray μοντέλου T700S. Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η προσέγγιση της δομής του εμπορικού δείγματος μέσω δύο διαφορετικών μεθόδων, για καθαρά ποιοτικούς λόγους. Η πρώτη μέθοδος αφορά στη χρήση δεδομένων της ψηφιακής σάρωσης, τα οποία λήφθηκαν μέσω του μικροτομογράφου ακτίνων X, προκειμένου σε συνδυασμό με τη χρήση CAD να τροφοδοτήσουν το λογισμικό του 3-D εκτυπωτή και να παραχθούν αντικείμενα όμοιας εσωτερικής γεωμετρικής δομής. Στη δεύτερη μέθοδο, εκτελέστηκε σύνταξη G-κώδικα προκειμένου να πραγματοποιηθεί αναπαράσταση της δομής των ινών με μια διαφορετική προσέγγιση, από αυτήν της πρώτης μεθόδου.

Τα τρία πρώτα κεφάλαια αποτελούν το θεωρητικό κομμάτι της εργασίας στο οποίο γίνεται αναφορά στη λειτουργία και τις εφαρμογές της αντίστροφης μηχανικής, της υπολογιστικής αξονικής μικροτομογραφίας και της 3-D εκτύπωσης. Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται όλη η πειραματική διαδικασία η οποία διαχωρίζεται σε τρία μέρη. Στο πρώτο μέρος, το εμπορικό δείγμα σαρώθηκε στον μικροτομογράφο. Ακολούθησε η επεξεργασία των εικονικών εγκάρσιων τομών (φετών) της σάρωσης στο λογισμικό NRecon και μετέπειτα η εξαγωγή τριών αρχείων STL, από τρεις διαφορετικές περιοχές του δείγματος, στο λογισμικό CTAn. Τα αρχεία STL, λόγω της μη καθαρότητας των ινών έπρεπε να βελτιωθούν με τη βοήθεια του λογισμικού CAD, SolidWorks. Στο SolidWorks επανασχεδιάστηκαν οι ίνες άνθρακα, δίνοντας παράλληλα μορφή και στη δομή της εποξειδικής ρητίνης. Τέλος, τα συγκεκριμένα αρχεία ήταν έτοιμα για το στάδιο της 3-D εκτύπωσης, με διπλή κεφαλή προκειμένου να εκτυπωθούν ταυτόχρονα τόσο οι ίνες όσο και το πληρωτικό υλικό.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας, πραγματοποιήθηκε η σύνταξη του G-κώδικα, των εντολών δηλαδή τις οποίες διαβάζει ο 3-D εκτυπωτής για τη δημιουργία τριδιάστατων μοντέλων. Σκοπός αυτών των κωδικών είναι η αναπαράσταση των ινών του εμπορικού δείγματος με μια διαφορετική προσέγγιση από την πρώτη μέθοδο που εφαρμόστηκε. Κώδικες γράφτηκαν για δύο διαφορετικές κατηγορίες κατεύθυνσης, για  $0^\circ$  και  $45^\circ$ . Και οι δύο κατηγορίες αποτελούνται από δύο διαφορετικές στρώσεις οι οποίες επαναλαμβάνονται μέσα στον χώρο, δημιουργώντας ένα πλέγμα. Θεωρώντας ότι οι άξονες  $xx'$  και  $yy'$  είναι πάνω στο επίπεδο της πλατφόρμας εκτύπωσης, η μία στρώση που αφορά την αραιή δομή η οποία αναπαριστά το πληρωτικό υλικό και είναι ίδια και για τις δύο κατηγορίες βρίσκεται ως προς τον  $yy'$  ενώ η δεύτερη αφορά τη δομή των ινών είτε των  $0^\circ$  είτε των  $45^\circ$  που αντιπροσωπεύει την πυκνή δομή του πλέγματος. Οι κώδικες και των δύο κατηγοριών εκτυπώθηκαν με μια ποικιλία πειραματικών παραμέτρων.

Η πειραματική διαδικασία ολοκληρώνεται στο τρίτο μέρος, εφαρμόζοντας τη μέθοδο της θλίψης σε όλα τα δοκίμια που προέκυψαν από τα δύο πρώτα μέρη του πειράματος, μέσω της 3-D εκτύπωσης. Από τα αποτελέσματα της θλίψης παρατηρήθηκε ότι τα Reverse δοκίμια φάνηκε να συγκλίνουν αρκετά μεταξύ τους, τόσο ως προς τον τρόπο της παραμόρφωσής τους όσο και ως προς το μέγιστο φορτίο που μπορούν να αντέξουν κατά τη θλίψη. Τα αποτελέσματα αυτά φανερώνουν τη σωστή προσέγγιση που πραγματοποιήθηκε ως προς τις εμπορικές ίνες, κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της σάρωσης. Από τα αποτελέσματα της θλίψης, στα δοκίμια που προέκυψαν από τον G-κώδικα παρατηρήθηκε και στις δύο κατευθύνσεις, για τους συγκεκριμένους συνδυασμούς των παραμέτρων που εφαρμόστηκαν, πως η λειτουργία του ανεμιστήρα επηρεάζει σημαντικά την ανθεκτικότητα του τελικού δοκιμίου που εκτυπώνεται. Επιπλέον, παρατηρήθηκε στα δοκίμια που εκτυπώθηκαν στους  $200^\circ\text{C}$  χωρίς τη λειτουργία του ανεμιστήρα να εμφανίζουν υψηλότερη αντοχή από τα υπόλοιπα των  $190^\circ\text{C}$ , με εξαίρεση στην κατηγορία των  $45^\circ$  για το δοκίμιο 3 το οποίο στους  $190^\circ\text{C}$ , με ανενεργό ανεμιστήρα εμφάνισε τη μεγαλύτερη ανθεκτικότητα. Τέλος, η εργασία ολοκληρώνεται στο πέμπτο κεφάλαιο, με τη σύνοψη των συμπερασμάτων του πειράματος καθώς και με προτάσεις για περαιτέρω έρευνα προς τη βελτίωση των δοκιμίων.

## ABSTRACT

3-D printing describes a synthesis of automated prosthetic procedures by converting 3-D digital models into physical objects. In most systems, the prosthesis is accomplished by the controlled formation and combination of successive materials corresponding to transverse cross-sections of the article being manufactured. Non-destructive characterization methods, such as X-ray computed tomography, collect valuable information about the internal structure of the object under consideration. With the combined use of the two methods, reverse engineering of any object can be performed to approach its internal structure.

In the present postgraduate thesis, the reverse engineering method was carried out on a commercial sample of epoxy resin T700S, manufactured by Toray. The purpose of this work is to approach the structure of the commercial sample by two different methods, for purely qualitative reasons. The first method involves the use of digital scanning data obtained through the X-ray microtome, in conjunction with the use of CAD to feed the 3-D printer software and produce objects of similar internal geometric structure. In the second method, a G-code syntax was set to perform a representation of the fiber structure with a different approach than the first method.

The first three chapters are the theoretical part of this work which refer to the operation and applications of reverse engineering, axial microtomography and 3-D printing. The fourth chapter describes the entire experimental process which is divided into three parts. In the first part, the commercial sample was scanned in the microtome. The processing of the virtual slices of the scan in the NRecon software followed, and afterwards the extraction of three STL files from three different regions of the sample into the CTAn software. STL files due to impure fiber geometry had to be improved with CAD, SolidWorks software. Carbon fibers were redesigned by using SolidWorks, while giving shape to the epoxy resin structure. Finally, these files were ready for the 3-D printing stage, with a double head to print both the fiber and the filler material at the same time.

In the second part of this work, G-code was compiled, which is the set of commands that the 3-D printer reads the appropriate commands to create three-dimensional models. The purpose of these codes is to represent the commercial sample of fibers with a different approach from the first applied method. The codes were written for two different directional categories, for  $0^\circ$  and  $45^\circ$ . Both categories consist of two different layers that are repeated in space, creating a grid. Considering that the axes  $xx'$  and  $yy'$  are on the plane of the print platform, one layer pertaining to the sparse structure representing the filler and the same for the two categories is

for  $yy'$ , while the second relates to the structure of the fibers of  $0^\circ$  or  $45^\circ$  representing the dense structure of the lattice. Codes at both categories have been printed with a variety of parameters.

The experimental process is completed in the third part, applying the compression method to all the specimens that emerged from the first two parts of the experiment, through 3-D printing. From the results of the grief it was observed that the Reverse specimens appeared to converge sufficiently with each other, both in the way of their deformation and in the maximum load that they can withstand during grief. These results show the correct approach to commercial fibers when processing the scan data. From the results of the grief, in the specimens derived from the G-code it was observed in both directions, for the particular combinations of the parameters applied, how the fan function significantly affects the durability of the final test piece being printed. In addition, the specimens printed at  $200^\circ\text{C}$  without the fan function showed a higher resistance than the printed at  $190^\circ\text{C}$ , except for the  $45^\circ$  for the specimen 3 which at  $190^\circ\text{C}$  with an inactive fan exhibited the highest durability. Finally, the work is completed in the fifth chapter, with the summary of the experimental conclusions as well as proposals for further research into the improvement of specimens.

# 1 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

## 1.1 Ιστορική αναδρομή

Η αντίστροφη μηχανική είχε χρησιμοποιηθεί ευρέως κατά τη διάρκεια του ψυχρού και του Β΄ παγκοσμίου πολέμου. Πλέον χρησιμοποιείται συχνά στον χώρο του στρατού προκειμένου να διερευνηθούν οι τεχνολογικές εξελίξεις, τα μηχανήματα ή οι πληροφορίες άλλων εθνών. Τα τελευταία χρόνια, μέσω της εξέλιξης της υπολογιστικής δύναμης και των συσκευών σάρωσης, με ή χωρίς επαφή, η διακριτοποίηση της γεωμετρίας στον χώρο του αυτοκινητοβιομηχανικού σχεδιασμού, στη βιομηχανία αλλά και στην εξασφάλιση της ποιότητας έχει αποκτήσει σημαντικό ενδιαφέρον. Η επίδραση της αντίστροφης μηχανικής στη βιομηχανία διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην προώθηση της βιομηχανικής εξέλιξης με την εισαγωγή δαπανηρών προϊόντων και την τόνωση του πρόσθετου ανταγωνισμού. Επιπλέον, παρέχει ένα εργαλείο υψηλής τεχνολογίας που συμβάλλει στην επιτάχυνση της διαδικασίας επανεξέτασης για τη μελλοντική ανέλιξη του βιομηχανικού κλάδου. Παράλληλα, η συνεισφορά της αντίστροφης μηχανικής καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική στον κλάδο των αερομεταφορών λόγω της ωριμότητας της βιομηχανίας, της προόδου των σύγχρονων τεχνολογιών και των απαιτήσεων της αγοράς. Κατά το ξεκίνημα της αεροπορικής βιομηχανίας στις αρχές του 1900 μέχρι την ωριμότητα του εξοπλισμού της, με την ανάπτυξη των αεριωθούμενων αεροσκαφών τη δεκαετία του 50', επαναστάτησε ως προς τους τρόπους μεταφοράς μέσα σε περίπου 50 χρόνια [1].

## 1.2 Εισαγωγή

Με τον όρο μηχανική γίνεται αναφορά στη διαδικασία σχεδιασμού, κατασκευής, συναρμολόγησης και συντήρησης προϊόντων και συστημάτων. Η μηχανική διαχωρίζεται σε δύο κατηγορίες, σε αυτή της κλασικής και της αντίστροφης μηχανικής. Στην κλασική μηχανική, η κύρια αντίληψη είναι η σχεδίαση ενός προϊόντος, βάσει κατάλληλων προδιαγραφών και η μετέπειτα ενσωμάτωσή του σε ένα σύστημα. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις προϊόντων υπάρχει έλλειψη βασικών τεχνικών λεπτομερειών, όπως σχεδιαστικά και τεχνικά δεδομένα.

Η διαδικασία της αντιγραφής ενός υπάρχοντος τμήματος, υποσυνόλου ή προϊόντος, χωρίς το στάδιο της ψηφιακής μοντελοποίησης, αποτελεί τη βασική ιδέα της αντίστροφης μηχανικής. Ένας επιπλέον ορισμός που χαρακτηρίζει την αντίστροφη μηχανική είναι η απόκτηση ενός

γεωμετρικού μοντέλου CAD από ένα σύνολο δεδομένων, το οποίο συλλέγεται μέσω της διαδικασίας σάρωσης ή ψηφιοποίησης υφιστάμενων τμημάτων ή προϊόντων. Η αντίστροφη μηχανική βρίσκει χρήση σε ευρύ πεδίο εφαρμογών στο βιομηχανικό σχεδιασμό, καθώς και στην αναπαραγωγή τους. Σε περιπτώσεις, όπως στην αυτοκινητοβιομηχανία, όπου οι σχεδιαστές δίνουν σχήμα στις ιδέες τους με τη χρήση διαφόρων υλικών, όπως πηλό, γύψο ή ξύλο, κρίνεται απαραίτητη η χρήση σχεδιαστικού λογισμικού για την υλοποίηση του τελικού σχεδίου.

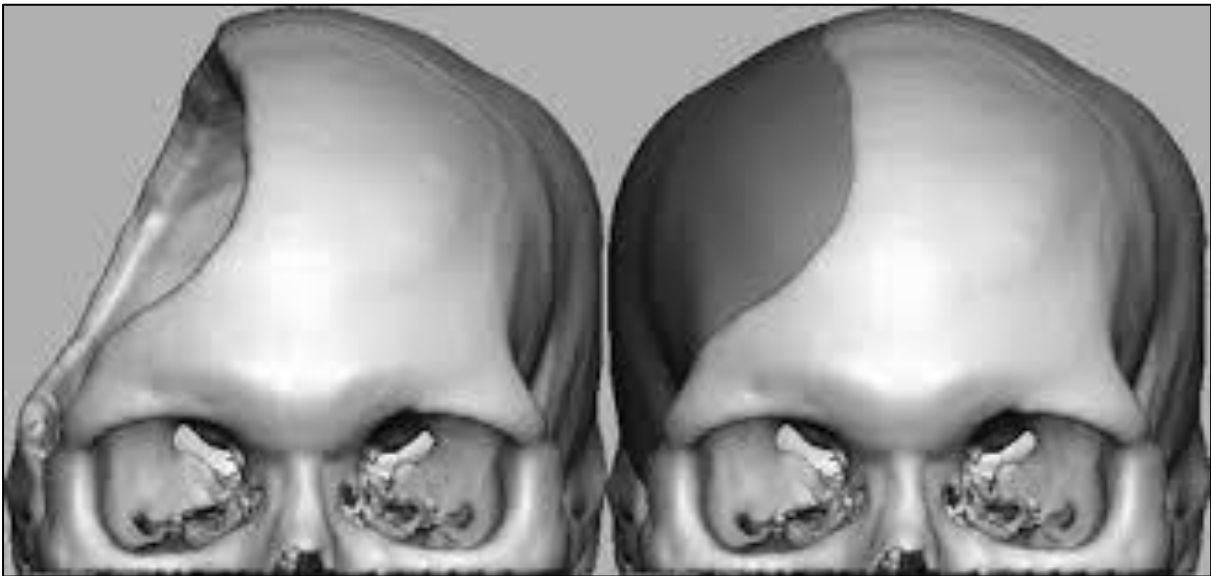
Καθώς όμως τα προϊόντα αποκτούν μια πιο σύνθετη σχεδιαστικά μορφή, η σχεδίασή τους με κατάλληλα σχεδιαστικά προγράμματα καθίσταται δυσχερής λόγω του ότι δεν μπορούν να εξασφαλίσουν την επακριβή αναπαράσταση του επιθυμητού τελικού προϊόντος. Λύση σε αυτό το πρόβλημα παρέχει η αντίστροφη μηχανική καθώς το φυσικό μοντέλο αποτελεί την πηγή των πληροφοριών για το μοντέλο CAD. Μια ακόμα σημαντική εφαρμογή της αντίστροφης μηχανικής είναι να συμπίεζει τους χρόνους του κύκλου ανάπτυξης του προϊόντος. Στην έντονα ανταγωνιστική παγκόσμια αγορά, οι κατασκευαστές αναζητούν συνεχώς νέους τρόπους συντόμευσης του χρόνου παράδοσης προκειμένου να διατεθεί ένα νέο προϊόν στην αγορά.

### **1.3 Λόγοι χρήσης της αντίστροφης μηχανικής**

Παρακάτω παρατίθενται μερικοί από τους λόγους που καθιστούν την αντίστροφη μηχανική απαραίτητη:

- Όταν ο κατασκευαστής ενός έργου δεν είναι πλέον διαθέσιμος στην αγορά αλλά υπάρχει η ανάγκη ζήτησης του προϊόντος που είχε παράξει στο παρελθόν, όπως π.χ. ανταλλακτικά πλοίων και αεροσκαφών
- Δημιουργία δεδομένων για ανακατασκευή τμήματος ενός προϊόντος για το οποίο δεν υπάρχουν σχεδιαστικά δεδομένα ή έχουν χαθεί
- Έλεγχος ποιότητας ενός κατασκευαστικού μέρους με το αρχικό του σχέδιο καθώς και σύγκριση ενός τμήματος με τις πραγματικές του διαστάσεις, όπως λαμβάνονται από ένα σύστημα
- Ανάλυση των θετικών και αρνητικών χαρακτηριστικών των προϊόντων άλλων ανταγωνιστών
- Ενίσχυση των καλών χαρακτηριστικών σε σύντομο ορίζοντα χρόνου
- Απαλοιφή μερικών ανεπιθύμητων χαρακτηριστικών του αντικειμένου
- Εξερεύνηση νέων οδών προς τη βελτίωση της απόδοσης και της λειτουργίας του προϊόντος

- Δημιουργία τριδιάστατων δεδομένων από φυσικά μοντέλα για κινούμενα σχέδια σε βιντεοπαιχνίδια και ταινίες επιστημονικής φαντασίας
- Τεκμηρίωση και μέτρηση μιας αρχιτεκτονικής κατασκευής
- Δημιουργία δεδομένων για τη δημιουργία οδοντικών ή χειρουργικών προσθέτων, μηχανικών ιστών ή πρόσθετα μέρη του σώματος, για τη μοντελοποίηση ανθρώπινων μελών και τη διενέργεια χειρουργικών επεμβάσεων
- Προσαρμογή ρούχων και υποδημάτων καθώς και αποτύπωση των ανθρωπομορφικών χαρακτηριστικών ενός πληθυσμού
- Τεκμηρίωση και αναπαραγωγή ενός εγκλήματος [2]

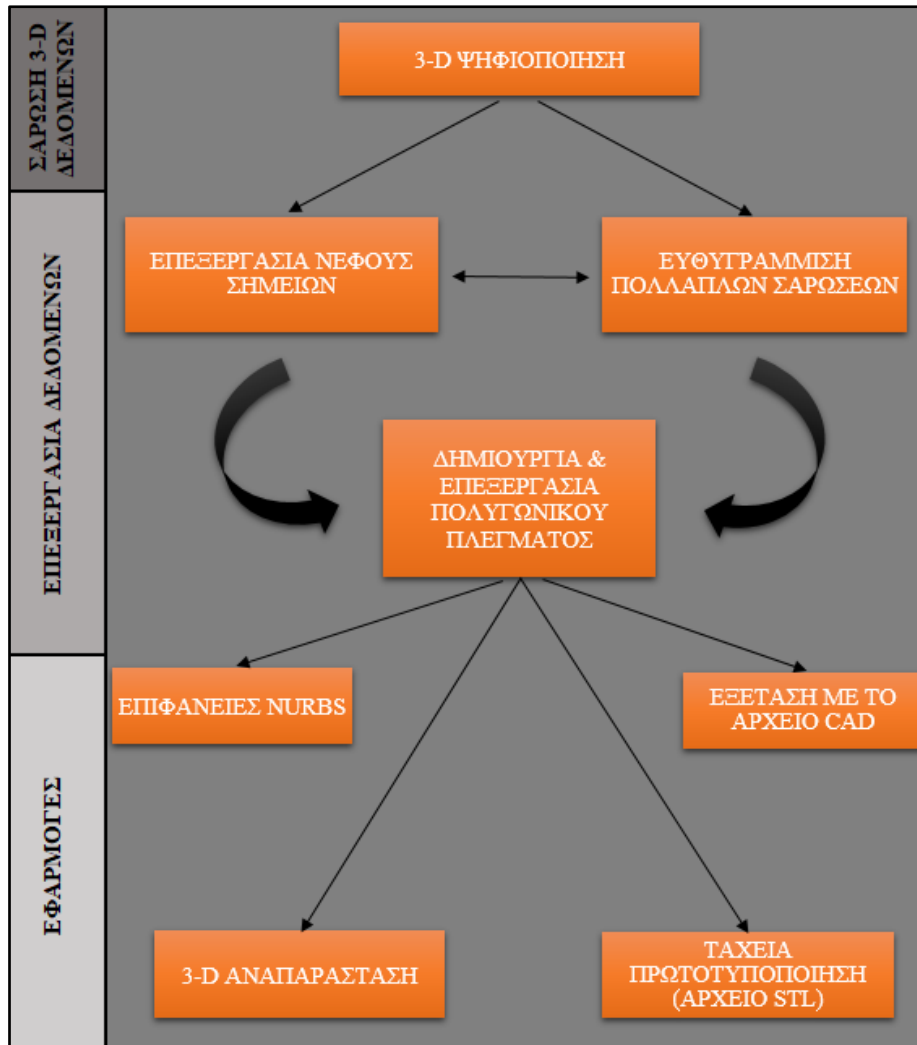


Εικόνα 1.1: Σχεδίαση κρανιακού εμφυτεύματος {1}.

#### 1.4 Αρχές λειτουργίας της αντίστροφης μηχανικής

Μέσω της χρήσης του ηλεκτρονικού υπολογιστή γίνεται η σύλληψη της γεωμετρίας του εξαρτήματος, η παρουσίαση της τριδιάστατης μορφής του, η εκτέλεση των αλλαγών που απαιτούνται πάνω στο μοντέλο, η δοκιμή της απόδοσης και τέλος η προσομοίωση της διαδικασίας παραγωγής και ελέγχου, χωρίς την παραγωγή του φυσικού πρωτοτύπου. Τα γενικευμένα στάδια της αντίστροφης μηχανικής διακρίνονται στη σάρωση του φυσικού μοντέλου και στη συλλογή των 3-D δεδομένων, την επεξεργασία των σημείων και την ανάπτυξη του γεωμετρικού μοντέλου. Στο διάγραμμα 1.1 παρουσιάζεται ένα γενικευμένο διάγραμμα της διαδικασίας της αντίστροφης μηχανικής που ακολουθείται.





Διάγραμμα 1.1: Γενικευμένη διαδικασία της αντίστροφης μηχανικής.

Η στρατηγική που συνηθίζεται να ακολουθείται για μια ολοκληρωμένη διαδικασία αντίστροφης μηχανικής περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

- Λόγοι για τη χρήση της μεθόδου
- Μέγεθος του αντικειμένου
- Αριθμός των αντικειμένων που θα σαρωθούν
- Εκτίμηση της πολυπλοκότητας του αντικειμένου
- Υλικό
- Χαρακτηριστικά εξωτερικής επιφάνειας
- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά
- Απαιτούμενη ακρίβεια [3]

## 1.4.1 Σάρωση

Το στάδιο της σάρωσης σχετίζεται με τη στρατηγική της, την τεχνική, την προετοιμασία του προς σάρωση τμήματος και την εκτέλεση της πραγματικής σάρωσης για την καταγραφή πληροφοριών που περιγράφουν όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός φυσικού μοντέλου, όπως βήματα, σχισμές και τρύπες. Κατά τη διαδικασία αυτή χρησιμοποιούνται τριδιάστατοι σαρωτές οι οποίοι σαρώνουν τη γεωμετρία του τμήματος, δημιουργώντας ένα σύννεφο σημείων, το οποίο καθορίζει τη γεωμετρία του μοντέλου. Αυτές οι συσκευές σάρωσης είναι διαθέσιμες ως ειδικά εργαλεία ή ως πρόσθετα στα υφιστάμενα υπολογιστικά εργαλεία με ψηφιακό έλεγχο (computer numerical control-CNC). Υπάρχουν δύο ξεχωριστοί τύποι τριδιάστατων σαρωτών, σαρωτές με αισθητήριο επαφής και οπτικοί σαρωτές χωρίς επαφή.

### 1.4.1.1 Σάρωση με επαφή

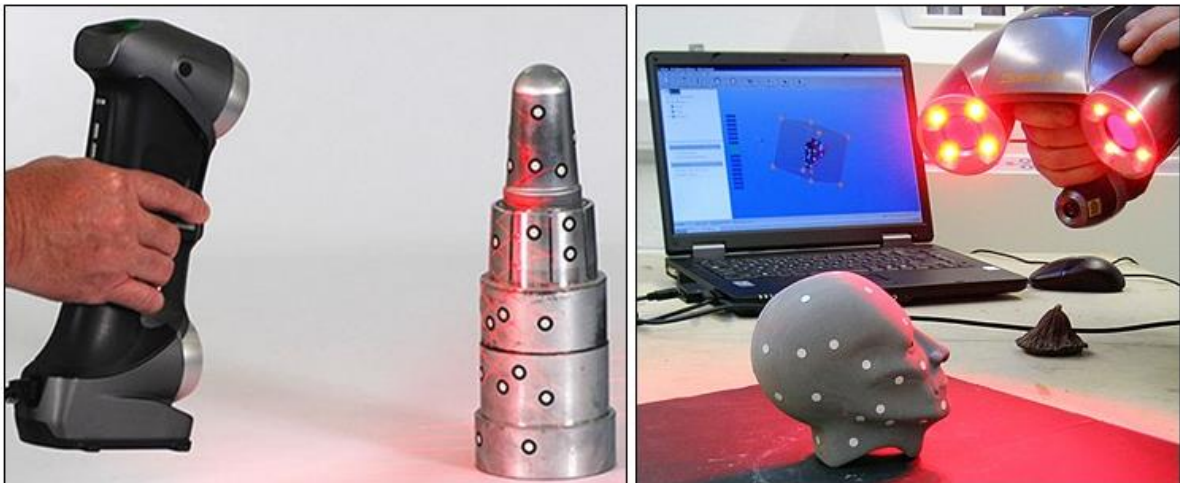
Αυτές οι συσκευές χρησιμοποιούν αισθητήρες επαφής οι οποίοι ακολουθούν αυτόματα τα περιγράμματα της φυσικής επιφάνειας. Σε αυτή τη μέθοδο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια εργαλειομηχανή μέτρησης συντεταγμένων (coordinate measuring machine-CMM) για την αποτύπωση της επιφάνειας όταν απαιτείται μεγάλη ακρίβεια ή μια απλή εργαλειομηχανή CNC στην οποία έχει προσαρμοστεί μια ακίδα επαφής, στην περίπτωση όπου οι απαιτήσεις ακρίβειας είναι μικρές. Ανάλογα με το μέγεθος του τμήματος που πρόκειται να σαρωθεί, οι μέθοδοι μπορεί να είναι αργές, λόγω του ότι κάθε σημείο δημιουργείται διαδοχικά στην άκρη της ακίδας. Οι ανιχνευτές πρέπει να εκτρέπονται προκειμένου να καταγράψουν ένα σημείο. Ως εκ τούτου πρέπει να διατηρείται ένας βαθμός πίεσης κατά τη διάρκεια της σάρωσης. Αυτή η μέθοδος σάρωσης δε συνιστάται σε μαλακά υλικά λόγω της πίεσης της επαφής καθώς δεν μπορούν να καταγραφούν ακριβή αποτελέσματα.



Εικόνα 1.2: Σάρωση με αισθητήρα αφής {2}.

### 1.4.1.2 Σάρωση χωρίς επαφή

Οι συσκευές σάρωσης χωρίς επαφή χρησιμοποιούν λέιζερ ή οπτικά συστήματα για λήψη δεδομένων. Παρόλο που αυτές οι συσκευές καταγράφουν μεγάλες ποσότητες δεδομένων σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα, υπάρχουν ορισμένα θέματα που σχετίζονται με αυτήν την τεχνολογία. Ορισμένα συστήματα μη επαφής έχουν προβλήματα δημιουργίας δεδομένων, όταν περιγράφουν επιφάνειες οι οποίες είναι παράλληλες με τον άξονα του λέιζερ. Παράλληλα, πολλά εξαρτήματα, ανάλογα με τη διαμόρφωση, μπορεί να απαιτούν την επανατοποθέτηση ή την περιστροφή του αντικειμένου σε διάφορες θέσεις, προκειμένου να αποτυπωθεί μια εσοχή ή ένα χαρακτηριστικό που έχει παραληφθεί στις αρχικές σαρώσεις. Επιπλέον, οι συσκευές αυτές χρησιμοποιούν φως για τη διαδικασία συλλογής δεδομένων με αποτέλεσμα να δημιουργείται πρόβλημα, όταν το φως προσκρούει σε γυαλιστερές επιφάνειες. Αυτά τα θέματα περιορίζουν τη χρήση αυτών των συσκευών σε τομείς της μηχανικής, όπου η ακρίβεια της παραγόμενης πληροφορίας είναι δευτερεύουσα σε σχέση με την ταχύτητα συλλογής δεδομένων [4].



Εικόνα 1.3: Σάρωση χωρίς επαφή [3].

### 1.4.2 Επεξεργασία σημείων

Σε αυτό το στάδιο, γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων σάρωσης και διακρίνεται σε δύο διαφορετικές φάσεις. Η πρώτη περιλαμβάνει την εισαγωγή των δεδομένων, μειώνοντας τον θόρυβο και τον αριθμό των σημείων, εκτελώντας μια σειρά προκαθορισμένων φίλτρων. Σε αυτή τη φάση είναι εφικτό να συγχωνευθούν πολλαπλά σύνολα δεδομένων σάρωσης. Μερικές φορές, είναι απαραίτητο να γίνονται πολλές σαρώσεις ενός συγκεκριμένου μέρους, όπως προαναφέρθηκε, προκειμένου να εξασφαλισθεί ότι έχουν σαρωθεί όλες οι απαιτούμενες λεπτομέρειες και λειτουργίες. Αυτό περιλαμβάνει την περιστροφή του αντικειμένου και κατά συνέπεια κάθε σημείο σάρωσης καθίσταται ιδιαίτερα σημαντικό. Το αποτέλεσμα αυτής της

επεξεργασίας είναι ένα καθαρό και ενωμένο σύνολο σημείων στην πιο κατάλληλη μορφή, το οποίο οδηγεί σε ένα μοντέλο πολυγωνικού πλέγματος. Ο πολλαπλός σχεδιασμός σάρωσης έχει άμεση επίδραση στη φάση επεξεργασίας σημείων. Η σωστή σχεδίαση των στοιχείων θα περιορίσει την προσπάθεια που απαιτείται στη φάση επεξεργασίας σημείων και την εισαγωγή σφαλμάτων από τη συγχώνευση πολλαπλών δεδομένων σάρωσης.

Η δεύτερη φάση αποτελείται από λειτουργίες εφαρμογής φίλτρων για την εξάλειψη μη επιθυμητών κορυφών, την εξομάλυνση της επιφάνειας, τη μείωση θορύβου και του αριθμού των πολυγώνων καθώς και λειτουργίες για το γεφύρωμα ανοιχτών επιφανειών προς τη δημιουργία του τελικού μοντέλου κλειστής επιφάνειας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπου ο σαρωτής αντί για σημεία, παράγει σαρώσεις της μορφής έτοιμων πολυγωνικών επιφανειών, η πρώτη φάση μπορεί να παραλειφθεί και η ένωση των σαρώσεων να γίνει απευθείας στη φάση δύο. Στην αγορά κυκλοφορούν αρκετά προϊόντα λογισμικού που σχεδόν αυτοματοποιούν τη συγκεκριμένη διαδικασία, με την προϋπόθεση ο χρήστης να έχει κατανοήσει πλήρως τη λειτουργία των ειδικών φίλτρων που χρησιμοποιούνται και στις δύο φάσεις [5].

### **1.4.3 Ανάπτυξη γεωμετρικού μοντέλου**

Με τον ίδιο τρόπο που οι εξελίξεις στις τεχνολογίες ταχείας παραγωγής πρωτοτύπων και εργαλείων συμβάλλουν στη σημαντική μείωση του χρόνου που απαιτείται για τη δημιουργία φυσικών αναπαραστάσεων από μοντέλα CAD, οι τρέχουσες τεχνολογίες της αντίστροφης μηχανικής συμβάλλουν στη μείωση του χρόνου δημιουργίας μοντέλων CAD από υπάρχουσες φυσικές αναπαραστάσεις.

Η δημιουργία μοντέλων CAD από δεδομένα σημείων είναι πιθανώς η πιο πολύπλοκη δραστηριότητα της αντίστροφης μηχανικής λόγω του ότι απαιτούνται ισχυροί αλγόριθμοι για τη δημιουργία επιφανειών που αντιπροσωπεύουν με ακρίβεια τις τριδιάστατες πληροφορίες που περιγράφονται από ένα σύνολο σημείων. Τα περισσότερα συστήματα CAD δε σχεδιάζονται για την εμφάνιση και επεξεργασία μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων και ως εκ τούτου νέα διακριτά πακέτα είναι απαραίτητα για την επεξεργασία των σημείων. Οι εφαρμογές της αντίστροφης μηχανικής για τη δημιουργία δεδομένων CAD είναι εξίσου σημαντικές με αυτές της τεχνολογίας που την υποστηρίζει.

Αυτή η φάση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον πραγματικό σκοπό της αντίστροφης μηχανικής. Παραδείγματος χάριν, στην περίπτωση που έπρεπε να εκτελεσθεί σάρωση ενός σπασμένου εργαλείου, το ενδιαφέρον θα εστιάζονταν στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου καθώς και στα δεδομένα του G-κώδικα (η σύνταξη του οποίου θα αναλυθεί στο κομμάτι της πειραματικής διαδικασίας) που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την

παραγωγή του, σε όσο το δυνατό σύντομο χρονικό διάστημα, με τη χρήση πολυαξονικών μηχανών CNC [6,7,8].

## **1.5 Εφαρμογές της αντίστροφης μηχανικής**

Η αντίστροφη μηχανική είναι μια πολυεπιστημονική γενική επιστήμη και ουσιαστικά μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε πεδίο παγκοσμίως. Οι κύριες εφαρμογές της αντίστροφης μηχανικής είναι είτε να επαναδημιουργήσει μια κατοπτρική εικόνα του αρχικού μέρους, να αποκωδικοποιήσει τον μηχανισμό μιας λειτουργίας, ή να παρακολουθήσει τα γεγονότα που συμβαίνουν. Χρησιμοποιείται ευρέως σε βιομηχανίες λογισμικού και τεχνολογίες πληροφοριών, από λογισμικό ανάπτυξης κώδικα μέχρι την ασφάλεια δικτύου στο διαδίκτυο. Χρησιμοποιείται επίσης για την ανακατασκευή των συμβάντων λίγο πριν και αμέσως μετά τα ατυχήματα στην αεροπορία, την αυτοκινητοβιομηχανία και άλλες μεταφορικές βιομηχανίες. Η εγκληματολογική επιστήμη είναι μια άλλη περιοχή όπου η αντίστροφη μηχανική χρησιμοποιείται για να βοηθήσει στην επίλυση εγκλημάτων. Άλλα πεδία, όπως τα ιατρικά συστήματα, η αρχιτεκτονική, ο τομέας του πολιτικού μηχανικού, η ναυπηγική βιομηχανία, και οι γκαλερί τέχνης, βρίσκουν επίσης πολλές εφαρμογές αντίστροφης μηχανικής. Χρησιμοποιείται στην παραγωγή πρωτοτύπων για νέο σχεδιασμό και επισκευές για τα χρησιμοποιημένα μέρη. Επιπλέον, χιλιάδες τμήματα διαφόρων προϊόντων επαναπροσδιορίζονται κάθε χρόνο χρησιμοποιώντας την αντίστροφη μηχανική για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις της αγοράς.

Η εφεύρεση της ψηφιακής τεχνολογίας έχει φέρει ουσιαστικά επανάσταση στον τομέα της αντίστροφης μηχανικής. Σε σύγκριση με τις αεροπορικές και αυτοκινητιστικές βιομηχανίες, οι εφαρμογές της ψηφιοποιημένης αντίστροφης μηχανικής στην επιστήμη της ζωής και της βιομηχανίας ιατρικών συσκευών έχουν αντιμετωπίσει περισσότερες προκλήσεις και έχουν προχωρήσει με έναν πιο μετριοπαθή ρυθμό. Αυτό οφείλεται εν μέρει στη λεπτή λειτουργία των ανθρώπινων οργάνων και στη μοναδική γεωμετρική τους μορφή. Λόγω του γεγονότος ότι δεν έχει γίνει πλήρως κατανοητή η πρωτοτυπία της μηχανικής του ανθρώπινου σώματος, η αντίστροφη μηχανική έχει λάβει μοναδικό μέρος στις βιοεπιστήμες και τις βιομηχανίες ιατρικών συσκευών, ιδιαίτερα στην εφαρμογή τεχνητών τμημάτων στο ανθρώπινο σώμα. Η εφαρμογή σαρωμένων εικόνων με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στην αντίστροφη μηχανική αποτελεί σημαντική βοήθεια για τους μηχανικούς στην ακριβή μοντελοποίηση προσαρμοσμένων τμημάτων που ταιριάζουν καλύτερα στον εκάστοτε ασθενή [9].

## 2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΜΙΚΡΟΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ΜΕ ΑΚΤΙΝΕΣ Χ

### 2.1 Εισαγωγή

Η απεικόνιση διδιάστατων εικόνων μιας επιφάνειας δείγματος ή λεπτών «φετών» μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της συμβατικής οπτικής ή ηλεκτρονικής μικροσκοπίας. Ωστόσο, δεν είναι εφικτό να εξαχθούν αποτελέσματα σχετικά με την τριδιάστατη δομή του δείγματος. Προκειμένου να αποκτηθεί μια τριδιάστατη δομή του προς μελέτη αντικειμένου, αυτό που μπορεί να πραγματοποιηθεί είναι να διαχωριστεί σε πολύ λεπτές «φέτες»/slices, οι οποίες στην πορεία μπορούν να απεικονιστούν στο οπτικό μικροσκόπιο και να μετατρέψουν τη διδιάστατη πληροφορία σε ένα τριδιάστατο μοντέλο δομής. Παρόλα αυτά, η μέθοδος δε θεωρείται ιδιαίτερα αξιόπιστη λόγω του ότι η δομή του αντικειμένου μπορεί να μεταβληθεί κατά τη διάρκεια της σύνθεσής του, οδηγώντας σε μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των διαδοχικών φετών.

Ένα σύστημα ακτίνων Χ παράγει διδιάστατες σκιάδεις εικόνες, πλήρων εσωτερικών τριδιάστατων δομών, αλλά σε μια κοινή διδιάστατη προβολή οι πληροφορίες που συλλέγονται δεν είναι πλήρως ξεκάθαρες. Μόνο ένα σύστημα τομογραφίας ακτίνων Χ μπορεί να επιτρέψει την απεικόνιση και τη μέτρηση αντικειμένων, με ολοκληρωμένες τριδιάστατες δομές, χωρίς κάποια συγκεκριμένη προετοιμασία ή χημική σταθεροποίηση του δείγματος [10]. Η τυπική χωρική ανάλυση συμβατικών ιατρικών σαρωτών κυμαίνεται από 1 έως 2.5 mm, που αντιστοιχεί σε μέγεθος κυψελίδας όγκου από 1 έως 10 mm<sup>3</sup>. Η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης και η μικροτομογραφία με ακτίνες Χ παρέχουν τη δυνατότητα βελτίωσης της χωρικής ανάλυσης [11].

Η μικροτομογραφία ή διαφορετικά microcomputed-tomography (micro-CT ή μCT) είναι μια τεχνική η οποία παράγει μια στοίβα εικόνων, υψηλής ανάλυσης, οι οποίες μετέπειτα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ψηφιακών τριδιάστατων μοντέλων. Βασίζεται στις αρχές της υπολογιστικής τομογραφίας (computed tomography, CT), οι οποίες ισχύουν και για τους σαρωτές που χρησιμοποιούνται στα νοσοκομεία, για την εξέταση οργάνων και οστών [12]. Η διαφορά είναι ότι χρησιμοποιώντας σταθερά εστιασμένες πηγές ακτίνων Χ και οπτικά μικροσκόπια, η μικροτομογραφία επιτρέπει την ανάλυση σε πάρα πολύ μικρού μεγέθους δείγματα [13].

Το πλεονέκτημα της χρήσης ενός οργάνου micro-CT σε σύγκριση με ένα CT είναι η σημαντικά υψηλότερη χωρική ανάλυση σε συνδυασμό με την καλύτερη οπτικοποίηση των εσωτερικών δομών [14]. Το micro-CT θεωρείται πλέον ως ένα από τα πιο δυναμικά και ελκυστικά εργαλεία για τη μελέτη της εσωτερικής δομής διαφόρων δειγμάτων από ποικίλους

κλάδους της επιστήμης όπως στον τομέα της βιολογίας [15, 16, 17], της παλαιοντολογίας [18], της γεωλογίας [19], της υδρολογίας [20], της ιατρικής [21] καθώς επίσης και στον τομέα της επιστήμης των υλικών [22, 23]. Η μικροτομογραφία αντιπροσωπεύει ένα συμπληρωματικό εργαλείο της επιστήμης καθότι επιτρέπει την έρευνα του προς μελέτη δείγματος, με ή χωρίς την επεξεργασία του, για την απόκτηση εικόνων της εσωτερικής του δομής [24]. Είναι μια μη καταστρεπτική μέθοδος και ταυτόχρονα παρέχει τη δυνατότητα επανασάρωσης του ίδιου δείγματος για μια διαφορετική μελέτη [25, 26]. Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία χρησιμοποιήθηκε ο μικροτομογράφος SkyScan 1272 της εταιρίας Bruker, ο οποίος επιτρέπει την επίτευξη χωρικής ανάλυσης στην κλίμακα των μικρομέτρων.

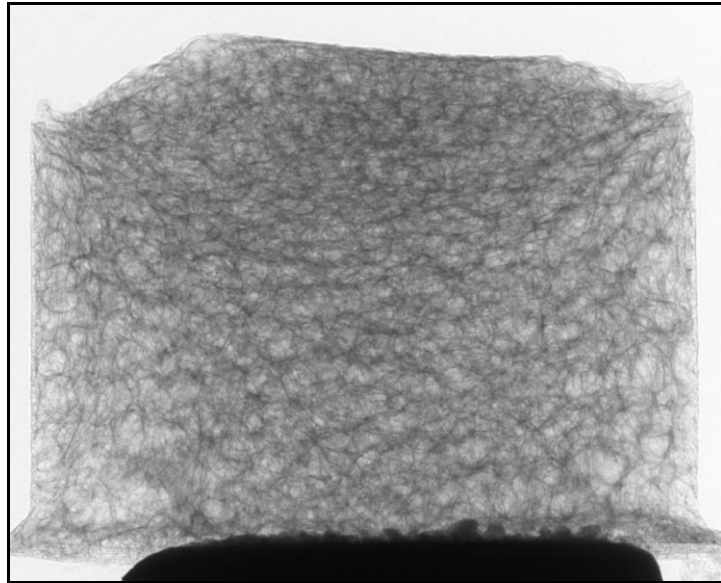


Εικόνα 2.1: Μικροτομογράφος Skyscan 1272.

## 2.2 Γενική αρχή λειτουργίας ενός μικροτομογράφου

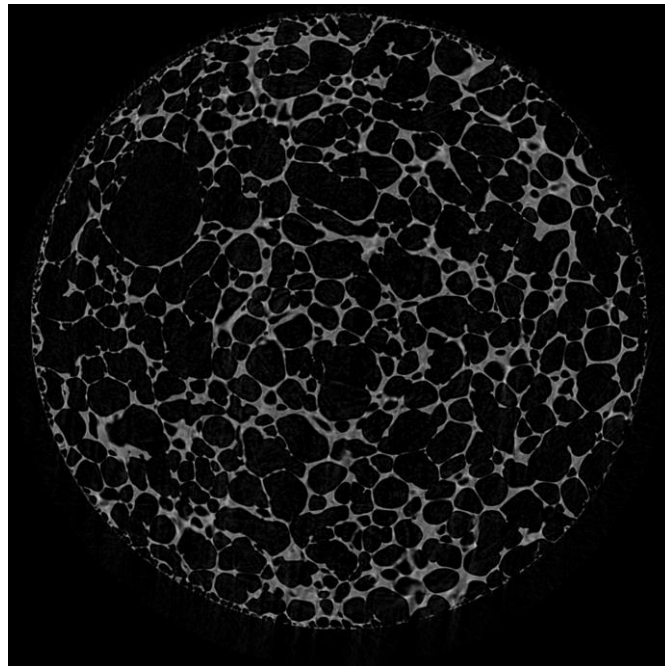
Η μικροτομογραφία είναι μια τεχνική μετάδοσης εικόνας μέσω ακτίνων X. Οι ακτίνες X εκπέμπονται από μια γεννήτρια ακτίνων X, οι οποίες ταξιδεύουν διαμέσου του δείγματος και καταγράφονται από έναν ανιχνευτή, αντιδιαμετρικά του πομπού για την παραγωγή της ακτινογραφίας (γνωστή ως εικόνα προβολής) [27]. Στη συνέχεια το δείγμα περιστρέφεται κατά ένα μικρό βήμα, το οποίο ορίζεται από τον εκάστοτε χρήστη και μια άλλη εικόνα προβολής

λαμβάνεται στη νέα θέση. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου το δείγμα περιστραφεί κατά 180 ή 360 μοίρες και παράξει μια σειρά από εικόνες προβολής.



**Εικόνα 2.2:** Εικόνα προβολής-Ικρίωμα από υλικό PLA (Bruker).

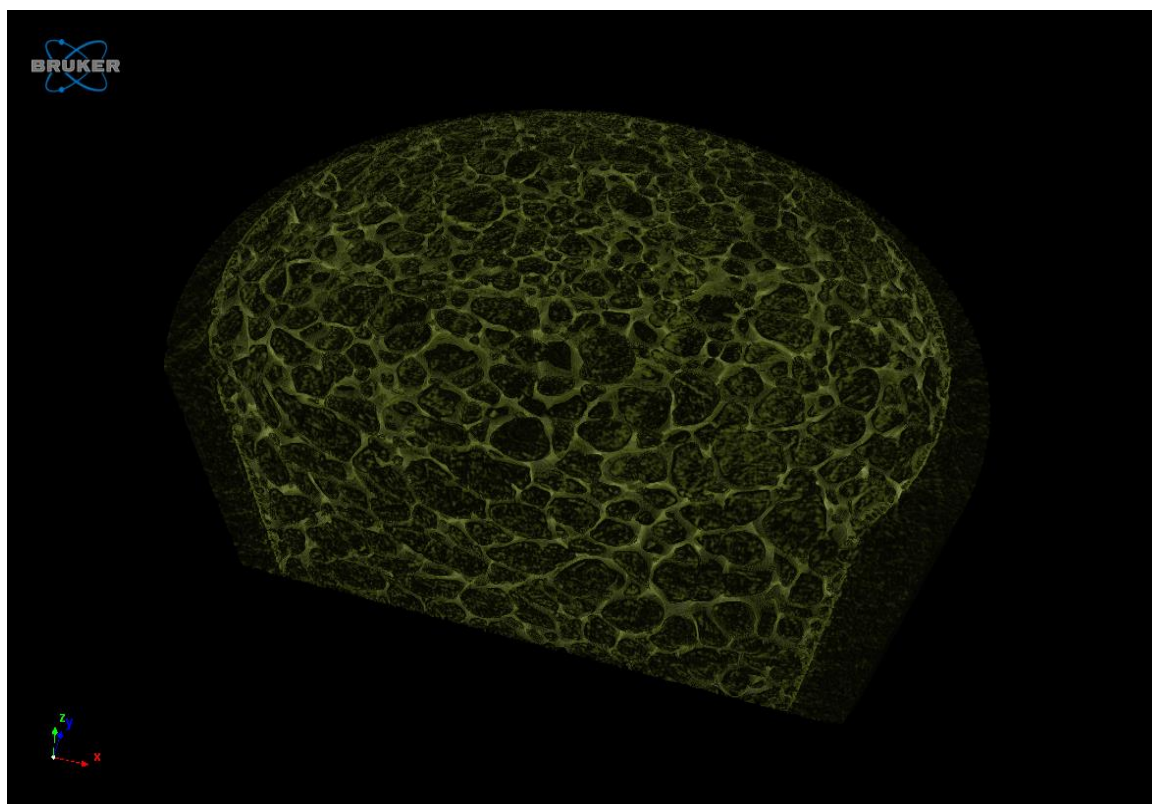
Στη συνέχεια, γίνεται η επεξεργασία των εικόνων προβολής με τη χρήση ειδικών λογισμικών, μέσω των οποίων εκτελούνται μερικές επιμέρους διορθώσεις προς τον σχηματισμό μιας πλήρους τριδιάστατης αναπαράστασης της εσωτερικής δομής του αντικειμένου. Οι εικόνες που προκύπτουν μέσα από μια τέτοια διαδικασία ονομάζονται ανακατασκευασμένες εικόνες.



**Εικόνα 2.3:** Ανακατασκευασμένη εικόνα ικριώματος (Bruker).



Το επόμενο στάδιο των ανακατασκευασμένων εικόνων είναι να διαμορφωθούν σε ογκομετρικά αντικείμενα 3-D για ποσοτική ανάλυση ή απεικόνιση της εσωτερικής δομής [28, 29, 30].



Εικόνα 2.4: 3-D Αναπαράσταση εσωτερικής δομής του ικριώματος (Bruker).

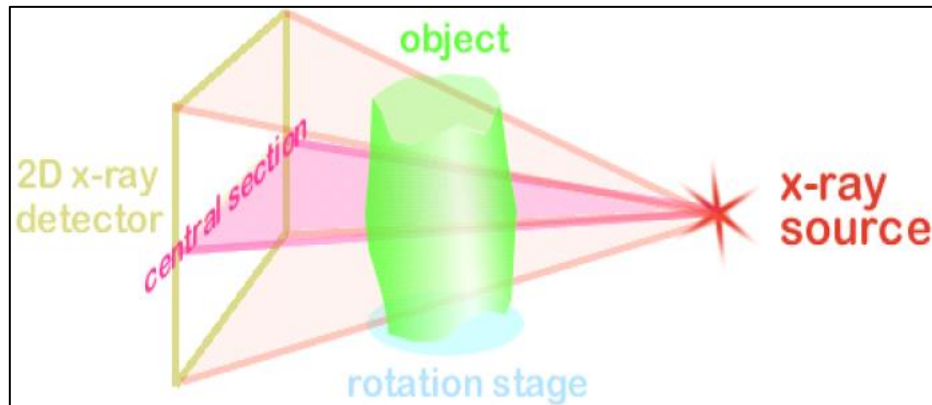
## 2.3 Απόκτηση τριδιάστατης ψηφιακής εικόνας

Για τη λήψη μιας τριδιάστατης εικόνας ενός δείγματος, μέσω της διαδικασίας σάρωσης με micro-CT, εκτελείται μια σειρά από συγκεκριμένα στάδια, τα οποία αναλύονται παρακάτω.

### 2.3.1 Προθέρμανση πηγής

Πριν από την έναρξη της σάρωσης, ένα βασικό στάδιο της διαδικασίας αποτελεί η προθέρμανση της πηγής. Η πηγή είναι σημαντικό να προθερμαίνεται πριν από κάθε χρήση προκειμένου να σταθεροποιηθεί η δέσμη πριν τη σάρωση. Οι ακτίνες X εκπέμπονται όταν κινούμενα ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας, τα οποία παράγονται σε μία κάθοδο, προσπίπτουν, προς ένα στόχο (Βολφράμιο, χαλκός κλπ.). Ο στόχος εκπέμπει ακτίνες X που διαπερνούν το δείγμα [31]. Όσο πιο λεπτή θα είναι η δέσμη ηλεκτρονίων που θα επικεντρωθεί στον στόχο, τόσο υψηλότερη θα είναι η ανάλυση των εικόνων που θα ληφθούν. Οι εκπεμπόμενες ακτίνες X έχουν σχήμα κώνου, όπου το σημείο έναρξης είναι ένα σημείο επί του στόχου και η εκπεμπόμενη δέσμη αποκλίνει σε κωνικό σχήμα. Το πλεονέκτημα ενός κωνικού σχήματος

είναι η ικανότητα να συλλάβει μεγαλύτερο όγκο σε μία μόνο περιστροφή σάρωσης. Μόλις ολοκληρωθεί το στάδιο της προθέρμανσης το δείγμα τοποθετείται μέσα στον σαρωτή [32, 33].



Εικόνα 2.5: Αναπαράσταση της εκπομπής των ακτίνων X [4].

### 2.3.2 Τοποθέτηση δείγματος

Ακολουθεί το στάδιο της σωστής τοποθέτησης του δείγματος. Το micro-CT απαιτεί ελάχιστη έως μηδαμινή προετοιμασία του δείγματος και αρκετές φορές το δείγμα μπορεί να σαρωθεί ακριβώς όπως παρέχεται. Λόγω της περιστρεφόμενης λειτουργίας του σαρωτή είναι σημαντικό το δείγμα να τοποθετηθεί σωστά και να αποτραπεί η οποιαδήποτε ελεύθερη κίνηση του δείγματος μέσα στο μηχάνημα κατά τη διάρκεια της σάρωσης [34]. Η τοποθέτηση πραγματοποιείται σε ειδικούς δειγματοφορείς, ανάλογα με το μέγεθος και το είδος του δείγματος. Για αυτό τον λόγο, ανάλογα με το δείγμα, αυτό μπορεί να τοποθετηθεί είτε εντός ενός πλαστικού σωλήνα, είτε να εγκιβωτιστεί μέσα σε ρητίνη ή να στερεοποιηθεί με ειδικό κερί το οποίο εφαρμόζεται ανάμεσα στο δείγμα και τον δειγματοφορέα [35]. Είναι σημαντικό τα βοηθητικά υλικά που χρησιμοποιούνται για την τοποθέτηση του δείγματος να είναι χαμηλής πυκνότητας για να μην απορροφούν την προσπίπτουσα ακτινοβολία.

Προτιμάται το δείγμα να τοποθετείται με μια ελαφριά κλίση έτσι ώστε να διασφαλίζεται ότι οι παράλληλες επιφάνειες στη δέσμη ακτίνων X να είναι οι ελάχιστες δυνατές. Αυτό συμβαίνει επειδή οι παράλληλες επιφάνειες εμποδίζουν τη σωστή διαπέραση των ακτίνων X και μπορούν να οδηγήσουν σε μεγάλα σφάλματα και έλλειψη λεπτομερειών στο σύνολο των δεδομένων. Στην περίπτωση όπου το δείγμα δεν είναι σωστά ασφαλισμένο στον δειγματοφορέα υπάρχει η πιθανότητα απόκτησης θολών εικόνων προβολής γεγονός που τις καθιστούν ακατάλληλες για ανάλυση. Επιπρόσθετα, ρυθμίζεται η απόσταση και το ύψος του δείγματος ως προς την πηγή. Προτιμάται η μικρότερη δυνατή απόσταση ανάμεσα στο αντικείμενο και την πηγή προκειμένου να εξαχθούν εικόνες ικανοποιητικής ανάλυσης [36].

### 2.3.3 Σάρωση του δείγματος

Για τη σωστή λειτουργία ενός μικροτομογράφου πρέπει να πληρούνται δύο προϋποθέσεις. Πρώτον, μερική απορρόφηση, που σημαίνει ότι ορισμένα φωτόνια ακτίνων X απορροφούνται από το υλικό, ενώ άλλα μεταδίδονται στον ανιχνευτή, και δεύτερον διαφορετική απορρόφηση, δηλαδή διαφορετικά υλικά εντός του αντικειμένου να έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά απορρόφησης για να δώσουν την επιθυμητή αντίθεση. Στην περίπτωση έλλειψης της διαφορετικής απορρόφησης, το αποτέλεσμα θα είναι ένα ομοιόμορφο επίπεδο γκριζου. Οι ακτίνες X διαδίδονται μέσω του δείγματος, όπου μερικά από τα φωτόνια ακτίνων X απορροφούνται και άλλα φτάνουν στον ανιχνευτή. Η γενική μορφή της εξίσωσης της εξασθένησης των ακτίνων X είναι η ακόλουθη:

$$I_1 = I_0 \cdot e^{-\mu t}$$

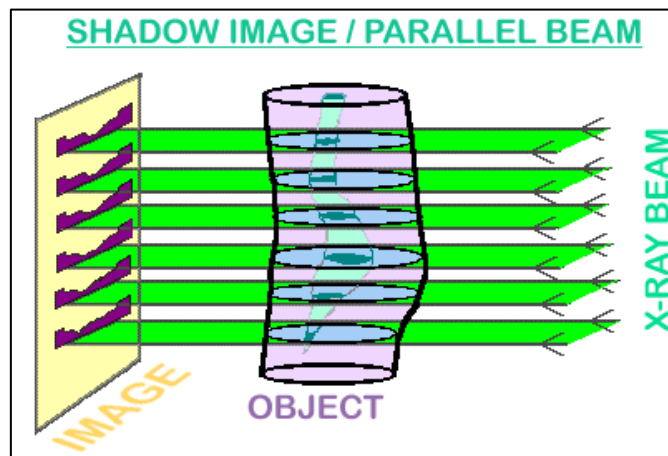
Όπου:

- $I_0$ : Η ένταση των ακτίνων X προτού φτάσει η δέσμη στο δείγμα
- $I_1$ : Η ένταση των ακτίνων X μετά τη διέλευση από το δείγμα
- $e$ : Η βάση των νεπερίων ή φυσικών λογαρίθμων (2.71828...)
- $\mu$ : Ο συντελεστής εξασθένησης των ακτίνων X
- $t$ : Το πάχος του δείγματος, σε επιλεγμένες μονάδες μήκους [37, 38]

Από την παραπάνω εξίσωση βλέπουμε ότι η απορρόφηση των ακτίνων δεν εξαρτάται μόνο από το είδος του υλικού αλλά και από το πάχος του υλικού που διαπερνούν οι ακτίνες. Οι μη απορροφούμενες ακτίνες X καταγράφονται από τον ανιχνευτή. Έτσι παράγεται μια μοναδική ακτινογραφική εικόνα παρόμοια με μια ακτινογραφία που θα λαμβάνονταν για ένα σπασμένο οστό. Το πυκνότερο υλικό (όπως το οστό) απορροφά περισσότερες ακτίνες X σε σχέση με ένα λιγότερο πυκνό υλικό (μαλακό ιστό), γι' αυτό και τα συστήματα ακτίνων X 2-D δε χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των πυκνοτήτων, εκτός εάν χρησιμοποιούν περισσότερες από μία κορυφές ενέργειας [36]. Στην περίπτωση όπου τα δείγματα περιέχουν χημικά στοιχεία με μεγάλο ατομικό αριθμό, οι ακτίνες X δε θα έχουν αρκετή ισχύ για να περάσουν από το δείγμα και να καταλήξουν στον ανιχνευτή. Για παράδειγμα, ο μόλυβδος απορροφά τις ακτίνες X αρκετά αποτελεσματικά ώστε να χρησιμοποιείται ως υλικό θωράκισης για τέτοιου είδους συστήματα, αλλά ως υλικό δεν είναι χρήσιμο για την ανίχνευση περισσότερο του ενός χιλιοστού σε ένα σύστημα ακτίνων X. Από την άλλη μεριά, το δείγμα πρέπει να είναι αρκετά πυκνό ώστε να απορροφηθεί ικανοποιητικός αριθμός ακτίνων X από αυτό, διαφορετικά

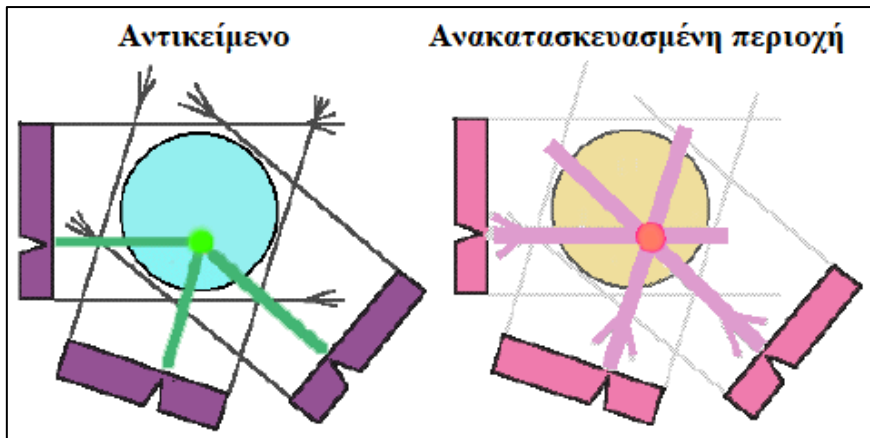
θεωρείται διαφανές. Στοιχεία με χαμηλό ατομικό αριθμό, όπως το καθαρό βηρύλλιο, μπορεί να είναι δύσκολο να απεικονιστούν λόγω του μικρού βαθμού απορρόφησής τους

Μια εικόνα σκιάς ακτίνων X αντιπροσωπεύει μια διδιάστατη προβολή από ένα τριδιάστατο αντικείμενο. Στην απλούστερη περίπτωση, μπορεί να γίνει περιγραφή του παράλληλου φωτισμού ακτίνων X. Σε αυτή την προσέγγιση, κάθε σημείο της εικόνας σκιάς περιέχει την ενσωμάτωση πληροφοριών απορρόφησης μέσα από το τριδιάστατο αντικείμενο κατά μήκος της διαδρομής της αντίστοιχης ακτίνας X (Εικόνα 2.6). Στην περίπτωση της παράλληλης γεωμετρίας, το πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί με τη διαίρεση της τριδιάστατης ανασυγκρότησης από τις διδιάστατες προβολές στη σειριακή ανακατασκευή των διδιάστατων φετών από μονοδιάστατες γραμμές σκιάς [11].



Εικόνα 2.6: Παράλληλος φωτισμός ακτίνων X {4}.

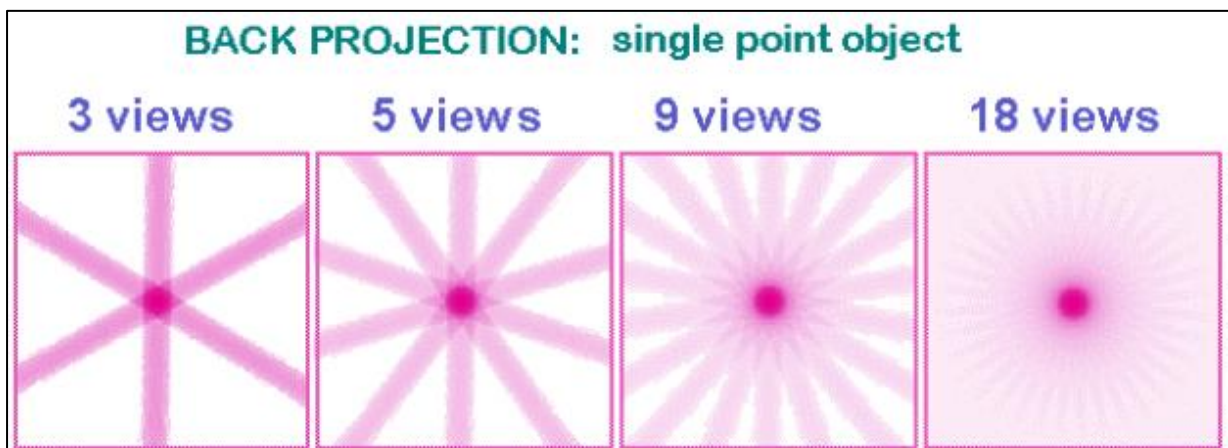
Η δυνατότητα αυτής της ανακατασκευής μπορεί να περιγραφεί με ένα απλό παράδειγμα ενός αντικειμένου με ένα μόνο σημείο σημαντικής απορρόφησης, σε ένα άγνωστο μέρος αυτού. Στη μονοδιάστατη γραμμή σκιάς παρατηρείται μείωση της έντασης απορρόφησης στην περιοχή του αντικειμένου. Σε αυτό το σημείο γίνεται αρχικοποίηση μιας κενής συστοιχίας από pixels στη μνήμη του υπολογιστή, που αντιστοιχούν σε μια πιθανή μετατόπιση του αντικειμένου. Παράλληλα, είναι σημαντικό όλα τα μέρη του ανακατασκευασμένου αντικειμένου να βρίσκονται μέσα στο οπτικό πεδίο. Λόγω του ότι υπάρχει η θέση της σκιάς από τα σημεία απορρόφησης του αντικειμένου, μπορούν να καταγραφούν στον υπολογιστή όλες οι πιθανές θέσεις των σημείων απορρόφησης στο εσωτερικό του αντικειμένου, ως γραμμές [11, 36, 39].



Εικόνα 2.7: Αντικείμενο με ένα σημείο απορρόφησης {4}.

### 2.3.4 Περιστροφή του δείγματος

Σε αυτό το στάδιο, αφού έχει ληφθεί μια εικόνα προβολής το δείγμα περιστρέφεται κατά ένα βήμα  $0.5^\circ$  ή λιγότερο και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Σε κάθε νέα θέση περιστροφής του αντικειμένου, προστίθενται στην περιοχή της ανασυγκρότησης γραμμές πιθανών θέσεων που αντιστοιχούν στη θέση της σκιάς. Η συγκεκριμένη ενέργεια ονομάζεται «πίσω προβολή». Μετά από ένα ορισμένο αριθμό βημάτων περιστροφής η θέση του σημείου απορρόφησης μπορεί να εντοπιστεί μέσα στην περιοχή της ανασυγκρότησης. Καθώς αυξάνεται ο αριθμός προβολών από διαφορετικά σημεία, ο εντοπισμός μπορεί να προσδιοριστεί καλύτερα. Κατά τη σάρωση υπάρχει η επιλογή να γίνει χρήση μόνο των  $180^\circ$  για τη μείωση του χρόνου της διαδικασίας, καθώς οι εικόνες προβολής από  $0^\circ$  έως  $180^\circ$  θεωρούνται εικόνες «καθρέφτες» των εικόνων που θα λαμβάνονταν από τις  $180^\circ$  έως τις  $360^\circ$  για συμμετρικά δείγματα. Ο αριθμός των αρχείων μετά το πέρας της σάρωσης εξαρτάται από το βήμα περιστροφής που ορίστηκε από τον χρήστη καθώς και από τη συνολική περιστροφή. Με την ολοκλήρωση της σάρωσης μπορεί να αρχίσει το στάδιο της ανασυγκρότησης των εικόνων προβολής του δείγματος [40].



Εικόνα 2.8: Λήψη προβολών από διαφορετικές γωνίες {4}.

### **2.3.5 Ανασυγκρότηση των εικόνων προβολής**

Το στάδιο της ανασυγκρότησης χαρακτηρίζεται ως η διαδικασία υπολογισμού της εσωτερικής δομικής πληροφορίας από τις εικόνες προβολής. Αυτή η διαδικασία οδηγεί σε μια στοίβα εικόνων ανακατασκευής, οι οποίες αναφέρονται και ως «εικόνες εγκάρσιας τομής» ή slices. Ο πιο παραγωγικός αλγόριθμος ανασυγκρότησης είναι ο αλγόριθμος ανασυγκρότησης δέσμης κώνου Feldkamp, Davis και Kemp (FDK), ο οποίος είναι μια μορφή φιλτραρισμένης οπίσθιας προβολής (FDP) [41]. Οι ληφθείσες γωνιακές προβολές σκιάς χρησιμοποιούνται για την ανακατασκευή των εικονικών «φετών» μέσω του αντικειμένου. Στη συνέχεια δημιουργείται μια σειρά «φετών» με τη χρήση του αλγόριθμου ανασυγκρότησης. Αυτά τα ακατέργαστα δεδομένα δεν αποτελούν ακόμα μια εικόνα, αλλά έναν πίνακα αριθμών που συγκρατούν τις τιμές απορρόφησης στην ανακατασκευασμένη διατομή. Τα slices μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απεικόνιση της εσωτερικής δομής, για επιπρόσθετη ανάλυση του αντικειμένου ακόμα και να ανακατασκευαστούν σε εικονικά μοντέλα 3-D, να αποτυπωθούν σε ταινίες όπως επίσης να τυπωθούν σε τριδιάστατα μοντέλα, με τη χρήση ειδικών λογισμικών. Με τη χρήση αυτών των ειδικών λογισμικών ανασυγκρότησης υπάρχει η επιλογή περικοπής του οπτικού πεδίου έτσι ώστε να μειωθεί ο συνολικός όγκος ανακατασκευής και παράλληλα να μειωθεί ο συνολικός όγκος δεδομένων καθώς απαιτείται λιγότερη μνήμη. Η συγκεκριμένη επιλογή καθίσταται ιδιαίτερα χρήσιμη στην περίπτωση όπου ο χρόνος ή η υπολογιστική ισχύς που διατίθεται είναι περιορισμένη [42].

## **2.4 Αστοχίες κατά τη μικροτομογραφία**

Προβλήματα της συγκεκριμένης τεχνικής που μπορούν να εμφανιστούν πιθανόν να οφείλονται σε περιορισμένη ροή των ακτίνων X, σε διακριτή δειγματοληψία και σκέδαση των ακτίνων X. Όλα τα παραπάνω οδηγούν στην αύξηση της εμφάνισης αστοχιών στις ανακατασκευασμένες εικόνες, γεγονός που αποτρέπει την απόκτηση πλήρως λεπτομερών δομών. Σκλήρυνση της δέσμης των ακτίνων X και εμφάνιση δακτυλίων είναι μερικά από τα σφάλματα που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της σάρωσης [43].

### **2.4.1 Σκλήρυνση της δέσμης ακτίνων X**

Αποτελεί ένα από τα πιο συνηθισμένα σφάλματα που προκύπτουν στα τομογραφικά συστήματα που χρησιμοποιούν συμβατικές πολυχρωματικές πηγές ακτίνων X. Καθώς οι ακτίνες X περνούν μέσα από το σώμα, φωτόνια ακτίνων X χαμηλής ενέργειας εξασθενούν πιο εύκολα σε αντίθεση με την υπόλοιπη ομάδα των φωτονίων υψηλής ενέργειας. Έτσι, η μετάδοση της δέσμης δεν ακολουθεί την απλή εκθετική συμπεριφορά που παρατηρείται σε μια

μονοχρωματική ακτινογραφία [44]. Το συγκεκριμένο πρόβλημα εμφανίζεται έντονα σε υλικά που περιέχουν στοιχεία με υψηλό ατομικό αριθμό όπως σε οστά, στο ιώδιο ή σε μέταλλα. Σε σύγκριση με τον χαμηλό ατομικό αριθμό, ενώσεις που περιέχουν στοιχεία υψηλού ατομικού αριθμού έχουν δραματικά υψηλή εξασθένηση σε χαμηλότερες ενέργειες [45]. Για τις ακτίνες X χαμηλής ενέργειας, η εξασθένηση οφείλεται κατά βάση στο φωτοηλεκτρικό αποτέλεσμα και είναι ανάλογη του λόγου:

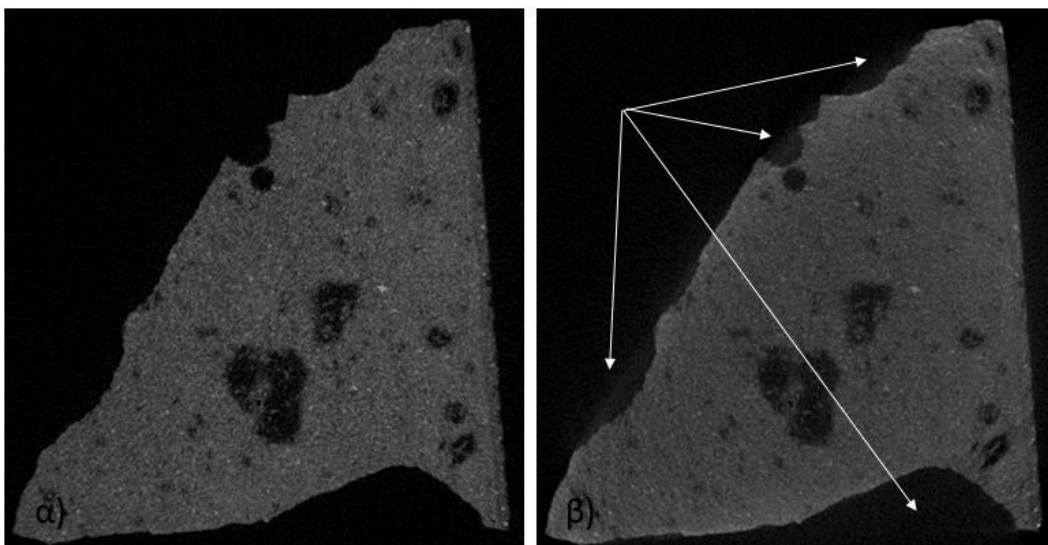
$$\frac{Z^3}{E^3}$$

- Z: Ατομικός αριθμός
- E: Ενέργεια

Αντίθετα, στις υψηλές ενέργειες η εξασθένηση είναι ανάλογη του λόγου:

$$\frac{1}{E}$$

Επειδή η εξασθένηση είναι συνήθως μεγαλύτερη προς το κέντρο του δείγματος σε σχέση με την περιφέρειά του, αυτό έχει ως αποτέλεσμα το δείγμα να εμφανίζεται λιγότερο πυκνό προς το κέντρο. Επιπλέον, η σκλήρυνση της δέσμης μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία ραβδώσεων μεταξύ δύο ή περισσότερων σημείων όπου εξασθενούν τα χαρακτηριστικά του δείγματος, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα [43].

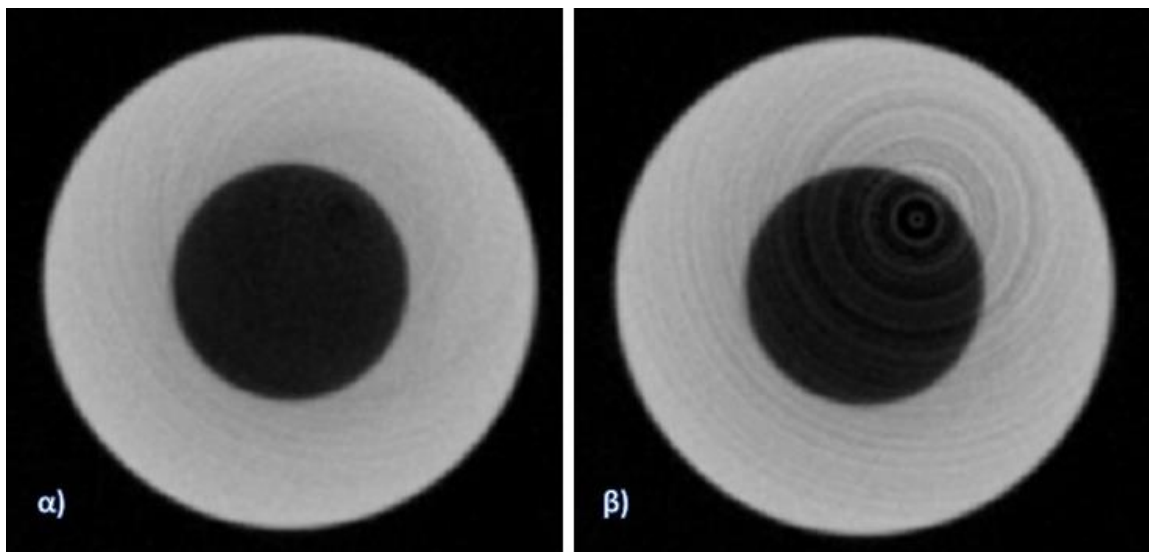


**Εικόνα 2.9:** Σύνθετο τσιμέντο με CNTs α) Δείγμα χωρίς σκλήρυνση των ακτίνων X, β) Δείγμα με σκλήρυνση των ακτίνων X-Δημιουργία ραβδώσεων στα σημεία που υποδεικνύουν τα βέλη (R-Nano).

## 2.4.2 Εμφάνιση δακτυλίων

Η εμφάνιση των δακτυλίων προκύπτει από τις διαφορές στην ευαισθησία των γειτονικών στοιχείων του ανιχνευτή [46]. Εμφανίζονται ως ένας αριθμός ομόκεντρων δακτυλίων στις εικόνες που λαμβάνονται από τη σάρωση. Καθώς τα επίπεδα του γκριζου στις ανακατασκευασμένες εικόνες επηρεάζονται από τους δακτυλίους, η ποσοτική ανάλυση καθίσταται μείζον πρόβλημα [47]. Επιπλέον, άλλες επεξεργασίες όπως η μείωση του θορύβου ή η κατάτμηση της εικόνας παρεμποδίζονται σημαντικά από την ύπαρξη αυτής της αστοχίας. Υπάρχουν πολλές αιτίες για την εμφάνιση των δακτυλίων οι οποίες σχετίζονται με την απόκριση μεμονωμένων εικονοστοιχείων. Στη χειρότερη περίπτωση, εάν κάποια στοιχεία του ανιχνευτή είναι μειωμένης απόδοσης λόγω κατασκευαστικών ελαττωμάτων, οι δακτύλιοι εμφανίζονται ως κύκλοι χωρίς διαφορά στάθμης γκριζου, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.9 [48]. Στους σύγχρονους σαρωτές, αυτή η κατάσταση είναι βελτιωμένη και τα στοιχεία του ανιχνευτή είναι γενικά υψηλής ποιότητας. Ωστόσο, η απόκρισή τους στο εισερχόμενο σήμα συνήθως δεν είναι όπως αναμένεται λόγω των ακόλουθων λόγων:

- Μετατόπιση της ευαισθησίας του στοιχείου του ανιχνευτή μεταξύ των βαθμονομήσεων του λευκού πεδίου (μπορεί να προκαλείται λόγω αστάθειας της θερμοκρασίας)
- Μη γραμμική απόκριση του στοιχείου ανίχνευσης που προκαλείται από τη σκλήρυνση της δέσμης
- Μετατόπιση της διόρθωσης του λευκού πεδίου του ανιχνευτή λόγω ελαττωματικών σημείων του υλικού [49]

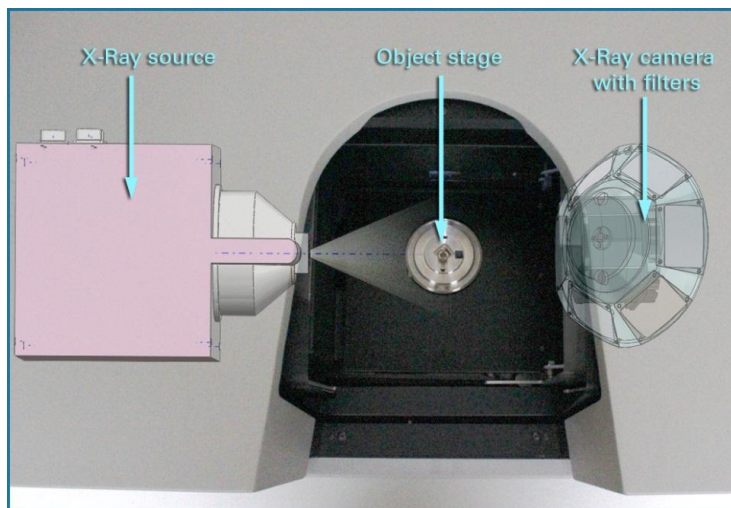


**Εικόνα 2.10:** Μεταλλική βαλβίδα α) Δείγμα χωρίς εμφάνιση «δακτυλιδιού», β) Δείγμα με έντονη την παρουσία εμφάνισης του «δακτυλιδιού» (Bruker).



## 2.5 Δομή του σαρωτή SkyScan 1272

Η δομή του σαρωτή, μέσα στον χώρο όπου τοποθετείται το δείγμα παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 2.11: Δομή του σαρωτή SkyScan 1272 {4}.

Ο σαρωτής αποτελείται από μια πηγή ακτίνων X, την κάμερα που συλλέγει τις εικόνες προβολής και το ενδιάμεσο σημείο στο οποίο τοποθετείται το εκάστοτε προς μελέτη δείγμα. Η πηγή λειτουργεί σε 20-100 kV με μέγιστη ισχύ 100W και παράγει ακτίνες X από ένα μικρό εστιακό σημείο για την εξασφάλιση εικόνων με μεγαλύτερες λεπτομέρειες μέσα στο αντικείμενο. Το σύστημα χρησιμοποιεί φυσική διάδοση δέσμης ακτίνων X μεταξύ πηγής και κάμερας. Στην περίπτωση που το αντικείμενο βρίσκεται κοντά στην πηγή, η εικόνα του θα μεγεθυνθεί σημαντικά στην κάμερα ενώ στην περίπτωση που το αντικείμενο τοποθετηθεί κοντά στην κάμερα θα προβληθεί με σχετικά μικρότερη μεγέθυνση. Η μεγέθυνση είναι ανάλογη της απόστασης της πηγής από την κάμερα και αντίστοιχα της πηγής από το αντικείμενο. Με την κατάλληλη μετακίνηση του αντικειμένου ανάμεσα στην πηγή και την κάμερα το σύστημα μπορεί να προσαρμόσει την απαραίτητη μεγέθυνση [50, 51].

Η κάμερα που χρησιμοποιείται στον σαρωτή είναι τοποθετημένη στη δεξιά πλευρά του με δύο διαθέσιμες επιλογές κάμερας, 16Mp και 11Mp (συγκεκριμένα η κάμερα του σαρωτή που διαθέτει το εργαστήριο R-Nano είναι 11Mp), οι οποίες περιέχουν αισθητήρα CCD συνδεδεμένο με οπτικές ίνες σε λεπτό σπινθηριστικό στρώμα, πίσω από ένα παράθυρο άμορφου άνθρακα για την προστασία του CCD από το ορατό φως. Η ακτινοβολία των ακτίνων X περνάει από ένα λεπτό παράθυρο άνθρακα και μετατρέπεται μέσω σπινθηριστή σε ορατό φως. Αυτή η εικόνα διέρχεται μέσω των οπτικών ινών χωρίς καμία εξασθένηση και καταλήγει στον αισθητήρα CCD όπου μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα. Έπειτα το ηλεκτρικό σήμα ψηφιοποιείται μέσω της κάμερας και η πληροφορία μεταφέρεται στον υπολογιστή. Για τη

διατήρηση της σταθερής θερμοκρασίας του αισθητήρα CCD και την αποφυγή της επαναβαθμονόμησης που συνδέεται με διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, η κάμερα περιέχει ψύκτρα στερεάς κατάστασης, επιτρέποντας τη διατήρηση σταθερού επιπέδου θερμοκρασίας για τον αισθητήρα CCD με πολύ υψηλή ακρίβεια [52]. Παράλληλα, η κάμερα περιέχει έναν προσαρμοσμένο κινητήρα αλλαγής φίλτρου, έξι θέσεων. Επιτρέπει την κάλυψη του μπροστινού παραθύρου της κάμερας με επιλεγμένο λεπτό μεταλλικό φίλτρο για την ακριβή επιλογή ενέργειας της ακτινοβολίας της δέσμης. Τυπικά η μία από τις έξι θέσεις δεν έχει φίλτρο για υλικά με χαμηλή απορρόφηση ακτίνων X, ενώ τις υπόλοιπες θέσεις καταλαμβάνουν διαφορετικά μεταλλικά φύλλα με διαφορετικά υλικά και πάχος. Τα φίλτρα θα έπρεπε να μπου αμέσως μετά την πηγή της δέσμης πριν το δείγμα, ώστε να προσπίπτει στο δείγμα κατά το δυνατόν ισοενεργειακή δέσμη. Η τοποθέτησή τους πριν τον ανιχνευτή αναιρεί σε ένα βαθμό τις αντιθέσεις που προκύπτουν από την απορρόφηση του δείγματος. [53].

Στο κεντρικό τμήμα του συστήματος γίνεται η τοποθέτηση του δείγματος. Το τμήμα αυτό περιλαμβάνει έναν περιστρεφόμενο δίσκο για την περιστροφή των δειγμάτων κατά τη διάρκεια της σάρωσης και μπορεί να μετακινείται γραμμικά κατά τους άξονες XYZ για την ακριβή τοποθέτηση του αντικειμένου και την αλλαγή της μεγέθυνσης. Όλα τα στάδια τοποθέτησης και η μηχανοκίνητη πόρτα κινούνται με ηλεκτρονικά μοτέρ με 9 άξονες, τα οποία λειτουργούν με μικροβήματα (με ακρίβεια μέχρι το 1/128 του βήματος του φυσικού βηματικού μοτέρ) και μπορούν να παρέχουν ομαλή τοποθέτηση με προγραμματιζόμενες καμπύλες επιτάχυνσης/απόκλισης. Το στάδιο τοποθέτησης του αντικειμένου είναι επίσης εξοπλισμένο με μια έγχρωμη οπτική κάμερα, η οποία επιτρέπει στον χειριστή να δει όλες τις κινήσεις του δείγματος μέσα στο θωρακισμένο θάλαμο και να αποφύγει την οποιαδήποτε σύγκρουση μεγάλων αντικειμένων με την πηγή των ακτίνων X.

Το σύστημα δε διαθέτει διακόπτη τροφοδοσίας. Η ισχύς του συστήματος μπορεί να ενεργοποιηθεί και να απενεργοποιηθεί με εντολές από λογισμικό ελέγχου που αποστέλλεται μέσω θύρας USB. Με την εκκίνηση του λογισμικού ελέγχου εκκίνησης ενεργοποιείται ο σαρωτής και σε κάθε κλείσιμο του λογισμικού ελέγχου, ο σαρωτής απενεργοποιείται αυτόματα. Το λογισμικό υποστηρίζει επίσης την αυτόματη απενεργοποίηση του σαρωτή και του υπολογιστή ελέγχου (αν επιλεγεί) μετά από μακράς διάρκειας σάρωση και μετά από χρονοβόρες διαδικασίες βαθμονόμησης και δοκιμής σταθερότητας του σαρωτή [11].

## **3 ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ**

### **3.1 Εισαγωγή**

Η τεχνολογία της τριδιάστατης εκτύπωσης (3-D Printing), η οποία αναφέρεται επίσης και ως προσθετική κατασκευή (ΠΚ, Additive Manufacturing), σε αντίθεση με τις μεθοδολογίες αφαιρετικής παραγωγής είναι μια διαδικασία ελεγχόμενης συνένωσης διαδοχικών στρώσεων υλικού για την κατασκευή αντικειμένων, μέσω της χρήσης ψηφιακών τριδιάστατων μοντέλων. Αυτή η αναδύομενη τεχνολογία φέρνει την επανάσταση στη μεταποιητική βιομηχανία με την ικανότητά της να μετατρέπει τα ψηφιακά δεδομένα σε φυσικά μέρη. Λόγω του ότι η συγκεκριμένη τεχνολογία παράγει αντικείμενα με την προσθήκη υλικού συμβάλλει στη μείωση των αποβλήτων, ενώ παράλληλα επιτυγχάνει ικανοποιητική γεωμετρική ακρίβεια. Η ξεχωριστή ικανότητα παραγωγής σύνθετων σχημάτων και δομών έχει ήδη καταστήσει την τεχνολογία αυτή ανεκτίμητη ως προς την παραγωγή πρωτοτύπων, όπως πολλαπλές μηχανές στον χώρο της αυτοκινητοβιομηχανίας και εργαλεία, όπως καλούπια επενδύσεων χύτευσης σε κοσμηματοπωλεία και στην αεροναυπηγική βιομηχανία [54].

### **3.2 Ιστορική αναδρομή**

Το πρώτο εμπορικά διαθέσιμο σύστημα ΠΚ εμφανίστηκε στα τέλη της δεκαετίας του 80', από την εταιρία 3-D Systems των ΗΠΑ. Η λειτουργία του εκτυπωτή βασίζονταν στις αρχές της στερεολιθογραφίας (Stereolithography apparatus, SLA) και για πρώτη φορά κατάφεραν οι χρήστες της συγκεκριμένης τεχνολογίας να παράξουν ένα φυσικό μοντέλο, μεγάλης γεωμετρικής πολυπλοκότητας, μέσω της αξιοποίησης ψηφιακών δεδομένων. Έκτοτε, ακολούθησαν επιπλέον τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα της ΠΚ, όπως η μέθοδος εναπόθεσης υλικού (Fused Deposition Modelling, FDM), η επιλεκτική συγκόλληση εναπόθεσης (Selective Deposition Lamination, SDL) και η επιλεκτική συσσωμάτωση με δέσμη laser (Selective Laser Sintering, SLS).

Με την πάροδο του χρόνου, καθώς οι χρήστες αποκτούσαν μεγαλύτερη εξοικείωση με τις μηχανές της ΠΚ, αναπτύχθηκαν νέες εφαρμογές αυτής της τεχνολογίας. Παράλληλα, σημειώθηκε βελτίωση τόσο στα υλικά, όπως για παράδειγμα νέες ρητίνες με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, όσο και στον τεχνολογικό τομέα, όπως πιο γρήγορες και ακριβείς κατασκευαστικές τεχνικές [55]. Εταιρίες όπως η General Motors υιοθέτησαν από νωρίς την τεχνολογία της ΠΚ και το 1991, βασισμένοι στη μέθοδο της στερεολιθογραφίας, ενσωματώθηκαν στον χώρο της ταχείας κατασκευής εργαλείων και πρωτοτυποποίησης εξαρτημάτων, όπως το περίβλημα της μύτης του κινητήρα. Στην πορεία, το 1993 η εταιρία

Soligen έφερε στην αγορά την παραγωγή κελύφους με τη μέθοδο της άμεσης χύτευσης, ενώ η εταιρία 3-D Systems παρουσίασε τη μέθοδο Quickcast, με την οποία γίνεται εφικτή η παραγωγή εργαλείων με έμμεσο τρόπο, με τη χρήση εξαρτημάτων ΠΚ. Τριδιάστατοι εκτυπωτές, βασισμένοι στην τεχνολογία συμβατικών εκτυπωτών, έκαναν την εμπορική τους εμφάνιση το 1996, ενώ το 1998 η εταιρία Optomec έφερε στην αγορά το πρώτο σύστημα Laser Engineered Net Shaping (LENS), με τη χρήση μεταλλικών υλικών υπό μορφή σκόνης. Με το σύστημα LENS ήταν εφικτή η διαδικασία παραγωγής πλήρως πυκνών μεταλλικών εξαρτημάτων, χωρίς την ύπαρξη κενών στην εσωτερική τους δομή. Ένα χρόνο αργότερα, οι Fockele και Schwarze παρουσίασαν για πρώτη φορά το σύστημα της επιλεκτικής τήξης με laser (Selective Laser Melting, SLM) [56].

Από το 2000 και έπειτα αναπτύχθηκαν και ενσωματώθηκαν στην αγορά επιπλέον συστήματα ΠΚ και καθώς εξελίσσονταν η διαδικασία παραγωγής πυκνών μεταλλικών εξαρτημάτων γεννήθηκε το ενδιαφέρον ως προς την άμεση παραγωγή τους στην αεροδιαστημική και αυτοκινητιστική βιομηχανία. Καθώς ορισμένες εταιρείες, όπως η αεροπορική εταιρία Boeing, χρησιμοποιούσαν ήδη την ΠΚ για την παραγωγή εξαρτημάτων, η ανάπτυξη διεθνών προτύπων αναμενόταν να βοηθήσει διάφορες εταιρείες να συντονίσουν τις προσπάθειες έρευνας και εμπορευματοποίησης και να αυξήσουν περαιτέρω τη χρήση της ΠΚ για άμεση παραγωγή [57]. Στην πορεία, το 2002 οι επιστήμονες κατασκεύασαν ένα μικροσκοπικό λειτουργικό τριδιάστατο νεφρό με την ικανότητα να φιλτράρει το αίμα και να παράγει αραιωμένα ούρα σε ένα ζώο. Αυτή η εφεύρεση οδήγησε στη διεξαγωγή ερευνών στο Ινστιτούτο Wake Forest στον τομέα της Αναγεννητικής Ιατρικής με στόχο την εκτύπωση οργάνων και ιστών [58]. Τρία χρόνια αργότερα, ο Δρ. Adrian Bowyer [59] στο Πανεπιστήμιο του Bath ιδρύει την RepRap, μια πρωτοβουλία ανοιχτού κώδικα για τη δημιουργία ενός 3-D εκτυπωτή ο οποίος θα έχει τη δυνατότητα να αναπαράγει τα περισσότερα από τα δικά του εξαρτήματα. Το όραμα αυτού του έργου ήταν η διανομή των RepRap μονάδων με μειωμένο κόστος σε ιδιώτες, παρέχοντας την ευκαιρία να δημιουργήσουν προϊόντα καθημερινής χρήσης από μόνοι τους. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται χαρακτηριστικά το τεχνητό τυπωμένο νεφρό καθώς και ένας εκτυπωτής RepRap, αντίστοιχα.

Τη χρονιά του 2006 καθίσταται βιώσιμη η πρώτη μηχανή SLS. Αυτός ο τύπος μηχανής χρησιμοποιεί λέιζερ για την τήξη υλικών σε προϊόντα 3-D. Αυτή η ανακάλυψη ανοίγει την πόρτα στη μαζική προσαρμογή και στην κατασκευή βιομηχανικών τμημάτων [60]. Την ίδια χρονιά, η εταιρία Objet, ένας τριδιάστατος εκτυπωτής συστημάτων και προμηθευτής υλικών, δημιουργεί μια μηχανή ικανή να εκτυπώνει σε πολλαπλά υλικά, συμπεριλαμβανομένων ελαστομερών και πολυμερών. Το μηχάνημα επιτρέπει την κατασκευή ενός μόνο τμήματος με

ποικίλες πυκνότητες και ιδιότητες υλικού. Το 2008 κυκλοφορεί για πρώτη φορά το έργο της RepRap με το όνομα Darwin, ένας τριδιάστατος εκτυπωτής ο οποίος μπορεί να εκτυπώσει την πλειοψηφία των δικών του εξαρτημάτων, επιτρέποντας στους χρήστες, είτε είναι καλλιτέχνες, αρχιτέκτονες είτε ερασιτέχνες σχεδιαστές να δημιουργήσουν τα τριδιάστατα σχέδιά τους και να τα φέρουν στη φυσική τους μορφή, με χαμηλό κόστος. Παράλληλα, την ίδια χρονιά σημειώνεται σημαντική εξέλιξη στον τομέα των προσθετικών μελών του ανθρωπίνου σώματος. Καταγράφεται ο πρώτος άνθρωπος που περπατάει με τριδιάστατο εκτυπωμένο πόδι, με όλα τα μέλη του προσθετικού ποδιού να είναι εκτυπωμένα στην ίδια περίπλοκη δομή με το φυσικό πόδι, χωρίς να απαιτείται η συναρμολόγησή τους [61].



**Εικόνα 3.1:** α) Τεχνητό νεφρό και άλλα μέλη του σώματος, β) Εκτυπωτής της RepRap [5, 6].

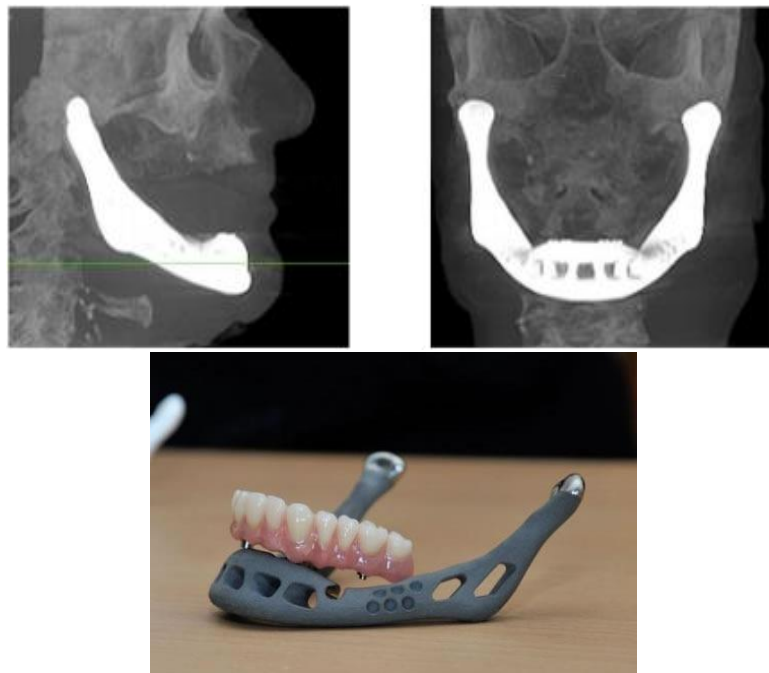
Ένα χρόνο αργότερα, η εταιρία MakerBot κυκλοφορεί στην αγορά τους τριδιάστατους εκτυπωτές DIY kits, επιτρέποντας στους αγοραστές να κατασκευάσουν τους δικούς τους εκτυπωτές και τα επιθυμητά τους προϊόντα. Ταυτόχρονα, την ίδια χρονιά η εταιρία Organovo, βασιζόμενη στην τεχνογνωσία του Δρ. Gabor, χρησιμοποιεί έναν 3-D εκτυπωτή για την εκτύπωση των πρώτων αιμοφόρων αγγείων [62]. Τη χρονιά του 2011 οι μηχανικοί του Πανεπιστημίου του Southampton σχεδίασαν και κατασκεύασαν το πρώτο μη επανδρωμένο 3-D αεροσκάφος σε διάστημα μόλις επτά ημερών με κόστος £5000. Σε αυτό το έργο σχεδιάστηκαν ελλειπτικά φτερά, ένα ακριβές χαρακτηριστικό, τα οποία συμβάλλουν στη βελτίωση της αεροδυναμικής απόδοσης. Ταυτόχρονα, την ίδια χρονιά κατασκευάστηκε το πρώτο παγκοσμίως εκτυπωμένο αμάξι Urbee της εταιρίας Kor Ecologic, σχεδιασμένο για να είναι κομψό και φιλικό ως προς το περιβάλλον. Επίσης, η εταιρία i.materialise γίνεται η πρώτη υπηρεσία εκτύπωσης 3-D παγκοσμίως που προσφέρει χρυσό αξίας 14 καρατίων και ασήμι ως υλικά, ανοίγοντας τον δρόμο για μια νέα και λιγότερο δαπανηρή επιλογή κατασκευής για τους σχεδιαστές κοσμημάτων [63]. Το 2012 γίνεται η πρώτη τριδιάστατη εκτύπωση κάτω γνάθου και στη συνέχεια η εμφύτευσή της σε μια ηλικιωμένη γυναίκα η οποία έπασχε από χρόνια

οστική μόλυνση. Αυτή η τεχνολογία βρίσκεται σε ερευνητική εξέλιξη για την προώθηση της ανάπτυξης νέου οστικού ιστού [64].



**Εικόνα 3.2:** Πρώτο μη επανδρωμένο 3-D αεροσκάφος {7, 8}.

Τον Μάιο του 2013 κατασκευάζεται το πρώτο παγκοσμίως εκτυπωμένο πιστόλι, με το όνομα Liberator, αποτελούμενο από 16 συνολικά εξαρτήματα (Εικόνα 3.4) [65]. Το 2014 χρησιμοποιείται για πρώτη φορά 3-D εκτυπωτής στο διάστημα με απώτερο στόχο τη μείωση του κόστους των μελλοντικών αποστολών. Η συσκευή χαρακτηρίζεται για την αντοχή της σε δονήσεις ανύψωσης και λειτουργεί σταθερά σε κλειστό περιβάλλον, εντός του διαστημικού σταθμού [66]. Τον Φεβρουάριο του 2015, Αυστραλοί επιστήμονες του Πανεπιστημίου Monash παρουσίασαν τον πρώτο κινητήρα αεριοθούμενου, ο οποίος κατασκευάστηκε εξ'ολοκλήρου από ένα 3-D εκτυπωτή, αυξάνοντας το ενδιαφέρον για τη διαδικασία εκτύπωσης εξαρτημάτων, λόγω του μειωμένου χρόνου και χαμηλού κόστους παραγωγής καθώς και του ελαφρύτερου βάρους [63].



**Εικόνα 3.3:** Εκτυπωμένο 3-D εμφύτευμα κάτω γνάθου {9, 10}.

Τον Σεπτέμβριο του 2015 κατασκευάστηκε ο πρώτος 3-D εκτυπωτής με υλικό εκτύπωσης το γυαλί. Οι ερευνητές στο MIT ήταν σε θέση να δημιουργήσουν το πρώτο μηχάνημα που μπορεί να εξωθήσει γυαλί, στρώση ανά στρώση, με αρχή λειτουργίας αρκετά παρόμοια με αυτή της FDM μεθόδου. Για την αποτελεσματική εξώθηση του γυαλιού, είναι σημαντικό το ακροφύσιο να υποβληθεί σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 1000°C ενώ παράλληλα ο εκτυπωτής πρέπει να διαθέτει σύστημα θέρμανσης για κάθε φάση κατά τη διάρκεια της διαδικασίας υλοποίησης [67]. Το 2016 η εταιρία Nano Dimensions ανακοίνωσε το μηχάνημα DragonFly 2020, έναν εκτυπωτή που παραδόθηκε σε μια ισραηλινή αμυντική εταιρία. Η εταιρία αυτή έδωσε θετική ανατροφοδότηση σχετικά με τις δυνατότητες του εκτυπωτή, καθιστώντας αποτελεσματική την εκτύπωση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων [68].



**Εικόνα 3.4:** 3-D εκτυπωτής της εταιρίας Nano Dimensions-Μοντέλο DragonFly 2020 {11, 12, 13}.

### 3.3 Η τεχνολογία της 3-D εκτύπωσης

Οι τεχνολογίες που μπορούν να εφαρμοστούν στον τομέα της 3-D εκτύπωσης ποικίλουν αναλόγως με τα υλικά που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν καθώς και με τους χρόνους κατασκευής και τις αντοχές του επιθυμητού τελικού προϊόντος. Ορισμένες τεχνολογίες είναι πλέον διαθέσιμες στον τομέα της κατασκευής πρωτοτύπων αλλά παράλληλα νέες τεχνολογίες αναπτύσσονται συνεχώς. Αυτές οι διαφορετικές μέθοδοι μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις κατηγορίες, ανάλογα με τη μορφή του υλικού που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Πιο

συγκεκριμένα με βάση το υγρό στοιχείο, τη σκόνη, τα στερεά υλικά και το χαρτί. Μια άλλη δημοφιλής προσέγγιση περιλαμβάνει την κατηγοριοποίηση των τεχνολογιών με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά όπως για παράδειγμα ο μηχανισμός εξώθησης της πρώτης ύλης ή η χρήση λέιζερ.

### **3.3.1 Μορφή πρώτης ύλης**

#### **Διαδικασίες με βάση το υγρό**

Σε αυτήν την κατηγορία ο εκτυπωτής δημιουργεί αντικείμενα με επιλεκτική στερεοποίηση μιας υγρής ρητίνης, γνωστή και ως φωτοπολυμερές, η οποία όταν εκτίθεται σε λέιζερ ή σε κάποια άλλη πηγή φωτός, σκληραίνει. Η διαδικασία εκτύπωσης σε αυτήν την κατηγορία εκτελείται είτε μέσα σε μια δεξαμενή υγρού είτε με την εκτόξευση ενός στρώματος ρητίνης, με τη χρήση υπεριώδους φωτός για τη στερεοποίηση της πριν την προσθήκη της επόμενης στρώσης. Ορισμένοι εκτυπωτές τελευταίας τεχνολογίας είναι σε θέση να αναμειγνύουν διαφορετικά πολυμερή, στην ίδια εργασία εκτύπωσης, επιτρέποντας την εξαγωγή αντικειμένων από πολλαπλά υλικά.

#### **Διαδικασίες με βάση τη σκόνη**

Μια δεύτερη και ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος τριδιάστατης εκτύπωσης είναι αυτή της δημιουργίας αντικειμένου με την επιλεκτική προσκόλληση διαδοχικών στρωμάτων μιας πολύ λεπτής σκόνης. Για την επιτυχή προσκόλληση της σκόνης πραγματοποιείται εκτόξευση μιας κόλλας σε κάθε στρώση εκτύπωσης ή τήξη των κόκκων σκόνης μεταξύ τους, μέσω λέιζερ ή άλλης πηγής θερμότητας.

#### **Διαδικασίες με βάση τα στερεά**

Στην αγορά κυκλοφορούν εκτυπωτές οι οποίοι δημιουργούν αντικείμενα μέσω της εξώθησης τηγμένου ή ημι-υγρού υλικού από το ακροφύσιο της κεφαλής εκτύπωσης. Συνήθως σε αυτήν την κατηγορία συνεπάγεται η εξώθηση τηγμένου θερμοπλαστικού υλικού, το οποίο στερεοποιείται άμεσα με την έξοδό του από την κεφαλή εκτύπωσης. Στην ίδια κατηγορία συμπεριλαμβάνονται και εκτυπωτές οι οποίοι μπορούν να εξωθήσουν λιωμένο μέταλλο, σκυρόδεμα, πηλό ή ακόμη και σοκολάτα

#### **Διαδικασίες με βάση το χαρτί**

Σε αυτήν την κατηγορία η τριδιάστατη εκτύπωση βασίζεται στη διαδικασία της πλαστικοποίησης. Διαδοχικά στρώματα χαρτιού, μετάλλου ή πλαστικού κολλούν μεταξύ τους χτίζοντας ένα στερεό αντικείμενο. Φύλλα χαρτιού, που χρησιμοποιούνται ως υλικό κατασκευής, κόβονται με λεπίδα ή λέιζερ και στερεοποιούνται μεταξύ τους. Παράλληλα,

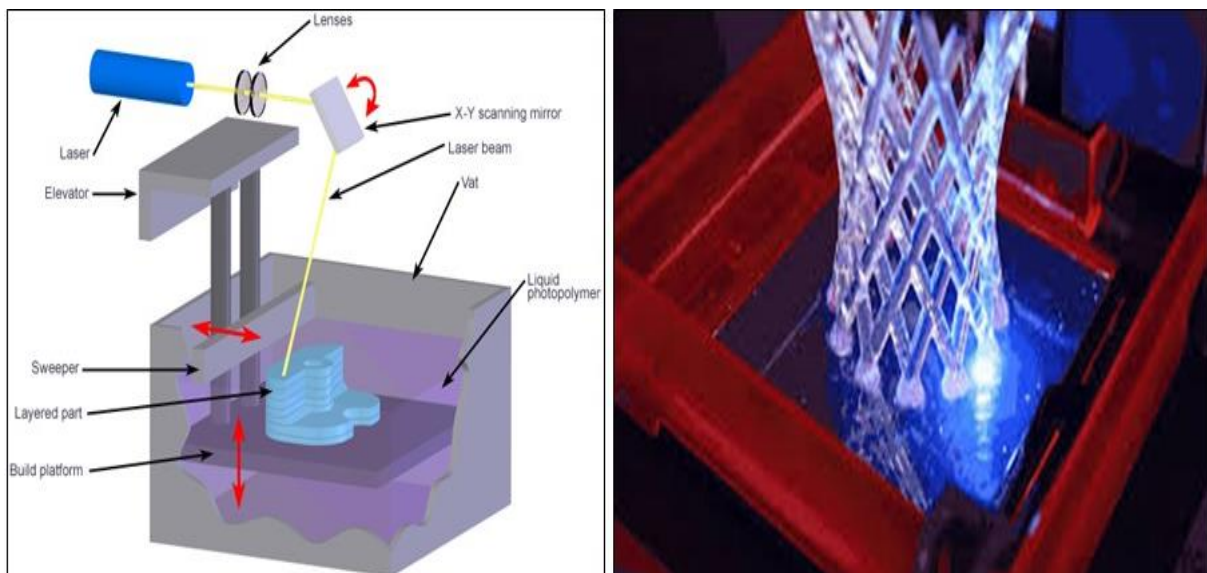


μπορούν να ψεκαστούν με πολλαπλές μελάνες κατά τη διαδικασία της εκτύπωσης, παρέχοντας τη δυνατότητα κατασκευής έγχρωμων αντικειμένων, με χαμηλό κόστος [69, 70].

### 3.3.2 Τεχνικές τριδιάστατης εκτύπωσης

#### Μέθοδος στερεολιθογραφίας (SLA)

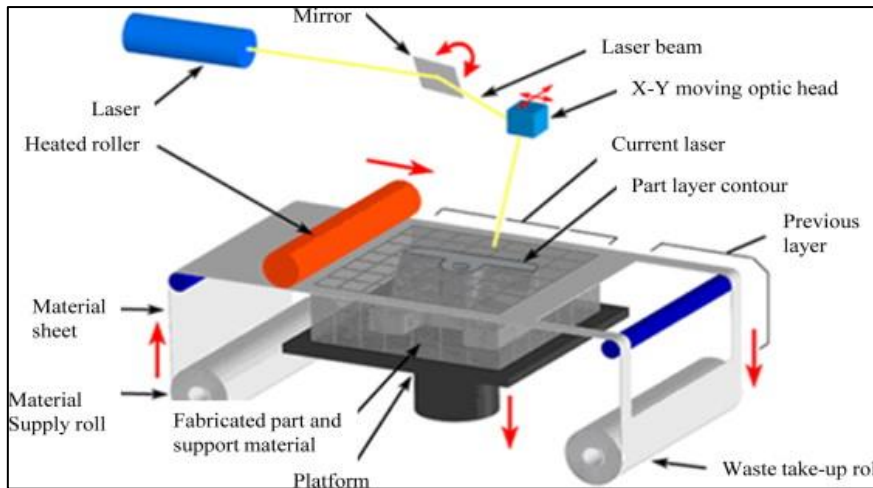
Η συγκεκριμένη μέθοδος ήταν η πρώτη που εισήχθη το 1988, βασισμένη στην εργασία του εφευρέτη Charles Hull και είναι η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη τεχνολογία γρήγορης πρωτοτυποποίησης. Μέσω αυτής της διαδικασίας κατασκευάζονται αντικείμενα με τη στερεοποίηση στρωμάτων φωτοπολυμερικής ρητίνης. Η στερεοποίηση εκτελείται γρήγορα με τη χρήση εστιασμένης ακτίνας λέιζερ [71].



Εικόνα 3.5: Μέθοδος SLA [14].

#### Μέθοδος συγκόλλησης επάλληλων φύλλων (LOM)

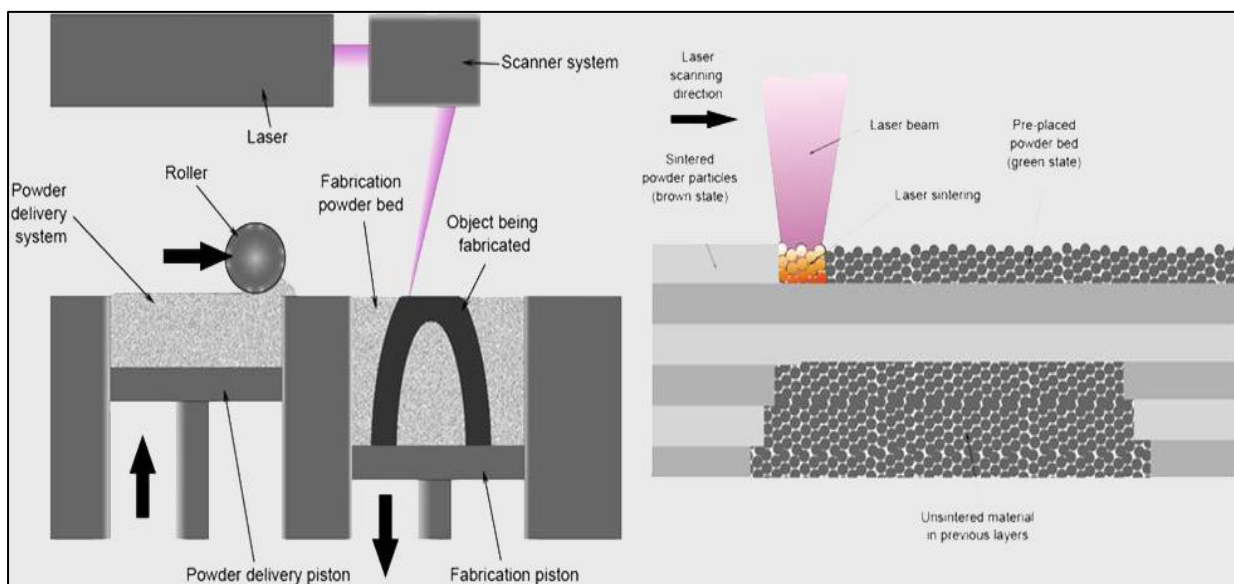
Τα κύρια εξαρτήματα αυτής της μεθόδου είναι ένας μηχανισμός τροφοδοσίας που προωθεί το φύλλο πάνω στην πλατφόρμα εκτύπωσης, ένας θερμαινόμενος κύλινδρος ο ρόλος του οποίου είναι να ασκεί πίεση για τη συγκόλληση του φύλλου με την κάτω στρώση και ένα λέιζερ το οποίο κόβει το περίγραμμα του φύλλου σε κάθε στρώση. Τα εξαρτήματα παράγονται με στρώσεις στοιβάξης, συγκόλλησης και κοπής, σε φύλλα επικαλυμμένα με συγκολλητικό φύλλο, πάνω από την προηγούμενη στρώση. Μετά την ολοκλήρωση της κάθε κοπής ένα άλλο φύλλο προωθείται πάνω από τα προηγούμενα και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την ολοκλήρωση της εκτύπωσης [72].



Εικόνα 3.6: Μέθοδος LOM {15}.

### Μέθοδος SLS

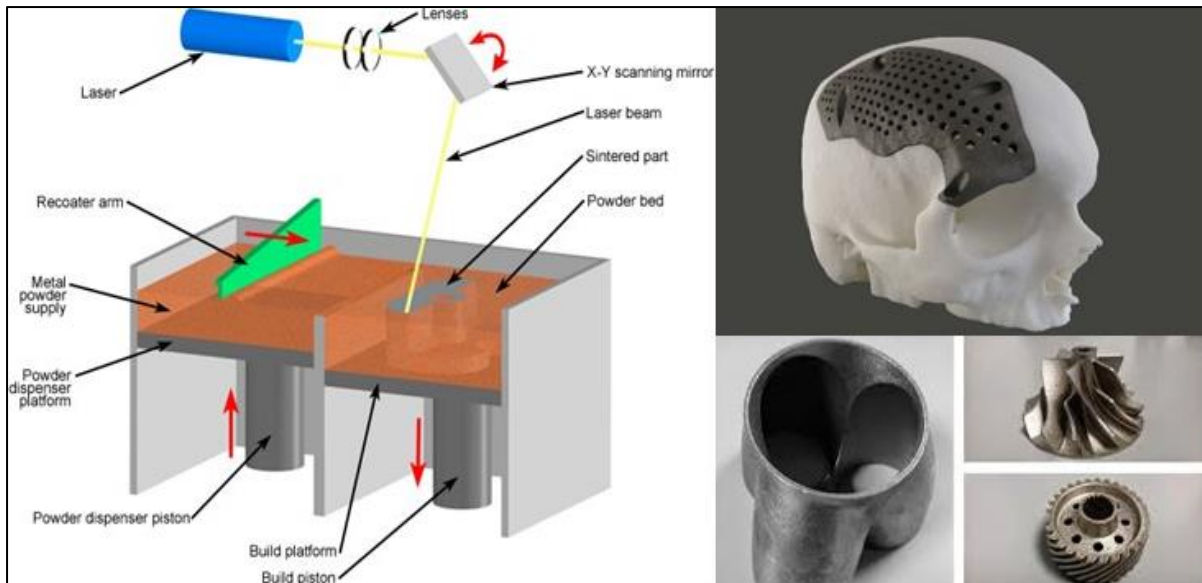
Σε αυτή τη μέθοδο θερμοπλαστική σκόνη απλώνεται πάνω σε μια επιφάνεια με τη βοήθεια ενός κυλίνδρου. Μια δέσμη λέιζερ χτυπάει στην επιφάνεια προκειμένου να λιώσει επιλεκτικά και να συνενώσει τους κόκκους προς τον σχηματισμό του τελικού αντικειμένου[73].



Εικόνα 3.7: Μέθοδος SLS {16}.

### Μέθοδος άμεσης πυροσυσσωμάτωσης με λέιζερ (DMLS)

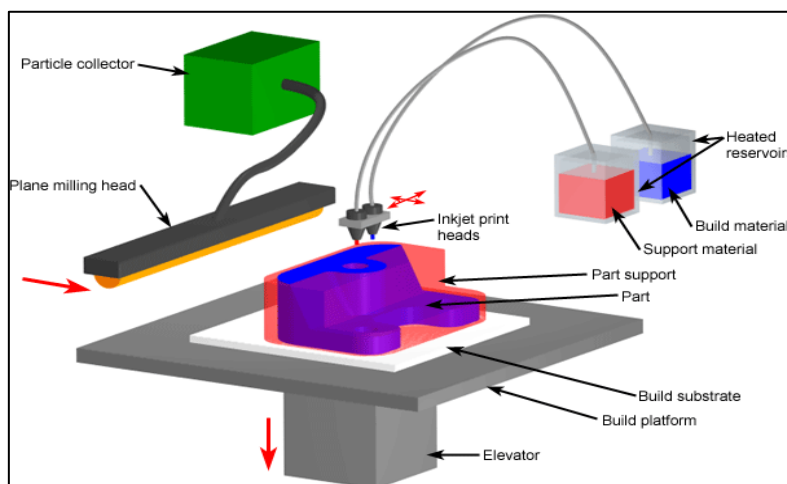
Στη συγκεκριμένη μέθοδο χρησιμοποιείται μεταλλική σκόνη, χωρίς κάποιο συνδετικό παράγοντα. Η τήξη της σκόνης πραγματοποιείται μέσω της χρήσης λέιζερ υψηλής ισχύος, για την κατασκευή εξαρτημάτων με ίδιες ιδιότητες με αυτές του αρχικού υλικού. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την πρωτοτυποποίηση εργαλείων, ανθρώπινων εμφυτευμάτων και αεροδιαστημικών εξαρτημάτων για εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας [74].



Εικόνα 3.8: Μέθοδος DMLS {17}.

### Μέθοδος Ink-jet

Σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιείται ένα υλικό κατασκευής και ένα υλικό υποστήριξης, τα οποία διατηρούνται σε υγρή κατάσταση μέσα σε δεξαμενές. Τα υγρά τροφοδοτούνται σε μεμονωμένες κεφαλές εκτόξευσης, οι οποίες με τη σειρά τους εκτοξεύουν μικροσκοπικά σταγονίδια των υλικών κατά τη μετακίνησή τους. Καθώς τα υλικά στερεοποιούνται άμεσα μετά την εναπόθεσή τους, μια κεφαλή φρεζαρίσματος διέρχεται πάνω από το στρώμα για την επίτευξη ομοιόμορφου πάχους, με τη διαδικασία να επαναλαμβάνεται μέχρι την αποπεράτωση του αντικειμένου [75].

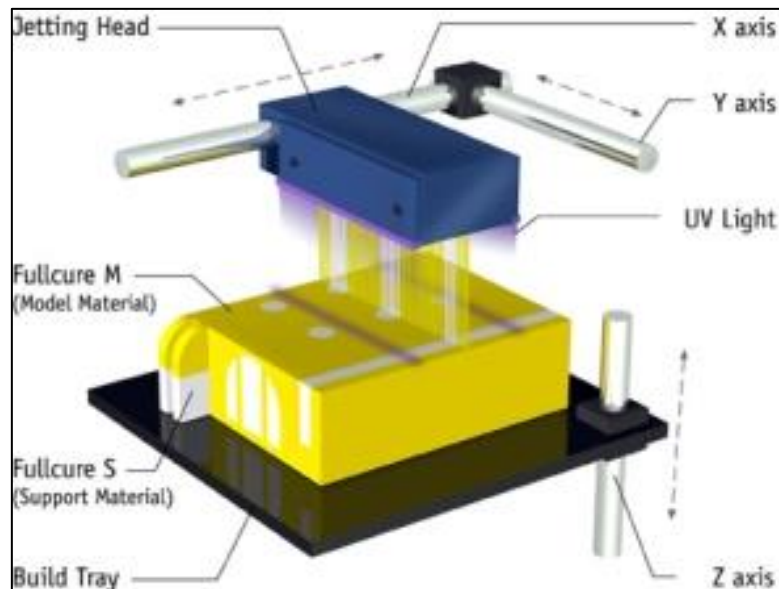


Εικόνα 3.9: Μέθοδος Ink-jet {18}.

### Μέθοδος Poly-jet

Η συγκεκριμένη διαδικασία παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με τη συμβατική εκτύπωση, με τη διαφορά ότι σε αυτή γίνεται εκτόξευση υγρών πολυμερών πάνω σε δίσκο και στη

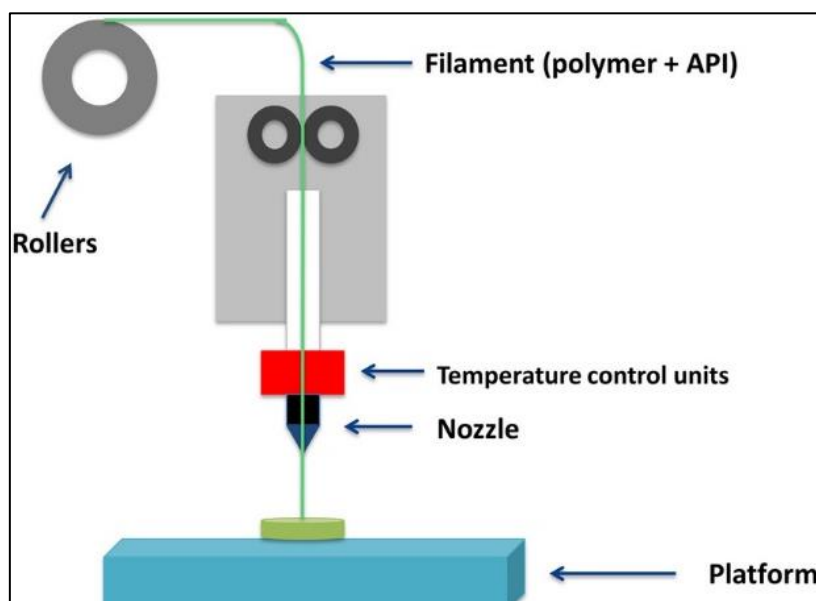
συνέχεια ακτίνες UV «θεραπεύουν» το μοντέλο. Τόσο τα υλικά κατασκευής όσο και τα υποστηρικτικά υλικά είναι φωτοπολυμερή [76].



Εικόνα 3.10: Μέθοδος Poly-jet {19}.

### Μέθοδος FDM

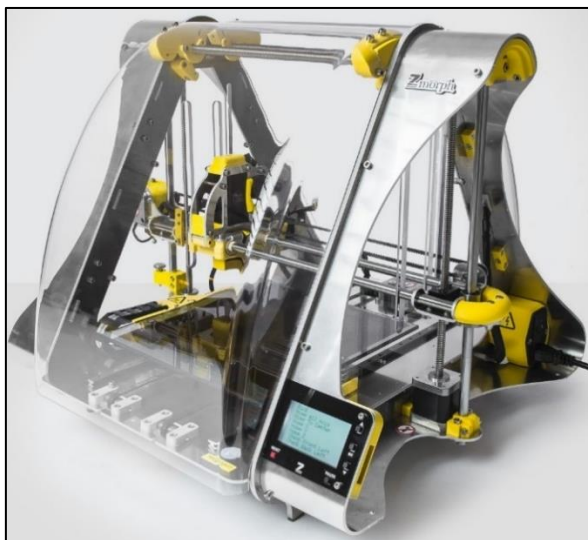
Σε αυτή τη διαδικασία, το κατασκευαστικό υλικό, κατά βάση πλαστικό, εξωθείται μέσω ενός ακροφυσίου. Το υλικό, το οποίο τροφοδοτεί το ακροφύσιο, βρίσκεται υπό τη μορφή νήματος. Το ακροφύσιο θερμαίνεται για να λιώσει το υλικό και επιπλέον διαθέτει ένα μηχανισμό που επιτρέπει την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση της ροής του υλικού. Το υλικό στερεοποιείται σύντομα αμέσως μετά την εξώθησή του από το ακροφύσιο με αποτέλεσμα να χτίζεται η κάθε στρώση πάνω στην προηγούμενη [77].



Εικόνα 3.11: Μέθοδος FDM {20}.

### 3.4 Τριδιάστατη εκτύπωση μέσω της διαδικασίας FDM

Στην παρούσα εργασία έγινε χρήση της μεθόδου FDM και για τον λόγο αυτό θα γίνει εκτενέστερη ανάλυση αυτής. Συγκεκριμένα, όλες οι εκτυπώσεις στο πειραματικό μέρος πραγματοποιήθηκαν στον 3-D εκτυπωτή της εταιρίας Z-Morph στο εργαστήριο R-Nano της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



Εικόνα 3.12: 3-D Εκτυπωτής Zmorph 2.0S [21].

#### 3.4.1 Κατασκευαστική δομή ενός FDM εκτυπωτή

Η δομή ενός FDM εκτυπωτή αποτελείται από ένα συνδυασμό βασικών εξαρτημάτων:

- Κύριο σώμα
- Μηχανικά εξαρτήματα
- Ηλεκτρονικά εξαρτήματα

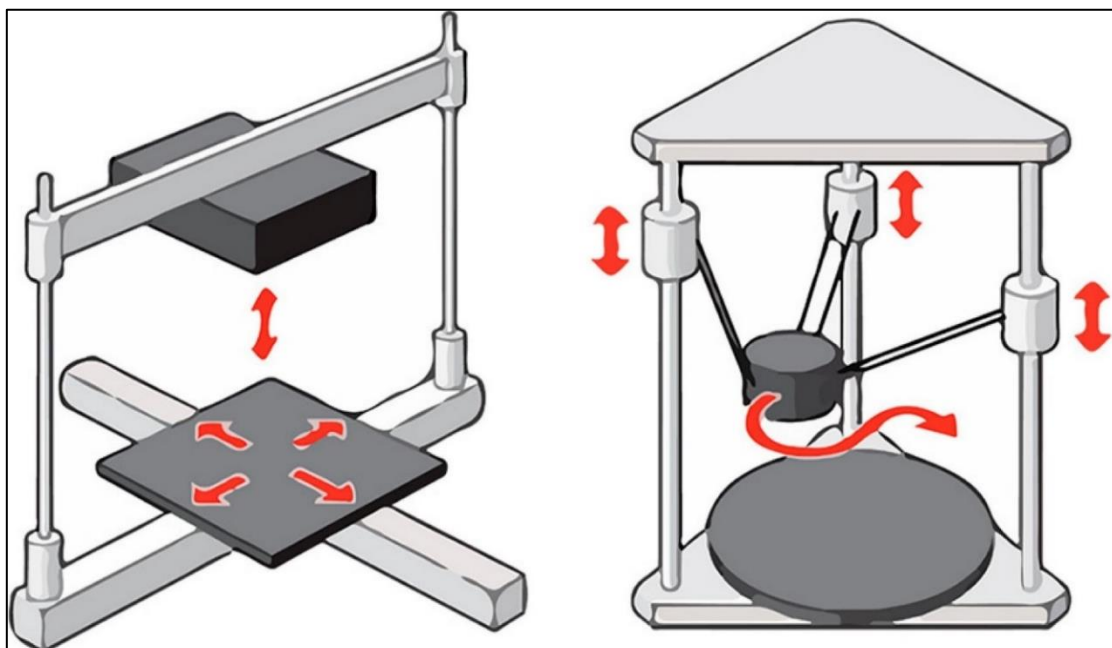
##### 3.4.1.1 Κύριο σώμα

###### Καρτεσιανοί/Delta εκτυπωτές

Οι τριδιάστατοι εκτυπωτές, ανάλογα με τη σχετική κίνηση μεταξύ κεφαλής και πλατφόρμας εκτύπωσης, διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, στους καρτεσιανούς και τους Delta. Οι καρτεσιανοί εκτυπωτές οφείλουν το όνομά τους στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιούν, το οποίο προτάθηκε από τον Rene Descartes. Δε λειτουργούν μόνο με βάση το σύστημα συντεταγμένων  $X$  και  $Y$ , αλλά οδηγούν επίσης την κεφαλή εκτύπωσης με μηχανισμό που κινείται γραμμικά τόσο στον άξονα  $X$  όσο και στον άξονα  $Y$ . Οι περισσότεροι καρτεσιανοί εκτυπωτές αποτελούνται από μια κινούμενη ορθογώνια περιοχή κατασκευής ή διαφορετικά πλατφόρμα εκτύπωσης και οι ίδιοι οι εκτυπωτές τείνουν να έχουν κυβικό σχήμα.

Υπάρχουν ορισμένοι εκτυπωτές αυτού του τύπου στους οποίους η αλλαγή ύψους, μετά την ολοκλήρωση μιας στρώσης, δεν πραγματοποιείται με την κίνηση της κεφαλής προς τα πάνω αλλά με την κίνηση της πλατφόρμας εκτύπωσης προς τα κάτω. Το μειονέκτημα ενός καρτεσιανού εκτυπωτή έγκειται στο βάρος των κινούμενων τμημάτων καθώς και στη δυσκολία της γρήγορης αλλαγής κατεύθυνσης. Επιπλέον, οι συνεχείς κραδασμοί μπορεί να οδηγήσουν σε χαλαρές και ανακριβείς εκτυπώσεις [78].

Οι εκτυπωτές τύπου Delta αποτελούνται από τρεις βραχίονες οι οποίοι καταλήγουν στο κέντρο για να μετακινήσουν την κεφαλή μέσα στον χώρο κατασκευής. Και οι Delta εκτυπωτές χρησιμοποιούν καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων για τη μετακίνηση μέσα στον χώρο, αλλά αντί να πραγματοποιείται η κίνηση σε κάθε άξονα με έναν κινητήρα κάθε φορά, όπως συμβαίνει στους καρτεσιανούς τύπους, και οι τρεις βραχίονες κινούνται με διαφορετικούς ρυθμούς ή χρόνους για την ακριβή μετακίνηση της κεφαλής. Ένας εκτυπωτής τύπου Delta διαθέτει συνήθως μια κυκλική ακίνητη πλατφόρμα, συνεπώς και το φυσικό σχήμα του εκτυπωτή είναι κυκλικό. Επομένως, αντικείμενα ορθογώνιας δομής τείνουν να κατασκευάζονται σε μικρότερη κλίμακα σε σύγκριση με έναν καρτεσιανό 3D εκτυπωτή. Το πλεονέκτημα ενός Delta εκτυπωτή, σε σύγκριση με έναν 3-D καρτεσιανό εκτυπωτή, είναι η ικανότητά του να κατασκευάζει ψηλά αντικείμενα με υψηλή ακρίβεια. Επιπλέον, αποτελείται από λιγότερα εξαρτήματα γεγονός που μειώνει τη συντήρηση και το κόστος. Ένα βασικό μειονέκτημα αυτού του τύπου είναι ότι λόγω του βραχίονα περιορίζεται ο συνολικός όγκος που μπορεί να εκτυπωθεί μέσα στον χώρο εργασίας [79].



**Εικόνα 3.13:** Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης ενός καρτεσιανού και ενός Delta εκτυπωτή, αντίστοιχα [22].

### **Βιδωτές ράβδοι/Βίδες (Threaded Rods/Leadscrews)**

Οι βιδωτές ράβδοι και οι βίδες είναι μεταλλικές ράβδοι με σπειρώματα σε όλο το μήκος τους και συνδέονται με ένα βηματικό μοτέρ. Κατά τη λειτουργία του κινητήρα, η ράβδος περιστρέφεται και ένα παξιμάδι το οποίο συνδέεται με την πλατφόρμα εκτύπωσης κινείται κατά μήκος της. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του καρτεσιανού συστήματος, καθώς η μπάρα περιστρέφεται και το παξιμάδι κινείται, το συγκρότημα θα μετακινηθεί προς τα εμπρός ή πίσω, πάνω ή κάτω, ανάλογα με τις εντολές του G-Κώδικα. Η διαφορά μεταξύ των βιδωτών ράβδων και των βιδών οδηγεί στην τελική ποιότητα της κατασκευής και την ακρίβεια.

### **Ιμάντες (Belts)**

Οι ιμάντες συμβάλλουν στην ομαλή κίνηση τόσο της κεφαλής ως προς τον άξονα X όσο και της πλατφόρμας εκτύπωσης στον άξονα Y. Οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται στους άξονες X, Y έχουν γρανάζια τα οποία περιστρέφουν τους ιμάντες. Οι περισσότεροι εκτυπωτές διαθέτουν επίσης κάποιον τρόπο ρύθμισης της τάσης στους ιμάντες [80].

### **Βηματικοί κινητήρες (Stepper Motors)**

Σε αντίθεση με τους κανονικούς ηλεκτροκινητήρες συνεχούς ρεύματος, οι οποίοι περιστρέφονται συνεχώς όταν τους δοθεί ισχύς, οι βηματικοί κινητήρες περιστρέφονται σε βήματα. Αυτό τους δίνει τον ακριβή έλεγχο της θέσης, τόσο της κεφαλής όσο και την πλατφόρμας. Οι περισσότεροι εκτυπωτές χρησιμοποιούν μοτέρ τύπου NEMA 17 με 200 βήματα ανά στροφή.

### **Πλαίσιο (Frame)**

Το πλαίσιο συγκρατεί όλα τα εξαρτήματα μαζί. Οι παλαιότεροι εκτυπωτές είχαν πλαίσια κατασκευασμένα από κόντρα πλακέ. Οι τωρινοί διαθέτουν πλαίσια από φύλλα μετάλλου, δοκάρια αλουμινίου ή πλαστικά. Αρκετά τμήματα που απαρτίζουν το πλαίσιο ενός εκτυπωτή μπορούν να αναπαραχθούν μέσω της τριδιάστατης εκτύπωσης. Όσο πιο άκαμπτο είναι το πλαίσιο τόσο πιο σταθερή θα είναι και η εκτύπωση.

### **Κέλυφος**

Το κέλυφος καθίσταται απαραίτητο για την ασφάλεια του χρήστη, λόγω της ύπαρξης κινούμενων τμημάτων, στοιχείων θέρμανσης και εκπομπής αέριων ρύπων κατά την εκτύπωση. Επιπλέον, βοηθάει στη διατήρηση ισοθερμοκρασιακών συνθηκών αποτρέποντας την παραμόρφωση του αντικειμένου [81, 82].

### **3.4.1.2 Μηχανικά εξαρτήματα**

#### **Υλικά τριδιάστατης εκτύπωσης**

Τα πιο διαδεδομένα υλικά που χρησιμοποιούνται σε FDM εκτυπωτές είναι τα πολυμερή PLA (Πολυγαλακτικό Οξύ) και ABS (τριπολυμερές ακρυλονιτριλίου-βουταδιενίου-στυρενίου), τα οποία είναι εμπορικά διαθέσιμα σε μορφή νήματος, τυλιγμένα σε καρούλι, με διάμετρο 1.75 ή 3 mm. Το ABS είναι ένα πολύ ανθεκτικό θερμοπλαστικό που είναι ελαφρώς εύκαμπτο και κατάλληλο για πολλούς σκοπούς. Μπορεί να λειανθεί, να βαφτεί καθώς και να διαλυθεί σε ακετόνη. Είναι ανθεκτικό στην κρούση και έχει σχετικά υψηλή αντοχή στη θερμότητα, καθώς η εξώθησή του κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης γίνεται στους 210 °C. Όταν η εκτύπωση πραγματοποιείται με υλικό ABS, η θερμαινόμενη πλατφόρμα εκτύπωσης ρυθμίζεται στους 110 °C και καλύπτεται από μια ταινία πολυαμιδίου, η οποία καθίσταται απαραίτητη για την αποφυγή καμπυλώσεων καθώς και πιθανόν ρωγμών του εκτυπωμένου αντικειμένου κατά τη διάρκεια της στερεοποίησής του.

Το PLA είναι ένα βιοπολυμερές πλαστικό το οποίο προέρχεται από άμυλο αραβοσίτου ή από ζαχαροκάλαμο. Δεν ανακυκλώνεται εύκολα αλλά μπορεί να βιοδιασπαστεί υπό κατάλληλες συνθήκες. Θεωρείται φιλικό υλικό ως προς το περιβάλλον και αποτελεί μια εναλλακτική λύση στη χρήση πετροχημικών πλαστικών. Αποτελεί ένα ιδιαίτερα σκληρό υλικό όταν ψύχεται και έχει χαμηλότερο όριο για υψηλές θερμοκρασίες από το ABS, η εξώθηση του οποίου γίνεται κοντά στους 180 °C. Κατά την εκτύπωση με PLA δε θεωρείται απαραίτητη η θέρμανση της πλατφόρμας, ωστόσο σε ορισμένες περιπτώσεις η θέρμανση της πλατφόρμας μέχρι τους 60 °C συμβάλλει σημαντικά ως προς την ποιότητα της εκτύπωσης. Επιπλέον, το PLA μπορεί να εκτυπωθεί σε καθαρή γυάλινη επιφάνεια όσο η πλατφόρμα εκτύπωσης θερμαίνεται [83].

#### **Πλατφόρμα εκτύπωσης**

Η πλατφόρμα εκτύπωσης είναι το σημείο στο οποίο ολοκληρώνεται η εκτύπωση του αντικειμένου. Οι διαστάσεις της πλατφόρμας καθώς και το εύρος κίνησης για το μήκος, το πλάτος και το ύψος του εκτυπωτή είναι μια αρκετά καλή ένδειξη για το μέγιστο μέγεθος ενός αντικειμένου που μπορεί να εκτυπωθεί. Το μέγεθος της πλατφόρμας εκτύπωσης αναφέρεται και ως όγκος εκτύπωσης. Οι περισσότερες πλατφόρμες εκτύπωσης θερμαίνονται προκειμένου να αποφευχθεί η στρέβλωση του αντικειμένου κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης. Λόγω της θερμικής συστολής κατά την ψύξη, το πλαστικό θα συρρικνωθεί ελαφρώς καθώς θα στερεοποιείται. Αυτό αναγκάζει το αντικείμενο να αλλοιωθεί προς τα πάνω γύρω από τις άκρες και να αποκολληθεί από την πλατφόρμα. Οι θερμαινόμενες πλατφόρμες διατηρούν το κάτω



μέρος του αντικειμένου ζεστό, για την αποφυγή της αποκόλλησής του. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένοι εκτυπωτές χωρίς θερμαινόμενες πλατφόρμες, γεγονός που περιορίζει τον αριθμό των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά την εκτύπωση. Η επιφάνεια της πλατφόρμας του εκτυπωτή είναι συχνά κατασκευασμένη είτε από γυαλί είτε από αλουμίνιο για την καλύτερη διάδοση της θερμότητας σε όλη την περιοχή και για τη δημιουργία επίπεδων ομαλών επιφανειών. Το γυαλί παρέχει την ομαλότερη επιφάνεια για την εκτύπωση, ενώ το αλουμίνιο παρέχει καλύτερη μετάδοση θερμότητας σε μια θερμαινόμενη πλατφόρμα [84, 85].

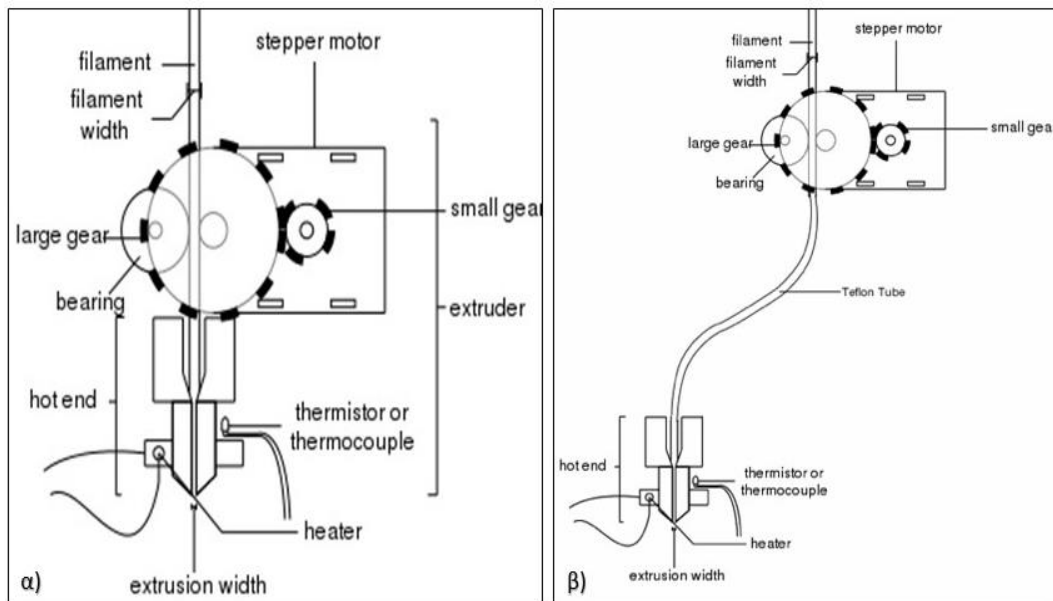
### **Κεφαλή εκτύπωσης**

Την καρδιά ενός τριδιάστατου εκτυπωτή αποτελεί η κεφαλή εκτύπωσης. Αυτή αποτελείται από δύο ενότητες, το ψυχρό και το θερμό άκρο. Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι εξωθητήρων ανάλογα με τη θέση του συστήματος τροφοδοσίας, ο άμεσος (direct extruder) και ο έμμεσος (Bowden extruder). Στη δομή του άμεσου εξωθητήρα, το ψυχρό και το θερμό άκρο είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους και επιτρέπει την ελεγχόμενη εξώθηση του πλαστικού. Σε αντίθεση με τον άμεσο, στον έμμεσο εξωθητήρα το ψυχρό και το θερμό άκρο διαχωρίζονται μέσω ενός μεγάλου σωλήνα, μέσα από τον οποίο ταξιδεύει το νήμα προς το ακροφύσιο. Αυτός ο τύπος μηχανισμού μειώνει το βάρος και επιτρέπει ταχύτερη κίνηση και λιγότερους κραδασμούς.

Το ψυχρό άκρο αποτελεί μέρος του συστήματος εξώθησης και λειτουργεί σαν αρπάγη, τραβώντας το νήμα, το οποίο είναι τυλιγμένο σε ένα καρούλι και ωθώντας το προς το θερμό άκρο, με τη βοήθεια μιας ειδικής περιστρεφόμενης τροχαλίας με αυλακώσεις (Hobbed Gear/Filament Drive Gear). Αντιδιαμετρικά της τροχαλίας είναι τοποθετημένο ένα μονόσφαιρο ρουλεμάν (Idler Gear), το οποίο σε συνδυασμό με την παρουσία ελατηρίου, πιέζει το νήμα στην περιστρεφόμενη τροχαλία. Αυτό το εξάρτημα είναι συνήθως ρυθμιζόμενο προκειμένου η τάση στο νήμα να μπορεί να αυξηθεί ή να μειωθεί, ανάλογα με τα επιθυμητά αποτελέσματα. Ο έλεγχος της ταχύτητας τροφοδοσίας πραγματοποιείται μέσω ενός βηματικού κινητήρα [86].

Το θερμό άκρο αποτελείται από μια ψύκτρα (Heat Sink) της οποίας ο ρόλος είναι η απαγωγή της θερμότητας και η διατήρηση της θερμοκρασίας σε σταθερά επίπεδα, για την αποφυγή της πρόωρης τήξης του πλαστικού, σε συνδυασμό με την παρουσία ενός ανεμιστήρα (Heat Sink Fan) ο οποίος φυσάει κατά μήκος της ψύκτρας. Επιπλέον, διαθέτει ένα σωλήνα PTFE (PTFE Tube – σωλήνας Τεφλόν) ο οποίος αποτρέπει τη μεταφορά της θερμότητας προς τον εξωθητήρα καθώς και την πρόωρη τήξη του νήματος. Ταυτόχρονα, υπάρχει ένας θερμαντήρας (Heater Cartridge) ο οποίος συμβάλλει προς την ομαλή εξώθηση του υλικού καθώς και ένα θερμίστορ (Thermistor) για τη μέτρηση της θερμοκρασίας στο θερμό άκρο. Επιπρόσθετα, το

τιμήμα που συμπληρώνει το θερμό άκρο είναι ένα μεταλλικό ακροφύσιο με μια μικρή οπή απ'όπου εξωθείται το τηγμένο πλαστικό και προσκολλάται στην πλατφόρμα εκτύπωσης. Η διάμετρος του ακροφυσίου κυμαίνεται από 0.25 mm έως 0.75 mm, με το πιο συνηθισμένο μέγεθος αυτό των 0.4 mm. Ανάλογα με το σχέδιο, τον διαθέσιμο χρόνο και το επιθυμητό αποτέλεσμα, το ακροφύσιο αντικαθίσταται από κάποιο άλλο διαφορετικού μεγέθους. Τέλος, είναι τοποθετημένος ένας ανεμιστήρας κοντά στην περιοχή του ακροφυσίου για να ψύχει το πλαστικό αμέσως μετά την εναπόθεσή του από το ακροφύσιο [87].



Εικόνα 3.14: Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας των κεφαλών α) άμεσης και β) έμμεσης τροφοδοσίας {23, 24}.

### 3.4.1.3 Ηλεκτρονικά εξαρτήματα

#### Παροχή ηλεκτρικού ρεύματος (Power Supply)

Αυτό το εξάρτημα τροφοδοτείται με εναλλασσόμενο ρεύμα έντασης 120V και το μετατρέπει σε συνεχές ρεύμα χαμηλής τάσης για τη λειτουργία του εκτυπωτή. Μια τυπική συσκευή τροφοδοσίας που χρησιμοποιείται είναι τύπου ATX. Πρόκειται για τα ίδια τροφοδοτικά που χρησιμοποιούνται σε επιτραπέζιους υπολογιστές. Θεωρούνται αρκετά αποτελεσματικά και έχουν ξεχωριστές γραμμές που παρέχουν ισχύ σε διαφορετικές τάσεις των 12, 5 ή 3.3V.

#### Μητρική πλακέτα (Motherboard)

Η μητρική πλακέτα είναι ο εγκέφαλος του εκτυπωτή. Παίρνει εντολές που δέχεται από τον υπολογιστή με τη μορφή G-Κώδικα και ενορχηστρώνει την εκτέλεσή τους. Η μητρική πλακέτα περιέχει έναν μικροεπεξεργαστή (ουσιαστικά ένα μικροσκοπικό, αυτόνομο υπολογιστή) και

όλα τα κυκλώματα που απαιτούνται για τη λειτουργία των κινητήρων, την ανάγνωση των αισθητήρων και την επικοινωνία με τον υπολογιστή.

### **Βηματικοί οδηγοί (Stepper Drivers)**

Τα συγκεκριμένα εξαρτήματα είναι υπεύθυνα για τη λειτουργία των βηματικών κινητήρων. Φέρουν τα σπειράματα του κινητήρα σε σειρά, προκαλώντας την κίνησή τους σε βήματα. Πολλές μητρικές πλακέτες έχουν ενσωματωμένους βηματικούς οδηγούς. Με την εξισορρόπηση της τροφοδοτούμενης ισχύος σε κάθε πηνίο, ο οδηγός είναι επίσης σε θέση να διαιρέσει τα βήματα σε περαιτέρω μικρότερα βήματα. Η συγκεκριμένη διαδικασία ονομάζεται μικρο-βήματα (micro-stepping) και επιτρέπει πιο ακριβή έλεγχο του κινητήρα. Επίσης, ο βηματικός οδηγός ελέγχει πόσο ηλεκτρικό ρεύμα θα τροφοδοτηθεί στον κινητήρα [88].

### **LCD οθόνη**

Ορισμένοι εκτυπωτές έχουν οθόνη LCD, με συγκεκριμένα λογισμικά προκειμένου οι χρήστες να ειδοποιούνται σχετικά με τις θερμοκρασίες του εκτυπωτή αλλά και με τα δεδομένα της εκτύπωσης. Επιπλέον, η οθόνη μπορεί να αντικαταστήσει τη θέση του υπολογιστή και ο εκτυπωτής να δέχεται βασικές εντολές από την οθόνη

### **Υποδοχή SD κάρτας**

Ορισμένοι εκτυπωτές έχουν επίσης υποδοχή κάρτας SD, από την οποία μπορούν να φορτώσουν αρχεία G-Κώδικα. Αυτό επιτρέπει στους εκτυπωτές να τρέξουν ανεξάρτητα, χωρίς τη χρήση του υπολογιστή.

### **Τερματικοί διακόπτες (Endstops)**

Είναι μικροί διακόπτες οι οποίοι πιέζονται κάθε φορά που ένας άξονας φτάνει στο τέρμα του. Με αυτόν τον τρόπο ο εκτυπωτής διαπιστώνει το σημείο εκκίνησης πριν ξεκινήσει την εκτύπωση. Οι περισσότεροι εκτυπωτές χρησιμοποιούν μηχανικούς διακόπτες αλλά ορισμένοι διαθέτουν οπτικούς αισθητήρες.

### **Βαθμονόμηση πλατφόρμας εκτύπωσης (Bed Levelling)**

Πολλοί εκτυπωτές έχουν συστήματα αυτόματης διασφάλισης για την επίπεδη τοποθέτηση της πλατφόρμας εκτύπωσης σε σχέση με το ακροφύσιο. Υπάρχουν όμως ορισμένες περιπτώσεις στις οποίες η βαθμονόμηση γίνεται χειροκίνητα [89].

### 3.4.2 Στάδια διαδικασίας της ΠΚ

Η διαδικασία κατασκευής ενός αντικειμένου με τη μέθοδο της ΠΚ, ανεξάρτητα από την τεχνική που πρόκειται να εφαρμοστεί, διαχωρίζεται κατά βάση σε πέντε στάδια:

- Σχεδίαση τριδιάστατου ψηφιακού μοντέλου σε λογισμικό CAD ή διαδικασία σκαναρίσματος αντικειμένου.
- Μετατροπή του μοντέλου CAD σε αρχείο STL για την αναπαράσταση και ερμηνεία των γεωμετρικών δεδομένων.
- Ακολουθεί ο αλγόριθμος τεμαχισμού του αρχείου STL σε λεπτές εγκάρσιες διατομές.
- Ξεκινάει η κατασκευή του αντικειμένου με τη διαδοχική σύνδεση των λεπτών διατομών.
- Τέλος, γίνεται η αφαίρεση και ο καθαρισμός του εξαρτήματος [90,91].

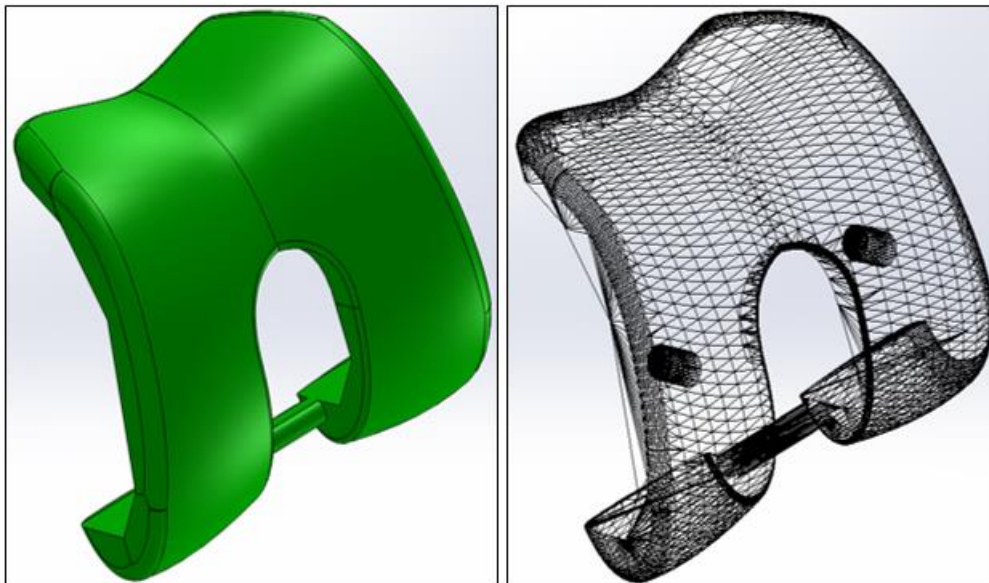
#### 3.4.2.1 Δημιουργία 3-D μοντέλου

Το πρώτο στάδιο για την έναρξη της διαδικασίας της ΠΚ είναι είτε η δημιουργία ενός ψηφιακού αντικειμένου είτε η χρησιμοποίηση ενός υπάρχοντος σχεδίου, με τη χρήση κατάλληλου σχεδιαστικού λογισμικού (Computer Aided Design, CAD). Ο κυριότερος ρόλος ενός λογισμικού CAD είναι ο ορισμός της γεωμετρίας ενός σχεδίου, λόγω του ότι η γεωμετρία του σχεδίου είναι ουσιώδης για όλες τις μετέπειτα δραστηριότητες στον κύκλο του τελικού προϊόντος. Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα που προσφέρει ένα εργαλείο CAD είναι η μεγάλη οικονομία χρόνου που επιφέρει καθώς και η μείωση των σφαλμάτων που προκαλούνται από την ανάγκη επανεκτίμησης της γεωμετρίας ενός φυσικού μοντέλου [92].

Το ψηφιακό μοντέλο, το οποίο αναπαριστά το αντίστοιχο φυσικό, πρέπει να παρουσιάζεται με κλειστές επιφάνειες, οι οποίες θα ορίζουν σαφώς έναν κλειστό όγκο. Αυτό συνεπάγεται ότι τα δεδομένα πρέπει να καθορίζουν τόσο το εσωτερικό όσο και το εξωτερικό μέρος του μοντέλου καθώς και τα όριά του [93]. Η απαίτηση αυτή καθίσταται περιττή στην περίπτωση όπου η τεχνική μοντελοποίησης που χρησιμοποιείται βασίζεται στη στερεά μοντελοποίηση. Από την άλλη, η συλλογή και ερμηνεία δεδομένων απευθείας από ένα φυσικό μοντέλο δεν είναι τόσο απλή διαδικασία. Είναι απαραίτητη η απόκτηση δεδομένων μέσω της γνωστής μεθόδου της αντίστροφης μηχανικής. Σε αυτήν την περίπτωση γίνεται χρήση βασικών εξοπλισμών όπως μηχανές μέτρησης συντεταγμένων, τριδιάστατοι σαρωτές με δέσμη λέιζερ, αξονικοί τομογράφοι καθώς και αξονικοί μικρο-τομογράφοι, για τη συλλογή σημείων του φυσικού μοντέλου και εν συνεχεία την ανασύστασή του σε ένα σύστημα CAD [94].

### 3.4.2.2 Μετατροπή του μοντέλου CAD σε αρχείο STL

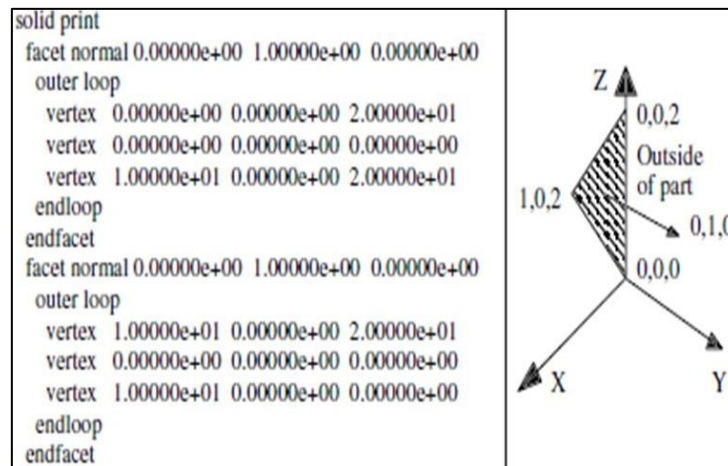
Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός τριδιάστατου αντικειμένου μπορούν να αποθηκευτούν σε διάφορες μορφές, ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο σύστημα μοντελοποίησης. Οι διάφορες συσκευές που χρησιμοποιούνται στον τομέα της ΠΚ είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να δέχονται τα δεδομένα του μοντέλου σε μια σταθερή μορφή, δηλαδή μια STL μορφή. Η συγκεκριμένη μορφή αρχείου καθιερώθηκε από την εταιρία 3-D Systems το 1987, αφού αναπτύχθηκε από την Albert Consulting Group. Ένα αρχείο STL αναπαριστά ένα αντικείμενο ως ένα σύνολο στοιχειωδών επίπεδων τριγώνων, το οποίο μπορεί να χαρακτηριστεί κι ως ψηφιοποιημένο αντικείμενο (tessellated object) ή πολυεδρικό αντικείμενο (faceted object), όπως παρατηρείται στην εικόνα 3.15. Οι βασικές πληροφορίες που εμπεριέχονται σε ένα αρχείο STL αφορούν στη γεωμετρία των επίπεδων τριγώνων και στις συντεταγμένες των κορυφών. Η περιγραφή ενός τριγώνου γίνεται με την αναφορά των σημείων των τριών κορυφών, που βρίσκονται ανάμεσα στις εντολές outer loop και end loop καθώς και το κάθετο μοναδιαίο διάνυσμα, στο επίπεδο που ορίζουν οι τρεις κορυφές, το οποίο δείχνει προς το εξωτερικό του μοντέλου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.16 [95].



**Εικόνα 3.15:** Μοντέλο εμφυτεύματος μηριαίου οστού. Αριστερά το αρχικό στερεό μοντέλο και δεξιά το αντίστοιχο ψηφιοποιημένο [25].

Κατά αυτόν τον τρόπο, το σύνολο των τριγώνων ορίζει ένα κλειστό όγκο του στερεού μοντέλου. Ο ορισμός της κάθε κορυφής γίνεται με βάση το διάνυσμα των τριών συντεταγμένων του σημείου, ενώ ο αντίστοιχος ορισμός του μοναδιαίου κάθετου διανύσματος γίνεται με βάση το συνημίτονο της κατεύθυνσής του. Υπάρχουν συστήματα στα οποία η φορά των κορυφών παρατίθεται αντίθετη από αυτή των δεικτών του ρολογιού, προκειμένου η φορά του κάθετου διανύσματος να έρχεται σε συμφωνία με τον κανόνα του δεξιού χεριού. Αυτό έχει

ως αποτέλεσμα ακόμα και την απαλοιφή του πεδίου του κάθετου διανύσματος καθότι μπορεί να υπολογιστεί με βάση τις συντεταγμένες των κορυφών [96].



Εικόνα 3.16: Αναπαράσταση τριγώνου με βάση το αρχείο STL [26].

Τα αρχεία τύπου STL διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Η μια είναι ο αμερικανικός τυποποιημένος κώδικας (American Standard Code for Information Interchange, ASCII) για τη μορφή ανταλλαγής πληροφοριών και η άλλη είναι ο δυαδικός τύπος. Το μέγεθος ενός αρχείου STL τύπου ASCII είναι πολύ μεγαλύτερο από ένα αρχείο δυαδικής μορφής, παρόλα αυτά θεωρείται περισσότερο ευανάγνωστο και συχνά χρησιμοποιείται για εκπαιδευτικούς σκοπούς όπως επίσης και για αποσφαλμάτωση και έλεγχο. Η μορφή ASCII δε θεωρείται πλήρως συμβατή με τη δυαδική έκδοση, καθώς η δυαδική περιέχει πρόσθετες πληροφορίες χαρακτηριστικών οι οποίες πλέον δε χρησιμοποιούνται [97].

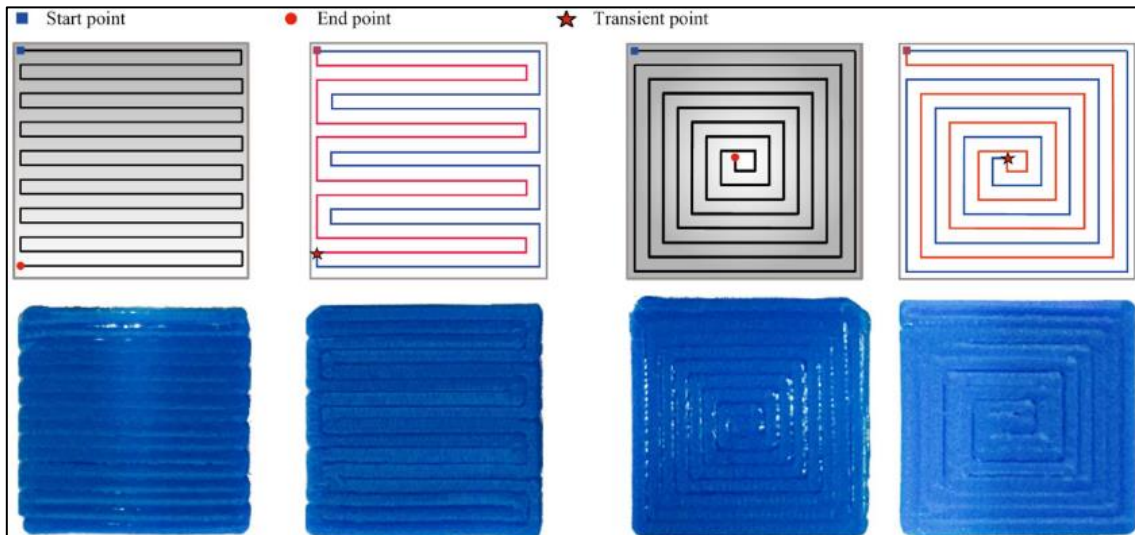
Λόγω του ότι τα αρχεία STL χρησιμοποιούν για την περιγραφή της οποιασδήποτε γεωμετρίας στοιχειώδη επίπεδα, είναι δύσκολο να αναπαραστήσουν καμπύλες επιφάνειες παρά μόνο προσεγγιστικά. Με την άνοδο του πλήθους των στοιχειωδών τριγώνων επιτρέπεται η καλύτερη προσέγγιση της γεωμετρικής πολυπλοκότητας του εκάστοτε αντικειμένου. Από την άλλη όμως, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του μεγέθους του αρχείου STL και αντίστοιχα την αύξηση του χρόνου επεξεργασίας και κατασκευής.

Επιπρόσθετα, σφάλματα όπως αυτά της στρογγυλοποίησης, που μπορεί να εμφανιστούν λόγω κινητής υποδιαστολής, θεωρούνται εξίσου σημαντικά εξαιτίας της απουσίας τοπολογικών πληροφοριών σχετικά με το μοντέλο. Ταυτόχρονα, ένα επιπλέον μειονέκτημα ενός αρχείου STL είναι ο περιορισμένος όγκος πληροφοριών όσον αφορά την αναπαραγωγή του χρώματος, την υφή του υλικού, της υποδομής καθώς και άλλων ιδιοτήτων του κατασκευασμένου τελικού προϊόντος. Κατά συνέπεια, θεωρείται δόκιμο οι σχεδιαστές να μπορούν να εξισορροπούν τις απαιτήσεις ακρίβειας με τις ανάγκες ευχρηστίας ώστε να δημιουργηθεί ένα αρχείο STL χρήσιμο και αποτελεσματικό [98, 99].

Παρόλα αυτά, τα αρχεία STL μπορούν να προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα όπως είναι η απλή μέθοδος αναπαράστασης των τριδιάστατων ψηφιοποιημένων σχεδίων. Η ακρίβεια της εξόδου μπορεί να ελεγχθεί εύκολα και κατά συνέπεια οι εκφυλισμοί που προκύπτουν να είναι ελάχιστοι. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα το οποίο χαρακτηρίζει ένα αρχείο STL είναι το μεγάλο εύρος εισόδου. Οποιαδήποτε τριδιάστατη γεωμετρία μπορεί να ερμηνευτεί σε τριγωνισμένο μοντέλο, λόγω της ευρύτητας εφαρμογής των διαθέσιμων αλγορίθμων τριγωνισμού επιφανειών. Τέλος, μπορεί να παρέχει μικρά και ακριβή αρχεία για μεταφορά δεδομένων [100].

### 3.4.2.3 Επιλογή κατάλληλων παραμέτρων και τεμαχισμός μοντέλου

Ακολουθεί το τρίτο βήμα που αφορά στον προγραμματισμό της μηχανής και της δημιουργίας του σχετικού αρχείου οδηγίων υπό τη μορφή ενός αρχείου τομών ή διαδρομών (toolpath) του εργαλείου που ονομάζεται G-Κώδικας και θα κατευθύνει τη μηχανή της ΠΚ προς την κατασκευή του αντικειμένου. Σε αυτό το στάδιο ο σχεδιαστής καλείται να προσδιορίσει τον βέλτιστο προσανατολισμό της κατασκευής, το πάχος της κάθε στρώσης καθώς και άλλες παραμέτρους, με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού κατασκευής με τη βοήθεια του Η/Υ (Computer Aided Manufacturing, CAM) [101, 102].



Εικόνα 3.17: Στο πάνω μέρος γίνεται ψηφιακή αναπαράσταση του toolpath ενώ στο κάτω μέρος φαίνεται η αντίστοιχη εκτύπωση {27}.

### Προσανατολισμός εξαρτήματος

Η επιλογή του κατάλληλου προσανατολισμού του εξαρτήματος στον θάλαμο δημιουργίας του έχει μεγάλη επίδραση στις ιδιότητες, στον χρόνο εκτέλεσης της ΠΚ, στην ανάλυση του εξαρτήματος καθώς και στο είδος της επιφάνειάς του, δεδομένου ότι όλες αυτές οι παράμετροι δεν είναι όμοιες και στις τρεις συντεταγμένες X, Y και Z. Είναι προφανές ότι με την

ελαχιστοποίηση του ύψους της γεωμετρίας, μειώνεται ταυτόχρονα και το πλήθος των στρώσεων και κατά συνέπεια ο αντίστοιχος συνολικός χρόνος δημιουργίας [103]. Πάντα, ανάλογα με την εφαρμογή που πρόκειται να έχει το εξάρτημα, ο σχεδιαστής έχει την επιλογή να θυσιάσει έναν ελάχιστο χρόνο δημιουργίας με αντάλλαγμα την αυξημένη ποιότητα και ακρίβεια της γεωμετρίας του εξαρτήματος. Τέλος, ανάλογα με τον προσανατολισμό του εξαρτήματος, μπορεί να χρειαστεί και η ύπαρξη κάποιας υποστηρικτικής δομής. Συνηθίζεται, η ποιότητα του δημιουργήματος να θεωρείται πιο σημαντικός παράγοντας σε αντίθεση με τον χρόνο αποπεράτωσης του αντικειμένου [104, 105].

### Τεμαχισμός του μοντέλου (slicing)

Αφού οριστεί ο κατάλληλος προσανατολισμός του εξαρτήματος ακολουθεί το στάδιο του τεμαχισμού προς τη δημιουργία του G-κώδικα. Οι τομές πραγματοποιούνται από διαδοχικά οριζόντια επίπεδα, ως προς τον άξονα Z. Η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών επιπέδων, δηλαδή των αντίστοιχων τομών του αρχείου, αποτελεί το πάχος της κάθε στρώσης. Για τη δημιουργία μιας τομής κατασκευάζεται αρχικά ένα περίγραμμα, το οποίο αποτελεί το κέλυφος του αντικειμένου [106]. Στην πορεία,

ανάλογα με τη χρήση που πρόκειται να έχει το αντικείμενο, η εσωτερική του δομή είτε καλύπτεται από ένα πλέγμα πλήρωσης

(infill), το ποσοστό του οποίου καθορίζεται από την επιθυμητή αντοχή του τελικού προϊόντος είτε παραμένει κενή [107]. Το πλέγμα πλήρωσης αποτελείται από διάφορα επαναλαμβανόμενα γεωμετρικά μοτίβα, συγκεκριμένου ποσοστού μέσα στον χώρο, το οποίο ορίζεται από τον εκάστοτε χρήστη [108, 109].

Όταν παραχθούν τα αρχεία τεμαχίων του εξαρτήματος και των υποστηρικτικών δομών, συγχωνεύονται προκειμένου το εξάρτημα και η αντίστοιχη υποστηρικτική δομή να μπορούν να κατασκευαστούν ενιαία. Στην περίπτωση εκτύπωσης πολλών εξαρτημάτων ταυτόχρονα, στην ίδια πλατφόρμα εκτύπωσης, πραγματοποιείται συγχώνευση όλων των αρχείων τεμαχίων των εξαρτημάτων και των στηριγμάτων, με τη λογική ότι το αντίστοιχο λογισμικό που χρησιμοποιείται επεξεργάζεται τα δεδομένα σα να ήταν η διατομή ενός μοναδιαίου

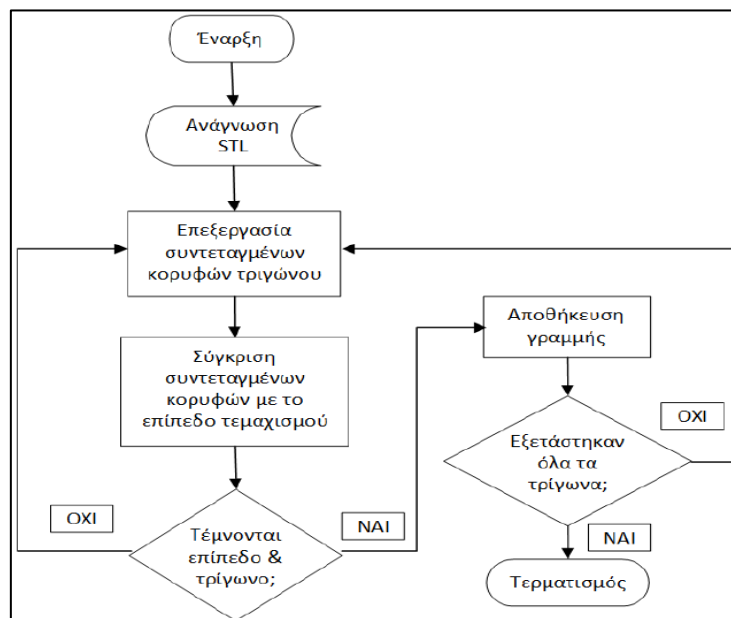


**Εικόνα 3.18:** Στην πάνω εικόνα παρουσιάζεται η κατασκευή του αντικειμένου με 2, 5, 10 και 15 κελύφη, αντίστοιχα, ενώ στην κάτω παρουσιάζονται περιπτώσεις διαφορετικού ποσοστού πλήρωσης {28}.



εξαρτήματος. Επιπλέον, σε αυτήν την περίπτωση η τοποθέτηση των αντικειμένων γίνεται σε τόσο κοντινές αποστάσεις όσο χρειάζεται για τη μείωση του χρόνου μετάβασης της κεφαλής εκτύπωσης από το ένα σημείο στο άλλο και ταυτόχρονα για την αποφυγή σύγκρουσης της κεφαλής με κάποιο εξάρτημα στην πλατφόρμα εκτύπωσης [110, 111].

Η αλγοριθμική διαδικασία τεμαχισμού που εκτελείται, ανεξαρτήτως της τεχνικής της ΠΚ που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα 3.19. Σύμφωνα με αυτόν τον αλγόριθμο, για τον υπολογισμό της διατομής ενός στρώματος, για δεδομένο πάχος, γίνεται αναζήτηση των τριγώνων που τέμνουν το αντίστοιχο οριζόντιο επίπεδο τεμαχισμού. Από τον υπολογισμό των διανυσμάτων/τομών μεταξύ επιπέδου και τριγώνων ορίζονται ένα ή περισσότερα κλειστά πολύγωνα τα οποία χαρακτηρίζουν τον κλειστό χώρο της διατομής/στρώματος [76].



Εικόνα 3.19: Αλγόριθμος τεμαχισμού {29}.

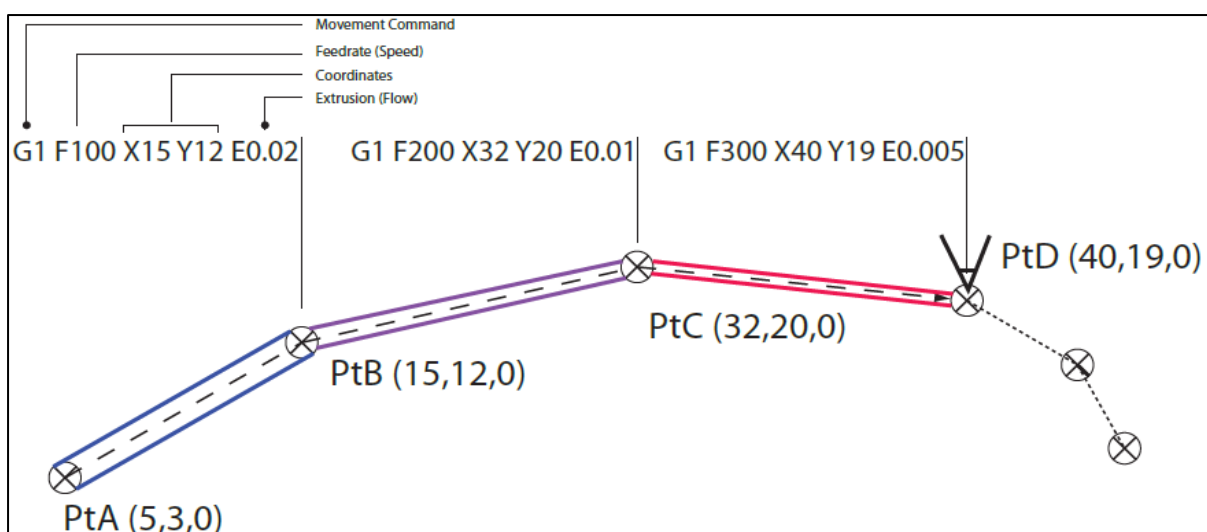
Για την καλύτερη απόδοση του αλγορίθμου, μπορεί να προηγηθεί μια ταξινόμηση των τριγώνων ως προς το ύψος, καθότι με αυτόν τον τρόπο διευκολύνεται σημαντικά η αναζήτηση των τριγώνων που τέμνουν ένα επίπεδο σε δεδομένο ύψος. Μόλις ολοκληρωθεί ο υπολογισμός των ευθύγραμμων τμημάτων, σύμφωνα με τον παραπάνω αλγόριθμο, σχηματίζεται η γεωμετρία των πολυγώνων. Είναι σημαντικό να ελεγχθεί η εγγύτητα μεταξύ των τμημάτων για τον σχηματισμό της διατομής καθώς η ύπαρξη σφαλμάτων, όπως αυτών της στρογγυλοποίησης, προκαλεί αβεβαιότητα για το αν τα σημεία βρίσκονται στην ίδια ακριβώς θέση. Ταυτόχρονα, γίνεται έλεγχος της εγκυρότητας της διατομής στην περίπτωση που τα πολύγωνα, αν είναι παραπάνω από ένα, δεν τέμνονται μεταξύ τους. Ανάλογα με την τεχνολογία που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, είναι πιθανή η ύπαρξη μιας μικρής μεγέθυνσης

ή σμίκρυνσης της διατομής η οποία θα φέρει σε ισορροπία φαινόμενα συρρίκνωσης ή διαστολής των υλικών κατά τον σχηματισμό του στρώματος [92, 112].

### Εξαγωγή του G-Κώδικα

Ο G-κώδικας είναι η γλώσσα με την οποία ο χρήστης μπορεί να δώσει συγκεκριμένες εντολές που επιθυμεί ούτως ώστε να τις εκτελέσει ο 3-D εκτυπωτής. Ο κώδικας αυτός περιέχει εντολές για τη μετακίνηση διαφόρων τμημάτων μέσα στον χώρο του εκτυπωτή, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση της FDM μεθόδου, που θα αναλυθεί παρακάτω, την κίνηση της κεφαλής ή της πλατφόρμας εκτύπωσης και αποτελείται από εντολές τύπου G- και M-. Κατά την εισαγωγή ενός αρχείου τύπου STL σε ειδικά λογισμικά που χρησιμοποιούνται για τον τεμαχισμό του αντικειμένου, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, δημιουργείται αυτόματα ο G-κώδικας, η γλώσσα δηλαδή στην οποία ανταποκρίνεται ο εκτυπωτής. Οι πληροφορίες που δίνει ο συγκεκριμένος κώδικας στον χρήστη, μπορούν να διαβαστούν σε προγράμματα επεξεργασίας κειμένου, όπως σε ένα σημειωματάριο και να ερμηνευτούν οι εντολές του καθώς και οι διαδρομές που θα εκτελέσει η κεφαλή εκτύπωσης για την παραγωγή του αντικειμένου.

Ο κώδικας στην ουσία παρέχει οδηγίες στους κινητήρες για τη μετακίνησή τους σε μια ορισμένη συντεταγμένη, με συγκεκριμένη ταχύτητα και εξαγωγή υλικού, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.20, στην οποία παρουσιάζεται η διαδρομή μιας τυχαίας εκτύπωσης. Η εντολή G1 δηλώνει τη γραμμική κίνηση του συστήματος, το γράμμα F εκφράζει την ταχύτητα πρόωσης και μετριέται σε mm/min, τα X και Y δηλώνουν το σημείο στο οποίο θα μετακινηθεί η κεφαλή εκτύπωσης και τέλος το E εκφράζει την ποσότητα του υλικού που θα εξαχθεί από τη μια συντεταγμένη ως την επόμενη [113, 114].



Εικόνα 3.20: Διαδρομή της κεφαλής εκτύπωσης σε μορφή G-κώδικα [30].

Ορισμένες από τις βασικές εντολές του κώδικα που χρησιμοποιούνται συχνότερα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 3.1:** Βασικές εντολές του G-κώδικα.

Εντολή	Παράδειγμα	Ερμηνεία
G28	G28 X Y	Με αυτήν την εντολή ο εκτυπωτής ξεκινάει από το αρχικό σημείο του άξονα X και Y.
G1	G1 X0 Y0 Z0.2 F2400 G1 X20 Y30 E10 F1800	Η συγκεκριμένη εντολή χρησιμοποιείται κατά 95% στους G-κώδικες και ορίζει τόσο τη μετακίνηση της κεφαλής σε σχέση με την πλατφόρμα εκτύπωσης, όσο και την ταχύτητα πρόωσης καθώς και την ποσότητα εξαγωγής του υλικού. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα η κεφαλή μετακινείται από το σημείο (X,Y)=(0,0), σε ύψος Z=0.2 με ταχύτητα 2400 mm/min στο σημείο (X,Y)=(20,30) με εξαγωγή υλικού 10 mm και ταχύτητα 1800 mm/min, στο ίδιο ύψος.
G90/91	i) G90 G1 X10 F3600 G1 X20  ii) G91 G1 X10 F3600 G1 X20	Χρήση απόλυτων/σχετικών συντεταγμένων αντίστοιχα. Στο πρώτο παράδειγμα γίνεται μετακίνηση της κεφαλής στο σημείο X=10 και στη συνέχεια στο σημείο X=20 mm, με ταχύτητα 3600 mm/min. Στο δεύτερο παράδειγμα η μετακίνηση γίνεται στο σημείο X=10 mm ενώ η δεύτερη μετακίνηση στο σημείο X=30 mm, με ταχύτητα 3600 mm/min.
G92	G92 E0	Με αυτήν την εντολή γίνεται επανακαθορισμός του σημείου αναφοράς τόσο των συντεταγμένων όσο και της ποσότητας του υλικού που εξάγεται. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα μηδενίζεται η ποσότητα του υλικού που έχει εξαχθεί κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης προκειμένου οι μελλοντικές εντολές να είναι σχετικές με τη νέα τιμή. Η εντολή αυτή κατά βάση χρησιμοποιείται στην αλλαγή κάθε επόμενης στρώσης.
M104/109	M104/109 S195	Χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας του ακροφυσίου. Η εντολή M104 ορίζει μια συγκεκριμένη θερμοκρασία, η οποία δηλώνεται με το γράμμα S και μετά την επιθυμητή θερμοκρασία, και αμέσως επιτρέπει στον χρήστη να εκτελέσει άλλες εντολές. Ενώ με την εντολή M109 ο εκτυπωτής θα περιμένει να φτάσει την επιθυμητή θερμοκρασία και στη συνέχεια θα εκτελέσει τις υπόλοιπες εντολές.
M140/190	M140/190 S195	Χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας της πλατφόρμας εκτύπωσης. Η σύνταξη είναι παρόμοια με τις εντολές για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας του ακροφυσίου.
M106	M106 S250 M106 S127 M106 S0	Με τη συγκεκριμένη εντολή ενεργοποιείται ο ανεμιστήρας του εκτυπωτή. Στην πρώτη περίπτωση δηλώνεται η μέγιστη ισχύς (100%), στη δεύτερη το 50% της ισχύος ενώ στην τελευταία ο ανεμιστήρας απενεργοποιείται.

Ανάλογα με το μέγεθος και την πολυπλοκότητα του ψηφιακού σχεδίου προς εκτύπωση, μπορεί να υπάρχουν εκατοντάδες ή και χιλιάδες κινήσεις που εμπλέκονται στην παραγωγή και κατά συνέπεια ο G-κώδικας να αποτελείται από εκατοντάδες σελίδες. Είναι κατανοητό λοιπόν πως η σύνταξη ολόκληρου του κώδικα με το χέρι θα ήταν μια αρκετά χρονοβόρα διαδικασία. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις στις οποίες θα πρέπει να παρέμβει το ανθρώπινο χέρι είτε για να βελτιώσει τον κώδικα που εξάγεται από ειδικά λογισμικά είτε για να τον φτιάξει από το μηδέν σε περιπτώσεις όπου το σχέδιο ή το σκαναρισμένο αρχείο κατά βάση, δεν μπορεί να ερμηνευτεί αναλυτικά, σε μια προσπάθεια προσέγγισης της γεωμετρικής δομής του αντικειμένου, όπως θα γίνει στην παρούσα εργασία [115, 116].

#### **3.4.2.4 Στάδιο κατασκευής του αντικειμένου**

Αυτό το στάδιο περιλαμβάνει την κατασκευή του αντικειμένου με τη χρήση διαφόρων μεθόδων, όπως θα αναφερθούν μερικές από αυτές στην ενότητα 3.4, οι οποίες εκτελούνται από ειδικές μηχανές εκτύπωσης. Κατά το στάδιο της δημιουργίας του εξαρτήματος, χτίζονται μία προς μία οι διατομές στις οποίες διαιρέθηκε το ψηφιακό μοντέλο, με τη χρήση διαφόρων υλικών όπως ρητίνες, μεταλλική σκόνη και χαρτί. Για όλες σχεδόν τις τεχνολογίες εκτύπωσης, το συγκεκριμένο στάδιο είναι απόλυτα αυτοματοποιημένο, με μερικές εξαιρέσεις στις οποίες χρειάζεται μικρή ανθρώπινη παρέμβαση. Ανάλογα με το επιθυμητό μέγεθος και τον αριθμό των εξαρτημάτων που απαιτούνται, η διαδικασία μπορεί να διαρκέσει από λίγα λεπτά μέχρι μερικές ώρες. Ο αριθμός των πανομοιότυπων εξαρτημάτων που μπορούν να κατασκευαστούν υπόκειται στο συνολικό μέγεθος κατασκευής και περιορίζεται από τον συνολικό όγκο που μπορεί να κατασκευάσει μια μηχανή ΠΚ. Τα περισσότερα μηχανήματα ΠΚ έρχονται σε επικοινωνία με συστήματα ειδοποίησης προκειμένου οι χρήστες να ενημερώνονται εγκαίρως μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής [54].

#### **3.4.2.5 Μετεπεξεργασία του 3-D εκτυπωμένου μοντέλου**

Οι επεξεργασίες που ακολουθούν μετά την ολοκλήρωση της εκτύπωσης, παρότι διαφέρουν ανάλογα με τη μέθοδο που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, εστιάζουν στην τελειοποίηση και στην ενίσχυση του αντικειμένου καθώς και στη διόρθωση των οποιωνδήποτε ελαττωμάτων που μπορεί να εμφανιστούν. Οι μετεπεξεργασίες μπορεί να αφορούν στην αφαίρεση της υποστηρικτικής δομής, στη βελτίωση της ποιότητας του αντικειμένου με τον καθαρισμό και το φινίρισμα της επιφάνειάς του, στη διαστασιολογική του ακρίβεια, στη βελτίωση της αισθητικής ή της υφής, στη χρησιμοποίηση του αντικειμένου ως πρότυπο χύτευσης όπως επίσης και στην αναβάθμιση των ιδιοτήτων, όπως η αντοχή του. Συνήθως, κάποια αντικείμενα

που είναι κατασκευασμένα από φωτοευαίσθητα υλικά υφίστανται επιπλέον επεξεργασία σκλήρυνσης προτού παραδοθούν για χρήση.

Η πιο διαδεδομένη διαδικασία που ακολουθείται μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του αντικειμένου είναι η αφαίρεση της υποστηρικτικής δομής, ο ρόλος της οποίας είναι να περιορίζει και να συγκρατεί το αντικείμενο κατά τη διάρκεια της κατασκευής του, έτσι ώστε να είναι εφικτή η κατασκευή διαφόρων επιθυμητών προεξοχών και περίπλοκων γεωμετριών. Υποστηρικτική δομή μπορεί να υφίσταται είτε φυσικά, λόγω της ίδιας της διαδικασίας, όπως γίνεται σε τεχνικές επεξεργασίας κόκκων ή φύλλων, κατά τις οποίες το τελικό προϊόν στηρίζεται φυσικά από την ανεπεξέργαστη πρώτη ύλη, είτε τεχνητά δημιουργώντας μια βοηθητική δομή, όπως συμβαίνει στις τεχνολογίες φωτοπολυμερισμού και εναπόθεσης. Η αφαίρεση των τεχνητών υποστηρικτικών δομών είναι συχνά πιο απαιτητική διαδικασία από την αφαίρεση των φυσικών δομών υποστήριξης. Η αφαίρεση των υποστηρικτικών δομών απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή καθώς συχνά μένουν μερικά υπολείμματα στις επιφάνειες απ' όπου αφαιρέθηκαν, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η τραχύτητα στα σημεία αυτά [117].

Μια εξίσου σημαντική διαδικασία που ακολουθείται μετά το πέρας της εκτύπωσης είναι η βελτίωση της ποιότητας της επιφάνειας του αντικειμένου. Μια επιφανειακή κατεργασία που μπορεί να εφαρμοσθεί, για την εξομάλυνση της τραχύτητας, είναι αυτή της αμμοβολής ή της ανατάραξης του αντικειμένου σε θάλαμο με άμμο ή της χρήσης της βαφής. Όσον αφορά στην ποιότητα της επιφάνειας πολυμερών υλικών μπορεί να ακολουθήσει η εμβάπτιση του εξαρτήματος σε διαβρωτικό διάλυμα, όπως συνηθίζεται στη διαδικασία FDM κατά την οποία τα εξαρτήματα εμβαπτίζονται σε διάλυμα ακετόνης για την εξομάλυνση της κλιμακωτής υφής. Παρόλα αυτά, μερικά από τα ζητήματα που μπορεί να προκύψουν μέσω των παραπάνω διαδικασιών είναι η μη διαστασιολογική ακρίβεια του μοντέλου, σε σχέση με το αρχικό σχέδιο CAD [118].

Ένα επιπλέον στάδιο που ακολουθείται με την ολοκλήρωση της εκτύπωσης είναι αυτό της βελτίωσης των ιδιοτήτων του αντικειμένου. Στις περισσότερες τεχνολογίες ΠΚ δημιουργούνται πορώδεις δομές, οι οποίες στην ουσία δεν είναι επιθυμητές σε αρκετές εφαρμογές λόγω της μειωμένης μηχανικής αντοχής που προκαλείται και της διαπερατότητας. Οι διαδικασίες που ακολουθούνται σε αυτές τις περιπτώσεις είναι ο εμποτισμός του αντικειμένου σε ειδικά διαλύματα ούτως ώστε να κλείσουν οι πόροι, στην επιφάνεια κατά βάση. Στην περίπτωση των κεραμικών αντικειμένων, τα υλικά που χρησιμοποιούνται για εμποτισμό είναι κατά προτίμηση διάφορα είδη πολυμερών και κόλλες, όπως οι κυανοακρυλικές, ή ο συνδυασμός διαφόρων υλικών τα οποία θα προσδώσουν την απαιτούμενη αύξηση της αντοχής, της ελαστικότητας και της αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες με

μηχανισμούς ενίσχυσης σε νανο-κλίμακα. Από την άλλη, στην περίπτωση των μεταλλικών αντικειμένων που παράγονται μέσω της χρήσης της ΠΚ η ολοκλήρωση της διαδικασίας πραγματοποιείται μέσω μιας θερμικής επεξεργασίας. Στόχος αυτής της επεξεργασίας είναι η διαμόρφωση μιας επιθυμητής δομής σε μικρο-κλίμακα και η χαλάρωση των παραμενουσών τάσεων [119, 120].

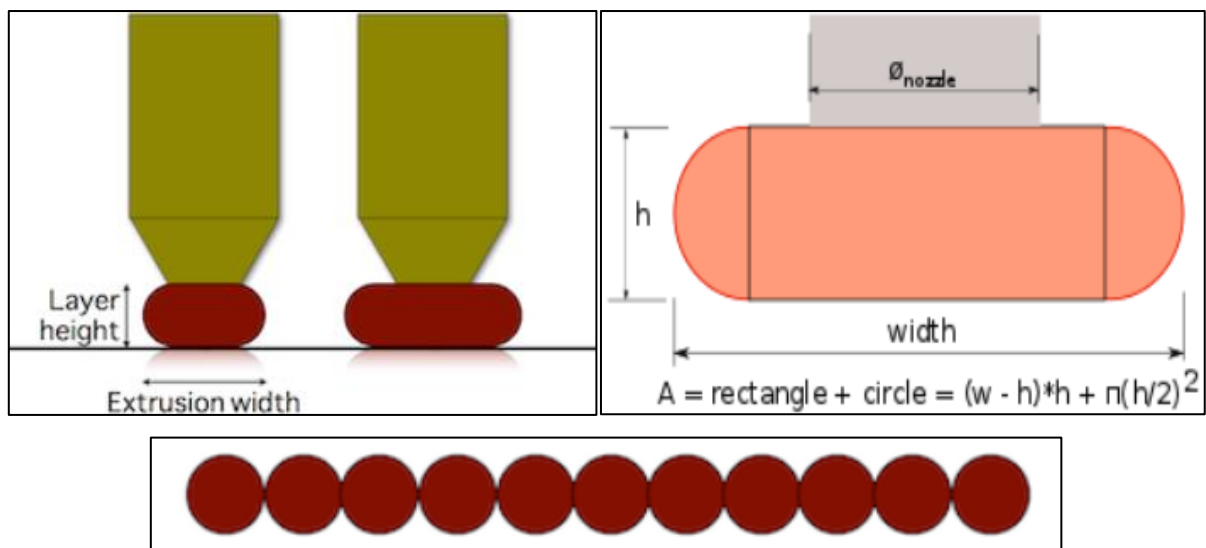
### **3.4.3 Ροή του υλικού κατά την εξαγωγή του από το ακροφύσιο**

Ανάλογα με το λογισμικό CAM που θα χρησιμοποιηθεί, εφαρμόζονται διαφορετικοί αλγόριθμοι για τον υπολογισμό του όγκου της ίνας που εξάγεται από το ακροφύσιο, για τη δημιουργία ίνας με συγκεκριμένο ύψος και πλάτος, σε χρόνο που ορίζεται από την ταχύτητα εκτύπωσης. Κατά την εκτύπωση, όταν δύο διαδρομές επικαλύπτονται είτε είναι πολύ κοντά μεταξύ τους είτε εξάγεται παραπάνω υλικό [121]. Στην περίπτωση που οι γειτονικές διαδρομές είναι αρκετά απομακρυσμένες μεταξύ τους το τελικό προϊόν μπορεί να σκεβρώσει λόγω μη επαρκούς συγκόλλησης. Συνεπώς, με την υπό- ή υπέρ-εξώθηση μπορούν να παραχθούν διαδρομές παχύτερες ή λεπτότερες. Οι παχύτερες διαδρομές παρέχουν καλύτερη συγκόλληση με την προηγούμενη στρώση, και κατά συνέπεια καθίστανται ιδανικότερες για την κατασκευή μηχανικών τμημάτων. Ωστόσο, υστερούν στην ακριβή προσέγγιση του σχήματος του αντικειμένου. Αντίθετα, οι λεπτότερες διαδρομές παρέχουν λιγότερο δυνατή συγκόλληση με τις προηγούμενες στρώσεις αλλά υπερτερούν ως προς την απόδοση της γεωμετρικής ακρίβειας [122].

Το πλάτος εξώθησης ορίζεται ως το πάχος του νήματος που εξωθείται είτε πάνω σε μια επιφάνεια είτε στον αέρα και όχι ως η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών διαδρομών. Στην πραγματικότητα, το πλάτος του νήματος που εξωθείται μπορεί να ελεγχθεί μόνο όταν η εξώθηση εκτελείται πάνω σε μια υπάρχουσα επιφάνεια. Όταν η εξώθηση γίνεται στον αέρα, το προκύπτον σχήμα θα είναι πάντα κυκλικής διατομής και ίσο με τη διάμετρο του ακροφυσίου [123]. Για τον υπολογισμό της ποσότητας του υλικού που απαιτείται για να παραχθεί ένα δεδομένο πλάτος χρειάζονται τρεις βασικές παράμετροι, η διάμετρος του νήματος, η διάμετρος του ακροφυσίου και το ύψος της στρώσης. Το ύψος της στρώσης επηρεάζει κυρίως την ομαλότητα των στερεών στοιχείων και την πρόσφυση με την προηγούμενη στρώση. Τα μεγάλα ύψη των στρώσεων προκαλούν εύθραυστες εκτυπώσεις [124].

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται το λογισμικό Slic3r για τον τεμαχισμό του μοντέλου γίνεται η παραδοχή ότι η διατομή της ίνας που εξέρχεται προκύπτει από το άθροισμα ενός ορθογωνίου και δύο ημικύκλιων άκρων, με τη διάμετρο των ημικύκλιων να ισούται με το ύψος της στρώσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.21. Χωρίς να ληφθεί υπόψη η διαστολή του πλαστικού κατά την εξώθησή του από το ακροφύσιο, ισχύει το ισοζύγιο μάζας στο σύστημα

[125]. Συγκεκριμένα, η ποσότητα του υλικού που εισέρχεται στο σύστημα ισούται με την ποσότητα του υλικού που εξάγεται από το ακροφύσιο κατά την εκτύπωση. Επομένως, ισχύει η σχέση ισότητας μεταξύ του όγκου του νήματος που εισέρχεται και εκείνου που εξέρχεται, συναρτήσει των διατομών και του μήκους. Το λογισμικό CAM, γνωρίζοντας την ονομαστική διάμετρο του νήματος, για μια δεδομένη απόσταση που θα διανύσει το ακροφύσιο υπολογίζει το μήκος του νήματος που πρέπει να ωθήσει στον θάλαμο τήξης. Ο υπολογισμός του μήκους του νήματος που θα ωθηθεί προς τον θάλαμο τήξης ισούται με την ποσότητα του νήματος που εξάγεται κατά την εκτύπωση, δηλαδή ισούται με την ποσότητα E, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα του G-κώδικα.



**Εικόνα 3.21:** Στην πάνω αριστερή εικόνα γίνεται αναπαράσταση της εναπόθεσης του υλικού πάνω σε μια επιφάνεια. Στην πάνω δεξιά εικόνα γίνεται ανάλυση της γεωμετρίας της ίνας που εναποτίθεται σε μια επιφάνεια. Η κάτω εικόνα αναπαριστά τη διάταξη μιας διαδρομής μέσα στον χώρο, διατηρώντας το κυκλικό σχήμα, όπως όταν εξάγεται από το ακροφύσιο [31].

Έστω,  $A_o$ ,  $l_o$  ( $l_o=E$ ) η αρχική διατομή και το μήκος του νήματος που εισέρχεται στο σύστημα αντίστοιχα και  $A_1$ ,  $l_1$  οι αντίστοιχες ποσότητες κατά την εξαγωγή του υλικού από το ακροφύσιο. Συνεπώς, σύμφωνα με το ισοζύγιο μάζας ισχύει η σχέση [126]:

$$A_o \cdot l_o = A_1 \cdot l_1$$

### 3.4.4 Αστοχίες κατά την εκτύπωση

Ακόμα και στην περίπτωση δημιουργίας ενός φαινομενικά απλού μοντέλου μπορούν να εμφανιστούν αρκετά εμπόδια κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, κατά την εκτύπωση το νήμα μπορεί είτε να κοπεί είτε να έχει ήδη φθαρεί η επιφάνειά του με αποτέλεσμα να σταματάει η εκτύπωση ή να μην ωθείται σωστά το νήμα, με σταθερό βήμα, προς το θερμό άκρο αντίστοιχα. Μια άλλη περίπτωση που προκαλεί αστοχία κατά την εκτύπωση είναι η πολύ κοντινή απόσταση του ακροφυσίου ως προς την πλατφόρμα εκτύπωσης. Στην ουσία, η οπή του ακροφυσίου είναι μπλοκαρισμένη χωρίς να αφήνει τον

απαραίτητο χώρο για την εξώθηση του υλικού. Επίσης, εμπόδιο ως προς την εξώθηση του υλικού μπορεί να αποτελέσει η φραγή του ακροφυσίου λόγω της παγίδευσης ξένων σωματιδίων μέσα σε αυτό.

Επιπρόσθετα, μπορεί να εμφανιστεί αστοχία ως προς τη σωστή συγκόλληση των στρώσεων πάνω στην πλατφόρμα εκτύπωσης. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να οφείλεται στη μεγάλη απόσταση του ακροφυσίου από την πλατφόρμα εκτύπωσης ή στη λανθασμένη βαθμονόμηση αυτής. Επιπλέον, μπορεί να προκαλείται από παραμέτρους όπως μεγάλη ταχύτητα εκτύπωσης, θερμοκρασία του υλικού και της πλατφόρμας εκτύπωσης και ισχύς του ανεμιστήρα. Τη λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα αρκετές φορές δίνει η δημιουργία μιας περιφέρειας (skirt) γύρω από τον χώρο στον οποίο θα εκτυπωθεί το επιθυμητό αντικείμενο, πριν τη δημιουργία του, ούτως ώστε να σταθεροποιηθεί η ροή του υλικού. Μια εναλλακτική λύση μπορεί να αποτελέσει η δημιουργία αρχικά μερικών αραιών στρώσεων (raft) τα οποία παρέχουν μεγαλύτερη επιφάνεια για την προσκόλληση με την πλατφόρμα [127].



## 4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Το πρώτο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας ξεκίνησε με την ψηφιακή απεικόνιση ενός εμπορικού δείγματος ινών άνθρακα με εποξειδική ρητίνη, τύπου T700S της εταιρίας Toray, με κατεύθυνση ινών 0° ως προς το υπόστρωμα. Η ψηφιακή απεικόνιση του δείγματος πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του μικροτομογράφου της εταιρίας Bruker, μοντέλου Skyscan 1272, που διατέθηκε από το εργαστήριο R-Nano. Ακολούθησε η επεξεργασία των δεδομένων του εμπορικού δείγματος, μέσω ειδικών λογισμικών και η εξαγωγή αυτού σε αρχείο τύπου STL, για τρεις διαφορετικές περιοχές του δείγματος. Λόγω του ότι η δομή του δείγματος δεν ήταν εφικτό να απεικονιστεί αναλυτικά και καθαρά, προκειμένου τα αρχεία STL να είναι εκτυπώσιμα, έγινε περαιτέρω επεξεργασία αυτών των αρχείων στο ειδικό σχεδιαστικό λογισμικό της SolidWorks. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η σύνταξη του G-κώδικα στην προσπάθεια προσέγγισης της γεωμετρικής δομής του δείγματος. Κώδικας γράφτηκε τόσο για τις 0° όσο και για τις 45°, μεταβάλλοντας διάφορες παραμέτρους κάθε φορά, προκειμένου να διαπιστωθεί η επίδραση της κάθε παραμέτρου στο τελικό αποτέλεσμα. Μετέπειτα, ακολούθησε η εκτύπωση των τριών αρχείων STL και του κάθε κώδικα στον 3-D εκτυπωτή. Τέλος, εφαρμόστηκε η μέθοδος της θλίψης σε όλα τα δείγματα για την ποιοτική πρόβλεψη της αντοχής και αστοχίας του αντίστοιχου εμπορικού υλικού.

### 1<sup>ο</sup> ΜΕΡΟΣ

#### 4.1 Ψηφιακή απεικόνιση εμπορικού δείγματος

##### 4.1.1 Χαρακτηριστικά του δείγματος

Το συνθετικό εμπορικό δείγμα που σαρώθηκε είναι ένα δείγμα ινών άνθρακα μέσα σε εποξειδική ρητίνη, όπως προαναφέρθηκε, της εταιρίας Toray. Αυτή η κατηγορία ινών άνθρακα χαρακτηρίζεται για την αποδοτικότητά της ως προς το κόστος, καθώς πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ως προς την αντοχή εφελκυσμού ανά μονάδα κόστους. Οι τυποποιημένες ίνες άνθρακα τύπου T700S έχουν υψηλή αντοχή εφελκυσμού και αποτελούν πρότυπες ίνες μέτρησης με εξαιρετικά χαρακτηριστικά επεξεργασίας για την περιέλιξη νημάτων, τον προ-εμποτισμό και την ύφανση. Οι ίνες αυτές χρησιμοποιούνται σε ποικίλες εφαρμογές τόσο βιομηχανικές όσο και ψυχαγωγικές, συμπεριλαμβανομένων



Εικόνα 4.1: Εμπορικό δείγμα ινών άνθρακα της εταιρίας Toray.

των δοχείων πίεσης όπως οι δεξαμενές αποθήκευσης οχημάτων φυσικού αερίου (Natural gas vehicle, NGV) και οι δεξαμενές αναπνοής (Self-contained breathing apparatus, SCBA). Τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες των ινών αναγράφονται στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 4.1:** Χαρακτηριστικά και ιδιότητες των ινών άνθρακα μέσα στο δείγμα.

Ιδιότητες Ινών	Διεθνές σύστημα μονάδων SI
Tensile Strength	4900 MPa
Tensile Modulus	230 GPa
Strain	2.10%
Πυκνότητα	1.80 g/cm <sup>3</sup>
Διάμετρος ίνας	7 μm

Οι αντίστοιχες ιδιότητες ολόκληρου του συνθετικού δείγματος φαίνονται στον παρακάτω πίνακα [128].

**Πίνακας 4.2:** Χαρακτηριστικά ολόκληρου του εμπορικού δείγματος.

Ιδιότητες του συνθετικού δείγματος	Διεθνές σύστημα μονάδων SI
Tensile Strength	2550 MPa
Tensile Modulus	135 GPa
Strain	1.70%
Compressive Strength	1470 MPa
Flexural Strength	1670 MPa
Flexural Modulus	120 GPa

#### 4.1.2 Προετοιμασία του δείγματος για τη διαδικασία της σάρωσης

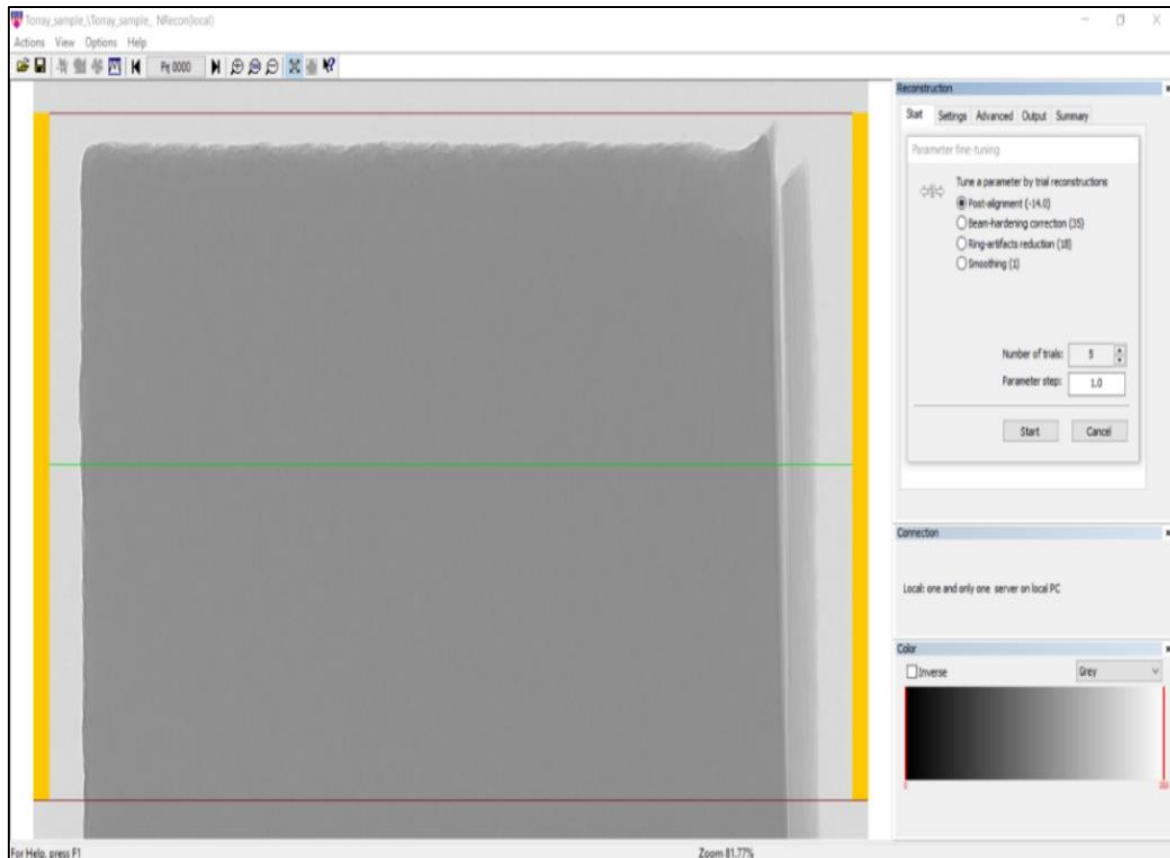
Με την ολοκλήρωση της προθέρμανσης της πηγής του σαρωτή, το δείγμα τοποθετήθηκε με ιδιαίτερη προσοχή στον δειγματοφορέα, με τη βοήθεια μικρής ποσότητας κεριού (dental wax) ανάμεσα στο δείγμα και τον δειγματοφορέα για την αποτελεσματικότερη προσκόλληση του δείγματος. Στη συνέχεια, ακολούθησε το κλείσιμο της πόρτας καθώς και οι απαραίτητες ρυθμίσεις μέσω του ειδικού λογισμικού SkyScan 1272 της εταιρίας Bruker, για την έναρξη της σάρωσης. Μέσω αυτού του λογισμικού ρυθμίστηκε η τοποθέτηση του δείγματος όσο πιο κεντρικά και συμμετρικά γίνεται γύρω από τον άξονα περιστροφής του, για την αποφυγή τυχόν ψευδενδείξεων από λανθασμένη ευθυγράμμιση των προβολών. Ταυτόχρονα, το δείγμα μεταφέρθηκε όσο το δυνατόν πιο κοντά στην πηγή για την απόκτηση αναλυτικών και ευδιάκριτων εικόνων, μειώνοντας τον αριθμό των pixel. Το δοκίμιο τοποθετήθηκε σε απόσταση 52.50 mm από την πηγή, με δυναμικό 40 kV. Πραγματοποιήθηκε περιστροφή 180° με βήμα 0.095°, χωρίς την παρουσία φίλτρου. Η διάρκεια της σάρωσης κράτησε 4 ώρες και 2 λεπτά.



**Εικόνα 4.2:**  
Δειγματοφορέας, με ποσότητα κεριού πριν την τοποθέτηση του δείγματος προς σάρωση.

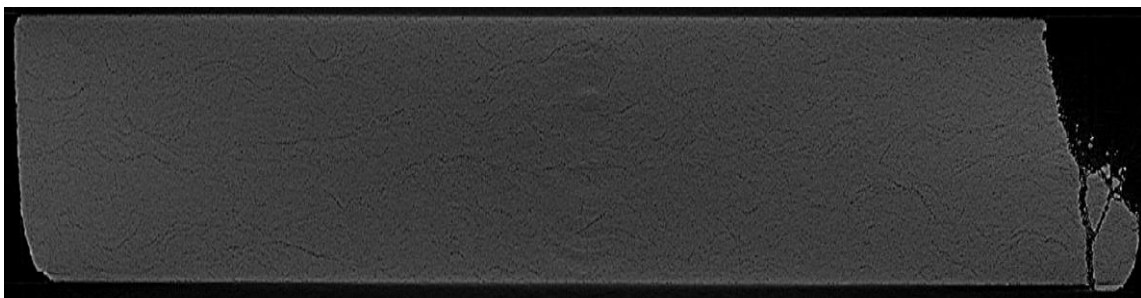
#### 4.1.3 Επεξεργασία φετών-Εξαγωγή αρχείου STL

Μετά το πέρας της σάρωσης, ακολούθησε το στάδιο της ανοικοδόμησης των συνολικών φετών που συλλέχθηκαν από το μοντέλο, μέσω του προγράμματος NRecon. Με την εισαγωγή των εικονικών φετών στο λογισμικό NRecon λαμβάνεται η συνολική εικόνα του δείγματος που σαρώθηκε, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Τέλος, επιλέχθηκε η μέγιστη επιτρεπόμενη περιοχή που ορίζει το λογισμικό για την πραγματοποίηση των διορθώσεων. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν τέσσερις βασικές διορθώσεις ως προς την ευθυγράμμιση του δοκιμίου (Post-alignment), τη σκλήρυνση της δέσμης (Beam-hardening), το φαινόμενο του δακτυλιδιού (Ring-artifacts) και της εξομάλυνσης (Smoothing) της εικόνας.



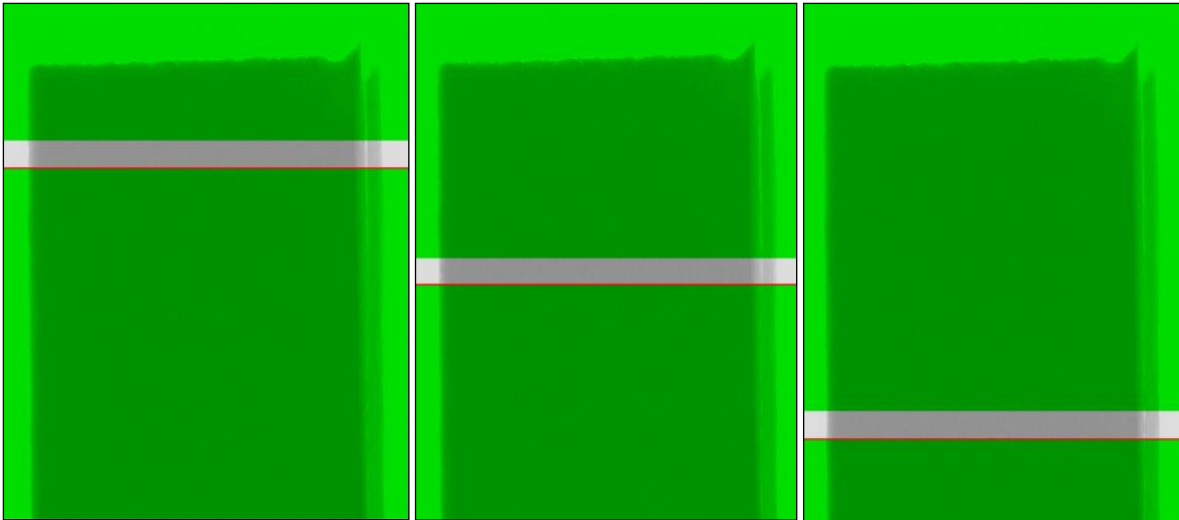
**Εικόνα 4.3:** Ανοικοδόμηση των φετών μέσω του λογισμικού NRecon.

Με την ολοκλήρωση των διορθώσεων, παρουσιάζεται παρακάτω η τελική εικόνα της εσωτερικής δομής του δείγματος, σε μία τυχαία διατομή του.



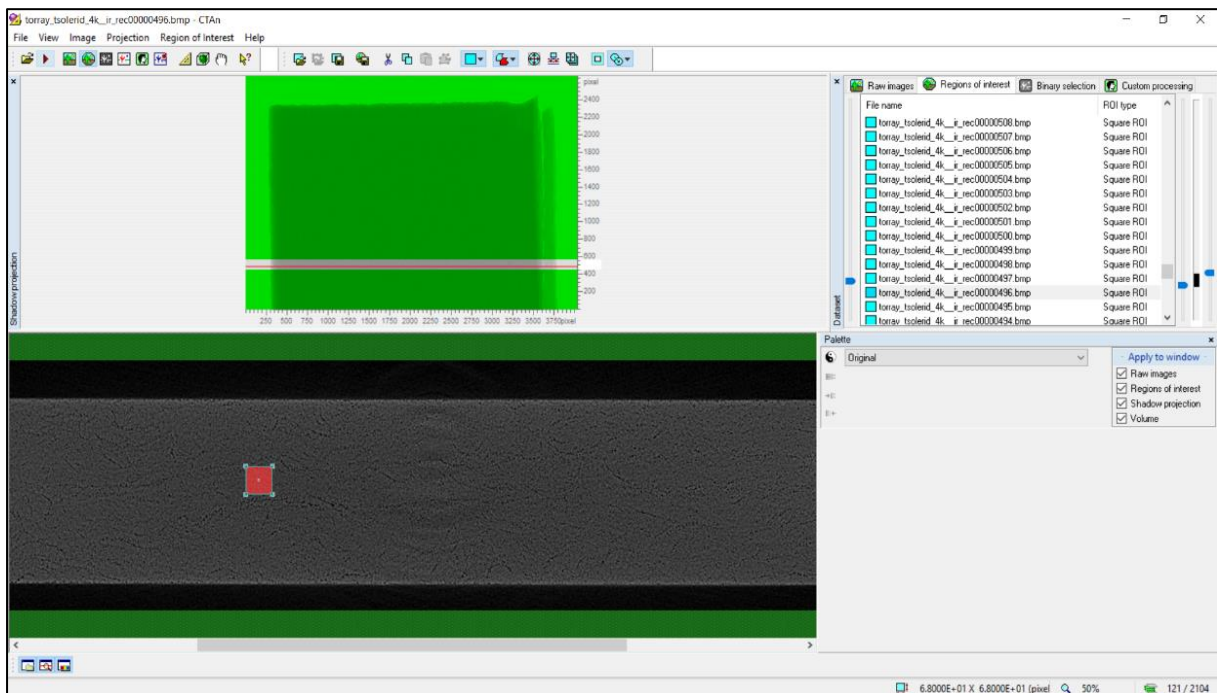
**Εικόνα 4.4:** Τυχαία διατομή του εμπορικού δείγματος, στο λογισμικό NRecon.

Μετά την ανασυγκρότηση ακολούθησε η επεξεργασία των δεδομένων στο λογισμικό CTAn. Κατά την εισαγωγή των δεδομένων στο λογισμικό παρουσιάζεται ολόκληρη η περιοχή του δείγματος που επιλέχθηκε από το προηγούμενο λογισμικό. Συγκεκριμένα στο πείραμα, λόγω της επαναλαμβανόμενης δομής του δείγματος επιλέχθηκαν τρεις περιοχές προς μελέτη, σε διαφορετικό ύψος η κάθε μια, με μικρό εύρος, για την απεικόνιση και τη σύγκριση της τοποθέτησης των ινών μέσα στην εποξειδική ρητίνη.



**Εικόνα 4.5:** Τρεις διαφορετικές περιοχές του δείγματος προς μελέτη, μέσω του λογισμικού CTAn.

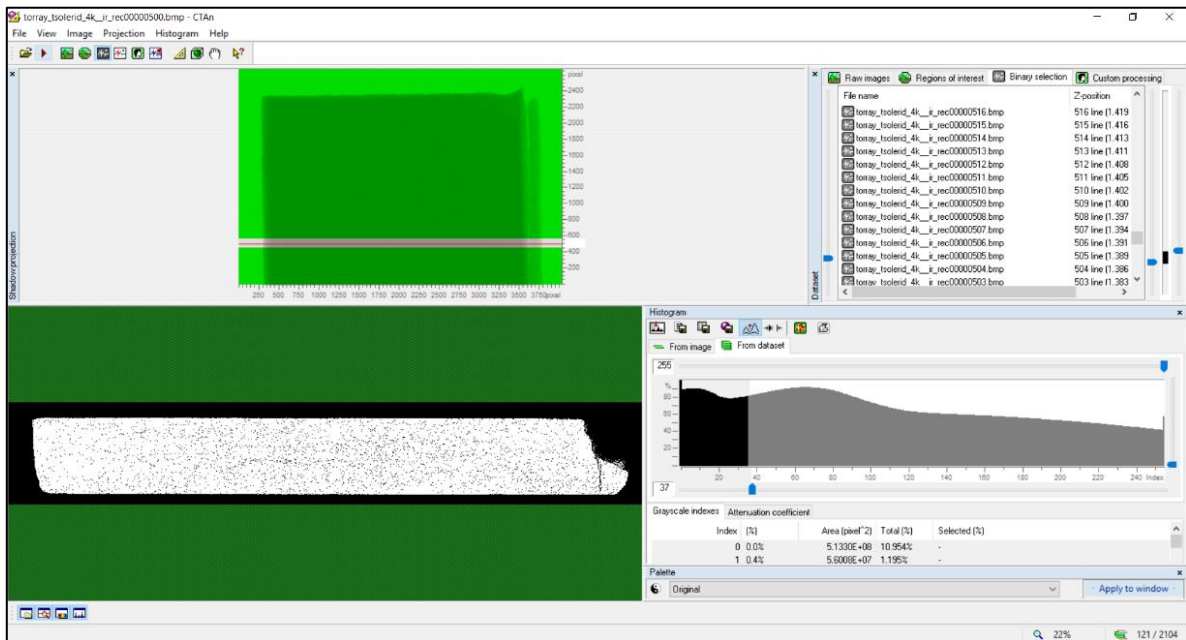
Μέσα σε αυτό το εύρος, με την επιλογή μιας τυχαίας φέτας υπάρχει η δυνατότητα μελέτης της οποιασδήποτε επιθυμητής περιοχής (Region of interest, ROI) πάνω σε αυτή. Η επιθυμητή περιοχή μπορεί να εκφραστεί με διάφορα γεωμετρικά σχήματα. Ανάλογα με τη γεωμετρία που επιθυμεί ο εκάστοτε χρήστης να παρουσιάσει, μπορεί να δημιουργήσει μια μεταβαλλόμενη γεωμετρία κατά μήκος του εύρους. Συγκεκριμένα, σε αυτήν την εργασία επιλέχθηκε μια μικρή τετράγωνη περιοχή, ενιαία σε όλο το εύρος, μακριά από το κέντρο του δείγματος για την αποφυγή λήψης αλλοιωμένων 3-D εικόνων, λόγω της εμφάνισης του δαχτυλιδιού στο κέντρο.



**Εικόνα 4.6:** Ένα μικρό τμήμα της διατομής (κόκκινο τετράγωνο) του δείγματος, προς μελέτη, από μία μικρή περιοχή που επιλέχθηκε στην προηγούμενη εικόνα, μέσω του λογισμικού CTAn.

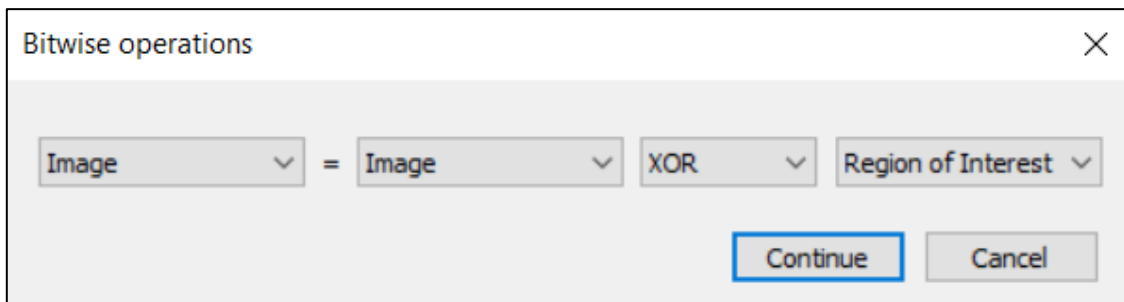
Το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει τη διακριτοποίηση των τριών φάσεων μέσα στο δείγμα, του αέρα, της εποξειδικής ρητίνης και των ινών άνθρακα. Σε αυτή τη φάση η εικόνα από

αποχρώσεις γκριζου μετατρέπεται σε εικόνα δυαδικής μορφής (άσπρο-μαύρο). Το στάδιο αυτό ονομάζεται διακριτοποίηση (Thresholding) και αποτελεί μια διαδικασία απλοποίησης της εικόνας. Η κάθε κορυφή του ιστογράμματος αντιπροσωπεύει μια διαφορετική φάση (η πρώτη κορυφή αριστερά είναι πάντα ο αέρας), όπως παρουσιάζεται στα δεξιά της εικόνας 4.7. Ανάλογα με τη φάση που χρειάζεται να μελετηθεί, επιλέγονται τα αντίστοιχα όρια γύρω από την κορυφή.



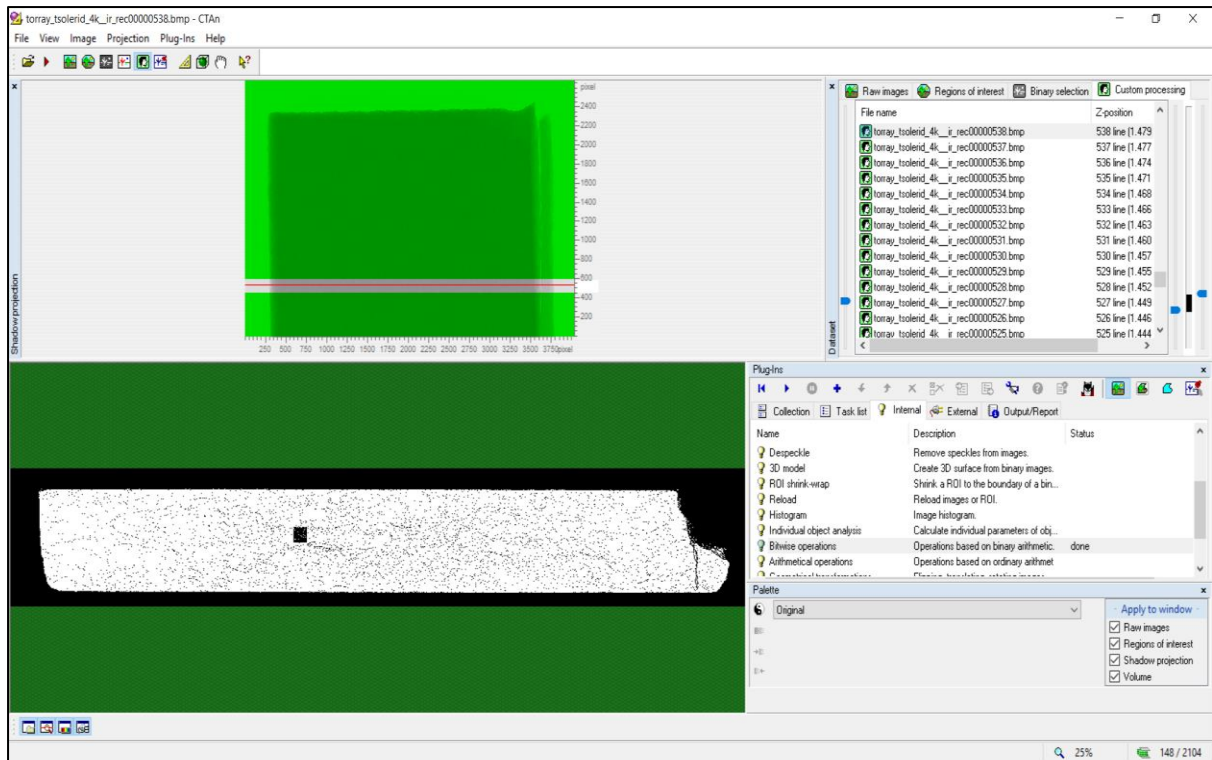
Εικόνα 4.7: Στάδιο διακριτοποίησης (Thresholding), μέσω του λογισμικού CTAn.

Στο συγκεκριμένο δείγμα, ο τύπος του Thresholding που χρησιμοποιήθηκε είναι Global, για τα όρια τα οποία τέθηκαν αρχικά στο ιστογράμμο, αυτόματα από το πρόγραμμα. Σε αυτό το στάδιο, η δημιουργία STL αρχείου θα δώσει ως 3-D εικόνα το πληρωτικό υλικό. Προκειμένου να αντιστραφεί η εικόνα και να αναπαριστούνται οι ίνες άνθρακα ως τριδιάστατο μοντέλο αυτό που μπορεί να συμβεί είναι είτε η χειροκίνητη αλλαγή του εύρους στο ιστογράμμο είτε να χρησιμοποιηθεί η εντολή Bitwise operations, όπως πράγματι πραγματοποιήθηκε.



Εικόνα 4.8: Στάδιο αντιστροφής της εικόνας στην εντολή Bitwise operations, στο λογισμικό CTAn.

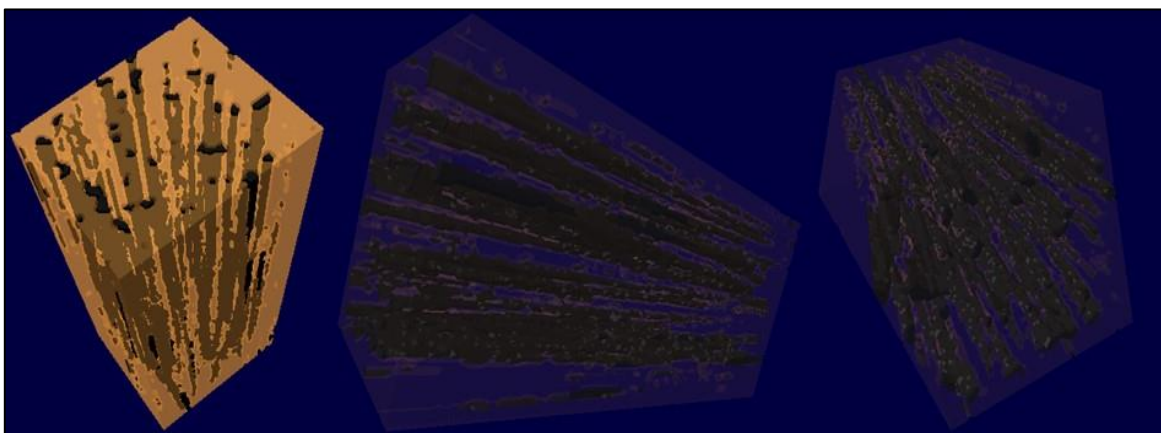
Το αποτέλεσμα αυτής της εντολής, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 4.9, είναι η αντιστροφή του ROI σε σχέση με ολόκληρη την περιοχή της διατομής τους δείγματος.



**Εικόνα 4.9:** Αποτέλεσμα της αντιστροφής της μικρής περιοχής σε σχέση με ολόκληρη την περιοχή, στο λογισμικό CTAn.

Τέλος, με την εντολή 3-D model δημιουργείται το STL αρχείο, έτοιμο για τη μετεπεξεργασία του στο λογισμικό SolidWorks. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τα υπόλοιπα δύο εύρη, όπως παρουσιάστηκαν στην εικόνα 4.5.

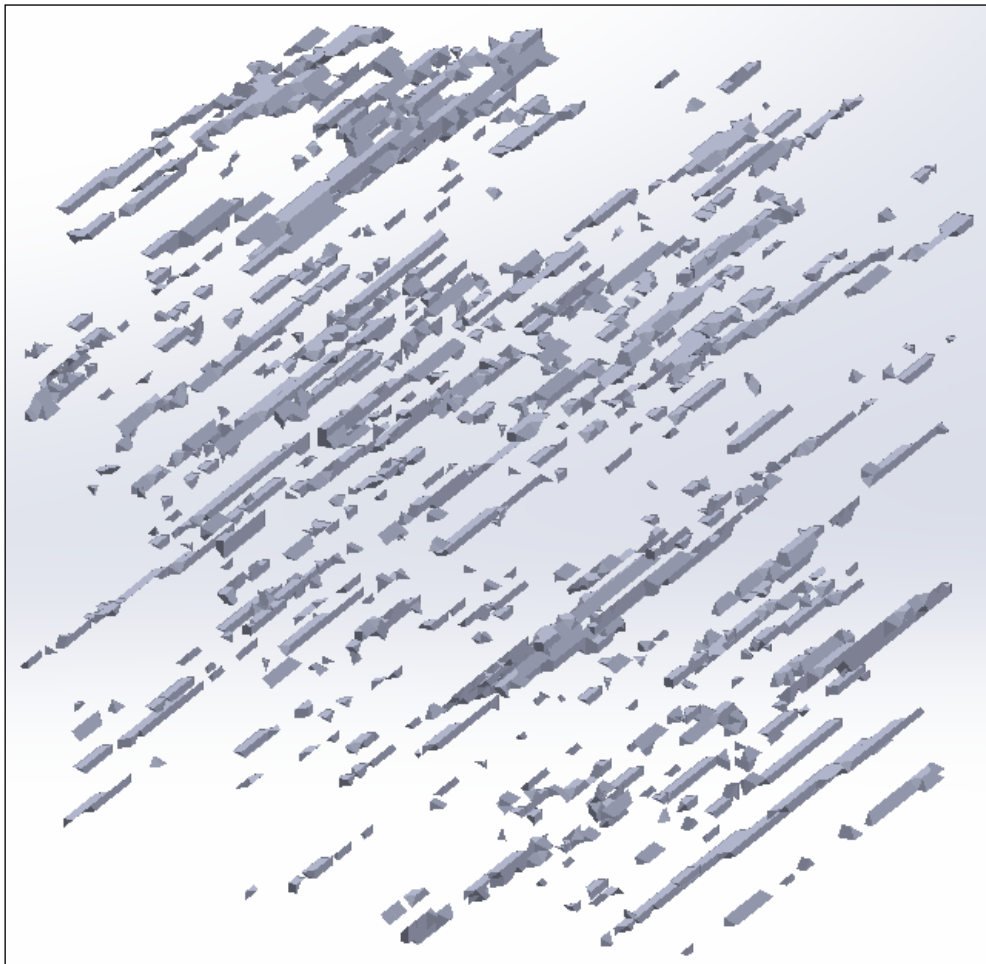
Το 3-D μοντέλο που εξάγεται από το CTAn, κατά τη συνένωση των αρχείων STL του πληρωτικού υλικού και των ινών άνθρακα, είναι το ακόλουθο.



**Εικόνα 4.10:** Το τελικό τριδιάστατο μοντέλο κατά τη συνένωση των αρχείων των ινών άνθρακα και του πληρωτικού υλικού.-Αναπαράσταση του μοντέλου μέσω του λογισμικού CTVol.

#### 4.1.4 Επανασχηματισμός ιών στο SolidWorks - Εκτύπωση με διπλή κεφαλή

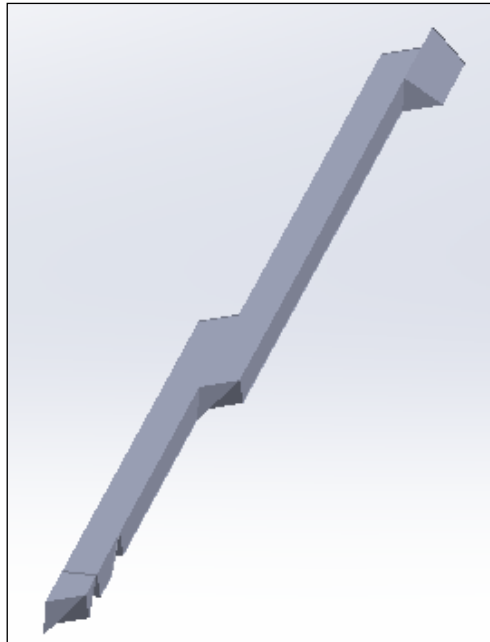
Παρατηρείται ότι το μοντέλο που προκύπτει δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα καθαρή εικόνα, κατάλληλη για 3-D εκτύπωση. Το γεγονός αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στις παραμέτρους που τέθηκαν πριν τη σάρωση του δείγματος. Σε περίπτωση που ορίζονταν επιπλέον παράμετροι για την απόκτηση πιο ευδιάκριτων εικόνων, θα αυξάνονταν υπερβολικά ο όγκος των δεδομένων, με αποτέλεσμα να μην είναι επεξεργάσιμα τα αρχεία. Τη λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα προσφέρει το σχεδιαστικό πρόγραμμα SolidWorks. Αρχικά έγινε εισαγωγή του αρχείου STL των ιών άνθρακα στο λογισμικό SolidWorks, μέσω της επέκτασης XTract3D.



**Εικόνα 4.11:** Αναπαράσταση των ιών άνθρακα με την εισαγωγή του αρχείου STL στο σχεδιαστικό λογισμικό SolidWorks.

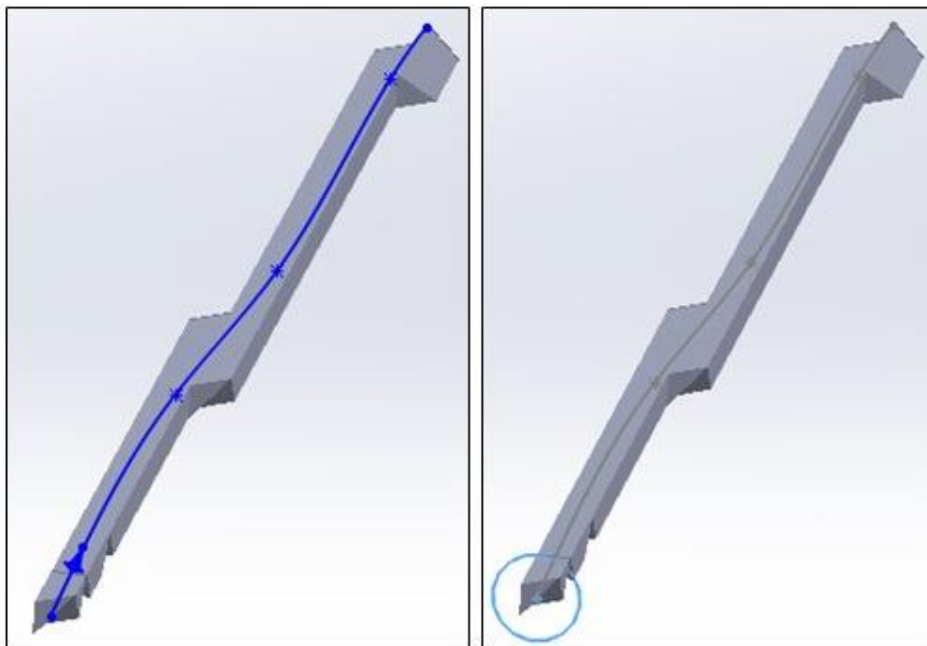
Μέσω αυτής της επέκτασης σχεδιάστηκαν καμπύλες (Splines) πάνω στις ίνες. Με αυτόν τον τρόπο, δίνεται η δυνατότητα ένωσης διάσπαρτων τμημάτων μιας ίνας προς τον σχηματισμό μια ενιαίας. Για παράδειγμα, για την κατανόηση του τρόπου λειτουργίας της επέκτασης απομονώθηκε μια τυχαία ίνα.





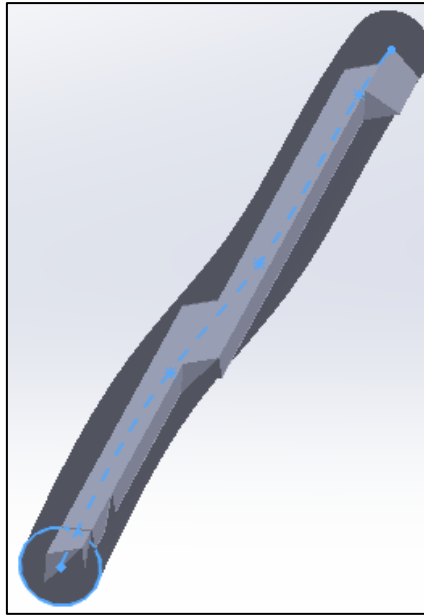
**Εικόνα 4.12:** Απομόνωση μιας ίνας από τον χώρο, αλλοιωμένης γεωμετρίας.

Πάνω στη συγκεκριμένη ίνα σχεδιάστηκε ένα Spline, προσαρμοσμένο στην καμπύλη της ίνας. Στη συνέχεια, σχεδιάστηκε ένας κύκλος, κάθετα στο Spline, με κέντρο το ένα άκρο του Spline.



**Εικόνα 4.13:** Στην αριστερή εικόνα σχηματίζεται το Spline-Στη δεξιά εικόνα σχεδιάζεται ο κύκλος με κέντρο την αρχή του Spline.

Τέλος, με την εντολή Swept Boss/Base σχηματίστηκε ένας σωλήνας, με διάμετρο ίση με αυτή του κύκλου, κατά μήκος του Spline.



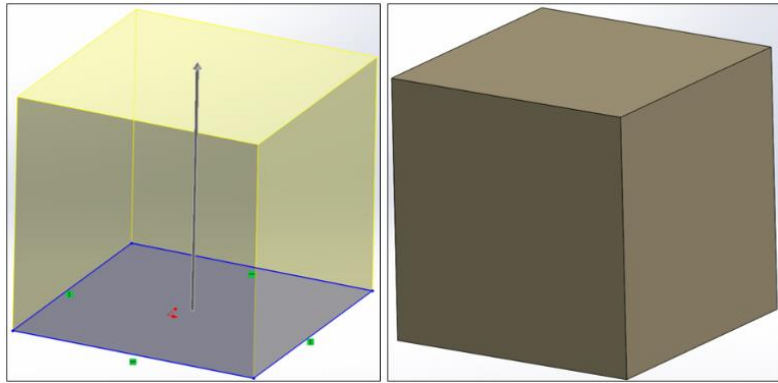
**Εικόνα 4.14:** Σχηματισμός ίνας, με την εντολή Sweep Boss/Base.

Κατά αυτόν τον τρόπο επανασχηματίστηκαν όλες οι ίνες άνθρακα του συγκεκριμένου αρχείου STL. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τα υπόλοιπα δύο αρχεία STL που εξήχθησαν από το λογισμικό CTAπ.



**Εικόνα 4.15:** Επανασχηματισμός των ινών άνθρακα και των τριών αρχείων STL.

Από τη στιγμή που υπάρχει πλέον η γεωμετρία των ινών, το επόμενο στάδιο είναι ο σχεδιασμός του πληρωτικού υλικού. Αρχικά σχεδιάστηκε μια τετράγωνη βάση και στη συνέχεια με την εντολή Extruded Boss/Base δόθηκε

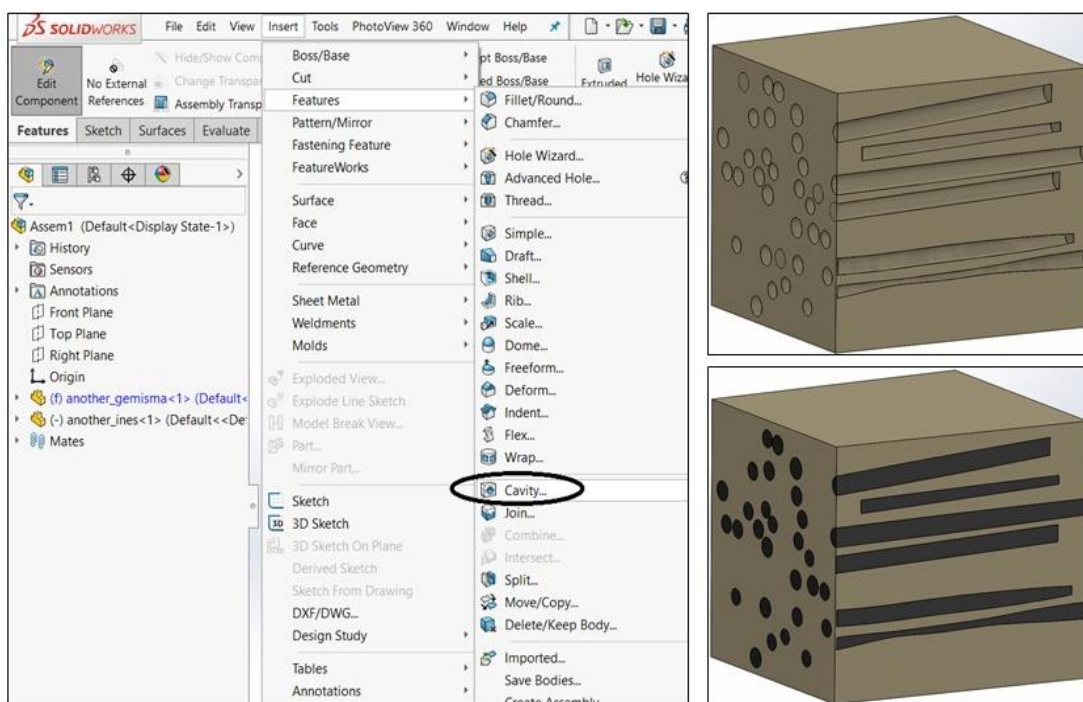


Εικόνα 4.16: Αρχικό στάδιο σχηματισμού του καλούπιού.

ύψος για τον σχηματισμό ενός

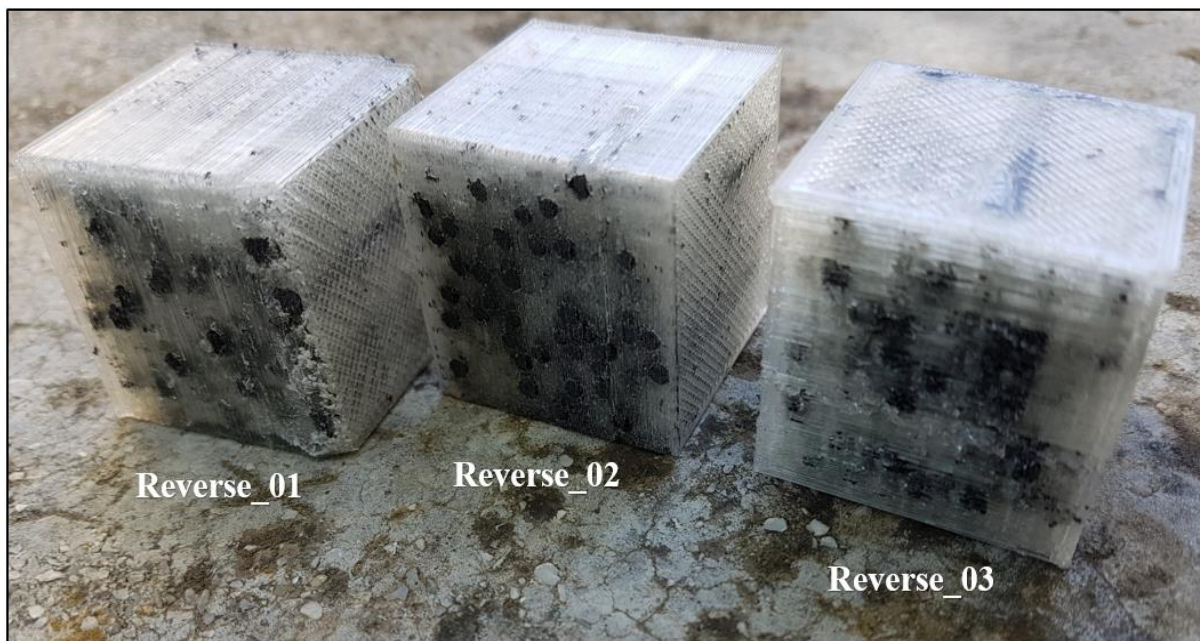
κύβου. Οι διαστάσεις του κύβου σχεδιάστηκαν ελάχιστα πιο μεγάλες σε σχέση με τις αντίστοιχες διαστάσεις που καταλαμβάνουν οι ίνες στον χώρο, προκειμένου να ενσωματωθούν μέσα στον κύβο.

Στη συνέχεια γίνεται η ενσωμάτωση των αρχείων του κύβου και των ινών σε ένα κοινό χώρο εργασίας, προς την ένωσή τους, με την εντολή mate. Μετά τη συνένωση των δύο αρχείων και μέσω της αφαιρετικής διαδικασίας, απομονώνονται οι ίνες από τον κύβο αφήνοντας το στίγμα τους μέσα σε αυτό. Κατά αυτόν τον τρόπο σχεδιάστηκε το πληρωτικό υλικό. Αναλυτικά τα στάδια της δημιουργίας του πληρωτικού υλικού είναι τα εξής. Αρχικά επιλέγεται το μοντέλο του κύβου και στη συνέχεια η εντολή Edit Component. Μετέπειτα, με την εντολή Cavity επιλέγονται οι ίνες προκειμένου να αφαιρεθούν από τον κύβο. Κατά συνέπεια, σχηματίζεται ένας κύβος με οπές, ίσης γεωμετρίας με αυτή των ινών.



Εικόνα 4.17: Στάδιο δημιουργίας των κενών, με την αφαίρεση των ινών από το καλούπι-Δημιουργία δύο διαφορετικών αρχείων STL.

Το επόμενο στάδιο, μετά την ολοκλήρωση του σχεδίου είναι η εκτύπωση των δύο αρχείων στον 3-D εκτυπωτή Zmorph, με διπλή κεφαλή. Η επεξεργασία των αρχείων και η σωστή ευθυγράμμιση τους πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό Voxelizer. Το τελικό μοντέλο έχει διαστάσεις  $3 \cdot 3 \cdot 3 \text{ cm}^3$ . Για την εκτύπωσή του χρησιμοποιήθηκε υλικό PLA natureworks 4043D για το πληρωτικό υλικό και CarbonFil της Formfutura για τις ίνες άνθρακα. Το συνολικό μήκος του νήματος που χρησιμοποιήθηκε ήταν 11m και το μοντέλο ζύγισε περίπου 35 gr. Το ποσοστό του infill του κάθε υλικού και για τα τρία δείγματα είναι 40%. Η ίδια διαδικασία εφαρμόστηκε και για τις υπόλοιπες δύο περιοχές. Τα τελικά μοντέλα που εκτυπώθηκαν αποτελούν την αντίστροφη (Reverse) εκδοχή των τμημάτων του εμπορικού δείγματος.



**Εικόνα 4.18:** Τα STL αρχεία της reverse εκδοχής της εσωτερικής δομής του εμπορικού δείγματος, σε 3-D μορφή.

## 2<sup>ο</sup> ΜΕΡΟΣ

### 4.2 Σύνταξη G-κώδικα

Το δεύτερο μέρος της εργασίας αφορά τη σύνταξη του G-κώδικα τόσο για τις 0° όσο και για τις 45° όπως προαναφέρθηκε, η βασική ιδέα του οποίου στηρίχτηκε στη γεωμετρική δομή του δείγματος Toray. Σκοπός της σύνταξης του G-κώδικα είναι η δημιουργία ενός μοντέλου σε μορφή πλέγματος, το οποίο θα προσεγγίζει ποιοτικά τη δομή του εμπορικού δείγματος των ινών. Η δομή του πλέγματος θα αποτελείται από δύο διαφορετικές επαναλαμβανόμενες στρώσεις. Τόσο στην περίπτωση των 0° όσο και των 45°, η μία στρώση θα αποτελείται από μια σειρά παράλληλων ινών σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους, η οποία θα αναπαριστά τη γεωμετρία των ινών άνθρακα. Αντίθετα, η δεύτερη στρώση στην περίπτωση των 0° θα είναι κάθετη στην πρώτη ενώ στη δεύτερη περίπτωση θα σχηματίζει γωνία 45°.

Ταυτόχρονα, η δεύτερη στρώση θα αποτελείται επίσης από μια σειρά παράλληλων ινών με πιο αραιή απόσταση μεταξύ τους, η οποία θα αντιστοιχεί στη δομή του πληρωτικού υλικού του εμπορικού δείγματος. Η δημιουργία της αραιής δομής είναι απαραίτητη καθότι λειτουργεί σα βάση για να χτιστεί η κάθε επόμενη στρώση των πυκνών ινών. Κατά αυτόν τον τρόπο, αποτρέπεται μια πιθανή σκέβρωση της ίνας μετά την εξαγωγή της από το ακροφύσιο στη διάρκεια της εκτύπωσης. Η επιλογή της γεωμετρίας του πλέγματος ήταν ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο, μικρού μεγέθους. Ο λόγος που γράφτηκε κώδικας για μικρό μέγεθος πλέγματος είναι διότι παρέχει τη δυνατότητα, μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα και με χαμηλό κόστος (μικρή ποσότητα υλικού), να μελετηθεί η εκτυπωτική συμπεριφορά του για διάφορες παραμέτρους εκτύπωσης. Οι υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν για τις συντεταγμένες των διαδρομών και για την ποσότητα του υλικού, έλαβαν χώρα στο λογισμικό Excel. Τέλος, ο κάθε κώδικας μεταφέρθηκε σε σημειωματάριο υπό τη μορφή αρχείου gcode, έτοιμο προς εκτύπωση.

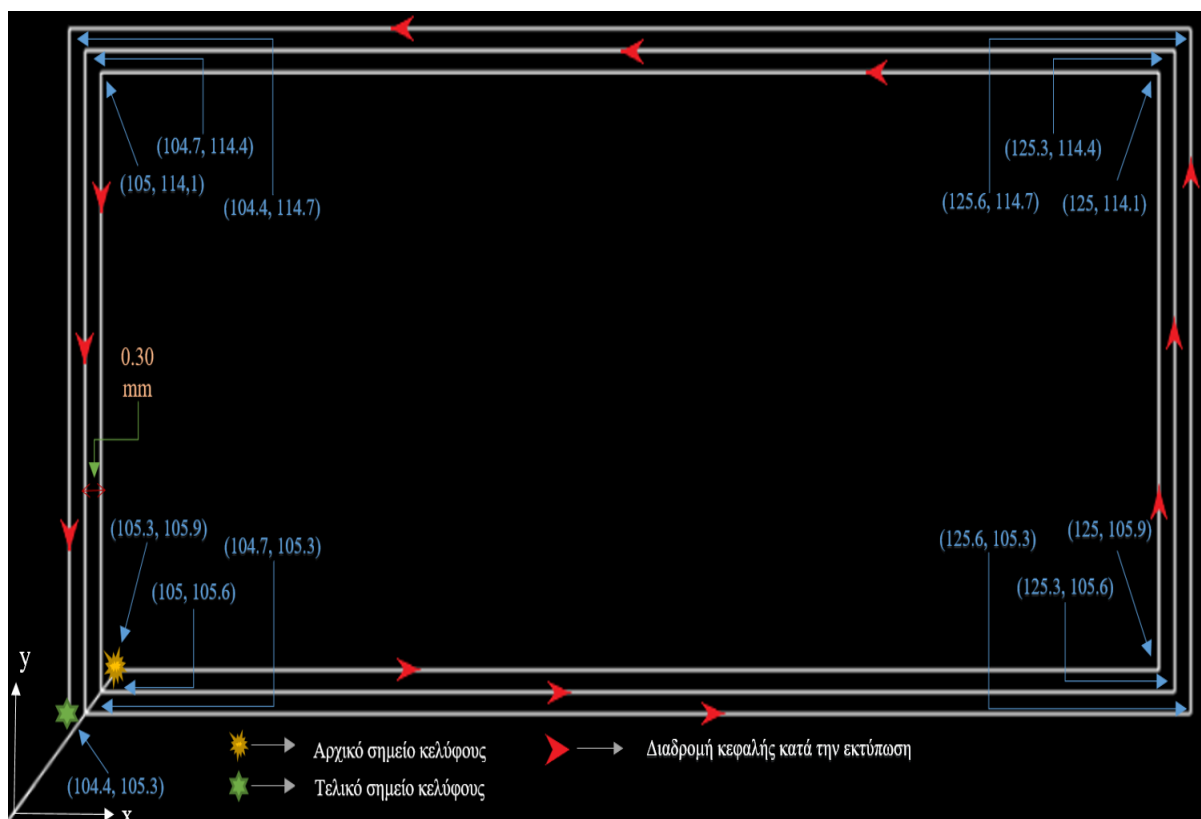
#### 4.2.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κώδικα - Τροχιά κεφαλής

Η γενική μορφή του κώδικα που θα εκτυπωθεί, αποτελείται από μια στρώση skirt, δύο στρώσεις raft και τις δύο διαφορετικές επαναλαμβανόμενες στρώσεις μέσα στον χώρο, οι οποίες ορίζουν και τη γεωμετρία του πλέγματος. Τόσο για τον σχηματισμό του πλέγματος όσο και για το raft είναι απαραίτητη η δημιουργία κελύφους σε κάθε στρώση, πάνω στο οποίο η ίνα «δένει», διατηρώντας την επιθυμητή γεωμετρία. Συνολικά, το πλέγμα αποτελείται από 13 στρώσεις, με τις 7 να ορίζουν τη γεωμετρία που είναι παράλληλη ως προς τον άξονα των x και τις υπόλοιπες 6 το υπόστρωμα. Κάθε νέα αλλαγή ύψους για την επόμενη στρώση γίνεται σε ύψος 0.30 mm. Οι διαστάσεις του τελικού παραλληλεπίπεδου είναι 21.2·9.4·3.90 mm.

Αρχικά, έγινε επιλογή του μεγέθους της ίνας που θα εξάγεται από το ακροφύσιο για τον σχηματισμό του πλέγματος, με διάμετρο στα 0.3 mm. Το μέγεθος επιλέχθηκε τόσο μικρό προκειμένου να γίνει μια ποιοτική προσέγγιση του μικρού μεγέθους των ινών άνθρακα. Το επόμενο στάδιο είναι ο ορισμός των συντεταγμένων, δηλαδή το αρχικό σημείο στο οποίο θα ταξιδέψει η κεφαλή για την εκκίνηση της εκτύπωσης μέχρι το πέρας της. Επιπλέον, οι συντεταγμένες ορίστηκαν όσο πιο κεντρικά γίνεται πάνω στην πλατφόρμα εκτύπωσης, καθώς θεωρείται πιο σταθερό σημείο σε σχέση με τις υπόλοιπες τέσσερις γωνίες της πλατφόρμας.

### Σχηματισμός κελύφους πλέγματος

Ο ορισμός των συντεταγμένων ξεκίνησε με τη δημιουργία του κελύφους, από την εσωτερική μεριά προς την εξωτερική. Οι αποστάσεις των διαδρομών για τον σχηματισμό του κελύφους ορίστηκαν στα 0.3 mm. Το σημείο από το οποίο ξεκινάει η εκτύπωση του εσωτερικού του κελύφους μέχρι την ολοκλήρωση του εξωτερικού παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα. Ο λόγος που κάθε νέο σημείο για τη δημιουργία του κελύφους ξεκινάει κατά 0.3 mm προς τα κάτω σε σχέση με το τελικό σημείο είναι για την αποφυγή της συσσώρευσης υλικού καθώς και για την ομαλή συγκόλληση των ινών στα σημεία που ολοκληρώνεται το κέλυφος.

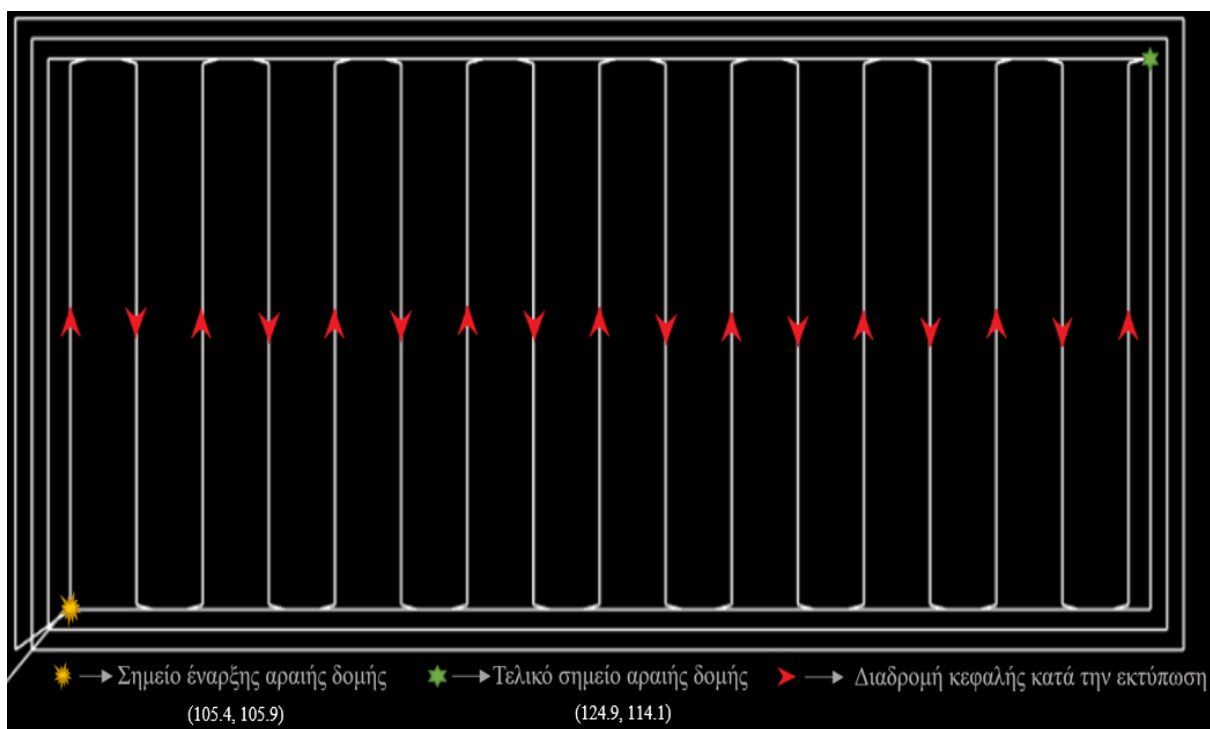


Εικόνα 4.19: Πορεία της κεφαλής κατά την εκτύπωση του κελύφους του πλέγματος.

## Σχηματισμός υποστρώματος πλέγματος

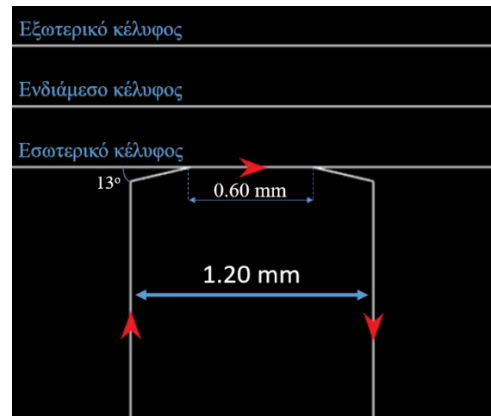
Στον εσωτερικό χώρο του κελύφους θα σχηματιστεί η δομή των  $0^\circ$  και  $45^\circ$  καθώς και η αραιή δομή, η οποία θα είναι ίδια και για τις δύο περιπτώσεις. Η αραιή δομή ακολούθησε κάθετη διαδρομή ως προς τον άξονα των  $x$ . Το σύνολο των ινών, μέσα στο εύρος του εσωτερικού του κελύφους κατά μήκος του άξονα  $x$ , είναι 17 με τη μεταξύ τους απόσταση στα 1.2 mm. Παράλληλα, δόθηκε ένα κενό των 0.40 mm της πρώτης και τελευταίας κάθετης ίνας ως προς την εσωτερική μεριά του κελύφους, για τη δημιουργία ευδιάκριτων ινών και για την αποφυγή πιθανής αλλοίωσης του κελύφους. Επιπλέον, στα σημεία όπου η ίνα έρχεται σε επαφή με το εσωτερικό κέλυφος προς τον σχηματισμό της επόμενης κάθετης ίνας, η προσέγγιση πραγματοποιείται υπό μια μικρή γωνία για την ομαλή εναπόθεση του υλικού πάνω στο κέλυφος.

Παρακάτω, παρατίθεται η εικόνα του κελύφους μαζί με την αραιή δομή-υπόστρωμα. Το σημείο εκκίνησης της αραιής δομής πραγματοποιείται πάντα πάνω στο εσωτερικό κέλυφος και απέχει απόσταση 0.10 mm από το αντίστοιχο αρχικό σημείο του κελύφους.



**Εικόνα 4.20:** Πορεία σχηματισμού του υποστρώματος, μέσα στο κέλυφος.

Επιπλέον, λόγω του ότι προηγείται πάντα η εκτύπωση του κελύφους, πριν τον σχηματισμό είτε του υποστρώματος είτε της πυκνής δομής μέσα σε αυτό καθώς και το γεγονός ότι η εκτύπωση τόσο του κελύφους όσο και μιας από τις πυκνές δομές πραγματοποιείται στο ίδιο ύψος, επιλέγεται το σημείο εκκίνησης μέσα στο κέλυφος να βρίσκεται σχετικά κοντά με το τελικό σημείο του κελύφους. Σε περίπτωση που η εκκίνηση εκτελεστεί σε πιο απομακρυσμένο σημείο ενδέχεται να μεταφερθεί υλικό, παραμορφώνοντας το πλέγμα. Μια πιο ευδιάκριτη εικόνα της ίνας κατά τη συγκόλλησή της πάνω στο κέλυφος παρουσιάζεται στην εικόνα 4.21. Σε περίπτωση που η είσοδος και η έξοδος της ίνας πάνω στο κέλυφος γίνονταν απότομα, σχηματίζοντας γωνία  $90^\circ$  και διανύοντας μια τόσο μικρή απόσταση, με μεγάλη ταχύτητα, κατά την απομάκρυνση της ίνας από το κέλυφος θα παρατηρούνταν αποκόλληση από αυτό.

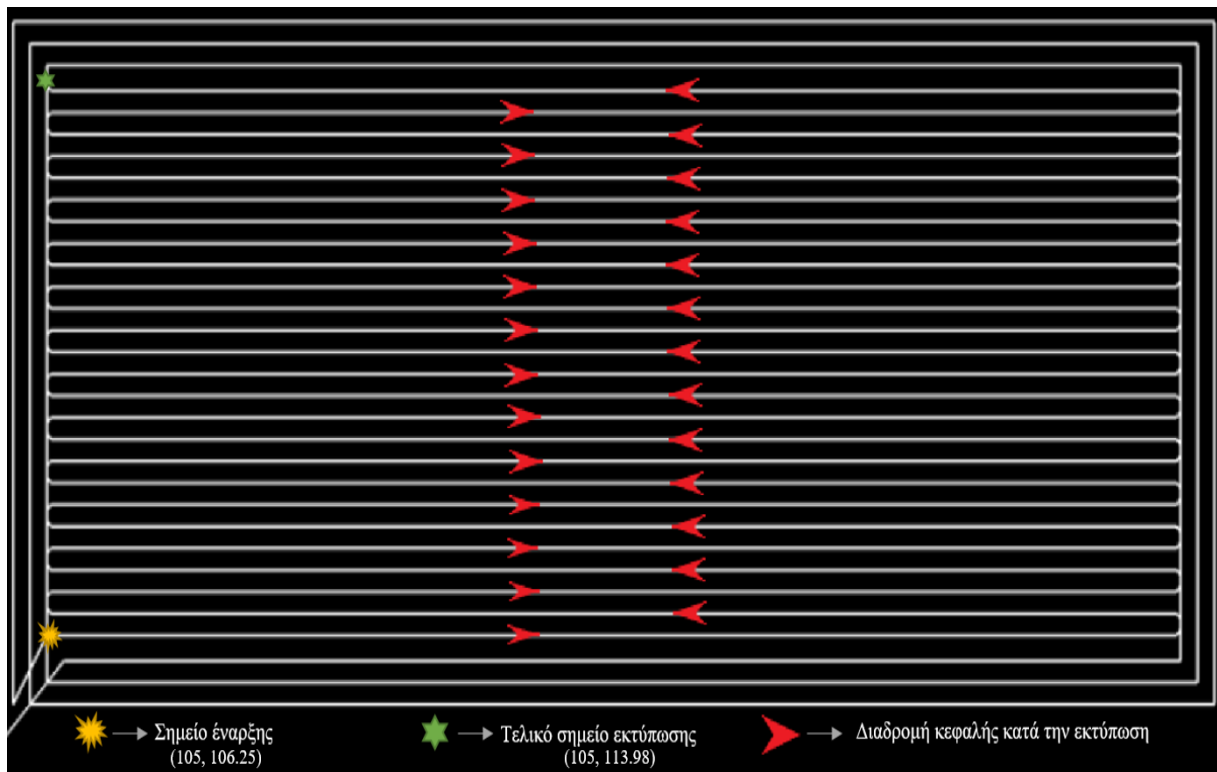


**Εικόνα 4.21:** Ομαλή προσέγγιση της ίνας πάνω στο εσωτερικό τμήμα του κελύφους, στη δομή του υποστρώματος.

### Σχηματισμός δομής $0^\circ$

Για τον σχηματισμό των ινών στις  $0^\circ$ , ακολουθείται μια διαδρομή κάθετα στην αραιή δομή. Η επιλογή των γειτονικών διαδρομών ορίστηκε όσο το μέγεθος της διαμέτρου της ίνας που θα εξάγεται από το ακροφύσιο, δηλαδή  $0.30\text{ mm}$ . Κατά αυτόν τον τρόπο, δημιουργείται μια αρκετά πυκνή δομή, παράλληλων ινών, αντίστοιχη με αυτή του εμπορικού δείγματος. Δεδομένου ότι το εύρος του εσωτερικού κελύφους έχει απόσταση  $8.2\text{ mm}$  καθώς και του μικρού κενού της πρώτης και τελευταίας ίνας ως προς το εσωτερικό κέλυφος, κατά μήκος του  $x$ , ο μέγιστος αριθμός των ινών που μπορεί να σχεδιαστεί είναι 26. Το σημείο εκκίνησης για την εκτύπωση αυτών των ινών βρίσκεται στο πάνω τμήμα του εσωτερικού κελύφους, ακολουθώντας μια παράλληλη διαδρομή ως προς τον άξονα  $x$ . Όπως στην περίπτωση της αραιής δομής, έτσι κι εδώ το σημείο εκκίνησης πραγματοποιείται κοντά στο τελικό σημείο του κελύφους.



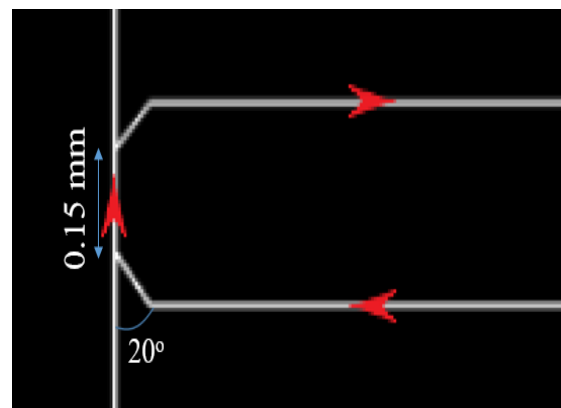


Εικόνα 4.22: Πορεία σχηματισμού της δομής των 0°, μέσα στο κέλυφος.

Ταυτόχρονα, στα σημεία ένωσης με το εσωτερικό κέλυφος παρατηρείται μια ελαφριά καμπυλότητα, για τους λόγους που προαναφέρθηκαν στην περίπτωση της αραιής δομής.

#### Σχηματισμός δομής 45°

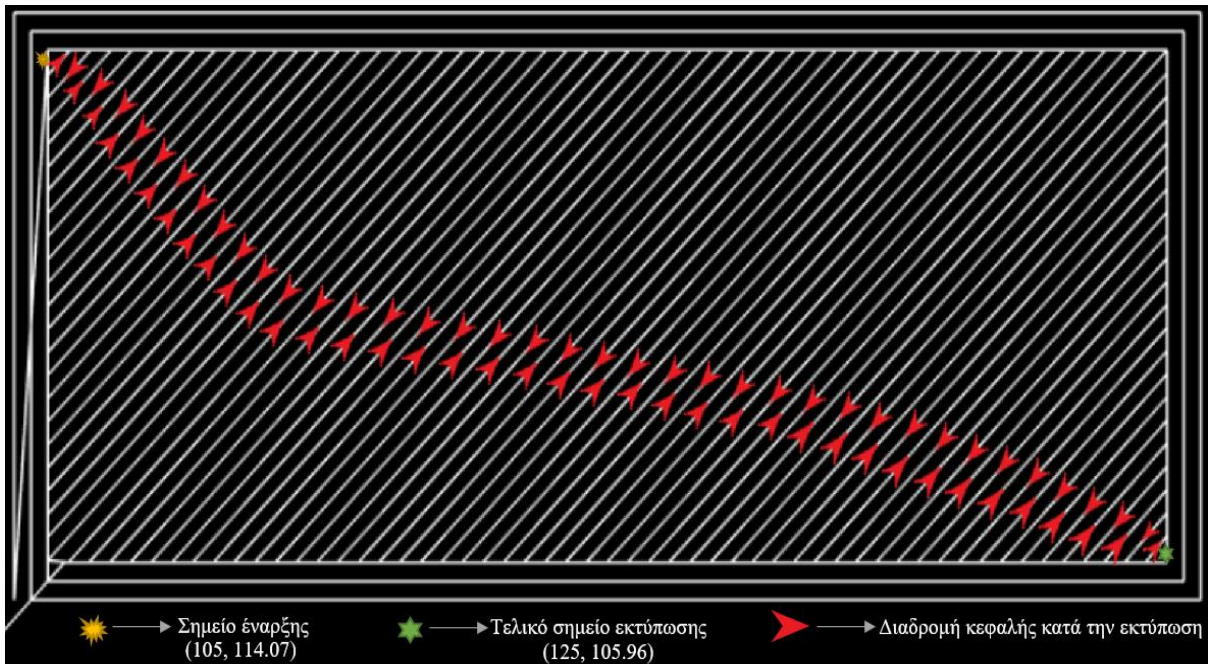
Όσον αφορά τη δομή των 45° μέσα στο κέλυφος, η πορεία των ινών ακολούθησε μια διαδρομή κλίσης 45° σε σχέση με τον άξονα των x.



Εικόνα 4.23: Ομαλή προσέγγιση της ίνας πάνω στο εσωτερικό τμήμα του κελυφούς, στη δομή των 0°.

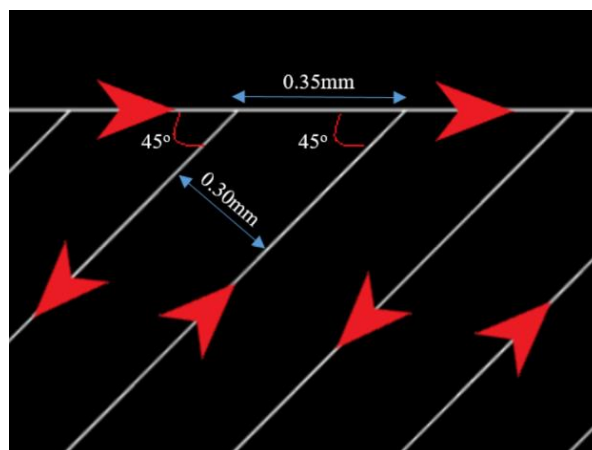
Σε αυτήν την περίπτωση, η αρχή της εκτύπωσης δεν πραγματοποιήθηκε κοντά στο τελικό σημείο του κελύφους αλλά ξεκίνησε στο επόμενο πιο κοντινό σημείο, δηλαδή στην πάνω αριστερή γωνία, με κατεύθυνση προς τα δεξιά. Καθώς τελειώνει η εκτύπωση του κελύφους, η κεφαλή ταξιδεύει προς το πάνω αριστερά μέρος του εσωτερικού κελύφους, ξεκινώντας την εναπόθεση του υλικού πάνω σε αυτό με κατεύθυνση προς τα κάτω, για μικρή απόσταση. Στην πορεία, κινείται υπό γωνία 45° προς το πάνω μέρος του εσωτερικού κελύφους, διανύοντας μια μικρή απόσταση πάνω σε αυτό, προς τα δεξιά. Με τον ίδιο τρόπο δημιουργούνται και οι

υπόλοιπες ίνες μέσα στον χώρο. Η απόσταση των διαδρομών μεταξύ τους ορίστηκε και σε αυτήν την περίπτωση 0.30 mm. Συνεπώς, η μικρή απόσταση που θα διανύει η κεφαλή πάνω στο κέλυφος θα είναι 0.35 mm. Το σύνολο των πλάγιων ιών μέσα στον χώρο είναι 75. Παρακάτω, στην εικόνα 4.24 παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη εικόνα της συνολικής δομής των 45°.



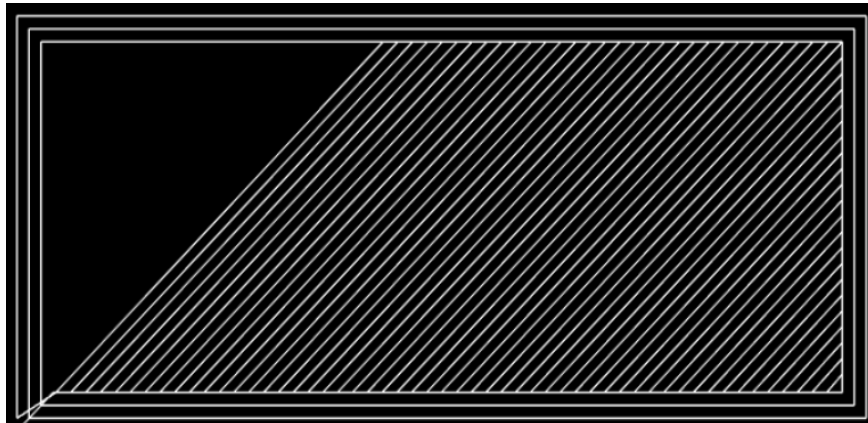
Εικόνα 4.24: Πορεία σχηματισμού της δομής των 45ο, μέσα στο κέλυφος.

Για την πλήρη κατανόηση της διαδικασίας συγκόλλησης της ίνας με το κέλυφος, παρατίθεται η εικόνα 4.25, στην οποία γίνεται ευδιάκριτη η απόσταση που διανύει η κεφαλή στο κέλυφος καθώς και η απόσταση μεταξύ των γειτονικών διαδρομών. Επιπλέον, παρατηρείται ότι οι ίνες, στα σημεία που γίνεται η συγκόλληση με το εσωτερικό κέλυφος, δεν αλλάζουν πορεία για την ομαλή εναπόθεση του υλικού στο κέλυφος καθώς αυτό εκτελείται υπό κλίση, καθιστώντας την εναπόθεση ομαλή.



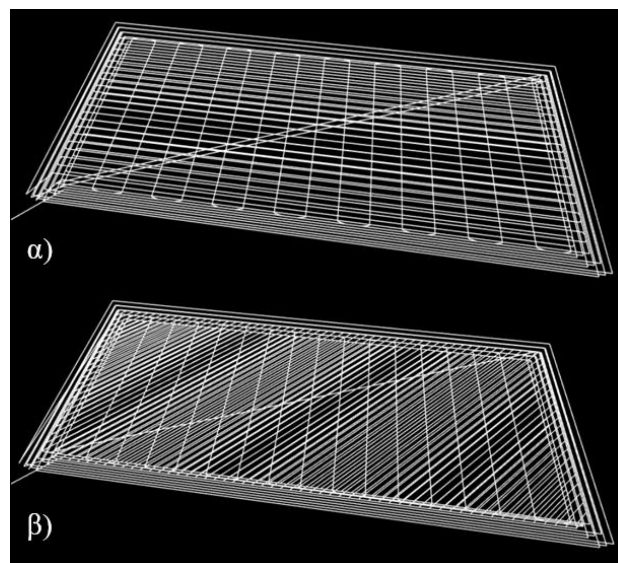
Εικόνα 4.25: Πορεία της κεφαλής πάνω στο κέλυφος, υπό γωνία 45°.

Ο λόγος που δεν επιλέχθηκε ως αρχικό σημείο η κάτω αριστερή γωνία, η οποία βρίσκεται κοντά στο τελικό σημείο του κελύφους είναι διότι κατά αυτόν τον τρόπο η κεφαλή θα πρέπει είτε να ακολουθήσει μια διαδρομή προς τα αριστερά είτε προς τα δεξιά, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 4.26, με αποτέλεσμα να χρειαστεί να ταξιδέψει ξανά προς το αρχικό σημείο για να ολοκληρωθεί η εκτύπωση του υπόλοιπου μέρους. Σε αυτήν την περίπτωση υπάρχει το ενδεχόμενο να μεταφερθεί υλικό κατά τη μετακίνηση της κεφαλής, λόγω μεγάλης απόστασης και ίσου ύψους, καθώς και να παραμορφωθεί η ακολουθία των ινών.



Εικόνα 4.26: Διαφορετική διαδρομή για την πλήρωση του χώρου μέσα στο κέλυφος-Δομή 45°.

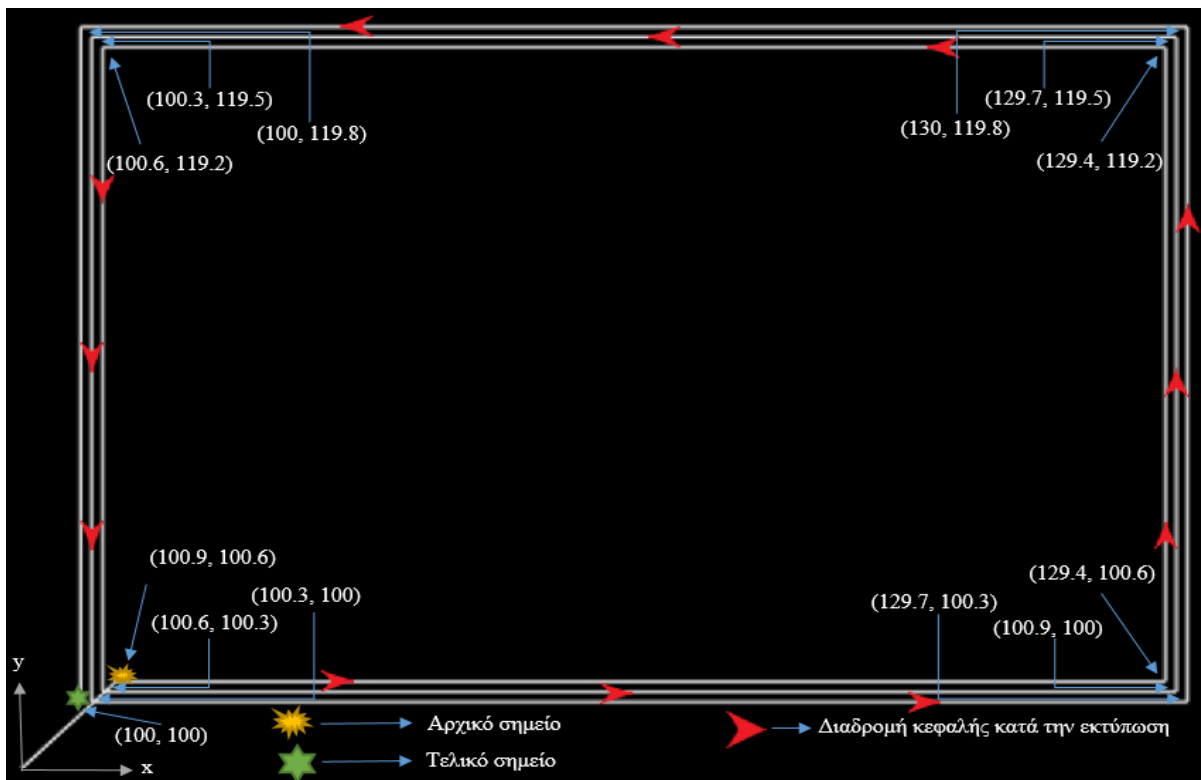
Με την ολοκλήρωση του ορισμού των συντεταγμένων για το πλέγμα, τόσο για τις 0° όσο και για τις 45° είναι εφικτή η αναπαράσταση της δομής και για τις δύο περιπτώσεις. Στην εικόνα 4.27, παρουσιάζεται ένα μέρος του πλέγματος, με τρεις συνεχόμενες στρώσεις και για τις δύο διαφορετικές διευθύνσεις για την κατανόηση της δομής. Η πρώτη και τρίτη στρώση αποτελούν την πυκνή δομή ενώ η ενδιάμεση το υπόστρωμα, όπως παρουσιάζεται χαρακτηριστικά παρακάτω.



Εικόνα 4.27: Τμήμα του επαναλαμβανόμενου μοτίβου του πλέγματος, α) Δομή 0°, β) Δομή 45°.

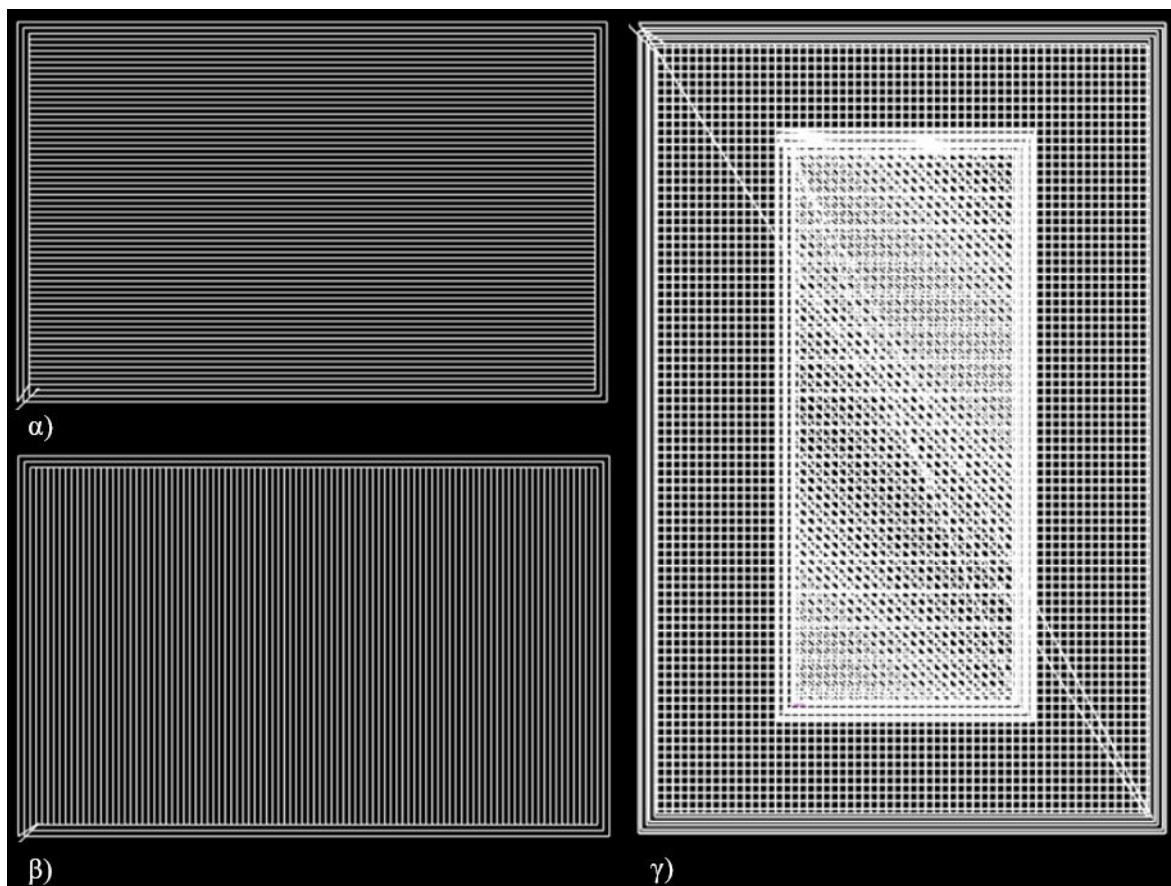
## Σχηματισμός raft

Μετά την ολοκλήρωση της τροχιάς της κεφαλής τόσο για το κέλυφος όσο και για το υπόστρωμα και τις πυκνές δομές, ορίστηκαν οι συντεταγμένες για την υποστηρικτική δομή του πλέγματος. Η γεωμετρία του raft ακολουθεί την ίδια δομή με αυτή του πλέγματος, σε μεγαλύτερες όμως διαστάσεις ως προς το μήκος και το πλάτος, προκειμένου να υπάρχει περιθώριο αφαίρεσης αυτής της δομής στο τέλος της εκτύπωσης. Επιπλέον, αποτελείται από δύο στρώσεις. Στη μία στρώση η κατεύθυνση των ινών είναι παράλληλη ως προς τον  $xx'$  ενώ η δεύτερη ως προς τον  $yy'$ . Όπως στην περίπτωση της δημιουργίας του πλέγματος, έτσι κι εδώ η αρχή για τον σχεδιασμό αυτής της δομής ξεκινάει με τον ορισμό ενός κελύφους. Οι διαστάσεις του raft είναι  $30 \cdot 19.8$  mm και οι αποστάσεις των διαδρομών του κελύφους είναι 0.30 mm.



Εικόνα 4.28: Πορεία της κεφαλής κατά την εκτύπωση του κελύφους του Raft.

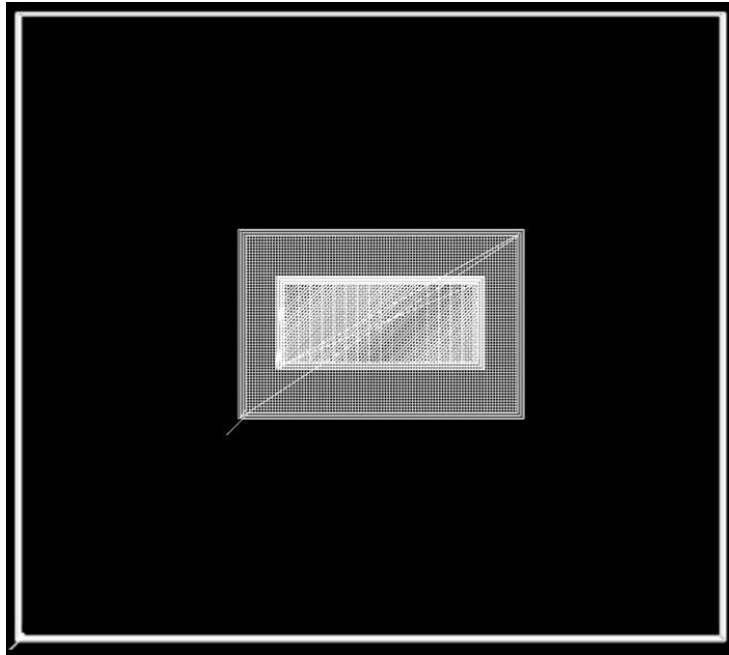
Ακολουθεί ο σχεδιασμός της πρώτης στρώσης, με τη διεύθυνση των ινών παράλληλη ως προς τον άξονα των  $x$ . Για συνολικό μήκος 18.6 mm του εσωτερικού κελύφους, ως προς τον  $y$ , και για απόσταση των γειτονικών διαδρομών των 0.30 mm, ο μέγιστος αριθμός των ινών που μπορεί να σχεδιαστεί είναι 61. Όσον αφορά στην περίπτωση της δεύτερης στρώσης, μέσα σε εύρος 28.8 mm, για ίδια γειτονική απόσταση, σχεδιάστηκαν συνολικά 95 ίνες.



**Εικόνα 4.29:** α) και β) αποτελούν τις δύο μοναδικές στρώσεις από τις οποίες αποτελείται η δομή του Raft-γ) κάτωψη του κώδικα στην περίπτωση της δομής των 45°, μαζί με τη δομή του Raft.

### Σχηματισμός skirt

Ο ορισμός των συντεταγμένων ολοκληρώνεται με τον σχηματισμό της δομής του skirt. Η δομή του πραγματοποιείται περιμετρικά του Raft και στην ουσία αποτελεί την πρώτη γεωμετρία που ξεκινάει να εκτυπώνει η κεφαλή. Αποτελείται από τρεις περιμέτρους και οι γειτονικές διαδρομές έχουν απόσταση 0.30 mm. Στη συγκεκριμένη δομή, η απόλυτη γεωμετρική ακρίβεια είναι δευτερεύουσας σημασίας καθότι, όπως προαναφέρθηκε στην αντίστοιχη θεωρία, σκοπός αυτής της δομής είναι η σταθεροποίηση της ροής του υλικού.



Εικόνα 4.30: Κάτοψη ολόκληρου του κώδικα-Δομή Skirt, Raft και πλέγμα.

#### 4.2.2 Δομή/εντολές/παράμετροι G-κώδικα

Τα στάδια της σύνταξης, που απαρτίζουν ολόκληρη τη δομή του G-κώδικα είναι τα εξής. Αρχικά εισάγονται εντολές, απαραίτητες για τη βαθμονόμηση των τριών αξόνων, συσχετίζοντας τη θέση της κεφαλής με το κέντρο της πλατφόρμας εκτύπωσης. Στη συνέχεια, εισάγεται η δομή του skirt και ακολουθεί αυτή του Raft. Μετέπειτα, ξεκινάει η δομή του πλέγματος, με πρώτη στρώση αυτή της πυκνής δομής και στη συνέχεια αυτή του υποστρώματος, με ένα επαναλαμβανόμενο μοτίβο μέσα στο χώρο μέχρι την τελευταία 13<sup>η</sup> στρώση, σύμφωνα με το μέγιστο ύψος που τέθηκε. Ο κώδικας ολοκληρώνεται με εντολές οι οποίες απομακρύνουν την κεφαλή από το τελικό μοντέλο και απενεργοποιούν τις ρυθμίσεις οι οποίες είναι υπεύθυνες για τη θερμοκρασία της εκτύπωσης τόσο του υλικού όσο και της πλατφόρμας εκτύπωσης καθώς και την ισχύ του ανεμιστήρα. Στις παρακάτω δύο εικόνες παρουσιάζεται σε σύντομη μορφή η δομή του κώδικα που γράφτηκε για τις 0°, που είναι αντιπροσωπευτική για όλους τους κώδικες, για την κατανόηση των βημάτων της σύνταξης του κώδικα. Να σημειωθεί ότι η παρουσία του ερωτηματικού μέσα στον κώδικα, επιτρέπει στον εκάστοτε χρήστη να καταγράψει σχόλια και παρατηρήσεις, σχετικά με τις εντολές που θα ακολουθήσουν, χωρίς να επηρεαστεί η εκτύπωση.



0.30 mm, με χαμηλή ταχύτητα στα 300 mm/min. Επιπλέον, η ταχύτητα στις διαδρομές όπου η κεφαλή ταξιδεύει, χωρίς να εξωθεί υλικό, ορίστηκε αρκετά υψηλή, στα 6000 mm/min.

Πίνακας 4.4: Δομή πλέγματος για κατεύθυνση 0° υπό τη μορφή του G-κώδικα μέσα στο σημειωματάριο.

;PLEGMA				G1	X 124.600	Y 114.030	E 4.4158	
;LAYER: 1				G1	X 124.900	Y 114.100	E 4.4188	
;KELYFOS				;LAYER: 13				
;eswterikh				;KELYFOS				
G92			E 0.0000				E 0.0000	
G1			E -1.0000	F 1200			F 1200	
G1	Z 0.90			F 300			F 300	
G1	X 105.300	Y 105.900		F 6000			F 6000	
G1			E 0.0000	F 1200			F 1200	
G1	X 125.00	Y 105.90	E 0.5804	F 600	G92	Z 4.50		
G1	X 125.00	Y 114.10	E 0.8220		G1	X 105.300	Y 105.900	
G1	X 105.00	Y 114.10	E 1.4112		G1		E 0.0000	
G1	X 105.00	Y 105.90	E 1.6527		G1	X 125.00	Y 105.90	E 0.5804
;endiamesh				G1	X 125.00	Y 114.10	E 0.8220	
G1	X 105.00	Y 105.60		F 6000	G1	X 105.00	Y 114.10	E 1.4112
G1	X 125.30	Y 105.60	E 2.2508	F 600	G1	X 105.00	Y 105.90	E 1.6527
G1	X 125.30	Y 114.40	E 2.5100		;endiamesh			
G1	X 104.70	Y 114.40	E 3.1169		G1	X 105.00	Y 105.60	F 6000
G1	X 104.70	Y 105.60	E 3.3762		G1	X 125.30	Y 105.60	E 2.2508
;jkswterikh				G1	X 125.30	Y 114.40	E 2.5100	
G1	X 104.70	Y 105.30		F 6000	G1	X 104.70	Y 114.40	E 3.1169
G1	X 125.60	Y 105.30	E 3.9919	F 600	G1	X 104.70	Y 105.60	E 3.3762
G1	X 125.60	Y 114.70	E 4.2688		;jkswterikh			
G1	X 104.40	Y 114.70	E 4.8934		G1	X 104.70	Y 105.30	F 6000
G1	X 104.40	Y 105.30	E 5.1703		G1	X 125.60	Y 105.30	E 3.9919
G92			E 0.0000		G1	X 125.60	Y 114.70	E 4.2688
G1			E -1.0000	F 1200.00	G1	X 104.40	Y 114.70	E 4.8934
;ORIZONTIES				G1	X 104.40	Y 105.30	E 5.1703	
G1	X 105.000	Y 106.300		F 6000.00	G92		E 0.0000	
G1			E 0.0000	F 1200.00	G1		E -1.0000	F 1200.00
G1	X 124.943	Y 106.300	E 0.5875	F 1500.00	;ORIZONTIES			
G1	X 125.000	Y 106.393	E 0.5914		G1	X 105.000	Y 106.300	F 6000.00
.				G1			E 0.0000	F 1200.00
.				G1	X 124.943	Y 106.300	E 0.5875	F 1500.00
.				G1	X 125.000	Y 106.393	E 0.5914	
G1	X 125.000	Y 113.793	E 12.5718		.			
G1	X 125.000	Y 113.978	E 12.5773		.			
;LAYER: 2				.				
;KELYFOS				.				
;eswterikh				.				
G92			E 0.0000					
G1			E -1.0000	F 1200				
G1	Z 1.200			F 300				
G1	X 105.300	Y 105.900		F 6000				
G1			E 0.0000	F 1200				
G1	X 125.00	Y 105.90	E 0.5804	F 600	G1	X 125.000	Y 113.053	E 11.3738
G1	X 125.00	Y 114.10	E 0.8220		G1	X 125.000	Y 113.238	E 11.3792
G1	X 105.00	Y 114.10	E 1.4112		G1	X 124.943	Y 113.330	E 11.3831
G1	X 105.00	Y 105.90	E 1.6527		G1	X 105.057	Y 113.330	E 11.9690
;endiamesh				G1	X 105.000	Y 113.423	E 11.9728	
G1	X 105.00	Y 105.60		F 6000	G1	X 105.000	Y 113.608	E 11.9783
G1	X 125.30	Y 105.60	E 2.2508	F 600	G1	X 105.057	Y 113.700	E 11.9821
G1	X 125.30	Y 114.40	E 2.5100		G1	X 124.943	Y 113.700	E 12.5680
G1	X 104.70	Y 114.40	E 3.1169		G1	X 125.000	Y 113.793	E 12.5718
G1	X 104.70	Y 105.60	E 3.3762		G1	X 125.000	Y 113.978	E 12.5773
;jkswterikh				.				
G1	X 104.70	Y 105.30		F 6000	.			
G1	X 125.60	Y 105.30	E 3.9919	F 600	.			
G1	X 125.60	Y 114.70	E 4.2688		.			
G1	X 104.40	Y 114.70	E 4.8934		.			
G1	X 104.40	Y 105.30	E 5.1703		.			
G92			E 0.0000		.			
G1			E -1.0000	F 1200.00	.			
;YPOSTRIMA				G1	X117.500	Y220.000	Z11.950	F6000.000
G1	X 105.400	Y 105.900		F 6000.00	T0			
G1			E 0.0000	F 1200.00	M104 50			
G1	X 105.400	Y 114.030	E 0.2395	F 1200.00	T1			
G1	X 105.700	Y 114.100	E 0.2425		M104 50			
.				.				
.				.				
.				.				

Μια επιπλέον εντολή η οποία έπαιξε ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο ως προς τη συνολική εικόνα του κώδικα, ήταν η G92. Συγκεκριμένα, η εντολή G92 E0 συνέβαλε καθοριστικά στην οργάνωση της δομής και στον εύκολο υπολογισμό του υλικού που εξάγεται, καθώς με την

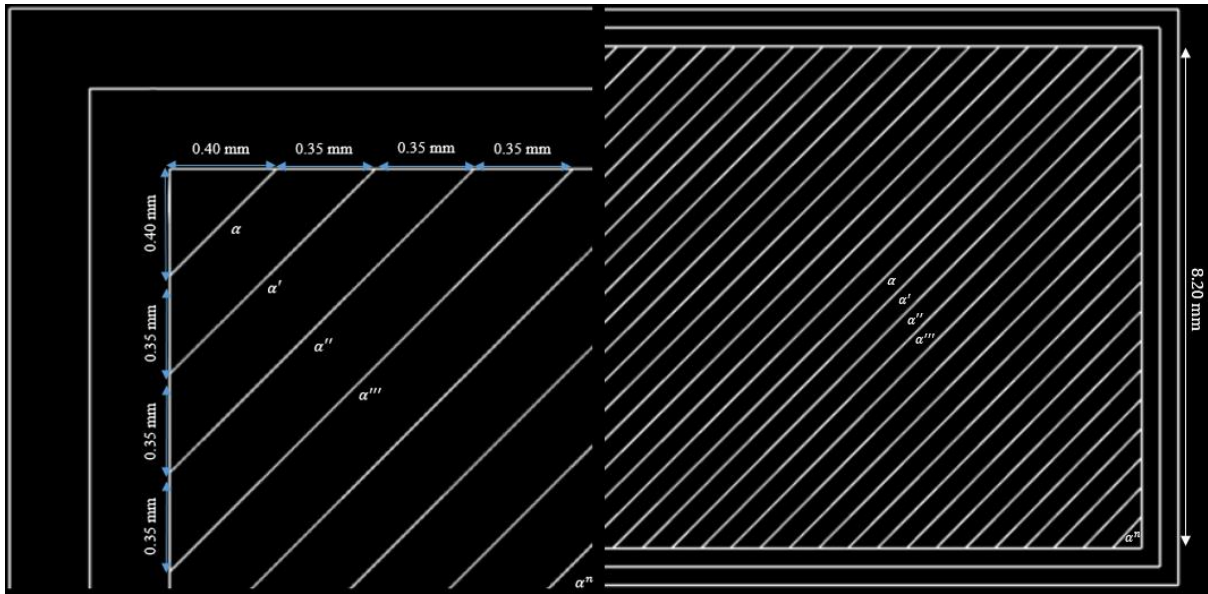


εισαγωγή της δηλώνεται αυτομάτως στο σύστημα ο μηδενισμός της ποσότητας του υλικού, με αποτέλεσμα να υπολογίζει εκ νέου την ποσότητα που θα εξαχθεί για την επόμενη τροχιά. Κατά αυτόν τον τρόπο ο υπολογισμός της ποσότητας E για όλο το σύστημα πραγματοποιείται τμηματικά και όχι αθροιστικά, καθιστώντας τη δήλωση της ποσότητας μια αρκετά απλή και καθόλου χρονοβόρα διαδικασία. Για παράδειγμα στον συγκεκριμένο κώδικα, μετά το πέρας της τροχιάς του κάθε κελύφους που ανήκει στο πλέγμα, εισάγεται η εντολή G92 E0, την οποία διαδέχεται η τροχιά των ινών είτε της πυκνής δομής είτε του υποστρώματος, υπολογίζοντας την ποσότητα της εναπόθεσης του υλικού από την αρχή.

Επίσης, μέσα στον κώδικα υπάρχουν αρνητικές τιμές στην ποσότητα του υλικού. Το «-» δηλώνει το τράβηγμα του υλικού προς τα πίσω και είναι μια διαδικασία που ονομάζεται Retraction. Στον συγκεκριμένο κώδικα, στο τελευταίο σημείο όπου ολοκληρώνεται μια στρώση, η ποσότητα μηδενίζεται και το υλικό ωθείται προς τα μέσα. Στη συνέχεια, η κεφαλή κινείται κατά 0.30 mm προς τα πάνω και ταξιδεύει προς το αρχικό σημείο της επόμενης στρώσης. Το Retraction συνέβαλε στο να μη συσσωρευτεί υλικό στο τελευταίο σημείο της κάθε στρώσης καθώς και να μην παρασυρθεί επιπλέον ποσότητα κατά τη μετάβαση της κεφαλής από το ένα σημείο στο άλλο.

Επιπλέον, μια άλλη σημαντική παράμετρος που καθόρισε την τελική δομή του μοντέλου ήταν η ταχύτητα εκτύπωσης του κελύφους του πλέγματος. Είναι σημαντικό η εναπόθεση του υλικού για το χτίσιμο του κελύφους να πραγματοποιείται αργά σε σχέση με την υπόλοιπη δομή που θα συμπληρώσει το κέλυφος, διότι αποτελεί το βασικότερο θεμέλιο καθώς σε αυτό θα καταλήξουν όλες οι ίνες του πλέγματος. Κατά αυτόν τον τρόπο, υπάρχει σωστή συνοχή σε κάθε νέα στρώση κελύφους, χωρίς τη δημιουργία κενών. Επομένως, επιλέχθηκε σε πρώτη φάση μια χαμηλή ταχύτητα στα 600 mm/min.

Ο υπολογισμός της ποσότητας του υλικού πραγματοποιήθηκε μέσω της σχέσης που προαναφέρθηκε στο τέλος της ενότητας 3.4.3. Γνωρίζοντας την απόσταση που πρέπει να διανύσει η κεφαλή, υπολογίζεται αυτομάτως η ποσότητα από τη σχέση. Στην περίπτωση της πυκνής δομής των 45°, το μόνο κομμάτι των ινών που διατηρεί σταθερό μήκος μέσα στο κέλυφος είναι αυτό του οποίου οι συντεταγμένες έχουν αρχή και τέλος πάνω στο εσωτερικό κέλυφος κατά μήκος του άξονα x. Κατά συνέπεια, λόγω του μεταβαλλόμενου μήκους των ινών στις άκρες του κελύφους, έπρεπε να γραφτεί μια απλή ακολουθία, μέσω της οποίας θα υπολογίζονταν αυτόματα το μήκος των ινών και εν συνεχεία η ποσότητα του υλικού.



**Εικόνα 4.31:** Αριστερή εικόνα-Αύξηση του μήκους της ίνας, Δεξιά εικόνα-Μείωση του μήκους της ίνας.

Συγκεκριμένα, γράφτηκε ακολουθία με πολύ απλές μαθηματικές πράξεις, που περιγράφει την αύξηση του μήκους των ινών, με κατεύθυνση από τα αριστερά προς τα δεξιά, μέχρι την απόκτηση σταθερού μήκους και στη συνέχεια μια αντίστοιχη που περιγράφει τη μείωση του μήκους, κατά την προσέγγιση της δεξιάς μεριάς τους κελύφους. Όσον αφορά την περίπτωση της αριστερής μεριάς, χρησιμοποιώντας το Πυθαγόρειο θεώρημα για τον υπολογισμό του κάθε νέου μήκους, βγήκε η ακόλουθη σχέση:

$$\alpha' = \sqrt{2 \cdot (0.40 + 0.35)^2} = (0.40 + 0.35 \cdot 1) \cdot \sqrt{2}$$

$$\alpha'' = (0.40 + 0.35 \cdot 2) \cdot \sqrt{2}$$

⋮

$$\alpha^n = (0.40 + 0.35 \cdot n) \cdot \sqrt{2}$$

όπου:

- $\alpha$ : το μήκος της ίνας
- $n$ : κάθε επόμενη ίνα

Αντίστοιχα, στη δεξιά μεριά, η ακολουθία που γράφτηκε βάσει του Πυθαγόρειου θεωρήματος, αφορά τη μείωση του μήκους της ίνας. Η μέγιστη απόσταση των εσωτερικών κελύφων ως προς τον  $yy'$  είναι 8.20 mm, συνεπώς κατά τη φθίνουσα πορεία ισχύει η εξής ακολουθία:

$$\alpha' = \sqrt{2 \cdot (8.20 - 0.35)^2} = (8.20 - 0.35 \cdot 1) \cdot \sqrt{2}$$

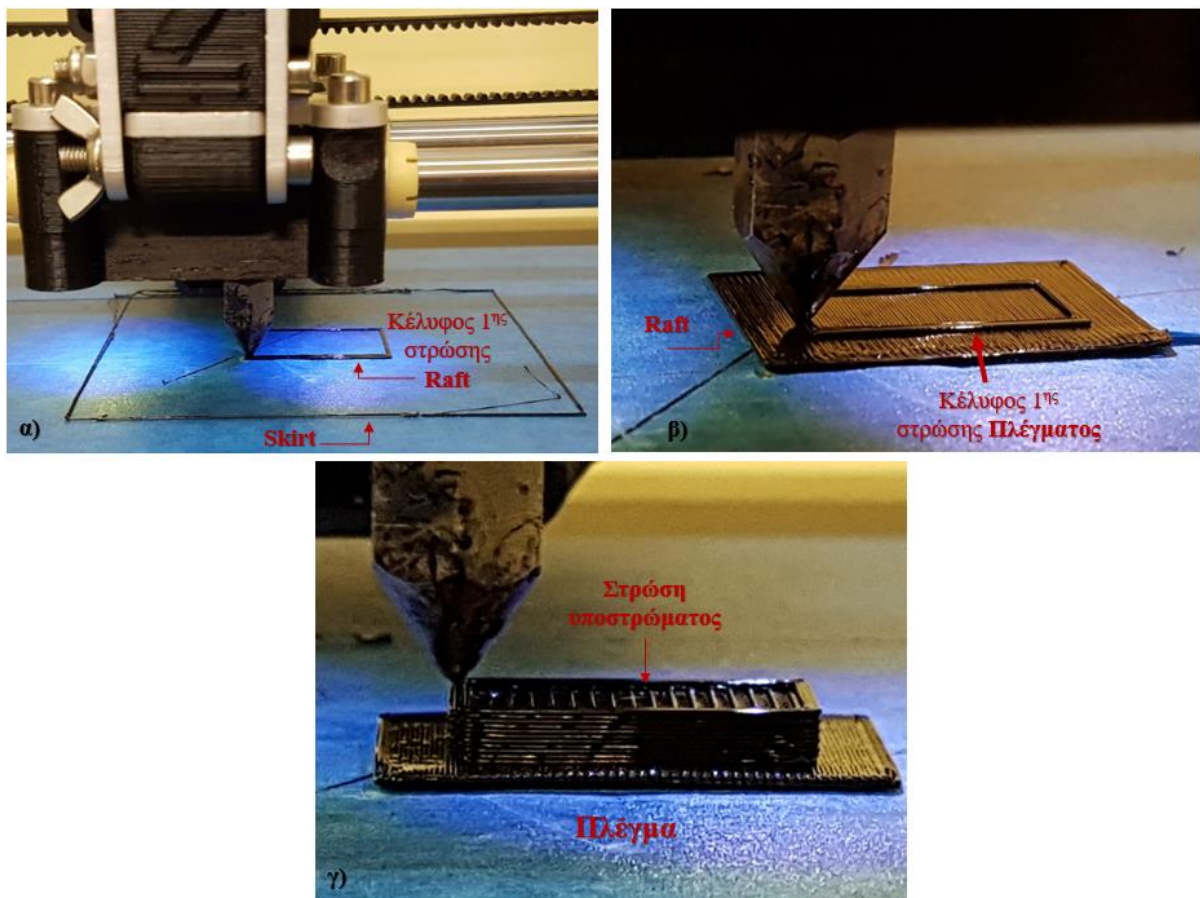
$$\alpha'' = (8.20 - 0.35 \cdot 2) \cdot \sqrt{2}$$

⋮

$$\alpha^n = (8.20 - 0.35 \cdot n) \cdot \sqrt{2}$$

### 4.2.3 Εκτύπωση/Σάρωση των G-κωδικών

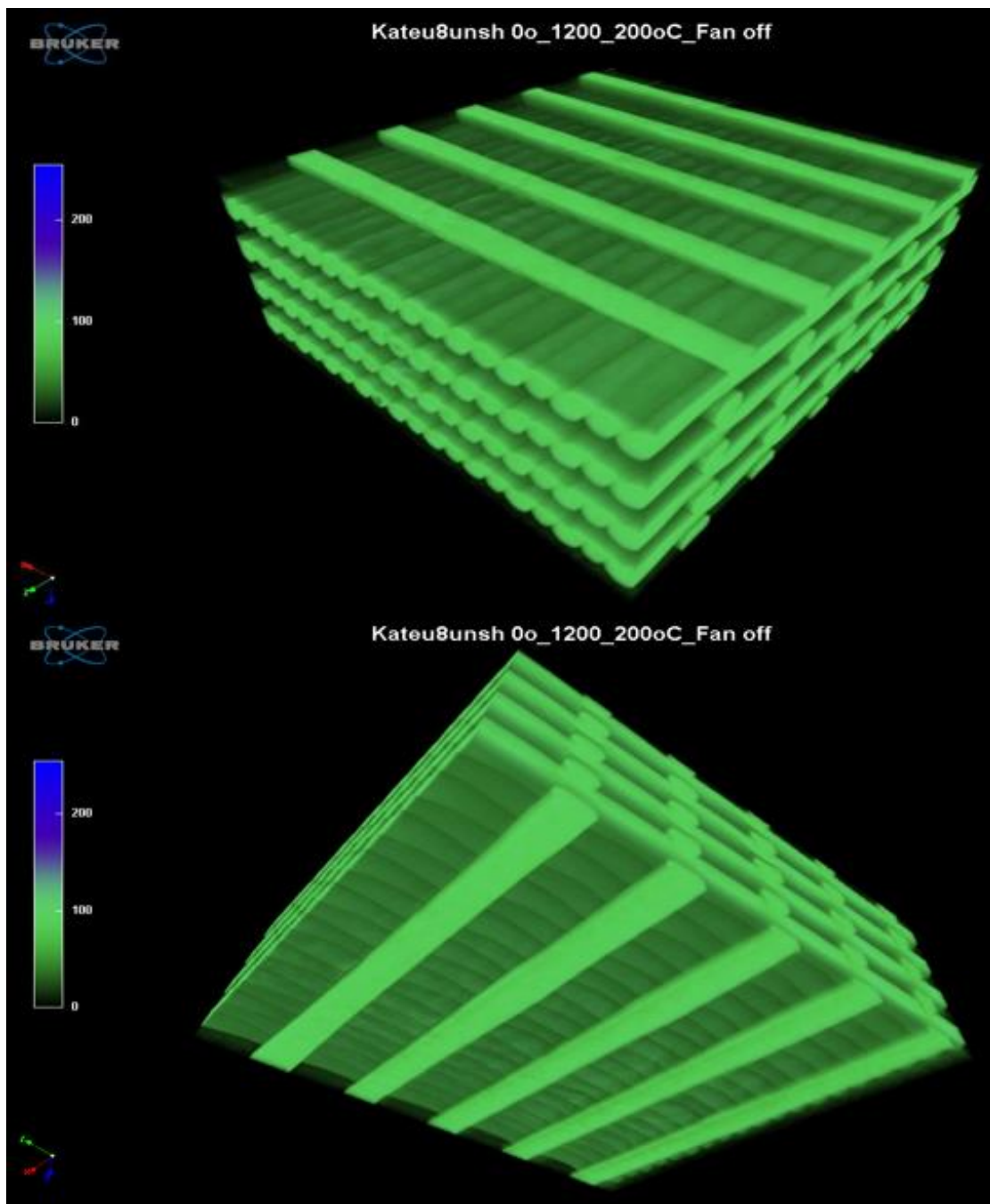
Οι πρώτοι δοκιμαστικοί κώδικες που εκτυπώθηκαν αφορούν τις ίνες με κατεύθυνση 0°, για τρεις διαφορετικές ταχύτητες εκτύπωσης της πυκνής δομής, στα 1200, 1500 και 1800 mm/min. Και στις τρεις περιπτώσεις, η ταχύτητα εκτύπωσης του υποστρώματος επιλέχθηκε στα 1200, η θερμοκρασία εξαγωγής του υλικού στους 200 °C και η ισχύς του ανεμιστήρα στο 0%. Πάνω στην πλατφόρμα εκτύπωσης τοποθετήθηκε μπλε ταινία, χάρη στην οποία το τελικό μοντέλο μπόρεσε να αφαιρεθεί εύκολα. Παρακάτω, παρουσιάζονται τα στάδια της εκτύπωσης του skirt, του Raft και του πλέγματος.



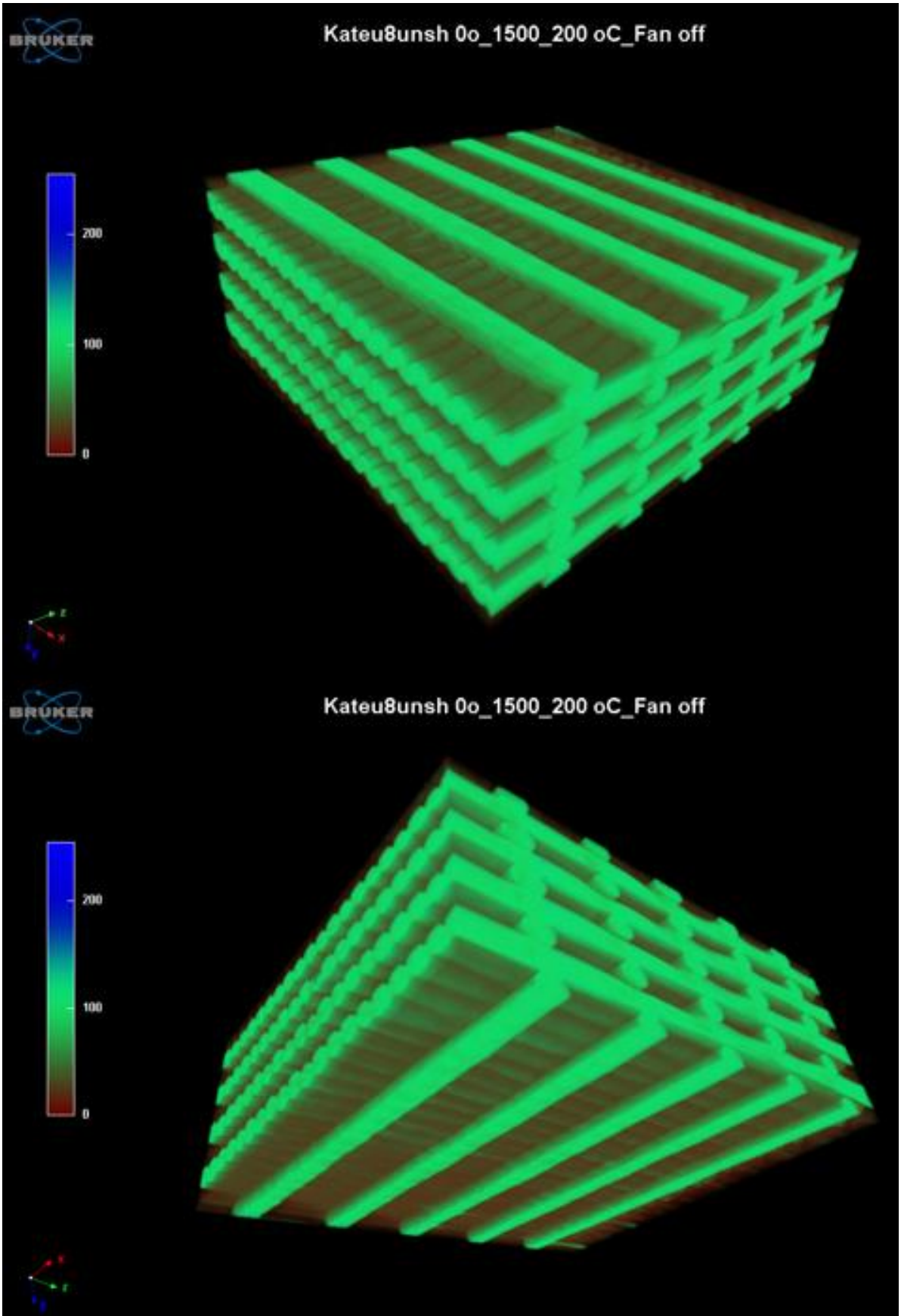
**Εικόνα 4.32:** Ανάγνωση των εντολών από τον εκτυπωτή και αποτύπωση του G-κώδικα σε 3-D μορφή. α) Αρχικό στάδιο του κώδικα-Δομή Skirt & Raft, β) Αρχή δομής του πλέγματος πάνω στο Raft, γ) Ένα βήμα πριν την τελευταία στρώση του πλέγματος προς την ολοκλήρωση του κώδικα.

Να σημειωθεί ότι ο χρόνος εκτύπωσης του κάθε κώδικα, ανάλογα με την ταχύτητα κυμάνθηκε γύρω στα 13, 12 και 11 λεπτά αντίστοιχα για 1200, 1500 και 1800 mm/min και η ποσότητα του υλικού που χρειάστηκε ήταν κοντά στα 0.34 m για κάθε κώδικα. Στην εικόνα 4.32 α) φαίνεται χαρακτηριστικά η δομή του Skirt η οποία όπως παρατηρείται σε κάποια σημεία έχει αποκολληθεί από την πλατφόρμα. Η αποκόλληση, σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις, παρατηρούνταν στην αρχή της δημιουργίας του, με μια ελαφριά συσσώρευση υλικού γύρω από το ακροφύσιο, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει σωστή πρόσφυση του υλικού πάνω στην

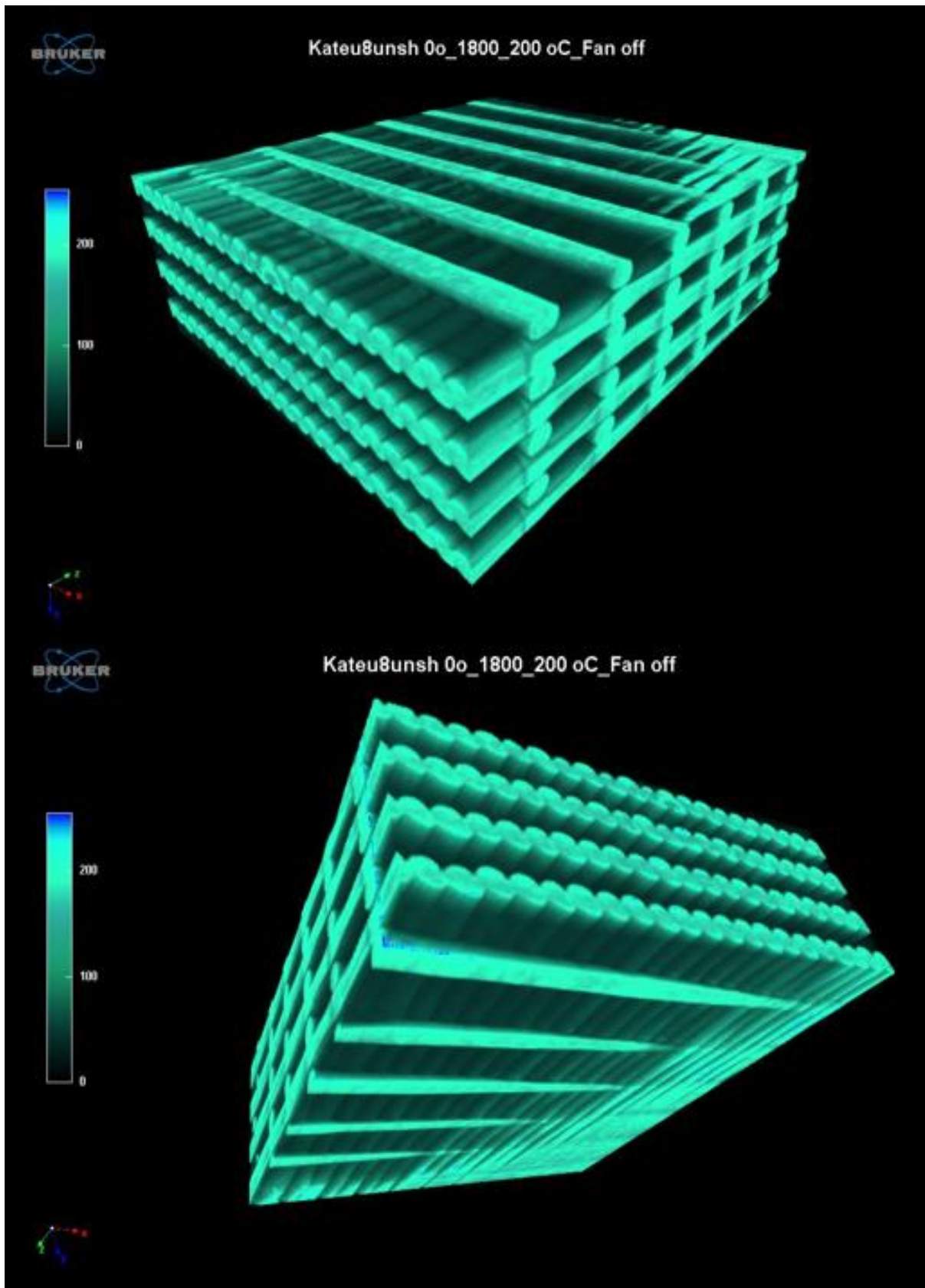
πλατφόρμα. Εν συνεχεία, με την απόκτηση σταθερής ροής του υλικού εξελίχθηκε με επιτυχία η εκτύπωση των υπόλοιπων τμημάτων. Στην πορεία, τα τρία τυπωμένα μοντέλα σαρώθηκαν στο SkyScan 1272 προκειμένου να μελετηθεί η εσωτερική τους δομή και να διαπιστωθεί κατά πόσο προσεγγίζουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που τέθηκαν αρχικά στον G-κώδικα. Στην παρακάτω εικόνα, φαίνεται ένα τμήμα της εσωτερικής δομής του κώδικα που εκτυπώθηκε για ταχύτητα 1200 mm/min. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων της σάρωσης σε όλες τις περιπτώσεις έγινε στο λογισμικό NRecon, όπου έγιναν οι απαραίτητες διορθώσεις και η απεικόνισή τους πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό CTVox.



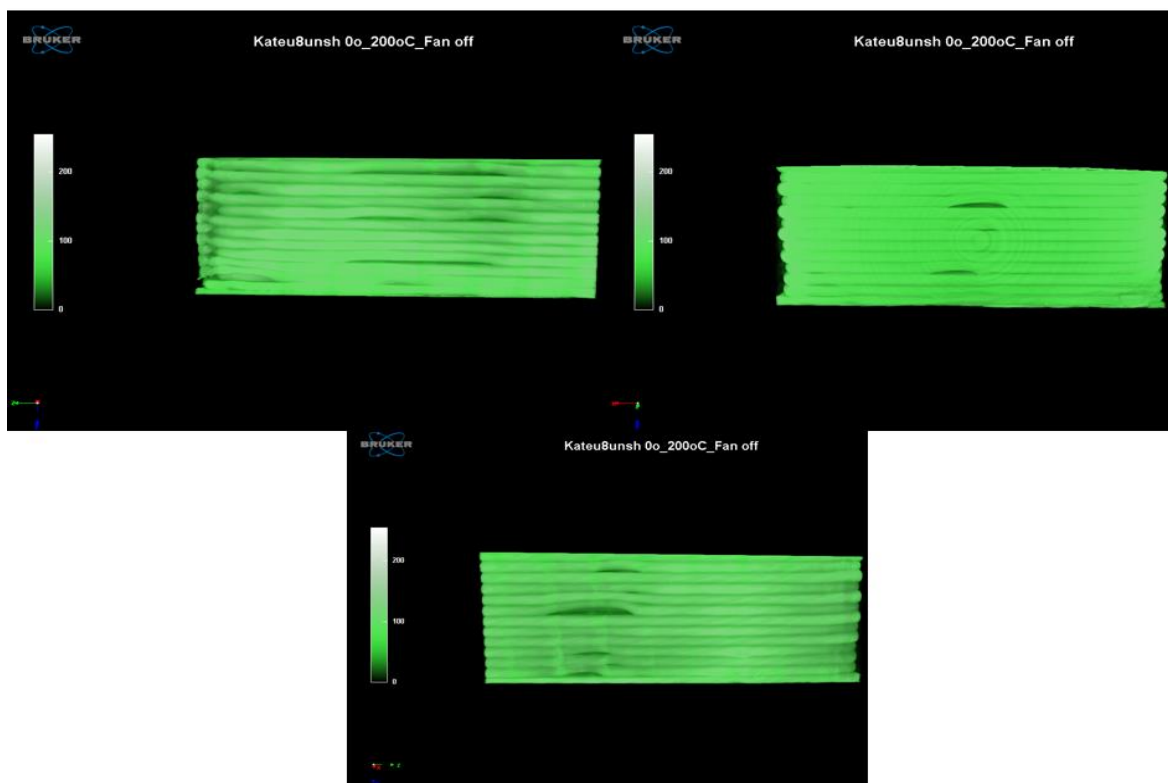
**Εικόνα 4.33:** Ψηφιακή αναπαράσταση του εκτυπωμένου G-κώδικα στο λογισμικό CTVox, κατεύθυνσης 0°, F1200, θερμοκρασία στους 200 °C, 0% ισχύ του ανεμιστήρα.



Εικόνα 4.34: Ψηφιακή αναπαράσταση του εκτυπωμένου G-κώδικα στο λογισμικό CTVox, κατεύθυνσης 0°, F1500, θερμοκρασία στους 200 °C, 0% ισχύ του ανεμιστήρα.



**Εικόνα 4.35:** Ψηφιακή αναπαράσταση του εκτυπωμένου G-κώδικα στο λογισμικό CTVox, κατεύθυνσης 0°, F1800, θερμοκρασία στους 200 °C, 0% ισχύ του ανεμιστήρα.

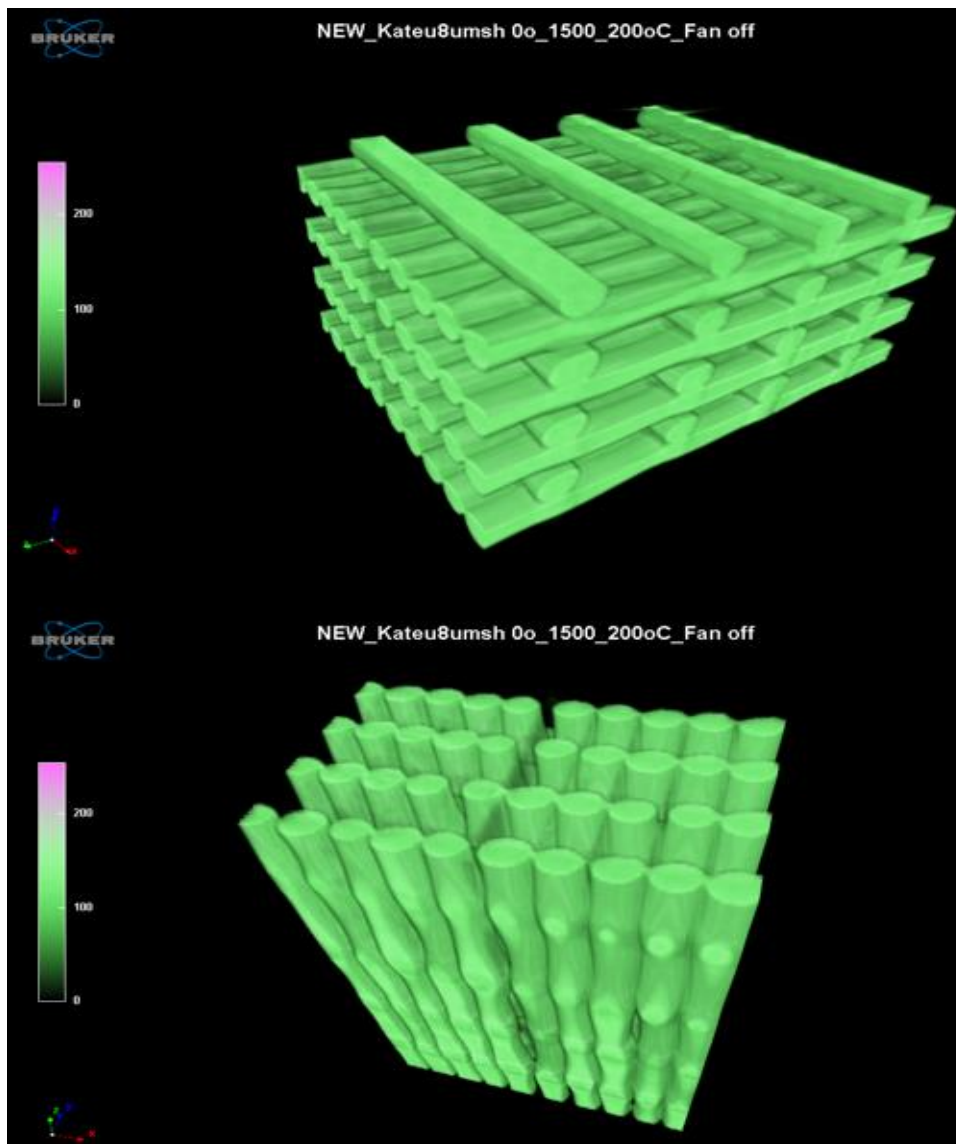


**Εικόνα 4.36:** Ψηφιακή αναπαράσταση του εκτυπωμένου G-κώδικα στο λογισμικό CTVox από πλάγια όψη-Απεικόνιση των κενών που δημιουργήθηκαν κατά την εκτύπωση του κελύφους.

Από τις παραπάνω εικόνες γίνεται ευδιάκριτη η δομή του υποστρώματος σε όλες τις περιπτώσεις, καθώς οι συντεταγμένες που ορίστηκαν για αυτή τη δομή, αποτυπώθηκαν με ακρίβεια προς τον σχηματισμό της αραιής γεωμετρίας. Όσον αφορά το υπόλοιπο κομμάτι του πλέγματος, φαίνεται χαρακτηριστικά ότι οι ίνες της πυκνής δομής και στις τρεις περιπτώσεις επικαλύπτονται μεταξύ τους, χωρίς να διαγράφεται μια ευδιάκριτη πορεία των ινών, σύμφωνα με τις συντεταγμένες που δόθηκαν. Παρόλα αυτά, παρατηρείται ότι με τις ταχύτητες στα 1500 και 1800 mm/min οι ίνες προσεγγίζουν περισσότερο τη γεωμετρία μιας καθαρά κυκλικής διατομής, μεγέθους 0.30 mm όπως ορίστηκε αρχικά, σε σχέση με τη χαμηλότερη ταχύτητα. Επιπλέον, στην περίπτωση του κελύφους του συνολικού μοντέλου, παρόλο που οι αποστάσεις μεταξύ των ινών φαίνεται να διατηρούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κώδικα, παρατηρήθηκαν μεγάλα κενά στο εξωτερικό κέλυφος του κάθε μοντέλου. Βάσει αυτών των αστοχιών, κάποια στοιχεία του κώδικα έπρεπε να επαναπροσδιοριστούν προκειμένου το τελικό αποτέλεσμα να γίνει ευδιάκριτο.

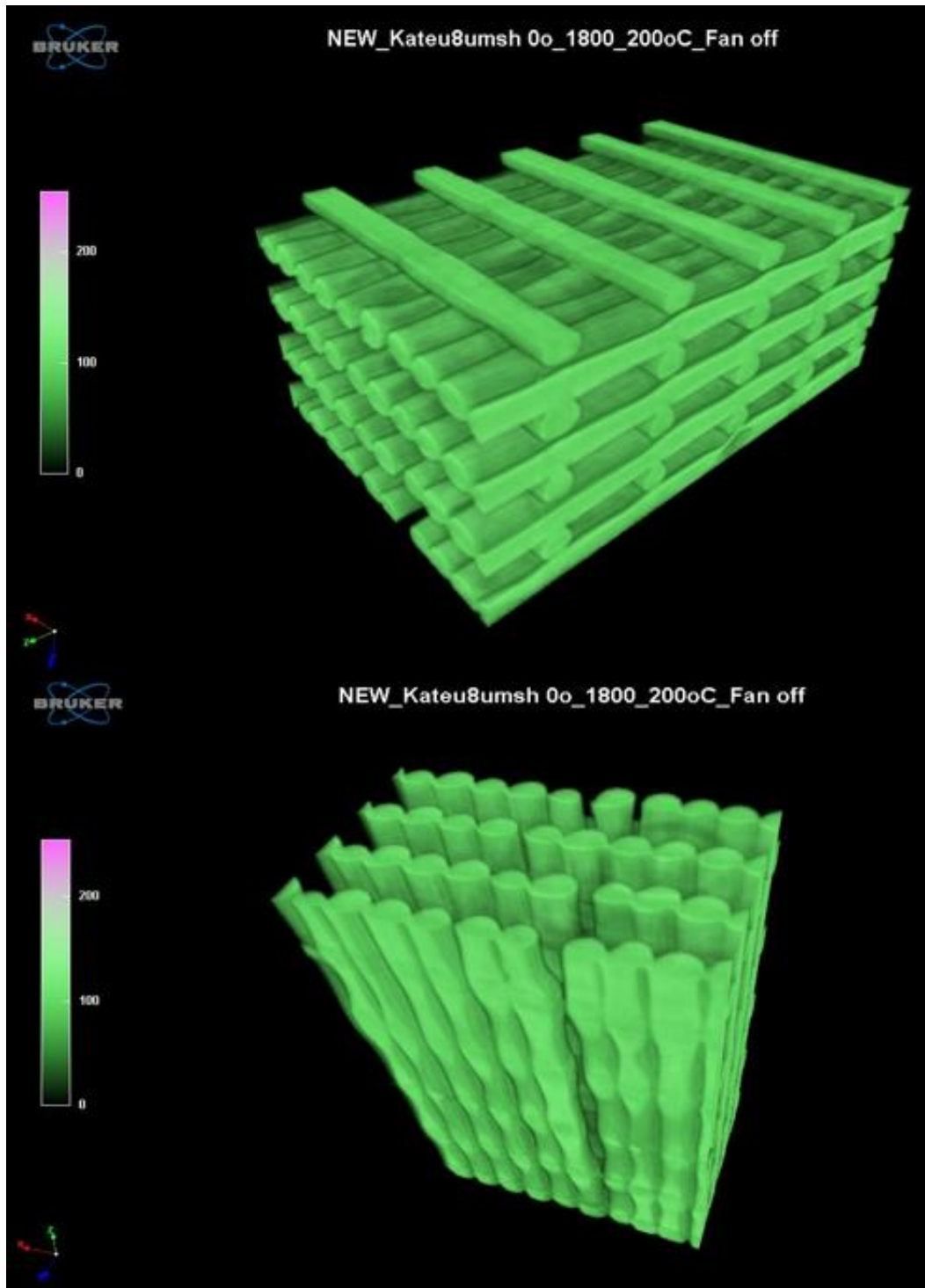
Κατά συνέπεια, έπρεπε να πραγματοποιηθούν αλλαγές τόσο ως προς την τροχιά της πυκνής δομής όσο και ως προς την εξάλειψη των κενών του κελύφους. Σε πρώτη φάση, πραγματοποιήθηκε μια αραιώση των αποστάσεων των γειτονικών διαδρομών στην πυκνή δομή, διατηρώντας ίδια τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υποστρώματος. Οι αποστάσεις των διαδρομών αυξήθηκαν ελάχιστα μεταξύ τους, συγκεκριμένα κατά 0.07 mm, ούτως ώστε οι ίνες

που θα σχηματίζονται να διατηρούν το επιθυμητό κυλινδρικό τους σχήμα καθώς και μια ελάχιστη δυνατή απόσταση μεταξύ των γειτονικών ινών, προκειμένου να προσεγγίσουν τη δομή του εμπορικού δείγματος. Με την αλλαγή των αποστάσεων των διαδρομών, οι συνολικές ίνες που μπορούν να εκτυπωθούν μέσα στο κέλυφος είναι 21. Όσον αφορά τα κενά στα κελύφη όπως παρατηρείται στην εικόνα 4.36, μια προσπάθεια εξάλειψης αυτών ήταν η αύξηση της ποσότητας εξαγωγής του υλικού, μόνο στην περίπτωση κατά τη δημιουργία των κελυφών. Συνοψίζοντας τα νέα δεδομένα, η εκτύπωση των κωδικών πραγματοποιήθηκε πάλι για την κατεύθυνση των 0° και για ταχύτητες 1500 και 1800 mm/min. Η θερμοκρασία παρέμεινε στους 200 °C και η ισχύς του ανεμιστήρα στο 0%. Επίσης, οι αποστάσεις των διαδρομών της πυκνής δομής τέθηκαν στα 0.37 mm και η ποσότητα του υλικού του κελύφους αυξήθηκε κατά ένα μικρό ποσοστό, 10%. Μετά το πέρας της εκτύπωσης, τα δοκίμια σαρώθηκαν προκειμένου να μελετηθεί η απόσταση των ινών της πυκνής δομής καθώς και η δομή του κελύφους.



**Εικόνα 4.37:** Ψηφιακή αναπαράσταση του νέου εκτυπωμένου G-κώδικα στο λογισμικό CTVox, κατεύθυνσης 0°, F1500, θερμοκρασία στους 200 °C, 0% ισχύ του ανεμιστήρα.





**Εικόνα 4.38:** Ψηφιακή αναπαράσταση του νέου εκτυπωμένου G-κώδικα στο λογισμικό CTBox, κατεύθυνσης 0°, F1800, θερμοκρασία στους 200 °C, 0% ισχύ του ανεμιστήρα.

Τα νέα δεδομένα του κώδικα προσδίδουν καλύτερο αποτέλεσμα, όσον αφορά τις αποστάσεις των ινών, όπως παρουσιάζεται στις παραπάνω εικόνες. Στην περίπτωση του κελύφους, με τη μικρή αύξηση της ποσότητας δεν παρατηρήθηκε ιδιαίτερη βελτίωση ως προς τη μείωση των κενών. Πραγματοποιήθηκαν επιπλέον εκτυπώσεις, με αύξηση της ποσότητας του υλικού του κελύφους κατά 20% και 30%. Με την αύξηση κατά 20%, τα κενά μειώθηκαν

αισθητά, οι ίνες όμως άρχισαν να συμπιέζονται μεταξύ τους, λόγω του ότι για τις ίδιες συντεταγμένες ορίστηκε μεγαλύτερη ποσότητα εξαγωγής. Με την αύξηση κατά 30% τα κενά εξαλείφθηκαν, όμως παρατηρήθηκε μεγάλη αλλοίωση της πορείας των ινών κατά τη δημιουργία τους κελύφους.

Αυτό συνέβη λόγω της συσσώρευσης αρκετού υλικού στην άκρη του ακροφυσίου, το μέγεθος της οποίας αυξάνονταν σταδιακά μέχρι την ολοκλήρωση του κελύφους. Επιπλέον, όταν ολοκληρώνονταν το κέλυφος και ξεκινούσε η εκτύπωση των ινών μέσα σε αυτό, παρασύρονταν επιπλέον ποσότητα υλικού από το κέλυφος, με αποτέλεσμα να παραμορφώνεται και η δομή μέσα σε αυτό. Μια άλλη προσέγγιση που πραγματοποιήθηκε στην εξάλειψη των κενών του κελύφους ήταν η τμηματική εναπόθεση του υλικού πάνω σε μια διαδρομή κατά τον σχηματισμό του κελύφους, χωρίς να αλλάξει η ποσότητα του υλικού. Για παράδειγμα, αντί να οριστεί η απόσταση που θα διανύσει η κεφαλή για μια ευθεία, με τη δήλωση δύο συντεταγμένων, χωρίστηκε σε τρία τμήματα με δύο ενδιάμεσα σημεία, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.39.

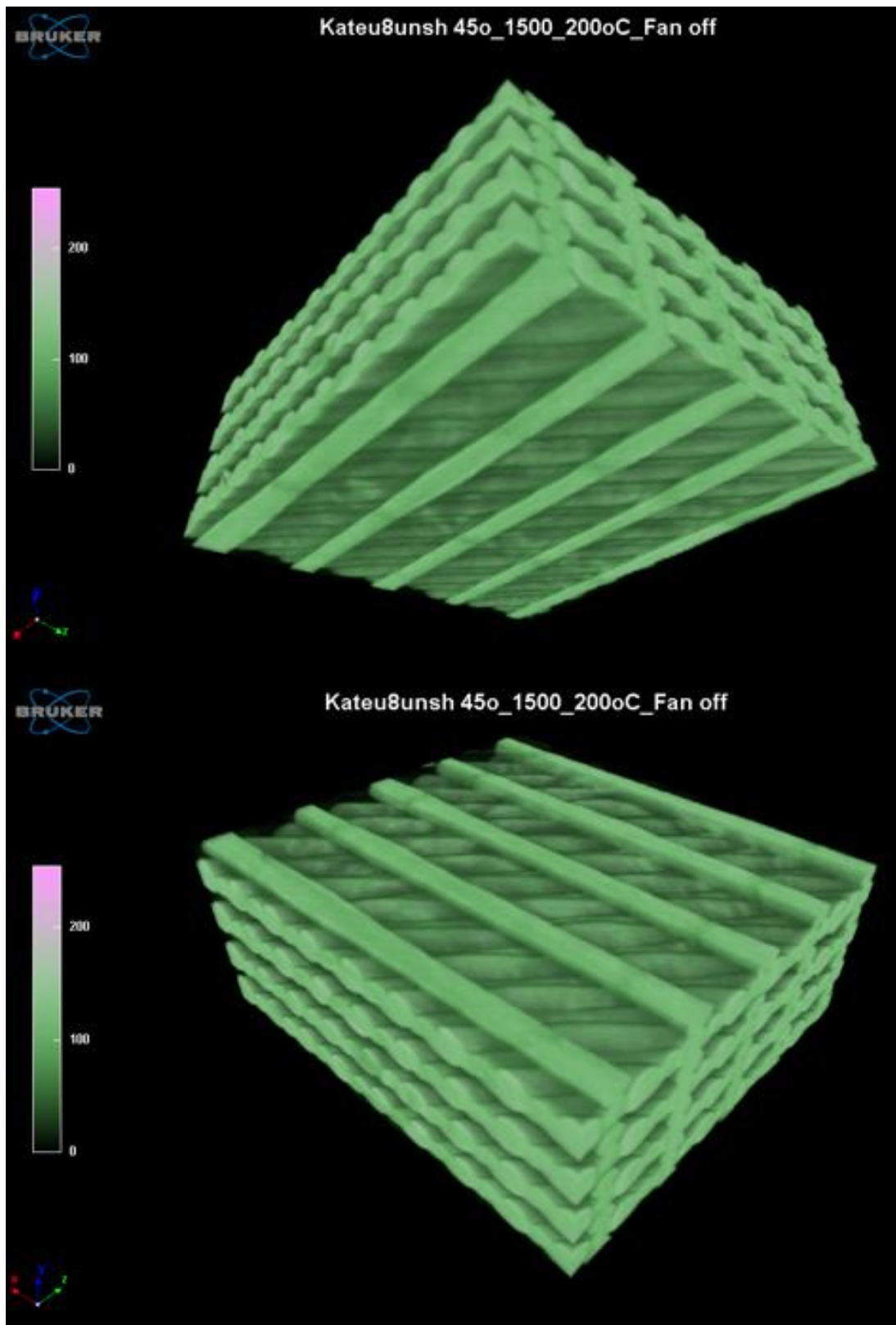


**Εικόνα 4.39:** Διαφορετικοί τρόποι κίνησης της κεφαλής για την ίδια διαδρομή κατά την εκτύπωση. Στην πάνω γραμμή η κεφαλή έχει ένα αρχικό και ένα τελικό σημείο ενώ η κάτω διαδρομή για την ίδια απόσταση χωρίζεται σε τρεις μικρές διαδρομές.

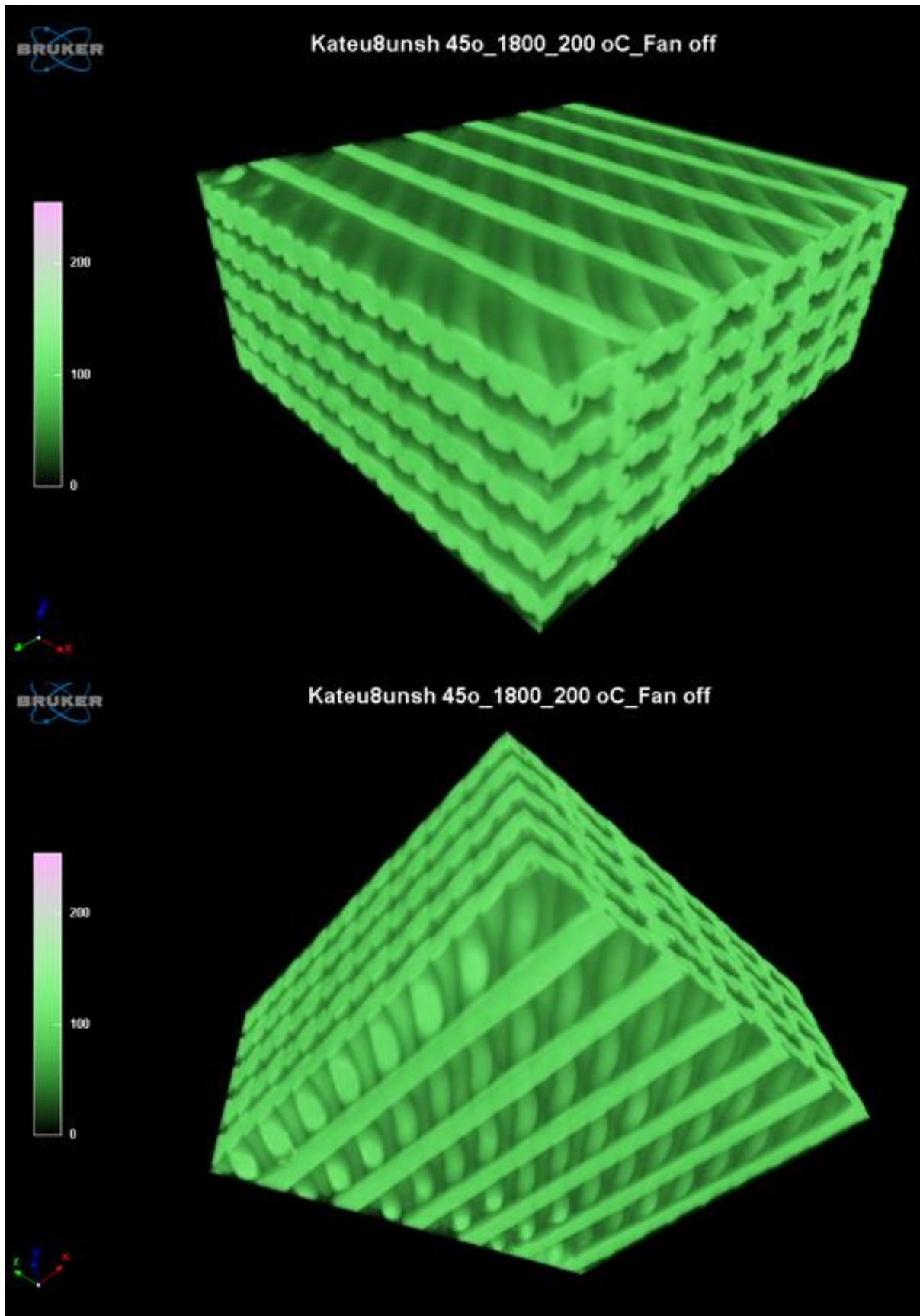
Το αποτέλεσμα και σε αυτήν την περίπτωση δεν ήταν ικανοποιητικό καθώς κατά αυτόν τον τρόπο διακρίνονταν τα βήματα στα οποία χωρίστηκε η κάθε διαδρομή, χωρίς να παρουσιάζεται μια ενιαία ίνα. Επίσης, τα κενά διατηρήθηκαν στα ίδια επίπεδα. Την καλύτερη λύση στο πρόβλημα, έδωσε η μείωση της ταχύτητας εκτύπωσης του κελύφους, διατηρώντας τα επίπεδα της ποσότητας του υλικού ίδια με τα αρχικά. Η μείωση ξεκίνησε σταδιακά και παρατηρήθηκε ότι όντως τα κενά αρχίζουν να μειώνονται. Η τελική και ιδανικότερη ταχύτητα αποδείχτηκε ότι ήταν αυτή των 200 mm/min.

Στην πορεία, ακολούθησαν δοκιμαστικές εκτυπώσεις σχετικά με την κατεύθυνση των 45°. Τα περισσότερα δεδομένα εκτύπωσης αυτής της κατεύθυνσης βασίστηκαν στα αντίστοιχα δεδομένα των 0°. Συγκεκριμένα, η ταχύτητα εκτύπωσης του υποστρώματος πραγματοποιήθηκε στα 1200 mm/min, της πυκνής δομής στα 1500 mm/min και 1800 mm/min και του κελύφους στα 200 mm/min. Μετά την ολοκλήρωση της εκτύπωσης, πραγματοποιήθηκε σάρωση, όπως στην περίπτωση της κατεύθυνσης των 0°. Ο χρόνος εκτέλεσης της εκτύπωσης για ταχύτητα 1500 και 1800 mm/min στην πυκνή δομή ήταν 18 και

17 λεπτά αντίστοιχα, με ποσότητα υλικού 0.38 m για το καθένα. Ο συνολικός χρόνος εκτύπωσης βγήκε μεγαλύτερος σε σχέση με την πρώτη περίπτωση των 0° καθώς υπάρχει διαφορετική γεωμετρία και πιο χαμηλή ταχύτητα εκτύπωσης του κελύφους.

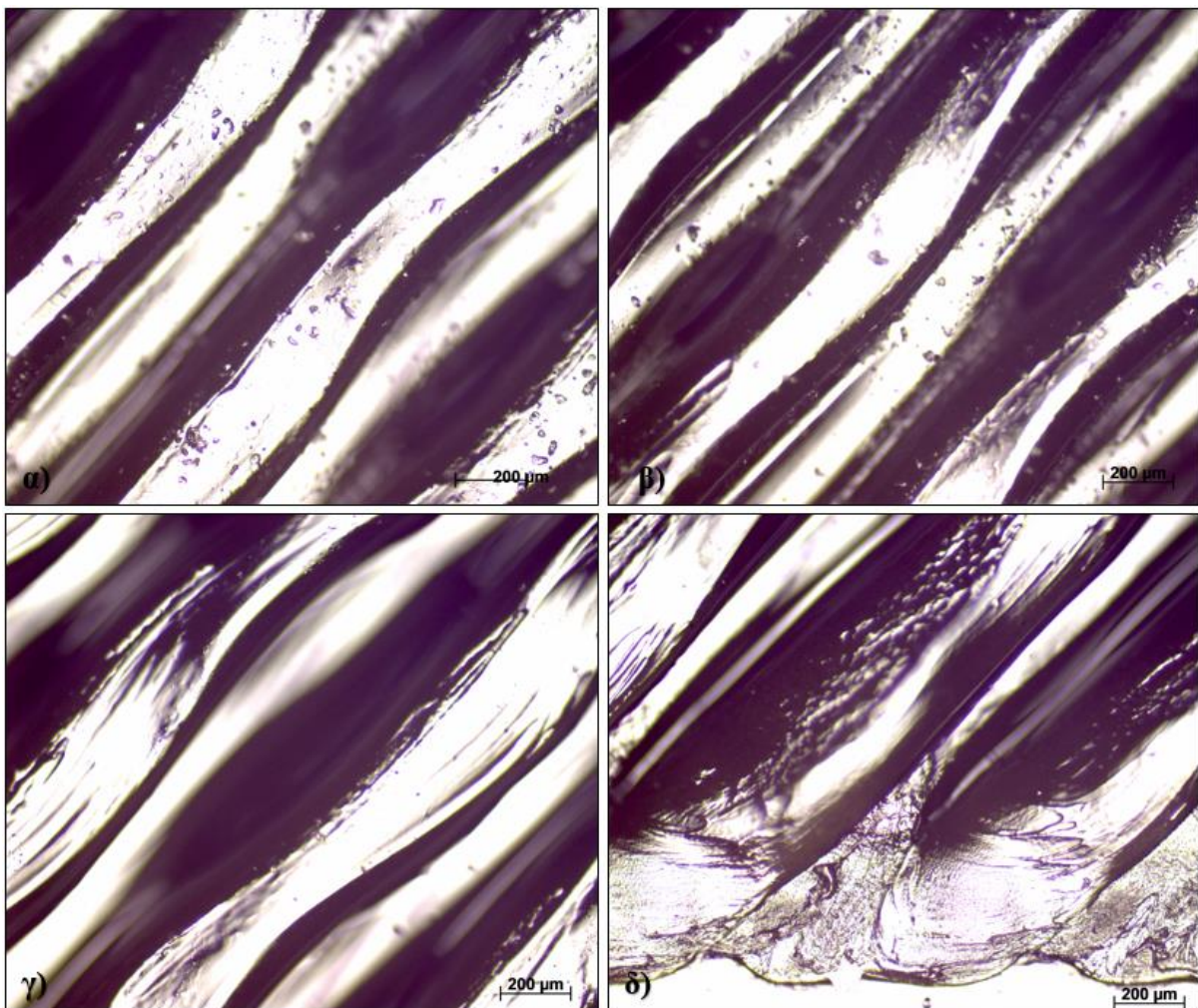


**Εικόνα 4.40:** Ψηφιακή αναπαράσταση του εκτυπωμένου G-κώδικα στο λογισμικό CTVox, κατεύθυνσης 45°, F1500, θερμοκρασία στους 200 °C, 0% ισχύ του ανεμιστήρα.



Εικόνα 4.41: Ψηφιακή αναπαράσταση του εκτυπωμένου G-κώδικα στο λογισμικό CTVox, κατεύθυνσης 45°, F1800, θερμοκρασία στους 200 °C, 0% ισχύ του ανεμιστήρα.

Παρατηρήθηκε ότι η δομή του κελύφους είχε την απαραίτητη συνοχή σε κάθε στρώση, χωρίς την παρουσία κενών. Παρόλα αυτά, και σε αυτήν την περίπτωση οι ίνες στην πυκνή δομή αλληλοεπικαλύπτονταν, με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζεται μια ευδιάκριτη εικόνα της δομής των 45°. Λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα αποτέλεσε η αραίωση των αποστάσεων των γειτονικών διαδρομών στην πυκνή δομή. Συγκεκριμένα, η απόσταση μεταξύ των διαδρομών τέθηκε στα 0.37 mm και οι συνολικές ίνες που εκτυπώθηκαν μέσα στον χώρο του κελύφους ήταν 70. Τα δοκίμια μετά την εκτύπωση μελετήθηκαν στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο για να παρατηρηθεί η απόσταση των ινών.

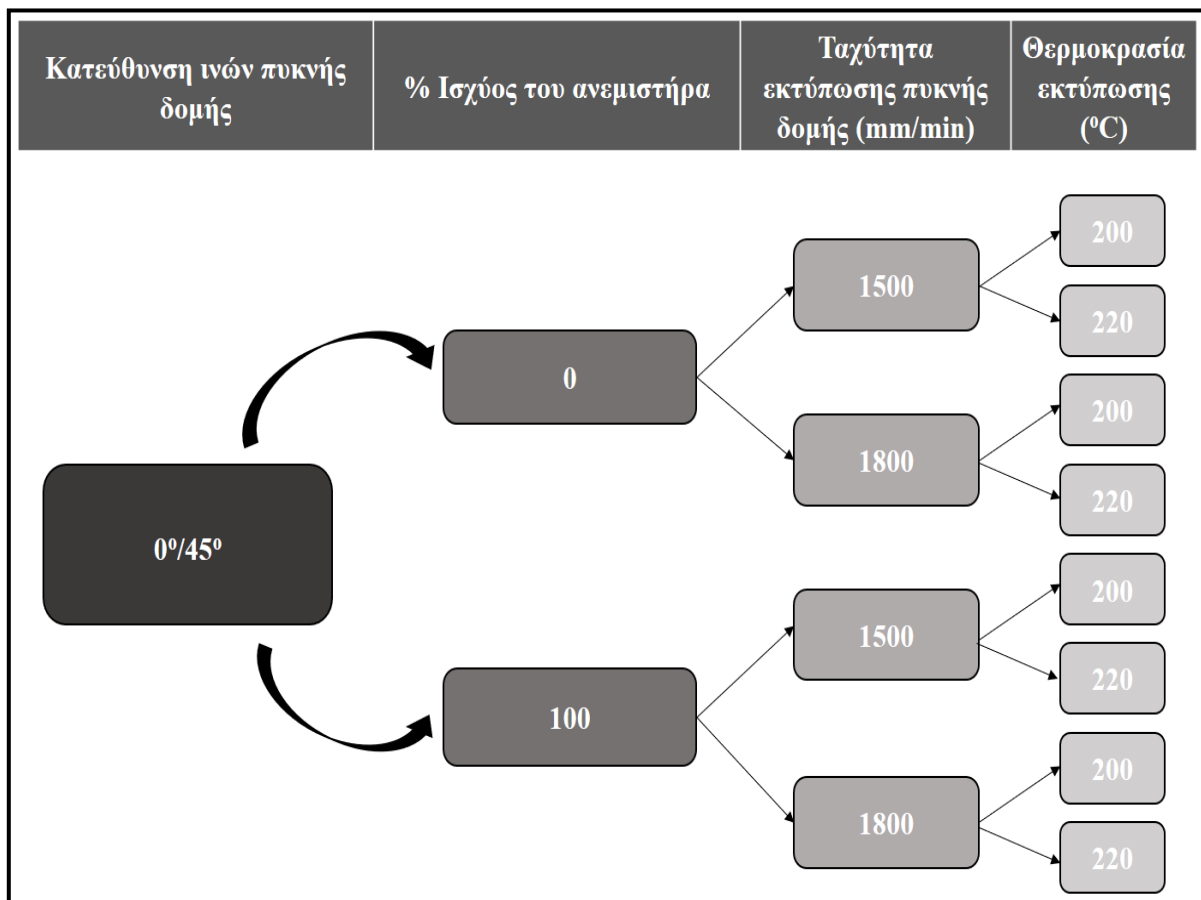


**Εικόνα 4.42:** Κατεύθυνση 45°, με μηδενική ισχύ του ανεμιστήρα, στους 200 °C. Οι εικόνες α,β) αντιστοιχούν στα 1500 mm/min και οι γ,δ) στα 1800 mm/min.

Στην εικόνα 4.42 παρουσιάζεται η δομή των 45° και συγκεκριμένα στην εικόνα 4.42 α) και 4.42 β) φαίνεται το απαραίτητο κενό που ορίστηκε μεταξύ των γειτονικών διαδρομών των ινών για ταχύτητα 1500 mm/min, σε ένα τυχαίο ενδιάμεσο σημείο της πυκνής δομής. Στην εικόνα 4.42 γ) παρουσιάζεται αντίστοιχα ένα τυχαίο ενδιάμεσο σημείο για ταχύτητα 1800 mm/min

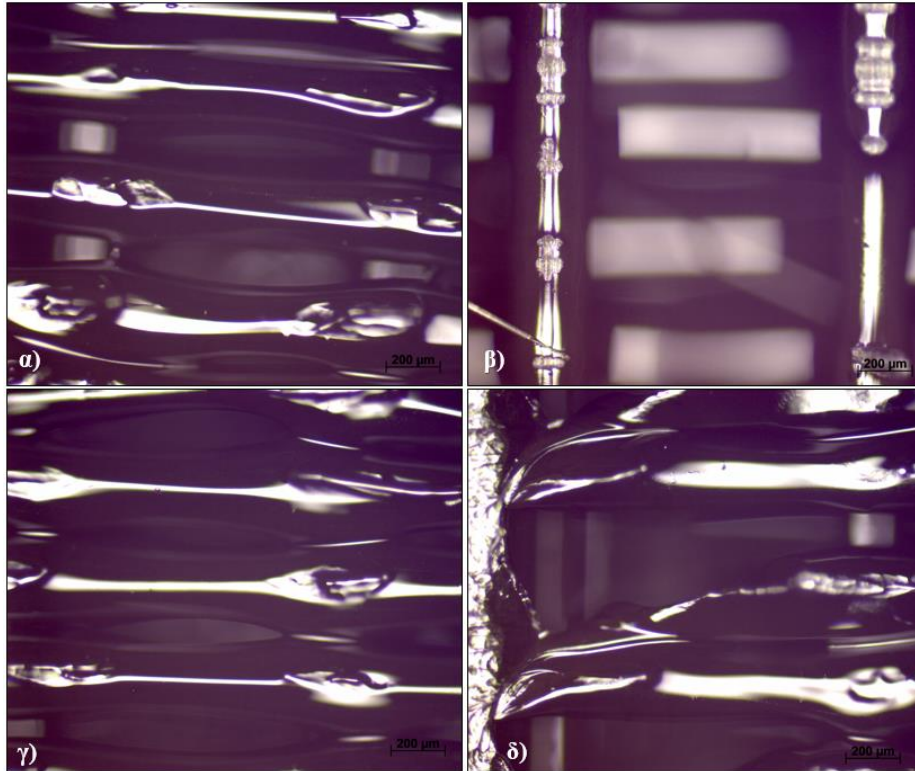
ενώ στην εικόνα 4.42 δ) παρουσιάζεται η συγκόλληση των ινών πάνω στο εσωτερικό κέλυφος καθώς και η καθαρότητα αυτής για την ίδια ταχύτητα.

Αφού ολοκληρώθηκαν οι δοκιμαστικές εκτυπώσεις με τις απαραίτητες διορθώσεις, δημιουργήθηκαν επιπλέον 12 G-κώδικες, στο σύνολο 16, με τους 8 να αφορούν τις 0° και τους υπόλοιπους τις 45°. Και στις δύο περιπτώσεις, οι τροχιές παρέμειναν σταθερές, μεταβάλλοντας μερικές παραμέτρους. Αυτές οι παράμετροι αφορούν τη θερμοκρασία, την ταχύτητα της εκτύπωσης και την ισχύ του ανεμιστήρα. Συγκεκριμένα, οι κώδικες εκτυπώθηκαν σε δύο διαφορετικές θερμοκρασίες, στους 200 °C και στους 220 °C, παράμετρος η οποία ορίστηκε από το λογισμικό Voxelizer, χωρίς να χρειαστεί να περαστεί συγκεκριμένη εντολή μέσα στον κώδικα. Επιπλέον, οι ταχύτητες που αφορούν τις ίνες της πυκνής δομής τέθηκαν στα 1500 mm/min και 1800 mm/min και τέλος η ένταση του ανεμιστήρα στο 0% και 100% της ισχύος του. Σε όλες τις περιπτώσεις, η θερμοκρασία της πλατφόρμας εκτύπωσης παρέμενε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Επιπρόσθετα, η ταχύτητα εκτύπωσης του υποστρώματος ήταν σταθερή στα 1200 mm/min και του κελύφους στα 200 mm/min.

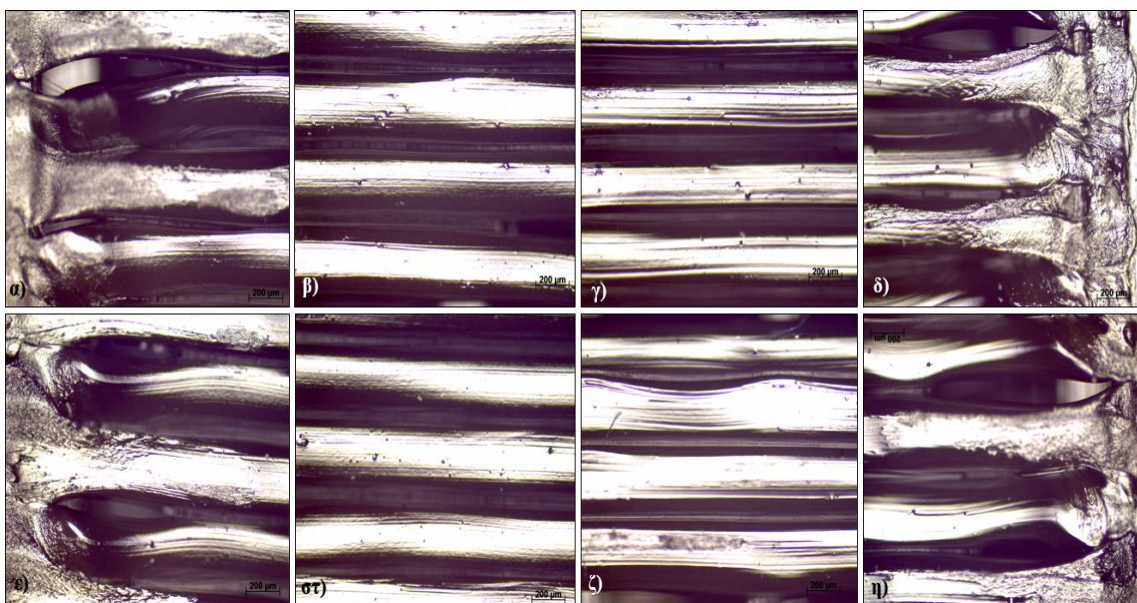


Διάγραμμα 4.1: Συνδυασμός παραμέτρων για την εκτύπωση των G-κωδικών.

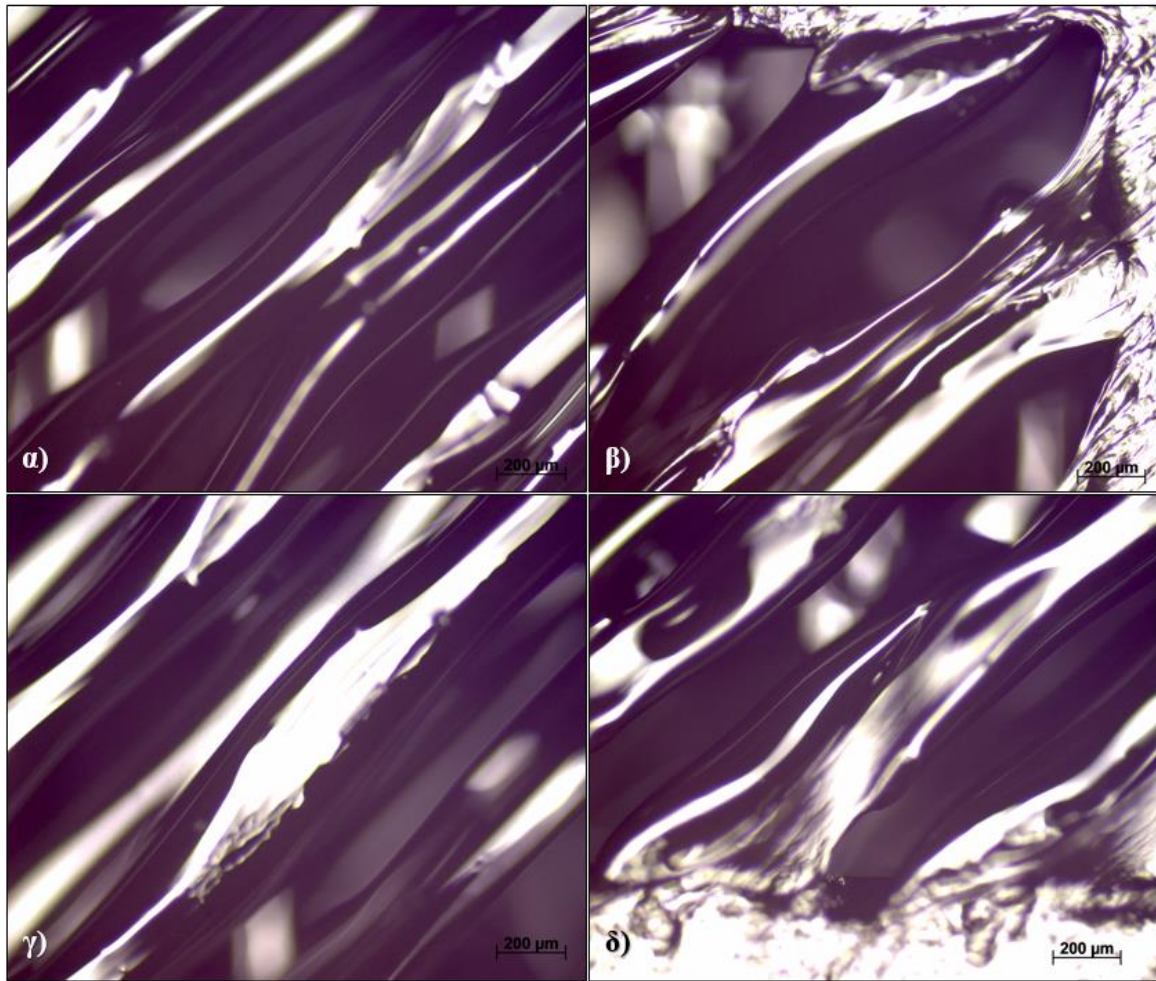
Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται τμήματα των δοκιμίων που εκτυπώθηκαν, σε τυχαία σημεία πάνω σε αυτά. Συγκεκριμένα, παρατηρείται η γεωμετρία της ίνας, η συγκόλλησή της πάνω στο κέλυφος, το υπόστρωμα καθώς και οι αποστάσεις των γειτονικών διαδρομών. Οι εικόνες πάρθηκαν μέσω του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου για κάθε μία περίπτωση ξεχωριστά, για τους 12 νέους κώδικες.



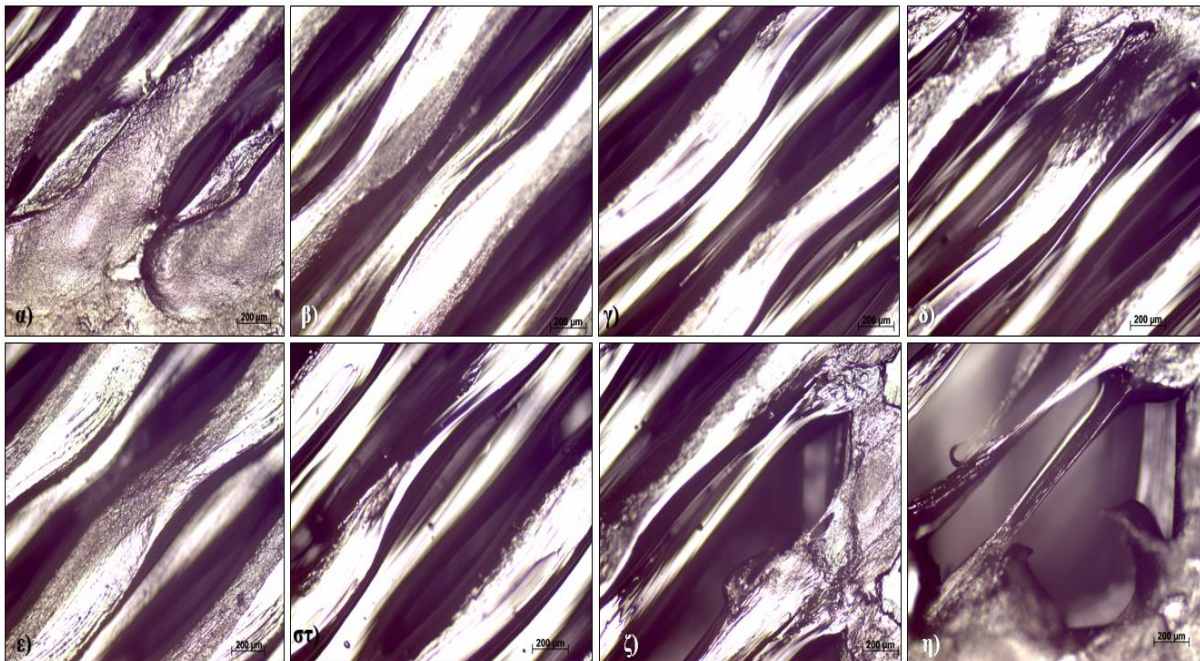
**Εικόνα 4.43:** Κατεύθυνση 0°, με μηδενική ισχύ του ανεμιστήρα, στους 220 °C. Οι εικόνες α,β) αντιστοιχούν στα 1500 mm/min και οι γ,δ) στα 1800 mm/min.



**Εικόνα 4.44:** Κατεύθυνση 0°, με 100% της ισχύς του ανεμιστήρα. Η πάνω σειρά αντιστοιχεί σε ταχύτητα 1500 mm/min ενώ η κάτω σε 1800 mm/min. Οι δύο πρώτες στήλες είναι για κώδικες στους 200 °C ενώ οι δύο τελευταίες στους 220 °C.



**Εικόνα 4.45:** Κατεύθυνση 45°, με μηδενική ισχύ του ανεμιστήρα, στους 220 °C. Οι εικόνες α,β) αντιστοιχούν στα 1500 mm/min και οι γ,δ) στα 1800 mm/min.



**Εικόνα 4.46:** Κατεύθυνση 45°, με 100% της ισχύς του ανεμιστήρα. Η πάνω σειρά αντιστοιχεί σε ταχύτητα 1500 mm/min ενώ η κάτω σε 1800 mm/min. Οι δύο πρώτες στήλες είναι για κώδικες σε θερμοκρασία 200 °C ενώ οι δύο τελευταίες για θερμοκρασία 220 °C.



Εμφανή προβλήματα παρουσιάστηκαν στη γεωμετρία των ινών στους 220 °C, ανεξαρτήτως ταχύτητας και ισχύος του ανεμιστήρα όπως παρατηρείται στις εικόνες 4.46 δ) και 4.48 β,δ). Γίνεται ευδιάκριτο ότι οι ίνες στα σημεία όπου συγκολλούνται με το κέλυφος προς τον σχηματισμό της επόμενης διαδρομής της ίνας, έρχονται σε επαφή μεταξύ τους, με αποτέλεσμα οι ίνες να αλληλοεπικαλύπτονται, δημιουργώντας μεγαλύτερα κενά στην τελική πυκνή δομή. Επιπρόσθετα, στις εικόνες 4.47 α,β,ε,στ) και 4.47 γ,δ,ζ,η), για θερμοκρασία 200 και 220 °C αντίστοιχα, στο 100% της ισχύος του ανεμιστήρα, γίνεται εμφανής η επίδραση της θερμοκρασίας, καθότι στα σημεία συγκόλλησης, αλλαγής κατεύθυνσης και σε τυχαία ενδιάμεσα σημεία, στην περίπτωση των 220 °C φαίνεται η αλλοίωση της γεωμετρίας της ίνας.

Επιπλέον, πρόβλημα παρουσιάστηκε στη γεωμετρία με κατεύθυνση 45° στα ακριανά τμήματα του εσωτερικού κελύφους, κυρίως στα σημεία έναρξης και λήξης της εκτύπωσης της πυκνής δομής, όπως παρατηρείται στην εικόνα 4.49 ζ,η), για θερμοκρασία 220 °C. Ο λόγος είναι διότι η κεφαλή καθώς πλησιάζει τις άκρες, διανύει μια όλο και πιο μικρή απόσταση με μια σταθερά μεγάλη ταχύτητα. Γίνεται αντιληπτό, ότι η αρκετά υψηλή θερμοκρασία εκτύπωσης του υλικού επιφέρει μείωση του ιξώδους του και κατά συνέπεια μείωση της αντίστασης στη ροή, με αποτέλεσμα να μην αποδίδεται το κυλινδρικό σχήμα στην ίνα όπως ορίστηκε στον κώδικα.

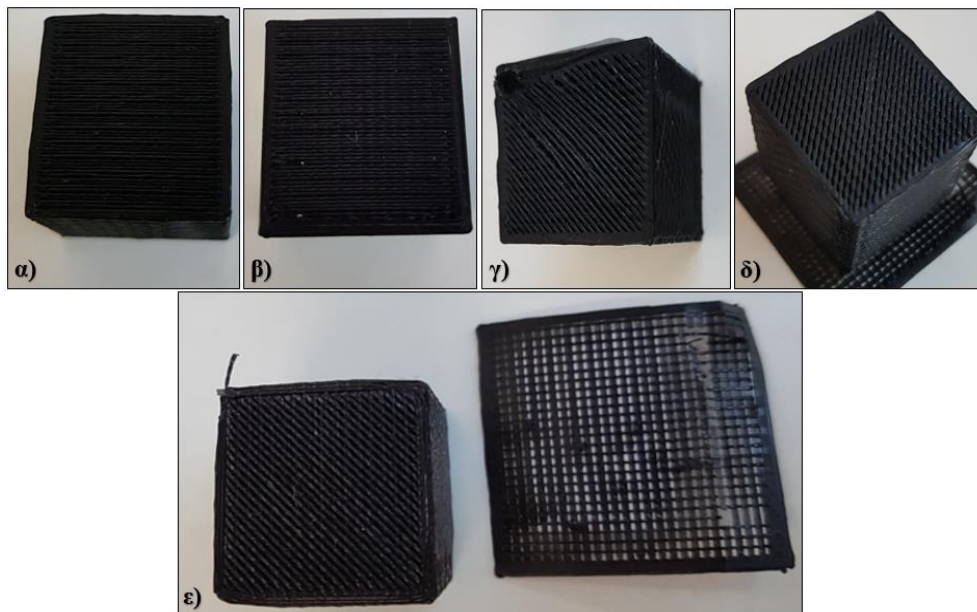
Μια ακόμη αστοχία που παρατηρήθηκε σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις, ήταν αυτή του Raft. Κατά την αφαίρεση του Raft, τμήμα του κάτω μέρους του πλέγματος αποκολλούνταν με αποτέλεσμα να αφαιρούνται τις περισσότερες φορές κομμάτια από τις δύο πρώτες στρώσεις του. Χαρακτηριστική είναι η εικόνα 4.46 β) στην οποία παρουσιάζονται οι ίνες της δομής του υποστρώματος, με αποτυπωμένα τα σημάδια της αποκόλλησης της πρώτης στρώσης της πυκνής δομής.

#### **4.2.4 Επανασύνταξη του G-κώδικα**

Το επόμενο στάδιο είναι η επανασύνταξη του κώδικα σε μεγαλύτερο μέγεθος, προκειμένου τα δοκίμια που θα προκύψουν να είναι κατάλληλα για την εφαρμογή της μεθόδου της θλίψης σε αυτά. Το σχήμα που επιλέχθηκε ήταν κυβικό, με διαστάσεις 2·2·2 cm<sup>3</sup>. Οι αποστάσεις μεταξύ των διαδρομών για το Skirt, τα κελύφη αλλά και για το υπόστρωμα και τις πυκνές δομές, και στις δύο κατευθύνσεις, παρέμειναν ίδιες με τις αρχικές. Επιπλέον, η ταχύτητα εκτύπωσης του κελύφους παρέμεινε σταθερή στα 200 mm/min. Η διαφορά ύψους σε κάθε στρώση, πλην της δομής του Raft, παρέμεινε στα 0.30 mm και συνολικά το κάθε δοκίμιο αποτελείται από 67 στρώσεις και για τις δύο κατευθύνσεις. Σύνολο, τόσο για τις 0° όσο και για τις 45° η ποσότητα του υλικού που χρειάστηκε για κάθε ένα δοκίμιο ήταν στα 1.98 m και 2.13

m αντίστοιχα. Σε κάθε στρώση εκτυπώθηκαν 53 ίνες για την κατεύθυνση των 0°, 83 ίνες για την κατεύθυνση των 45° και 17 ίνες για τη δομή του υποστρώματος.

Όσον αφορά τη βελτίωση της γεωμετρίας των ινών στις 45°, στη νέα σύνταξη του κώδικα εφαρμόστηκε μια ελαφριά διακύμανση της ταχύτητας της εκτύπωσης. Συγκεκριμένα, ξεκίνησε από μια χαμηλή τιμή στα 400 mm/min, με σταδιακή αύξηση αυτής μέχρι την απόκτηση της τιμής είτε των 1500 mm/min είτε των 1800 mm/min και στη συνέχεια σημειώθηκε αντίστοιχη μείωση της ταχύτητας καθώς η εκτύπωση ολοκληρώνονταν στο κάτω δεξιά άκρο. Κατά αυτόν τον τρόπο, μπορεί να επιτευχθεί η επιθυμητή ομαλότητα της εναπόθεσης του υλικού καθώς και η μείωση της αλλοίωσης τόσο του κελύφους όσο και του πλέγματος. Τέλος, αλλαγές πραγματοποιήθηκαν ως προς τη γεωμετρία της δομής του Raft. Αυτή τη φορά, στις ίνες του Raft δε δόθηκε μια καθαρά κυλινδρική δομή αλλά μια αντίστοιχη της εικόνας 3.21 β). Στην ουσία μειώθηκε το ύψος για τις δύο στρώσεις από τις οποίες αποτελείται το Raft, με αποτέλεσμα η δομή να αποκτά μια πιο δυνατή επαφή με την πλατφόρμα εκτύπωσης και ταυτόχρονα μια πιο λεπτή γεωμετρία, σε σύγκριση με την παλιά. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε αραίωση των διαδρομών μεταξύ των ινών, γεγονός που συνέβαλε στην αρκετά εύκολη αποκόλλησή του και στην αποφυγή της αλλοίωσης του δοκιμίου. Όσον αφορά τις παραμέτρους που θα δοθούν στους G-κώδικες, δεδομένων των αποτελεσμάτων που προέκυψαν για εκτύπωση στους 220 °C, αυτή η κατηγορία επιλέχθηκε να απορριφθεί. Συνεπώς, οι πρώτοι κώδικες που εκτυπώθηκαν, προς θλίψη, ήταν στη θερμοκρασία των 200 °C, για ταχύτητα 1500 mm/min, με ανεμιστήρα ενεργό και ανενεργό και στις δύο διαφορετικές κατευθύνσεις. Το αποτέλεσμα της εκτύπωσης φαίνεται στην εικόνα 4.47.



**Εικόνα 4.47:** Εκτύπωση του G-κώδικα για 200 °C και F1500. α) Κατεύθυνση 0° με 0% ισχύ του ανεμιστήρα, β) Κατεύθυνση 0° με 100% ισχύ, γ) Κατεύθυνση 45° με 0% ισχύ, δ) Κατεύθυνση 45° με 100% ισχύ, ε) Αφαίρεση δομής Raft-Άθικτη η δομή του πλέγματος.

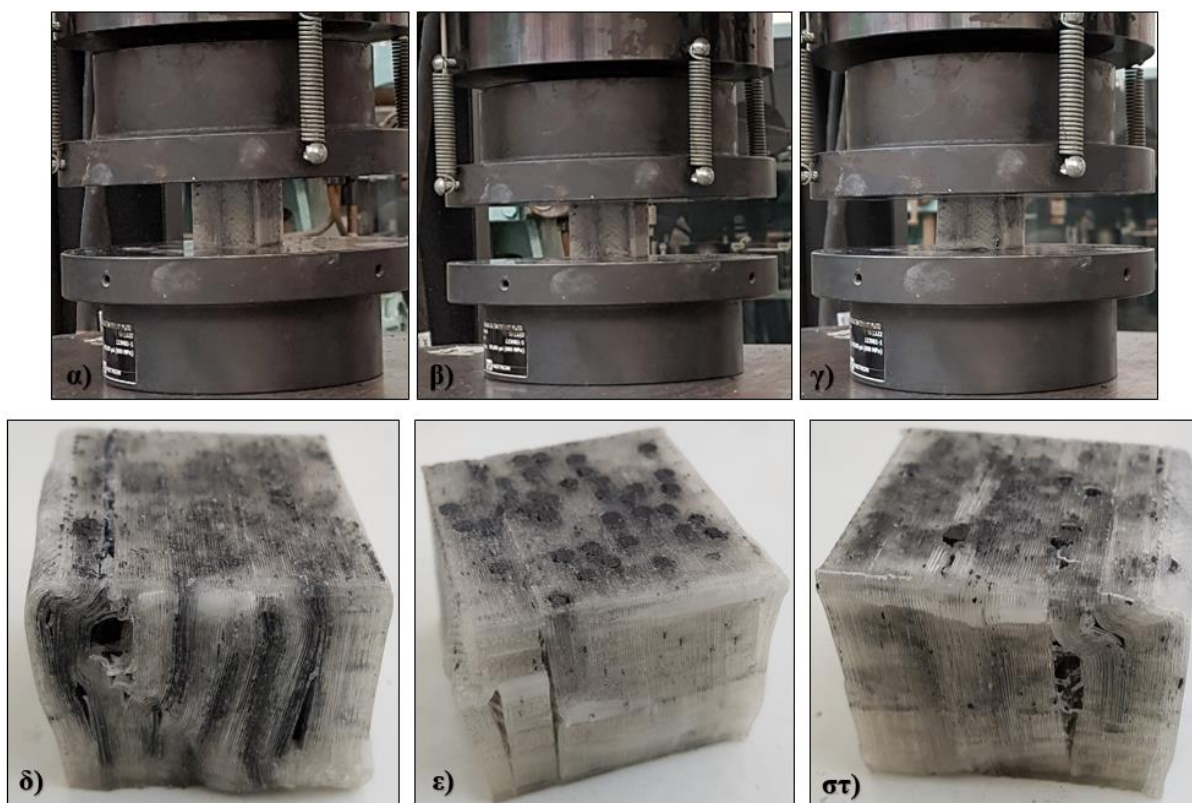
## 3<sup>ο</sup> ΜΕΡΟΣ

### 4.3 Διαδικασία θλίψης

Η πειραματική διαδικασία ολοκληρώνεται με τη μέθοδο της θλίψης για τα τρία δοκίμια-Reverse που αναπαριστούν την εσωτερική δομή του εμπορικού δείγματος των ινών άνθρακα καθώς και για τα δοκίμια που διαμορφώθηκαν κατά τη νέα σύνταξη του G-κώδικα.

#### 4.3.1 Δοκίμια προς θλίψη

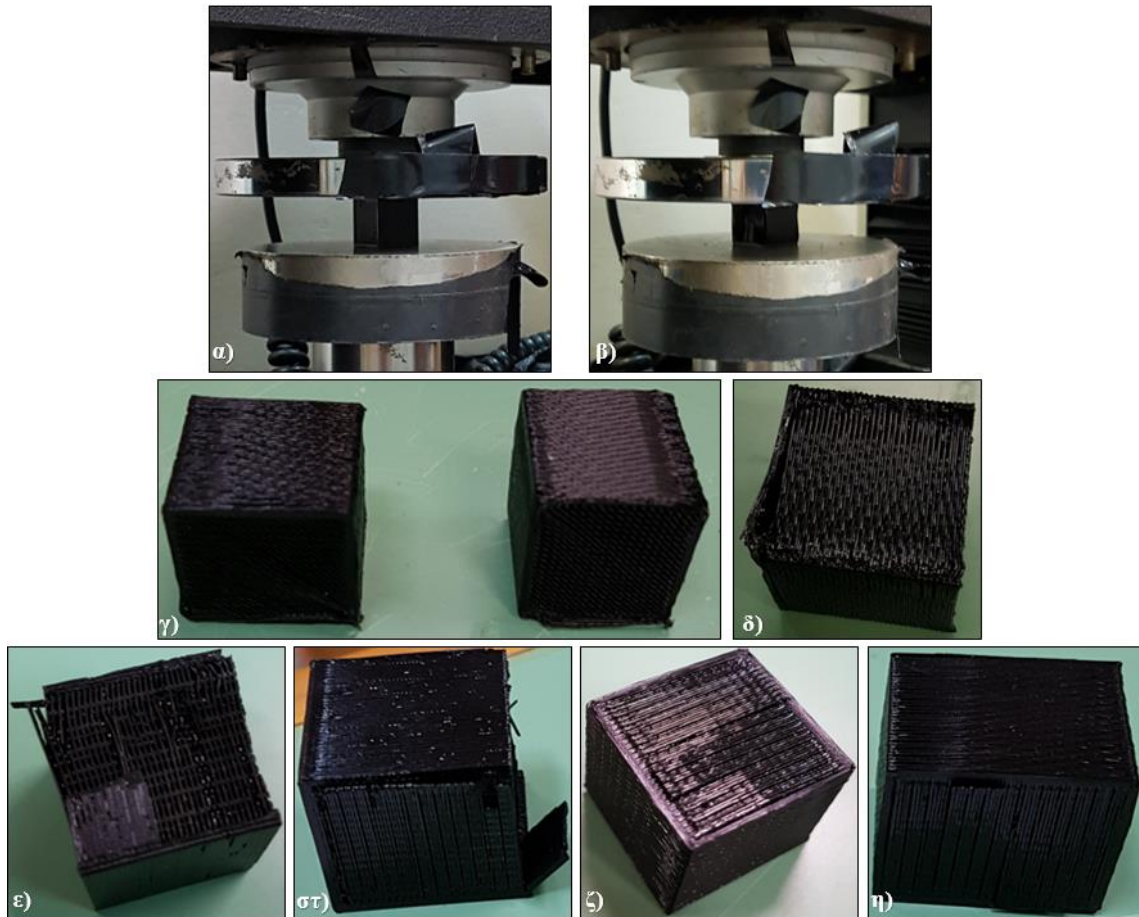
Τα πρώτα δοκίμια στα οποία εφαρμόστηκε η θλίψη ήταν τα Reverse. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν με τη φορά των ινών κάθετα ως προς το έδαφος. Η κάτω βάση ήταν ακίνητη ενώ η πάνω κατέβαινε με σταθερό βήμα, με ταχύτητα 5 mm/min. Το αποτέλεσμα της θλίψης παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



**Εικόνα 4.48:** α-γ) Στάδιο συμπίεσης ενός Reverse δοκίμιου κατά το στάδιο της θλίψης. δ-στ) Reverse δοκίμια μετά το πέρας της θλίψης.

Στην εικόνα 4.48 α-γ) παρατηρείται το στάδιο της συμπίεσης για ένα από τα τρία δείγματα. Κατά την πειραματική διαδικασία το δοκίμιο εμφανίζει μια βράχυνση με μερική πλευρική διόγκωση. Ουσιαστικά αποτελεί το τελικό σημείο του πειράματος, καθώς το δοκίμιο δεν είναι απαραίτητο να φτάσει στο σημείο της θραύσης για να θεωρηθεί η διαδικασία ολοκληρωμένη. Επιπλέον, παρατηρείται σε όλα τα δοκίμια μια τμηματική αποκόλληση του υλικού PLA.

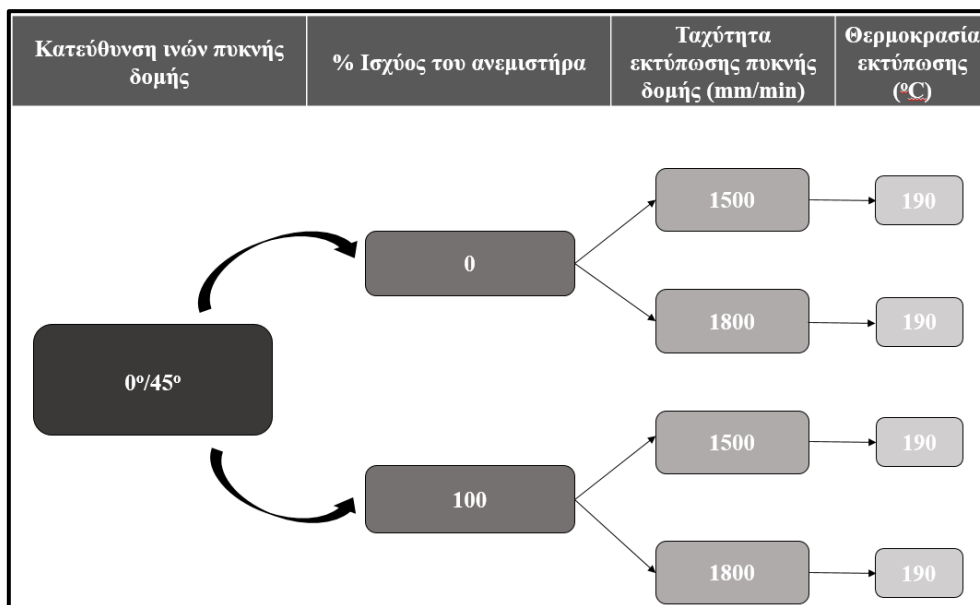
Στη συνέχεια, ακολούθησε το πείραμα για τους τέσσερις κώδικες που εκτυπώθηκαν, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.49. Και σε αυτήν την περίπτωση, οι ίνες της πυκνής δομής τοποθετήθηκαν κάθετα ως προς το έδαφος. Η κάτω βάση ήταν ακίνητη ενώ η πάνω κατέβαινε με σταθερή ταχύτητα 2 mm/min.



**Εικόνα 4.49:** α) Έναρξη και β) πέρας του πειράματος της θλίψης για τους πρώτους κώδικες, γ) Δοκίμια κατεύθυνσης 45° μετά τη θλίψη, για 0% και 100% ισχύ του ανεμιστήρα αντίστοιχα, δ) Πλάγια όψη δοκιμίου 45°, με 0% ισχύ του ανεμιστήρα, ε),στ) Δοκίμιο κατεύθυνσης 0° μετά τη θλίψη, σε πλάγια και μπροστινή όψη με 0% ισχύ του ανεμιστήρα, ζ),η) Δοκίμιο κατεύθυνσης 0° μετά τη θλίψη, από δύο διαφορετικές όψεις με 100% ισχύ του ανεμιστήρα.

Στην εικόνα 4.49 α) και 4.49 β) παρουσιάζονται αντίστοιχα η αρχή και το πέρας της θλίψης για ένα δοκίμιο κατεύθυνσης 0°. Παρατηρήθηκε στην περίπτωση των 0° και για 0% ισχύ του ανεμιστήρα, πλευρική αποκόλληση του κελύφους καθώς και μερική αποκόλληση του πλέγματος του δοκιμίου από το κέλυφος στις εικόνες 4.49 ε) και 4.49 στ), αντίστοιχα. Επίσης, στην εικόνα 4.49 ε) παρατηρείται μετατόπιση και καμπύλωση των ινών στα σημεία όπου εφαρμόστηκε η συμπίεση. Όσον αφορά στην περίπτωση των 0° για 100% ισχύ, εμφανίστηκε αστοχία ως προς το πλέγμα καθώς υπήρξε αποκόλληση αυτού από τα κελύφη, όπως φαίνεται στις εικόνες 4.49 ζ) και 4.49 η). Σχετικά με την περίπτωση των 45°, παρατηρήθηκε και στις δύο περιπτώσεις μόνιμη συμπίεση των δοκιμίων καθώς και αποκόλληση των πρώτων

στρώσεων όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 4.49 δ). Παρατηρήθηκε, με βάση τον οπτικό έλεγχο των τεσσάρων δοκιμίων που εξήχθησαν από τον G-κώδικα, μετά το πέρας της θλίψης, ότι οι περισσότερες αστοχίες πρέπει να προκαλούνται λόγω της υψηλής θερμοκρασίας των 200 °C, στην οποία εκτυπώθηκαν. Συνεπώς, θεωρήθηκε δόκιμο οι υπόλοιποι G-κώδικες να εκτυπωθούν σε χαμηλότερη θερμοκρασία και συγκεκριμένα στους 190 °C, για να εκτιμηθεί οι συμπεριφορά τους στη θλίψη. Οι παράμετροι που τέθηκαν στους υπόλοιπους κώδικες προς εκτύπωση παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι κώδικες που εκτυπώθηκαν, πριν τη διαδικασία της θλίψης.



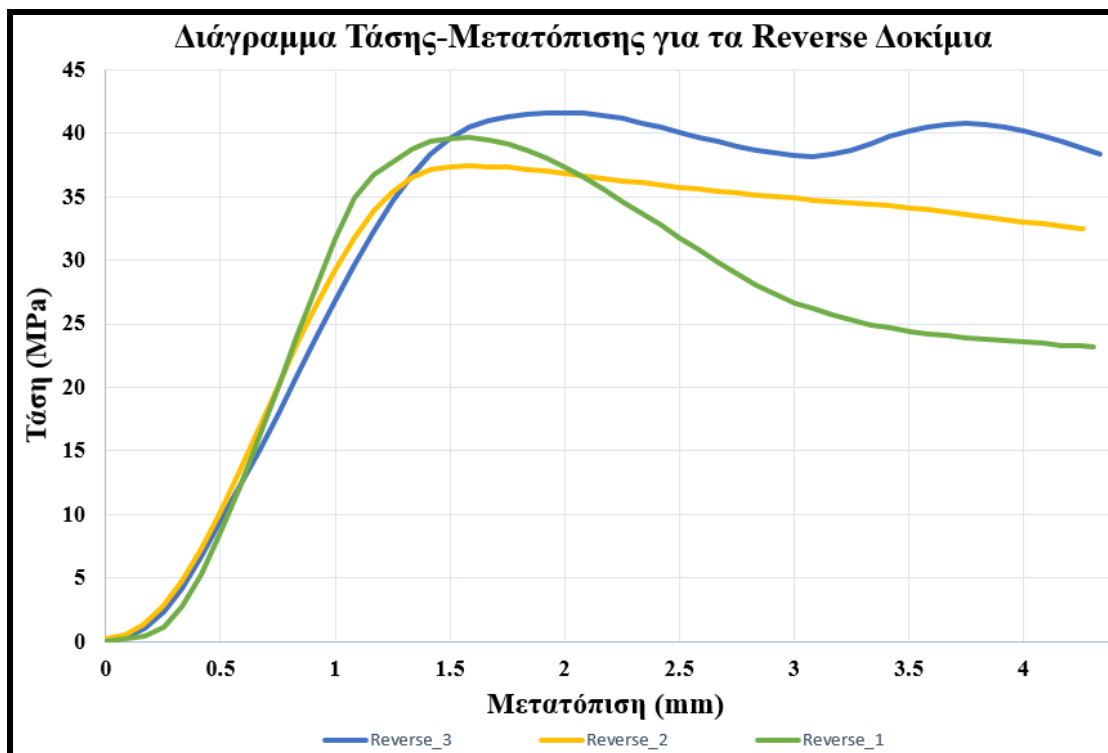
Διάγραμμα 4.2: Συνδυασμός παραμέτρων για την εκτύπωση των νέων G-κωδικών.



Εικόνα 4.50: Εκτύπωση του G-κώδικα στους 190 °C, πριν τη διαδικασία της θλίψης. α) Κατεύθυνση 45°, F1500 με 0% ισχύ του ανεμιστήρα, β) Κατεύθυνση 45°, F1500 με 100% ισχύ, γ) Κατεύθυνση 45°, F1800 με 0% ισχύ, δ) Κατεύθυνση 45°, F1800 με 100% ισχύ, ε) Κατεύθυνση 0°, F1500 με 0% ισχύ του ανεμιστήρα, στ) Κατεύθυνση 0°, F1500 με 100% ισχύ, ζ) Κατεύθυνση 0°, F1800 με 0% ισχύ, η) Κατεύθυνση 0°, F1800 με 100% ισχύ.

### 4.3.2 Αποτελέσματα θλίψης

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται αρχικά τα αποτελέσματα της θλίψης για τα Reverse δοκίμια και στη συνέχεια για τα δοκίμια που προέκυψαν από τη εκτύπωση του G-κώδικα που έχει γραφεί.



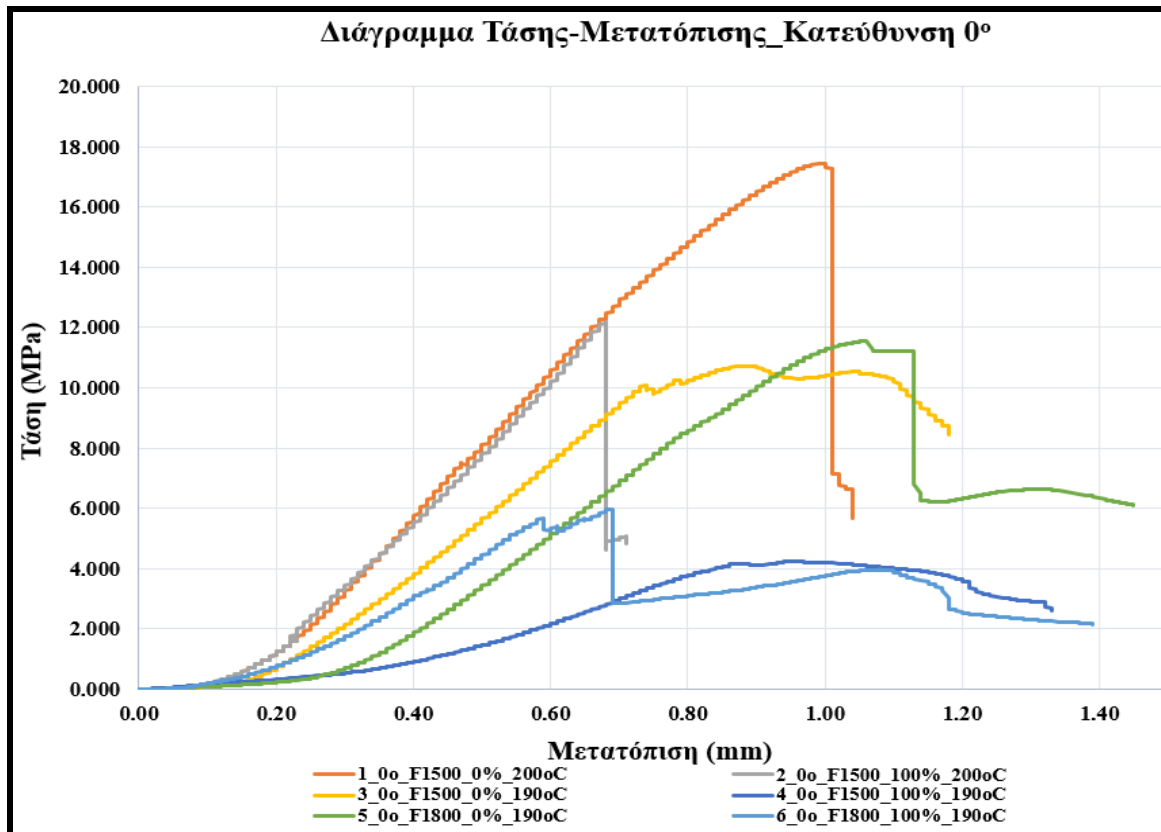
Διάγραμμα 4.3: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης για τα Reverse δοκίμια, μετά το πείραμα της θλίψης.

Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα θλίψης των Reverse δοκιμίων.

Αριθμός Δοκιμίου	Λειτουργία Ανεμιστήρα	Θερμοκρασία εκτύπωσης PLA/CarbonFil (°C)		Χρόνος Εκτύπωσης (ώρες)	Μέγιστη Αντοχή Θλίψης (MPa)
1	Ενεργός	205	215	3.10'	39.65
2	Ενεργός	205	215	3.10'	37.41
3	Ενεργός	205	215	3.10'	41.62

Στο παραπάνω διάγραμμα 4.3 αποτυπώνεται η αντοχή των δοκιμίων, τα οποία προέκυψαν μέσω της αντίστροφης μηχανικής του εμπορικού δείγματος Toray, στο πείραμα της θλίψης. Από τα αποτελέσματα διακρίνεται ότι υπάρχει σχετική σύγκλιση των τιμών της αντοχής σε θλίψη για τα τρία δοκίμια, με τη μέγιστη τιμή να εμφανίζεται στο Δοκίμιο 3, στα 41.62 MPa, το οποίο αντιστοιχεί στο κάτω μέρος του εμπορικού δείγματος, όπως παρουσιάστηκε στην εικόνα 4.5. Επιπλέον, στην περίπτωση του δοκιμίου 3 παρουσιάζεται ένα δευτερογενές μέτρο

ελαστικότητας, το οποίο αποδίδεται στο γεγονός ότι υπάρχουν δομές μέσα στον όγκο του υλικού που αντιστέκονται δευτερογενώς κατά την επιβολή του φορτίου. Παρατηρείται επίσης ότι η συμπεριφορά των δοκιμίων κατά τη θλίψη είναι παρόμοια και σταθερή και στα τρία δοκίμια, μέχρι το σημείο της τελικής τους παραμόρφωσης. Επιπλέον, παρατηρείται ότι η κατά μέσο όρο συμπίεση και των τριών δοκιμίων είναι κοντά στα 1.5 mm.



Διάγραμμα 4.4: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης για τους G-κώδικες, κατεύθυνσης 0°, μετά το πείραμα της θλίψης.

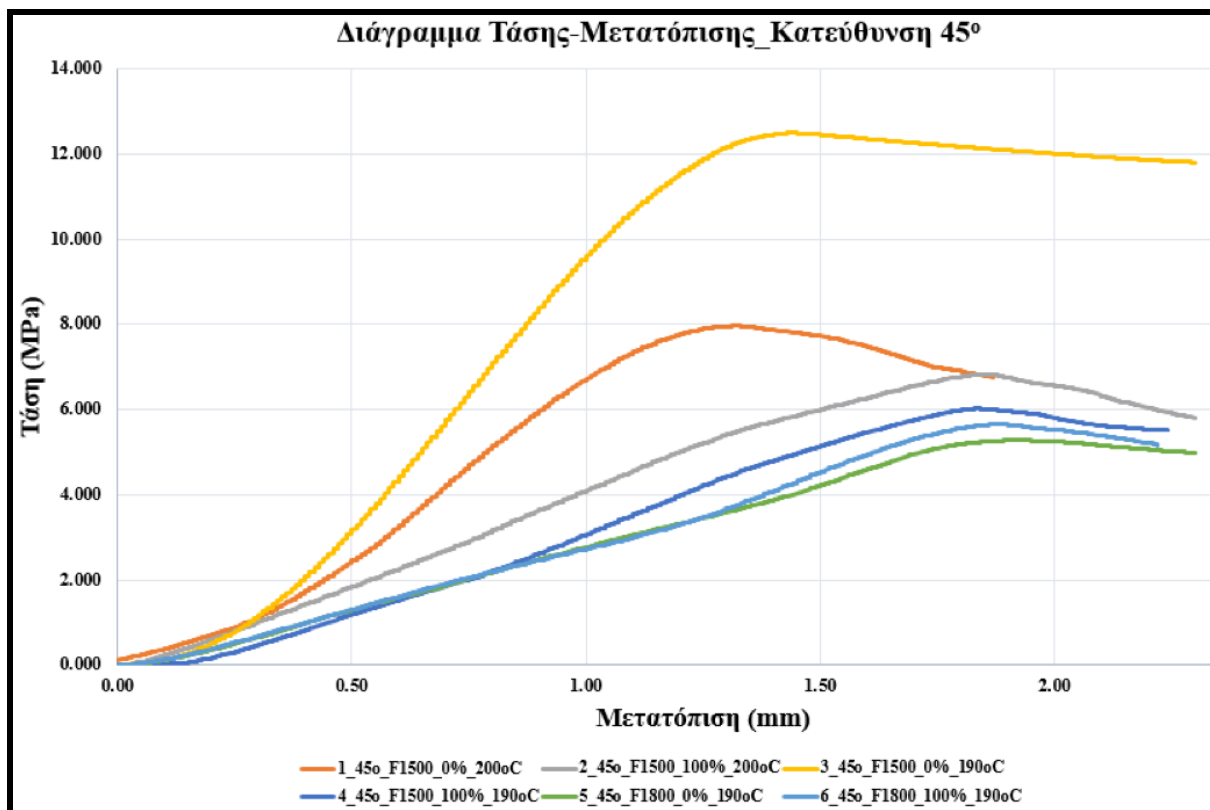
Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα θλίψης του G-κώδικα, για κατεύθυνση 0°, με διάφορες παραμέτρους εκτύπωσης.

Αριθμός Δοκιμίου	Ταχύτητα εκτύπωσης (mm/min)	% Ισχύς του ανεμιστήρα	Θερμοκρασία εκτύπωσης (°C)	Χρόνος Εκτύπωσης (ώρες)	Μέγιστη Αντοχή Θλίψης (MPa)
1	1500	0	200	02.14'	17.44
2	1500	100	200	02.14'	12.20
3	1500	0	190	02.14'	10.70
4	1500	100	190	02.14'	4.23
5	1800	0	190	02.10'	11.55
6	1800	100	190	02.10'	5.97

Στο παραπάνω διάγραμμα αποτυπώνεται η αντοχή των δοκιμίων, κατεύθυνσης 0°, στο πείραμα της θλίψης, ανά ζεύγη, με και χωρίς ανεμιστήρα. Παρατηρείται ότι στην περίπτωση των δοκιμίων, στη θερμοκρασία εκτύπωσης των 200 °C, παρουσιάζεται υψηλότερη αντοχή σε σχέση με τα δοκίμια, σε θερμοκρασία 190 °C. Αυτό οφείλεται στο ότι η υψηλότερη θερμοκρασία με την οποία εναποτίθεται το υλικό, τήκει τις υπάρχουσες στρώσεις και κατά συνέπεια δημιουργείται καλύτερη συνοχή μεταξύ των διαδοχικών στρώσεων. Παρόλα αυτά φαίνεται πως παρουσιάζουν ψαθυρή συμπεριφορά καθότι δεν έχουν καθόλου πλαστική παραμόρφωση μετά το σημείο της διαρροής και δε μεταφέρουν την τάση σε όλο τον όγκο του δοκιμίου. Εμφανής διαφορά στην αντοχή αποτυπώνεται με την παρουσία ή χωρίς του ανεμιστήρα κατά την εκτύπωση. Σε όλες τις περιπτώσεις στις οποίες ο ανεμιστήρας είναι ανενεργός φαίνεται να προσδίδει υψηλότερη αντοχή σε σχέση με το 100% της ισχύος του. Παρατηρείται από το διάγραμμα πως για ίδιες συνθήκες ταχύτητας και θερμοκρασίας εκτύπωσης, αλλά με διαφορετική ισχύ του ανεμιστήρα, παρόλο που παρουσιάζεται μια κοινή συμπεριφορά των δοκιμίων κατά τη θλίψη, είναι εμφανής η διαφοροποίηση των τιμών αντοχής τους. Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα αιτιολογείται καθώς με τη χρήση του ανεμιστήρα, κατά την εναπόθεση του υλικού πραγματοποιείται συρρίκνωση αυτού, με αποτέλεσμα το δέσιμο των στρώσεων μεταξύ τους να χαρακτηρίζεται ως αδύναμο.

Επιπρόσθετα, παρατηρείται ότι στην περίπτωση των 190 °C, οι μέγιστες τιμές θλίψης για 0% ισχύος ανεμιστήρα παρουσιάζουν σχεδόν τη διπλάσια τιμή αντοχής σε σύγκριση με το 100% της ισχύος του ανεμιστήρα. Όσον αφορά στην περίπτωση των 190 °C, τα αποτελέσματα των δοκιμίων 3, 5 καθώς και 4, 6 συγκλίνουν αρκετά μεταξύ τους. Το γεγονός αυτό δηλώνει πως η ταχύτητα εκτύπωσης επηρέασε σε πολύ μικρό ποσοστό τα αποτελέσματα της θλίψης, καθώς για ταχύτητα 1800 mm/min παρουσιάστηκε μια μικρή διαφορά αύξησης των τιμών αντοχής. Παρόλα αυτά, παρατηρείται πως με την αύξηση της ταχύτητας δεν παρουσιάζεται πλαστική περιοχή, αντιθέτως μετά το σημείο διαρροής το υλικό αστοχεί. Επιπλέον, στο δοκίμιο 3 παρατηρείται ότι ενώ συνολικά έχει χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας σε σύγκριση τα ψαθυρά δοκίμια, φαίνεται να μεταφέρει ικανοποιητικά την τάση στο συνολικό όγκο του δοκιμίου και να αστοχεί προοδευτικά, παρουσιάζοντας πλαστική παραμόρφωση. Τέλος, παρατηρείται ότι τα δοκίμια 2 και 5, παρόλο που εκτυπώθηκαν σε θερμοκρασίες 200 και 190 °C αντίστοιχα, παρουσιάζουν σχεδόν την ίδια τιμή αντοχής. Είναι εμφανές, από τα αποτελέσματα πως ο ρόλος του ανεμιστήρα είναι ιδιαίτερα σημαντικός στην τελική συμπεριφορά τους σε σύγκριση με τη θερμοκρασία εκτύπωσης.





Διάγραμμα 4.5: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης για τους G-κώδικες, κατεύθυνσης 45°, μετά το πείραμα της θλίψης.

Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα θλίψης του G-κώδικα, για κατεύθυνση 45°, με διάφορες παραμέτρους εκτύπωσης.

Αριθμός Δοκιμίου	Ταχύτητα εκτύπωσης (mm/min)	% Ισχύς του ανεμιστήρα	Θερμοκρασία εκτύπωσης (°C)	Χρόνος Εκτύπωσης (ώρες)	Τάση Διαρροής (MPa)
1	1500	0	200	02.19'	7.96
2	1500	100	200	02.19'	6.81
3	1500	0	190	02.19'	12.50
4	1500	100	190	02.19'	6.02
5	1800	0	190	02.16'	5.27
6	1800	100	190	02.16'	5.65

Στο διάγραμμα 4.5 διακρίνονται τα αποτελέσματα της αντοχής των δοκιμίων, κατεύθυνσης 45°, στο πείραμα της θλίψης. Από το διάγραμμα, παρατηρείται ότι η μέγιστη αντοχή ενάντια στην εφαρμογή της θλίψης παρουσιάζεται στο δοκίμιο 3, το οποίο εκτυπώθηκε με ταχύτητα 1500 mm/min, σε θερμοκρασία εκτύπωσης 190 °C, για 0% ισχύ του ανεμιστήρα. Η μέγιστη αντοχή του συγκεκριμένου δοκιμίου παρουσιάζει σχεδόν τη διπλάσια τιμή σε σύγκριση με τα

υπόλοιπα δοκίμια, με εξαίρεση το δοκίμιο 1, του οποίου η αντοχή ανέρχεται στα 7.96 MPa. Με εξαίρεση το δοκίμιο 3, όπως προσδιορίζεται από το διάγραμμα 4.3 παρατηρείται υψηλότερη αντοχή στα δοκίμια τα οποία εκτυπώθηκαν σε θερμοκρασία 200 °C σε σύγκριση με τα δοκίμια των 190 °C, όπως συνέβη και στην περίπτωση της κατεύθυνσης των 0°. Επιπλέον, η λειτουργία του ανεμιστήρα έπαιξε και σε αυτήν την περίπτωση μελέτης σημαντικό ρόλο ως προς τα τελικά αποτελέσματα, καθότι σε όλες τις περιπτώσεις, με εξαίρεση τα δοκίμια 5 και 6, παρατηρείται να προσδίδεται περισσότερη αντοχή στα δοκίμια όταν ο ανεμιστήρας είναι εκτός λειτουργίας. Επομένως συμπεραίνεται πως οι βέλτιστες συνθήκες εκτύπωσης για αυτήν την περίπτωση είναι αυτές που ορίστηκαν για την εκτύπωση του δοκιμίου 3. Τέλος, παρατηρείται ότι κανένα δοκίμιο δεν εμφάνισε ψαθυρή συμπεριφορά.

## 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

### Συμπεράσματα

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία έχει ως κύριο θέμα την αναπαράσταση της γεωμετρίας ενός εμπορικού δείγματος ινών άνθρακα, με δύο διαφορετικούς τρόπους προσέγγισης αυτής. Ο πρώτος αφορά στην απόκτηση εικονικών δεδομένων του δείγματος, μέσω της μεθόδου της αντίστροφης μηχανικής ενώ ο δεύτερος τρόπος αφορά στην προσέγγιση της γεωμετρίας των ινών, μέσω της σύνταξης του G-κώδικα. Και στις δύο μεθόδους, τα ψηφιακά μοντέλα που δημιουργούνται αποτυπώνονται, μέσω της 3-D εκτύπωσης, σε τριδιάστατη μορφή και τέλος τα δοκίμια που προκύπτουν αξιολογούνται ως προς την αντοχή τους, μέσω της μεθόδου της θλίψης. Επιπλέον, να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα της θλίψης των δοκιμίων δεν μπορούν να συγκριθούν με τις ονομαστικές τιμές του εμπορικού δείγματος, καθώς τα συγκεκριμένα δοκίμια κατασκευάστηκαν για ποιοτικούς σκοπούς αναπαράστασης δειγμάτων με ίνες άνθρακα.

### Reverse Δοκίμια

Στην πρώτη περίπτωση μελέτης της συγκεκριμένης εργασίας, διερευνήθηκε ο **τρόπος απόκτησης καθαρών ψηφιακών εικόνων** του εμπορικού δείγματος, μέσω της διαδικασίας της ψηφιακής σάρωσης στο μικροτομογράφο, μια μη καταστρεπτική μέθοδο. Η **επεξεργασία των ψηφιακών δεδομένων προς την απόκτηση καθαρών εικόνων των ινών** του δείγματος αποτέλεσε μια ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία καθότι το μέγεθος του δείγματος προς σάρωση ήταν σημαντικά μικρό. Το γεγονός αυτό περιόρισε την ανάκτηση λεπτομερών εικόνων της εσωτερικής δομής του δείγματος και αντ' αυτού πάρθηκαν εικόνες στις οποίες οι ίνες άνθρακα παρουσιάζονται είτε ως διάσπαρτα μικρά κυβάρια είτε ως μικρού μήκους ορθογώνια παραλληλεπίπεδα, χωρίς να προσδίδεται μια συνοχή στη γεωμετρία των ινών, ούτε να αποτυπώνεται το κυλινδρικό τους σχήμα. Περαιτέρω βελτιώσεις ως προς τις συνθήκες σάρωσης δεν επιχειρήθηκαν καθότι θα οδηγούσαν στη συσσώρευση μεγάλου όγκου δεδομένων, με αποτέλεσμα η επεξεργασία των εικονικών φετών να καθίσταται αδύνατη.

Αρκετές προσπάθειες για την ανάκτηση καθαρών εικόνων πραγματοποιήθηκαν τόσο στα πρώτα στάδια της επεξεργασίας των εικονικών φετών στο πρόγραμμα NRecon όσο και μετέπειτα, πριν από τη δημιουργία των αρχείων STL στις τρεις ξεχωριστές περιοχές του δείγματος, στο πρόγραμμα CTAn. Ωστόσο, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ινών παρέμεναν αλλοιωμένα και διάσπαρτα, καθιστώντας μη εφικτή την εξαγωγή αρχείων τύπου STL προς το επόμενο στάδιο, αυτό της τριδιάστατης εκτύπωσης. Το συγκεκριμένο πρόβλημα

αντιμετωπίστηκε με **την παρέμβαση του σχεδιαστικού λογισμικού SolidWorks**. Μέσω αυτού του λογισμικού, δόθηκε η δυνατότητα **σχεδίασης των ινών εκ νέου**, έχοντας ως βάση τα διάσπαρτα τμήματα των ινών. Διαβάζοντας την πιθανή διαδρομή των ινών, που ακολουθούν μέσα στον χώρο, σχεδιάστηκαν οι αντίστοιχες καμπύλες πάνω στις διαδρομές και τέλος δόθηκε ο απαραίτητος όγκος σε αυτές. Κατά αυτόν τον τρόπο, **δόθηκε μορφή στις ίνες που σαρώθηκαν και ακολούθησε ο σχηματισμός του κελύφους, που αναπαριστά την εποξειδική ρητίνη ανάμεσα στις ίνες**.

Παρόλο που με τη συγκεκριμένη διαδικασία, δόθηκε λύση στο πρόβλημα της αναπαράστασης των ινών, αποτέλεσε ωστόσο μια ιδιαίτερα χρονοβόρα και πολύπλοκη μέθοδο προσέγγισης. Χρονοβόρα μέθοδος καθώς έπρεπε μέσα σε έναν χώρο αρκετών σαρωμένων ινών, να σχεδιαστούν μία προς μία όλες οι ίνες και πολύπλοκη διότι η ένωση των διάσπαρτων σημείων έγινε σε μεγάλο βαθμό κατά προσέγγιση, με μικρή πιθανότητα εσφαλμένης αποτύπωσης της δομής των ινών σε σύγκριση με το εμπορικό δείγμα. Στη συνέχεια, ακολούθησε η **εκτύπωση των ψηφιακών μοντέλων των ινών, με διπλή κεφαλή και τέλος, η αξιολόγηση της αντοχής τους μέσω της διαδικασίας της θλίψης**. Τα δοκίμια δεν εκτυπώθηκαν στο ίδιο μέγεθος με τους G-κώδικες διότι αν εκτυπώνονταν σε διαστάσεις  $2 \cdot 2 \cdot 2 \text{ cm}^3$  θα υπήρχε πρόβλημα κατά την εναλλαγή των κεφαλών εκτύπωσης, όπως μεταφορά υλικού μεταξύ τους καθώς και μειωμένη εκτυπωτική απόδοση, λόγω μικρού μεγέθους. Η εκτύπωσή τους σε μεγαλύτερο μέγεθος θα οδηγούσε σε περισσότερο χρόνο εκτύπωσης όπως επίσης και σε ποσότητα υλικού. Συνεπώς, επιλέχθηκε ως βέλτιστο μέγεθος το  $3 \cdot 3 \cdot 3 \text{ cm}^3$ . Και στα τρία reverse δοκίμια, μετά το πέρας της θλίψης παρατηρήθηκε τμηματική αποκόλληση των ινών CarbonFil με το πληρωτικό υλικό PLA καθώς και μόνιμη παραμόρφωση (συμπίεση) αυτών. Το θετικό των αποτελεσμάτων είναι ότι εμφάνισαν κοινή συμπεριφορά κατά τη διάρκεια της θλίψης μέχρι το σημείο διαρροής, γεγονός που δηλώνει τη συνάφεια της γεωμετρικής τους υπόστασης μεταξύ των reverse δοκιμίων και κατ' επέκταση τη σωστή προσέγγιση της γεωμετρίας των εμπορικών ινών, κατά την επεξεργασία τους στο λογισμικό SolidWorks.

### **G-Κώδικες**

Στη δεύτερη φάση της μεταπτυχιακής εργασίας επιχειρήθηκε η **προσέγγιση της γεωμετρίας των εμπορικών ινών μέσω της σύνταξης του G-κώδικα**. Για την κατανόηση της δομής και της φιλοσοφίας του G-κώδικα προς το στάδιο της σύνταξής του ήταν απαραίτητη η μελέτη άλλων G-κωδικών, για δομές απλούστερης γεωμετρίας, σε slicer λογισμικά τα οποία «διαβάζοντας» τη γεωμετρία του οποιουδήποτε μοντέλου εξάγουν αυτόματα τον αντίστοιχο κώδικα.

Στην παρούσα εργασία, κώδικας γράφτηκε τόσο για τη **δομή των 0°, που αναπαριστούν τις ίνες του εμπορικού δείγματος, όσο και των 45° της κατεύθυνσης των ινών**. Και οι δύο διαφορετικές διευθύνσεις χαρακτηρίζονται από μία πυκνή δομή, η οποία αναπαριστά τις ίνες και από μία αραιή η οποία αναπαριστά το πληρωτικό τους υλικό. Πριν την ολοκλήρωση της σύνταξης του τελικού κώδικα για την εκτύπωση των τελικών δοκιμίων προς θλίψη και για τις δύο δομές, πραγματοποιήθηκαν αρκετά πειράματα. Αρχικά, έπρεπε να επιλεγεί το επιθυμητό μέγεθος της διατομής της ίνας που θα εξάγεται και θα εναποτίθεται πάνω σε κάθε νέα στρώση. Με βάση αυτό το κριτήριο, **καθορίστηκαν οι αποστάσεις μεταξύ των ινών** καθώς και το ύψος της κάθε στρώσης. Με τον ορισμό της τροχιάς, το επόμενο στάδιο προς την ολοκλήρωση του κώδικα ήταν η συμπλήρωση των στοιχείων της **ταχύτητας εκτύπωσης, της ποσότητας του υλικού που θα εξάγεται κατά την τροχιά του, της θερμοκρασίας εκτύπωσης του υλικού όπως επίσης και της λειτουργίας του ανεμιστήρα ψύξης του εκτυπωτή**.

Μέσα από τους πρώτους δοκιμαστικούς κώδικες που εκτυπώθηκαν και για τις δύο κατευθύνσεις, εκτιμήθηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων σε σχέση με την τροχιά που τους δόθηκε, τόσο μέσω της ψηφιακής σάρωσης αυτών όσο και μέσω της μελέτης τους στο οπτικό μικροσκόπιο. Παρατηρήθηκαν αρκετές αποκλίσεις σε σχέση με την αρχική δοθείσα γεωμετρία με αποτέλεσμα να χρειαστεί αραίωση των αποστάσεων μεταξύ των ινών της πυκνής δομής, αλλαγή ταχύτητας της εκτύπωσης του κελύφους καθώς και αλλαγή της γεωμετρίας της δομής του Raft, διότι κατά την αποκόλληση της τελευταίας δομής από το συνολικό δοκίμιο αφαιρούνταν ταυτόχρονα μέρος των αρχικών στρώσεων αυτού. Μέσα από πολλές δοκιμές αναζήτησης ιδανικών συνθηκών εκτύπωσης των κωδικών, επιλέχθηκαν οι κατάλληλες παράμετροι, προκειμένου να εκτυπωθούν οι πρώτοι κώδικες οι οποίοι προορίζονταν για το πείραμα της θλίψης.

Οι πρώτοι κώδικες που εκτυπώθηκαν προκειμένου να εκτιμηθεί η αντοχή τους στη θλίψη αφορούσαν και στις δύο κατευθύνσεις, για διαστάσεις  $2 \cdot 2 \cdot 2 \text{ cm}^3$ , ταχύτητα εκτύπωσης 1500 mm/min, με ή χωρίς ανεμιστήρα, στους 200 °C. Από τα αποτελέσματα της θλίψης, φάνηκε να υπάρχει **αποκόλληση στα κελύφη και στις πρώτες στρώσεις του πλέγματος των δοκιμίων**. Θεωρήθηκε δόκιμο συνεπώς, οι υπόλοιποι κώδικες, για τις ίδιες διαστάσεις, να εκτυπωθούν σε χαμηλότερη θερμοκρασία, διατηρώντας σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους εκτύπωσης, προκειμένου να διαπιστωθεί κατά πόσο η μείωση της θερμοκρασίας θα βελτιώσει τη ροή του υλικού και κατ' επέκταση τη συνεκτικότητα των στρώσεων και την αντοχή των δοκιμίων. Τα υπόλοιπα δοκίμια τα οποία εκτυπώθηκαν σε θερμοκρασία 190 °C, παρόλο που εμφάνισαν πολύ μικρότερη αντοχή σε σχέση με αυτά των 200 °C, με μια εξαίρεση το δοκίμιο 3 των 45° στους

190 °C, παραμορφώθηκαν ελαστικά κατά το πείραμα, αντίθετα κατά την αποφόρτισή τους επανέρχονταν στην αρχική τους θέση.

Από τα αποτελέσματα της θλίψης, παρόλο που τα δοκίμια των 200 °C παρουσίαζαν μόνιμη παραμόρφωση, σε αντίθεση με αυτά των 190 °C, εμφάνιζαν υψηλότερη αντοχή. Μεγάλη **διαφορά της επίδρασης της θερμοκρασίας** εντοπίστηκε στην κατηγορία των 0°, στους 200 °C για 0% ισχύ, με αντοχή στη θλίψη σχεδόν τη διπλάσια και παραπάνω από τα υπόλοιπα δοκίμια. Επιπλέον, παρατηρείται ότι για τις συγκεκριμένες παραμέτρους στις οποίες τέθηκαν οι κώδικες να εκτυπωθούν, **τα αποτελέσματα της θλίψης παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις με την παρουσία ή χωρίς του ανεμιστήρα**. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι και οι δύο περιπτώσεις της κατάστασης του ανεμιστήρα αφορούν ακραίες περιπτώσεις της λειτουργίας του. Επιπρόσθετα, **η παράμετρος της ταχύτητας φαίνεται να μην επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα, σε συνδυασμό με τις υπόλοιπες παραμέτρους**. Ενδεχομένως, τα αποτελέσματα να παρουσίαζαν μεγάλη διαφορά σε σύγκριση με αυτά που προέκυψαν, στην περίπτωση όπου τα δοκίμια δοκιμάζονταν σε θλίψη δίχως τη δομή του κελύφους, παρά μόνο θλίβοντας το εσωτερικό του, δηλαδή το πλέγμα το οποίο αποτελείται από τη δομή των ινών και του πληρωτικού υλικού.

## **Προτάσεις για μελλοντική έρευνα**

Στα πλαίσια της μελλοντικής έρευνας και περαιτέρω εξέλιξης της συγκεκριμένης εργασίας προτείνεται, όσον αφορά στην περίπτωση των Reverse δοκιμίων, όλες οι παράμετροι κατά το στάδιο της σάρωσης να τεθούν στις όσο το δυνατόν βέλτιστες τιμές τους, προκειμένου να προσδώσουν κατά το μέγιστο ποσοστό την πραγματική εικόνα της δομής του δείγματος, σε 3-D ψηφιοποιημένη εικόνα. Για παράδειγμα, το εμπορικό δείγμα να τοποθετηθεί σε όσο το δυνατόν πιο κοντινή απόσταση από την πηγή για πλήρη περιστροφή 360° σάρωσης, σε αντίθεση με την περιστροφή των 180° του δείγματος, όπως εφαρμόστηκε. Επιπλέον, λόγω του μεγάλου όγκου δεδομένων που θα προκύψει, προτείνεται η επεξεργασία των αποτελεσμάτων να πραγματοποιηθεί σε έναν υπολογιστή μεγαλύτερης ισχύος, με περισσότερους πυρήνες και μεγαλύτερη μνήμη Ram. Κατά αυτόν τον τρόπο είναι πιθανό, τα αρχεία STL που θα προκύπτουν από το λογισμικό CTAn να μη χρειάζονται περαιτέρω επεξεργασία προκειμένου να είναι έτοιμα για το στάδιο της 3-D εκτύπωσης. Ένας άλλος τρόπος προσέγγισης των ινών, μετά το στάδιο της σάρωσης, σε περίπτωση όπου τα αποτελέσματα των εικόνων των ινών εμφανίζονται αλλοιωμένα, όπως παρουσιάστηκαν στην εικόνα 4.11, είναι η δημιουργία κώδικα. Η λογική του κώδικα θα είναι να μπορεί να αναγνωρίζει τα κέντρα των ευθύγραμμων τμημάτων που αναπαριστούν τις ίνες, στην αρχή και στο πέρας του κάθε τμήματος,

παραλείποντας το στάδιο της χειροκίνητης δημιουργίας των ινών, όπως πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό SolidWorks. Επιπλέον, θα ήταν χρήσιμο να εκτυπωθούν περισσότερες περιοχές του δείγματος για να υπάρξει μια πιο ολοκληρωμένη εκτίμηση της συμπεριφοράς των δοκιμίων στο πείραμα της θλίψης.

Όσον αφορά στην περίπτωση του G-κώδικα, προκειμένου να διαπιστωθεί κατά πόσο οι ίνες της κάθε κατεύθυνσης αντέχουν στο πείραμα της θλίψης, θα μπορούσε το κέλυφος του κάθε δοκιμίου να κοπεί με laser, ούτως ώστε το μόνο τμήμα που θα εξεταστεί να είναι αυτό του πλέγματος. Επίσης, θα μπορούσε να αλλάξει η δομή του πλέγματος και να αποτελείται μόνο από τις ίνες της κατεύθυνσης  $0^\circ$  ή των  $45^\circ$ , χωρίς την αραιή δομή που αναπαριστούσε το υπόστρωμα. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, θα πρέπει η εναπόθεση της ίνας σε κάθε νέα στώση να γίνεται με τέτοιο τρόπο προκειμένου να διατηρείται η γεωμετρία της κυκλικής διατομής της, αποφεύγοντας την πιθανή συμπίεση μεταξύ τους, η οποία μπορεί να επιφέρει αλλοίωση της τελικής επιθυμητής δομής. Δηλαδή να δημιουργηθεί μία δομή που θα αποτελείται από ίνες της ίδιας κατεύθυνσης, οι οποίες θα ακουμπάνε οριακά μεταξύ τους, μια δομή παρόμοια με αυτή του εμπορικού δείγματος. Μια επιπρόσθετη αλλαγή που θα μπορούσε να βελτιώσει τα αποτελέσματα του πειράματος της θλίψης στα δοκίμα των G-κωδικών είναι η εκτύπωσή τους με το ίδιο υλικό που χρησιμοποιήθηκε για να εκτυπωθούν οι ίνες των Reverse δοκιμίων, με CarbonFil. Μια επιπλέον πρόταση, που θα μπορούσε να συμβάλει στην εγκυρότητα των αποτελεσμάτων της θλίψης των συγκεκριμένων δοκιμίων θα ήταν η εκτύπωση αυτών, τουλάχιστον από δύο φορές και πάνω, διατηρώντας σταθερές τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν. Ταυτόχρονα, οι G-κώδικες μπορούν να εκτυπωθούν σε θερμοκρασίες ενδιάμεσες των  $190$  και  $200$  °C καθώς και λίγο παραπάνω, για περισσότερα ποσοστά της ισχύος του ανεμιστήρα, για να διερευνηθεί η αλληλεπίδραση αυτών των δύο παραμέτρων και να διαπιστωθεί ο βέλτιστος συνδυασμός που θα προσδίδει τη μέγιστη αντοχή. Τέλος, η επιλογή ακροφυσίου μικρότερης διαμέτρου θα συντελούσε στην απόδοση πιο ακριβούς γεωμετρίας της ίνας, σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά που δίνονται στον κώδικα και κατά συνέπεια καλύτερη συνοχή μεταξύ των ινών, με ευδιάκριτη γεωμετρία.

## 6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Kumar, A.; Jain, P. K. and Pathak, P. M.: *Chapter 39 in DAAAM International Scientific Book, Reverse Engineering in Product Manufacturing: An Overview*. (2013), Vol. **12**, pp 665.
- [2] Bhatti, A.; Syed, N. A. and John, P. *Chapter 5 - Reverse Engineering and Its Applications A2 - Barh, Debmalya. In Omics Technologies and Bio-Engineering*, Azevedo, V., (ed.) Academic Press (2018), pp 95.
- [3] Tamarez-Gomez, F. *A reverse engineering process for mechanical engineering systems. Thesis*. Rochester Institute of Technology (2007).
- [4] Raja, V. *Introduction to Reverse Engineering. In: Raja V., Fernandes K. (eds) Reverse Engineering*. Springer Series in Advanced Manufacturing. Springer, London. (2008), pp. 1–9.
- [5] Várady, T.; Martin, R. R and Cox, J. *Reverse engineering geometric models. An introduction. Computer-Aided Design* **29**, 255–268 (1997).
- [6] Fondevilla, A.; Bousseau, A.; Rohmer, D.; Hahmann, S. and Cani, M. P. *Patterns from photograph: Reverse-engineering developable products. Comput. Graph.* **66**, 4–13 (2017).
- [7] Zhou, M. *A new approach of composite surface reconstruction based on reverse engineering. Procedia Eng.* **23**, 594–599 (2011).
- [8] Dehaghi, M. R. and Goodarzi, M. *Reverse Engineering: A Way of Technology Transfer in Developing Countries like Iran. International Journal of e-Education, e-Business, e-Management and e-Learning* **1**, 347–353 (2011).
- [9] Wang, W. *Reverse engineering: technology of reinvention* 2010, CRS Press.
- [10] Chung, S.-Y.; Han, T.-S.; Kim, S.-Y.; Jay Kim, J.-H.; Youm, K.-S. and Lim, J.-H. *Evaluation of effect of glass beads on thermal conductivity of insulating concrete using micro CT images and probability functions. Cem. Concr. Compos.* **65**, 150–162 (2016).
- [11] Bruker-Micro-CT, C. *SkyScan 1272 User Manual V1.1 12/2013* 0. 1–89 (2013).
- [12] Hounsfield G. N. *Computerized transverse axial scanning (tomography) 1. Description of system. Br. J. Radiol.* **46**, 1016–1022 (1973).
- [13] Baird, E. and Taylor, G. *X-ray micro computed-tomography. Curr. Biol.* **27**, R289–R291 (2017).
- [14] Engelke, K.; Karolczak, M.; Lutz, A.; Seibert, U.; Schaller, S. and Kalender, W. *Micro-CT. Technology and application for assessing bone structure. Der Radiologe* **39**, 203–212 (1999).
- [15] Stock, S. R.; Nagaraja, S.; Barss, J.; Dahl, T. and Veis, A. *X-ray microCT study of pyramids of the sea urchin *Lytechinus variegatus*. J. Struct. Biol.* **141**, 9–21 (2003).



- [16] Dinley, J.; Hawkins, L.; Paterson, G.; Ball, A. D.; Sinclair, I.; Sinnett-Jones, P. and Lanham, S. *Micro-computed X-ray tomography: a new non-destructive method of assessing sectional, fly-through and 3D imaging of a soft-bodied marine worm. Journal of Microscopy* **238**, 123–133 (2010).
- [17] Schulz-Mirbach, T.; Heß, M.; Metscher, B. D. and Ladich, F. *A unique swim bladder-inner ear connection in a teleost fish revealed by a combined high-resolution microtomographic and three-dimensional histological study. BMC Biol.* **11**, 1–13 (2013).
- [18] Sutton, M. D. *Tomographic techniques for the study of exceptionally preserved fossils. Proc. Biol. Sci.* **275**, 1587–1593 (2008).
- [19] Ketcham, R. A. and Carlson, W. D. *Acquisition, optimization and interpretation of x-ray computed tomographic imagery: Applications to the geosciences. Comput. Geosci.* **27**, 381–400 (2001).
- [20] Wildenschild, D.; Hopmans, J. W.; Vaz, C. M. P.; Rivers, M. L.; Rikard, D. and Christensen, B. S. B. *Using X-ray computed tomography in hydrology: systems, resolutions, and limitations. (Special Issue: Non-invasive methods in hydrology). J. Hydrol.* **267**, 285–297 (2002).
- [21] Cnudde, V.; Masschaele, B.; De Cock H. E. V.; Olstad, K.; Vlamincx, L.; Vlassenbroeck, J.; Dierick, M.; Witte, Y. D.; Van Hoorebeke, L. and Jacobs, P. *Virtual histology by means of high-resolution X-ray CT. J. Microsc.* **232**, 476–485 (2008).
- [22] Tondi, G.; Blacher, S.; Léonard, A.; Pizzi, A.; Fierro, V.; Leban, J.M.; and Celzard, A. *X-Ray Microtomography Studies of Tannin-Derived Organic and Carbon Foams. Microsc. Microanal.* **15**, 384–394 (2009).
- [23] Bale, H.; Blacklock, M.; Begley, M. R.; Marshall, D. B.; Cox, B. N. and Ritchie, R. O. *Characterizing three-dimensional textile ceramic composites using synchrotron x-ray micro-computed-tomography. J. Am. Ceram. Soc.* **95**, 392–402 (2012).
- [24] Steppe, K.; Cnudde, V.; Girard, C.; Lemeur, R.; Cnudde, J. P. and Jacobs, P. *Use of X-ray computed microtomography for non-invasive determination of wood anatomical characteristics. J. Struct. Biol.* **148**, 11–21 (2004).
- [25] Baluška, F.; Barlow, P. W.; Baskin, T. I.; Chen, R.; Feldman, L.; Forde, B. G.; Geisler, M.; Jernstedt, J.; Menzel, D.; Muday, G. K.; Murphy, A.; Šamaj, J. and Volkmann, D. *What is apical and what is basal in plant root development? Trends Plant Sci.* **10**, 409–411 (2005).
- [26] Ou, X.; Zhang, X.; Lowe, T.; Blanc, R.; Rad, M. N.; Wang, Y.; Batail, N.; Pham, C.; Shokri, N.; Garforth, A.; Withers, P. and Fan, X. *X-ray micro computed tomography characterization of cellular SiC foams for their applications in chemical engineering. Mater. Charact.* **123**, 20–28 (2017).
- [27] Robb, R. A. *X-ray computed tomography: from basic principles to applications. Ann. Rev. Biophys. Bioeng.* **11**, 177–201 (1982).

- [28] Babout, L. *X-Ray tomography imaging: a necessary tool for materials science. Automatyka* **10**, 117–124 (2006).
- [29] Dului, O. G. *Computer axial tomography in geosciences: an overview. Earth-Sci. Rev.* **48**, 265–281 (1999).
- [30] Kak, A. C. and Slaney, M. *Principles of Computerized Tomographic Imaging*. New York: IEEE Press; (1988).
- [31] Singhal, A.; Grande, J. C. and Zhou, Y. *Micro/nano CT for visualization of internal structures. Microscopy Today* **21**, 16–22 (2013).
- [32] Davis G. R. and Elliott J. C. *High definition X-ray microtomography using a conventional impact X-ray source. J. Phys. IV France* **104**, 131–134 (2003).
- [33] Scarfe, W. C. and Farman, A. G. *What is Cone-Beam CT and How Does it Work? Dental Clinics of North America* **52**, 707–730 (2008).
- [34] CT Basics — Micro CT. [www.biotech.cornell.edu/sites/default/files/upload/](http://www.biotech.cornell.edu/sites/default/files/upload/)
- [35] Wan, Y.; Straumit, I., Takahashi, J. and Lomov, S. *Micro-CT analysis of internal geometry of chopped carbon fiber tapes reinforced thermoplastics. Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* **91**, 211–221 (2016).
- [36] Du Plessis, A.; Broeckhoven, C.; Guelpa, A. and Le Roux, S. G. *Laboratory x-ray micro-computed tomography: a user guideline for biological samples. GigaScience* **6**, 1–11 (2017).
- [37] Hu, Q. *X-Ray Physics with emphasis on attenuation of X-rays in matter* 4–7 (2005).
- [38] Stauber, M. and Müller, R. *Micro-computed tomography: a method for the non-destructive evaluation of the three-dimensional structure of biological specimens. Methods Mol Biol.* **455**, 273–292 (2008).
- [39] Skyscan NRecon User Manual. Bruker microCT (2011).
- [40] Latief, F. D. E.; Mohammad, I. H. and Rarasati, A. D. *Digital 3D microstructure analysis of concrete using X-Ray micro computed tomography SkyScan 1173: A Preliminary Study. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **267**, (2017).
- [41] Feldkamp, L. A.; Davis, L. C. and Kress J. W. *Practical cone-beam algorithm. J. Opt. Soc. Am.* **1**, 612–9 (1984).
- [42] Evans, N. J.; McInnes, B. I. A.; Squelch, A. P.; Austin, P. J.; McDonald, B. J. and Wu, Q. *Application of X-ray micro-computed tomography in (U–Th)/He thermochronology. Chemical Geology* **257**, 101–113 (2008).
- [43] Davis, G. R. and Elliott, J. C. *Artefacts in X-ray microtomography of materials. Mater. Sci. Technol.* **22**, 1011–1018 (2006).
- [44] Yan, C. H.; Whalen, R. T.; Beaupré, G. S.; Yen, S. Y. and Napel, S. *Reconstruction algorithm for polychromatic CT imaging: application to beam hardening correction. IEEE Trans Med Imaging* **19**, 1–11 (2000).

- [45] Herman, G. T. *Correction for beam hardening in computed tomography*. *Phys. Med. Biology* **24**, 81–106 (1979).
- [46] Ter-Pogossian, M. M.; Phelps, M. E.; Hoffman, E. J. and Mullani, N. A. *A positron-emission transaxial tomograph for nuclear imaging (PETT)* *Radiology* **114**, 89–98 (1975).
- [47] Kinney, J. H., Johnson, Q. C.; Nichols, M. C.; Bonse, U.; R. A. Saroyan, Nusshardt, R. and Pahl, R. *X-ray microtomography on beamline X at SSRL*. *Review of Scientific Instruments* **60**, 2471–2474 (1989).
- [48] Hiriyannaiah, H. P. *X-ray computed tomography for medical imaging*. *IEEE Signal Processing Magazine* **14**, 42–59 (1997).
- [49] Sijbers, J. and Postnov, A. *Reduction of ring artifacts in high resolution micro-CT reconstructions*. *Phys. Med. Biol.* **49**, 247–253 (2004).
- [50] Zagorchev, L., Oses, P.; Zhuang, Z. W.; Moodie, K.; Mulligan-Kehoe, M. J.; Michael Simons, M. and Couffinha, T. *Micro computed tomography for vascular exploration*. *J. Angiogenesis Res.* **2**, 1–7. (2010).
- [51] Gregor, T.; Kočhová, P.; Eberlová, L.; Nedorost, L.; Prosecká, E.; Liška, V.; Mírka, H.; Kachlík, D.; Pirner, I.; Zimmermann, P.; Králíčková, A.; Králíčková, M. and Tonar, Z. *Correlating micro-CT imaging with quantitative histology*. *Inj. Skelet. Biomech.* 173–196 (2012).
- [52] Sarkar, P. S.; Ray, N. K.; Pal, M. K.; Ravi Baribaddala, R.; Agrawal, A.; Kashyap, Y.; A. Sinha, A. and Gadkari, S. C. *Development of X-ray CCD camera based X-ray micro-CT system*. *Review of Scientific Instruments* **88**, 023702 (2017).
- [53] Ren, L.; Ghani, M. U.; Wu, D.; Zheng, B.; Chen, Y.; Yang, K.; Wu, X. and Liu, H. *The impact of spectral filtration on image quality in micro-CT system*. *J. Appl. Clin. Med. Phys.* **17**, 301–315 (2016).
- [54] Chua, C. K. and Leong, K. F. *3D printing and additive manufacturing: principles and applications*. Kindle Edition (2017).
- [55] Wohlers, T. and Gornet, T. *History of Additive Manufacturing*. *Wohlers Report 2014* 1–34 (2014).
- [56] Jacobs, P. *Stereolithography 1993: epoxy resins, improved accuracy, and investment casting*. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* **2102**, 41–52 (1994).
- [57] Hiemenz, J. *Additive Manufacturing Trends in Aerospace*. *Addit. Manuf.* **6** (2013).
- [58] Baharuddin, A. S.; Baharuddin, A. S.; Wan Harun, M. A.; Ruskam, A. and Yacob, A. R. *Three-Dimensional (3D) bioprinting of human organs in realizing Maqasid Al-Shariah* **4**, 27–42 (2014).

- [59] Hodgson, G. *A history of RepRap development: posts from the RepRap development blog* (2016).
- [60] Dababneh, A. B. and Ozbolat, I. T. *Bioprinting Technology: A Current State-of-the-Art Review. J. Manuf. Sci. Eng.* **136**, 061016 (2014).
- [61] Winnan, C. D. *3D Printers - The Next Technology Goldrush - Future Factories and How to Capitalize on Distributed Manufacturing* 291 (2012).
- [62] Stratatsys. *3D Printers* **100** (2014).
- [63] Cooper, K. G. *Rapid Prototyping Technology: Selection and Application*. Kindle Edition (2001).
- [64] Mommaerts, M. Y. *Additively manufactured sub-periosteal jaw implants. Intern. J. Oral Maxillofacial Surg.* **46**, 938–940 (2017).
- [65] Bryans, D. L. *Unlocked and Loaded: Government Censorship of 3D-Printed Firearms and a Proposal for More Reasonable Regulation of 3D-Printed Goods. Indiana Law J.* **90**, 901–934 (2015).
- [66] National Research Council *3D Printing in Space* (2014). Washington, DC: The National Academies Press. 106.
- [67] Da Silva, L. F. M. Editor, *Materials Design and Applications* (2017).
- [68] *Nanodimensions, Dragonfly 2020 pro 3D printer for professional electronics.* [www.nano-di.com](http://www.nano-di.com)
- [69] Al-Maliki, J. Q. and Al-Maliki, A. J. Q. *The Processes and Technologies of 3D Printing, Inter. J. Adv. Comp. Sci. Technology* **4**, 161–165 (2015).
- [70] Ramya, A. and Vanapalli S. L. *3D Printing Technologies in Various Applications. Inter. J. Mech. Eng. Technology (IJMET)* **7**, 396–409 (2016).
- [71] Umetani, N., Bickel, B. and Matusik, W. *Computational Tools for 3D Printing.* [www.computational-fabrication.com](http://www.computational-fabrication.com)
- [72] Wong, K. V. and Hernandez, A. *A Review of Additive Manufacturing. ISRN Mech. Eng.* **2012**, 1–10 (2012).
- [73] Balletti, C.; Ballarin, M. and Guerra, F. *3D printing: State of the art and future perspectives. J. Cult. Herit.* **26**, 172–182 (2017).
- [74] Duda, T. and Raghavan, L. V. *3D Metal Printing Technology. IFAC-PapersOnLine* **49**, 103–110 (2016).
- [75] Heij, W. J. *Feed velocity feedback for high speed fused deposition modelling machines. Master Thesis.* Dept Biomechanical Engineering, Delft University (2016).
- [76] Γιαννατσής, Ι.; Δεδούσης Β. και Καννελίδης, Β. Σύγχρονες Τεχνολογίες Κατασκευής με τη βοήθεια Η/Υ (2015).
- [77] Yves Saint Laurent, M. A. *Fused Deposition Modelling 3D. 3D Print.* 1–23

- [78] Schmitt, B. M.; Zirbesa, C. F.; Bonina, C.; Lohmannb, D.; Lencinaa, D. C. and Nettoa, A. C. S. *A Comparative Study of Cartesian and Delta 3D Printers on Producing PLA Parts. Mater. Res.* **20**, 883–886 (2017).
- [79] Bell, C. *3D Printing with Delta Printers*. New York: APRESS; p. 268 (2015).
- [80] Josh, C. *How to Build a 3D Printer: Getting Started Guide and Tips*. 26 February (2016). <http://www.3dprinterprices.net/how-to-build-a-3d-printer-getting-started-guide-tips/>.
- [81] Earl, B. *What is a Stepper Motor?* 23 November (2015). <https://learn.adafruit.com/all-about-stepper-motors/what-is-a-stepper-motor>.
- [82] Hausman, K. K. and Horne, R. *How to Use Motor-Driver Modules on your RepRap 3D Printer*. n.d. 22 April (2017). <http://www.dummies.com/computers/pcs/printers/how-to-use-motor-driver-modules-on-your-reprap-3d-printer/>.
- [83] Guide, T. C. *Comparing 3D Filament*.
- [84] Gorman, W. *Building a 3D Printer : Motors and Controls*.
- [85] Das, D.; Pandey, I. and Banerjee, J. S. *An in-depth Study of Implementation Issues of 3D Printer* (2018).
- [86] Taylor Landry. *Extruders 101: A crash course on an essential component of your 3D printer*. March 15, (2016). <https://www.matterhackers.com/articles/extruders-101:-a-crash-course-on-an-essential-component-of-your-3d-printer>.
- [87] *Fargo 3-D Printing. Advantages and Disadvantages of Direct and Bowden Extrusion*. November 30, (2017). <https://www.fargo3dprinting.com/advantages-disadvantages-direct-bowden-extrusion/>.
- [88] *MakeShaper. How 3D printers work? Anatomy of a 3D Printer*. <https://www.makeshaper.com/anatomy-of-a-3d-printer/>.
- [89] *My3DConcepts. Main components of FDM 3-D printers*. <http://my3dconcepts.com/explore/main-components-of-desktop-3d-printers/>.
- [90] Burns, M. *Research notes. Rapid Prototyping Report*. 4(3), 3–6 (1994).
- [91] Burns M. *Automated Fabrication*. New Jersey: PTRPrentice Hall, (1993).
- [92] Lee. K. *Principles of CAD/CAM/CAE systems* (1999).
- [93] Bedworth, D. D.; Henderson, M. R. and Wolfe, P. M. *Computer-integrated design and manufacturing*, McGraw-Hill, New York. (1991).
- [94] Kester, W.; Sheingold, D. and Bryant, J. *Fundamentals of sampled data systems, in: Data Conversion Handbook*, Walt Kester (ed.), Newnes (2005).
- [95] Breltinger, F. *Rapid Tooling for Simultaneous Product and Process Development: Part II, RapidNEWS*, **5**, 52–57 (1997).
- [96] McMahon C. and Browne J. *CAD-CAM principles, practice and manufacturing management*, Addison-Wesley, 2<sup>nd</sup> Ed., (1998).

- [97] Leong, K. F; Chua C. K and Ng, Y. M. *A study of stereolithography file errors and repair Part 1-Generic solutions. Internal Journal of Advanced Manufacturing Technologies* **12**, 407–414 (1996).
- [98] Leong, K. F; Chua C. K. and Ng, Y. M. *A study of stereolithography file errors and repair Part 2-Special cases. Internal Journal of Advanced Manufacturing Technologies* **12**, 415–422 (1996).
- [99] Bohn, J. H. and Wozny, M. J. *Automatic CAD-model repair: Shell-closure. In Proceedings, Solid Freeform Fabrication Symposium 1992, Texas, USA*, 86–94 (1992).
- [100] Jinghon, L. *Improving stereolithography parts quality-Practical solutions. In Proceedings of the Third International Conference on Rapid Prototyping* 171–179 (1992).
- [101] Guerrero-De-Mier, A.; Espinosa, M. M. and Domínguez, M. Azara: *A New 32 bit RepRap with Improved Performance. Procedia Eng.* **132**, 118–125 (2015).
- [102] Kim, S. *3D Model Data Generation and Conversion for 3D Printers. J. Electron. Mater.* **44**, 815–822 (2015).
- [103] Wang, W. M.; Zanni, C. and Kobbelt, L. *Improved surface quality in 3D printing by optimizing the printing direction. Comput. Graph. Forum* **35**, 59–70 (2016).
- [104] Cacace, S.; Cristiani, E. and Rocchi, L. *A level set based method for fixing overhangs in 3D printing. Appl. Math. Model.* **44**, 446–455 (2017).
- [105] Jin, Y.-A.; He, Y. and Fu, J.-Z. *Support generation for additive manufacturing based on sliced data. Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **80**, 2041–2052 (2015).
- [106] Vasilescu, M. D. and Groza, I. V. *Influence of technological parameters on the dimension of flat and round parts generated by FDM 3D printing* (2018).
- [107] Tong, K.; Joshi, S. and Lehtihet, E. A. *Error compensation for fused deposition modeling (FDM) machine by correcting slice files. Rapid Prototyp. J.* **14**, 4–14 (2008).
- [108] Jia, Y.; He, H.; Geng, Y.; Huang, B. and Peng, X. *High through-plane thermal conductivity of polymer based product with vertical alignment of graphite flakes achieved via 3D printing. Compos. Sci. Technol.* **145**, 55–61 (2017).
- [109] Santana, L.; Lino Alves, J. and da Costa Sabino Netto, A. *A study of parametric calibration for low cost 3D printing: Seeking improvement in dimensional quality. Mater. Des.* **135**, 159–172 (2017).
- [110] Lensgraf, S. and Mettu, R. R. *Beyond layers: A 3D-aware toolpath algorithm for fused filament fabrication. Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.* 3625–3631 (2016).
- [111] Dinh, H. Q.; Lefebvre S.; Gelman, F. and Claux, F. *Modeling and toolpath generation for consumer-level 3D Printing, Siggraph 2015: Xroads of Discovery* (2015).

- [112] Kloski, L. W. and Kloski, N. *Getting Started with 3D Printing: A Hands-on Guide to the Hardware, Software, and Services Behind the New Manufacturing Revolution*, May 27 (2016).
- [113] All3DP, *3-D Printer G-Code Commands-2018 Tutorials for Beginners*.  
<https://all3dp.com/g-code-tutorial-3d-printer-gcode-commands/>.
- [114] Ultimaker, *What is g-code?* <https://ultimaker.com/en/resources/39071-what-is-g-code>.
- [115] Simplify3D, *G-code tutorial. The 10 most common commands*.  
<https://www.simplify3d.com/support/articles/3d-printing-gcode-tutorial/>.
- [116] Liu, J.; Fan, Y.; Lu, Q. and Yang, Y. *Design of extendable Tool Path Generation software for 3D printing. 2014 Int. Conf. Manip. Manuf. Meas. Nanoscale* 130–133 (2014).
- [117] Fabbaloo, *A Great Guide to 3D Print Post Processing*, Aug 27 (2017).  
<http://www.fabbaloo.com/blog/2017/8/27/a-great-guide-to-3d-print-post-processing>.
- [118] Roberson, D. A.; Espalin, D. and Wicker, R. B. *3D Printer Selection: A Decision-Making Evaluation and Ranking Model. Virtual and Physical Prototyping* **8**, 201–212 (2013).
- [119] Melenka, G. W.; Schofield, J. S.; Dawson, M. R. and Carey, J. P. *Evaluation of Dimensional Accuracy and Material Properties of The Makerbot 3D Desktop Printer. Rapid Prototyp. J.* **21**, 618–627 (2015).
- [120] Akande, S. O. *Dimensional Accuracy and Surface Finish Optimization of Fused Deposition Modelling Parts using Desirability Function Analysis. International Journal of Engineering Research and Technology* **4**, 196–202 (2015).
- [121] Turner, B. N.; Strong, R. and Gold, S. A. *A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. Rapid Prototyp. J.* **20**, 192–204 (2014).
- [122] Turner, B. N. and Gold, S. A. *A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness. Rapid Prototyp. J.* **21**, 250–261 (2015).
- [123] Sukindar, N. A.; Ariffin, M. K. A.; Baharudin, B. T. H. T.; Jaafar, C. N. A. and Ismail, M. I. S. *Analyzing the Effect of Nozzle Diameter in Fused Deposition Modeling for Extruding Polylactic Acid Using Open Source 3D Printing. J. Teknol.* **78**, (2016).
- [124] Brooks, H.; Rennie, A.; Abram, T.; McGovern, J. and Caron, F. *Variable fused deposition modelling: analysis of benefits, concept design and tool path generation* (2011).
- [125] *Adventures in 3-D Printing, Calculating the Flow Rate value*. <http://adventuresin3dprinting.blogspot.com/2011/04/calculating-flow-rate-value.html>.
- [126] *Slic3r Manual, Welcome to the Slic3r Manual*. <http://manual.slic3r.org/>.
- [127] Shenzhen Anet Technology Co, *3 D Print Quality Troubleshooting Guide*.
- [128] TorayCA. T700S Technical Data Sheet. **2** (2005).

## 7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

- {1} Section, N. *Materials used in cranioplasty: a history and analysis*. **36**, 1–7 (2014).
- {2} *3-D scanning, inspection, & reverse engineering contract services*.  
<http://www.nvision3d.com/nvision-services.html>
- {3} *R&D Prototype 3-D non contact laser scanning*. <http://www.rdprototype.com/laser-scanning.html>.
- {4} Bruker-Micro-CT, C. *SkyScan 1272 User Manual V1.1* 12/2013 0. 1–89 (2013).
- {5} *3D-Printing Techniques In A Medical Setting: A Systematic Literature Review*.  
<https://alexandermastersblog.wordpress.com/2017/01/07/3d-printing-techniques-in-a-medical-setting/>.
- {6} *RepRap: The 3D printer that's heading for your home*.  
<https://www.techrepublic.com/blog/european-technology/reprap-the-3d-printer-thats-heading-for-your-home/>.
- {7} *Popular Science*.  
<https://www.popsoci.com/consent.php?redirect=https%3a%2f%2fwww.popsoci.com%2f>
- {8} *3D printing: The world's first printed plane*.  
<https://www.newscientist.com/article/dn20737-3d-printing-the-worlds-first-printed-plane/>.
- {9} *Woman gets world's first 3D printed jaw transplant*.  
<https://www.cbsnews.com/news/woman-gets-worlds-first-3d-printed-jaw-transplant/>.
- {10} *83-Year-Old Woman Gets the World's First 3D Printed Replacement Jaw*.  
<https://inhabitat.com/83-year-old-woman-gets-the-worlds-first-3d-printed-jaw/>.
- {11} *Feds Tighten Restrictions On 3-D Printed Gun Files Online*.  
<https://www.wired.com/2015/06/feds-restrict-3d-printed-gun-files/>.
- {12} *Nano Dimension Ships First DragonFly 2020 System to Leading Israeli Defense Company*.  
<https://www.3dprintingmedia.network/nano-dimension-ships-first-dragonfly-2020-system-leading-israeli-defense-company/>.
- {13} *Desktop 3D printer presages the future of multi-layer circuit board design*.  
<https://www.computerworld.com/article/3195839/3d-printing/desktop-3d-printer-presages-the-future-of-multi-layer-circuit-board-design.html>.
- {14} *Aniwaa: Categories of 3D printing technologies*. <https://www.aniwaa.com/3d-printing-technologies/>.



- {15} *Laminated Object Manufacturing: LOM.*  
<https://www.makepartsfast.com/laminate-object-manufacturing-lom/>.
- {16} *What is Selective Laser Sintering?* <https://www.livescience.com/38862-selective-laser-sintering.html>.
- {17} Sedlak, J., Sekerka, V., Slany, M. & Kouril, K. *PRODUCTION OF PROTOTYPE PARTS USING DIRECT METAL 1 . Additive technology of rapid prototyping.* **55**, 260–266 (2015).
- {18} <http://www.custompartnet.com/wu/ink-jet-printing>.
- {19} Chaim, L. *Embracing the digital in instrument making : Towards a musician-tailored mouthpiece by 3D printing* (2013).
- {20} Konta, A. A. & Serrano, D. *Personalised 3D Printed Medicines : Which Techniques and Polymers Are More Personalised 3D Printed Medicines : Which Techniques and Polymers Are More Successful ?* (2017).
- {21} <http://diy3dprinting.blogspot.com/2015/09/zmorph-20s-12-toolhead-3d-printer.html>.
- {22} <https://3deometry.com/blog/fff-fdm-3d-printer-buying-guide/attachment/cartesian-vs-delta/>.
- {23} <https://www.fargo3dprinting.com/advantages-disadvantages-direct-bowden-extrusion/direct-extruder-diagram/>.
- {24} <https://3dprint.com/49533/turtle-3d-lora-printer/>.
- {25} Σ. Τσολερίδου. *Σχεδιασμός και ανάλυση τεχνητής άρθρωσης γονάτου με χρήση πεπερασμένων στοιχείων.* Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας (2016).
- {26} <https://slideplayer.com/slide/6554982/>.
- {27} <https://www.cs.cmu.edu/~scoros/cs15869-s15/lectures/03-3dPrintingSoftware.pdf>.
- {28} <http://enablingthefuture.org/2014/11/13/tech-talk-thursday-intro-to-3d-printing/>.
- {29} Γιαννατσής Ι., Δεδούσης Β., Κ. Β. *Σύγχρονες Τεχνολογίες Κατασκευής με τη βοήθεια Η / Υ.* (2015).
- {30} <https://projectsilkworm.com/>.
- {31} Slic3r Manual, Welcome to the Slic3r Manual. <http://manual.slic3r.org/>.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στο συγκεκριμένο παράρτημα παρατίθενται οι τελικοί G-κώδικες για ταχύτητα F1500 και 0% ισχύ του ανεμιστήρα, διαστάσεων 2·2·2 cm<sup>3</sup> τόσο για 0° όσο και για 45°, σε μορφή σημειωματαρίου. Η θερμοκρασία δε δηλώνεται στον κώδικα καθώς μπορεί να ρυθμιστεί από τον υπολογιστή. Στην περίπτωση που η ισχύς του ανεμιστήρα λειτουργεί στο 100% προστίθεται η εντολή M106 S255 στην αρχή της δημιουργίας της δομής του Skirt για την ενεργοποίηση του στο 100%, ενώ για την απενεργοποίηση προστίθεται η εντολή M107 S0 στο τέλος του κώδικα.

### G-κώδικας – 0°

```
G91
G1 Z1.000 F200.000
G90
G28 X0.000 Y0.000
G1 X117.500 Y125.000 F8000.000
G28 Z0.000
;SKIRT
G1 X 70.30 Y 70.00
G1 Z0.2 F300
G1 X 160.00 Y 70.00 E 2.6427 F600
G1 X 160.00 Y 150.00 E 4.9995
G1 X 70.00 Y 150.00 E 7.6510
G1 X 70.00 Y 70.00 E 10.0079

G1 X 70.00 Y 69.70
G1 X 160.30 Y 69.70 E 12.6682
G1 X 160.30 Y 150.30 E 15.0428
G1 X 69.70 Y 150.30 E 17.7120
G1 X 69.70 Y 69.70 E 20.0865

G1 X 69.70 Y 69.40
G1 X 160.60 Y 69.40 E 22.7645
G1 X 160.60 Y 150.30 E 25.1479
G1 X 69.40 Y 150.30 E 27.8348
G1 X 69.40 Y 69.40 E 30.2181
G92 E0
;RAFT
;PERIMETROI
;LAYER: -1
;eswterikh
G1 X 100.9 Y 100.6 F6000
G1 Z 0.2 F300
G1 X 129.4 Y 100.6 E 0.60311 F600
G1 X 129.4 Y 129.4 E 1.21257
G1 X 100.6 Y 129.4 E 1.82203
G1 X 100.6 Y 100.6 E 2.43149

;endiamesh
G1 X 100.6 Y 100.3 F6000
G1 X 129.7 Y 100.3 E 3.0473 F600
G1 X 129.7 Y 129.7 E 3.66946
G1 X 100.3 Y 129.7 E 4.29162
G1 X 100.3 Y 100.3 E 4.91378

;ekswterikh
G1 X 100.3 Y 100 F6000
G1 X 130 Y 100 E 5.54228 F600
G1 X 130 Y 130 E 6.17714
G1 X 100 Y 130 E 6.81199
G1 X 100 Y 100 E 7.44685

;ORIZONTIES
G92 E0
G1 X 100.6 Y 101.3 F6000
G1 X 129.2 Y 101.3 E 0.60523 F1200
G1 X 129.4 Y 101.5 E 0.61115
G1 X 129.4 Y 102.2 E 0.62597
G1 X 129.2 Y 102.4 E 0.63189
G1 X 100.8 Y 102.4 E 1.23289
G1 X 100.6 Y 102.6 E 1.23881
G1 X 100.6 Y 103.3 E 1.25363
G1 X 100.8 Y 103.5 E 1.25955
G1 X 129.2 Y 103.5 E 1.86055
G1 X 129.4 Y 103.7 E 1.86647
G1 X 129.4 Y 104.4 E 1.88129
G1 X 129.2 Y 104.6 E 1.88721
G1 X 100.8 Y 104.6 E 2.48821
G1 X 100.6 Y 104.8 E 2.49413
G1 X 100.6 Y 105.5 E 2.50895
G1 X 100.8 Y 105.7 E 2.51487
G1 X 129.2 Y 105.7 E 3.11587
G1 X 129.4 Y 105.9 E 3.12179
```

G1	X 129.4	Y 106.6	E 3.13661
G1	X 129.2	Y 106.8	E 3.14253
G1	X 100.8	Y 106.8	E 3.74353
G1	X 100.6	Y 107	E 3.74945
G1	X 100.6	Y 107.7	E 3.76427
G1	X 100.8	Y 107.9	E 3.77019
G1	X 129.2	Y 107.9	E 4.37119
G1	X 129.4	Y 108.1	E 4.37711
G1	X 129.4	Y 108.8	E 4.39193
G1	X 129.2	Y 109	E 4.39785
G1	X 100.8	Y 109	E 4.99885
G1	X 100.6	Y 109.2	E 5.00477
G1	X 100.6	Y 109.9	E 5.01959
G1	X 100.8	Y 110.1	E 5.02551
G1	X 129.2	Y 110.1	E 5.62651
G1	X 129.4	Y 110.3	E 5.63243
G1	X 129.4	Y 111	E 5.64724
G1	X 129.2	Y 111.2	E 5.65317
G1	X 100.8	Y 111.2	E 6.25417
G1	X 100.6	Y 111.4	E 6.26009
G1	X 100.6	Y 112.1	E 6.2749
G1	X 100.8	Y 112.3	E 6.28083
G1	X 129.2	Y 112.3	E 6.88183
G1	X 129.4	Y 112.5	E 6.88775
G1	X 129.4	Y 113.2	E 6.90256
G1	X 129.2	Y 113.4	E 6.90849
G1	X 100.8	Y 113.4	E 7.50949
G1	X 100.6	Y 113.6	E 7.51541
G1	X 100.6	Y 114.3	E 7.53022
G1	X 100.8	Y 114.5	E 7.53615
G1	X 129.2	Y 114.5	E 8.13715
G1	X 129.4	Y 114.7	E 8.14307
G1	X 129.4	Y 115.4	E 8.15788
G1	X 129.2	Y 115.6	E 8.16381
G1	X 100.8	Y 115.6	E 8.7648
G1	X 100.6	Y 115.8	E 8.77073
G1	X 100.6	Y 116.5	E 8.78554
G1	X 100.8	Y 116.7	E 8.79147
G1	X 129.2	Y 116.7	E 9.39246
G1	X 129.4	Y 116.9	E 9.39839
G1	X 129.4	Y 117.6	E 9.4132
G1	X 129.2	Y 117.8	E 9.41913
G1	X 100.8	Y 117.8	E 10.0201
G1	X 100.6	Y 118	E 10.026
G1	X 100.6	Y 118.7	E 10.0409
G1	X 100.8	Y 118.9	E 10.0468
G1	X 129.2	Y 118.9	E 10.6478
G1	X 129.4	Y 119.1	E 10.6537
G1	X 129.4	Y 119.8	E 10.6685
G1	X 129.2	Y 120	E 10.6744
G1	X 100.8	Y 120	E 11.2754
G1	X 100.6	Y 120.2	E 11.2814
G1	X 100.6	Y 120.9	E 11.2962
G1	X 100.8	Y 121.1	E 11.3021
G1	X 129.2	Y 121.1	E 11.9031
G1	X 129.4	Y 121.3	E 11.909
G1	X 129.4	Y 122	E 11.9238
G1	X 129.2	Y 122.2	E 11.9298
G1	X 100.8	Y 122.2	E 12.5308
G1	X 100.6	Y 122.4	E 12.5367
G1	X 100.6	Y 123.1	E 12.5515
G1	X 100.8	Y 123.3	E 12.5574
G1	X 129.2	Y 123.3	E 13.1584
G1	X 129.4	Y 123.5	E 13.1643
G1	X 129.4	Y 124.2	E 13.1792
G1	X 129.2	Y 124.4	E 13.1851
G1	X 100.8	Y 124.4	E 13.7861
G1	X 100.6	Y 124.6	E 13.792
G1	X 100.6	Y 125.3	E 13.8068
G1	X 100.8	Y 125.5	E 13.8127
G1	X 129.2	Y 125.5	E 14.4137
G1	X 129.4	Y 125.7	E 14.4197
G1	X 129.4	Y 126.4	E 14.4345
G1	X 129.2	Y 126.6	E 14.4404
G1	X 100.8	Y 126.6	E 15.0414
G1	X 100.6	Y 126.8	E 15.0473
G1	X 100.6	Y 127.5	E 15.0621
G1	X 100.8	Y 127.7	E 15.0681
G1	X 129.2	Y 127.7	E 15.6691
G1	X 129.4	Y 127.9	E 15.675
G1	X 129.4	Y 128.6	E 15.6898
G1	X 129.2	Y 128.8	E 15.6957
G1	X 100.8	Y 128.8	E 16.2967
G1	X 100.6	Y 129	E 16.3026
G1	X 100.6	Y 129.2	E 16.3069

:LAYER: 0

:eswterikh

G92

G1

G1

G1

G1

G1

G1

G1

G1

G1

G1

G1

G1

G1

G1

G1

G1

G1

G1

G1

G1

G1

E 0.0000

E -1.0000 F1200

Y 100.6

E 0.0000 F1200

Y 100.6

Y 129.4

Y 129.4

Y 100.6

Y 100.3

Y 100.3

Y 129.7

Y 129.7

Y 129.7

Y 129.7

Y 100.3

Y 100.3

Y 100.3

Y 100.3

Y 100.3

Y 100.3

Y 100.3

Y 100.3

F300

F6000

E 0.60311 F600

E 1.21257

E 1.82203

E 2.43149

F6000

E 3.0473 F600

E 3.66946

E 4.29162

E 4.91378

ekssterikh				
G1	X 100.3	Y 100		F6000
G1	X 130	Y 100	E 5.54228	F600
G1	X 130	Y 130	E 6.17714	
G1	X 100	Y 130	E 6.81199	
G1	X 100	Y 100	E 7.44685	
:KATHETES				
G92 E0				
G1	X 101.3	Y 100.6		F6000
G1	X 101.3	Y 129.2	E 0.60523	F1200
G1	X 101.5	Y 129.4	E 0.61115	
G1	X 102.2	Y 129.4	E 0.62597	
G1	X 102.4	Y 129.2	E 0.63189	
G1	X 102.4	Y 100.8	E 1.23289	
G1	X 102.6	Y 100.6	E 1.23881	
G1	X 103.3	Y 100.6	E 1.25363	
G1	X 103.5	Y 100.8	E 1.25955	
G1	X 103.5	Y 129.2	E 1.86055	
G1	X 103.7	Y 129.4	E 1.86647	
G1	X 104.4	Y 129.4	E 1.88129	
G1	X 104.6	Y 129.2	E 1.88721	
G1	X 104.6	Y 100.8	E 2.48821	
G1	X 104.8	Y 100.6	E 2.49413	
G1	X 105.5	Y 100.6	E 2.50895	
G1	X 105.7	Y 100.8	E 2.51487	
G1	X 105.7	Y 129.2	E 3.11587	
G1	X 105.9	Y 129.4	E 3.12179	
G1	X 106.6	Y 129.4	E 3.13661	
G1	X 106.8	Y 129.2	E 3.14253	
G1	X 106.8	Y 100.8	E 3.74353	
G1	X 107	Y 100.6	E 3.74945	
G1	X 107.7	Y 100.6	E 3.76427	
G1	X 107.9	Y 100.8	E 3.77019	
G1	X 107.9	Y 129.2	E 4.37119	
G1	X 108.1	Y 129.4	E 4.37711	
G1	X 108.8	Y 129.4	E 4.39193	
G1	X 109	Y 129.2	E 4.39785	
G1	X 109	Y 100.8	E 4.99885	
G1	X 109.2	Y 100.6	E 5.00477	
G1	X 109.9	Y 100.6	E 5.01959	
G1	X 110.1	Y 100.8	E 5.02551	
G1	X 110.1	Y 129.2	E 5.62651	
G1	X 110.3	Y 129.4	E 5.63243	
G1	X 111	Y 129.4	E 5.64724	
G1	X 111.2	Y 129.2	E 5.65317	
G1	X 111.2	Y 100.8	E 6.25417	
G1	X 111.4	Y 100.6	E 6.26009	
G1	X 112.1	Y 100.6	E 6.2749	
G1	X 112.3	Y 100.8	E 6.28083	
G1	X 112.3	Y 129.2	E 6.88183	
G1	X 112.5	Y 129.4	E 6.88775	
G1	X 113.2	Y 129.4	E 6.90256	
G1	X 113.4	Y 129.2	E 6.90849	
G1	X 113.4	Y 100.8	E 7.50949	
G1	X 113.6	Y 100.6	E 7.51541	
G1	X 114.3	Y 100.6	E 7.53022	
G1	X 114.5	Y 100.8	E 7.53615	
G1	X 114.5	Y 129.2	E 8.13715	
G1	X 114.7	Y 129.4	E 8.14307	
G1	X 115.4	Y 129.4	E 8.15788	
G1	X 115.6	Y 129.2	E 8.16381	
G1	X 115.6	Y 100.8	E 8.7648	
G1	X 115.8	Y 100.6	E 8.77073	
G1	X 116.5	Y 100.6	E 8.78554	
G1	X 116.7	Y 100.8	E 8.79147	
G1	X 116.7	Y 129.2	E 9.39246	
G1	X 116.9	Y 129.4	E 9.39839	
G1	X 117.6	Y 129.4	E 9.4132	
G1	X 117.8	Y 129.2	E 9.41913	
G1	X 117.8	Y 100.8	E 10.0201	
G1	X 118	Y 100.6	E 10.026	
G1	X 118.7	Y 100.6	E 10.0409	
G1	X 118.9	Y 100.8	E 10.0468	
G1	X 118.9	Y 129.2	E 10.6478	
G1	X 119.1	Y 129.4	E 10.6537	
G1	X 119.8	Y 129.4	E 10.6685	
G1	X 120	Y 129.2	E 10.6744	
G1	X 120	Y 100.8	E 11.2754	
G1	X 120.2	Y 100.6	E 11.2814	
G1	X 120.9	Y 100.6	E 11.2962	
G1	X 121.1	Y 100.8	E 11.3021	
G1	X 121.1	Y 129.2	E 11.9031	
G1	X 121.3	Y 129.4	E 11.909	
G1	X 122	Y 129.4	E 11.9238	
G1	X 122.2	Y 129.2	E 11.9298	
G1	X 122.2	Y 100.8	E 12.5308	
G1	X 122.4	Y 100.6	E 12.5367	
G1	X 123.1	Y 100.6	E 12.5515	
G1	X 123.3	Y 100.8	E 12.5574	
G1	X 123.3	Y 129.2	E 13.1584	
G1	X 123.5	Y 129.4	E 13.1643	
G1	X 124.2	Y 129.4	E 13.1792	
G1	X 124.4	Y 129.2	E 13.1851	
G1	X 124.4	Y 100.8	E 13.7861	
G1	X 124.6	Y 100.6	E 13.792	
G1	X 125.3	Y 100.6	E 13.8068	
G1	X 125.5	Y 100.8	E 13.8127	
G1	X 125.5	Y 129.2	E 14.4137	
G1	X 125.7	Y 129.4	E 14.4197	
G1	X 126.4	Y 129.4	E 14.4345	
G1	X 126.6	Y 129.2	E 14.4404	
G1	X 126.6	Y 100.8	E 15.0414	

G1	X 126.8	Y 100.6			E 15.0473
G1	X 127.5	Y 100.6			E 15.0621
G1	X 127.7	Y 100.8			E 15.0681
G1	X 127.7	Y 129.2			E 15.6691
G1	X 127.9	Y 129.4			E 15.675
G1	X 128.6	Y 129.4			E 15.6898
G1	X 128.8	Y 129.2			E 15.6957
G1	X 128.8	Y 100.8			E 16.2967
G1	X 129	Y 100.6			E 16.3026
G1	X 129.2	Y 100.6			E 16.3069
:PLEGMA					
:LAYER: 1					
:PERIMETROI					
:eswterikh					
G92 E0					
G1			E -1.0000	F1200	
G1	Z 0.7				F300
G1	X 105.3	Y 105.9			F6000
G1				E0	F1200
G1	X 125	Y 105.9		E 0.58037	F200
G1	X 125	Y 125.9		E 1.16959	
G1	X 105	Y 125.9		E 1.7588	
G1	X 105	Y 105.9		E 2.34801	
:endiamesh					
G1	X 105	Y 105.6			F6000
G1	X 125.3	Y 105.6		E 2.94606	F200
G1	X 125.3	Y 126.2		E 3.55295	
G1	X 104.7	Y 126.2		E 4.15983	
G1	X 104.7	Y 105.6		E 4.76672	
:ekswterikh					
G1	X 104.7	Y 105.3			F6000
G1	X 125.6	Y 105.3		E 5.38245	F200
G1	X 125.6	Y 126.5		E 6.00701	
G1	X 104.4	Y 126.5		E 6.63158	
G1	X 104.4	Y 105.3		E 7.25614	
G92			E 0.0000		
G1			E -1.0000	F1200.00	
:ORIZONTIES					
G1	X 105	Y 106.3			F6000
G1				E0	F1200
G1	X 124.943	Y 106.3		E 0.58753	F1500
G1	X 125	Y 106.393		E 0.59139	
G1	X 125	Y 106.578		E 0.59684	
G1	X 124.943	Y 106.67		E 0.6007	
G1	X 105.057	Y 106.67		E 1.18655	
G1	X 105	Y 106.763		E 1.19041	
G1	X 105	Y 106.948		E 1.19586	
G1	X 105.057	Y 107.04		E 1.19972	
G1	X 124.943	Y 107.04		E 1.78558	
G1	X 125	Y 107.133		E 1.78944	
G1	X 125	Y 107.318		E 1.79489	
G1	X 124.943	Y 107.41		E 1.79875	
G1	X 105.057	Y 107.41		E 2.3846	
G1	X 105	Y 107.503		E 2.38846	
G1	X 105	Y 107.688		E 2.39391	
G1	X 105.057	Y 107.78		E 2.39777	
G1	X 124.943	Y 107.78		E 2.98362	
G1	X 125	Y 107.873		E 2.98748	
G1	X 125	Y 108.058		E 2.99293	
G1	X 124.943	Y 108.15		E 2.99679	
G1	X 105.057	Y 108.15		E 3.58264	
G1	X 105	Y 108.243		E 3.5865	
G1	X 105	Y 108.428		E 3.59195	
G1	X 105.057	Y 108.52		E 3.59581	
G1	X 124.943	Y 108.52		E 4.18166	
G1	X 125	Y 108.613		E 4.18552	
G1	X 125	Y 108.798		E 4.19097	
G1	X 124.943	Y 108.89		E 4.19483	
G1	X 105.057	Y 108.89		E 4.78069	
G1	X 105	Y 108.983		E 4.78455	
G1	X 105	Y 109.168		E 4.79	
G1	X 105.057	Y 109.26		E 4.79386	
G1	X 124.943	Y 109.26		E 5.37971	
G1	X 125	Y 109.353		E 5.38357	
G1	X 125	Y 109.538		E 5.38902	
G1	X 124.943	Y 109.63		E 5.39288	
G1	X 105.057	Y 109.63		E 5.97873	
G1	X 105	Y 109.723		E 5.98259	
G1	X 105	Y 109.908		E 5.98804	
G1	X 105.057	Y 110		E 5.9919	
G1	X 124.943	Y 110		E 6.57775	
G1	X 125	Y 110.093		E 6.58161	
G1	X 125	Y 110.278		E 6.58706	
G1	X 124.943	Y 110.37		E 6.59092	
G1	X 105.057	Y 110.37		E 7.17677	
G1	X 105	Y 110.463		E 7.18063	
G1	X 105	Y 110.648		E 7.18608	
G1	X 105.057	Y 110.74		E 7.18994	
G1	X 124.943	Y 110.74		E 7.7758	
G1	X 125	Y 110.833		E 7.77966	
G1	X 125	Y 111.018		E 7.78511	
G1	X 124.943	Y 111.11		E 7.78897	
G1	X 105.057	Y 111.11		E 8.37482	
G1	X 105	Y 111.203		E 8.37868	
G1	X 105	Y 111.388		E 8.38413	
G1	X 105.057	Y 111.48		E 8.38799	
G1	X 124.943	Y 111.48		E 8.97384	
G1	X 125	Y 111.573		E 8.9777	
G1	X 125	Y 111.758		E 8.98315	
G1	X 124.943	Y 111.85		E 8.98701	
G1	X 105.057	Y 111.85		E 9.57286	

G1	X 105	Y 111.943	E 9.57672
G1	X 105	Y 112.128	E 9.58217
G1	X 105.057	Y 112.22	E 9.58603
G1	X 124.943	Y 112.22	E 10.1719
G1	X 125	Y 112.313	E 10.1757
G1	X 125	Y 112.498	E 10.1812
G1	X 124.943	Y 112.59	E 10.1851
G1	X 105.057	Y 112.59	E 10.7709
G1	X 105	Y 112.683	E 10.7748
G1	X 105	Y 112.868	E 10.7802
G1	X 105.057	Y 112.96	E 10.7841
G1	X 124.943	Y 112.96	E 11.3699
G1	X 125	Y 113.053	E 11.3738
G1	X 125	Y 113.238	E 11.3792
G1	X 124.943	Y 113.33	E 11.3831
G1	X 105.057	Y 113.33	E 11.969
G1	X 105	Y 113.423	E 11.9728
G1	X 105	Y 113.608	E 11.9783
G1	X 105.057	Y 113.7	E 11.9821
G1	X 124.943	Y 113.7	E 12.568
G1	X 125	Y 113.793	E 12.5718
G1	X 125	Y 113.978	E 12.5773
G1	X 124.943	Y 114.07	E 12.5811
G1	X 105.07	Y 114.07	E 13.167
G1	X 105	Y 114.163	E 13.1709
G1	X 105	Y 114.348	E 13.1763
G1	X 105.07	Y 114.44	E 13.1802
G1	X 124.93	Y 114.44	E 13.766
G1	X 125	Y 114.533	E 13.7699
G1	X 125	Y 114.718	E 13.7753
G1	X 124.93	Y 114.81	E 13.7792
G1	X 105.07	Y 114.81	E 14.365
G1	X 105	Y 114.903	E 14.3689
G1	X 105	Y 115.088	E 14.3743
G1	X 105.07	Y 115.18	E 14.3782
G1	X 124.93	Y 115.18	E 14.9641
G1	X 125	Y 115.273	E 14.9679
G1	X 125	Y 115.458	E 14.9734
G1	X 124.93	Y 115.55	E 14.9772
G1	X 105.07	Y 115.55	E 15.5631
G1	X 105	Y 115.643	E 15.5669
G1	X 105	Y 115.828	E 15.5724
G1	X 105.07	Y 115.92	E 15.5763
G1	X 124.93	Y 115.92	E 16.1621
G1	X 125	Y 116.013	E 16.166
G1	X 125	Y 116.198	E 16.1714
G1	X 124.93	Y 116.29	E 16.1753
G1	X 105.07	Y 116.29	E 16.7611
G1	X 105	Y 116.383	E 16.765
G1	X 105	Y 116.568	E 16.7704
G1	X 105.07	Y 116.66	E 16.7743
G1	X 124.93	Y 116.66	E 17.3601
G1	X 125	Y 116.753	E 17.364
G1	X 125	Y 116.938	E 17.3695
G1	X 124.93	Y 117.03	E 17.3733
G1	X 105.07	Y 117.03	E 17.9592
G1	X 105	Y 117.123	E 17.963
G1	X 105	Y 117.308	E 17.9685
G1	X 105.07	Y 117.4	E 17.9723
G1	X 124.93	Y 117.4	E 18.5582
G1	X 125	Y 117.493	E 18.5621
G1	X 125	Y 117.678	E 18.5675
G1	X 124.93	Y 117.77	E 18.5714
G1	X 105.07	Y 117.77	E 19.1572
G1	X 105	Y 117.863	E 19.1611
G1	X 105	Y 118.048	E 19.1665
G1	X 105.07	Y 118.14	E 19.1704
G1	X 124.93	Y 118.14	E 19.7562
G1	X 125	Y 118.233	E 19.7601
G1	X 125	Y 118.418	E 19.7655
G1	X 124.93	Y 118.51	E 19.7694
G1	X 105.07	Y 118.51	E 20.3553
G1	X 105	Y 118.603	E 20.3591
G1	X 105	Y 118.788	E 20.3646
G1	X 105.07	Y 118.88	E 20.3684
G1	X 124.93	Y 118.88	E 20.9543
G1	X 125	Y 118.973	E 20.9581
G1	X 125	Y 119.158	E 20.9636
G1	X 124.93	Y 119.25	E 20.9674
G1	X 105.07	Y 119.25	E 21.5533
G1	X 105	Y 119.343	E 21.5572
G1	X 105	Y 119.528	E 21.5626
G1	X 105.07	Y 119.62	E 21.5665
G1	X 124.93	Y 119.62	E 22.1523
G1	X 125	Y 119.713	E 22.1562
G1	X 125	Y 119.898	E 22.1616
G1	X 124.93	Y 119.99	E 22.1655
G1	X 105.07	Y 119.99	E 22.7513
G1	X 105	Y 120.083	E 22.7552
G1	X 105	Y 120.268	E 22.7607
G1	X 105.07	Y 120.36	E 22.7645
G1	X 124.93	Y 120.36	E 23.3504
G1	X 125	Y 120.453	E 23.3542
G1	X 125	Y 120.638	E 23.3597
G1	X 124.93	Y 120.73	E 23.3635
G1	X 105.07	Y 120.73	E 23.9494
G1	X 105	Y 120.823	E 23.9532
G1	X 105	Y 121.008	E 23.9587
G1	X 105.07	Y 121.1	E 23.9626
G1	X 124.93	Y 121.1	E 24.5484
G1	X 125	Y 121.193	E 24.5523
G1	X 125	Y 121.378	E 24.5577

G1	X 124.93	Y 121.47	E 24.5616
G1	X 105.07	Y 121.47	E 25.1474
G1	X 105	Y 121.563	E 25.1513
G1	X 105	Y 121.748	E 25.1567
G1	X 105.07	Y 121.84	E 25.1606
G1	X 124.93	Y 121.84	E 25.7465
G1	X 125	Y 121.933	E 25.7503
G1	X 125	Y 122.118	E 25.7558
G1	X 124.93	Y 122.21	E 25.7596
G1	X 105.07	Y 122.21	E 26.3455
G1	X 105	Y 122.303	E 26.3493
G1	X 105	Y 122.488	E 26.3548
G1	X 105.07	Y 122.58	E 26.3586
G1	X 124.93	Y 122.58	E 26.9445
G1	X 125	Y 122.673	E 26.9484
G1	X 125	Y 122.858	E 26.9538
G1	X 124.93	Y 122.95	E 26.9577
G1	X 105.07	Y 122.95	E 27.5435
G1	X 105	Y 123.043	E 27.5474
G1	X 105	Y 123.228	E 27.5528
G1	X 105.07	Y 123.32	E 27.5567
G1	X 124.93	Y 123.32	E 28.1425
G1	X 125	Y 123.413	E 28.1464
G1	X 125	Y 123.598	E 28.1519
G1	X 124.93	Y 123.69	E 28.1557
G1	X 105.07	Y 123.69	E 28.7416
G1	X 105	Y 123.783	E 28.7454
G1	X 105	Y 123.968	E 28.7509
G1	X 105.07	Y 124.06	E 28.7547
G1	X 124.93	Y 124.06	E 29.3406
G1	X 125	Y 124.153	E 29.3444
G1	X 125	Y 124.338	E 29.3499
G1	X 124.93	Y 124.43	E 29.3538
G1	X 105.07	Y 124.43	E 29.9396
G1	X 105	Y 124.523	E 29.9435
G1	X 105	Y 124.708	E 29.9489
G1	X 105.07	Y 124.8	E 29.9528
G1	X 124.93	Y 124.8	E 30.5386
G1	X 125	Y 124.893	E 30.5425
G1	X 125	Y 125.078	E 30.5479
G1	X 124.93	Y 125.17	E 30.5518
G1	X 105.07	Y 125.17	E 31.1377
G1	X 105	Y 125.263	E 31.1415
G1	X 105	Y 125.448	E 31.147
G1	X 105.07	Y 125.54	E 31.1508
G1	X 124.93	Y 125.54	E 31.7367
G1	X 125	Y 125.633	E 31.7405
G1	X 125	Y 125.818	E 31.746

:LAYER: 2

:PERIMETROI

:eswterikh

G92 E0

G1			E -1.0000	F1200	
G1	Z 1				F300
G1	X 105.3	Y 105.9			F6000
G1				E0	F1200
G1	X 125	Y 105.9		E 0.58037	F200
G1	X 125	Y 125.9		E 1.16959	
G1	X 105	Y 125.9		E 1.7588	
G1	X 105	Y 105.9		E 2.34801	

:endiamesh

G1	X 105	Y 105.6			F6000
G1	X 125.3	Y 105.6		E 2.94606	F200
G1	X 125.3	Y 126.2		E 3.55295	
G1	X 104.7	Y 126.2		E 4.15983	
G1	X 104.7	Y 105.6		E 4.76672	

:ekswterikh

G1	X 104.7	Y 105.3			F6000
G1	X 125.6	Y 105.3		E 5.38245	F200
G1	X 125.6	Y 126.5		E 6.00701	
G1	X 104.4	Y 126.5		E 6.63158	
G1	X 104.4	Y 105.3		E 7.25614	

G92

G1			E 0.0000		
G1			E -1.0000		F 1200.00

:KATHETES

G1	X 105.4	Y 105.9		F6000	
G1			E0	F1200	
G1	X 105.4	Y 125.83	E0.58715		
G1	X 105.7	Y 125.9	E0.5901		
G1	X 106.3	Y 125.9	E0.60777		
G1	X 106.6	Y 125.83	E0.61072		
G1	X 106.6	Y 105.97	E1.1958		
G1	X 106.9	Y 105.9	E1.19875		
G1	X 107.5	Y 105.9	E1.21643		
G1	X 107.8	Y 105.97	E1.21937		
G1	X 107.8	Y 125.83	E1.80446		
G1	X 108.1	Y 125.9	E1.80741		
G1	X 108.7	Y 125.9	E1.82508		
G1	X 109	Y 125.83	E1.82803		
G1	X 109	Y 105.97	E2.41312		
G1	X 109.3	Y 105.9	E2.41606		
G1	X 109.9	Y 105.9	E2.43374		
G1	X 110.2	Y 105.97	E2.43668		
G1	X 110.2	Y 125.83	E3.02177		
G1	X 110.5	Y 125.9	E3.02472		
G1	X 111.1	Y 125.9	E3.04239		
G1	X 111.4	Y 125.83	E3.04534		
G1	X 111.4	Y 105.97	E3.63043		
G1	X 111.7	Y 105.9	E3.63337		
G1	X 112.3	Y 105.9	E3.65105		
G1	X 112.6	Y 105.97	E3.654		

G1	X 112.6	Y 125.83	E4.23908
G1	X 112.9	Y 125.9	E4.24203
G1	X 113.5	Y 125.9	E4.25971
G1	X 113.8	Y 125.83	E4.26265
G1	X 113.8	Y 105.97	E4.84774
G1	X 114.1	Y 105.9	E4.85068
G1	X 114.7	Y 105.9	E4.86836
G1	X 115	Y 105.97	E4.87131
G1	X 115	Y 125.83	E5.45639
G1	X 115.3	Y 125.9	E5.45934
G1	X 115.9	Y 125.9	E5.47702
G1	X 116.2	Y 125.83	E5.47996
G1	X 116.2	Y 105.97	E6.06505
G1	X 116.5	Y 105.9	E6.068
G1	X 117.1	Y 105.9	E6.08567
G1	X 117.4	Y 105.97	E6.08862
G1	X 117.4	Y 125.83	E6.67371
G1	X 117.7	Y 125.9	E6.67665
G1	X 118.3	Y 125.9	E6.69433
G1	X 118.6	Y 125.83	E6.69727
G1	X 118.6	Y 105.97	E7.28236
G1	X 118.9	Y 105.9	E7.28531
G1	X 119.5	Y 105.9	E7.30298
G1	X 119.8	Y 105.97	E7.30593
G1	X 119.8	Y 125.83	E7.89102
G1	X 120.1	Y 125.9	E7.89396
G1	X 120.7	Y 125.9	E7.91164
G1	X 121	Y 125.83	E7.91459
G1	X 121	Y 105.97	E8.49967
G1	X 121.3	Y 105.9	E8.50262
G1	X 121.9	Y 105.9	E8.52029
G1	X 122.2	Y 105.97	E8.52324
G1	X 122.2	Y 125.83	E9.10833
G1	X 122.5	Y 125.9	E9.11127
G1	X 123.1	Y 125.9	E9.12895
G1	X 123.4	Y 125.83	E9.1319
G1	X 123.4	Y 105.97	E9.71698
G1	X 123.7	Y 105.9	E9.71993
G1	X 124.3	Y 105.9	E9.73761
G1	X 124.6	Y 105.97	E9.74055
G1	X 124.6	Y 125.83	E10.3256
G1	X 124.9	Y 125.9	E10.3286

:LAYER: 3

:PERIMETROI

:eswterikh

G92 E0

G1			E -1.0000	F1200	
G1	Z 1.3				F300
G1	X 105.3	Y 105.9			F6000
G1				E0	F1200
G1	X 125	Y 105.9		E 0.58037	F200
G1	X 125	Y 125.9		E 1.16959	
G1	X 105	Y 125.9		E 1.7588	
G1	X 105	Y 105.9		E 2.34801	

:endiamesh

G1	X 105	Y 105.6			F6000
G1	X 125.3	Y 105.6		E 2.94606	F200
G1	X 125.3	Y 126.2		E 3.55295	
G1	X 104.7	Y 126.2		E 4.15983	
G1	X 104.7	Y 105.6		E 4.76672	

:ekswterikh

G1	X 104.7	Y 105.3			F6000
G1	X 125.6	Y 105.3		E 5.38245	F200
G1	X 125.6	Y 126.5		E 6.00701	
G1	X 104.4	Y 126.5		E 6.63158	
G1	X 104.4	Y 105.3		E 7.25614	

G92

G1			E 0.0000		
G1			E -1.0000	F 1200.00	

:ORIZONTIES

G1	X 105	Y 106.3			F6000
G1				E0	F1200
G1	X 124.943	Y 106.3		E 0.58753	F1500
G1	X 125	Y 106.393		E 0.59139	
G1	X 125	Y 106.578		E 0.59684	
G1	X 124.943	Y 106.67		E 0.6007	
G1	X 105.057	Y 106.67		E 1.18655	
G1	X 105	Y 106.763		E 1.19041	
G1	X 105	Y 106.948		E 1.19586	
G1	X 105.057	Y 107.04		E 1.19972	
G1	X 124.943	Y 107.04		E 1.78558	
G1	X 125	Y 107.133		E 1.78944	
G1	X 125	Y 107.318		E 1.79489	
G1	X 124.943	Y 107.41		E 1.79875	
G1	X 105.057	Y 107.41		E 2.3846	
G1	X 105	Y 107.503		E 2.38846	
G1	X 105	Y 107.688		E 2.39391	
G1	X 105.057	Y 107.78		E 2.39777	
G1	X 124.943	Y 107.78		E 2.98362	
G1	X 125	Y 107.873		E 2.98748	
G1	X 125	Y 108.058		E 2.99293	
G1	X 124.943	Y 108.15		E 2.99679	
G1	X 105.057	Y 108.15		E 3.58264	
G1	X 105	Y 108.243		E 3.5865	
G1	X 105	Y 108.428		E 3.59195	
G1	X 105.057	Y 108.52		E 3.59581	
G1	X 124.943	Y 108.52		E 4.18166	
G1	X 125	Y 108.613		E 4.18552	
G1	X 125	Y 108.798		E 4.19097	
G1	X 124.943	Y 108.89		E 4.19483	
G1	X 105.057	Y 108.89		E 4.78069	
G1	X 105	Y 108.983		E 4.78455	



G1	X 105	Y 109.168	E 4.79
G1	X 105.057	Y 109.26	E 4.79386
G1	X 124.943	Y 109.26	E 5.37971
G1	X 125	Y 109.353	E 5.38357
G1	X 125	Y 109.538	E 5.38902
G1	X 124.943	Y 109.63	E 5.39288
G1	X 105.057	Y 109.63	E 5.97873
G1	X 105	Y 109.723	E 5.98259
G1	X 105	Y 109.908	E 5.98804
G1	X 105.057	Y 110	E 5.9919
G1	X 124.943	Y 110	E 6.57775
G1	X 125	Y 110.093	E 6.58161
G1	X 125	Y 110.278	E 6.58706
G1	X 124.943	Y 110.37	E 6.59092
G1	X 105.057	Y 110.37	E 7.17677
G1	X 105	Y 110.463	E 7.18063
G1	X 105	Y 110.648	E 7.18608
G1	X 105.057	Y 110.74	E 7.18994
G1	X 124.943	Y 110.74	E 7.7758
G1	X 125	Y 110.833	E 7.77966
G1	X 125	Y 111.018	E 7.78511
G1	X 124.943	Y 111.11	E 7.78897
G1	X 105.057	Y 111.11	E 8.37482
G1	X 105	Y 111.203	E 8.37868
G1	X 105	Y 111.388	E 8.38413
G1	X 105.057	Y 111.48	E 8.38799
G1	X 124.943	Y 111.48	E 8.97384
G1	X 125	Y 111.573	E 8.9777
G1	X 125	Y 111.758	E 8.98315
G1	X 124.943	Y 111.85	E 8.98701
G1	X 105.057	Y 111.85	E 9.57286
G1	X 105	Y 111.943	E 9.57672
G1	X 105	Y 112.128	E 9.58217
G1	X 105.057	Y 112.22	E 9.58603
G1	X 124.943	Y 112.22	E 10.1719
G1	X 125	Y 112.313	E 10.1757
G1	X 125	Y 112.498	E 10.1812
G1	X 124.943	Y 112.59	E 10.1851
G1	X 105.057	Y 112.59	E 10.7709
G1	X 105	Y 112.683	E 10.7748
G1	X 105	Y 112.868	E 10.7802
G1	X 105.057	Y 112.96	E 10.7841
G1	X 124.943	Y 112.96	E 11.3699
G1	X 125	Y 113.053	E 11.3738
G1	X 125	Y 113.238	E 11.3792
G1	X 124.943	Y 113.33	E 11.3831
G1	X 105.057	Y 113.33	E 11.969
G1	X 105	Y 113.423	E 11.9728
G1	X 105	Y 113.608	E 11.9783
G1	X 105.057	Y 113.7	E 11.9821
G1	X 124.943	Y 113.7	E 12.568
G1	X 125	Y 113.793	E 12.5718
G1	X 125	Y 113.978	E 12.5773
G1	X 124.943	Y 114.07	E 12.5811
G1	X 105.07	Y 114.07	E 13.167
G1	X 105	Y 114.163	E 13.1709
G1	X 105	Y 114.348	E 13.1763
G1	X 105.07	Y 114.44	E 13.1802
G1	X 124.93	Y 114.44	E 13.766
G1	X 125	Y 114.533	E 13.7699
G1	X 125	Y 114.718	E 13.7753
G1	X 124.93	Y 114.81	E 13.7792
G1	X 105.07	Y 114.81	E 14.365
G1	X 105	Y 114.903	E 14.3689
G1	X 105	Y 115.088	E 14.3743
G1	X 105.07	Y 115.18	E 14.3782
G1	X 124.93	Y 115.18	E 14.9641
G1	X 125	Y 115.273	E 14.9679
G1	X 125	Y 115.458	E 14.9734
G1	X 124.93	Y 115.55	E 14.9772
G1	X 105.07	Y 115.55	E 15.5631
G1	X 105	Y 115.643	E 15.5669
G1	X 105	Y 115.828	E 15.5724
G1	X 105.07	Y 115.92	E 15.5763
G1	X 124.93	Y 115.92	E 16.1621
G1	X 125	Y 116.013	E 16.166
G1	X 125	Y 116.198	E 16.1714
G1	X 124.93	Y 116.29	E 16.1753
G1	X 105.07	Y 116.29	E 16.7611
G1	X 105	Y 116.383	E 16.765
G1	X 105	Y 116.568	E 16.7704
G1	X 105.07	Y 116.66	E 16.7743
G1	X 124.93	Y 116.66	E 17.3601
G1	X 125	Y 116.753	E 17.364
G1	X 125	Y 116.938	E 17.3695
G1	X 124.93	Y 117.03	E 17.3733
G1	X 105.07	Y 117.03	E 17.9592
G1	X 105	Y 117.123	E 17.963
G1	X 105	Y 117.308	E 17.9685
G1	X 105.07	Y 117.4	E 17.9723
G1	X 124.93	Y 117.4	E 18.5582
G1	X 125	Y 117.493	E 18.5621
G1	X 125	Y 117.678	E 18.5675
G1	X 124.93	Y 117.77	E 18.5714
G1	X 105.07	Y 117.77	E 19.1572
G1	X 105	Y 117.863	E 19.1611
G1	X 105	Y 118.048	E 19.1665
G1	X 105.07	Y 118.14	E 19.1704
G1	X 124.93	Y 118.14	E 19.7562
G1	X 125	Y 118.233	E 19.7601
G1	X 125	Y 118.418	E 19.7655
G1	X 124.93	Y 118.51	E 19.7694

G1	X 105.07	Y 118.51	E 20.3553
G1	X 105	Y 118.603	E 20.3591
G1	X 105	Y 118.788	E 20.3646
G1	X 105.07	Y 118.88	E 20.3684
G1	X 124.93	Y 118.88	E 20.9543
G1	X 125	Y 118.973	E 20.9581
G1	X 125	Y 119.158	E 20.9636
G1	X 124.93	Y 119.25	E 20.9674
G1	X 105.07	Y 119.25	E 21.5533
G1	X 105	Y 119.343	E 21.5572
G1	X 105	Y 119.528	E 21.5626
G1	X 105.07	Y 119.62	E 21.5665
G1	X 124.93	Y 119.62	E 22.1523
G1	X 125	Y 119.713	E 22.1562
G1	X 125	Y 119.898	E 22.1616
G1	X 124.93	Y 119.99	E 22.1655
G1	X 105.07	Y 119.99	E 22.7513
G1	X 105	Y 120.083	E 22.7552
G1	X 105	Y 120.268	E 22.7607
G1	X 105.07	Y 120.36	E 22.7645
G1	X 124.93	Y 120.36	E 23.3504
G1	X 125	Y 120.453	E 23.3542
G1	X 125	Y 120.638	E 23.3597
G1	X 124.93	Y 120.73	E 23.3635
G1	X 105.07	Y 120.73	E 23.9494
G1	X 105	Y 120.823	E 23.9532
G1	X 105	Y 121.008	E 23.9587
G1	X 105.07	Y 121.1	E 23.9626
G1	X 124.93	Y 121.1	E 24.5484
G1	X 125	Y 121.193	E 24.5523
G1	X 125	Y 121.378	E 24.5577
G1	X 124.93	Y 121.47	E 24.5616
G1	X 105.07	Y 121.47	E 25.1474
G1	X 105	Y 121.563	E 25.1513
G1	X 105	Y 121.748	E 25.1567
G1	X 105.07	Y 121.84	E 25.1606
G1	X 124.93	Y 121.84	E 25.7465
G1	X 125	Y 121.933	E 25.7503
G1	X 125	Y 122.118	E 25.7558
G1	X 124.93	Y 122.21	E 25.7596
G1	X 105.07	Y 122.21	E 26.3455
G1	X 105	Y 122.303	E 26.3493
G1	X 105	Y 122.488	E 26.3548
G1	X 105.07	Y 122.58	E 26.3586
G1	X 124.93	Y 122.58	E 26.9445
G1	X 125	Y 122.673	E 26.9484
G1	X 125	Y 122.858	E 26.9538
G1	X 124.93	Y 122.95	E 26.9577
G1	X 105.07	Y 122.95	E 27.5435
G1	X 105	Y 123.043	E 27.5474
G1	X 105	Y 123.228	E 27.5528
G1	X 105.07	Y 123.32	E 27.5567
G1	X 124.93	Y 123.32	E 28.1425
G1	X 125	Y 123.413	E 28.1464
G1	X 125	Y 123.598	E 28.1519
G1	X 124.93	Y 123.69	E 28.1557
G1	X 105.07	Y 123.69	E 28.7416
G1	X 105	Y 123.783	E 28.7454
G1	X 105	Y 123.968	E 28.7509
G1	X 105.07	Y 124.06	E 28.7547
G1	X 124.93	Y 124.06	E 29.3406
G1	X 125	Y 124.153	E 29.3444
G1	X 125	Y 124.338	E 29.3499
G1	X 124.93	Y 124.43	E 29.3538
G1	X 105.07	Y 124.43	E 29.9396
G1	X 105	Y 124.523	E 29.9435
G1	X 105	Y 124.708	E 29.9489
G1	X 105.07	Y 124.8	E 29.9528
G1	X 124.93	Y 124.8	E 30.5386
G1	X 125	Y 124.893	E 30.5425
G1	X 125	Y 125.078	E 30.5479
G1	X 124.93	Y 125.17	E 30.5518
G1	X 105.07	Y 125.17	E 31.1377
G1	X 105	Y 125.263	E 31.1415
G1	X 105	Y 125.448	E 31.147
G1	X 105.07	Y 125.54	E 31.1508
G1	X 124.93	Y 125.54	E 31.7367
G1	X 125	Y 125.633	E 31.7405
G1	X 125	Y 125.818	E 31.746

:

:LAYER: 66  
:PERIMETROI

:eswterikh  
G92 E0

G1			E -1.0000	F1200	
G1	Z 20.2				F300
G1	X 105.3	Y 105.9			F6000
G1				E0	F1200
G1	X 125	Y 105.9		E 0.58037	F200
G1	X 125	Y 125.9		E 1.16959	
G1	X 105	Y 125.9		E 1.7588	
G1	X 105	Y 105.9		E 2.34801	
:endiamesh					
G1	X 105	Y 105.6			F6000
G1	X 125.3	Y 105.6		E 2.94606	F200
G1	X 125.3	Y 126.2		E 3.55295	
G1	X 104.7	Y 126.2		E 4.15983	
G1	X 104.7	Y 105.6		E 4.76672	
:ekswterikh					
G1	X 104.7	Y 105.3			F6000
G1	X 125.6	Y 105.3		E 5.38245	F200

G1	X 125.6	Y 126.5	E 6.00701
G1	X 104.4	Y 126.5	E 6.63158
G1	X 104.4	Y 105.3	E 7.25614
G92		E 0.0000	
G1		E -1.0000	F 1200.00
;KATHETES			
G1	X 105.4	Y 105.9	F6000
G1		E0	F1200
G1	X 105.4	Y 125.83	E0.58715
G1	X 105.7	Y 125.9	E0.5901
G1	X 106.3	Y 125.9	E0.60777
G1	X 106.6	Y 125.83	E0.61072
G1	X 106.6	Y 105.97	E1.1958
G1	X 106.9	Y 105.9	E1.19875
G1	X 107.5	Y 105.9	E1.21643
G1	X 107.8	Y 105.97	E1.21937
G1	X 107.8	Y 125.83	E1.80446
G1	X 108.1	Y 125.9	E1.80741
G1	X 108.7	Y 125.9	E1.82508
G1	X 109	Y 125.83	E1.82803
G1	X 109	Y 105.97	E2.41312
G1	X 109.3	Y 105.9	E2.41606
G1	X 109.9	Y 105.9	E2.43374
G1	X 110.2	Y 105.97	E2.43668
G1	X 110.2	Y 125.83	E3.02177
G1	X 110.5	Y 125.9	E3.02472
G1	X 111.1	Y 125.9	E3.04239
G1	X 111.4	Y 125.83	E3.04534
G1	X 111.4	Y 105.97	E3.63043
G1	X 111.7	Y 105.9	E3.63337
G1	X 112.3	Y 105.9	E3.65105
G1	X 112.6	Y 105.97	E3.654
G1	X 112.6	Y 125.83	E4.23908
G1	X 112.9	Y 125.9	E4.24203
G1	X 113.5	Y 125.9	E4.25971
G1	X 113.8	Y 125.83	E4.26265
G1	X 113.8	Y 105.97	E4.84774
G1	X 114.1	Y 105.9	E4.85068
G1	X 114.7	Y 105.9	E4.86836
G1	X 115	Y 105.97	E4.87131
G1	X 115	Y 125.83	E5.45639
G1	X 115.3	Y 125.9	E5.45934
G1	X 115.9	Y 125.9	E5.47702
G1	X 116.2	Y 125.83	E5.47996
G1	X 116.2	Y 105.97	E6.06505
G1	X 116.5	Y 105.9	E6.068
G1	X 117.1	Y 105.9	E6.08567
G1	X 117.4	Y 105.97	E6.08862
G1	X 117.4	Y 125.83	E6.67371
G1	X 117.7	Y 125.9	E6.67665
G1	X 118.3	Y 125.9	E6.69433
G1	X 118.6	Y 125.83	E6.69727
G1	X 118.6	Y 105.97	E7.28236
G1	X 118.9	Y 105.9	E7.28531
G1	X 119.5	Y 105.9	E7.30298
G1	X 119.8	Y 105.97	E7.30593
G1	X 119.8	Y 125.83	E7.89102
G1	X 120.1	Y 125.9	E7.89396
G1	X 120.7	Y 125.9	E7.91164
G1	X 121	Y 125.83	E7.91459
G1	X 121	Y 105.97	E8.49967
G1	X 121.3	Y 105.9	E8.50262
G1	X 121.9	Y 105.9	E8.52029
G1	X 122.2	Y 105.97	E8.52324
G1	X 122.2	Y 125.83	E9.10833
G1	X 122.5	Y 125.9	E9.11127
G1	X 123.1	Y 125.9	E9.12895
G1	X 123.4	Y 125.83	E9.1319
G1	X 123.4	Y 105.97	E9.71698
G1	X 123.7	Y 105.9	E9.71993
G1	X 124.3	Y 105.9	E9.73761
G1	X 124.6	Y 105.97	E9.74055
G1	X 124.6	Y 125.83	E10.3256
G1	X 124.9	Y 125.9	E10.3286
;LAYER: 67			
;PERIMETROI			
;eswterikh			
G92	E0	E -1.0000	F1200
G1	Z 20.5		F300
G1	X 105.3	Y 105.9	F6000
G1			F1200
G1	X 125	Y 105.9	E0
G1	X 125	Y 125.9	E 0.58037
G1	X 105	Y 125.9	E 1.16959
G1	X 105	Y 105.9	E 1.7588
G1	X 105	Y 105.9	E 2.34801
;endiamesh			
G1	X 105	Y 105.6	F6000
G1	X 125.3	Y 105.6	E 2.94606
G1	X 125.3	Y 126.2	E 3.55295
G1	X 104.7	Y 126.2	E 4.15983
G1	X 104.7	Y 105.6	E 4.76672
;ekswterikh			
G1	X 104.7	Y 105.3	F6000
G1	X 125.6	Y 105.3	E 5.38245
G1	X 125.6	Y 126.5	E 6.00701
G1	X 104.4	Y 126.5	E 6.63158
G1	X 104.4	Y 105.3	E 7.25614
G92		E 0.0000	
G1		E -1.0000	F 1200.00
;ORIZONTIES			

G1	X 105	Y 106.3	E0	F6000
G1				F1200
G1	X 124.943	Y 106.3	E 0.58753	F1500
G1	X 125	Y 106.393	E 0.59139	
G1	X 125	Y 106.578	E 0.59684	
G1	X 124.943	Y 106.67	E 0.6007	
G1	X 105.057	Y 106.67	E 1.18655	
G1	X 105	Y 106.763	E 1.19041	
G1	X 105	Y 106.948	E 1.19586	
G1	X 105.057	Y 107.04	E 1.19972	
G1	X 124.943	Y 107.04	E 1.78558	
G1	X 125	Y 107.133	E 1.78944	
G1	X 125	Y 107.318	E 1.79489	
G1	X 124.943	Y 107.41	E 1.79875	
G1	X 105.057	Y 107.41	E 2.3846	
G1	X 105	Y 107.503	E 2.38846	
G1	X 105	Y 107.688	E 2.39391	
G1	X 105.057	Y 107.78	E 2.39777	
G1	X 124.943	Y 107.78	E 2.98362	
G1	X 125	Y 107.873	E 2.98748	
G1	X 125	Y 108.058	E 2.99293	
G1	X 124.943	Y 108.15	E 2.99679	
G1	X 105.057	Y 108.15	E 3.58264	
G1	X 105	Y 108.243	E 3.5865	
G1	X 105	Y 108.428	E 3.59195	
G1	X 105.057	Y 108.52	E 3.59581	
G1	X 124.943	Y 108.52	E 4.18166	
G1	X 125	Y 108.613	E 4.18552	
G1	X 125	Y 108.798	E 4.19097	
G1	X 124.943	Y 108.89	E 4.19483	
G1	X 105.057	Y 108.89	E 4.78069	
G1	X 105	Y 108.983	E 4.78455	
G1	X 105	Y 109.168	E 4.79	
G1	X 105.057	Y 109.26	E 4.79386	
G1	X 124.943	Y 109.26	E 5.37971	
G1	X 125	Y 109.353	E 5.38357	
G1	X 125	Y 109.538	E 5.38902	
G1	X 124.943	Y 109.63	E 5.39288	
G1	X 105.057	Y 109.63	E 5.97873	
G1	X 105	Y 109.723	E 5.98259	
G1	X 105	Y 109.908	E 5.98804	
G1	X 105.057	Y 110	E 5.9919	
G1	X 124.943	Y 110	E 6.57775	
G1	X 125	Y 110.093	E 6.58161	
G1	X 125	Y 110.278	E 6.58706	
G1	X 124.943	Y 110.37	E 6.59092	
G1	X 105.057	Y 110.37	E 7.17677	
G1	X 105	Y 110.463	E 7.18063	
G1	X 105	Y 110.648	E 7.18608	
G1	X 105.057	Y 110.74	E 7.18994	
G1	X 124.943	Y 110.74	E 7.7758	
G1	X 125	Y 110.833	E 7.77966	
G1	X 125	Y 111.018	E 7.78511	
G1	X 124.943	Y 111.11	E 7.78897	
G1	X 105.057	Y 111.11	E 8.37482	
G1	X 105	Y 111.203	E 8.37868	
G1	X 105	Y 111.388	E 8.38413	
G1	X 105.057	Y 111.48	E 8.38799	
G1	X 124.943	Y 111.48	E 8.97384	
G1	X 125	Y 111.573	E 8.9777	
G1	X 125	Y 111.758	E 8.98315	
G1	X 124.943	Y 111.85	E 8.98701	
G1	X 105.057	Y 111.85	E 9.57286	
G1	X 105	Y 111.943	E 9.57672	
G1	X 105	Y 112.128	E 9.58217	
G1	X 105.057	Y 112.22	E 9.58603	
G1	X 124.943	Y 112.22	E 10.1719	
G1	X 125	Y 112.313	E 10.1757	
G1	X 125	Y 112.498	E 10.1812	
G1	X 124.943	Y 112.59	E 10.1851	
G1	X 105.057	Y 112.59	E 10.7709	
G1	X 105	Y 112.683	E 10.7748	
G1	X 105	Y 112.868	E 10.7802	
G1	X 105.057	Y 112.96	E 10.7841	
G1	X 124.943	Y 112.96	E 11.3699	
G1	X 125	Y 113.053	E 11.3738	
G1	X 125	Y 113.238	E 11.3792	
G1	X 124.943	Y 113.33	E 11.3831	
G1	X 105.057	Y 113.33	E 11.969	
G1	X 105	Y 113.423	E 11.9728	
G1	X 105	Y 113.608	E 11.9783	
G1	X 105.057	Y 113.7	E 11.9821	
G1	X 124.943	Y 113.7	E 12.568	
G1	X 125	Y 113.793	E 12.5718	
G1	X 125	Y 113.978	E 12.5773	
G1	X 124.943	Y 114.07	E 12.5811	
G1	X 105.07	Y 114.07	E 13.167	
G1	X 105	Y 114.163	E 13.1709	
G1	X 105	Y 114.348	E 13.1763	
G1	X 105.07	Y 114.44	E 13.1802	
G1	X 124.93	Y 114.44	E 13.766	
G1	X 125	Y 114.533	E 13.7699	
G1	X 125	Y 114.718	E 13.7753	
G1	X 124.93	Y 114.81	E 13.7792	
G1	X 105.07	Y 114.81	E 14.365	
G1	X 105	Y 114.903	E 14.3689	
G1	X 105	Y 115.088	E 14.3743	
G1	X 105.07	Y 115.18	E 14.3782	
G1	X 124.93	Y 115.18	E 14.9641	
G1	X 125	Y 115.273	E 14.9679	
G1	X 125	Y 115.458	E 14.9734	
G1	X 124.93	Y 115.55	E 14.9772	

G1	X 105.07	Y 115.55	E 15.5631
G1	X 105	Y 115.643	E 15.5669
G1	X 105	Y 115.828	E 15.5724
G1	X 105.07	Y 115.92	E 15.5763
G1	X 124.93	Y 115.92	E 16.1621
G1	X 125	Y 116.013	E 16.166
G1	X 125	Y 116.198	E 16.1714
G1	X 124.93	Y 116.29	E 16.1753
G1	X 105.07	Y 116.29	E 16.7611
G1	X 105	Y 116.383	E 16.765
G1	X 105	Y 116.568	E 16.7704
G1	X 105.07	Y 116.66	E 16.7743
G1	X 124.93	Y 116.66	E 17.3601
G1	X 125	Y 116.753	E 17.364
G1	X 125	Y 116.938	E 17.3695
G1	X 124.93	Y 117.03	E 17.3733
G1	X 105.07	Y 117.03	E 17.9592
G1	X 105	Y 117.123	E 17.963
G1	X 105	Y 117.308	E 17.9685
G1	X 105.07	Y 117.4	E 17.9723
G1	X 124.93	Y 117.4	E 18.5582
G1	X 125	Y 117.493	E 18.5621
G1	X 125	Y 117.678	E 18.5675
G1	X 124.93	Y 117.77	E 18.5714
G1	X 105.07	Y 117.77	E 19.1572
G1	X 105	Y 117.863	E 19.1611
G1	X 105	Y 118.048	E 19.1665
G1	X 105.07	Y 118.14	E 19.1704
G1	X 124.93	Y 118.14	E 19.7562
G1	X 125	Y 118.233	E 19.7601
G1	X 125	Y 118.418	E 19.7655
G1	X 124.93	Y 118.51	E 19.7694
G1	X 105.07	Y 118.51	E 20.3553
G1	X 105	Y 118.603	E 20.3591
G1	X 105	Y 118.788	E 20.3646
G1	X 105.07	Y 118.88	E 20.3684
G1	X 124.93	Y 118.88	E 20.9543
G1	X 125	Y 118.973	E 20.9581
G1	X 125	Y 119.158	E 20.9636
G1	X 124.93	Y 119.25	E 20.9674
G1	X 105.07	Y 119.25	E 21.5533
G1	X 105	Y 119.343	E 21.5572
G1	X 105	Y 119.528	E 21.5626
G1	X 105.07	Y 119.62	E 21.5665
G1	X 124.93	Y 119.62	E 22.1523
G1	X 125	Y 119.713	E 22.1562
G1	X 125	Y 119.898	E 22.1616
G1	X 124.93	Y 119.99	E 22.1655
G1	X 105.07	Y 119.99	E 22.7513
G1	X 105	Y 120.083	E 22.7552
G1	X 105	Y 120.268	E 22.7607
G1	X 105.07	Y 120.36	E 22.7645
G1	X 124.93	Y 120.36	E 23.3504
G1	X 125	Y 120.453	E 23.3542
G1	X 125	Y 120.638	E 23.3597
G1	X 124.93	Y 120.73	E 23.3635
G1	X 105.07	Y 120.73	E 23.9494
G1	X 105	Y 120.823	E 23.9532
G1	X 105	Y 121.008	E 23.9587
G1	X 105.07	Y 121.1	E 23.9626
G1	X 124.93	Y 121.1	E 24.5484
G1	X 125	Y 121.193	E 24.5523
G1	X 125	Y 121.378	E 24.5577
G1	X 124.93	Y 121.47	E 24.5616
G1	X 105.07	Y 121.47	E 25.1474
G1	X 105	Y 121.563	E 25.1513
G1	X 105	Y 121.748	E 25.1567
G1	X 105.07	Y 121.84	E 25.1606
G1	X 124.93	Y 121.84	E 25.7465
G1	X 125	Y 121.933	E 25.7503
G1	X 125	Y 122.118	E 25.7558
G1	X 124.93	Y 122.21	E 25.7596
G1	X 105.07	Y 122.21	E 26.3455
G1	X 105	Y 122.303	E 26.3493
G1	X 105	Y 122.488	E 26.3548
G1	X 105.07	Y 122.58	E 26.3586
G1	X 124.93	Y 122.58	E 26.9445
G1	X 125	Y 122.673	E 26.9484
G1	X 125	Y 122.858	E 26.9538
G1	X 124.93	Y 122.95	E 26.9577
G1	X 105.07	Y 122.95	E 27.5435
G1	X 105	Y 123.043	E 27.5474
G1	X 105	Y 123.228	E 27.5528
G1	X 105.07	Y 123.32	E 27.5567
G1	X 124.93	Y 123.32	E 28.1425
G1	X 125	Y 123.413	E 28.1464
G1	X 125	Y 123.598	E 28.1519
G1	X 124.93	Y 123.69	E 28.1557
G1	X 105.07	Y 123.69	E 28.7416
G1	X 105	Y 123.783	E 28.7454
G1	X 105	Y 123.968	E 28.7509
G1	X 105.07	Y 124.06	E 28.7547
G1	X 124.93	Y 124.06	E 29.3406
G1	X 125	Y 124.153	E 29.3444
G1	X 125	Y 124.338	E 29.3499
G1	X 124.93	Y 124.43	E 29.3538
G1	X 105.07	Y 124.43	E 29.9396
G1	X 105	Y 124.523	E 29.9435
G1	X 105	Y 124.708	E 29.9489
G1	X 105.07	Y 124.8	E 29.9528
G1	X 124.93	Y 124.8	E 30.5386
G1	X 125	Y 124.893	E 30.5425

G1	X 125	Y 125.078	E 30.5479
G1	X 124.93	Y 125.17	E 30.5518
G1	X 105.07	Y 125.17	E 31.1377
G1	X 105	Y 125.263	E 31.1415
G1	X 105	Y 125.448	E 31.1447
G1	X 105.07	Y 125.54	E 31.1508
G1	X 124.93	Y 125.54	E 31.7367
G1	X 125	Y 125.633	E 31.7405
G1	X 125	Y 125.818	E 31.746

G92 A0.00000  
G91  
G1 E-3.00000 F1200.000  
G90  
G1 X117.500 Y220.000 Z11.950 F6000.000  
T0  
M104 S0  
T1  
M104 S0

## G-κώδικας – 45°

G91  
G1 Z1.000 F200.000  
G90  
G28 X0.000 Y0.000  
G1 X117.500 Y125.000 F8000.000  
G28 Z0.000  
;SKIRT  
G1 X 70.30 Y 70.00  
G1 Z0.2 F300  
G1 X 160.00 Y 70.00 E 2.6427 F600  
G1 X 160.00 Y 150.00 E 4.9995  
G1 X 70.00 Y 150.00 E 7.6510  
G1 X 70.00 Y 70.00 E 10.0079  
  
G1 X 70.00 Y 69.70  
G1 X 160.30 Y 69.70 E 12.6682  
G1 X 160.30 Y 150.30 E 15.0428  
G1 X 69.70 Y 150.30 E 17.7120  
G1 X 69.70 Y 69.70 E 20.0865  
  
G1 X 69.70 Y 69.40  
G1 X 160.60 Y 69.40 E 22.7645  
G1 X 160.60 Y 150.30 E 25.1479  
G1 X 69.40 Y 150.30 E 27.8348  
G1 X 69.40 Y 69.40 E 30.2181  
G92 E0  
;RAFT  
;PERIMETROI  
;LAYER: -1  
;eswterikh  
G1 X 100.9 Y 100.6 F6000  
G1 Z 0.2 F300  
G1 X 129.4 Y 100.6 E 0.60311 F600  
G1 X 129.4 Y 129.4 E 1.21257  
G1 X 100.6 Y 129.4 E 1.82203  
G1 X 100.6 Y 100.6 E 2.43149  
;endiamesh  
G1 X 100.6 Y 100.3 F6000  
G1 X 129.7 Y 100.3 E 3.0473 F600  
G1 X 129.7 Y 129.7 E 3.66946  
G1 X 100.3 Y 129.7 E 4.29162  
G1 X 100.3 Y 100.3 E 4.91378  
;ekswterikh  
G1 X 100.3 Y 100 F6000  
G1 X 130 Y 100 E 5.54228 F600  
G1 X 130 Y 130 E 6.17714  
G1 X 100 Y 130 E 6.81199  
G1 X 100 Y 100 E 7.44685  
;ORIZONTIES  
G92 E0  
G1 X 100.6 Y 101.3 F6000  
G1 X 129.2 Y 101.3 E 0.60523 F1200  
G1 X 129.4 Y 101.5 E 0.61115  
G1 X 129.4 Y 102.2 E 0.62597  
G1 X 129.2 Y 102.4 E 0.63189  
G1 X 100.8 Y 102.4 E 1.23289  
G1 X 100.6 Y 102.6 E 1.23881  
G1 X 100.6 Y 103.3 E 1.25363  
G1 X 100.8 Y 103.5 E 1.25955  
G1 X 129.2 Y 103.5 E 1.86055  
G1 X 129.4 Y 103.7 E 1.86647  
G1 X 129.4 Y 104.4 E 1.88129  
G1 X 129.2 Y 104.6 E 1.88721  
G1 X 100.8 Y 104.6 E 2.48821  
G1 X 100.6 Y 104.8 E 2.49413  
G1 X 100.6 Y 105.5 E 2.50895  
G1 X 100.8 Y 105.7 E 2.51487  
G1 X 129.2 Y 105.7 E 3.11587  
G1 X 129.4 Y 105.9 E 3.12179  
G1 X 129.4 Y 106.6 E 3.13661  
G1 X 129.2 Y 106.8 E 3.14253  
G1 X 100.8 Y 106.8 E 3.74353  
G1 X 100.6 Y 107 E 3.74945  
G1 X 100.6 Y 107.7 E 3.76427  
G1 X 100.8 Y 107.9 E 3.77019  
G1 X 129.2 Y 107.9 E 4.37119  
G1 X 129.4 Y 108.1 E 4.37711  
G1 X 129.4 Y 108.8 E 4.39193

G1	X 129.2	Y 109	E 4.39785
G1	X 100.8	Y 109	E 4.99885
G1	X 100.6	Y 109.2	E 5.00477
G1	X 100.6	Y 109.9	E 5.01959
G1	X 100.8	Y 110.1	E 5.02551
G1	X 129.2	Y 110.1	E 5.62651
G1	X 129.4	Y 110.3	E 5.63243
G1	X 129.4	Y 111	E 5.64724
G1	X 129.2	Y 111.2	E 5.65317
G1	X 100.8	Y 111.2	E 6.25417
G1	X 100.6	Y 111.4	E 6.26009
G1	X 100.6	Y 112.1	E 6.2749
G1	X 100.8	Y 112.3	E 6.28083
G1	X 129.2	Y 112.3	E 6.88183
G1	X 129.4	Y 112.5	E 6.88775
G1	X 129.4	Y 113.2	E 6.90256
G1	X 129.2	Y 113.4	E 6.90849
G1	X 100.8	Y 113.4	E 7.50949
G1	X 100.6	Y 113.6	E 7.51541
G1	X 100.6	Y 114.3	E 7.53022
G1	X 100.8	Y 114.5	E 7.53615
G1	X 129.2	Y 114.5	E 8.13715
G1	X 129.4	Y 114.7	E 8.14307
G1	X 129.4	Y 115.4	E 8.15788
G1	X 129.2	Y 115.6	E 8.16381
G1	X 100.8	Y 115.6	E 8.7648
G1	X 100.6	Y 115.8	E 8.77073
G1	X 100.6	Y 116.5	E 8.78554
G1	X 100.8	Y 116.7	E 8.79147
G1	X 129.2	Y 116.7	E 9.39246
G1	X 129.4	Y 116.9	E 9.39839
G1	X 129.4	Y 117.6	E 9.4132
G1	X 129.2	Y 117.8	E 9.41913
G1	X 100.8	Y 117.8	E 10.0201
G1	X 100.6	Y 118	E 10.026
G1	X 100.6	Y 118.7	E 10.0409
G1	X 100.8	Y 118.9	E 10.0468
G1	X 129.2	Y 118.9	E 10.6478
G1	X 129.4	Y 119.1	E 10.6537
G1	X 129.4	Y 119.8	E 10.6685
G1	X 129.2	Y 120	E 10.6744
G1	X 100.8	Y 120	E 11.2754
G1	X 100.6	Y 120.2	E 11.2814
G1	X 100.6	Y 120.9	E 11.2962
G1	X 100.8	Y 121.1	E 11.3021
G1	X 129.2	Y 121.1	E 11.9031
G1	X 129.4	Y 121.3	E 11.909
G1	X 129.4	Y 122	E 11.9238
G1	X 129.2	Y 122.2	E 11.9298
G1	X 100.8	Y 122.2	E 12.5308
G1	X 100.6	Y 122.4	E 12.5367
G1	X 100.6	Y 123.1	E 12.5515
G1	X 100.8	Y 123.3	E 12.5574
G1	X 129.2	Y 123.3	E 13.1584
G1	X 129.4	Y 123.5	E 13.1643
G1	X 129.4	Y 124.2	E 13.1792
G1	X 129.2	Y 124.4	E 13.1851
G1	X 100.8	Y 124.4	E 13.7861
G1	X 100.6	Y 124.6	E 13.792
G1	X 100.6	Y 125.3	E 13.8068
G1	X 100.8	Y 125.5	E 13.8127
G1	X 129.2	Y 125.5	E 14.4137
G1	X 129.4	Y 125.7	E 14.4197
G1	X 129.4	Y 126.4	E 14.4345
G1	X 129.2	Y 126.6	E 14.4404
G1	X 100.8	Y 126.6	E 15.0414
G1	X 100.6	Y 126.8	E 15.0473
G1	X 100.6	Y 127.5	E 15.0621
G1	X 100.8	Y 127.7	E 15.0681
G1	X 129.2	Y 127.7	E 15.6691
G1	X 129.4	Y 127.9	E 15.675
G1	X 129.4	Y 128.6	E 15.6898
G1	X 129.2	Y 128.8	E 15.6957
G1	X 100.8	Y 128.8	E 16.2967
G1	X 100.6	Y 129	E 16.3026
G1	X 100.6	Y 129.2	E 16.3069

:LAYER: 0

:eswterikh

G92

G1

E 0.0000

E -1.0000 F1200

F300

G1

Z 0.4

F6000

G1

X 100.9

Y 100.6

E 0.0000 F1200

G1

X 129.4

Y 100.6

E 0.60311 F600

G1

X 129.4

Y 129.4

E 1.21257

G1

X 100.6

Y 129.4

E 1.82203

G1

X 100.6

Y 100.6

E 2.43149

:endiamesh

G1

X 100.6

Y 100.3

F6000

G1

X 129.7

Y 100.3

E 3.0473 F600

G1

X 129.7

Y 129.7

E 3.66946

G1

X 100.3

Y 129.7

E 4.29162

G1

X 100.3

Y 100.3

E 4.91378

:ekswterikh

G1

X 100.3

Y 100

F6000

G1

X 130

Y 100

E 5.54228 F600

G1

X 130

Y 130

E 6.17714

G1

X 100

Y 130

E 6.81199

G1

X 100

Y 100

E 7.44685

:KATHETES

G92 E0

G1	X 101.3	Y 100.6		F6000
G1	X 101.3	Y 129.2	E 0.60523	F1200
G1	X 101.5	Y 129.4	E 0.61115	
G1	X 102.2	Y 129.4	E 0.62597	
G1	X 102.4	Y 129.2	E 0.63189	
G1	X 102.4	Y 100.8	E 1.23289	
G1	X 102.6	Y 100.6	E 1.23881	
G1	X 103.3	Y 100.6	E 1.25363	
G1	X 103.5	Y 100.8	E 1.25955	
G1	X 103.5	Y 129.2	E 1.86055	
G1	X 103.7	Y 129.4	E 1.86647	
G1	X 104.4	Y 129.4	E 1.88129	
G1	X 104.6	Y 129.2	E 1.88721	
G1	X 104.6	Y 100.8	E 2.48821	
G1	X 104.8	Y 100.6	E 2.49413	
G1	X 105.5	Y 100.6	E 2.50895	
G1	X 105.7	Y 100.8	E 2.51487	
G1	X 105.7	Y 129.2	E 3.11587	
G1	X 105.9	Y 129.4	E 3.12179	
G1	X 106.6	Y 129.4	E 3.13661	
G1	X 106.8	Y 129.2	E 3.14253	
G1	X 106.8	Y 100.8	E 3.74353	
G1	X 107	Y 100.6	E 3.74945	
G1	X 107.7	Y 100.6	E 3.76427	
G1	X 107.9	Y 100.8	E 3.77019	
G1	X 107.9	Y 129.2	E 4.37119	
G1	X 108.1	Y 129.4	E 4.37711	
G1	X 108.8	Y 129.4	E 4.39193	
G1	X 109	Y 129.2	E 4.39785	
G1	X 109	Y 100.8	E 4.99885	
G1	X 109.2	Y 100.6	E 5.00477	
G1	X 109.9	Y 100.6	E 5.01959	
G1	X 110.1	Y 100.8	E 5.02551	
G1	X 110.1	Y 129.2	E 5.62651	
G1	X 110.3	Y 129.4	E 5.63243	
G1	X 111	Y 129.4	E 5.64724	
G1	X 111.2	Y 129.2	E 5.65317	
G1	X 111.2	Y 100.8	E 6.25417	
G1	X 111.4	Y 100.6	E 6.26009	
G1	X 112.1	Y 100.6	E 6.2749	
G1	X 112.3	Y 100.8	E 6.28083	
G1	X 112.3	Y 129.2	E 6.88183	
G1	X 112.5	Y 129.4	E 6.88775	
G1	X 113.2	Y 129.4	E 6.90256	
G1	X 113.4	Y 129.2	E 6.90849	
G1	X 113.4	Y 100.8	E 7.50949	
G1	X 113.6	Y 100.6	E 7.51541	
G1	X 114.3	Y 100.6	E 7.53022	
G1	X 114.5	Y 100.8	E 7.53615	
G1	X 114.5	Y 129.2	E 8.13715	
G1	X 114.7	Y 129.4	E 8.14307	
G1	X 115.4	Y 129.4	E 8.15788	
G1	X 115.6	Y 129.2	E 8.16381	
G1	X 115.6	Y 100.8	E 8.7648	
G1	X 115.8	Y 100.6	E 8.77073	
G1	X 116.5	Y 100.6	E 8.78554	
G1	X 116.7	Y 100.8	E 8.79147	
G1	X 116.7	Y 129.2	E 9.39246	
G1	X 116.9	Y 129.4	E 9.39839	
G1	X 117.6	Y 129.4	E 9.4132	
G1	X 117.8	Y 129.2	E 9.41913	
G1	X 117.8	Y 100.8	E 10.0201	
G1	X 118	Y 100.6	E 10.026	
G1	X 118.7	Y 100.6	E 10.0409	
G1	X 118.9	Y 100.8	E 10.0468	
G1	X 118.9	Y 129.2	E 10.6478	
G1	X 119.1	Y 129.4	E 10.6537	
G1	X 119.8	Y 129.4	E 10.6685	
G1	X 120	Y 129.2	E 10.6744	
G1	X 120	Y 100.8	E 11.2754	
G1	X 120.2	Y 100.6	E 11.2814	
G1	X 120.9	Y 100.6	E 11.2962	
G1	X 121.1	Y 100.8	E 11.3021	
G1	X 121.1	Y 129.2	E 11.9031	
G1	X 121.3	Y 129.4	E 11.909	
G1	X 122	Y 129.4	E 11.9238	
G1	X 122.2	Y 129.2	E 11.9298	
G1	X 122.2	Y 100.8	E 12.5308	
G1	X 122.4	Y 100.6	E 12.5367	
G1	X 123.1	Y 100.6	E 12.5515	
G1	X 123.3	Y 100.8	E 12.5574	
G1	X 123.3	Y 129.2	E 13.1584	
G1	X 123.5	Y 129.4	E 13.1643	
G1	X 124.2	Y 129.4	E 13.1792	
G1	X 124.4	Y 129.2	E 13.1851	
G1	X 124.4	Y 100.8	E 13.7861	
G1	X 124.6	Y 100.6	E 13.792	
G1	X 125.3	Y 100.6	E 13.8068	
G1	X 125.5	Y 100.8	E 13.8127	
G1	X 125.5	Y 129.2	E 14.4137	
G1	X 125.7	Y 129.4	E 14.4197	
G1	X 126.4	Y 129.4	E 14.4345	
G1	X 126.6	Y 129.2	E 14.4404	
G1	X 126.6	Y 100.8	E 15.0414	
G1	X 126.8	Y 100.6	E 15.0473	
G1	X 127.5	Y 100.6	E 15.0621	
G1	X 127.7	Y 100.8	E 15.0681	
G1	X 127.7	Y 129.2	E 15.6691	
G1	X 127.9	Y 129.4	E 15.675	
G1	X 128.6	Y 129.4	E 15.6898	
G1	X 128.8	Y 129.2	E 15.6957	
G1	X 128.8	Y 100.8	E 16.2967	



G1	X 129		Y 100.6		E 16.3026	
G1	X 129.2		Y 100.6		E 16.3069	
:.....:PLEGMA						
;LAYER: 1						
;PERIMETROI						
;eswterikh						
G92 E0						
G1				E -1.0000	F1200	
G1	Z 0.7					F300
G1	X 105.3		Y 105.9			F6000
G1					E0	F1200
G1	X 125		Y 105.9		E 0.58037	F200
G1	X 125		Y 125.9		E 1.16959	
G1	X 105		Y 125.9		E 1.7588	
G1	X 105		Y 105.9		E 2.34801	
;endiamesh						
G1	X 105		Y 105.6			F6000
G1	X 125.3		Y 105.6		E 2.94606	F200
G1	X 125.3		Y 126.2		E 3.55295	
G1	X 104.7		Y 126.2		E 4.15983	
G1	X 104.7		Y 105.6		E 4.76672	
;ekswterikh						
G1	X 104.7		Y 105.3			F6000
G1	X 125.6		Y 105.3		E 5.38245	F200
G1	X 125.6		Y 126.5		E 6.00701	
G1	X 104.4		Y 126.5		E 6.63158	
G1	X 104.4		Y 105.3		E 7.25614	
G92				E 0.0000		
G1				E -1.0000	F 1200.00	
;PLAGIES						
G1	X	105.000	Y	125.870		F6000
G1					E0	F400
G1	X	105.000	Y	125.500	E0.0109	
G1	X	105.400	Y	125.900	E0.027566	
G1	X	105.880	Y	125.900	E0.041707	
G1	X	105.000	Y	125.020	E0.078371	
G1	X	105.000	Y	124.540	E0.092512	
G1	X	106.360	Y	125.900	E0.149174	F600
G1	X	106.840	Y	125.900	E0.163315	
G1	X	105.000	Y	124.060	E0.239976	
G1	X	105.000	Y	123.580	E0.254117	
G1	X	107.320	Y	125.900	E0.350777	
G1	X	107.800	Y	125.900	E0.364918	
G1	X	105.000	Y	123.100	E0.481576	F900
G1	X	105.000	Y	122.620	E0.495717	
G1	X	108.280	Y	125.900	E0.632373	
G1	X	108.760	Y	125.900	E0.646515	
G1	X	105.000	Y	122.140	E0.803169	
G1	X	105.000	Y	121.660	E0.817311	
G1	X	109.240	Y	125.900	E0.993964	F1500
G1	X	109.720	Y	125.900	E1.00811	
G1	X	105.000	Y	121.180	E1.20476	
G1	X	105.000	Y	120.700	E1.2189	
G1	X	110.200	Y	125.900	E1.43555	
G1	X	110.680	Y	125.900	E1.44969	
G1	X	105.000	Y	120.220	E1.68634	
G1	X	105.000	Y	119.740	E1.70048	
G1	X	111.160	Y	125.900	E1.95713	
G1	X	111.640	Y	125.900	E1.97127	
G1	X	105.000	Y	119.260	E2.24791	
G1	X	105.000	Y	118.780	E2.26206	
G1	X	112.120	Y	125.900	E2.5587	
G1	X	112.600	Y	125.900	E2.57284	
G1	X	105.000	Y	118.300	E2.88948	
G1	X	105.000	Y	117.820	E2.90363	
G1	X	113.080	Y	125.900	E3.24027	
G1	X	113.560	Y	125.900	E3.25441	
G1	X	105.000	Y	117.340	E3.61105	
G1	X	105.000	Y	116.860	E3.62519	
G1	X	114.040	Y	125.900	E4.00183	
G1	X	114.520	Y	125.900	E4.01597	
G1	X	105.000	Y	116.380	E4.41261	
G1	X	105.000	Y	115.900	E4.42675	
G1	X	115.000	Y	125.900	E4.84338	
G1	X	115.480	Y	125.900	E4.85752	
G1	X	105.000	Y	115.420	E5.29416	
G1	X	105.000	Y	114.940	E5.3083	
G1	X	115.960	Y	125.900	E5.76493	
G1	X	116.440	Y	125.900	E5.77907	
G1	X	105.000	Y	114.460	E6.2557	
G1	X	105.000	Y	113.980	E6.26984	
G1	X	116.920	Y	125.900	E6.76647	
G1	X	117.4	Y	125.9	E6.78061	
G1	X	105	Y	113.5	E7.29724	
G1	X	105	Y	113.02	E7.31138	
G1	X	117.88	Y	125.9	E7.84801	
G1	X	118.36	Y	125.9	E7.86215	
G1	X	105	Y	112.54	E8.41878	
G1	X	105	Y	112.06	E8.43292	
G1	X	118.84	Y	125.9	E9.00954	
G1	X	119.32	Y	125.9	E9.02368	
G1	X	105	Y	111.58	E9.6203	
G1	X	105	Y	111.1	E9.63445	
G1	X	119.8	Y	125.9	E10.2511	
G1	X	120.28	Y	125.9	E10.2652	
G1	X	105	Y	110.62	E10.9018	
G1	X	105	Y	110.14	E10.916	
G1	X	120.76	Y	125.9	E11.5726	
G1	X	121.24	Y	125.9	E11.5867	
G1	X	105	Y	109.66	E12.26334	
G1	X	105	Y	109.18	E12.27748	

G1	X	121.72	Y	125.9	E12.9741
G1	X	122.2	Y	125.9	E12.98824
G1	X	105	Y	108.700	E13.70485
G1	X	105	Y	108.22	E13.71899
G1	X	122.68	Y	125.9	E14.4556
G1	X	123.16	Y	125.9	E14.4697
G1	X	105	Y	107.74	E15.2264
G1	X	105	Y	107.26	E15.2405
G1	X	123.64	Y	125.9	E16.0171
G1	X	124.12	Y	125.9	E16.0312
G1	X	105	Y	106.78	E16.8279
G1	X	105	Y	106.3	E16.842
G1	X	124.6	Y	125.9	E17.6586
G1	X	125	Y	125.9	E17.6727
G1	X	105	Y	105.9	E18.5093
G1	X	105.48	Y	105.9	E18.5235
G1	X	125	Y	125.42	E19.3368
G1	X	125	Y	124.94	E19.3509
G1	X	105.96	Y	105.9	E20.1442
G1	X	106.44	Y	105.9	E20.1583
G1	X	125	Y	124.46	E20.9316
G1	X	125	Y	123.98	E20.9457
G1	X	106.92	Y	105.9	E21.699
G1	X	107.4	Y	105.9	E21.7132
G1	X	125	Y	123.5	E22.4464
G1	X	125	Y	123.02	E22.4606
G1	X	107.88	Y	105.9	E23.1738
G1	X	108.36	Y	105.9	E23.188
G1	X	125	Y	122.54	E23.8813
G1	X	125	Y	122.06	E23.8954
G1	X	108.84	Y	105.9	E24.5687
G1	X	109.32	Y	105.9	E24.5828
G1	X	125	Y	121.58	E25.2361
G1	X	125	Y	121.1	E25.2503
G1	X	109.8	Y	105.9	E25.8835
G1	X	110.28	Y	105.9	E25.8977
G1	X	125	Y	120.62	E26.511
G1	X	125	Y	120.14	E26.5251
G1	X	110.76	Y	105.9	E27.1184
G1	X	111.24	Y	105.9	E27.1325
G1	X	125	Y	119.66	E27.7058
G1	X	125	Y	119.18	E27.72
G1	X	111.72	Y	105.9	E28.2733
G1	X	112.2	Y	105.9	E28.2874
G1	X	125	Y	118.7	E28.8207
G1	X	125	Y	118.22	E28.8348
G1	X	112.68	Y	105.9	E29.3481
G1	X	113.16	Y	105.9	E29.3623
G1	X	125	Y	117.74	E29.8556
G1	X	125	Y	117.26	E29.8697
G1	X	113.64	Y	105.9	E30.343
G1	X	114.12	Y	105.9	E30.3572
G1	X	125	Y	116.78	E30.8105
G1	X	125	Y	116.3	E30.8246
G1	X	114.6	Y	105.9	E31.2579
G1	X	115.08	Y	105.9	E31.272
G1	X	125	Y	115.82	E31.6853
G1	X	125	Y	115.34	E31.6995
G1	X	115.56	Y	105.9	E32.0928
G1	X	116.04	Y	105.9	E32.1069
G1	X	125	Y	114.86	E32.4802
G1	X	125	Y	114.38	E32.4944
G1	X	116.52	Y	105.9	E32.8477
G1	X	117	Y	105.9	E32.8618
G1	X	125	Y	113.9	E33.1951
G1	X	125	Y	113.42	E33.2093
G1	X	117.48	Y	105.9	E33.5226
G1	X	117.96	Y	105.9	E33.5367
G1	X	125	Y	112.94	E33.83
G1	X	125	Y	112.46	E33.8442
G1	X	118.44	Y	105.9	E34.1175
G1	X	118.92	Y	105.9	E34.1316
G1	X	125	Y	111.98	E34.3849
G1	X	125	Y	111.5	E34.3991
G1	X	119.4	Y	105.9	E34.6324
G1	X	119.88	Y	105.9	E34.6465
G1	X	125	Y	111.02	E34.8599
G1	X	125	Y	110.54	E34.874
G1	X	120.36	Y	105.9	E35.0673
G1	X	120.84	Y	105.9	E35.0815
G1	X	125	Y	110.06	E35.2548 F900
G1	X	125	Y	109.58	E35.2689
G1	X	121.32	Y	105.9	E35.4222
G1	X	121.8	Y	105.9	E35.4363
G1	X	125	Y	109.1	E35.5697
G1	X	125	Y	108.62	E35.5839
G1	X	122.28	Y	105.9	E35.6972 F600
G1	X	122.76	Y	105.9	E35.7113
G1	X	125	Y	108.14	E35.8046
G1	X	125	Y	107.66	E35.8188
G1	X	123.24	Y	105.9	E35.8921
G1	X	123.72	Y	105.9	E35.9063
G1	X	125	Y	107.18	E35.9596 F400
G1	X	125	Y	106.7	E35.9737
G1	X	124.2	Y	105.9	E36.0071
G1	X	124.68	Y	105.9	E36.0212
G1	X	125	Y	106.22	E36.0345
G1	X	125	Y	105.9	E36.044

;LAYER: 2  
;PERIMETROI  
;eswterikh  
G92 E0

G1			E -1.0000	F1200	
G1	Z 1				F300
G1	X 105.3	Y 105.9			F6000
G1				E0	F1200
G1	X 125	Y 105.9		E 0.58037	F200
G1	X 125	Y 125.9		E 1.16959	
G1	X 105	Y 125.9		E 1.7588	
G1	X 105	Y 105.9		E 2.34801	
:endiamesh					
G1	X 105	Y 105.6			F6000
G1	X 125.3	Y 105.6		E 2.94606	F200
G1	X 125.3	Y 126.2		E 3.55295	
G1	X 104.7	Y 126.2		E 4.15983	
G1	X 104.7	Y 105.6		E 4.76672	
:ekswterikh					
G1	X 104.7	Y 105.3			F6000
G1	X 125.6	Y 105.3		E 5.38245	F200
G1	X 125.6	Y 126.5		E 6.00701	
G1	X 104.4	Y 126.5		E 6.63158	
G1	X 104.4	Y 105.3		E 7.25614	
G92			E 0.0000		
G1			E -1.0000		F 1200.00
;KATHETES					
G1	X 105.4	Y 105.9		F6000	
G1				F1200	
G1			E0		
G1	X 105.4	Y 125.83	E0.58715		
G1	X 105.7	Y 125.9	E0.5901		
G1	X 106.3	Y 125.9	E0.60777		
G1	X 106.6	Y 125.83	E0.61072		
G1	X 106.6	Y 105.97	E1.1958		
G1	X 106.9	Y 105.9	E1.19875		
G1	X 107.5	Y 105.9	E1.21643		
G1	X 107.8	Y 105.97	E1.21937		
G1	X 107.8	Y 125.83	E1.80446		
G1	X 108.1	Y 125.9	E1.80741		
G1	X 108.7	Y 125.9	E1.82508		
G1	X 109	Y 125.83	E1.82803		
G1	X 109	Y 105.97	E2.41312		
G1	X 109.3	Y 105.9	E2.41606		
G1	X 109.9	Y 105.9	E2.43374		
G1	X 110.2	Y 105.97	E2.43668		
G1	X 110.2	Y 125.83	E3.02177		
G1	X 110.5	Y 125.9	E3.02472		
G1	X 111.1	Y 125.9	E3.04239		
G1	X 111.4	Y 125.83	E3.04534		
G1	X 111.4	Y 105.97	E3.63043		
G1	X 111.7	Y 105.9	E3.63337		
G1	X 112.3	Y 105.9	E3.65105		
G1	X 112.6	Y 105.97	E3.654		
G1	X 112.6	Y 125.83	E4.23908		
G1	X 112.9	Y 125.9	E4.24203		
G1	X 113.5	Y 125.9	E4.25971		
G1	X 113.8	Y 125.83	E4.26265		
G1	X 113.8	Y 105.97	E4.84774		
G1	X 114.1	Y 105.9	E4.85068		
G1	X 114.7	Y 105.9	E4.86836		
G1	X 115	Y 105.97	E4.87131		
G1	X 115	Y 125.83	E5.45639		
G1	X 115.3	Y 125.9	E5.45934		
G1	X 115.9	Y 125.9	E5.47702		
G1	X 116.2	Y 125.83	E5.47996		
G1	X 116.2	Y 105.97	E6.06505		
G1	X 116.5	Y 105.9	E6.068		
G1	X 117.1	Y 105.9	E6.08567		
G1	X 117.4	Y 105.97	E6.08862		
G1	X 117.4	Y 125.83	E6.67371		
G1	X 117.7	Y 125.9	E6.67665		
G1	X 118.3	Y 125.9	E6.69433		
G1	X 118.6	Y 125.83	E6.69727		
G1	X 118.6	Y 105.97	E7.28236		
G1	X 118.9	Y 105.9	E7.28531		
G1	X 119.5	Y 105.9	E7.30298		
G1	X 119.8	Y 105.97	E7.30593		
G1	X 119.8	Y 125.83	E7.89102		
G1	X 120.1	Y 125.9	E7.89396		
G1	X 120.7	Y 125.9	E7.91164		
G1	X 121	Y 125.83	E7.91459		
G1	X 121	Y 105.97	E8.49967		
G1	X 121.3	Y 105.9	E8.50262		
G1	X 121.9	Y 105.9	E8.52029		
G1	X 122.2	Y 105.97	E8.52324		
G1	X 122.2	Y 125.83	E9.10833		
G1	X 122.5	Y 125.9	E9.11127		
G1	X 123.1	Y 125.9	E9.12895		
G1	X 123.4	Y 125.83	E9.1319		
G1	X 123.4	Y 105.97	E9.71698		
G1	X 123.7	Y 105.9	E9.71993		
G1	X 124.3	Y 105.9	E9.73761		
G1	X 124.6	Y 105.97	E9.74055		
G1	X 124.6	Y 125.83	E10.3256		
G1	X 124.9	Y 125.9	E10.3286		
;LAYER: 3					
;PERIMETROI					
:eswterikh					
G92	E0				
G1			E -1.0000	F1200	
G1	Z 1.3				F300
G1	X 105.3	Y 105.9			F6000
G1				E0	F1200
G1	X 125	Y 105.9		E 0.58037	F200
G1	X 125	Y 125.9		E 1.16959	

G1	X 105		Y 125.9		E 1.7588	
G1	X 105		Y 105.9		E 2.34801	
;endiamesh						
G1	X 105		Y 105.6			F6000
G1	X 125.3		Y 105.6		E 2.94606	F200
G1	X 125.3		Y 126.2		E 3.55295	
G1	X 104.7		Y 126.2		E 4.15983	
G1	X 104.7		Y 105.6		E 4.76672	
;ekswterikh						
G1	X 104.7		Y 105.3			F6000
G1	X 125.6		Y 105.3		E 5.38245	F200
G1	X 125.6		Y 126.5		E 6.00701	
G1	X 104.4		Y 126.5		E 6.63158	
G1	X 104.4		Y 105.3		E 7.25614	
G92				E 0.0000		
G1				E -1.0000		F1200.00
;PLAGIES						
G1	X	105.000	Y	125.870		F6000
G1					E0	F400
G1	X	105.000	Y	125.500	E0.0109	
G1	X	105.400	Y	125.900	E0.027566	
G1	X	105.880	Y	125.900	E0.041707	
G1	X	105.000	Y	125.020	E0.078371	
G1	X	105.000	Y	124.540	E0.092512	
G1	X	106.360	Y	125.900	E0.149174	F600
G1	X	106.840	Y	125.900	E0.163315	
G1	X	105.000	Y	124.060	E0.239976	
G1	X	105.000	Y	123.580	E0.254117	
G1	X	107.320	Y	125.900	E0.350777	
G1	X	107.800	Y	125.900	E0.364918	
G1	X	105.000	Y	123.100	E0.481576	F900
G1	X	105.000	Y	122.620	E0.495717	
G1	X	108.280	Y	125.900	E0.632373	
G1	X	108.760	Y	125.900	E0.646515	
G1	X	105.000	Y	122.140	E0.803169	
G1	X	105.000	Y	121.660	E0.817311	
G1	X	109.240	Y	125.900	E0.993964	F1500
G1	X	109.720	Y	125.900	E1.00811	
G1	X	105.000	Y	121.180	E1.20476	
G1	X	105.000	Y	120.700	E1.2189	
G1	X	110.200	Y	125.900	E1.43555	
G1	X	110.680	Y	125.900	E1.44969	
G1	X	105.000	Y	120.220	E1.68634	
G1	X	105.000	Y	119.740	E1.70048	
G1	X	111.160	Y	125.900	E1.95713	
G1	X	111.640	Y	125.900	E1.97127	
G1	X	105.000	Y	119.260	E2.24791	
G1	X	105.000	Y	118.780	E2.26206	
G1	X	112.120	Y	125.900	E2.5587	
G1	X	112.600	Y	125.900	E2.57284	
G1	X	105.000	Y	118.300	E2.88948	
G1	X	105.000	Y	117.820	E2.90363	
G1	X	113.080	Y	125.900	E3.24027	
G1	X	113.560	Y	125.900	E3.25441	
G1	X	105.000	Y	117.340	E3.61105	
G1	X	105.000	Y	116.860	E3.62519	
G1	X	114.040	Y	125.900	E4.00183	
G1	X	114.520	Y	125.900	E4.01597	
G1	X	105.000	Y	116.380	E4.41261	
G1	X	105.000	Y	115.900	E4.42675	
G1	X	115.000	Y	125.900	E4.84338	
G1	X	115.480	Y	125.900	E4.85752	
G1	X	105.000	Y	115.420	E5.29416	
G1	X	105.000	Y	114.940	E5.3083	
G1	X	115.960	Y	125.900	E5.76493	
G1	X	116.440	Y	125.900	E5.77907	
G1	X	105.000	Y	114.460	E6.2557	
G1	X	105.000	Y	113.980	E6.26984	
G1	X	116.920	Y	125.900	E6.76647	
G1	X	117.4	Y	125.9	E6.78061	
G1	X	105	Y	113.5	E7.29724	
G1	X	105	Y	113.02	E7.31138	
G1	X	117.88	Y	125.9	E7.84801	
G1	X	118.36	Y	125.9	E7.86215	
G1	X	105	Y	112.54	E8.41878	
G1	X	105	Y	112.06	E8.43292	
G1	X	118.84	Y	125.9	E9.00954	
G1	X	119.32	Y	125.9	E9.02368	
G1	X	105	Y	111.58	E9.6203	
G1	X	105	Y	111.1	E9.63445	
G1	X	119.8	Y	125.9	E10.2511	
G1	X	120.28	Y	125.9	E10.2652	
G1	X	105	Y	110.62	E10.9018	
G1	X	105	Y	110.14	E10.916	
G1	X	120.76	Y	125.9	E11.5726	
G1	X	121.24	Y	125.9	E11.5867	
G1	X	105	Y	109.66	E12.26334	
G1	X	105	Y	109.18	E12.27748	
G1	X	121.72	Y	125.9	E12.9741	
G1	X	122.2	Y	125.9	E12.98824	
G1	X	105	Y	108.700	E13.70485	
G1	X	105	Y	108.22	E13.71899	
G1	X	122.68	Y	125.9	E14.4556	
G1	X	123.16	Y	125.9	E14.4697	
G1	X	105	Y	107.74	E15.2264	
G1	X	105	Y	107.26	E15.2405	
G1	X	123.64	Y	125.9	E16.0171	
G1	X	124.12	Y	125.9	E16.0312	
G1	X	105	Y	106.78	E16.8279	
G1	X	105	Y	106.3	E16.842	
G1	X	124.6	Y	125.9	E17.6586	
G1	X	125	Y	125.9	E17.6727	

G1	X	105	Y	105.9	E18.5093
G1	X	105.48	Y	105.9	E18.5235
G1	X	125	Y	125.42	E19.3368
G1	X	125	Y	124.94	E19.3509
G1	X	105.96	Y	105.9	E20.1442
G1	X	106.44	Y	105.9	E20.1583
G1	X	125	Y	124.46	E20.9316
G1	X	125	Y	123.98	E20.9457
G1	X	106.92	Y	105.9	E21.699
G1	X	107.4	Y	105.9	E21.7132
G1	X	125	Y	123.5	E22.4464
G1	X	125	Y	123.02	E22.4606
G1	X	107.88	Y	105.9	E23.1738
G1	X	108.36	Y	105.9	E23.188
G1	X	125	Y	122.54	E23.8813
G1	X	125	Y	122.06	E23.8954
G1	X	108.84	Y	105.9	E24.5687
G1	X	109.32	Y	105.9	E24.5828
G1	X	125	Y	121.58	E25.2361
G1	X	125	Y	121.1	E25.2503
G1	X	109.8	Y	105.9	E25.8835
G1	X	110.28	Y	105.9	E25.8977
G1	X	125	Y	120.62	E26.511
G1	X	125	Y	120.14	E26.5251
G1	X	110.76	Y	105.9	E27.1184
G1	X	111.24	Y	105.9	E27.1325
G1	X	125	Y	119.66	E27.7058
G1	X	125	Y	119.18	E27.72
G1	X	111.72	Y	105.9	E28.2733
G1	X	112.2	Y	105.9	E28.2874
G1	X	125	Y	118.7	E28.8207
G1	X	125	Y	118.22	E28.8348
G1	X	112.68	Y	105.9	E29.3481
G1	X	113.16	Y	105.9	E29.3623
G1	X	125	Y	117.74	E29.8556
G1	X	125	Y	117.26	E29.8697
G1	X	113.64	Y	105.9	E30.343
G1	X	114.12	Y	105.9	E30.3572
G1	X	125	Y	116.78	E30.8105
G1	X	125	Y	116.3	E30.8246
G1	X	114.6	Y	105.9	E31.2579
G1	X	115.08	Y	105.9	E31.272
G1	X	125	Y	115.82	E31.6853
G1	X	125	Y	115.34	E31.6995
G1	X	115.56	Y	105.9	E32.0928
G1	X	116.04	Y	105.9	E32.1069
G1	X	125	Y	114.86	E32.4802
G1	X	125	Y	114.38	E32.4944
G1	X	116.52	Y	105.9	E32.8477
G1	X	117	Y	105.9	E32.8618
G1	X	125	Y	113.9	E33.1951
G1	X	125	Y	113.42	E33.2093
G1	X	117.48	Y	105.9	E33.5226
G1	X	117.96	Y	105.9	E33.5367
G1	X	125	Y	112.94	E33.83
G1	X	125	Y	112.46	E33.8442
G1	X	118.44	Y	105.9	E34.1175
G1	X	118.92	Y	105.9	E34.1316
G1	X	125	Y	111.98	E34.3849
G1	X	125	Y	111.5	E34.3991
G1	X	119.4	Y	105.9	E34.6324
G1	X	119.88	Y	105.9	E34.6465
G1	X	125	Y	111.02	E34.8599
G1	X	125	Y	110.54	E34.874
G1	X	120.36	Y	105.9	E35.0673
G1	X	120.84	Y	105.9	E35.0815
G1	X	125	Y	110.06	E35.2548 F900
G1	X	125	Y	109.58	E35.2689
G1	X	121.32	Y	105.9	E35.4222
G1	X	121.8	Y	105.9	E35.4363
G1	X	125	Y	109.1	E35.5697
G1	X	125	Y	108.62	E35.5839
G1	X	122.28	Y	105.9	E35.6972 F600
G1	X	122.76	Y	105.9	E35.7113
G1	X	125	Y	108.14	E35.8046
G1	X	125	Y	107.66	E35.8188
G1	X	123.24	Y	105.9	E35.8921
G1	X	123.72	Y	105.9	E35.9063
G1	X	125	Y	107.18	E35.9596 F400
G1	X	125	Y	106.7	E35.9737
G1	X	124.2	Y	105.9	E36.0071
G1	X	124.68	Y	105.9	E36.0212
G1	X	125	Y	106.22	E36.0345
G1	X	125	Y	105.9	E36.044
			:		
			:		

:LAYER: 66  
:PERIMETROI

;eswterikh  
G92 E0

G1				E -1.0000	F1200	
G1	Z 20.2					F300
G1	X 105.3		Y 105.9			F6000
G1					E0	F1200
G1	X 125		Y 105.9		E 0.58037	F200
G1	X 125		Y 125.9		E 1.16959	
G1	X 105		Y 125.9		E 1.7588	
G1	X 105		Y 105.9		E 2.34801	
:endiamesh						
G1	X 105		Y 105.6			F6000
G1	X 125.3		Y 105.6		E 2.94606	F200
G1	X 125.3		Y 126.2		E 3.55295	

G1	X 104.7	Y 126.2		E 4.15983	
G1	X 104.7	Y 105.6		E 4.76672	
;ekswterikh					
G1	X 104.7	Y 105.3			F6000
G1	X 125.6	Y 105.3		E 5.38245	F200
G1	X 125.6	Y 126.5		E 6.00701	
G1	X 104.4	Y 126.5		E 6.63158	
G1	X 104.4	Y 105.3		E 7.25614	
G92			E 0.0000		
G1			E -1.0000		F1200.00
;KATHETES					
G1	X 105.4	Y 105.9		F6000	
G1			E0	F1200	
G1	X 105.4	Y 125.83	E0.58715		
G1	X 105.7	Y 125.9	E0.5901		
G1	X 106.3	Y 125.9	E0.60777		
G1	X 106.6	Y 125.83	E0.61072		
G1	X 106.6	Y 105.97	E1.1958		
G1	X 106.9	Y 105.9	E1.19875		
G1	X 107.5	Y 105.9	E1.21643		
G1	X 107.8	Y 105.97	E1.21937		
G1	X 107.8	Y 125.83	E1.80446		
G1	X 108.1	Y 125.9	E1.80741		
G1	X 108.7	Y 125.9	E1.82508		
G1	X 109	Y 125.83	E1.82803		
G1	X 109	Y 105.97	E2.41312		
G1	X 109.3	Y 105.9	E2.41606		
G1	X 109.9	Y 105.9	E2.43374		
G1	X 110.2	Y 105.97	E2.43668		
G1	X 110.2	Y 125.83	E3.02177		
G1	X 110.5	Y 125.9	E3.02472		
G1	X 111.1	Y 125.9	E3.04239		
G1	X 111.4	Y 125.83	E3.04534		
G1	X 111.4	Y 105.97	E3.63043		
G1	X 111.7	Y 105.9	E3.63337		
G1	X 112.3	Y 105.9	E3.65105		
G1	X 112.6	Y 105.97	E3.654		
G1	X 112.6	Y 125.83	E4.23908		
G1	X 112.9	Y 125.9	E4.24203		
G1	X 113.5	Y 125.9	E4.25971		
G1	X 113.8	Y 125.83	E4.26265		
G1	X 113.8	Y 105.97	E4.84774		
G1	X 114.1	Y 105.9	E4.85068		
G1	X 114.7	Y 105.9	E4.86836		
G1	X 115	Y 105.97	E4.87131		
G1	X 115	Y 125.83	E5.45639		
G1	X 115.3	Y 125.9	E5.45934		
G1	X 115.9	Y 125.9	E5.47702		
G1	X 116.2	Y 125.83	E5.47996		
G1	X 116.2	Y 105.97	E6.06505		
G1	X 116.5	Y 105.9	E6.068		
G1	X 117.1	Y 105.9	E6.08567		
G1	X 117.4	Y 105.97	E6.08862		
G1	X 117.4	Y 125.83	E6.67371		
G1	X 117.7	Y 125.9	E6.67665		
G1	X 118.3	Y 125.9	E6.69433		
G1	X 118.6	Y 125.83	E6.69727		
G1	X 118.6	Y 105.97	E7.28236		
G1	X 118.9	Y 105.9	E7.28531		
G1	X 119.5	Y 105.9	E7.30298		
G1	X 119.8	Y 105.97	E7.30593		
G1	X 119.8	Y 125.83	E7.89102		
G1	X 120.1	Y 125.9	E7.89396		
G1	X 120.7	Y 125.9	E7.91164		
G1	X 121	Y 125.83	E7.91459		
G1	X 121	Y 105.97	E8.49967		
G1	X 121.3	Y 105.9	E8.50262		
G1	X 121.9	Y 105.9	E8.52029		
G1	X 122.2	Y 105.97	E8.52324		
G1	X 122.2	Y 125.83	E9.10833		
G1	X 122.5	Y 125.9	E9.11127		
G1	X 123.1	Y 125.9	E9.12895		
G1	X 123.4	Y 125.83	E9.1319		
G1	X 123.4	Y 105.97	E9.71698		
G1	X 123.7	Y 105.9	E9.71993		
G1	X 124.3	Y 105.9	E9.73761		
G1	X 124.6	Y 105.97	E9.74055		
G1	X 124.6	Y 125.83	E10.3256		
G1	X 124.9	Y 125.9	E10.3286		
;LAYER: 67					
;PERIMETROI					
;eswterikh					
G92	E0		E -1.0000	F1200	
G1	Z 20.5				F300
G1	X 105.3	Y 105.9			F6000
G1				E0	F1200
G1	X 125	Y 105.9		E 0.58037	F200
G1	X 125	Y 125.9		E 1.16959	
G1	X 105	Y 125.9		E 1.7588	
G1	X 105	Y 105.9		E 2.34801	
;endiamesh					
G1	X 105	Y 105.6			F6000
G1	X 125.3	Y 105.6		E 2.94606	F200
G1	X 125.3	Y 126.2		E 3.55295	
G1	X 104.7	Y 126.2		E 4.15983	
G1	X 104.7	Y 105.6		E 4.76672	
;ekswterikh					
G1	X 104.7	Y 105.3			F6000
G1	X 125.6	Y 105.3		E 5.38245	F200
G1	X 125.6	Y 126.5		E 6.00701	

G1						E 6.63158
G1	X 104.4		Y 126.5			E 7.25614
G92	X 104.4		Y 105.3			
G1				E 0.0000		F1200.00
				E -1.0000		
:PLAGIES						
G1	X	105.000	Y	125.870		F6000
G1					E0	F400
G1	X	105.000	Y	125.500		E0.0109
G1	X	105.400	Y	125.900		E0.027566
G1	X	105.880	Y	125.900		E0.041707
G1	X	105.000	Y	125.020		E0.078371
G1	X	105.000	Y	124.540		E0.092512
G1	X	106.360	Y	125.900		E0.149174 F600
G1	X	106.840	Y	125.900		E0.163315
G1	X	105.000	Y	124.060		E0.239976
G1	X	105.000	Y	123.580		E0.254117
G1	X	107.320	Y	125.900		E0.350777
G1	X	107.800	Y	125.900		E0.364918
G1	X	105.000	Y	123.100		E0.481576 F900
G1	X	105.000	Y	122.620		E0.495717
G1	X	108.280	Y	125.900		E0.632373
G1	X	108.760	Y	125.900		E0.646515
G1	X	105.000	Y	122.140		E0.803169
G1	X	105.000	Y	121.660		E0.817311
G1	X	109.240	Y	125.900		E0.993964 F1500
G1	X	109.720	Y	125.900		E1.00811
G1	X	105.000	Y	121.180		E1.20476
G1	X	105.000	Y	120.700		E1.2189
G1	X	110.200	Y	125.900		E1.43555
G1	X	110.680	Y	125.900		E1.44969
G1	X	105.000	Y	120.220		E1.68634
G1	X	105.000	Y	119.740		E1.70048
G1	X	111.160	Y	125.900		E1.95713
G1	X	111.640	Y	125.900		E1.97127
G1	X	105.000	Y	119.260		E2.24791
G1	X	105.000	Y	118.780		E2.26206
G1	X	112.120	Y	125.900		E2.5587
G1	X	112.600	Y	125.900		E2.57284
G1	X	105.000	Y	118.300		E2.88948
G1	X	105.000	Y	117.820		E2.90363
G1	X	113.080	Y	125.900		E3.24027
G1	X	113.560	Y	125.900		E3.25441
G1	X	105.000	Y	117.340		E3.61105
G1	X	105.000	Y	116.860		E3.62519
G1	X	114.040	Y	125.900		E4.00183
G1	X	114.520	Y	125.900		E4.01597
G1	X	105.000	Y	116.380		E4.41261
G1	X	105.000	Y	115.900		E4.42675
G1	X	115.000	Y	125.900		E4.84338
G1	X	115.480	Y	125.900		E4.85752
G1	X	105.000	Y	115.420		E5.29416
G1	X	105.000	Y	114.940		E5.3083
G1	X	115.960	Y	125.900		E5.76493
G1	X	116.440	Y	125.900		E5.77907
G1	X	105.000	Y	114.460		E6.2557
G1	X	105.000	Y	113.980		E6.26984
G1	X	116.920	Y	125.900		E6.76647
G1	X	117.4	Y	125.9		E6.78061
G1	X	105	Y	113.5		E7.29724
G1	X	105	Y	113.02		E7.31138
G1	X	117.88	Y	125.9		E7.84801
G1	X	118.36	Y	125.9		E7.86215
G1	X	105	Y	112.54		E8.41878
G1	X	105	Y	112.06		E8.43292
G1	X	118.84	Y	125.9		E9.00954
G1	X	119.32	Y	125.9		E9.02368
G1	X	105	Y	111.58		E9.6203
G1	X	105	Y	111.1		E9.63445
G1	X	119.8	Y	125.9		E10.2511
G1	X	120.28	Y	125.9		E10.2652
G1	X	105	Y	110.62		E10.9018
G1	X	105	Y	110.14		E10.916
G1	X	120.76	Y	125.9		E11.5726
G1	X	121.24	Y	125.9		E11.5867
G1	X	105	Y	109.66		E12.26334
G1	X	105	Y	109.18		E12.27748
G1	X	121.72	Y	125.9		E12.9741
G1	X	122.2	Y	125.9		E12.98824
G1	X	105	Y	108.700		E13.70485
G1	X	105	Y	108.22		E13.71899
G1	X	122.68	Y	125.9		E14.4556
G1	X	123.16	Y	125.9		E14.4697
G1	X	105	Y	107.74		E15.2264
G1	X	105	Y	107.26		E15.2405
G1	X	123.64	Y	125.9		E16.0171
G1	X	124.12	Y	125.9		E16.0312
G1	X	105	Y	106.78		E16.8279
G1	X	105	Y	106.3		E16.842
G1	X	124.6	Y	125.9		E17.6586
G1	X	125	Y	125.9		E17.6727
G1	X	105	Y	105.9		E18.5093
G1	X	105.48	Y	105.9		E18.5235
G1	X	125	Y	125.42		E19.3368
G1	X	125	Y	124.94		E19.3509
G1	X	105.96	Y	105.9		E20.1442
G1	X	106.44	Y	105.9		E20.1583
G1	X	125	Y	124.46		E20.9316
G1	X	125	Y	123.98		E20.9457
G1	X	106.92	Y	105.9		E21.699
G1	X	107.4	Y	105.9		E21.7132
G1	X	125	Y	123.5		E22.4464
G1	X	125	Y	123.02		E22.4606

G1	X	107.88	Y	105.9	E23.1738
G1	X	108.36	Y	105.9	E23.188
G1	X	125	Y	122.54	E23.8813
G1	X	125	Y	122.06	E23.8954
G1	X	108.84	Y	105.9	E24.5687
G1	X	109.32	Y	105.9	E24.5828
G1	X	125	Y	121.58	E25.2361
G1	X	125	Y	121.1	E25.2503
G1	X	109.8	Y	105.9	E25.8835
G1	X	110.28	Y	105.9	E25.8977
G1	X	125	Y	120.62	E26.511
G1	X	125	Y	120.14	E26.5251
G1	X	110.76	Y	105.9	E27.1184
G1	X	111.24	Y	105.9	E27.1325
G1	X	125	Y	119.66	E27.7058
G1	X	125	Y	119.18	E27.72
G1	X	111.72	Y	105.9	E28.2733
G1	X	112.2	Y	105.9	E28.2874
G1	X	125	Y	118.7	E28.8207
G1	X	125	Y	118.22	E28.8348
G1	X	112.68	Y	105.9	E29.3481
G1	X	113.16	Y	105.9	E29.3623
G1	X	125	Y	117.74	E29.8556
G1	X	125	Y	117.26	E29.8697
G1	X	113.64	Y	105.9	E30.343
G1	X	114.12	Y	105.9	E30.3572
G1	X	125	Y	116.78	E30.8105
G1	X	125	Y	116.3	E30.8246
G1	X	114.6	Y	105.9	E31.2579
G1	X	115.08	Y	105.9	E31.272
G1	X	125	Y	115.82	E31.6853
G1	X	125	Y	115.34	E31.6995
G1	X	115.56	Y	105.9	E32.0928
G1	X	116.04	Y	105.9	E32.1069
G1	X	125	Y	114.86	E32.4802
G1	X	125	Y	114.38	E32.4944
G1	X	116.52	Y	105.9	E32.8477
G1	X	117	Y	105.9	E32.8618
G1	X	125	Y	113.9	E33.1951
G1	X	125	Y	113.42	E33.2093
G1	X	117.48	Y	105.9	E33.5226
G1	X	117.96	Y	105.9	E33.5367
G1	X	125	Y	112.94	E33.83
G1	X	125	Y	112.46	E33.8442
G1	X	118.44	Y	105.9	E34.1175
G1	X	118.92	Y	105.9	E34.1316
G1	X	125	Y	111.98	E34.3849
G1	X	125	Y	111.5	E34.3991
G1	X	119.4	Y	105.9	E34.6324
G1	X	119.88	Y	105.9	E34.6465
G1	X	125	Y	111.02	E34.8599
G1	X	125	Y	110.54	E34.874
G1	X	120.36	Y	105.9	E35.0673
G1	X	120.84	Y	105.9	E35.0815
G1	X	125	Y	110.06	E35.2548 F900
G1	X	125	Y	109.58	E35.2689
G1	X	121.32	Y	105.9	E35.4222
G1	X	121.8	Y	105.9	E35.4363
G1	X	125	Y	109.1	E35.5697
G1	X	125	Y	108.62	E35.5839
G1	X	122.28	Y	105.9	E35.6972 F600
G1	X	122.76	Y	105.9	E35.7113
G1	X	125	Y	108.14	E35.8046
G1	X	125	Y	107.66	E35.8188
G1	X	123.24	Y	105.9	E35.8921
G1	X	123.72	Y	105.9	E35.9063
G1	X	125	Y	107.18	E35.9596 F400
G1	X	125	Y	106.7	E35.9737
G1	X	124.2	Y	105.9	E36.0071
G1	X	124.68	Y	105.9	E36.0212
G1	X	125	Y	106.22	E36.0345
G1	X	125	Y	105.9	E36.044

G92 A0.00000  
G91  
G1 E-3.00000 F1200.000  
G90  
G1 X117.500 Y220.000 Z11.950 F6000.000  
T0  
M104 S0  
T1  
M104 S0