



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

**ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ  
ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ  
ΓΩΝΙΑΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΣΕ  
ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ FFF**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΝΕΚΤΑΡΙΟΣ -ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΚΑΡΡΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ ΣΧΟΛΗΣ ΙΚΑΡΩΝ

**ΕΠΙΒΛΕΨΗ:**

**Α. ΜΑΡΚΟΠΟΥΛΟΣ**

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**ΑΘΗΝΑ, Ιούνιος 2023**



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

**"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"**

**ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ  
ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ  
ΓΩΝΙΑΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΣΕ  
ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ FFF**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΝΕΚΤΑΡΙΟΣ -ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΚΑΡΡΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ ΣΧΟΛΗΣ ΙΚΑΡΩΝ

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

Α. ΜΑΡΚΟΠΟΥΛΟΣ, Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Κ. ΚΟΛΛΙΑ, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

**ΑΘΗΝΑ, Ιούνιος 2023**



Copyright © Νεκτάριος-Δημ Καρράς, 2023

All rights reserved. Με επιφύλαξη παντός δικαιωμάτος.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της διπλωματικής εργασίας για κερδοσκοπικούς σκοπούς πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο δεν δηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα.

**Ευχαριστίες**

Ολοκληρώνοντας τη παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές και επιστημονικούς συνεργάτες που συνεργάστηκαν άψογα και συνέβαλαν στην ομαλή διεξαγωγή και ολοκλήρωση του παρόντος Μεταπτυχιακού Προγράμματος, υπό τις πρωτόγνωρες συνθήκες μίας πανδημίας (COVID-19), που κανείς δεν μπορούσε να φανταστεί, παρέχοντας μας τις απαιτούμενες γνώσεις, προβληματισμούς και ανατροφοδότηση αναφορικά με την Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον επιβλέπων καθηγητή μου, κ. Άγγελο Μαρκόπουλο καθώς και τον επιστημονικό του συνεργάτη κ. Εμμανουήλ Παπάζογλου, για τη συνεχή στήριξη, ανταπόκριση και άψογη συνεργασία, αναφορικά με την εκπόνηση, συγγραφή και ολοκλήρωση της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας παρά τις δύσκολες υγειονομικές συνθήκες.

Τέλος, θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στην οικογένειά μου και τους φίλους μου για την συμπαράστασή τους και για όλα όσα μου έχουν προσφέρει στα χρόνια της ζωής και των σπουδών μου.

## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	10
Abstract .....	11
Εισαγωγή .....	12
1. Τεχνολογίες Τρισδιάστατης Εκτύπωσης .....	14
1.1. Εισαγωγή .....	14
1.2. Προσθετική Κατασκευή – Τρισδιάστατη Εκτύπωση .....	14
1.3. Σύγχρονες Εφαρμογές Προσθετικής Κατασκευής .....	18
1.4. Βασικές Μέθοδοι Προσθετικής Κατασκευής.....	21
1.4.1. Μέθοδοι Εξώθησης Υλικού .....	24
1.4.2. Μέθοδοι Στερεολιθογραφίας .....	26
1.4.3. Επιπλέον Μέθοδοι Προσθετικής Κατασκευής με Ρητίνες .....	28
1.4.4. Μέθοδοι Ψεκασμού Συνδετικών Μέσων.....	29
1.5. Επισκόπηση των Fused Filament Fabrication, FFF .....	30
1.5.1. Fused Filament Fabrication .....	30
1.5.2. Μέθοδοι για την Βελτιστοποίηση των Μηχανικών και Τριβολογικών Ιδιοτήτων των Εξαρτημάτων Πολυμερών που Εκτυπώνονται με 3D .....	30
1.5.3. Σημασία των Εξαγωνικών ή Ορθογωνικών Δομών και των Τριβολογικών Ιδιοτήτων.....	31
1.5.4. Συμπέρασμα για τη Σημασία των Κατάλληλων Παραμέτρων Διαδικασίας για την Εκτύπωση 3D και την Κάλυψη των Μηχανικών Απαιτήσεων.....	31
1.6. Σύγκριση τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής – Ανάπτυξη πρότυπων τυποποίησης .....	31
1.7. Οικονομικά στοιχεία - Βασικά πλεονεκτήματα και αδυναμίες της παραγωγής μέσω Προσθετικής Κατασκευής.....	33
2. Υλικά Εκτύπωσης.....	36
2.1. Γενικά.....	36
2.2. Πολυγαλακτικό-Οξύ (PLA) .....	38
2.3. Τρισδιάστατη εκτύπωση FDM σύνθετων υλικών PLA με ενισχύσεις βιολογικής προέλευσης .....	41
2.4. Ασυνεχείς ενισχύσεις μικροϊνών βιολογικής προέλευσης .....	44
2.5. Συνεχείς ενισχύσεις μικροϊνών βιολογικής προέλευσης .....	45
2.6. Σωματιδιακές ενισχύσεις .....	45
3. Μέτρηση Τραχύτητας.....	46
3.1. Τραχύτητα .....	46
3.2. Εφαρμογές Τραχυμέτρησης .....	46
3.3. Αρχή λειτουργίας του τραχύμετρου .....	47

3.4.	Παράμετροι τραχύτητας .....	48
3.5.	Βασικοί ορισμοί για την μέτρηση της τραχύτητας .....	49
3.6.	Μέτρηση τραχύτητας επιφάνειας – RRMS .....	50
3.7.	Τρόποι μέτρησης .....	52
3.8.	Μελέτη επιφανειακής τραχύτητας στη διεθνή βιβλιογραφία (State of the Art) .....	54
3.8.1.	Διερεύνηση της ακρίβειας διαστάσεων και της τραχύτητας επιφάνειας για τρισδιάστατα εκτυπωμένα μέρη με χρήση εκτυπωτή Multi-jet Printer .....	54
3.8.2.	Η επίδραση του ύψους του στρώματος στην τραχύτητα της επιφάνειας σε 3D Printed Polylactic Acid (PLA) με χρήση FDM 3D printing .....	56
4.	Εργαστηριακό Μέρος .....	59
4.1.	Διαδικασία .....	59
4.1.1.	Ανάλυση .....	59
4.1.2.	Ποιοτικό Πρότυπο Μετρήσεων .....	60
4.1.3.	Παρουσίαση Εκτυπωτή Low Cost – RED .....	61
4.1.4.	Παρουσίαση Εκτυπωτή High Cost - Green .....	64
4.1.5.	Συνθήκες εκτύπωσης δοκιμών .....	67
4.2.	Ανάλυση Αποτελεσμάτων .....	77
4.2.1.	Διαγράμματα Συσχέτισης .....	77
4.2.2.	Στατιστικά σημαντικά δεδομένα .....	86
4.2.2.1.	Tukey Method .....	86
4.2.2.2.	Fisher Method .....	87
4.2.2.3.	Λοιπά στατιστικά διαγράμματα .....	90
5.	Συμπεράσματα .....	92
	BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	94

## Εικόνες – Πίνακες – Διαγράμματα – Εξιιώσεις

Εικόνα 1:Υλικά με τονισμένες ιδιότητες για (A) σκληρότητα (19)], (B) ευκαμψία (23), ( C ) βιοσυμβατότητα (24)] και (D) αγωγιμότητα (22). .....	19
Εικόνα 2:Σχήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης για (A) μοντελοποίηση συντηγμένης εναπόθεσης, (B) στερεολιθογραφία και (C) επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ που είναι αντιπροσωπευτικά των διεργασιών εξώθησης, ρητίνης και σκόνης, αντίστοιχα. ....	23
Εικόνα 3: Διαδικασία 3D εκτύπωσης τύπου SLA (33). .....	27
Εικόνα 4: Επενδύσεις σε τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής (53).....	34
Εικόνα 5. Κύκλος ζωής του PLA. ....	38
Εικόνα 6.Στερεοϊσομερή λακτιδίου (59) . ....	39
Εικόνα 7: Τύποι σπλισμών βιολογικής προέλευσης που χρησιμοποιούνται σε σύνθετα υλικά FDM. ....	41
Εικόνα 8. Ταξινόμηση πηγών μικροϊνών που προέρχονται από βιολογικά προϊόντα (80)...	42
Εικόνα 9. Αντοχή σε εφελκυσμό έναντι του συντελεστή Young ασυνεχούς ενίσχυσης βιοπροερχόμενων από ίνες/σύνθετα υλικά PLA (31).....	44
Εικόνα 10: Μέτρηση Τραχύτητας.....	47
Εικόνα 11: Μεθοδολογία Μέτρησης Τραχύτητας. ....	48
Εικόνα 12:Προφίλ - Μορφολογικά χαρακτηριστικά επιφάνειας.....	52
Εικόνα 13: Χάρτης Έρευνας για τριβιολογικά χαρακτηριστικά (63). ....	58
Εικόνα 14: Εκτύπωσης RED (www.google.com) .....	61
Εικόνα 15:Εκτυπωτής Green (www.google.com).....	65
Εικόνα 16: Ρύθμιση Παραμέτρων Εκτύπωσης. [Φωτο} .....	68
Εικόνα 17: Ρύθμιση Παραμέτρων Εκτύπωσης. [Φωτο}.....	69
Εικόνα 18: Ρύθμιση Παραμέτρων Εκτύπωσης. [Φωτο}.....	69
Εικόνα 19: Ρύθμιση Παραμέτρων Εκτύπωσης. [Φωτο}.....	70
Εικόνα 20: Ρύθμιση Παραμέτρων Εκτύπωσης. [Φωτο}.....	70
Εικόνα 21: Ρύθμιση Παραμέτρων Εκτύπωσης. [Φωτο}.....	71
Εικόνα 22: Ρύθμιση Παραμέτρων Εκτύπωσης. [Φωτο}.....	71
Εικόνα 23: Ρύθμιση Παραμέτρων Εκτύπωσης. [Φωτο}.....	72
Εικόνα 24: Ρύθμιση Παραμέτρων Εκτύπωσης. [Φωτο}.....	72
Εικόνα 25: Ρύθμιση Παραμέτρων Εκτύπωσης. [Φωτο}.....	73
Εικόνα 26: Ρύθμιση Παραμέτρων Εκτύπωσης. [Φωτο}.....	73
Εικόνα 27: Ρύθμιση Παραμέτρων Εκτύπωσης. [Φωτο}.....	74
Εικόνα 28: Ρύθμιση Παραμέτρων Εκτύπωσης. [Φωτο}.....	74
Εικόνα 29: Μορφολογία εκτύπωσης (ASTM52902-2021). ....	75
Εικόνα 30: Τελικό Αποτέλεσμα Εκτύπωσης [Φωτογραφία]. ....	75
Εικόνα 31:Taylor Hobson Surtronic 3+ Προφιλόμετρο .....	76
Πίνακας 1: Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής ASTM52900/15. ....	22
Πίνακας 2: Υλικά Εκτύπωσης FDM.....	25
Πίνακας 3:Σύγκριση μεταξύ εμπορικά διαθέσιμων συστημάτων ΠΚ που προορίζονται για βιομηχανική παραγωγή μικρών παρτίδων προϊόντων (4)σελ28.....	32
Πίνακας 4: Βασικά Υλικά για χρήση σε FFF κατεργασία (4)σελ75.....	37



Πίνακας 5: Επίδραση διάφορων πλαστικοποιητών στη θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης, ψυχρής κρυστάλλωσης και τήξης, καθώς και στο ποσοστό κρυσταλλικότητας του PLA (4) σελ 99.....	40
Πίνακας 6: Σύμβολα και ονομασία όλων των παραμέτρων τραχύτητας.....	53
Πίνακας 7: Ιδιότητες PLA και τεχνικές προδιαγραφές.....	67
Πίνακας 8: Κύριες παράμετροι 3D εκτύπωσης.....	68
Εξίσωση 1: Τραχύτητα Επιφανείας.....	50
Εξίσωση 2: Σχετικό μήκος προφίλ επιφανείας.....	50
Εξίσωση 3: Υπολογισμός τραχύτητας Ra.....	76
Εξίσωση 4: Υπολογισμός τραχύτητας Rz.....	76
Εξίσωση 5: Υπολογισμός Συντελεστή Διακύμανσης.....	76
Διάγραμμα: 1 Διαδικασία Προσθετικής Κατασκευής (2).....	16
Διάγραμμα: 2 Το μέτρο της συνάρτησης μεταφοράς συναρτήσει του μήκους κύματος.....	51
Διάγραμμα: 3 Ra vs Angle για Back πλευρά των δύο εκτυπωτών.....	77
Διάγραμμα: 4 Cv vs Angle για Back πλευρά των δύο εκτυπωτών.....	77
Διάγραμμα: 5 Ra vs Angle για δύο πλευρές του RED εκτυπωτή.....	78
Διάγραμμα: 6 Cv vs Angle για δύο πλευρές του RED εκτυπωτή.....	79
Διάγραμμα: 7 Ra vs Angle για δύο πλευρές του GREEN εκτυπωτή.....	79
Διάγραμμα: 8 Cv vs Angle για δύο πλευρές του GREEN εκτυπωτή.....	80
Διάγραμμα: 9 Ra vs Angle για FRONT πλευρά των δύο εκτυπωτών.....	81
Διάγραμμα: 10 Cv vs Angle για FRONT πλευρά των δύο εκτυπωτών.....	81
Διάγραμμα: 11 Rz vs Angle για Back πλευρά των δύο εκτυπωτών.....	82
Διάγραμμα: 12 Cv Rz vs Angle για Back πλευρά των δύο εκτυπωτών.....	83
Διάγραμμα: 13 Rz vs Angle για FRONT πλευρά των δύο εκτυπωτών.....	83
Διάγραμμα: 14 Cv Rz vs Angle για FRONT πλευρά των δύο εκτυπωτών.....	84
Διάγραμμα: 15 Rz vs Angle για RED εκτυπωτή.....	84
Διάγραμμα: 16 Rz vs Angle για GREEN εκτυπωτή.....	85
Διάγραμμα: 17 Cv Rz vs Angle για RED εκτυπωτή.....	85
Διάγραμμα: 18 Rz vs Angle για GREEN εκτυπωτή.....	86
Διάγραμμα: 19 Στατιστικά σημαντικά με Tukey Method.....	87
Διάγραμμα: 20 Σημαντικά στατιστικά με Fisher Method.....	89

## Περίληψη

Η παρούσα έρευνα επικεντρώνεται στη σημασία της επιφανειακής τραχύτητας στην τρισδιάστατη εκτύπωση (3D Printing) και παρουσιάζει τις σύγχρονες τάσεις σε αυτόν τον τομέα. Η επιφανειακή τραχύτητα αναφέρεται στην ανομοιογένεια της επιφάνειας ενός αντικειμένου και έχει σημαντική επίδραση στη λειτουργικότητα και την αισθητική του. Οι ερευνητές και οι μηχανικοί επικεντρώνονται στην ανάπτυξη τεχνικών που μπορούν να μειώσουν την επιφανειακή τραχύτητα και να παράγουν αντικείμενα με λείες επιφάνειες, προσφέροντας καλύτερα αποτελέσματα. Η χρήση προηγμένων υλικών, όπως οι πολυμερές ρητίνες και οι μεταλλικές σκόρες, μπορεί να οδηγήσει σε πιο ακριβείς και λείες επιφάνειες. Επιφανειακές τεχνικές επεξεργασίας, όπως η λείανση και η χημική επεξεργασία, μπορούν επίσης να βελτιώσουν την επιφανειακή τραχύτητα, αφαιρώντας ατέλειες και ανωμαλίες από τις εκτυπώσεις.

Η μελέτη της επιφανειακής τραχύτητας στην τρισδιάστατη εκτύπωση συνεχίζεται να εξελίσσεται, με την ανάπτυξη νέων τεχνικών και υλικών. Αυτό ανοίγει τον δρόμο για τη δημιουργία ποιοτικών και λεπτομερών εκτυπώσεων με λείες επιφάνειες, επιτρέποντας την κατασκευή αντικειμένων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ακόμη περισσότερες εφαρμογές. Συνολικά, η μελέτη της επιφανειακής τραχύτητας στην τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί έναν σημαντικό τομέα που συνδέεται με τη βελτίωση της ποιότητας και τη διεύρυνση των δυνατοτήτων αυτής της τεχνολογίας. Με την περαιτέρω εξέλιξη των τεχνικών και των υλικών πόρων, αναμένεται να δούμε ακόμη πιο εντυπωσιακές επιφάνειες στα αντικείμενα που παράγονται με τη χρήση της 3D εκτύπωσης.

Είναι αξιοσημείωτο ότι στην παρούσα έρευνα συγκρίνουμε δύο εκτυπωτές 3D. Ένας από αυτούς είναι ένας εισαγωγικός εκτυπωτής με χαμηλό κόστος, που παρέχει οικονομική λύση για την τρισδιάστατη εκτύπωση. Παρόλο που η τιμή του είναι σχετικά χαμηλή, παρέχει βασικές δυνατότητες εκτύπωσης, ενώ η ακρίβεια και η ανάλυση εκτύπωσης μπορεί να είναι περιορισμένη σε σχέση με πιο ακριβούς εκτυπωτές. Ο δεύτερος εκτυπωτής, που ανήκει στην κατηγορία των επαγγελματικών εκτυπωτών, προσφέρει υψηλότερη ποιότητα και ακρίβεια εκτύπωσης, αλλά συνοδεύεται από υψηλότερο κόστος. Η σύγκριση αυτών των εκτυπωτών θα βοηθήσει τους χρήστες και τις επιχειρήσεις να καταλήξουν σε μια τεκμηριωμένη απόφαση σχετικά με τον εκτυπωτή που τους ταιριάζει καλύτερα, λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες, τον προϋπολογισμό και τις απαιτήσεις τους.

## Abstract

The present research focuses on the significance of surface roughness in 3D printing and presents the current trends in this field. Surface roughness refers to the unevenness of an object's surface and has a significant impact on its functionality and aesthetics. Researchers and engineers are concentrating on developing techniques that can reduce surface roughness and produce objects with smooth surfaces, offering better results. The use of advanced materials such as polymer resins and metallic powders can lead to more precise and smoother surfaces. Surface processing techniques, such as polishing and chemical treatment, can also improve surface roughness by removing imperfections and irregularities from the prints.

The study of surface roughness in 3D printing continues to evolve with the development of new techniques and materials. This opens the door to creating high-quality and detailed prints with smooth surfaces, allowing to produce objects that can be used in even more applications. Overall, the study of surface roughness in 3D printing is an important area connected to improving the quality and expanding the capabilities of this technology. With further advancements in techniques and material resources, we can expect to see even more impressive surfaces on objects produced using 3D printing.

It is noteworthy that in this research, we compare two 3D printers. One of them is an entry-level printer with a low cost, providing an economical solution for 3D printing. Although its price is relatively low, it offers basic printing capabilities, although the accuracy and resolution may be limited compared to more expensive printers. The second printer, belonging to the category of professional printers, offers higher quality and printing accuracy but comes with a higher cost. Comparing these printers will assist users and businesses in making an substantiated decision regarding the printer that best suits their needs, considering their requirements, budget, and preferences.

## Εισαγωγή

Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης (3D printing) έχει εξελιχθεί με εντυπωσιακό τρόπο τα τελευταία χρόνια, ανοίγοντας νέους ορίζοντες σε πολλούς τομείς, από τη βιομηχανία μέχρι την ιατρική και την αεροδιαστημική. Μια από τις σύγχρονες τάσεις στον χώρο της 3D εκτύπωσης είναι η μελέτη και βελτιστοποίηση της επιφανειακής τραχύτητας των εκτυπωμένων αντικειμένων. Η επιφανειακή τραχύτητα αναφέρεται στην ανομοιογένεια της επιφάνειας ενός αντικειμένου και παίζει σημαντικό ρόλο στη λειτουργικότητα και την αισθητική του. Οι ερευνητές και οι μηχανικοί επικεντρώνονται στην ανάπτυξη τεχνικών που μπορούν να μειώσουν την επιφανειακή τραχύτητα και να προσφέρουν αντικείμενα με λείες επιφάνειες, παράγοντας έτσι καλύτερα αποτελέσματα. Ένας από τους τρόπους για να επιτευχθεί αυτό είναι η βελτίωση των διαδικασιών εκτύπωσης και των υλικών που χρησιμοποιούνται. Οι προηγμένες μέθοδοι 3D εκτύπωσης, όπως η συνεχής εκτύπωση και η εκτύπωση πολυμερών, μπορούν να παράγουν αντικείμενα με πιο ομαλές επιφάνειες. Επιπλέον, η χρήση προηγμένων υλικών όπως οι πολυμερές ρητίνες και οι μεταλλικές σκόνες, μπορεί να οδηγήσει σε πιο ακριβείς και λείες επιφάνειες.

Οι επιφανειακές τεχνικές επεξεργασίας, όπως η λείανση και η χημική επεξεργασία, επίσης παίζουν σημαντικό ρόλο στην βελτίωση της επιφανειακής τραχύτητας. Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να αφαιρέσουν τις ατέλειες και τις ανωμαλίες από τις εκτυπώσεις και να δημιουργήσουν ομοιόμορφες και λαμπερές επιφάνειες. Η μελέτη της επιφανειακής τραχύτητας στην τρισδιάστατη εκτύπωση συνεχίζεται να εξελίσσεται, με νέες τεχνικές και υλικά που αναπτύσσονται συνεχώς. Αυτό ανοίγει προοπτικές για τη δημιουργία ποιοτικών και λεπτομερών εκτυπώσεων με λείες επιφάνειες, επιτρέποντας την κατασκευή αντικειμένων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ακόμη περισσότερες εφαρμογές.

Συνολικά, η μελέτη της επιφανειακής τραχύτητας στην τρισδιάστατη εκτύπωση είναι ένας σημαντικός τομέας που συνδέεται με τη βελτίωση της ποιότητας και την επέκταση των δυνατοτήτων αυτής της εκπληκτικής τεχνολογίας. Καθώς οι τεχνικές και οι υλικοί πόροι εξελίσσονται περαιτέρω, αναμένεται να δούμε ακόμη πιο εντυπωσιακές επιφάνειες στα αντικείμενα που παράγονται με τη χρήση της 3D εκτύπωσης.

Είναι αξιοσημείωτο ότι υπάρχουν εκτυπωτές 3D που παρουσιάζουν διακύμανση στο κόστος απόκτησής τους. Αυτή η ποικιλία στην διαφοροποίηση τιμών αντικατοπτρίζει την ποικιλία των διαθέσιμων τεχνολογιών, των χαρακτηριστικών και των επιδόσεων των εκτυπωτών. Αρχίζοντας από την ερασιτεχνική σειρά των εκτυπωτών 3D, μερικές φορές

αποκαλούμενων "entry-level", υπάρχουν οικονομικές επιλογές που μπορούν να αγοραστούν σε προσιτή τιμή, συνήθως κάτω από μερικές εκατοντάδες ευρώ. Αυτοί οι εκτυπωτές μπορεί να παρέχουν βασικές λειτουργίες και απλά υλικά εκτύπωσης, καθιστώντας τους κατάλληλους για ερασιτέχνες και αρχάριους χρήστες.

Από την άλλη πλευρά του φάσματος, υπάρχουν επαγγελματικές εκτυπωτικές λύσεις που μπορούν να φτάσουν σε πολύ υψηλά επίπεδα τόσο σε ακρίβεια όσο και σε τιμή. Αυτοί οι εκτυπωτές είναι συνήθως εξοπλισμένοι με προηγμένες τεχνολογίες, όπως οι εκτυπωτές πολλαπλών υλικών ή οι μεταλλικοί εκτυπωτές 3D. Τα κόστη αυτών των εκτυπωτών μπορεί να ανέρχονται σε χιλιάδες ή ακόμη και δεκάδες χιλιάδες ευρώ, καθιστώντας τους κατάλληλους για επαγγελματική χρήση και βιομηχανικές εφαρμογές. Οι επιλογές σε 3D εκτυπωτές είναι πολλές και καθένας μπορεί να βρει έναν εκτυπωτή που ταιριάζει στις ανάγκες του και στον προϋπολογισμό του. Είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη η ποιότητα, η ακρίβεια, οι υλικοί πόροι και οι δυνατότητες του εκτυπωτή πριν αποφασιστεί η αγορά τους.

Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, επικεντρωνόμαστε στη σύγκριση δύο εκτυπωτών 3D. Ο πρώτος εκτυπωτής είναι ένας εκπρόσωπος των ερασιτεχνικών επιλογών με χαμηλό κόστος, ενώ ο δεύτερος εκτυπωτής ανήκει στην κατηγορία των επαγγελματικών εκτυπωτών με υψηλότερο κόστος. Ο πρώτος εκτυπωτής, ο οποίος ανήκει στην κατηγορία των ερασιτεχνικών επιλογών, προσφέρει μια οικονομική λύση για την τρισδιάστατη εκτύπωση. Παρόλο που η τιμή του είναι σχετικά χαμηλή, παρέχει βασικές δυνατότητες εκτύπωσης και μπορεί να καλύψει τις ανάγκες αρχάριων χρηστών και ερασιτεχνών. Ωστόσο, η ακρίβεια και η ανάλυση εκτύπωσης μπορεί να είναι περιορισμένη σε σχέση με πιο ακριβούς εκτυπωτές. Ο δεύτερος εκτυπωτής, που ανήκει στην κατηγορία των επαγγελματικών εκτυπωτών, παρέχει υψηλότερη ποιότητα και ακρίβεια εκτύπωσης. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται και τα υλικά που υποστηρίζονται σε αυτόν τον εκτυπωτή είναι προηγμένα και επιτρέπουν την παραγωγή λεπτομερών και ακριβών αντικειμένων. Ωστόσο, αυτός ο επαγγελματικός εκτυπωτής διαφέρει και στο υψηλότερο κόστος του. Με τη σύγκριση αυτών των δύο εκτυπωτών, η έρευνά μας θα εξετάσει τις διαφορές σε παραμέτρους όπως η ποιότητα εκτύπωσης όσο αφορά την τραχύτητα. Αυτό θα βοηθήσει τους χρήστες και τις επιχειρήσεις να καταλήξουν σε μια ενημερωμένη απόφαση σχετικά με τον εκτυπωτή που τους ταιριάζει καλύτερα, λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες, τον προϋπολογισμό και τις απαιτήσεις τους.

# 1. Τεχνολογίες Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

## 1.1. Εισαγωγή

Κάποτε θα φάνταζε αδύνατο ο καθένας να μπορεί να αποτυπώσει τις στιγμές σε μία φωτογραφία και να την έχει διαθέσιμη παντού, όμως η πρόοδος της τεχνολογίας το έκανε να είναι δυνατόν. Το άλμα της ήταν μάλιστα τέτοιο που όχι μόνο ο καθένας μπορεί να τραβήξει την φωτογραφία του αλλά πλέον μπορεί και να την εκτυπώσει. Και όταν αναγράφεται εκτύπωση δεν εννοείται απαραίτητα πλέον η εκτύπωση σε φωτογραφικό χαρτί αλλά η χρήση εκτυπωτών για την παραγωγή του τρισδιάστατου αντικειμένου. Αυτοί οι εκτυπωτές πλέον έχουν παρεισφρήσει στην αγορά και είναι διαθέσιμοι και προσιτοί για τον καθένα. Μπορεί κανείς να βρει μοντέλα από μερικές εκατοντάδες ευρώ μέχρι και χιλιάδες. Μέσα από αυτή την εργασία θα γίνει προσπάθεια να συγκριθούν οι επιδόσεις ως προς την τραχύτητα της επιφάνειας στα εκτυπωμένα δοκίμια, δύο εκτυπωτών που βρίσκονται στην αγορά και η διαφορά τους είναι στο κόστος.

## 1.2. Προσθετική Κατασκευή – Τρισδιάστατη Εκτύπωση

Τα τελευταία χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί πραγματικά καινοτομίες στον τομέα των κατασκευών και ειδικά των μηχανουργικών κατεργασιών. Νέες μέθοδοι κατασκευής τεμαχίων αφήνουν πίσω την κλασική θεώρηση μέχρι πριν τρεις δεκαετίες, ήταν αυτή της αφαίρεσης υλικού από ένα τεμάχιο. Πλέον η νέα εποχή ορίζει την δημιουργία αντικειμένων μέσα από την διαδικασία της προσθετικής κατεργασίας. Από αυτή τη φιλοσοφία του κτισίματος υλικού με την χρήση πρώτης ύλης έχουν αρχίσει και δημιουργούνται οι εκτυπωτές τριών διαστάσεων. Με την προσθετική κατασκευή χρησιμοποιούνται πρώτες ύλες που είναι σε διάφορες καταστάσεις και μέσω μιας διαδικασίας συνεχώς επικαλύψεων δημιουργείται το τελικό προϊόν που μπορεί ακόμη και να μην χρειάζεται στην συνέχεια καμία επιφανειακή κατεργασία αποπεράτωσης.

Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές αν και στην αρχή ξεκινήσαν σαν συσκευές που ήταν πολύ ακριβές και δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν από απλούς μη εξειδικευμένους χρήστες πλέον έχουν κατακλίσει την αγορά και την καθημερινότητα. Κυρίαρχο υλικό που χρησιμοποιείται σε εκτυπώσεις είναι τα θερμοπλαστικά υλικά τα οποία μπορούν με τη θέρμανση να μεταβούν στην θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης και στην συνέχεια να μορφοποιηθούν με την επιθυμητή διαδικασία. Πλέον η τεχνολογία έχει προχωρήσει και μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τους εν λόγω εκτυπωτές ακόμη και για μέταλλα ή κεραμικά υλικά.

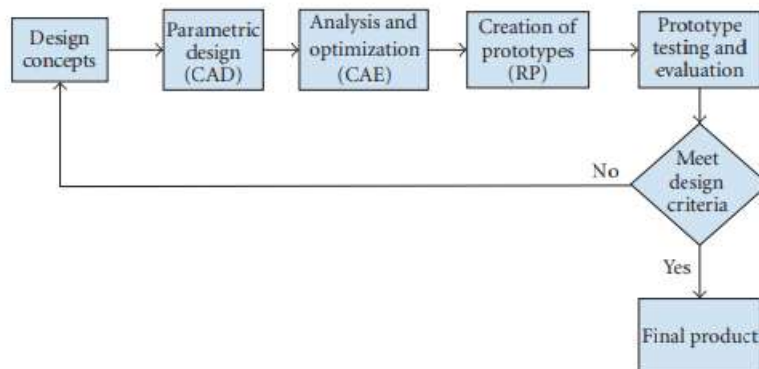
Βασική γλωσσική σύγχυση τα τελευταία χρόνια είναι στην χρήση του όρου προσθετικής κατασκευής. Με αυτή σαν ορισμός αναφέρεται σε ένα σύνολο διεργασιών που βοηθούν να κατασκευάσουμε φυσικά αντικείμενα άμεσα μέσα από ένα τρισδιάστατο σχέδιο υπολογιστή. Η «ASTM» το 2012 την όρισε ως την διαδικασία που χρησιμοποιείται για να παράγει υλικά που προκύπτουν από ένωση υλικών με διαδικασίες που ακολουθούν την εναπόθεσή τους σε επάλληλες στρώσεις. Αυτή ήρθε να αντικαταστήσει τον όρο τρισδιάστατη εκτύπωση που στην ουσία είχε παραμείνει στην κοινή γνώμη σαν η διαδικασία που χρησιμοποιείται για να παράγει ένα αντικείμενο που είναι γρήγορο και φθινό. Σήμερα, οι δύο αυτοί όροι χρησιμοποιούνται παράλληλα και ταυτόσημα με κυριαρχία στην επιστημονική κοινότητα του πρώτου (1).

Πρωτοπορία στην κατασκευή του πρώτου τρισδιάστατου εκτυπωτή είχε ο Αμερικανός Μηχανικός Chuck Hull το έτος 1984 όπου είχε σαν ερευνητικό πεδίο ενασχόλησης την φωτοσκλήρυνση σε πολυμερή υλικά που μελετούσε. Έτσι, γεννήθηκε η ιδέα να αναπτύξει ένα μηχανισμό που θα εναποθέτει υλικό σε στρώσεις και στην συνέχεια αυτές θα σκληραίνουν με σκοπό να δημιουργηθεί το τελικό αποτέλεσμα που απαιτείται (1).

Τότε στις αρχές τις δεκαετίας του 1980 είχε αρχίσει να εμφανίζεται και άλλη μια τεχνολογία που χρησιμοποιούσε την τεχνολογία CAD (Computer Aided Design) που ονομάστηκε Rapid Prototyping. Αυτή δημιουργήθηκε με πρωταρχικό στόχο να μπορέσει να βοηθήσει τους μηχανικούς που σχεδίαζαν κατασκευαστικά τμήματα να μπορούν ευκολά να αναπαράγουν και να δημιουργούν ένα προϊόν το οποίο θα μπορούν να το αξιολογούν και πρακτικά. Σύντομα αυτή η τεχνική δεν έμεινε μόνο στην εποπτική παρουσίαση μοντέλων αλλά πέρασε και στην κατασκευή βασικών εξαρτημάτων. Στόχος πλέον γίνεται πως θα είναι δυνατόν να μειωθεί το κόστος κατασκευής και να χρησιμοποιηθεί ευρέως αυτή η τεχνική. (2)  
(3)

Πλέον στην σημερινή εποχή η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μια μέθοδος προσθετικής κατασκευής που περιέχει όλες τις αυτοματοποιημένες εργασίες εναπόθεσης υλικού και μπορεί όχι μόνο να δημιουργήσει πρωτότυπα αλλά και τελικά προϊόντα. Το υλικό εναποτίθεται σε στρώσεις που το πάχος των στρώσεων κυμαίνεται από  $10^{-6}$  m μέχρι κάποιες δεκάδες εκατοστά  $10^{-2}$  m ανάλογα με την μέθοδο και το υλικό που χρησιμοποιείται καθώς και το τελικό μέγεθος της κατασκευής που επιθυμούμε να κατασκευάσουμε (4). Πλέον στις μέρες μας γίνεται αναφορά ακόμη και για κατασκευή ολόκληρων κατοικιών με την χρήση τρισδιάστατων εκτυπωτών.

Διαγραμματικά η διαδικασία που χρησιμοποιείται για να μπορέσει να περιγράψει τα βήματα που ακολουθούνται στην χρήση της Προσθετικής Κατασκευής φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα: 1 Διαδικασία Προσθετικής Κατασκευής (2)

Στην πράξη δίνονται τα κριτήρια και οι προϋποθέσεις που έχουν τεθεί για το προϊόν που είναι επιθυμητό να κατασκευαστεί και στην συνέχεια σχεδιάζεται με την βοήθεια ενός λογισμικού που φιλοξενείται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, αναλύεται ως προς τις μηχανικές ιδιότητες που και δημιουργείται το πρωτότυπο το οποίο ελέγχεται για το αν πληροί τις προϋποθέσεις. Η μεθοδολογία του Rapid Prototyping από το 2010 και μετά αρχίζει και ανακτά μεγάλη αποδοχή στην βιομηχανική περιοχή. (5) Όταν πλέον ο αριθμός των τεμαχίων που παράγονται χρησιμοποιώντας την τεχνική αυτή υπερβαίνει τον συνήθη αριθμό που χρειάζεται κάποιον μηχανικός για έλεγχο των πρωτοτύπων, τότε η διαδικασία σταματά να ονομάζεται Rapid Prototyping αλλά γίνεται πλέον προσθετική κατασκευή μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Στην μεθοδολογία της προσθετικής κατασκευής έχει αναπτυχθεί μια πληθώρα γκάμα από διεργασίες που μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να παραχθεί το επιδιωκόμενο κατασκευαστικό αποτέλεσμα. Στόχος όλων αυτών είναι να επιτύχουν με διαφορετικό τρόπο την καλύτερη δυνατή διασύνδεση του υλικού που εναποτίθεται σε στρώσεις. Με βάση αυτό το σκεπτικό υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες συστημάτων τρισδιάστατης εκτύπωσης. Στην πρώτη βρίσκονται τα Συστήματα ελεγχόμενης εναπόθεσης υλικού όπου χρησιμοποιώντας τα μέγιστα ρεολογικά χαρακτηριστικά του υλικού, αυτό ψεκάζεται ή εξωθείται σε στρώσεις μέσα από κάποιο ακροφύσιο. Στην δεύτερη μεγάλη κατηγορία περιλαμβάνονται συστήματα που χρησιμοποιούν την ελεγχόμενη συσσωμάτωση ή διασύνδεση των πρώτων υλών που έχουν εναποτεθεί στο χώρο κατασκευής των πρώτων υλών. Στην πρώτη κατηγορία χρησιμοποιείται κυρίως η θερμότητα ως μέσο για να διαμορφώσει το υλικό ενώ στην



δεύτερη κατηγορία χρησιμοποιείται ακόμη και η τεχνολογία των δεσμών laser για να μπορέσει να κατασκευαστεί το τελικό προϊόν.

Πέραν των δύο μεγάλων κατηγοριών που αναφέρονται ανωτέρω συνοπτικά με την πάροδο των ετών, οι τεχνικές AM έχουν επεκταθεί σε μοντέλα εναπόθεσης υλικού όπου έχει τηχθεί (FDM), στερεολιθογραφία (STL), 3D εκτύπωση κλίνης σκόνης και κεφαλής inkjet, επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (SLS), επιλεκτική τήξη λέιζερ (SLM), άμεση πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ μετάλλων (DMLS) και κατασκευή ελασματοποιημένων αντικειμένων (LOM). (6) Αυτές οι τεχνολογίες χρησιμοποιούνται συχνότερα επειδή επιτρέπουν την ενσωμάτωση διαφορετικών υλικών σε διάφορες εφαρμογές για την κατασκευή εξαιρετικά πολύπλοκων γεωμετρικών τμημάτων. Εξάρτημα που αποτελείται από περισσότερα από ένα υλικά δεν μπορεί να κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας συμβατικές μεθόδους όπως κοπή και χύτευση λόγω περιορισμού της μηχανής και για αυτό τον λόγο οι ανωτέρω μέθοδοι είναι πιο αποτελεσματικές και προσφέρουσες διαδικασίες (7). Εξάλλου πλέον με την χρήση αυτών των μεθοδολογιών δεν υπάρχει περιορισμός μόνο στην κατασκευή πρωτότυπων εξαρτημάτων αλλά και την χρήση των τεχνολογιών αυτών ακόμη και στην τελική αλυσίδα παραγωγής. (8)

Μια συγκεκριμένη μέθοδος που χρησιμοποιείται με την τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής, είναι η μέθοδος της εκτύπωσης τεμαχίων μέσα από την θέρμανση έτοιμων νημάτων υλικού. Αυτά εξωθούνται μέσω ενός ακροφυσίου το οποίο θερμαίνεται πάνω σε μια πλάκα και παράλληλα αυτό ακολουθεί συγκεκριμένη κίνηση στον χώρο έτσι ώστε να εκτυπώσει 3D δοκίμια. Σε αυτή την περίπτωση με τη θέρμανση που προσφέρεται στα νήματα, που είναι κατασκευασμένα από θερμοπλαστικό υλικό τα μετατρέπει σε υγρή κατάσταση. Τα μόρια του υδρογόνου και οι δυνάμεις Van der Waals μέσα στο πολυμερές σπάνε προσωρινά καθώς αυτό εκβάλλεται από το ακροφύσιο, εναποτίθεται και αποκαθίστανται όταν αυτό έρθει εκ νέου σε κατάσταση θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Ακόμη και σήμερα αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται με πολλούς μεγάλους περιορισμούς ως προς την μαζική παραγωγική διαδικασία. Ο βασικός λόγος είναι ότι δεν έχουν αποδειχθεί οι μηχανικές ιδιότητες που μπορούν να φέρουν τα τελικά προϊόντα. Ωστόσο, η επιστημονική κοινότητα είναι σε συνεχή μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων που φέρουν τα εκτυπωμένα δοκίμια και αξιολογείται συνεχώς η χρησιμότητά της μεθόδου στην μαζική παραγωγική διαδικασία. (9)

Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μια διαδικασία παραγωγής τρισδιάστατων αντικειμένων μέσα από τη διαδοχική επίστρωση υλικών. Παρόλο που κυρίως

χρησιμοποιούνται πολυμερή πλαστικά, έχουμε δει πρόοδο στην εκτύπωση μεταλλικών και κεραμικών αντικειμένων στα τελευταία χρόνια. Αυτή η διαδικασία, παρόλο που εξελίσσεται διαρκώς, μπορεί να καταταμηθεί σε τρία βασικά στάδια:

1. Αρχικά, δημιουργείται ένα τρισδιάστατο μοντέλο με τη χρήση εξειδικευμένου λογισμικού σχεδιασμού, γνωστού ως CAD (Computer Aided Design).

2. Στη συνέχεια, το μοντέλο θα συνεχίσει με μια διαδικασία γνωστή ως "slicing", δηλαδή διαιρείται σε πολλά λεπτά επίπεδα, και παράγεται ο G-code που θα κατευθύνει τον εκτυπωτή.

3. Τέλος, γίνεται η ίδια η εκτύπωση του αντικειμένου και μετά εξετάζεται το αντικείμενο για οποιαδήποτε τελική επεξεργασία που μπορεί να χρειάζεται.

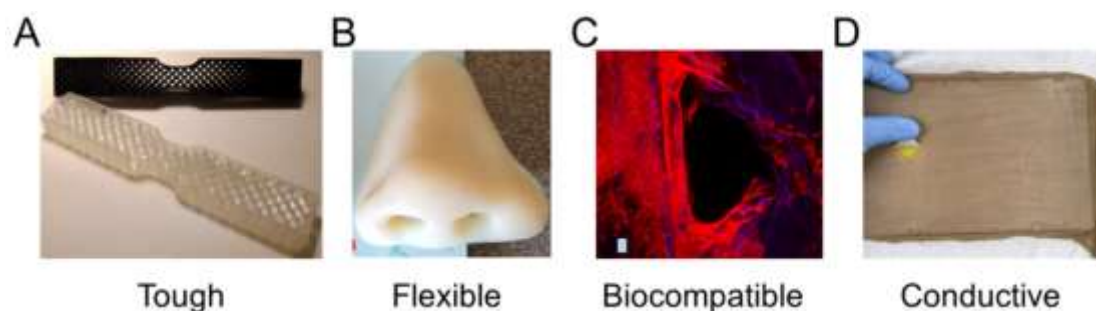
### 1.3. Σύγχρονες Εφαρμογές Προσθητικής Κατασκευής

Η 3D εκτύπωση πολυμερών έχει γίνει ταχύτατα εξελισσόμενη δύναμη τα τελευταία χρόνια, με αρκετούς ερευνητικούς τομείς να εξελίσσονται πλέον σε πρακτικά εφαρμοσμένα μηχανικά προϊόντα, ειδικότερα και στην ιατρική (1) (2) (3) (4). Η εκτύπωση πολυμερών είναι πολύτιμη για μια ευρεία γκάμα ιατρικών εφαρμογών που αντλούν οφέλη από την ποικιλομορφία των χαρακτηριστικών των πολυμερών υλικών και των μεθόδων επεξεργασίας (14) (15) (16).

Η τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί μια ιδιαίτερα προτιμώμενη τεχνική κατασκευής, καθώς δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας σχεδίων με πολύπλοκες γεωμετρίες και αρχιτεκτονικές, τα οποία δεν θα ήταν εφικτό να κατασκευαστούν με τις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής. Για παράδειγμα, οι δομές επιστρώματος ιστού που παράγονται μέσω της 3D εκτύπωσης και της στερεολιθογραφίας μπορούν να επιτύχουν ιεραρχικές μορφές που προσομοιώνουν τον ιστό του οστού, προσφέροντας έτσι υπόβαθρο για αναγέννηση των οστών(17). Επιπλέον, η επιλογή πολυμερικών υλικών για εκτύπωση έχει πλεονεκτήματα σε σχέση με την εκτύπωση μετάλλων. Για παράδειγμα μεταλλικά εμφυτεύματα που δεν αποικοδομούνται στο σώμα και οδηγούν σε σημαντικά ζητήματα όπως η θωράκιση από αλλεργίες (18).

Υπάρχουν διάφορες ιδιότητες υλικών που απαιτούνται από ιατρικές εφαρμογές που μπορούν να επιτευχθούν μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Συχνά, οι ιατρικές εφαρμογές οδηγούν την ανάγκη για ειδικές δυνατότητες υλικού, όπως η ανάγκη για υλικά απορρόφησης ενέργειας με αντοχή στην κρούση, πολύχρωμα μέρη με κατάλληλες υφές για μοντελοποίηση χειρουργικών ανατομιών ή συγκεκριμένες ιδιότητες υλικού για μίμηση βιολογικών ιστών. Η

εικόνα υπογραμμίζει πρόσφατη έρευνα σε ιατρικά πολυμερή υλικά με έμφαση στις μηχανικές ικανότητες για σκληρότητα (19) (20) και ευκαμψία (21), βιολογικές ικανότητες για βιοσυμβατότητα, και περαιτέρω δυνατότητες όπως η ηλεκτρική αγωγιμότητα (22).



Εικόνα 1:Υλικά με τονισμένες ιδιότητες για (A) σκληρότητα (19)], (B) ευκαμψία (23), (C) βιοσυμβατότητα (24)] και (D) αγωγιμότητα (22).

Η σκληρότητα σε ένα υλικό αναφέρεται στην ικανότητά του να απορροφά ενέργεια και να παραμορφώνεται πλαστικά χωρίς θραύση, η οποία υπολογίζεται από το συνδυασμό της αντοχής και της ολκιμότητας του υλικού. Πρόσφατα, μια τρισδιάστατη εκτυπωμένη ράβδος εφελκυσμού με δομές εγκάρσιας κατακόρυφης εκτύπωσης τυπώθηκε από ένα σκληρό υλικό πολυουρεθάνης με συγκρίσεις που περιλαμβάνουν φυσικώς διασυνδεδεμένο Carbothane AC-4095A σε μορφή pellet και χημικά διασταυρούμενη πολυουρεθάνη με σκληρότητα 68A σε μορφή υγρής ρητίνης (19). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι ελαστομερείς πολυουρεθάνες είναι σχετικά ανεκτικές σε αρχιτεκτονικές και εγκοπές, γεγονός που προάγει επίσης τη χρήση τους σε μια ποικιλία σχεδιαστικών στρατηγικών. Ένα περαιτέρω παράδειγμα σκληρότητας για βιοϊατρικά υλικά αποδείχθηκε με ένα μεθακρυλικό πολυμερές τυπωμένο χρησιμοποιώντας τη διαδικασία σκλήρυνσης ρητίνης με αντοχή εφελκυσμού 41 [MPa] και γενική επιμήκυνση έως και 50% πριν από τη θραύση (20). Το υλικό χρησιμοποιήθηκε για την εκτύπωση ενός συνδέσμου άξονα για ένα συγκρότημα χωρίς καμία απαραίτητη μετα-επεξεργασία λόγω της υψηλής ακρίβειας της διαδικασίας εκτύπωσης. Πρόσφατα κατασκευάστηκαν εύκαμπτα υλικά που είναι χρήσιμα, επιτρέπουν τη βελτιστοποίηση μιας συγκεκριμένης μορφής για τη μοναδική φυσιολογία ενός ατόμου μέσω τεχνολογιών σάρωσης και τοποθέτησης (23). Ο ασθενής που συμμετείχε στη μελέτη ήταν 27 ετών και υποβλήθηκε σε τοπογραφική σάρωση του προσώπου του που χρησιμοποίησε λογισμικό τρισδιάστατης χαρτογράφησης για να εκτυπώσει το σχήμα της μύτης χρησιμοποιώντας έναν εκτυπωτή πολυτζετ Stratasyς με εύκαμπτο υλικό TangoPlus. Το υλικό TangoPlus είχε σκληρότητα Shore A 26 έως 28, αντοχή εφελκυσμού 0,8 έως 1,5 [MPa] και αντοχή σε σχίσσιμο 2 έως 4 [kg/cm], ενώ είχε αίσθηση παρόμοια με το καουτσούκ. Ήταν απαραίτητος ο

επαναχρωματισμός για να ταιριάζει με τον τόνο του δέρματος του ασθενούς. Εύκαμπτα υλικά έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για την εκτύπωση πολύπλοκων κατασκευών, όπως ένα μοντέλο του πύργου του Άιφελ τυπωμένο με εύκαμπτο πολυμερές διεγερμένο από τη θερμοκρασία, τυπωμένο με στερεολιθογραφία (21). Το μοντέλο παραμορφώνεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία και καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται στους 70 [°C], η εκτύπωση ανακτά την αρχική της μορφή. Αυτή η εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία λειτουργία παρέχει δυνατότητες για ιατρικές εφαρμογές και ενεργοποίηση με θερμότητα, η οποία θα μπορούσε να εκκινηθεί από τη θερμότητα του σώματος ή συσκευές.

Η βιοσυμβατότητα είναι μια απαραίτητη ιδιότητα υλικού για εκτυπωμένες συσκευές που αλληλοεπιδρούν με το σώμα, όπως ακουστικά βαρηκοΐας ή υλικά που εμφυτεύονται *in vivo*, όπως τεχνητές αρθρώσεις ή ικρίωματα ιστού. Ανάλογα με την εφαρμογή, η βιοσυμβατότητα μπορεί να έχει διαφορετικά κριτήρια, αλλά γενικά αναφέρεται στην ανάγκη το υλικό να μην βλάπτει τον οργανισμό ενώ παράλληλα διευκολύνει την προβλεπόμενη λειτουργία του. Για τα ικρίωματα ιστών, η βιοσυμβατότητα συνήθως αναφέρεται στην ανάγκη για μη κυτταροτοξικότητα, βιοαποδομησιμότητα και προώθηση της ανάπτυξης ιστών. Η εκτύπωση Polyjet χρησιμοποιεί υλικό Stratasys MED610, το οποίο είναι ένα πολυμερές με βάση το ακρυλικό που είχε πρόσφατα επιτυχία στην εκτύπωση ικριωμάτων ιστού πολύπλοκων τοπολογιών (24). Οι βιολογικές δοκιμές διεξήχθησαν με μέτρηση της βιωσιμότητας των κυττάρων χρησιμοποιώντας κύτταρα Saos-2 που επέζησαν. Περαιτέρω δοκιμές κατέδειξαν ανάπτυξη σε επιφάνειες εκτυπωμένου ικριώματος ιστού. Ωστόσο, η ανάπτυξη ήταν περιορισμένη σε σύγκριση με άλλα υλικά μηχανικής ιστών. Μια εναλλακτική προσέγγιση είναι η χρήση στερεολιθογραφίας για τρισδιάστατα εκτυπωμένα πλέγματα χρησιμοποιώντας πολυγαλακτικό οξύ που μπορεί να σχηματίσει αξιόπιστα δομές πλέγματος με χαρακτηριστικά μικροκλίμακας (25). Απαιτούνται περαιτέρω δοκιμές για τον προσδιορισμό των πλεονεκτημάτων των 3D εκτυπωμένων πολυμερών σε συμβατικές προσεγγίσεις μηχανικής ιστών. Ωστόσο, τα πολυμερή παρέχουν άμεσα πλεονεκτήματα έναντι των μετάλλων λόγω της ικανότητάς τους να αποικοδομούνται με ασφάλεια *in vivo*.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι μια άλλη ιδιότητα υλικού που είναι χρήσιμη για ιατρικές εφαρμογές και έχει χρησιμοποιηθεί για κατασκευασμένα, αισθητηριακά ανάλογα ιστών μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης ενός οργανοπήγματος. Η τεχνολογία χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία ενός μαξιλαριού προπόνησης με ράμματα κατασκευασμένο με ενσωματωμένους πιεζοαντιστικούς αισθητήρες καταπόνησης και αγωγή νήματα ως ηλεκτρόδια για την ποσοτικοποίηση της απόδοσης του ασκούμενου (22). Τα βήματα κατασκευής περιλάμβαναν τη στερέωση νάιλον υφάσματος στον πυθμένα ενός

καλουπιού PLA, στη συνέχεια έκχυση και σκλήρυνση υγρού PDMS στο χρώμα του δέρματος, εισαγωγή αγωγίμων νημάτων στο εκτυπωμένο με 3D οργανοπήκτωμα, ενθυλάκωση αισθητήρων, προσθήκη στρώματος λίπους και κοπή του δείγματος για να σχηματιστεί το μπλοκ. Περαιτέρω ηλεκτρική αγωγιμότητα πολυμερούς έχει αποδειχθεί με θερμοπλαστικά αναμειγμένα με αγωγίμα υλικά πλήρωσης μαύρου άνθρακα για τρισδιάστατη εκτύπωση (26). Αυτές οι δυνατότητες εκτύπωσης επιτρέπουν νέους τύπους εφαρμογών σχεδιασμού που θα μπορούσαν να παρέχουν ανατροφοδότηση σε διαφορετικά ιατρικά σενάρια μέσω της ενσωμάτωσης αισθητήρων σε κατασκευασμένα σχέδια, που πιθανώς ενεργοποιούνται όταν επιτυγχάνονται ορισμένες μηχανικές σκανδάλες.

#### 1.4. Βασικές Μέθοδοι Προσθετικής Κατασκευής

Έχουν εξελιχθεί και πλέον είναι διαθέσιμες τεχνολογίες σχετικά με τον τρόπο που γίνεται η εναπόθεση και η σύνδεση μεταξύ των στρώσεων στα διάφορα στρώματα που δημιουργούνται κατά την δημιουργία των υλικών με την προσθήκη υλικού. Επίσης, κατηγοριοποιούνται και με βάση τα υλικά που χρησιμοποιούνται με βάση τις πρώτες ύλες που περιέχουν αυτά. Μπορούμε να χωρίσουμε τα συστήματα 3D εκτύπωσης σε δύο κατηγορίες:

- Τα συστήματα που ελέγχουν την εναπόθεση υλικού, όπου τα υλικά εκτυπώνονται ή ψεκάζονται από την κεφαλή του εκτυπωτή σε στρώσεις μέσα από ένα ακροφύσιο ή ένα μηχανισμό ψεκασμού.
- Τα συστήματα που ελέγχουν την εναπόθεση ή τη σύνδεση των υλικών που βρίσκονται σε δεξαμενές, είτε σε ρευστή μορφή είτε σε μορφή σκόνης. (4)

Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει μια ευρεία ποικιλία υλικών, όπως μεταλλικά κράματα, φυσικά και συνθετικά πολυμερή, κεραμικά, σύνθετα και νανοσύνθετα. Στη δεύτερη κατηγορία, όταν τα υλικά είναι σε μορφή σκόνης, η κεφαλή ή του εκτυπωτή μπορεί να κατευθύνει μια δέσμη λέιζερ για τοπική τήξη του υλικού (Selective Laser Sintering/Melting), ή να ψεκάζει συνδετικές ουσίες στην επιφάνεια της σκόνης, για τον σχηματισμό των στρώσεων του αντικειμένου. Επίσης, σε αυτήν την κατηγορία περιλαμβάνονται οι εκτυπωτές που εφαρμόζουν την στερεολιθογραφία, όπου τα τρισδιάστατα αντικείμενα δημιουργούνται μέσω της ελεγχόμενης σκλήρυνσης ρευστών ρητινών. (4)

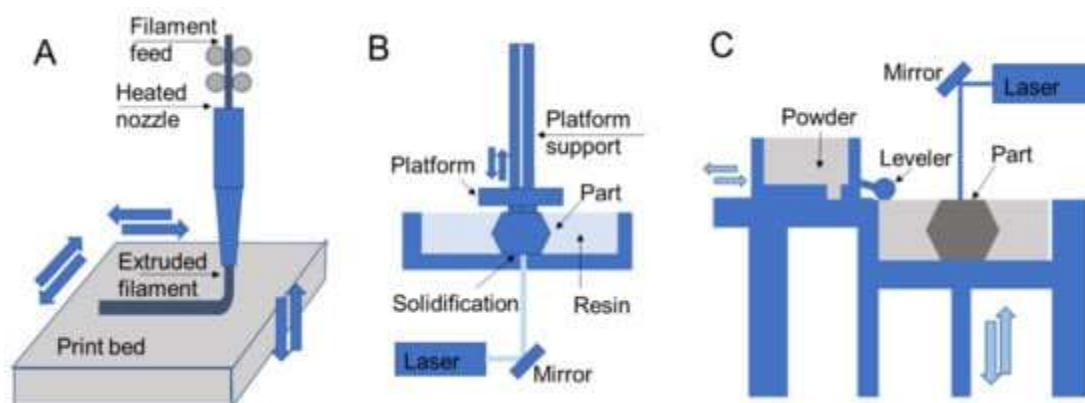
Με βάση την πρόσφατη ορολογία που καθορίστηκε από τους παγκόσμιους οργανισμούς τυποποίησης ISO και ASTM (ISO/ASTM52900 – 15), οι τεχνολογίες προσθετικής

κατασκευής χωρίζονται σε επτά βασικές κατηγορίες, που περιλαμβάνουν Vat Photopolymerisation, Material Jetting, Binder Jetting, Material Extrusion, Powder Bed Fusion, Sheet Lamination και Directed Energy Deposition.

Πίνακας 1: Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής ASTM52900/15.

	Είδος Τεχνολογίας	Σύντομη περιγραφή	Σχετιζόμενα είδη τρισδιάστατης εκτύπωσης
1	Εξώθηση Υλικού (Material Extrusion)	Εξώθηση τηγμένου υλικού προς την κεφαλή εκτύπωσης	FDM
2	Φωτοπολυμερισμός (Vat Photopolymerisation)	Φωτοπολυμερισμός ρητίνης μέσω δέσμης laser	SLA, DLP
3	Εκτόξευση υλικού (Material Jetting)	Ελεγχόμενος ψεκασμός υλικού και σκλήρυνση μέσω ακτινοβολίας	PolyJet, Nanoparticles Jetting (NPJ), Drop-On Demand (DOD)
4	Εκτόξευση συνδετικών μεσών (Binder Jetting)	Ψεκασμός συνδετικού υγρού με σκοπό την ένωση υλικού σε σκόνη	BI
5	Κλίση κόνωσης σύντηξης (Powder Bed Fusion)	Για την τήξη και τη σύντηξη σκόνης υλικού μαζί χρησιμοποιείται μια δέσμη λέιζερ ή ηλεκτρονίων	SLS, SLM, DMLS, EBM
6	Ελασματοποίηση σε φύλλα (Sheet Lamination)	Λεπτά φύλλα υλικού συνδέονται μεταξύ τους στρώμα-στρώμα για να σχηματίσουν το αντικείμενο	LOM, SLCOM
7	Κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας (Directed Energy Deposition)	Τροφοδοσία υλικού σε μια ενεργειακή πηγή για να σχηματιστεί ένα πυροσυσσωματωμένο στρώμα σε ένα υπόστρωμα	Laser-based, Electron beam-based, Plasma or Electric arc-based

Οι πιο κοινές τεχνικές για την πολυμερή τρισδιάστατη εκτύπωση περιλαμβάνουν διεργασίες εξώθησης υλικού, ρητίνης και σκόνης (1). Κάθε τύπος διεργασίας επιτρέπει την εναπόθεση προσθέτων των στρωμάτων για να σχηματίσει μέρη και πραγματοποιεί την κατασκευή χρησιμοποιώντας μοναδικά στάδια επεξεργασίας που περιορίζουν τις διαδικασίες σε διαφορετικές επιλογές υλικών και δυνατότητες σχηματισμού σχεδίων.



Εικόνα 2: Σχήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης για (A) μοντελοποίηση συντηγμένης εναπόθεσης, (B) στερεολιθογραφία και (C) επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ που είναι αντιπροσωπευτικά των διεργασιών εξώθησης, ρητίνης και σκόνης, αντίστοιχα.

Σε διαδικασίες εξώθησης, όπως η FDM, το υλικό τήκεται και εξωθείται μέσω ενός ακροφυσίου όπου κατευθύνεται για εναπόθεση για να σχηματίσει τμηματικά στρώματα Εικόνα 2 (14) (15). Η τροφοδοσία του νήματος δημιουργεί πίεση στο ακροφύσιο που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ροής του υλικού κατά τη διάρκεια της μερικής κατασκευής. Στην άμεση γραφή μελανιού, που είναι μια άλλη διαδικασία εξώθησης, το υλικό ωθείται μέσα από ένα ακροφύσιο σύμφωνα με μια εφαρμοσμένη εξωτερική τάση όπως η πίεση του αέρα ή οι κινήσεις εμβόλου (16). Η τρισδιάστατη εκτύπωση ρητίνης βασίζεται στην εφαρμογή υπεριώδους φωτός σε καθορισμένα μοτίβα για να σχηματίσει ένα μέρος στρώμα προς στρώμα με σκλήρυνση της εναποτιθέμενης υγρής ρητίνης, η οποία χρησιμοποιείται συνήθως για εκτύπωση στερεολιθογραφίας (17) (18). Στην άμεση γραφή με λέιζερ, το υπεριώδες φως κατευθύνεται προς μια δεξαμενή φωτοευαίσθητης ρητίνης για να σχηματίσει στερεά στρώματα με μια κινούμενη πλατφόρμα κατασκευής. Η τρισδιάστατη εκτύπωση σε σκόνη βασίζεται στη σύντηξη κόκκων ενός επιλεγμένου υλικού χρησιμοποιώντας λέιζερ στην επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση (19) (20) Εικόνα 2. Σε αυτές τις διεργασίες ένα στρώμα σκόνης στερεοποιείται και αναπληρώνεται στρώμα προς στρώμα για να σχηματιστεί ολόκληρο το υλικό.

#### 1.4.1. Μέθοδοι Εξώθησης Υλικού

Μεταξύ των διαδικασιών εκτύπωσης 3D με εξώθηση, η Fused Deposition Modeling (FDM) είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη (14), (15). Το υλικό τροφοδοτείται στον εκτυπωτή ως συνεχές νήμα. Το σώμα του ακροφυσίου θερμαίνεται για να λιώσει το νήμα που εξωθείται από την πίεση που δημιουργείται από την τροφοδοσία του νήματος. Μετά την εξώθηση του νήματος, το νήμα ψύχεται και στερεοποιείται για να σχηματίσει μια συμπαγή γεωμετρία. Μερικά από τα πιο κοινά υλικά εκτύπωσης για τη μοντελοποίηση συντηγμένης εναπόθεσης είναι το πολυγαλακτικό οξύ (PLA), το ακρυλονιτρίλιο βουταδιενικό στυρένιο (ABS), το τereφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET) και η θερμοπλαστική πολουρεθάνη (TPU). Διατίθενται επίσης υλικά υποστήριξης που αφαιρούνται κατά τη διάρκεια της μετα-επεξεργασίας και περιλαμβάνουν υλικά διαλυτά στο νερό όπως πολυβινυλική αλκοόλη (PVA), αποσπασμένα υλικά και κερί. Η απόδοση των τυπωμένων μερών εξαρτάται από την επιλογή υλικού και τις παραμέτρους της διαδικασίας όπως το πάχος του στρώματος, ο προσανατολισμός κατασκευής, η γωνία ράστερ, η πυκνότητα πλήρωσης (16). Η θερμοκρασία του ακροφυσίου γενικά διατηρείται σε λίγους βαθμούς υψηλότερη από το σημείο τήξης του πολυμερούς, καθώς η περαιτέρω αύξηση των θερμοκρασιών του ακροφυσίου μπορεί να επηρεάσει την απόδοση για υλικά όπως το PEEK και το PEI. Έχει αναφερθεί ότι το ποσοστό επιμήκυνσης πριν από την αστοχία και η αντοχή κρούσης ενός εξαρτήματος PEI αρχίζει να μειώνεται όταν η θερμοκρασία αυξάνεται πέρα από μια βέλτιστη θερμοκρασία ακροφυσίου (17). Από την άλλη πλευρά, οι χαμηλότερες θερμοκρασίες μπορεί να οδηγήσουν σε δυσκολία εξώθησης και κακή ποιότητα εκτύπωσης λόγω του σχηματισμού πορωδών όγκων μεταξύ των στρωμάτων (17). Επιπλέον, το μέγεθος του στρώματος παρουσιάζει συμβιβασμούς στην ανάλυση εκτύπωσης, την απόδοση μερών και την ταχύτητα εκτύπωσης, ενώ έχει ως αποτέλεσμα μεταβλητά ποσά ανισοτροπίας στις ιδιότητες τελικού εξαρτήματος που εισάγονται από τη διαμόρφωση των στρωμάτων σε καθορισμένες κατευθύνσεις.

Τα βασικά υλικά που χρησιμοποιούνται για την εκτύπωση φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. (23)



Πίνακας 2: Υλικά Εκτύπωσης FDM.

Όνομασία	Ιδιότητες	Θερμοκρασία τήξης (°C)	Θερμοκρασία επιφάνειας εκτύπωσης (°C)
PLA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Άοσμο Μικρές παραμορφώσεις</li> <li>• Φιλικό προς το περιβάλλον</li> <li>• Χαμηλές θερμοκρασίες εκτύπωσης</li> </ul>	205±15	50±10
ABS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ανθεκτικό στη θερμότητα</li> <li>• Μεγάλη Μηχανική Αντοχή</li> </ul>	225±25	100±10
PETG	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ανοχή σε φαινόμενα αποκόλλησης</li> <li>• Κατάλληλο για τρόφιμα</li> </ul>	240±20	70±10
HIPS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Διαλυτό σε Λεμονένιο</li> <li>• Παρόμοιες με αυτές του ABS</li> </ul>	235±15	95±5
Nylon	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Υψηλή αντοχή στη φθορά</li> <li>• Υψηλή ελαστικότητα</li> </ul>	240±20	90±10

Η άμεση γραφή μελάνης, γνωστή και ως «direct ink writing», είναι μια άλλη διαδικασία εκτύπωσης 3D με εξώθηση που αποφεύγει τις απαιτήσεις θέρμανσης της FDM και εναποθέτει ένα αραιωμένο ιξωδοελαστικό υλικό μέσω ενός ακροφυσίου εφαρμόζοντας εξωτερική διατμητική τάση (18) (19) (20). Δεδομένου ότι η διαδικασία επιτρέπει την εκτύπωση σε συνθήκες περιβάλλοντος, είναι ιδανική για εκτύπωση μαλακών υλικών. Καθώς αυξάνεται η διατμητική τάση, το ιξώδες της μελάνης μειώνεται και επιτρέπει την εξώθηση μέσω του ακροφυσίου. Καθώς το μελάνι εξωθείται, ανακτά το ιξώδες του για να σχηματίσει μια τρισδιάστατη δομή. Τα νήματα στοιβάζονται για να σχηματίσουν πρόσθετα το τελικό μέρος. Το τυπωμένο μέρος σκληραίνει σε διαφορετικό περιβάλλον σύμφωνα με τις απαιτήσεις του κάθε υλικού. Η άμεση γραφή με μελάνι χρησιμοποιείται για την εκτύπωση διαφορετικών υλικών, συμπεριλαμβανομένων βιομελανιών (21), μελανιών αιωρούμενων ινών (18) (20), ηλεκτρονικών/μαγνητικών μελανιών (22) και μελανιών πολλαπλών υλικών

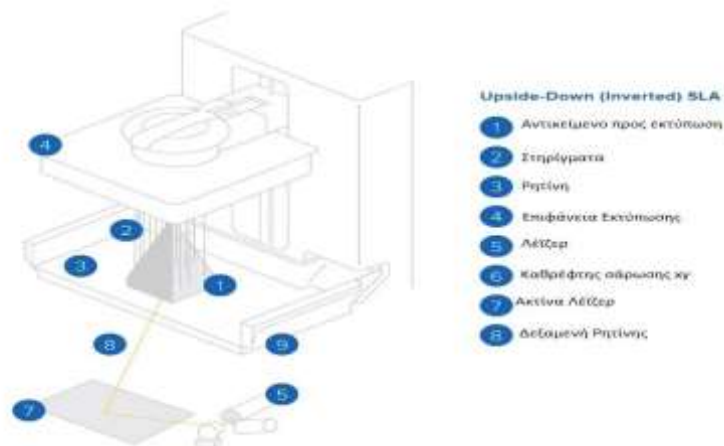
(23). Η ικανότητα εκτύπωσης διαφορετικών υλικών με άμεση γραφή με μελάνι έχει καταστήσει δυνατή την παραγωγή σχεδίων για διάφορες εφαρμογές (18) (20). Μερικά από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα πολυμερή για άμεση γραφή με μελάνι είναι το πολυδιμεθυλοσιλοξάνιο (PDMS), τα θερμοπλαστικά και τα εποξειδικά. Οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν την ικανότητα εκτύπωσης είναι το ιξώδες και η ιδιότητα αραίωσης του υλικού.

Ανάλογα με την τεχνική, τα μελάνια μπορούν να εναποτίθενται ως νήματα (pressure-assisted DIW) ή να ψεκάζονται ως μικρο- ή νανο-σταγόνες (Drop-on-Demand και Laser-Assisted DIW). (29) (30)

Στην πρώτη περίπτωση, η οποία ανήκει στην κατηγορία των τεχνικών συνεχόμενης εξώθησης υλικού, χρησιμοποιούνται μελάνια που συνήθως είναι πολυμερή διαλύματα με κολλοειδή αιωρήματα σωματιδίων υψηλού ιξώδους και μη νευτωνική συμπεριφορά. Αυτά τα υλικά υπόκεινται σε φαινόμενο διατμητικής λέπτυνσης, που σημαίνει ότι το ιξώδες τους μειώνεται όταν υπόκεινται σε διατμητικές τάσεις κατά την εξώθηση από το ακροφύσιο. Μετά την εναπόθεση, ανασχηματίζονται οι μοριακές εμπλοκές μεταξύ των πολυμερικών αλυσίδων και γίνεται αυτοσυγκρότηση υπερμοριακών δομών (self-assembly), αυξάνοντας το ιξώδες. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μερική στερεοποίηση των στρώσεων, η οποία μπορεί να ενισχυθεί περαιτέρω μέσω της δημιουργίας χημικών σταυροδεσμών μεταξύ των πολυμερικών αλυσίδων. Οι περισσότερες τεχνικές με μελάνια βασίζονται στην αύξηση του ιξώδους μέσω ελέγχου της εξάτμισης διαλυτών ή άλλων αλλαγών και διαχωρίσματος φάσεων των συστατικών του μελανιού, όπως αλλαγές στο PH και τη θερμοκρασία. (4)

#### 1.4.2. Μέθοδοι Στερεολιθογραφίας

Η Στερεολιθογραφία, η οποία εφευρέθηκε από τον Charles Hull το 1984, έχει ως αρχή λειτουργίας τον ελεγχόμενο φωτοπολυμερισμό ρευστών ρητινών μέσω δέσμης λέιζερ για τη δημιουργία των τρισδιάστατων αντικειμένων (31) (23). Η βασική διαφορά της στερεολιθογραφίας, σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η υψηλή ανάλυση εκτύπωσης, η οποία εξαρτάται από τη δέσμη λέιζερ που θα χρησιμοποιηθεί. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί φωτοπολυμερές υλικό εντός μιας δεξαμενής, το οποίο μπορεί να στερεοποιηθεί κατά την έκθεση του σε πηγή φωτός όπως ακτίνες X, γ ή την πλέον επικρατέστερη ακτινοβολία UV, η οποία βοηθά στην άμεση απορρόφηση από τη ρητίνη και οδηγεί σε ταχύτερο φωτοπολυμερισμό (32) (23)



Εικόνα 3: Διαδικασία 3D εκτύπωσης τύπου SLA (33).

Η επιφάνεια εκτύπωσης βυθίζεται στη δεξαμενή αυτή σε βάθος ίσο με το επιθυμητό πάχος και μια κεφαλή λέιζερ σαρώνει τις κατάλληλες περιοχές της επιφάνειας, όπως ορίζονται από το σχέδιο CAD. Στη συνέχεια, βυθίζεται όσο το πάχος της επόμενης διατομής και αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρις ότου ολοκληρωθεί το αντικείμενο, όπως φαίνεται στην εικόνα. Τέλος, το εκτυπωμένο αντικείμενο μπαίνει σε θάλαμο πλύσης και σκλήρυνσης.

Τα θερμοσκληρυντικά πολυμερή υλικά που χρησιμοποιούνται καλούνται συνήθως ρητίνες και μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω κατηγορίες (34)

Πίνακας 3 - – Είδη υλικών Στερεολιθογραφίας

Είδος Ρητίνης	Χρήση
Τυπικές	Γενική χρήση – Ταχεία προτυποποίηση
Μηχανολογικές	Όταν υπάρχει ανάγκη για συγκεκριμένες μηχανικές και θερμικές ιδιότητες
Οδοντιατρικές και Ιατρικές	Ορθοδοντικά μοντέλα και πιστοποιήσεις βιοσυμβατότητας
Χυτεύσεως	Μείωση προϊόντων καύσης

### 1.4.3. Επιπλέον Μέθοδοι Προσθετικής Κατασκευής με Ρητίνες

Οι διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης ρητίνης εκθέτουν φωτοευαίσθητα μονομερή σε ελεγχόμενο υπεριώδες φως ή άλλες πηγές φωτός υψηλής ενέργειας (35). Οι διαδικασίες ωρίμανσης ρητίνης συνήθως επωφελούνται από υψηλή ανάλυση και ποιοτικό φινίρισμα εξαρτημάτων σε σύγκριση με άλλες μεθόδους εκτύπωσης σε συγκρίσιμα εύρη τιμών. Οι στρατηγικές υπεριώδους σκλήρυνσης περιλαμβάνουν τη στερεολιθογραφία με άμεση γραφή με λέιζερ, την επεξεργασία ψηφιακού φωτός (DLP) (36) (37), τη συνεχή παραγωγή διεπαφής υγρού (CLIP) και τη συνεχή παραγωγή ψηφιακού φωτός (CDLM) (38), τα οποία έχουν όλες ποικίλες στρατηγικές έκθεσης μιας δεξαμενής ρητίνης στο φως για να σχηματίσουν ένα μέρος. Η εκτύπωση στερεολιθογραφίας με άμεση γραφή με λέιζερ περιλαμβάνει μια δεξαμενή ρητίνης, μια πηγή φωτός υψηλής ενέργειας και έναν ανακλαστικό καθρέφτη για τον έλεγχο της έκθεσης της ρητίνης σε ένα λέιζερ. Η ρητίνη στη δεξαμενή εκτίθεται σε ένα ελεγχόμενο από υπολογιστή λέιζερ που στερεοποιεί τη ρητίνη για να σχηματίσει ένα στερεό στρώμα. Μετά την έκθεση σε ένα στρώμα, η πλατφόρμα εκτύπωσης μετακινείται κατακόρυφα για την εκτύπωση του επόμενου στρώματος (35). Αφού εκτυπωθούν όλα τα στρώματα, το τμήμα πλένεται και ωριμάζει κάτω από υπεριώδες φως για να ενισχυθεί η δομή, η οποία παρέχει λεπτή ρύθμιση για συγκεκριμένες εφαρμογές (39). Η διάρκεια της ωρίμανσης αλλάζει τη μηχανική των τυπωμένων εξαρτημάτων, για παράδειγμα, όταν συγκρίνονται εξαρτήματα που σκληρύνθηκαν μετά την ωρίμανση για 30 ώρες με εκείνα που δεν είχαν μεταπολυμερισμό, η μεταπολυμερισμό με υπεριώδες φως ήταν πιο αποδοτική χρονικά και με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. όπως ο συντελεστής ελαστικότητας μιας και επικράτησε η προαγωγή της ομοιογένειας του υλικού μέσω υψηλότερου αριθμού σταυροδεσμών (40). Αν και η εκτύπωση στερεολιθογραφίας έχει υψηλή ανάλυση και ταχύτητα εκτύπωσης, σε γενικές γραμμές, δεν έχει δυνατότητα εκτύπωσης πολλαπλών υλικών.

Η εκτύπωση Polyjet (επίσης γνωστή ως inkjet) είναι μια εναλλακτική διαδικασία σκλήρυνσης ρητίνης που χρησιμοποιεί ένα ακροφύσιο για την εναπόθεση σταγονιδίων υλικού που ωριμάζουν αμέσως από μια υπεριώδη δέσμη κατά την εναπόθεσή τους για να σχηματίσουν ένα στρώμα (41). Η εκτύπωση Polyjet έχει πλεονεκτήματα για την ταχεία εκτύπωση μοντέλων πολλαπλών υλικών με εκτόξευση πολλαπλών ακροφυσίων, η οποία επιτρέπει επίσης την εκτύπωση με υλικά υποστήριξης (42) (43). Η εκτύπωση μελάνης έχει εφαρμογές σε τομείς που κυμαίνονται από τη δημιουργία πρωτοτύπων έως την ηλεκτρονική και τη βιοεκτύπωση (41) (43), και έχει αποδειχθεί πρόσφατα η χρήση τους σε βιοϊατρικές συσκευές που χρησιμοποιούν μηχανικά αποδοτικές δομές πλέγματος (44). Τα πλέγματα

τυπώθηκαν χρησιμοποιώντας ένα δίκτυο δοκών με διάμετρο περίπου 400μm, με ελαττώματα κατασκευής ανάλογα με το σχεδιασμό της τοπολογίας και την κατεύθυνση κατασκευής. Απαιτούνται περαιτέρω μελέτες για να καθοριστεί εάν η εκτύπωση Polyjet είναι κατάλληλη για εφαρμογές μηχανικής ιστών, με την ανάγκη περαιτέρω επίδειξης των δυνατοτήτων της με την παραγωγή δομών με δυνατότητες σποράς και πολλαπλασιασμού κυττάρων (45). Ωστόσο, η τεχνολογία παρέχει τη δυνατότητα για την ταχεία κατασκευή μεγάλων συνόλων δομών που είναι προσαρμόσιμες για συγκεκριμένους ασθενείς σε εφαρμογές όπως ο εξοπλισμός ασφαλείας.

#### 1.4.4. Μέθοδος Ψεκασμού Συνδεδειγμένων Μέσων

Οι διεργασίες σύντηξης σκόνης βασίζονται στην εναπόθεση στρώσεων σκόνης που είτε τήκονται είτε συγκολλούνται για την κατασκευή εξαρτημάτων με πρόσθετο τρόπο. Δύο κοινές τεχνικές σύντηξης σκόνης για την εκτύπωση πολυμερών είναι η επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ και η εκτόξευση συνδεδειγμένου υλικού (46). Οι αρχές λειτουργίας της επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης με λέιζερ, η οποία βασίζεται σε ένα απόθεμα σκόνης ισοπεδωμένο για να επιτρέψει τη σύντηξη ενός στρώματος μέσω της έκθεσης σε ένα λέιζερ που ακολουθεί μια καθορισμένη διαδρομή. Μόλις εκτυπωθεί ένα στρώμα, η πλατφόρμα χαμηλώνει και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης με λέιζερ είναι ότι η σκόνη που έχει απομείνει στην πλατφόρμα λειτουργεί ως στήριγμα κατά τη διάρκεια της μερικής κατασκευής. Επομένως, η διαδικασία δεν απαιτεί εκτύπωση ξεχωριστού υλικού υποστήριξης και επιτρέπει την κατασκευή πολύπλοκων εξαρτημάτων και συναρμολόγησης (20).

Στην εκτύπωση με εκτόξευση συνδεδειγμένου υλικού, ένα υλικό με εκτόξευση δεσμεύει τη σκόνη ως εναλλακτική λύση στην τήξη με λέιζερ (46). Η σκόνη απλώνεται στην πλατφόρμα εκτύπωσης μέσα σε ένα προκαθορισμένο πάχος και στη συνέχεια το συνδεδειγμένο υλικό εγχέεται για να σχηματίσει ένα συγκολλημένο στρώμα. Η τεχνική εκτόξευσης συνδεδειγμένου υλικού χρησιμοποιεί πολλαπλά ακροφύσια για την έγχυση του συνδεδειγμένου υλικού, το οποίο είναι δυνητικά ταχύτερο από την τήξη με λέιζερ. Η εκτόξευση συνδεδειγμένου υλικού είναι γενικά μια αποτελεσματική διαδικασία ικανή να εκτυπώνει πολύχρωμα και λειτουργικά υλικά με διαβαθμίσεις (47) (48). Δεδομένου ότι το συνδεδειγμένο υλικό λειτουργεί ως κόλλα για να συγκρατεί τη σκόνη μαζί και να σχηματίζει μια τυπωμένη γεωμετρία, οι ιδιότητες των τυπωμένων μερών εξαρτώνται από το συνδεδειγμένο υλικό (49) (50) (51).

## 1.5. Επισκόπηση των Fused Filament Fabrication, FFF

### 1.5.1. Fused Filament Fabrication

Η Fused Filament Fabrication (FFF), επίσης γνωστή ως Fused Deposition Modeling (FDM), είναι μια δημοφιλής διαδικασία εκτύπωσης 3D που χρησιμοποιείται στις μηχανικές και ιατρικές βιομηχανίες για την κατασκευή εξειδικευμένων λειτουργικών εξαρτημάτων. Ωστόσο, η κατανόηση της μηχανικής και τριβολογικής συμπεριφοράς διάφορων παραμέτρων επεξεργασίας, composite materials, εσωτερικών γεωμετριών και lattices μπορεί να είναι περίπλοκη, απαιτώντας μια επισκόπηση της τρέχουσας βιβλιογραφίας και έρευνας. Η τεχνολογία rapid prototyping βοηθά τις βιομηχανίες να συντομεύσουν τον χρόνο ανάπτυξης προϊόντων και να επιτύχουν πιο γρήγορη είσοδο στην αγορά. Οι παράμετροι του FFF, όπως το slicing, ο προσανατολισμός και η θερμοκρασία, επηρεάζουν σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες. Το ποσοστό γέμισης και η κατεύθυνση προσανατολισμού συμβάλλουν θετικά στις μηχανικές ιδιότητες των προϊόντων που εκτυπώνονται με 3D. (10).

### 1.5.2. Μέθοδοι για την Βελτιστοποίηση των Μηχανικών και Τριβολογικών Ιδιοτήτων των Εξαρτημάτων Πολυμερών που Εκτυπώνονται με 3D

Οι μηχανικές και τριβολογικές ιδιότητες των εξαρτημάτων πολυμερών που εκτυπώνονται με 3D διαφέρουν. Μέθοδοι όπως το DOE (Design of Experiments), το Taguchi method, το Box-Behnken Design και το ANOVA (Analysis of Variance) χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων και για τη μελέτη των σχέσεων αιτίας και επίδρασης. Παράγοντες όπως το πάχος της στρώσης, ο προσανατολισμός, η γωνία του raster, το πλάτος του raster και το air gap επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες των εξαρτημάτων που εκτυπώνονται με 3D. Χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες παραμέτρους εκτύπωσης και λαμβάνοντας υπόψη τη θερμοκρασία και το χρώμα του filament, οι τριβολογικές ιδιότητες των εξαρτημάτων πολυμερών που εκτυπώνονται με 3D βελτιώνονται. Η φθορά εξαρτάται από το φορτίο, την ταχύτητα, τον προσανατολισμό και τη σύνθεση του υλικού (10).

### 1.5.3. Σημασία των Εξαγωνικών ή Ορθογωνικών Δομών και των Τριβολογικών Ιδιοτήτων

Οι έρευνες δείχνουν ότι οι εξαγωνικές ή ορθογωνικές δομές ενισχύουν τις μηχανικές ιδιότητες των εξαρτημάτων που εκτυπώνονται με 3D. Μελέτη επίσης υπογραμμίζει τη σημασία της κατανόησης των τριβολογικών ιδιοτήτων, καθώς η τριβή και η φθορά εξαρτώνται από παράγοντες όπως η ταχύτητα ολίσθησης, η ρυθμιστική επιφάνεια και το φορτίο. Η εφαρμογή τροποποιήσεων επιφάνειας και η χρήση ισχυρών υλικών όπως τα Reinforced Carbon Fibers βελτιώνουν τις τριβολογικές ιδιότητες των εξαρτημάτων που εκτυπώνονται με 3D (10).

### 1.5.4. Συμπέρασμα για τη Σημασία των Κατάλληλων Παραμέτρων Διαδικασίας για την Εκτύπωση 3D και την Κάλυψη των Μηχανικών Απαιτήσεων

Συμπερασματικά, η επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων διαδικασίας για την εκτύπωση 3D επηρεάζει σημαντικά τις μηχανικές και τριβολογικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Είναι ζωτικής σημασίας να κατανοηθεί η σχέση μεταξύ των παραμέτρων επεξεργασίας και της συμπεριφοράς των Composite Materials για να ανταποκριθούν σε συγκεκριμένες μηχανικές απαιτήσεις. Αυτά τα ευρήματα παρέχουν έναν οδικό χάρτη για την βελτιστοποίηση των διαδικασιών εκτύπωσης 3D και τον σχεδιασμό υλικών που μπορούν να αντέξουν τριβολογική ένταση. Η μελέτη συμπεραίνει ότι οι μηχανικές και τριβολογικές ιδιότητες των πολυμερών που εκτυπώνονται με 3D μπορούν να ικανοποιήσουν τις ανάγκες των χρηστών και των κατασκευαστών στην Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση.











## 1.6. Σύγκριση τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής – Ανάπτυξη πρότυπων τυποποίησης

Ο πίνακας παρέχει δεδομένα σχετικά με την απόδοση εμπορικών συστημάτων παραγωγής προσαρμοστικής κατασκευής (ΠΚ) που προορίζονται για τη βιομηχανική παραγωγή μικρών παρτίδων. Η σύγκριση μεταξύ διαφορετικών μεθόδων ΠΚ, μεταξύ διαφορετικών συστημάτων ΠΚ που έχουν την ίδια αρχή λειτουργίας, καθώς και με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής είναι απαιτητική, καθώς υπάρχουν λίγες συγκριτικές μελέτες για την απόδοση διαφόρων συστημάτων ΠΚ. Επιπλέον, στην αγορά προσφέρονται διάφοροι συνδυασμοί μηχανημάτων, εξειδικευμένων πρώτων υλών και λογισμικών από κάθε εταιρεία. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η ακρίβεια που αναφέρεται στον πίνακα



είναι ενδεικτική και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αντικειμένου και το υλικό κατασκευής. Ο πίνακας δεν περιλαμβάνει κάποια πιο πρόσφατα συστήματα ΠΚ με καινοτόμες και ανταγωνιστικές τεχνολογίες, όπως η Continuous Liquid Interface Production (CLIP) της εταιρείας Carbon3D, η τεχνολογία Multi Jet Fusion της Hewlett Packard και η τεχνολογία NanoParticle Jetting της εταιρείας XJet, διότι δεν υπάρχουν ακόμα επαρκή δεδομένα για την απόδοση και αξιοπιστία τους (4).

Πίνακας 3: Σύγκριση μεταξύ εμπορικά διαθέσιμων συστημάτων ΠΚ που προορίζονται για βιομηχανική παραγωγή μικρών παρτίδων προϊόντων (4)σελ28.

Όνομα	Εταιρία	Τεχνολογία ΠΚ	Υλικά	Ακρίβεια XY (mm)	Χώρος Εργασίας (mm <sup>3</sup> )	Πάχος Στρώσης (mm)	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Παράδειγμα Αντικειμένου
	Stratasys	FFF (FDM®)	ABS, ASA, Nylon12, PC, PC-ABS, PPSF, PPSU ULTEM	± 0.09	914 x 610 x 914	0.178 – 330	Βιομηχανικές εφαρμογές, ταχύτητα, χαμηλό κόστος και δυνατότητα κλιμάκωσης της παραγωγής, υποστήριξη 2 υλικών κατασκευής	Μέτρια απόδοση λεπτομερών χαρακτηριστικών και αυξημένη επιφανειακή τραχύτητα	
	3D Systems	SLA	Κατοχυρωμένα υλικά που μιμούνται τα PP, ABS, PC, υλικά χύτευσης και οδοντιατρικών εφαρμογών	± 0.025 – 0.05	250 x 250 x 250	0.05 – 0.125	Ταχύτητα και ικανοποιητική ακρίβεια, βιοϊατρικές εφαρμογές, δυνατότητα μεταβολής της οπτικής διαφάνειας	Υψηλό κόστος λειτουργίας, συντήρησης και αναλώσιμων, λίγες επιλογές υλικών, τοξικά υλικά, χαμηλές μηχανικές αντοχές	
	EOS	SLS/SLM	Maraging steel, Cobalt-Chrome, Stainless steel, Ti64, AISI10Mg, Inconel 718 and 625	± 0.04 – 0.06	250 x 250 x 325	0.02 – 0.1	Πολύ καλή ακρίβεια, υψηλές αντοχές, απευθείας παραγωγή λειτουργικών εξαρτημάτων, βιοϊατρικές εφαρμογές	Μικρή ταχύτητα κατασκευής (~ 5 mm <sup>3</sup> /s), αποτρεπτική για μεγάλα αντικείμενα. Υψηλό κόστος λειτουργίας, συντήρησης και αναλώσιμων, συνήθως χρειάζεται περαιτέρω επιφανειακή επεξεργασία των αντικειμένων	
	ExOne	BJ	Silica sand, ceramic beads, stainless steel, stainless steel/ bronze matrix, bronze, Alloy IN 625, Iron, tungsten, iron-chrome-aluminum, cobalt-chrome, tungsten carbide	± 0.06	400 x 250 x 250	0.1 και πάνω	Υψηλή ταχύτητα (30-60 sec/ στρώση), χαμηλό κόστος, μεγάλη ποικιλία διαθέσιμων υλικών, ικανοποιητική ακρίβεια, εύκολη κατασκευή καλουπιών	Απαιτείται θερμική επεξεργασία (πυροσυσωμάτωση) των παραγόμενων αντικειμένων	
	Stratasys	MJ	Digital Materials: δυνατότητα συνδυασμού 6 διαφορετικών φωτοευαίσθητων ρητινών για τη δημιουργία υλικών ελεγχόμενης σύστασης και χρωματικών διαβαθμίσεων. Υλικά που προσομοιάζουν ελαστομερή και ABS	± 0.02 – 0.085	490 x 390 x 200	0.014 – 0.027	Πολύ καλή ποιότητα επιφάνειας αντικειμένου, πολύ καλή απόδοση φωτορεαλιστικών λεπτομερειών, 360.000 συνδυασμοί χρωμάτων, δυνατότητα μεταβολής της οπτικής διαφάνειας	Περιορισμένες επιλογές ρητινών βάσης, υψηλό κόστος συντήρησης και αναλώσιμων	



## 1.7. Οικονομικά στοιχεία - Βασικά πλεονεκτήματα και αδυναμίες της παραγωγής μέσω Προσθετικής Κατασκευής

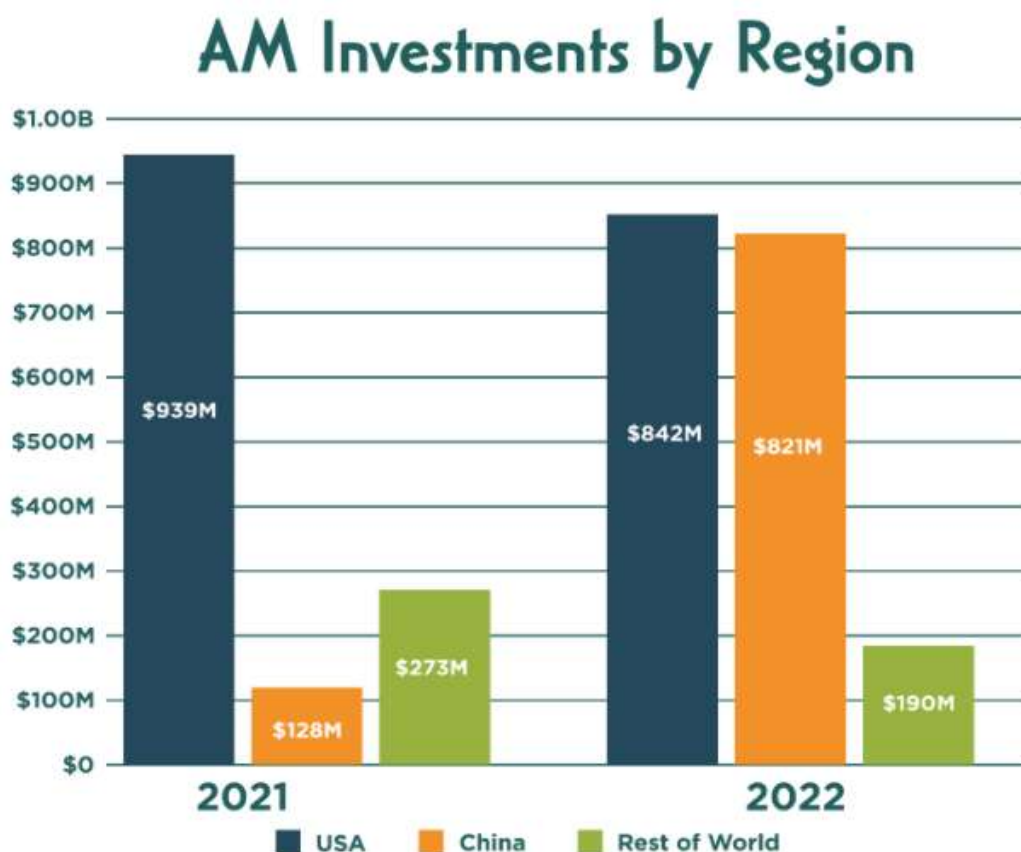
Η παραγωγή μέσω Προσθετικής Κατασκευής (ΠΚ) έχει σημαντικά οικονομικά πλεονεκτήματα και προοπτικές. Ένα από τα βασικά οφέλη είναι η δυνατότητα προσαρμογής και εξατομίκευσης των προϊόντων, που επιτρέπει την κατασκευή προϊόντων που ανταποκρίνονται ακριβώς στις απαιτήσεις και τις προτιμήσεις των πελατών. Αυτό δημιουργεί ευκαιρίες για εξατομίκευση των προϊόντων, αυξάνοντας την προστιθέμενη αξία και την ικανοποίηση των πελατών. Η ΠΚ επίσης μπορεί να μειώσει τα κόστη αποθήκευσης και διανομής, καθώς τα αντικείμενα που παράγονται μπορούν να κατασκευαστούν απευθείας κατά παραγγελία. Αυτό μειώνει την ανάγκη για μαζική παραγωγή, αποθήκευση μεγάλων αποθεμάτων και έξοδα για τη διαχείριση αποθήκης. Ωστόσο, η ΠΚ αντιμετωπίζει και ορισμένες προκλήσεις. Οι αρχικές επενδύσεις για την απόκτηση της τεχνολογίας ΠΚ, την αγορά εξοπλισμού και την εκπαίδευση του προσωπικού μπορεί να είναι υψηλές. Επιπλέον, τα κόστη λειτουργίας, συμπεριλαμβανομένων των υλικών και της ενέργειας, είναι συχνά ακριβότερα από τις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής. Αυτό μπορεί να επηρεάσει το κόστος παραγωγής των προϊόντων ΠΚ. Παρ' όλα αυτά, η ΠΚ έχει σημαντικό δυναμικό για ανάπτυξη και βελτιστοποίηση. Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται, αναμένεται να βελτιωθεί η αποδοτικότητα και η οικονομική βιωσιμότητα της ΠΚ. Τα οφέλη της προσαρμογής και της εξατομίκευσης των προϊόντων, μαζί με τη μείωση των δαπανών για αποθήκευση και διανομή, καθιστούν την ΠΚ μια ελκυστική επιλογή για πολλές βιομηχανίες.

Ο παγκόσμιος επενδυτικός όγκος κεφαλαίων σε εταιρείες Προσθετικής Κατασκευής αυξήθηκε κατά 36,7% ετησίως από 389 εκατομμύρια δολάρια το 2017 σε 1,853 δισεκατομμύρια δολάρια το 2022. Η αξιοσημείωτη δυναμική που αποκτήθηκε το 2021 συνεχίστηκε και στο 2022 με επιπλέον επενδύσεις ύψους 514 εκατομμυρίων δολαρίων. Η AMT - Η Ένωση Τεχνολογίας Κατασκευής αναγνώρισε πέντε εξαιρετικές συναλλαγές που συνολικά ανέρχονται σε 707 εκατομμύρια δολάρια, μοιρασμένα μεταξύ οδοντιατρικών εφαρμογών. Ενώ αυξήθηκαν ασυνήθιστα μεγάλες μειοψηφικές επενδύσεις, η κατηγορία κατασκευαστικών εφαρμογών λάμβανε 3,3 φορές περισσότερες επενδύσεις σε σχέση με το 2021, γίνοντας η δεύτερη μεγαλύτερη κατηγορία το 2022, με 21 συναλλαγές (53).

Η ισχυρή απόδοση για εφαρμογές σε οδοντιατρική, ιατρική, αεροδιαστημική, καταναλωτικά αγαθά και αυτοκίνητα υποδηλώνει ότι οι επενδυτές εστιάζουν επιτέλους στην εξειδίκευση και τις ευκαιρίες προσαρμοσμένων προϊόντων για συγκεκριμένες αγορές. Οι κατασκευαστές υλικού αντικατοπτρίζουν αυτόν τον τρόπο σκέψης στα προσφερόμενα

προϊόντα τους, στοχεύοντας συγκεκριμένες εφαρμογές, μια διακριτή αλλαγή σε σχέση με τον βιομηχανικό κανόνα όπου ένα μοντέλο εκτυπωτή καλύπτει όλες τις εφαρμογές σε μια συγκεκριμένη κατηγορία μεγέθους. Οι επενδύσεις γκάμα τεχνολογιών και υπηρεσίες παραμένουν υψηλές, με 38 συναλλαγές και συνεχή εστίαση στη βελτίωση, την ταχύτητα και/ή τη μείωση του κόστους του υλικού προσθετικής κατασκευής.

Η μέση επένδυση αυξήθηκε σε νέο υψηλό επίπεδο των 26,9 εκατομμυρίων δολαρίων για το 2022, αυξημένη κατά σχεδόν 40% λόγω μεγάλων επενδύσεων σε λίγες εταιρείες, όπως η Vulcan Forms, η Divergent, η Fictiv, η PrismaLab και η Sprintray. Η μεγαλύτερη μέση επένδυση υποδηλώνει επίσης αύξηση των γύρων χρηματοδότησης σε πιο προχωρημένα στάδια σε σύγκριση με προηγούμενα έτη. Παρόλο που αυτό είναι θετικό για εταιρείες που έχουν ήδη σημαντική αγορά, η χαμηλότερη χρηματοδότηση σε μεσαίες κατηγορίες δημιουργεί αυστηρότερες συνθήκες για εταιρείες που επιθυμούν να αναπτύξουν πιο εξελιγμένες τεχνολογίες (53).



Εικόνα 4: Επενδύσεις σε τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής (53).

Τα επόμενα χρόνια θα εμπεριέχουν αναμφίβολα περισσότερες επενδύσεις σε εταιρείες που αναπτύσσουν υλικά τεχνολογίας, παρόχους υπηρεσιών και εφαρμογές. Συνδυάζοντας ένα δυναμικό έτος επενδύσεων και την προοπτική μείωσης της αβεβαιότητας στις αλυσίδες εφοδιασμού, αναμφίβολα θα επιταχυνθεί η ανάπτυξη της τεχνολογίας και η περαιτέρω υιοθέτηση της στις εγχώριες αγορές. Με το ενδιαφέρον των επενδυτών να μετατοπίζεται προς τις εφαρμογές ως ένα σημαντικό συμπλήρωμα των εταιρειών έντασης τεχνολογίας, η προηγμένη κατασκευή μπορεί να βρει πιο αποδοτικά τη σωστή εφαρμογή των προϊόντων της και, τελικά, να βρει περισσότερους τρόπους για να πραγματοποιήσει τις υποσχέσεις της.

## 2. Υλικά Εκτύπωσης

### 2.1. Γενικά

Υπάρχει μια ευρεία γκάμα πολυμερών υλικών για τρισδιάστατη εκτύπωση, με δυνατότητες που σχετίζονται από τη μοριακή τους δομή, με πολυμερή που επεξεργάζονται με διαφορετικούς τρόπους για κάθε διαδικασία εκτύπωσης. Στις διαδικασίες εξώθησης, τα θερμοπλαστικά χρησιμοποιούνται συνήθως για τρισδιάστατη εκτύπωση όπου λιώνουν έπειτα εξωθούνται και στην συνέχεια γίνεται σκλήρυνση μετά την εναπόθεση (54). Για παράδειγμα, το ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο (ABS) είναι ένα κοινό θερμοπλαστικό που παρουσιάζει ευνοϊκή αντοχή στην κρούση και βελτιωμένη χημική αντοχή σε σύγκριση με το καθαρό πολυστυρένιο (55). Οι ιδιότητες του ABS μπορούν να προσδιοριστούν με βάση την αναλογία των τριών μονομερών του, για παράδειγμα, η πυκνότητά του μπορεί να κυμαίνεται από 1,05 [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ] έως 1,07 [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ] με προκύπτοντες συντελεστές εφελκυσμού από 2,5 [GPa] έως 2,7 [GPa]. Το ακρυλικό ακρυλονιτρίλιο στυρένιο (ASA) είναι μια εναλλακτική λύση στο ABS με βελτιωμένη αντοχή στη θερμότητα και εξαιρετική σταθερότητα στην υπεριώδη ακτινοβολία (56), ενώ το πολυγαλακτικό οξύ (PLA) είναι ένα άλλο δημοφιλές θερμοπλαστικό με βιοσυμβατότητα αλλά χαμηλότερη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης.

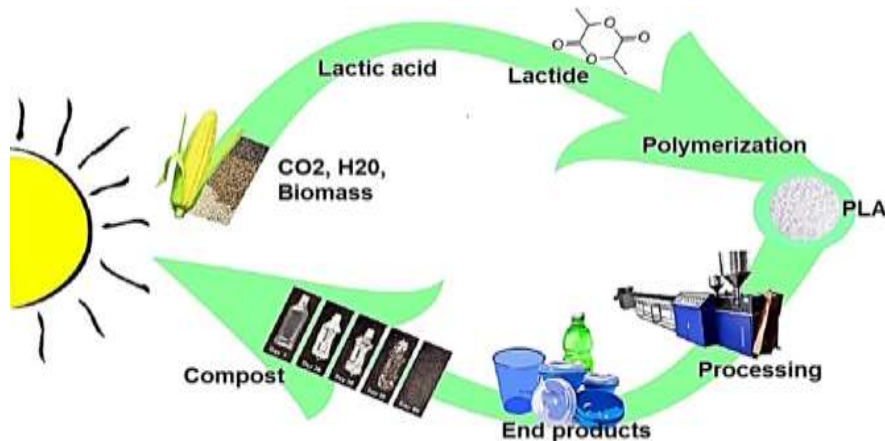
Ορισμένα από τα θερμοπλαστικά υλικά που είναι διαθέσιμα στην αγορά για χρήση στη μέθοδο FFF αναφέρονται παρακάτω. Συχνά, αυτά τα υλικά συνδυάζονται με άλλα πολυμερή ως μίγματα, είτε ως βάση για σύνθετα και νανοσύνθετα υλικά για τη βελτίωση των ιδιοτήτων τους. Επιπλέον, πολλά υλικά (PLA, ABS, PETG, PA, PEEK) είναι ενισχυμένα με ίνες γυαλιού ή άνθρακα μικρού μήκους (chopped CFs), που προστίθενται σε ποσοστό περίπου 20 [wt%]. Μια άλλη κατηγορία είναι τα υλικά που μιμούνται την όψη και την υφή μετάλλου, ξύλου και πέτρας, με πρόσθετα χαλκού, σιδήρου, μπρούτζου, ορείχαλκου, φυτικές ίνες και αλεσμένο ξύλο (ίνες μπαμπού, πεύκου, φελλοφόρου βελανιδιάς), είτε με σκόνη κιμωλίας και άλλων πετρωμάτων, σε μίγμα με βάση το PLA, σε συνδυασμό με πλαστικοποιητές και συμβατοποιητές (compatibilizers) (4). Στον παρακάτω πίνακα παρατίθεται βασική σύγκριση των εν λόγω υλικών όπως τα έχει καταγράψει η κα Γκάτρζου.

Πίνακας 4: Βασικά Υλικά για χρήση σε FFF κατεργασία (4)σελ75.

Υλικό	Δομική μονάδα πολυμερούς	T <sub>g</sub> (°C)	Θερμοκρασία εκτύπωσης (°C)	Θερμοκρασία πλατφόρμας (°C)	Ευκολία Κατεργασίας	Ιδιότητες
PLA		60 - 65	190 - 210	-	★★★	Εύκολη μορφοποίηση με FFF, μικρή συρρίκνωση κατά την ψύξη, βιοδιασπάσιμο, οπτικά διαυγές, διαθέσιμο σε πολλά χρώματα, ψαθυρή συμπεριφορά, για εφαρμογές χαμηλών απαιτήσεων.
ABS		100 -105	210 - 250	100	★★	Μέτριας δυσκολίας μορφοποίηση με FFF, σημαντική συρρίκνωση κατά την ψύξη, ανθεκτικό, υψηλή αντοχή σε κρούση, κατάλληλο για λειτουργικά αντικείμενα.
PET-G		80	220 - 235	-	★★★	Εύκολη κατεργασία, μικρή συρρίκνωση κατά την ψύξη, εύκαμπτο και ανθεκτικό, οπτική διαφάνεια, για εφαρμογές χαμηλών προς μέτριων απαιτήσεων.
PA		50 - 60	220 - 260	70 - 100	★★	Απαιτεί προσεκτική ρύθμιση των παραμέτρων εκτύπωσης, δυνατότητα μεταβολής της στυλνότητας ανάλογα με την κατεργασία, τάση παραμόρφωσης κατά την ψύξη, εύκαμπτο, υψηλή αντοχή σε κρούση, κατάλληλο για λειτουργικά αντικείμενα απαιτητικών εφαρμογών.
TPE	Συμπολυμερές, με εναλλασσόμενα εύκαμπτα και δύσκαμπτα τμήματα διαφόρων τύπων	-20	225 - 235	-	★	Συμπεριφορά ελαστομερούς, απαιτεί προσεκτική ρύθμιση των παραμέτρων εκτύπωσης, δεν ενδείκνυται για Bowden κεφαλές, κατάλληλο για λειτουργικά αντικείμενα
HIPS		100	210 - 250	100	★★	Υλικό υποστήριξης για τα υπόλοιπα συμπολυμερή του στυρενίου (ABS, ASA), διαλύεται σε d-limonene, παρόμοιες παράμετροι εκτύπωσης με το ABS.
PVA		85	180 - 220	-	★★★	Υλικό υποστήριξης για PLA και μίγματα PLA/PVA, υδατοδιαλυτό, βιοδιασπάσιμο, παρόμοιες παράμετροι εκτύπωσης με το PLA με χαμηλότερη θερμοκρασία εκτύπωσης, ευαίσθητο στην θερμική κατεργασία.
PC		150	280 - 310	100	★★	Απαιτεί προσεκτική ρύθμιση των παραμέτρων εκτύπωσης, υψηλές μηχανικές αντοχές, αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, διαφανές, εύκαμπτο και ανθεκτικό, κατάλληλο για λειτουργικά αντικείμενα απαιτητικών εφαρμογών..
POM		-30	210 - 225	130	★	Ιδιαίτερα απαιτητικό ως προς την μορφοποίηση με FFF, υψηλές μηχανικές αντοχές και ακαμψία, χαμηλός συντελεστής τριβής, κατάλληλο για λειτουργικά αντικείμενα απαιτητικών εφαρμογών.
ASA		100	240 - 260	100 - 120	★★	Παρόμοια εκτυπωτική συμπεριφορά και ιδιότητες με το ABS, μεγαλύτερες αντοχές στην φθορά από περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως η υπεριώδης ακτινοβολία και η υγρασία.
PEI		220	330 - 380	120 - 150	★	Αρωματικό πολυμερές με εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες και αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και στη φθορά, διαθέσιμο κυρίως για βιομηχανικά συστήματα FFF κατασκευής, δυνατότητα αποστείρωσης, ιδιαίτερα απαιτητικό ως προς την μορφοποίηση, κατάλληλο για αεροδιαστημικές εφαρμογές.
PPSF		230	380 - 400	225	★	Όπως το PEI, με αντοχή σε ακόμα υψηλότερες θερμοκρασίες, διαθέσιμο από την Stratasys για βιομηχανικούς FFF εκτυπωτές.
PEEK		145	355 - 390	120	★	Έχει, όπως και τα προηγούμενα, υψηλές μηχανικές αντοχές, θερμοκρασιακή σταθερότητα μέχρι τους 250 °C, πολύ καλές διηλεκτρικές ιδιότητες, περιορισμένη ευφλεκτότητα, κατάλληλο για απαιτητικές εφαρμογές (π.χ. στην αεροδιαστημική βιομηχανία).

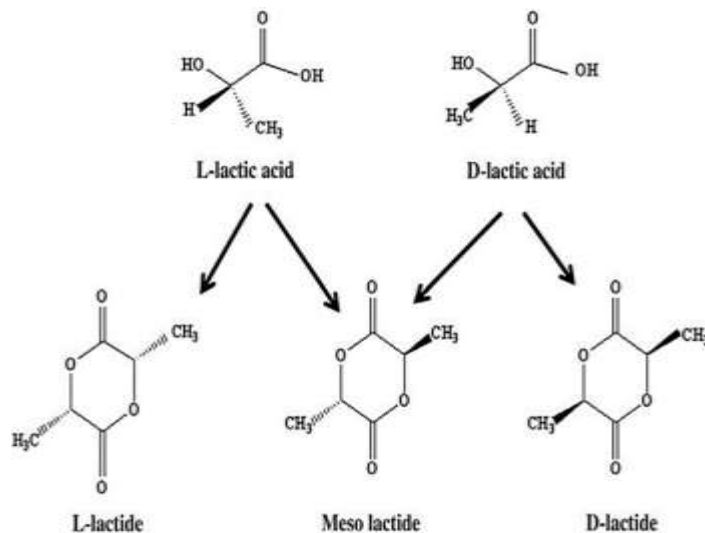
## 2.2. Πολυγαλακτικό-Οξύ (PLA)

Το PLA είναι ένα βιοπροερχόμενο θερμοπλαστικό πολυμερές που συντίθεται από γαλακτικό οξύ που λαμβάνεται από καλαμπόκι, ζαχαροκάλαμο και άλλη βιομάζα. Είναι επίσης ένα 100% βιοδιασπώμενο πολυμερές με υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό. Το PLA μπορεί να ανακυκλωθεί έως και 8 φορές και είναι κομποστοποιήσιμο στο τέλος της ζωής του (54) (55). Ο κύκλος ζωής του PLA φαίνεται στο Σχήμα παρακάτω.



Εικόνα 5. Κύκλος ζωής του PLA.

Το PLA συντίθεται από το γαλακτικό οξύ με τρεις τρόπους – άμεση πολυσυμπύκνωση του γαλακτικού οξέος (LA), αζεοτροπική αφυδατική συμπύκνωση και πολυμερισμός με άνοιγμα δακτυλίου (ROP) του λακτιδίου. Η ROP είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος καθώς αποδίδει PLA υψηλού μοριακού βάρους και απαιτεί χαμηλές θερμοκρασίες και σύντομους χρόνους αντίδρασης (56) (57). Αρχικά, τα oligομερή χαμηλού μοριακού βάρους παράγονται από τη συνεχή αντίδραση συμπύκνωσης υδατικού γαλακτικού οξέος. Στην συνέχεια, το oligομερές ή προπολυμερές μετατρέπεται καταλυτικά σε κυκλικό λακτίδιο. Αυτή η παραγωγή κυκλικού λακτιδίου έχει ως αποτέλεσμα τρεις μορφές: D,D-λακτίδιο (D-λακτίδιο), L,L-λακτίδιο (L-λακτίδιο) και L,D- ή D,L-λακτίδιο (μεσολακτίδιο) όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (58). Το επόμενο βήμα είναι η απόσταξη, όπου αφαιρούνται οι ακαθαρσίες και διαχωρίζεται το μεσολακτίδιο. Το τελικό βήμα περιλαμβάνει το ROP των λακτιδίων για τη λήψη διαφορετικών ποιοτήτων PLA.



Εικόνα 6. Στερεοϊσομερή λακτιδίου (59).

Η στερεοχημική δομή του PLA μπορεί να ελεγχθεί ελέγχοντας το μείγμα των ισομερών L- ή D- για να ληφθούν διαφορετικές αναλογίες κρυσταλλικών και άμορφων φάσεων. Ο πολυμερισμός του L-λακτιδίου παράγει πολυ (L-λακτίδιο) (PLLA), το D-λακτίδιο παράγει πολυ (D-λακτίδιο) (PDLA) και το ρακεμικό (50% L- και 50% D-) παράγει πολυ (DL-λακτίδιο) (PDLLA). Το PLLA και το PDLA είναι οπτικά καθαρά πολυλακτίδια και είναι κρυσταλλικά, ενώ το PDLLA είναι άμορφο. Το PLA μπορεί να αποικοδομηθεί με απλή υδρόλυση χωρίς τη χρήση ενζύμων για την κατάλυση της υδρόλυσης (56).

Οι θερμικές, μηχανικές και βιοαποικοδομητικές ιδιότητες του PLA εξαρτώνται από την κατανομή των στερεοϊσομερών στις πολυμερείς αλυσίδες. Το PLA με περισσότερο από 90% περιεκτικότητα σε PLLA είναι εξαιρετικά κρυσταλλικό και ένα χαμηλότερο ποσοστό PLLA αποδίδει περισσότερο άμορφο PLA. Η θερμοκρασία τήξης ( $T_m$ ) και η θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου ( $T_g$ ) του PLA αυξάνονται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε L-ισομερή και τη μείωση της περιεκτικότητας σε ισομερές D (58).

Το PLA είναι επίσης κατάλληλο για περαιτέρω τύπους διαδικασιών εκτύπωσης, όπως η σκλήρυνση ρητίνης με στερεολιθογραφία (63), η οποία επιτρέπει την κατασκευή πιο περίπλοκων αρχιτεκτονικών μερών από ό,τι είναι γενικά δυνατό με τις διαδικασίες εξώθησης. Αν και το PLA είναι βιοσυμβατό, υπάρχει κάποια ανησυχία για τοξικότητα στο τυπωμένο PLA με στερεολιθογραφία λόγω της προσθήκης φωτοπολυμερών στο διάλυμα της ρητίνης, το οποίο είναι απαραίτητο για τη διασταυρούμενη σύνδεση μονομερών για σχηματισμό πολυμερών παρουσία υπεριώδους φωτός. Ωστόσο, όταν εκτυπώνονται σωστά και υποβάλλονται σε μεταγενέστερη επεξεργασία, οι διαδικασίες σκλήρυνσης με ρητίνη



έχουν αποδειχθεί ασφαλείς για ιατρικές εφαρμογές, ανάλογα με τον συγκεκριμένο συνδυασμό χημικών συστατικών (64).

Έχει πραγματοποιηθεί αρκετή έρευνα σχετικά με την εφαρμογή διάφορων πλαστικοποιητών που επηρεάζουν την πολυμερική μήτρα μέσω διαμοριακών δυνάμεων, τροποποιώντας την κίνηση των αλυσίδων και τον ελεύθερο χώρο ανάμεσά τους. Αυτό οδηγεί σε μια αύξηση της περιοχής της πλαστικής διαμόρφωσης του υλικού, μείωση της θερμοκρασίας γυάλινης μετάβασης, διαμόρφωση του ποσοστού κρυσταλλικότητας και βελτίωση της επεξεργασιμότητας. Βιοσυμβατά ολιγομερή όπως πολυαιθυλενογλυκόλη, εστέρες κιτρικού οξέος, γλυκερόλη και το ίδιο το γαλακτικό οξύ έχουν δοκιμαστεί επιτυχώς, με την επίδρασή τους στη θερμική συμπεριφορά και την κρυσταλλικότητα να παρουσιάζεται στον Πίνακα. Ιδιαίτερα, τα ολιγομερή της πολυαιθυλενογλυκόλης μπορούν να επηρεάσουν εντυπωσιακά την ικανότητα επιμήκυνσης του υλικού, αν και αυτό μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την ελαστικότητα και την αντοχή στην τάση. Η προσθήκη 10% PEG200 σε εμπορικό PLA αύξησε την μέγιστη επιμήκυνση από 5.4 σε 413.1 %, μειώνοντας όμως συγχρόνως την ελαστικότητα και την αντοχή στην τάση κατά περίπου 64%.

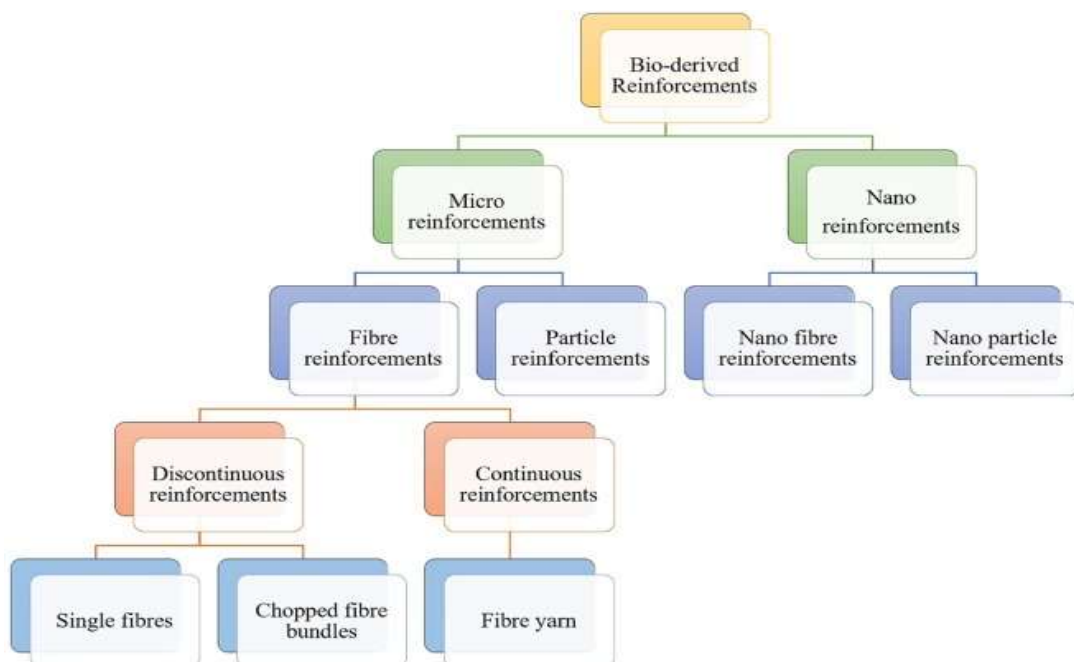
Πίνακας 5: Επίδραση διάφορων πλαστικοποιητών στη θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης, ψυχρής κρυστάλλωσης και τήξης, καθώς και στο ποσοστό κρυσταλλικότητας του PLA (4) σελ 99.

Material	T <sub>g</sub> (°C)	T <sub>c</sub> (°C)	T <sub>m</sub> (°C)	Crystallinity (%)
Pure PLA	58	–	152	1
PLA/10% glycerol	54	114	142	24.3
PLA/20% glycerol	53	110	141	25.4
PLA/10% citrate ester	51	–	144	12
PLA/20% citrate ester	46	–	142	20
PLA/10% polyethylene glycol monolaurate	34	94	148	22
PLA/20% polyethylene glycol monolaurate	21	75	146	24
PLA/10% polyethylene glycol	30	82	147	26
PLA/20% polyethylene glycol	12	67	143	29
PLA/10% oligomeric lactic acid	37	108	144	21
PLA/10% oligomeric lactic acid	18	76	132	24



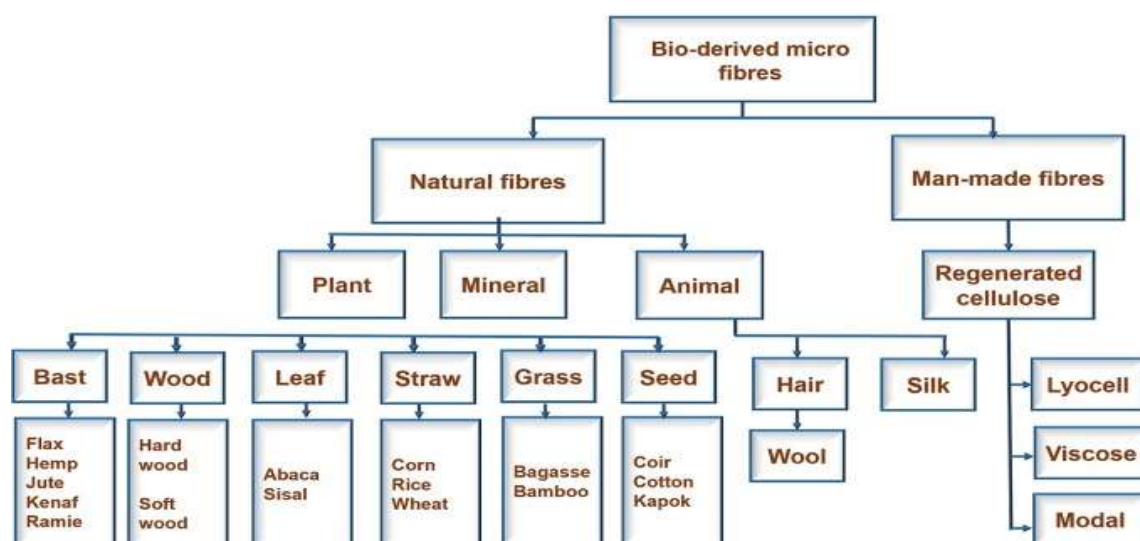
### 2.3. Τρισδιάστατη εκτύπωση FDM σύνθετων υλικών PLA με ενισχύσεις βιολογικής προέλευσης

Όταν οι ενισχύσεις σωματιδίων, ινών ή νιφάδων ενσωματώνονται σε ένα υλικό μήτρας, το υλικό που παράγεται ορίζεται ως σύνθετο. Τα περισσότερα σύνθετα υλικά με βάση πολυμερή έχουν 60% έως 70% πολυμερή ως μήτρα και το ενισχυτικό υλικό αποτελεί περίπου το 30% έως 40% (76). Ο σπλισμός θεωρείται το κύριο συστατικό σε ένα σύνθετο σύστημα, με κύρια λειτουργία τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού (77). Σε αυτήν την ανασκόπηση, ο σπλισμός ορίζεται ως το συστατικό που βελτιώνει τουλάχιστον το μέτρο Young του προκύπτοντος σύνθετου υλικού όταν προστίθεται στο πολυμερές. Οι ενισχύσεις βιολογικής προέλευσης που χρησιμοποιούνται στην εκτύπωση FDM 3D μπορούν να ταξινομηθούν σε ενισχύσεις μικρού (100 [μm] έως 100 [nm]) και νανο (100 [nm] έως 1 [nm]) που ταξινομούνται περαιτέρω σε ίνες και σωματιδιακές ενισχύσεις με βάση το σχήμα και το μέγεθός τους, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Αυτή η ταξινόμηση βασίζεται στις μορφές σπλισμού που χρησιμοποιούνται από την άποψη της επεξεργασίας υλικού. Οι μορφές ενίσχυσης μικροϊνών που προέρχονται από βιολογικά προϊόντα ταξινομούνται περαιτέρω σε ασυνεχείς και συνεχείς, όπου οι μεμονωμένες ίνες και οι δεσμίδες τεμαχισμένων ινών είναι ασυνεχείς μορφές ενίσχυσης και οι απλές ίνες που περιστρέφονται σε νήματα είναι μορφές συνεχούς ενίσχυσης(78). Οι νανοσπλισμοί ταξινομούνται σε νανο-ίνες και νανο-σωματιδιακές ενισχύσεις (79).



Εικόνα 7: Τύποι σπλισμών βιολογικής προέλευσης που χρησιμοποιούνται σε σύνθετα υλικά FDM.

Οι μικροΐνες που προέρχονται από βιολογικά προϊόντα είναι ο πιο κοινός τύπος ενισχύσεων και οι πηγές τους μπορεί να είναι φυσικές και ανθρωπογενείς, όπως φαίνεται στο σχήμα. Ενώ οι ενισχύσεις φυσικών ινών έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για την τρισδιάστατη εκτύπωση FDM του PLA, οι τεχνητές ίνες δεν έχουν διερευνηθεί μέχρι στιγμής για εφαρμογές FDM. Οι φυσικές ίνες περιλαμβάνουν φυτικές, ζωικές και ορυκτές ίνες (80). Οι φυτικές ίνες αποτελούνται από κυτταρίνη, ημικυτταρίνη και λιγνίνη και κατηγοριοποιούνται σε ίνες ξύλου, φλοιού, φύλλων, άχυρου, χόρτου και σπόρων. Οι ζωικές ίνες αποτελούνται από πρωτεΐνη και ταξινομούνται σε τρίχες και μετάξι. Οι ορυκτές ίνες ανήκουν στην ομάδα ορυκτών αμιάντου και δεν προτιμώνται λόγω της καρκινογόνου φύσης τους (81). Οι ανθρωπογενείς ή αναγεννημένες ίνες κυτταρίνης ταξινομούνται σε Lyocell, viscose και modal (82). Η παραγωγή αναγεννημένων ινών κυτταρίνης τυπικά περιλαμβάνει προκατεργασία κυτταρίνης με διαλύτη για τη διάγκωση των μορίων κυτταρίνης και την πρόκληση χαλάρωσης της αλυσίδας, ακολουθούμενη από μια διαδικασία περιδίνησης. Η διαδικασία βισκόζης είναι η παλαιότερη μέθοδος παραγωγής αναγεννημένων ινών κυτταρίνης, όπου η παραγωγοποίηση χρησιμοποιείται για την τροποποίηση της κυτταρίνης, ακολουθούμενη από διάλυση. Η διαδικασία για τη λήψη ινών modal είναι παρόμοια με τη βισκόζη, με τη διαφορά ότι οι ίνες υποβάλλονται σε επεξεργασία μετά για να βελτιωθεί η μοριακή ευθυγράμμιση αυξάνοντας έτσι την αντοχή των ινών. Οι ίνες Lyocell από την άλλη πλευρά παράγονται με άμεση διάλυση κυτταρίνης χρησιμοποιώντας ιοντικά υγρά ή N-μεθυλομορφολίνη-οξειδίο (NMMO). Η διαδικασία Lyocell είναι σχετικά νέα και θεωρείται φιλική προς το περιβάλλον σε σύγκριση με τις διεργασίες βισκόζης και μοντάλ λόγω της ικανότητας ανάκτησης άνω του 90% των διαλυτών που χρησιμοποιούνται (83).



Εικόνα 8. Ταξινόμηση πηγών μικροϊνών που προέρχονται από βιολογικά προϊόντα (80).

Το λινάρι και η κάνναβη έχουν την υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό και μέτρο Young μεταξύ των φυσικών ινών. Οι ζωικές ίνες έχουν χαμηλές μηχανικές ιδιότητες σε σύγκριση με άλλες ίνες βιολογικής προέλευσης εκτός από το μετάξι. Ωστόσο, το μετάξι είναι ακριβό και έχει χαμηλότερη ακαμψία σε σύγκριση με άλλες ίνες. Οι ιδιότητες των βιολογικών ινών πάρχουν από μεταβλητότητα,. Αυτό συμβαίνει επειδή οι ιδιότητες μιας βιολογικής ίνας εξαρτώνται από τον τύπο του φυτού, την περιοχή, τον τύπο εκχύλισης, την ηλικία των ινών και τις μεθόδους επεξεργασίας (84). Εκτός από τη μεταβλητότητα, η χρήση ινών βιολογικής προέλευσης έχει επίσης προκλήσεις όπως η υψηλή απορρόφηση υγρασίας, η χαμηλή θερμική σταθερότητα και η κακή αντίσταση στη φωτιά. Η επιλογή του τύπου οπλισμού που προέρχεται από βιολογικά προϊόντα διαδραματίζει ουσιαστικό ρόλο στην επίτευξη επαρκών επιδόσεων και στην υπέρβαση των περιορισμών λόγω της μεταβλητότητας των ιδιοτήτων για οποιαδήποτε εφαρμογή. Η κατανόηση της σύνθεσης των οπλισμών βιολογικής προέλευσης και η συμβολή τους στις ιδιότητες του υλικού επιτρέπει την επιλογή του σωστού τύπου οπλισμού. Για παράδειγμα, οι ιδιότητες των φυσικών ινών διέπονται από την περιεκτικότητα σε κυτταρίνη, τη μικροϊνιδική γωνία (MFA) και την κρυσταλλικότητα της κυτταρίνης. Προτιμάται χαμηλότερη περιεκτικότητα σε MFA και υψηλή περιεκτικότητα σε κυτταρίνη για την επίτευξη υψηλής αντοχής και ακαμψίας. Ωστόσο, για να επιτευχθεί υψηλή ολκιμότητα, προτιμάται υψηλότερο MFA (85) (86). Στην περίπτωση των τεχνητών ινών κυτταρίνης, η διαδικασία που χρησιμοποιείται για την παραγωγή των ινών επηρεάζει επίσης τις ιδιότητές τους, επηρεάζοντας τον βαθμό κρυσταλλικότητας, το μήκος του μικροκενού και τον προσανατολισμό των κρυστάλλων. Οι ανθρωπογενείς ίνες που παράγονται από τη διαδικασία Iyocell, για παράδειγμα, έχουν υψηλή κρυσταλλικότητα και μικρότερα μήκη κενών (87).

Οι ενισχύσεις βιολογικής προέλευσης μπορούν επίσης να ταξινομηθούν ανάλογα με το μέγεθος και το σχήμα τους. Για παράδειγμα, οι ενισχύσεις σκόνης που προέρχονται από βιολογικά προϊόντα περιλαμβάνουν μικροκρυσταλλική κυτταρίνη (MCC), σκόνη μπαμπού, κονιοποιημένη κάνναβη και άλλες (55). Οι νανοκρύσταλλοι κυτταρίνης (CNCs) και οι νανοϊνες κυτταρίνης (CNFs) είναι παραδείγματα βιο-προερχόμενων νανο-ενισχύσεων (88). Οι ακόλουθες ενότητες συζητούν την παραγωγή και τις ιδιότητες των σύνθετων υλικών PLA τυπωμένων FDM 3D με ενισχύσεις βιολογικής προέλευσης.

## 2.4. Ασυνεχείς ενισχύσεις μικροϊνών βιολογικής προέλευσης

Βιοσύνθετα νημάτια ενισχυμένα με ασυνεχείς φυσικές ίνες για FDM παράγονται με ανάμειξη πολυμερών, ινών και σε ορισμένες περιπτώσεις προσθέτων μέσω σύνθεσης τήγματος που ακολουθείται από εξώθηση. Οι φυσικές ίνες, όπως η κάνναβη, το μπαμπού, το λινάρι και άλλες, έχουν ερευνηθεί για την παραγωγή νημάτων PLA (78).

Η εικόνα συγκρίνει την αντοχή σε εφελκυσμό και το μέτρο Young ασυνεχούς ενίσχυσης βιο-προερχόμενων από ίνες/σύνθετα υλικά PLA που κατασκευάζονται για FDM, μέσω χύτευσης με έγχυση (IM) και χύτευση με συμπίεση (CM). Το IM και το CM είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες παραδοσιακές μέθοδοι παραγωγής για την παραγωγή σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες βιολογικής προέλευσης. Στη χύτευση με συμπίεση, η τροφοδοσία υλικού τοποθετείται σε μια ανοικτή θερμαινόμενη κοιλότητα καλουπιού, κλείνεται με ένα άνω βύσμα και συμπιέζεται με μια υδραυλική πρέσα για να στερεοποιηθεί το υλικό. Ο χαμηλότερος χρόνος κύκλου και η μεγαλύτερη αναπαραγωγικότητα είναι τα κύρια πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου (89) (90). Από την άλλη πλευρά, το IM περιλαμβάνει την τήξη της πρώτης ύλης υλικού και την ώθησή της σε ένα κλειστό καλούπι για να ληφθεί το αντικείμενο του επιθυμητού σχήματος και διαστάσεων. Το IM επιτρέπει τη μαζική παραγωγή εξαρτημάτων με υψηλή ακρίβεια οικονομικά (17) .



Εικόνα 9. Αντοχή σε εφελκυσμό έναντι του συντελεστή Young ασυνεχούς ενίσχυσης βιοπροερχόμενων από ίνες/σύνθετα υλικά PLA (31).

Οι μηχανικές ιδιότητες των τυπωμένων βιοσύνθετων υλικών FDM είναι συγκριτικά χαμηλότερες από τα συμβατικά κατασκευασμένα σύνθετα (55). Πολλοί παράγοντες συμβάλλουν σε αυτό, συμπεριλαμβανομένης της ασθενούς πρόσφυσης μεταξύ των στρωμάτων, της χαμηλής περιεκτικότητας σε ίνες στα νήματα FDM, της χαμηλής αναλογίας όψεων των ινών βιολογικής προέλευσης και του πορώδους των τυπωμένων προϊόντων (78)

## 2.5. Συνεχείς ενισχύσεις μικροϊνών βιολογικής προέλευσης

Η χρήση συνεχών ενισχύσεων από φυσικές ίνες θα μπορούσε να προσφέρει την ευκαιρία να επιτευχθούν υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες. Τα περισσότερα εμπορικά διαθέσιμα νήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης FDM με συνεχείς ενισχύσεις χρησιμοποιούν συνεχείς ίνες άνθρακα και ίνες κέβλαρ. Πρόσφατα, οι ερευνητές ανέπτυξαν προσαρμοσμένες μεθόδους για την παραγωγή σύνθετων νημάτων με συνεχείς ενισχύσεις από φυσικές ίνες (79). Μελέτες δείχνουν ότι σύνθετα υλικά με συνεχείς ενισχύσεις, όπως γιούτα/PLA και λινάρι/PLA, έχουν υπερβεί τις μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών με ασυνεχείς ενισχύσεις (78). Οι εκτυπωτές 3D FDM που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή σύνθετων υλικών με συνεχείς ενισχύσεις τροποποιούνται ώστε να περιλαμβάνουν δύο προμήθειες υλικών – το θερμοπλαστικό πολυμερές και τη συνεχή ίνα.

## 2.6. Σωματιδιακές ενισχύσεις

Οι ενισχύσεις σωματιδίων που προέρχονται από βιολογικά προϊόντα σε σύνθετα υλικά παρέχουν λιγότερη ενίσχυση από τις ίνες και γενικά χρησιμοποιούνται σε πολυμερείς μήτρες για τη βελτίωση του συντελεστή Young (91). Τα περισσότερα εμπορικά διαθέσιμα νήματα PLA FDM με σωματίδια βιολογικής προέλευσης βασίζονται σε σκόνη ξύλου (39). Αν και πολλά βιολογικά σωματίδια έχουν μελετηθεί εκτενώς για την τρισδιάστατη εκτύπωση (78), μόνο λίγα υλικά, συμπεριλαμβανομένων των MCC, της σκόνης κάνναβης και της σκόνης μπαμπού, έχουν επιδείξει ενισχυτικό αποτέλεσμα όταν συνδυάζονται με PLA για εκτύπωση FDM 3D.

## 3. Μέτρηση Τραχύτητας

### 3.1. Τραχύτητα

Η τραχύτητα (roughness, R) είναι ένας δείκτης που αναδεικνύει τις επιφανειακές ιδιότητες ενός υλικού σε μακροσκοπικό επίπεδο, καθώς είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση της ποιότητας των επιφανειών των υλικών. Αυτή η ιδιότητα υπόκειται σε τροποποιήσεις από μηχανικές και χημικές διαδικασίες που έχουν επηρεάσει την επιφάνεια του υλικού.

Η τραχύτητα, όταν καθορίζεται μηχανικά, είναι μια μετρήσιμη τιμή που εξαρτάται κυρίως από τη δομή των κρυσταλλιτών του υλικού, αλλά και από άλλους παράγοντες όπως η παρουσία διαφόρων επιφανειακών ατελειών που μπορεί να προκύψουν από χημικές ή μηχανικές διαδικασίες.

Η τραχύτητα της επιφάνειας αποτελεί έναν δείκτη της υφής της επιφάνειας. Μια επεξεργασμένη επιφάνεια μπορεί να παρουσιάζει διάφορες ανωμαλίες (όπως εσοχές, εξοχές, αποφλοιώσεις, ρωγμές κ.λπ.), και το επίπεδο τραχύτητας εξαρτάται από τη διαδικασία επεξεργασίας που υπήρξε η επιφάνεια. Η τραχύτητα υπολογίζεται με βάση τις κάθετες αποκλίσεις της πραγματικής επιφάνειας από την ιδανική μορφή της.

Η τραχύτητα της επιφάνειας έχει σημαντική επίδραση στον τρόπο που ένα υλικό αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του. Η μελέτη της τραχύτητας ενός μετάλλου είναι σημαντική καθώς αυτή επηρεάζει πολλές βασικές ιδιότητες των μετάλλων, όπως η ανακλαστικότητα, η φθορά, ο θόρυβος των κινούμενων μερών των μηχανημάτων, αλλά και την ικανότητά τους να λειτουργούν ως επικαλυπτικά ή ηλεκτρικά μέσα επαφής. Οι μετρήσεις τραχύτητας αναπαρίστανται με τις τιμές Rz (μέση τραχύτητα), Rt (μέγιστη τραχύτητα) και Ra (ολική μέση τραχύτητα).

### 3.2. Εφαρμογές Τραχυμέτρησης

Η τραχύτητα παίζει έναν σημαντικό ρόλο στον τρόπο που ένα πραγματικό αντικείμενο αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του. Οι ανώμαλες επιφάνειες φθείρονται πιο γρήγορα και έχουν υψηλότερους συντελεστές τριβής από τις λείες επιφάνειες. Η τραχύτητα συχνά αντανακλά την απόδοση ενός εξαρτήματος μηχανής, καθώς οι ανωμαλίες στην επιφάνεια μπορεί να δημιουργήσουν περιοχές ευάλωτες σε ρωγμές ή διάβρωση. Από την άλλη πλευρά, υψηλότερη τραχύτητα συνήθως οδηγεί σε καλύτερη πρόσφυση. Παρόλο που

η τραχύτητα συνήθως θεωρείται ανεπιθύμητη, είναι δύσκολο και δαπανηρό να την ελέγξουμε κατά την κατασκευή ενός εξαρτήματος. Η μείωση της τραχύτητας της επιφάνειας ενός αντικειμένου συνήθως οδηγεί σε εκθετική αύξηση του κόστους κατασκευής του. Αυτό συχνά αποτελεί έναν συμβιβασμό μεταξύ του κόστους παραγωγής ενός στοιχείου και της απόδοσής του σε μια εφαρμογή.



Εικόνα 10: Μέτρηση Τραχύτητας

### 3.3. Αρχή λειτουργίας του τραχύμετρου

Η τραχύτητα επηρεάζει σημαντικά τις ιδιότητες των επιφανειών, όπως η ανακλαστικότητα, η διάβρωση, η αντοχή στην κόπωση, η ηλεκτρική αντίσταση, η θερμική αλληλεπίδραση, η φθορά και άλλες παρόμοιες. Όταν η επιφάνεια είναι ανώμαλη λόγω της τραχύτητας, μπορεί να προκαλέσει λανθασμένα πειραματικά αποτελέσματα και παρανοήσεις. Για τον λόγο αυτό, είναι απαραίτητο να επεξεργαστούμε τις επιφάνειες μέσω λείανσης και στίλβωσης, προκειμένου να γίνουν λείες και ομαλές.

Για τη μέτρηση της τραχύτητας χρησιμοποιούνται τραχύμετρα, γνωστά και ως προφιλόμετρα. Αυτές οι συσκευές διαθέτουν μια σκληρή και λεπτή ακίδα που κινείται οριζόντια πάνω από την επιφάνεια του υλικού και ανιχνεύει τις επιφανειακές ανωμαλίες. Κατά τη διάρκεια της μέτρησης, ο μετρητής τοποθετείται στην επιφάνεια και η μηχανική μονάδα κινείται ομοιόμορφα κατά μήκος της επιφάνειας. Ο μετρητής ανιχνεύει την τραχύτητα της επιφάνειας μέσω του αιχμηρού ενσωματωμένου αισθητήρα, συχνά κατασκευασμένου από διαμάντι. Η τραχύτητα της επιφάνειας προκαλεί μετατοπίσεις στον αισθητήρα, προκαλώντας την εμφάνιση επαγωγικής τάσης στο πηνίο που βρίσκεται στο εσωτερικό του μετρητή. Έπειτα, το σήμα υποβάλλεται σε έναν ανορθωτή για τη διόρθωση της φάσης του. Με αυτή τη διαδικασία, η μηχανική κίνηση μετατρέπεται σε ένα ηλεκτρικό







### 3.5. Βασικοί ορισμοί για την μέτρηση της τραχύτητας

**Προφίλ τραχύτητας.** Αυτή είναι η καμπύλη προφίλ μετά από ένα φίλτρο υπερπερατό (μήκος κύματος αποκοπής  $\lambda_c$ ) εφαρμόζεται στην κύρια καμπύλη και τα μεγάλα μήκη κύματος αποκλείονται. Οι παράμετροι που υπολογίζονται από την καμπύλη τραχύτητας ονομάζονται «παράμετροι τραχύτητας» και το σύμβολο των παραμέτρων αυτών είναι «R». Παρακάτω δίνονται οι ορισμοί των πιο κοινών (Ra, Rq, Rt, Rz, Rp, Rv) που συναντώνται στους μετρητές τραχύτητας επιφάνειας.

Παράμετρος τραχύτητας: «Ra» ορίζεται ως ο αριθμητικός μέσος όρος της τραχύτητας και είναι εύκολο να μετρηθεί, και είναι πολύ αποτελεσματική στην μέτρηση της τραχύτητας μιας επιφάνειας. Υπάρχουν και άλλες παράμετροι που μπορεί να είναι περισσότερο συγκεκριμένες και χρήσιμες, ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής, όπως η τετραγωνική μέση τιμή, «Rq» και το μέγιστο ύψος τραχύτητας, «Rt». Παρότι οι παράμετροι τραχύτητας προφίλ (Ra, Rq, Rt) είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες από την άλλη οι παράμετροι τραχύτητας επιφάνειας (Sa, Sq, St) δίνουν πιο σημαντικές αξίες. Η ανάλυση της τραχύτητας είθισται να γίνεται σε δισδιάστατες δομές και εκφράζεται μέσω των τιμών Rz, Rt, Ra, όπου:

- Rz είναι η μέση τραχύτητα και εκφράζει τον αριθμητικό μέσο των μέσων αποκλίσεων (z).
- Rt είναι η μέγιστη τραχύτητα και εκφράζει τη μέγιστη απόκλιση ( $z_{max}$ ), η οποία αφορά στο συνολικό διανυόμενο μήκος ( $l_t$ ) της ακίδας, και
- Ra είναι η ολική μέση τραχύτητα και εκφράζει τον ολικό μέσο όρο της επιφάνειας που περιγράφεται από τις αποκλίσεις της ακίδας ως προς μία γραμμή αναφοράς κατά τη μέτρηση του ( $l_t$ ).

Συνηθέστατα χρησιμοποιείται η αριθμητική μέση απόκλιση Ra από τη «μέση γραμμή» της επιφάνειας μέσα σε ένα μήκος αναφοράς  $l$ . όπου  $y(x)$  το προφίλ της επιφάνειας και προσεγγιστικά με χρήση διακριτών τιμών αντί της ολοκλήρωσης. Μέση γραμμή: εμβαδό κοιλάδων = εμβαδόν κορυφών. Η τραχύτητα της επιφάνειας των μετάλλων εκφράζεται συνήθως από την τιμή Ra καθώς θεωρείται η πλέον αξιόπιστη.

### 3.6. Μέτρηση τραχύτητας επιφάνειας – RRMS

Η τραχύτητα επιφάνειας επίσης μετράται και ως τιμή RMS, δηλαδή :

*Εξίσωση 1: Τραχύτητα Επιφανείας.*

$$R_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n}}$$

Μέτρηση τραχύτητας επιφάνειας – Rmax:

- Rmax – η απόσταση από την ψηλότερη κορυφή έως τη βαθύτερη κοιλάδα.
- Rz – η μέση τιμή των 10 κατ' απόλυτη τιμή μέγιστων αποκλίσεων μέσα στο μήκος αναφοράς 5 κορυφών και 5 κοιλάδων.

Απεικόνιση «τοπογραφίας» επιφάνειας:

- Sm – η μέση απόσταση των ανωμαλιών τραχύτητας
- S – η μέση απόσταση των κορυφών
- tp – το σχετικό μήκος του προφίλ της επιφάνειας σε σχέση με το μήκος αναφοράς

*Εξίσωση 2: Σχετικό μήκος προφίλ επιφανείας.*

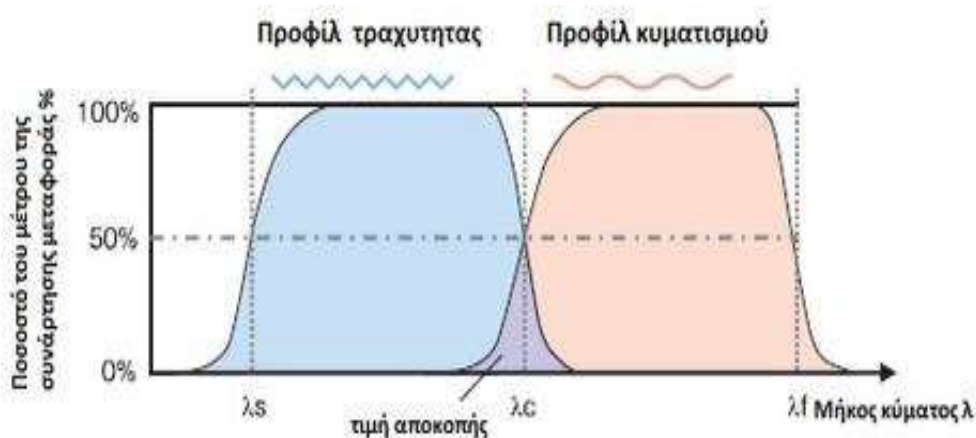
$$t_p = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n b_i$$

Τιμές:

- Συνηθισμένες τιμές για τα παραπάνω μεγέθη είναι :
- Ra=0.008-100 μm,
- Rz και Rmax= 0.025-1600 μm,
- Sm και S=0.002-12.5 mm και
- tp=10-90%
- μήκος αναφοράς l=0.01-25 mm.

**Προφίλ κυματισμού.** Αυτή είναι η καμπύλη μετά την εφαρμογή ενός ζωνοπερατού φίλτρου αποκοπής (τιμή αποκοπής lf / lc) στην κύρια καμπύλη. Η τιμή αποκοπής lf αποκλείει το τμήμα μεγάλου μήκους κύματος, ενώ η τιμή αποκοπής lc αποκλείει το τμήμα μικρού μήκους κύματος. Οι παράμετροι που υπολογίζονται από την καμπύλη κυματισμού ονομάζονται «παράμετροι κυματοειδούς».

**Μήκος κύματος αποκοπής.** Το μήκος κύματος αποκοπής είναι το σημείο διακλάδωσης μεταξύ των συνιστωσών τραχύτητας και των συνιστωσών κυματισμού όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Διάγραμμα: 2 Το μέτρο της συνάρτησης μεταφοράς συναρτήσει του μήκους κύματος.

**Μήκος δειγματοληψίας.** Το σταθερό μήκος που δειγματίζεται από την καμπύλη επιφανειακού προφίλ για να υπολογιστούν τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας. Αυτό ονομάζεται μήκος δειγματοληψίας. Τα μήκη δειγματοληψίας του προφίλ τραχύτητας και του προφίλ κυματοειδούς είναι τα ίδια με τις αντίστοιχες τιμές αποκοπής.

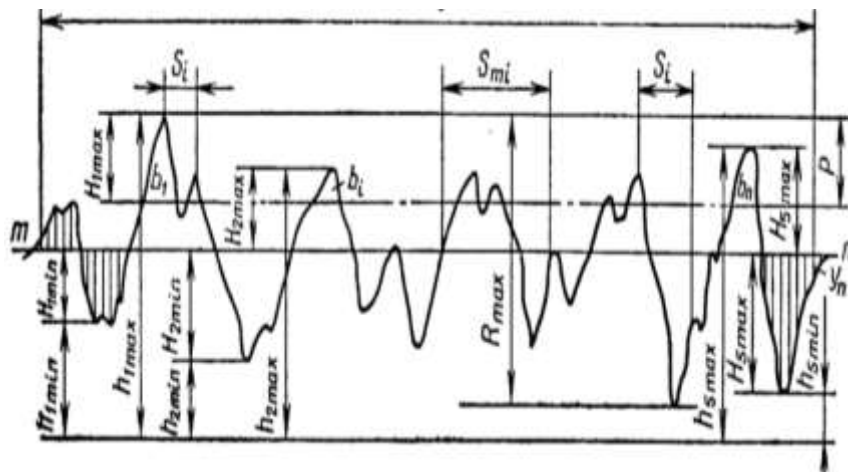
**Πρωτεύον προφίλ.** Αυτή είναι η καμπύλη προφίλ μετά την εφαρμογή χαμηλοπερατού φίλτρου (τιμή αποκοπής  $\lambda_s$ ) στην καμπύλη προφίλ επιφάνειας μέτρησης και το τμήμα μικρού μήκους κύματος αποκλείεται. Οι παράμετροι που υπολογίζονται από την κύρια καμπύλη ονομάζονται «κύριες παράμετροι προφίλ».

**Μήκος αξιολόγησης.** Τα χαρακτηριστικά της καμπύλης προφίλ υπολογίζονται σε σταθερό μήκος που περιλαμβάνει τουλάχιστον ένα μήκος δειγματοληψίας. Αυτό το μήκος ονομάζεται μήκος αξιολόγησης. Ως πρότυπο, το μήκος αξιολόγησης ορίζεται σε πέντε φορές το μήκος δειγματοληψίας.

### 3.7. Τρόποι μέτρησης

Άμεσα – με προφιλόμετρα (πλέον και φορητά) για τραχύτητα από 0.02 έως 5  $\mu\text{m}$ . Με αρχή λειτουργίας : σήμα τάσης ανάλογο της κατακόρυφης μετατόπισης μιας βελόνας διαμαντιού, η οποία διατρέχει το προφίλ– με οπτικούς αναλυτές (μικροσκόπιο) για τραχύτητα μεταξύ 0.8-80 [ $\mu\text{m}$ ].

Έμμεσα – με βάση προϋπάρχουσα βαθμονόμηση όπου γίνεται σύγκριση με πλακίδια τυποποιημένης δεδομένης τραχύτητας, μέτρηση ταχύτητας του αέρα που διέρχεται από κατάλληλο διάκενο ή μέτρηση της χωρητικότητας πυκνωτή, του οποίου ο ένας οπλισμός είναι η μετρούμενη επιφάνεια ή μέτρηση της έντασης του ανακλώμενου από την επιφάνεια φωτός.



Εικόνα 12: Προφίλ - Μορφολογικά χαρακτηριστικά επιφάνειας

Η τραχύτητα αποτελείται από επιφανειακές ανωμαλίες που προκύπτουν από τις διάφορες διαδικασίες κατεργασίας. Αυτές οι ανωμαλίες συνδυάζονται για να σχηματίσουν υφή της επιφάνειας.

- **Ύψος Τραχύτητας:**

Είναι το ύψος των ανωμαλιών σε σχέση με μία γραμμή αναφοράς. Μετριέται σε χιλιοστά ή μικρά. Είναι επίσης γνωστή ως το ύψος της ανομοιομορφίας.

- **Πλάτος Τραχύτητας:**

Το πλάτος τραχύτητας είναι η απόσταση παράλληλα προς την ονομαστική επιφάνεια μεταξύ διαδοχικών κορυφών ή κορυφογραμμών που αποτελούν το κυρίαρχο μοτίβο τραχύτητας. Μετριέται και αυτό σε χιλιοστά ή μικρά.

- **Πλάτος Τραχύτητας Cut off:**

Το Πλάτος τραχύτητας Cut off είναι η μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των αντίστοιχων επιφανειακών ανωμαλιών που συμπεριλαμβάνονται στη μέτρηση του μέσου ύψους τραχύτητας. Θα πρέπει πάντα να είναι μεγαλύτερο από το πλάτος τραχύτητας, προκειμένου να επιτευχθεί το συνολικό ύψος τραχύτητας.

Πίνακας 6: Σύμβολα και ονομασία όλων των παραμέτρων τραχύτητας.

Parameter	Ονομασία	Name
<b>Ra</b>	Μέση τιμή τραχύτητας	Roughness Average (Ra)
<b>Rq</b>	Μέση τετραγωνική ριζα (RMS) τραχύτητας	Root Mean Square (RMS) Roughness
<b>Rt</b>	Μέγιστο ύψος	Maximum Height of the Profile
<b>Rv, Rm</b>	Μέγιστο βάθος κοιλάδας	Maximum Profile Valley Depth
<b>Rp</b>	Μέγιστο ύψος κορυφής	Maximum Profile Peak Height
<b>Rpm</b>	Μέσος όρος Μέγιστου ύψους κορυφών	Average Maximum Profile Peak Height
<b>Rz</b>	Μέσος όρος μέγιστου ύψους	Average Maximum Height of the Profile
<b>Rmax</b>	Μέγιστο βάθος τραχύτητας	Maximum Roughness Depth
<b>Rc</b>	Μέσο ύψος παρατυπιών της επιφάνειας	Mean Height of Profile Irregularities
<b>Rz(iso)</b>	Ύψος τραχύτητας	Roughness Height
<b>Wt, W</b>	Ύψος κύματων	Waviness Height
<b>S</b>	Μέσο μήκος κορυφών	Mean Spacing of Local Peaks of the Profile
<b>Sm, RSm</b>	Μέσο μήκος παρατυπιών	Mean Spacing of Profile Irregularities
<b>λa</b>	Μέσο μήκος κύματος	Average Wavelength of the Profile
<b>λq</b>	Μέση τετραγωνική ριζα (RMS) μήκους κύματος	Root Mean Square (RMS) Wavelength of the Profile
<b>lr</b>	αναλογία μήκους	Profile Length Ratio
<b>Rsk, Sk</b>	Ασυμμετρίες	Skewness
<b>Rz1max</b>	Μέγιστη τραχύτητα της επιφάνειας	Maximum surface roughness:

### 3.8. Μελέτη επιφανειακής τραχύτητας στη διεθνή βιβλιογραφία (State of the Art)

#### 3.8.1. Διερεύνηση της ακρίβειας διαστάσεων και της τραχύτητας επιφάνειας για τρισδιάστατα εκτυπωμένα μέρη με χρήση εκτυπωτή Multi-jet Printer

Η ακρίβεια μιας επιφάνειας είναι σημαντική για την τριβή μεταξύ δύο επιφανειών, την παραμόρφωση επαφής, τη θερμική και ηλεκτρονική αγωγιμότητα του ρεύματος, τη στεγανότητα των αρμών επαφής και την ακρίβεια θέσης της επιφάνειας. Το SR (επιφανειακή τραχύτητα αποτελεί αντικείμενο πειραματικής και θεωρητικής έρευνας (92) (93). Οι παράμετροι SR μπορούν να υπολογιστούν στους τομείς των δισδιάστατων (2D) και των τρισδιάστατων (3D). Για περισσότερο από το μισό αιώνα, η ανάλυση προφίλ 2D χρησιμοποιείται για μηχανικές και επιστημονικές εφαρμογές (94) (95).

Σημαντική ερευνητική συνεισφορά έχει γίνει για τη συγκριτική αξιολόγηση διαφόρων διαδικασιών AM. Οι Singh κ.α. σε αυτό το πλαίσιο διερεύνησαν την επίδραση των παραμέτρων της διαδικασίας FDM στην τραχύτητα των παραγόμενων εξαρτημάτων. Εξέτασαν τον όγκο, την πυκνότητα και έναν αριθμό επικαλύψεων στο επενδυτικό χύτευση (IC). Πρότειναν μια εναλλακτική μέθοδο για την ανάπτυξη νάιλον-6 από απόβλητα και προσαρμοσμένες ιδιότητες για σύνθετο υλικό μήτρας αλουμινίου (AMC). Οι Beniak κ.α. (96) θεώρησαν ότι η διαδικασία FDM γνωρίζει την επίδραση του πάχους του στρώματος και της θερμοκρασίας εκτύπωσης στο σχήμα και την τραχύτητα των κατασκευασμένων εξαρτημάτων. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η θερμοκρασία εκτύπωσης ήταν πιο σημαντική για τον έλεγχο των διακυμάνσεων στο σχήμα και τις διαστάσεις. Οι Hyndhavi κ.α. (93) μελέτησαν την επίδραση των παραμέτρων διεργασίας (πάχος στρώματος, γωνία ράστερ και προσανατολισμός κατασκευής) και την αλληλεπίδρασή τους στην τραχύτητα του δείγματος που κατασκευάστηκε μέσω της διαδικασίας FDM με υλικά ακρυλονιτριλίου βουταδιενίου στυρενίου (ABS) και πολυγαλακτικού οξέος (PLA). Εφάρμοσαν τη μέθοδο Gray Relational Analysis (GRA) για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων, η οποία απέδωσε μια ελάχιστη ποσοστιαία αλλαγή στο μήκος, το πλάτος και το πάχος των εξαρτημάτων. Ο Kozak κ.α. (94) εξέτασε τη διαδικασία επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης με λέιζερ / επιλεκτικής τήξης λέιζερ (SLS/SLM) για τη διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων διεργασίας (ισχύς λέιζερ, διάμετρος κηλίδας και χρόνος έκθεσης) στο σχήμα και την τραχύτητα και την ποιότητα της επιφάνειας των κατασκευασμένων εξαρτημάτων. Αναπτύχθηκε ένα νέο θερμικό μοντέλο

διαστάσεων για την εκτίμηση των παραμέτρων της διαδικασίας μαζί με μια ανάλυση ευαισθησίας για την επικύρωση των αποτελεσμάτων. Ο Sahu κ.α. (95) παρουσίασε μια ασαφή λογική λήψης αποφάσεων σε ενοποίηση με τη μέθοδο Taguchi για τη βελτίωση της ακρίβειας διαστάσεων των επεξεργασμένων με FDM εξαρτημάτων ABS. Οι παράμετροι της διαδικασίας που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη μελέτη ήταν: πάχος στρώματος, προσανατολισμός, γωνία ράστερ, πλάτος ράστερ και διάκενο αέρα για την παρατήρηση διακύμανσης στις διαστάσεις του μήκους, του πλάτους και του πάχους των εξαρτημάτων. Αναφέρθηκε ότι η συρρίκνωση ήταν κυρίαρχη στις κατευθύνσεις μήκους και πλάτους, αλλά οι διαστάσεις επεκτάθηκαν στην κατεύθυνση του πάχους. Ο Noriega κ.α. πρότεινε την προσέγγιση νευρωνικού δικτύου για τη μείωση του σφάλματος διαστάσεων για την παράλληλη όψη του πρισματικού τμήματος ABS που κατασκευάστηκε σε FDM. Η μέθοδος αύξησε την ακρίβεια των κατασκευασμένων εξαρτημάτων. Ο Tronvoll κ.α. (96) διερεύνησε την τραχύτητα του νήματος που κατασκευάστηκε μέσω της διαδικασίας FDM. Πρότειναν τη στένωση των προφίλ νημάτων που αύξησε την απόδοση των τυπωμένων νημάτων. Ο Μου κ.α. (97) εξέτασε τρεις διαφορετικές διαδικασίες προσθετικής Κατασκευής για την κατασκευή εξαρτημάτων με προεξέχουσες επιφάνειες (όπως οπές, επίπεδες επιφάνειες, νευρώσεις μικροκλίμακας και μακριά κανάλια). Χρησιμοποίησαν μεθόδους χωρίς επαφή για να καταγράψουν την τραχύτητα της επιφάνειας. Διαπιστώθηκε ότι η διαδικασία FDM ήταν η λιγότερο ακριβής όσον αφορά την τραχύτητα της επιφάνειας, ενώ το MJM (που χρησιμοποιήθηκε ο τρισδιάστατος εκτυπωτής ProJet MJP 3600) παρήγαγε τα πιο ακριβή εξαρτήματα. Ο Garg κ.α. (98) θεώρησε τη διαδικασία FDM για να διερευνήσει την επίδραση της εναπόθεσης βάσει προσανατολισμού στο φινίρισμα της επιφάνειας και στην ακρίβεια των διαστάσεων. Η μετα-επεξεργασία έγινε με επεξεργασία ψυχρού ατμού και διερευνήθηκε. Αναφέρθηκε ότι παρατηρήθηκαν ελάχιστες διακυμάνσεις στην ακρίβεια των διαστάσεων. Οι Yang κ.α. (99) διερεύνησε τρεις ομάδες τρισδιάστατων εκτυπωμένων ικριωμάτων που εκτυπώθηκαν με έναν πρωτότυπο εκτυπωτή FDM Ultimaker. Το επιλεγμένο υλικό ήταν καθαρό PLA1, PLA2 και σύνθετος PLA/υδροξυαπατίτης (HAp). Η μορφολογία της επιφάνειας μελετήθηκε χρησιμοποιώντας τεχνικές SEM, micro-CT και υπέρθεσης. Τα αποτελέσματα πρότειναν ότι το ύψος του στρώματος του PLA1 διέφερε περισσότερο, ενώ το PLA/(10% HAp) που εκτυπώθηκε με την κατασκευή συντηγμένου νήματος (FFF) παράγει καλύτερη ακρίβεια σε σύγκριση με το καθαρό PLA (PLA1 ή PLA2).

Από τη διεθνή βιβλιογραφία προκύπτει ότι, μερικά από τα σημαντικά σημεία είναι τα ακόλουθα. Έχει γίνει πολλή μελέτη σχετικά με την επίδραση της παραμετρικής διακύμανσης, των διαφόρων υλικών, των διαφορετικών συνδυασμών υλικών και των



προσανατολισμών κατασκευής στην απόκλιση διαστάσεων και τη συμπεριφορά της επιφάνειας των εξαρτημάτων FDM.

### 3.8.2. Η επίδραση του ύψους του στρώματος στην τραχύτητα της επιφάνειας σε 3D Printed Polylactic Acid (PLA) με χρήση FDM 3D printing

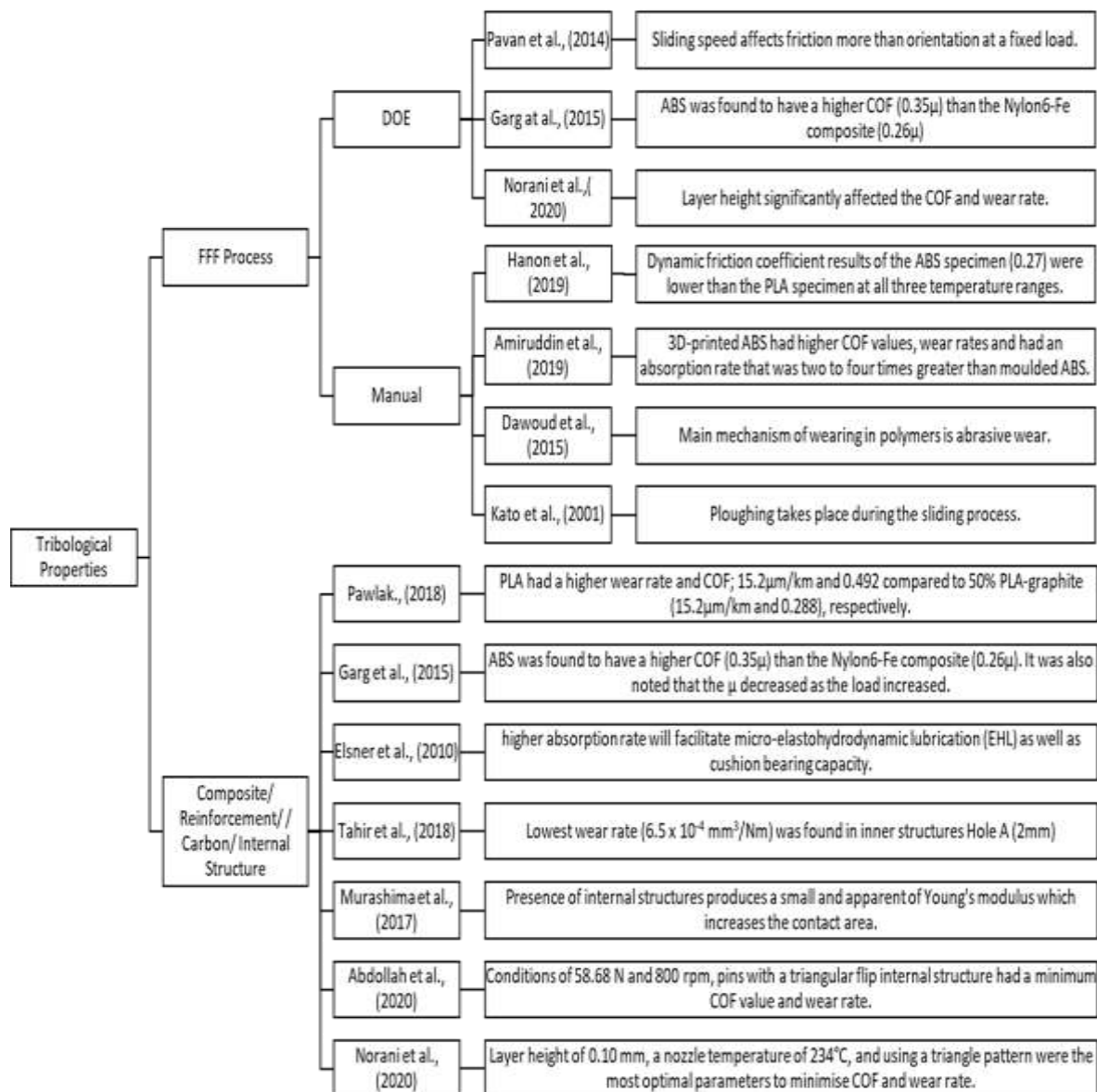
Αυτή τη στιγμή, η τρισδιάστατη εκτύπωση FDM αγοράζεται και πωλείται στην αγορά λόγω του συμπαγούς μηχανήματος και των προσιτών τιμών του κύριου υλικού. Η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης έχει εφαρμοστεί στους τομείς των μηχανικών, ηλεκτρικών, αστικών (12) και χειρουργικών επεμβάσεων οστών (13). Επομένως, οι υπάρχουσες παράμετροι πρέπει να βελτιστοποιηθούν προκειμένου να μειωθεί το κόστος παραγωγής (14). Η δομή και η ακρίβεια των διαστάσεων μελετώνται επίσης σε εξαρτήματα που χρησιμοποιούν υλικό ABS και PLA. Πλέον, η έρευνα για τα εφελκυστικά φορτία έχει πραγματοποιηθεί σε πολυμερή υλικά για να προσδιοριστούν οι μηχανικές τους ιδιότητες (61).

Η επίδραση του ύψους του στρώματος και ο προσανατολισμός της κλίσης της εκτύπωσης έχουν διερευνηθεί για να προσδιοριστεί η αντοχή εφελκυσμού του συνδέσμου (100). Επιπλέον, η δοκιμή συμπίεσης και κάμψης έχει πραγματοποιηθεί επίσης σε τρισδιάστατο εκτυπωμένο μοντέλο για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του δοκιμίου (56) και εξακολουθεί να υπάρχει κάποιος κίνδυνος και πρόκληση με τη χρήση της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης (18). Άλλες μελέτες βελτιστοποιούν επίσης την κατεύθυνση της εκτύπωσης αυξάνοντας την ποιότητα της επιφάνειας στο τρισδιάστατο εκτυπωμένο μοντέλο. Η έρευνα δημιουργεί έναν αλγόριθμο για τη διαίρεση τμημάτων του τρισδιάστατου μοντέλου με βάση τον προσανατολισμό του αντικειμένου δοκιμής (101).

Σε πρόσφατη μελέτη των Bintara κ.α., είχε στόχο τη διερεύνηση της τραχύτητας της επιφάνειας και της χρονοβόρας εκτύπωσης σε υλικό PLA χρησιμοποιώντας τρισδιάστατη εκτύπωση FDM σε διαφορές στο ύψος του στρώματος. Ένα μηχάνημα τρισδιάστατου εκτυπωτή, το Creality Ender 3 συμμετείχε στην κατασκευή του δείγματος. Επιπλέον, δοκίμασαν με τη συσκευή SurfTestSJ-301 Mitutoyo για να προσδιορίσουν την τραχύτητα του αντικειμένου της επιφάνειας. Το ύψος του στρώματος του δείγματος δοκιμής κυμαίνετο από



0,05 [mm] έως 0,25 [mm] με αύξηση 0,5 [mm] για κάθε μεταβολή, ενώ η γωνία στρώσης διατηρούταν σταθερή σε μηδέν βαθμό ( $0^\circ$ ). Η τραχύτητα της επιφάνειας και ο χρόνος εκτύπωσης αναλύθηκαν για να καθοριστούν οι καλύτερες παραμέτρους σχεδίασης. Τα αποτελέσματα της δοκιμής δείχνουν ότι όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος του στρώματος τόσο πιο τραχιά είναι η επιφάνεια. Επιπλέον, ο χρόνος εκτύπωσης είναι αντιστρόφως ανάλογος με την τραχύτητα της επιφάνειας. Η μικρότερη τραχύτητα επιφάνειας εμφανίζεται στα 0,05 mm ύψους στρώματος, ενώ η μικρότερη εμφανίζεται στα 0,25 [mm] ύψους στρώματος. Επιπλέον, η παράμετρος βελτιστοποίησης εμφανίζεται σε ύψος στρώματος 0,15 [mm] και 0,2 [mm], το οποίο η τραχύτητα επιφάνειας και ο χρόνος εκτύπωσης είναι 9,11 [ $\mu\text{m}$ ] και 158 λεπτά αντίστοιχα (Lh 0,15 [mm]), ενώ το ύψος στρώσης 0,20 [mm] για 120 λεπτά και 10,48 [ $\mu\text{m}$ ].



Εικόνα 13: Χάρτης Έρευνας για τριβολογικά χαρακτηριστικά (63).

## 4. Εργαστηριακό Μέρος

### 4.1. Διαδικασία

#### 4.1.1. Ανάλυση

Λόγω της μείωσης των τιμών των μηχανημάτων προσθετικής κατασκευής και της αυξανόμενης τεχνογνωσίας στον τομέα, έχει καταστεί ζωτικής σημασίας η εξέταση και αξιολόγηση των μηχανημάτων χαμηλού κόστους που είναι διαθέσιμα για εμπορική χρήση. Αν και οι μηχανές χαμηλού κόστους χρησιμοποιούνται ευρέως για σκοπούς ταχείας προτυποποίησης και πειραματισμού, συχνά υπολείπονται όσον αφορά την παραγωγή εξαρτημάτων υψηλής ποιότητας και την επίτευξη σταθερής επαναληψιμότητας. Αυτό αποδίδεται κυρίως στο χαμηλής ποιότητας υλικό τους και στο μη βέλτιστο λογισμικό τους.

Έχοντας αυτό κατά νου, ο πρωταρχικός στόχος είναι η διεξαγωγή πειραμάτων με τη χρήση ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή FDM (Fused Deposition Modeling) χαμηλού κόστους και ενός υψηλού κόστους και η αξιολόγηση της επιφανειακής τραχύτητας των εκτυπωμένων εξαρτημάτων σχετικά με τον προσανατολισμό τους σε σχέση με την έδρα εκτύπωσης. Ως υλικό εκτύπωσης έχει επιλεγεί το πολυγαλακτικό οξύ (PLA) και η επιφανειακή τραχύτητα των εκτυπωμένων εξαρτημάτων θα μετρηθεί σύμφωνα με το πρότυπο ISO ASTM 52902-2021. Η αξιολόγηση της επιφανειακής τραχύτητας θα βασιστεί στις τιμές Ra και Rz και θα χρησιμοποιηθεί στατιστική ανάλυση για την εξαγωγή σημαντικών συμπερασμάτων σχετικά με τον προσανατολισμό εκτύπωσης και της ποιότητας της επιφάνειας.

Στόχος της πειραματικής διαδικασίας είναι να καταγραφούν και να αναλυθούν οι παράμετροι τραχύτητας που προκύπτουν πάνω σε εκτυπωμένο τεμάχιο που αποτελείται από υλικό PLA, με τη χρήση 2 διαφορετικών εκτυπωτών τρισδιάστατης εκτύπωσης. Συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψη το πρότυπο ASTM 5290:2021 σύμφωνα με το οποίο έγινε η εκτύπωση δοκιμών μετρήθηκε η τραχύτητά τους στην επάνω και στην κάτω επιφάνεια με γνώμονα τις διαφορετικές γωνίες εκτύπωσης. Σκοπός ήταν να προσδιοριστούν μέσα από στατιστική ανάλυση και απομακρύνοντας τα ενδεχόμενα στατιστικού σφάλματος, όσο αφορά τις μετρήσεις, η ποιότητα εκτύπωσης του κάθε εκτυπωτή σε διαφορετικές γωνίες εκτύπωσης. Τέλος, θα γίνει μια συγκεντρωτική αξιολόγηση των δύο εκτυπωτών ως προς την ποιότητα εκτύπωσης. Συνοπτικά, θα ερευνήσουμε την επίδραση των παραμέτρων εκτύπωσης στην ποιότητα και ακρίβεια των αντικειμένων που παράγονται.

Στην μέχρι πρότινος βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε το μεγάλο βάρος σχετικά με την έρευνα και την δυνατότητα εκτύπωσης έχει επιδοθεί στην εύρεση του βέλτιστου τρόπου εκτύπωσης και αντίστοιχα ο υπολογισμός της αντοχής των εκτυπωμένων δοκιμίων. Με την αύξηση της παραγωγής και της χρήσης των 3D εκτυπωτών στην καθημερινότητα πρέπει να βρεθεί και ένα μοντέλο που να αξιολογεί την ποιότητα των επιφανειών των τελικών παραγόμενων τεμαχίων. Συνήθως, μετά την εκτύπωση ακολουθούνται άλλες επιφανειακές κατεργασίες τελικής διαμόρφωσης, όμως αυτές σε μαζική παραγωγή ή μέση παραγωγή θεωρούνται ότι αυξάνουν το κόστος και απαιτούν επιπρόσθετους πόρους που καθιστούν την χρήση 3D εκτυπωτών ασύμφορη.

#### 4.1.2. Ποιοτικό Πρότυπο Μετρήσεων

Το πρότυπο ASTM 52902-2021 αναφέρεται στη μέτρηση της τραχύτητας της επιφάνειας εκτυπωμένων αντικειμένων με χρήση της εκτύπωσης 3D. Αυτό το πρότυπο παρέχει κατευθυντήριες γραμμές για τη μέτρηση της τραχύτητας σε διάφορες μετρικές, όπως η τιμή Ra και η τιμή Rz.

Η τιμή Ra αντιπροσωπεύει το μέσο ύψος των κορυφών και των κοιλάδων στην επιφάνεια, ενώ η τιμή Rz αντιπροσωπεύει το συνολικό ύψος των κορυφών και των κοιλάδων. Αυτές οι μετρήσεις προσφέρουν πληροφορίες για την τραχύτητα της επιφάνειας και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της ποιότητας και της ακρίβειας των εκτυπώσεων 3D.

Το πρότυπο ASTM 52902-2021 ορίζει τις μεθόδους για την πραγματοποίηση των μετρήσεων, τα εργαλεία που απαιτούνται και τις διαδικασίες για την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Η συμμόρφωση με αυτό το πρότυπο εξασφαλίζει την ομοιόμορφη και αξιόπιστη μέτρηση της τραχύτητας της επιφάνειας σε εκτυπώσεις 3D, επιτρέποντας τη σύγκριση των αποτελεσμάτων ανάμεσα σε διάφορα εκτυπωτικά συστήματα και υλικά. Επιπλέον, το πρότυπο παρέχει σαφείς οδηγίες για την αποτύπωση των μετρήσεων και την αναφορά των αποτελεσμάτων.

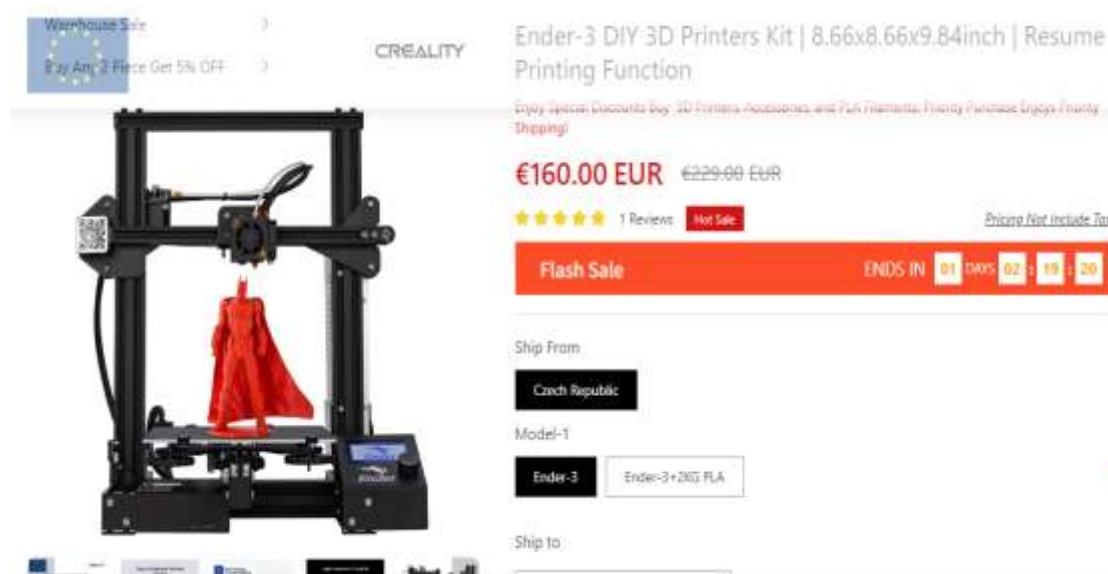
Με τη χρήση του προτύπου ASTM 52902-2021, οι ερευνητές και οι επαγγελματίες στον τομέα της εκτύπωσης 3D έχουν ένα κοινό πλαίσιο αναφοράς για την αξιολόγηση της ποιότητας της επιφάνειας των εκτυπωμένων αντικειμένων. Αυτό διευκολύνει τη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών μελετών και την ανταλλαγή πληροφοριών και ευρημάτων στον τομέα.

Συνολικά, το πρότυπο ASTM 52902-2021 συμβάλλει στην προώθηση της ποιότητας και της ακρίβειας της εκτύπωσης 3D μέσω της οριοθέτησης μεθόδων μέτρησης της τραχύτητας επιφάνειας. Αποτελεί ένα αξιόπιστο εργαλείο για την αξιολόγηση και τη βελτίωση των εκτυπωμένων αντικειμένων, συμβάλλοντας στην εξέλιξη και την επιτυχία της εκτυπωτικής τεχνολογία 3D με πολυμερή υλικά. Μέσω της εφαρμογής του προτύπου ASTM 52902-2021, οι χρήστες μπορούν να εκτιμήσουν την ποιότητα της επιφάνειας των εκτυπωμένων αντικειμένων και να προβούν σε συγκρίσεις ανάμεσα σε διάφορα υλικά και εκτυπωτικά συστήματα.

Επιπλέον, το πρότυπο παρέχει καθοδήγηση για τη σωστή διαδικασία μέτρησης και αναφοράς των τιμών τραχύτητας επιφάνειας, εξασφαλίζοντας ομοιόμορφη πρακτική και αξιόπιστα αποτελέσματα.

#### 4.1.3. Παρουσίαση Εκτυπωτή Low Cost – RED

Ο εκτυπωτής Creality 3D Ender-3 είναι ένας αξιόπιστος και προσιτός οικονομικά εκτυπωτής 3D που προσφέρει εξαιρετικά αποτελέσματα εκτύπωσης. Χρησιμοποιεί την τεχνολογία Fused Filament Fabrication (FFF) για την εκτύπωση αντικειμένων 3D. Διαθέτει μια μεγάλη πλατφόρμα εκτύπωσης με διαστάσεις 220 x 220 x 250 χιλιοστά, επιτρέποντας την εκτύπωση μεσαίων έως μεγάλων αντικειμένων.



Εικόνα 14: Εκτύπωτής RED (www.google.com)

Ο Creality 3D Ender-3 διαθέτει επίσης ένα σταθερό και ανθεκτικό σκελετό, που εξασφαλίζει σταθερή κατασκευή και ακρίβεια στις εκτυπώσεις. Επιπλέον, διαθέτει θερμαινόμενη πλάκα εκτύπωσης, που βοηθά στη βελτίωση της πρόσφυσης του υλικού κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης. Υποστηρίζει διάφορα υλικά εκτύπωσης, όπως PLA, ABS, TPU και άλλα, προσφέροντας ευελιξία στην επιλογή υλικού ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη. Επιπλέον, έχει εύκολη χρήση και εγκατάσταση, με φιλικό προς τον χρήστη λογισμικό. Οι ρυθμίσεις του εκτυπωτή μπορούν να προσαρμοστούν μέσω της οθόνης LCD και του ενσωματωμένου διακόπτη ελέγχου. Ο εκτυπωτής είναι συμβατός με διάφορα λογισμικά εκτύπωσης, προσφέροντας προηγμένες επιλογές στους χρήστες. Είναι γνωστός για την αξιοπιστία του και την απόδοσή του σε πολύ καλή τιμή. Είναι ένας ιδανικός εκτυπωτής για αρχάριους χρήστες που θέλουν να εξερευνήσουν τον κόσμο της εκτύπωσης 3D, καθώς και για προχωρημένους χρήστες που αναζητούν έναν αξιόπιστο εκτυπωτή για διάφορες εφαρμογές.

Συνολικά, ο Creality 3D Ender-3 προσφέρει υψηλή ποιότητα εκτύπωσης, εύκολη χρήση και πολλές επιλογές προσαρμογής. Είναι ένας εκτυπωτής 3D που ικανοποιεί τις ανάγκες τόσο των αρχάριων όσο και των πιο προχωρημένων χρηστών. Διαθέτει αρκετά χαρακτηριστικά που τον καθιστούν ελκυστική επιλογή για χρήστες που αναζητούν έναν αξιόπιστο και οικονομικό εκτυπωτή 3D. Παρακάτω παρατίθενται τα χαρακτηριστικά του:

1. Σταθερή κατασκευή: Ο Creality 3D Ender-3 έχει ένα στιβαρό μεταλλικό σκελετό που του παρέχει σταθερότητα και ακρίβεια κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης.
2. Μεγάλη τράπεζα εκτύπωσης: Η τράπεζα εκτύπωσης του Creality 3D Ender-3 έχει διαστάσεις 220 x 220 x 250 χιλιοστά, παρέχοντας αρκετό χώρο για την εκτύπωση μεσαίων μεγεθών αντικειμένων.
3. Εύκολη συναρμολόγηση: Ο Creality 3D Ender-3 παρέχεται σε μορφή kit και περιλαμβάνει λεπτομερείς οδηγίες συναρμολόγησης, καθιστώντας τον εύκολο στην εγκατάσταση και τη χρήση.
4. Θερμαινόμενη πλάκα εκτύπωσης: Ο εκτυπωτής διαθέτει θερμαινόμενη πλάκα, που βελτιώνει την πρόσφυση του υλικού κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης και μειώνει τον κίνδυνο αποκόλλησης.
5. Υλικά εκτύπωσης: Ο εκτυπωτής είναι συμβατός με διάφορα υλικά εκτύπωσης, όπως PLA, ABS, TPU και πολλά άλλα. Αυτό παρέχει ευελιξία στην επιλογή υλικού ανάλογα με τις ανάγκες και τις προτιμήσεις του χρήστη.
6. Ακρίβεια εκτύπωσης: Ο Creality 3D Ender-3 προσφέρει υψηλή ακρίβεια εκτύπωσης, με ανάλυση που φτάνει έως και 0,1 χιλιοστά. Αυτό επιτρέπει την παραγωγή λεπτομερών και ακριβών εκτυπώσεων.

7. Εύκολη χρήση: Ο εκτυπωτής διαθέτει φιλικό προς τον χρήστη λογισμικό, το Cura, που προσφέρει ευκολία στην προετοιμασία των μοντέλων για εκτύπωση.

8. Οικονομική επιλογή: Ο Creality 3D Ender-3 προσφέρει εξαιρετική ποιότητα εκτύπωσης σε μια προσιτή τιμή, καθιστώντας τον ιδανική επιλογή για χρήστες με περιορισμένο προϋπολογισμό.

Ο Creality 3D Ender-3 είναι ένας αξιόπιστος, εύκολος στη χρήση και οικονομικός εκτυπωτής 3D που προσφέρει υψηλή ποιότητα εκτύπωσης. Είναι ιδανικός για αρχάριους και προχωρημένου χρήστες που επιθυμούν να εξερευνήσουν την τεχνολογία της εκτύπωσης 3D ή να δημιουργήσουν πρωτότυπα και μικρού μεγέθους αντικείμενα. Η αξιόπιστη απόδοση, η ευκολία στη χρήση και η πολυμηχανική σταθερότητα του Ender-3 τον καθιστούν μια αξιόπιστη επιλογή για διάφορες εφαρμογές, όπως η εκπαίδευση, η πρωτότυπη ανάπτυξη και η παραγωγή μικρών σειρών προϊόντων.

Η χρήση του εκτυπωτή Creality 3D Ender-3 με υλικό PLA συνιστάται ιδιαίτερα. Υπάρχουν αρκετοί λόγοι για αυτό:

1. Προσαρμογή: Ο Creality 3D Ender-3 διαθέτει θερμαινόμενη πλάκα εκτύπωσης, η οποία βελτιώνει την πρόσφυση του PLA στην επιφάνεια εκτύπωσης. Αυτό εξασφαλίζει ότι το υλικό θα παραμείνει σταθερό και δεν θα αποκολληθεί κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης.

2. Ασφάλεια: Το PLA είναι ένας βιοδιασπώμενος και μη τοξικός υλικός. Αυτό το καθιστά ασφαλές για χρήση σε εσωτερικούς χώρους χωρίς να απελευθερώνει επιβλαβείς αέρια ή αποβλήτα.

3. Ευκολία χρήσης: Το PLA είναι ένα υλικό που είναι εύκολο να εκτυπωθεί. Έχει χαμηλή θερμοκρασία εξώθησης και δεν απαιτεί εξειδικευμένες ρυθμίσεις ή μεγάλες θερμοκρασίες εκτύπωσης.

4. Αισθητική: Το PLA προσφέρει ένα ευρύ φάσμα χρωμάτων, επιτρέποντάς σας να δημιουργήσετε εκτυπώσεις με πλούσια και ζωντανά χρώματα.

Συνολικά, ο εκτυπωτής Creality 3D Ender-3 είναι συμβατός με υλικό PLA και παρέχει αξιόπιστη εκτύπωση με αυτό το υλικό. Είναι μια καλή επιλογή για χρήστες που θέλουν να εκτυπώσουν προσιτά και εύκολα αντικείμενα με PLA. Ο εκτυπωτής διαθέτει τις απαραίτητες ρυθμίσεις για την εκτύπωση με PLA και η θερμαινόμενη πλάκα εκτύπωσης του βοηθά στην καλή πρόσφυση του υλικού.

Με τη χρήση του PLA, μπορεί να επιτευχθεί αξιόλογη ποιότητα εκτύπωσης με λεπτομερείς και ομαλές επιφάνειες. Το PLA είναι επίσης γνωστό για την χαμηλή τάση σύσπασης κατά την ψύξη, προσφέροντας σταθερότητα και αντοχή στις τελικές εκτυπώσεις.

Επιπλέον, η ευκολία χρήσης και η φιλικότητα του PLA προς το περιβάλλον το καθιστούν κατάλληλο για χρήστες όλων των επιπέδων εμπειρίας.

Συνολικά, η χρήση του PLA με τον εκτυπωτή Creality 3D Ender-3 είναι μια καλή επιλογή για χρήση με υλικό PLA λόγω των παραπάνω πλεονεκτημάτων.

Οι τεχνικές προδιαγραφές του Creality 3D Ender-3 περιλαμβάνουν:

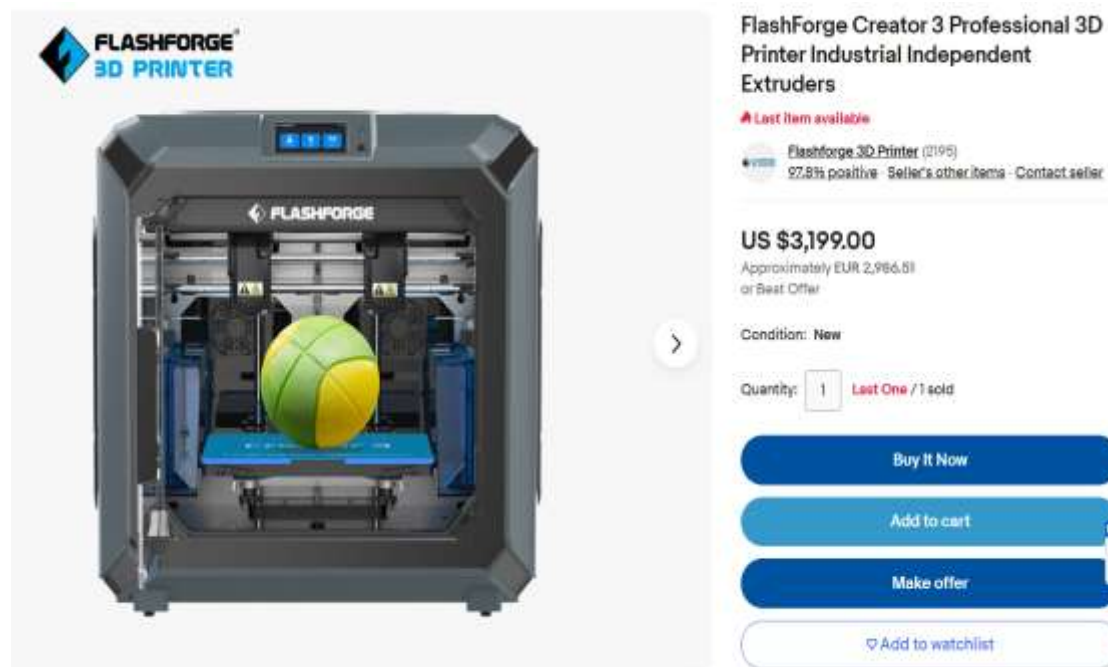
1. Κατασκευή:
  - Υλικό πλαισίου: Αλουμίνιο V-Slot
  - Κατασκευή πλατφόρμας: Ακρυλική
  - Θερμαινόμενη πλάκα εκτύπωσης: Ναι
2. Διαστάσεις:
  - Μέγιστο μέγεθος εκτύπωσης: 220 x 220 x 250 χιλιοστά
  - Ελάχιστο ύψος στρώματος: 0,1 χιλιοστά
3. Θερμοκρασία:
  - Μέγιστη θερμοκρασία πλάκας εκτύπωσης: 110°C
4. Συνδεσιμότητα:
  - USB: Ναι
  - SD κάρτα: Ναι
5. Λογισμικό:
  - Υποστήριξη λογισμικού εκτύπωσης: Cura, Simplify3D, Repetier-Host κ.ά.
  - Υποστήριξη αρχείων εκτύπωσης: STL, OBJ, AMF
6. Διασύνδεση:
  - Υποστήριξη λειτουργίας offline: Ναι
  - Οθόνη αφής: Όχι
7. Ηλεκτρικές προδιαγραφές:
  - Τροφοδοσία: 110-240V AC, 50/60Hz,
  - Ισχύς: 270W

#### 4.1.4. Παρουσίαση Εκτυπωτή High Cost - Green

Ο εκτυπωτής FlashForge Creator3 είναι ένα προηγμένο σύστημα εκτύπωσης 3D που παρέχει υψηλή ακρίβεια και ποιότητα εκτύπωσης. Χρησιμοποιεί την τεχνολογία Fused Filament Fabrication (FFF) για την εκτύπωση αντικειμένων. Διαθέτει δύο ανεξάρτητες εκτυπωτικές κεφαλές, που επιτρέπουν την εκτύπωση με διάφορα υλικά ή χρώματα



ταυτόχρονα. Αυτή η δυνατότητα παρέχει ευελιξία και επιτρέπει τη δημιουργία σύνθετων αντικειμένων με διαφορετικές ιδιότητες.



Εικόνα 15: Εκτυπωτής Green (www.google.com)

Ο FlashForge Creator3 διαθέτει μεγάλο χώρο εκτύπωσης με διαστάσεις έως και 300 x 250 x 200 χιλιοστά, επιτρέποντας την εκτύπωση μεγάλων και πολύπλοκων αντικειμένων. Επιπλέον, ο εκτυπωτής διαθέτει θερμαινόμενη πλάκα εκτύπωσης, που βοηθά στη βελτίωση της πρόσφυσης του υλικού και την αποφυγή αποκλίσεων κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης. Υποστηρίζει πολλά είδη υλικών, συμπεριλαμβανομένων του PLA, ABS, PETG και πολλών άλλων. Αυτό παρέχει επιλογές στους χρήστες να επιλέξουν το κατάλληλο υλικό για τις εκτυπώσεις τους, ανάλογα με τις απαιτήσεις τους σε ανθεκτικότητα, ευκαμψία ή άλλες ιδιότητες. Διαθέτει επίσης προηγμένη τεχνολογία επιπέδων υποστήριξης και απομάκρυνσης, που διευκολύνει την εκτύπωση αντικειμένων με πολύπλοκες δομές και υποστηρίζει την αντιμετώπιση της υπερέκθεσης και της αποτύπωσης.

Επιπλέον, διαθέτει εύχρηστο λογισμικό FlashPrint, που παρέχει ευέλικτες επιλογές σχεδίασης και προετοιμασίας για τις εκτυπώσεις. Το λογισμικό προσφέρει ευκολία χρήσης και επιτρέπει στους χρήστες να προσαρμόσουν τις ρυθμίσεις εκτύπωσης σύμφωνα με τις ανάγκες τους. Συνολικά, ο εκτυπωτής προσφέρει εξαιρετική ποιότητα εκτύπωσης, ευελιξία στην επιλογή υλικών και πολλές προηγμένες δυνατότητες. Αποτελεί μια καλή επιλογή για

επαγγελματική χρήση και για χρήστες που αναζητούν υψηλή ποιότητα εκτύπωσης και ακρίβεια στα αντικείμενά τους. Είναι ιδανικός για δημιουργία πρωτοτύπων, παραγωγή λεπτομερών μοντέλων και επαγγελματική χρήση σε διάφορους τομείς, όπως η μηχανολογία, η αρχιτεκτονική, η ιατρική και η εκπαίδευση.

Συνιστάται για τη χρήση με υλικό PLA. Το PLA είναι ένα από τα πιο δημοφιλή υλικά για την εκτύπωση 3D λόγω των ευκολιών στη χρήση και των ευνοϊκών ιδιοτήτων του. Είναι βιοδιασπώμενο, μη τοξικό και διαθέσιμο σε μεγάλη ποικιλία χρωμάτων. Παρέχει τις κατάλληλες ρυθμίσεις και δυνατότητες για την εκτύπωση με PLA. Με τη θερμαινόμενη πλάκα εκτύπωσης και τον ακριβή έλεγχο θερμοκρασίας, εξασφαλίζεται η κατάλληλη πρόσφυση του PLA κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης. Επίσης, ο FlashForge Creator3 διαθέτει αρκετή ακρίβεια και ανάλυση για να αναδείξει τις λεπτομέρειες και την ομαλότητα των εκτυπώσεων με PLA.

Είναι μια εξαιρετική επιλογή που θα παρέχει αξιόπιστες και υψηλής ποιότητας εκτυπώσεις. Ο εκτυπωτής είναι ιδανικός για χρήση με υλικό PLA για αρκετούς λόγους. Καταρχάς, ο Creator3 διαθέτει θερμαινόμενη πλάκα εκτύπωσης, η οποία βοηθά στη βελτίωση της πρόσφυσης του PLA στην επιφάνεια εκτύπωσης. Αυτό εξασφαλίζει ότι το PLA θα παραμείνει σταθερό κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης και δεν θα αποκολληθεί από τη βάση. Προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα στην εκτύπωση με PLA. Η υψηλή ακρίβεια και ανάλυση του εκτυπωτή εξασφαλίζουν λεπτομερείς και ομαλές εκτυπώσεις, ενώ η σταθερή δομή του μειώνει τον κίνδυνο παραμόρφωσης των αντικειμένων. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για το PLA, καθώς αυτό το υλικό μπορεί να είναι ευαίσθητο σε υψηλές θερμοκρασίες και μηχανικές πιέσεις.

Τέλος, ο FlashForge Creator3 παρέχει ευέλικτες επιλογές ρύθμισης για τον έλεγχο της θερμοκρασίας και των ταχυτήτων εκτύπωσης, που είναι ιδανικές για το PLA. Αυτό επιτρέπει στους χρήστες να προσαρμόσουν τις ρυθμίσεις σύμφωνα με τις ανάγκες τους και τις προτιμήσεις τους. Μπορούν να ρυθμίσουν τη θερμοκρασία εξώθησης, την ταχύτητα εκτύπωσης και άλλες παράμετρους, προσφέροντας τη δυνατότητα για εξατομίκευση και βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων εκτύπωσης. Είναι ιδανικός για τη χρήση με υλικό PLA λόγω των ισχυρών χαρακτηριστικών και των προηγμένων δυνατοτήτων του. Εξασφαλίζει αξιόπιστη πρόσφυση, ακρίβεια και ομαλή εκτύπωση, ενώ παρέχει επιλογές προσαρμογής για να ανταποκριθεί στις ανάγκες και τις προτιμήσεις των χρηστών.

Ορισμένα από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εκτυπωτή FlashForge Creator3 περιλαμβάνουν:

1. Τεχνολογία εκτύπωσης: Fused Filament Fabrication (FFF)
2. Διαστάσεις εκτύπωσης: 300 x 250 x 200 χιλιοστά
3. Υλικά εκτύπωσης: PLA, ABS, PETG και άλλα
4. Διάμετρος νήματος: 1,75 χιλιοστά
5. Ακρίβεια εκτύπωσης:  $\pm 0,1$  χιλιοστά
6. Θερμαινόμενη πλάκα εκτύπωσης: Ναι
7. Αριθμός εκτυπωτικών κεφαλών: Δύο ανεξάρτητες εκτυπωτικές κεφαλές
8. Μέγιστη θερμοκρασία εκτύπωσης: 300 [°C]
9. Συνδεσιμότητα: USB, Ethernet, Wi-Fi
10. Εύχρηστο λογισμικό: FlashPrint
11. Οθόνη: Έγχρωμη οθόνη αφής 5 ιντσών
12. Υποστηριζόμενα λειτουργικά συστήματα: Windows, macOS, Linux

Αυτά είναι μερικά από τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά του εκτυπωτή FlashForge Creator3. Το συγκεκριμένο μοντέλο προσφέρει υψηλή ακρίβεια, ευελιξία και αξιοπιστία για τις εκτυπώσεις 3D.

#### 4.1.5. Συνθήκες εκτύπωσης δοκιμών

Για την εκτύπωση των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν κοινές παράμετροι εκτύπωσης με κοινό υλικό PLA με τις ιδιότητές του να αναφέρονται στον Πίνακα.

Πίνακας 7: Ιδιότητες PLA και τεχνικές προδιαγραφές

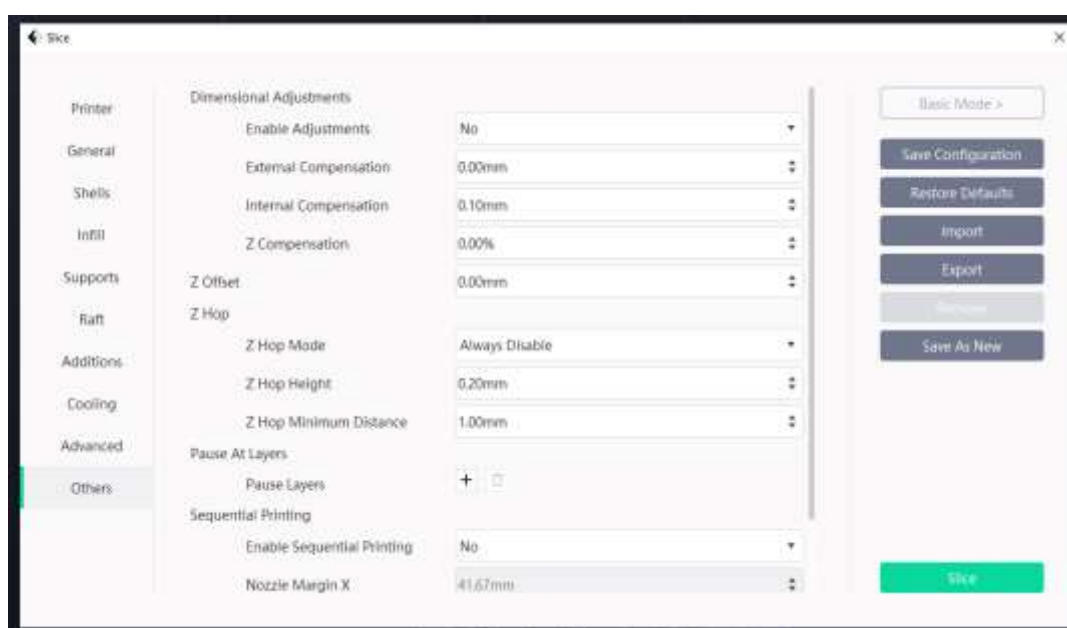
Ιδιότητες PLA – προδιαγραφές	
Βιομήχανος	Πραγματικό νήμα
Προτιμώμενη θερμοκρασία θερμού άκρου του κατασκευαστή	205 [°C]
Οι κατασκευαστές προτιμούσαν τη θερμοκρασία του κρεβατιού θέρμανσης	40 [°C]
Ειδικό βάρος	1,24 [gr/cm <sup>2</sup> ]
Εφελκυσμό	16 kpsi (κατεύθυνση μηχανήματος, MD) / 21 [kpsi] (κατεύθυνση διέλευσης, TD)
Επιμήκυνση θραύσης	160% (MD) 100% (TD)
Μέτρο εφελκυσμού	480 [Mpa] (MD) 560 [Mpa] (TD)
Αντοχή σε κρούση	2,5 I
Θερμοκρασία τήξης	210 [o C] +/- 8 [° C]
Σημείο τήξης	145-160 [°C]
Θερμοκρασία μαλάκυνσης Vicat	60 [°C]

Οι βασικές ρυθμίσεις που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα.

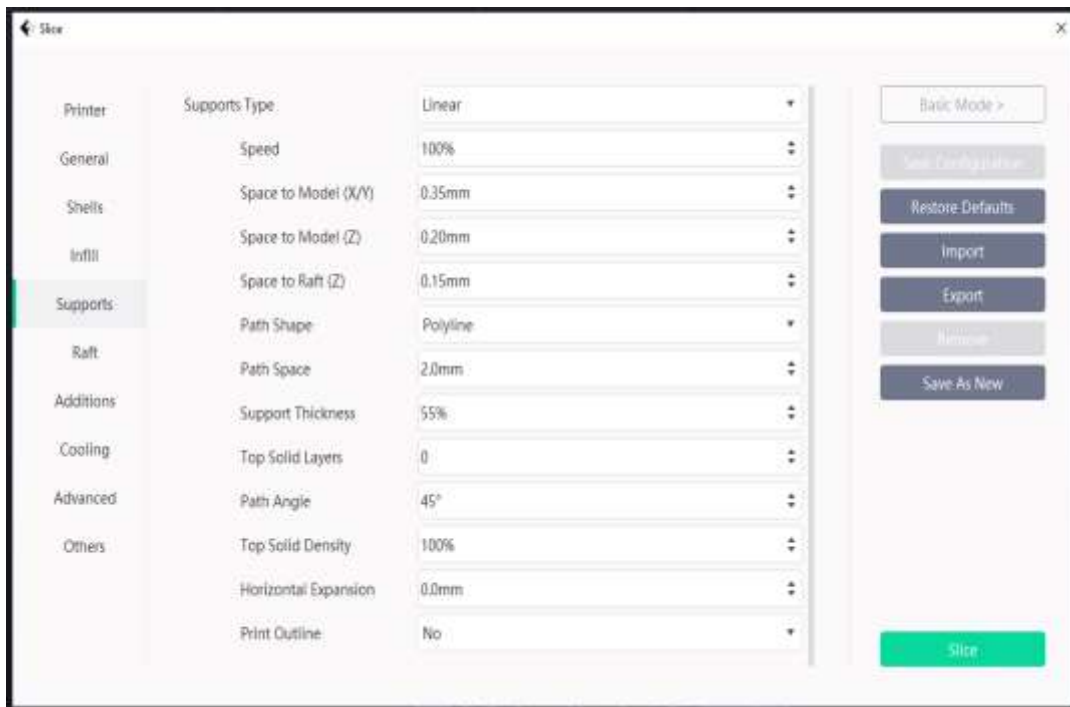
Πίνακας 8: Κύριες παράμετροι 3D εκτύπωσης

Κύριες παράμετροι εκτύπωσης 3D	
Layer Height	0,27 [mm]
Wall Line Count	2
Infill Density	15.0%
Printing Temperature	220 [°C]
Print Speed	60 [mm/sec]
Retraction	Ενεργοποιημένη
Build Plate Adhesion Type	Brim

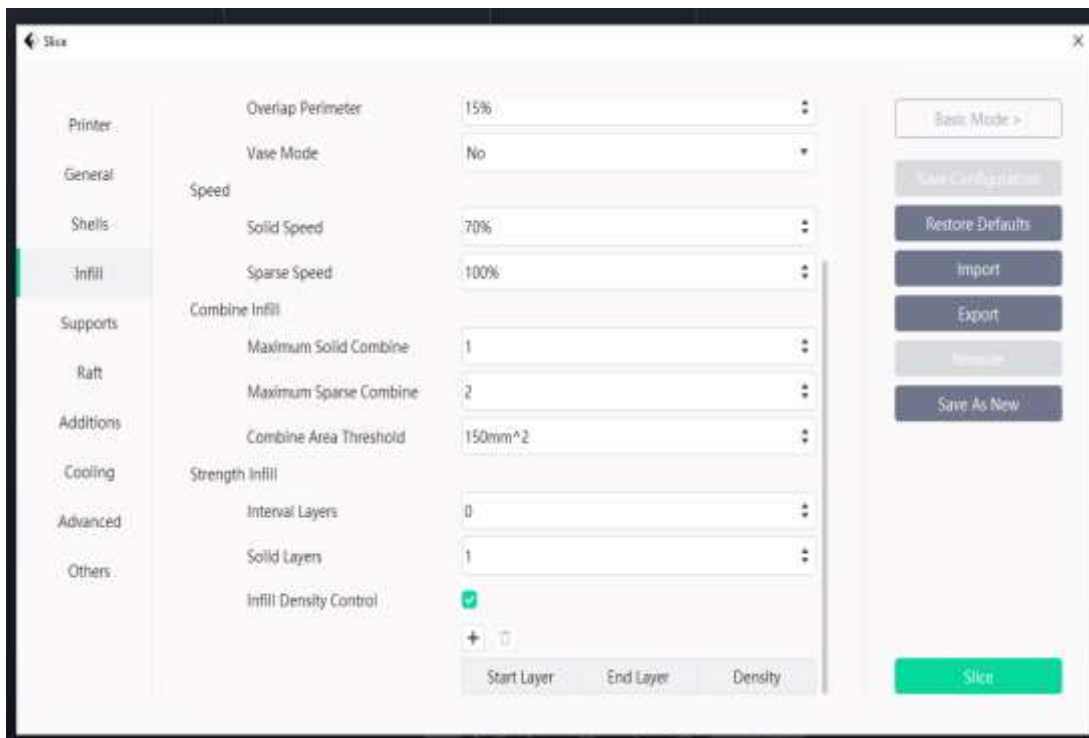
Στις παρακάτω εικόνες απεικονίζεται αναλυτικά οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για γίνουν οι αντίστοιχες εκτυπώσεις.



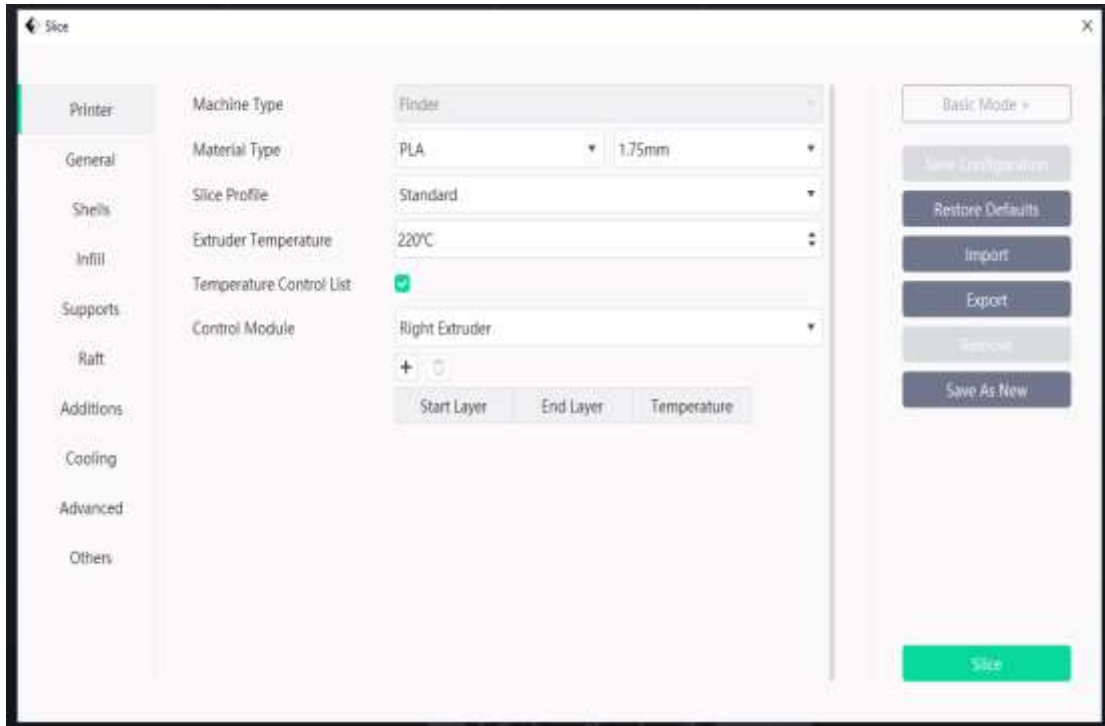
Εικόνα 16: Ρύθμιση Παραμέτρων Εκτύπωσης. [Φωτο]



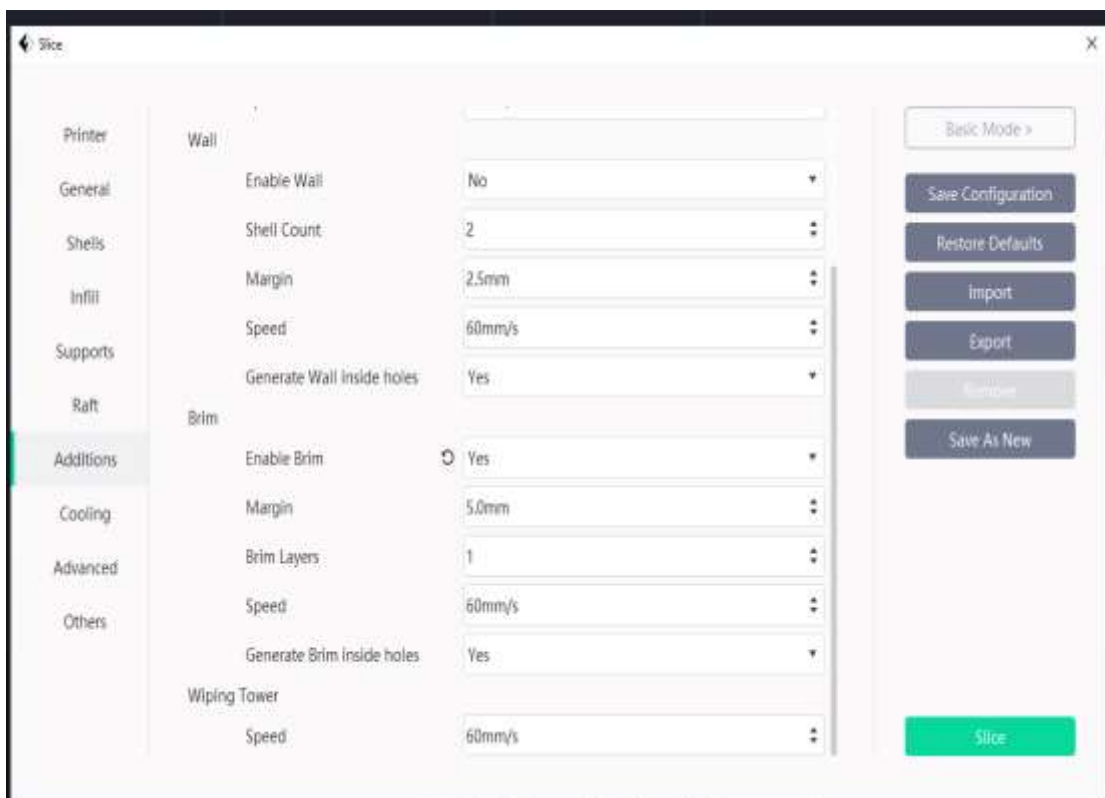
Εικόνα 17: Ρύθμιση Παραμέτρων Εκτύπωσης. [Φωτο]



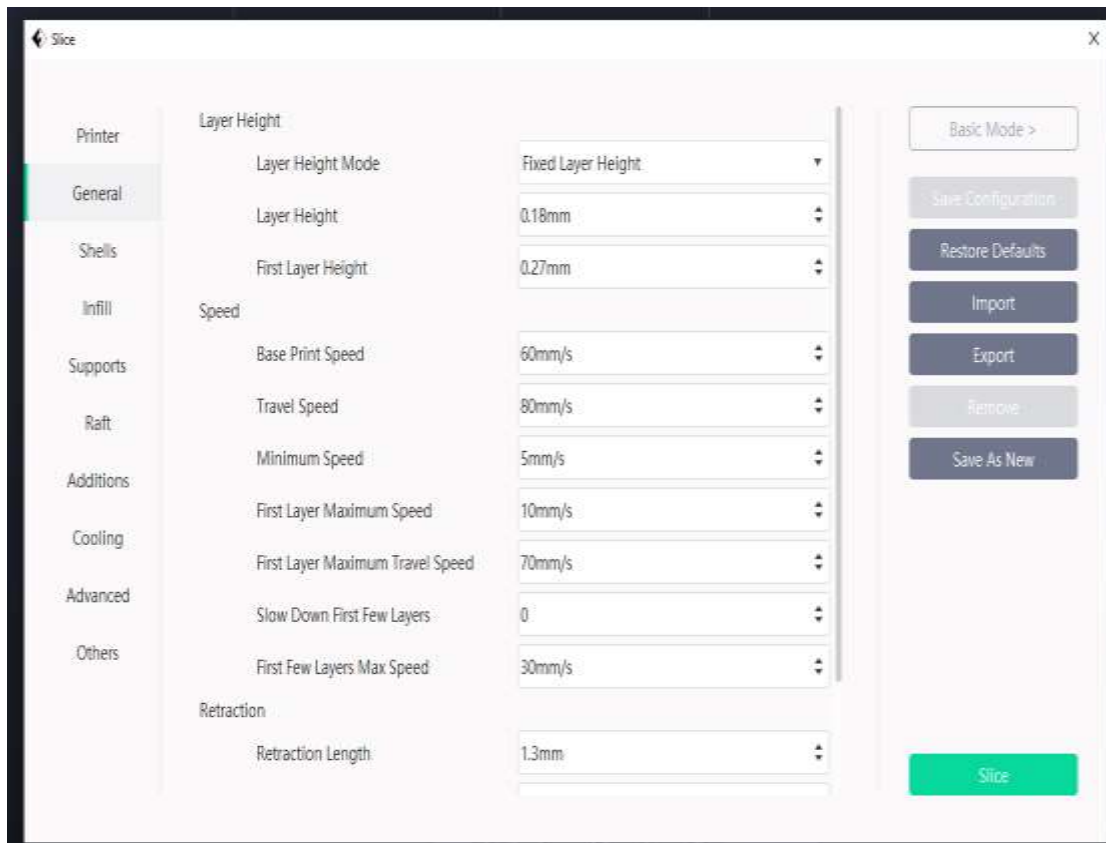
Εικόνα 18: Ρύθμιση Παραμέτρων Εκτύπωσης. [Φωτο]



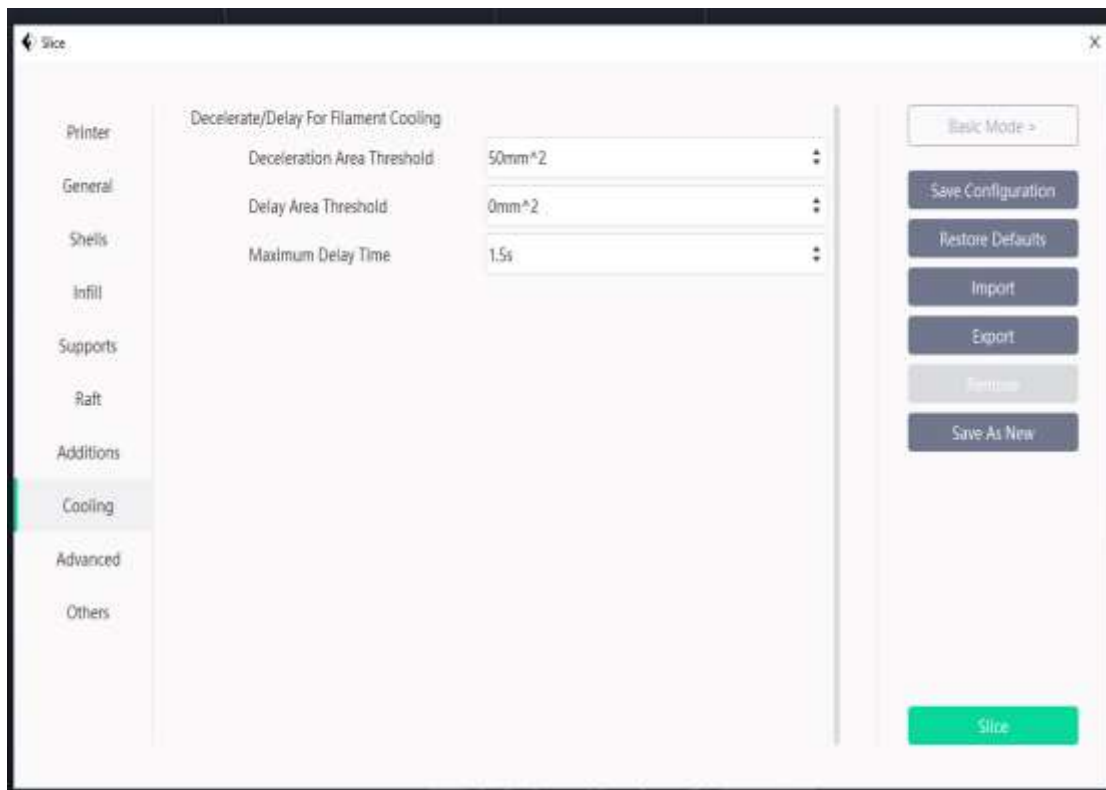
Εικόνα 19: Ρύθμιση Παραμέτρων Εκτύπωσης. [Φωτο]



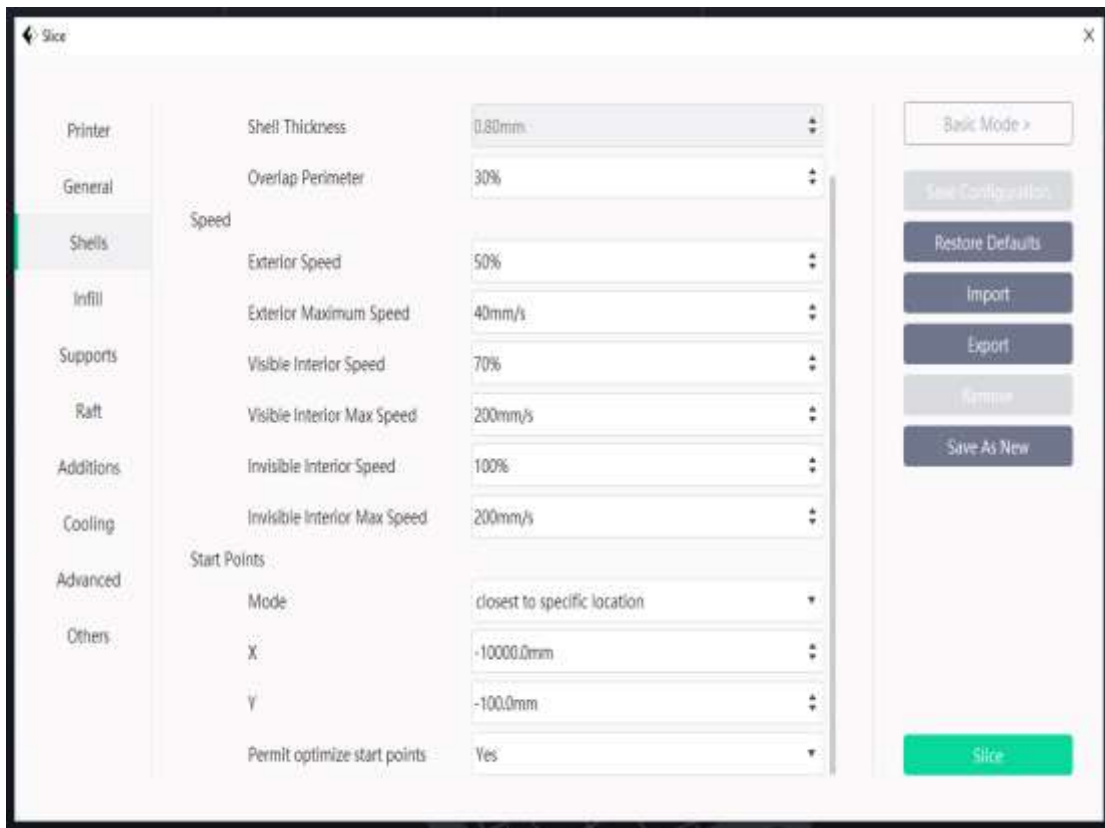
Εικόνα 20: Ρύθμιση Παραμέτρων Εκτύπωσης. [Φωτο]



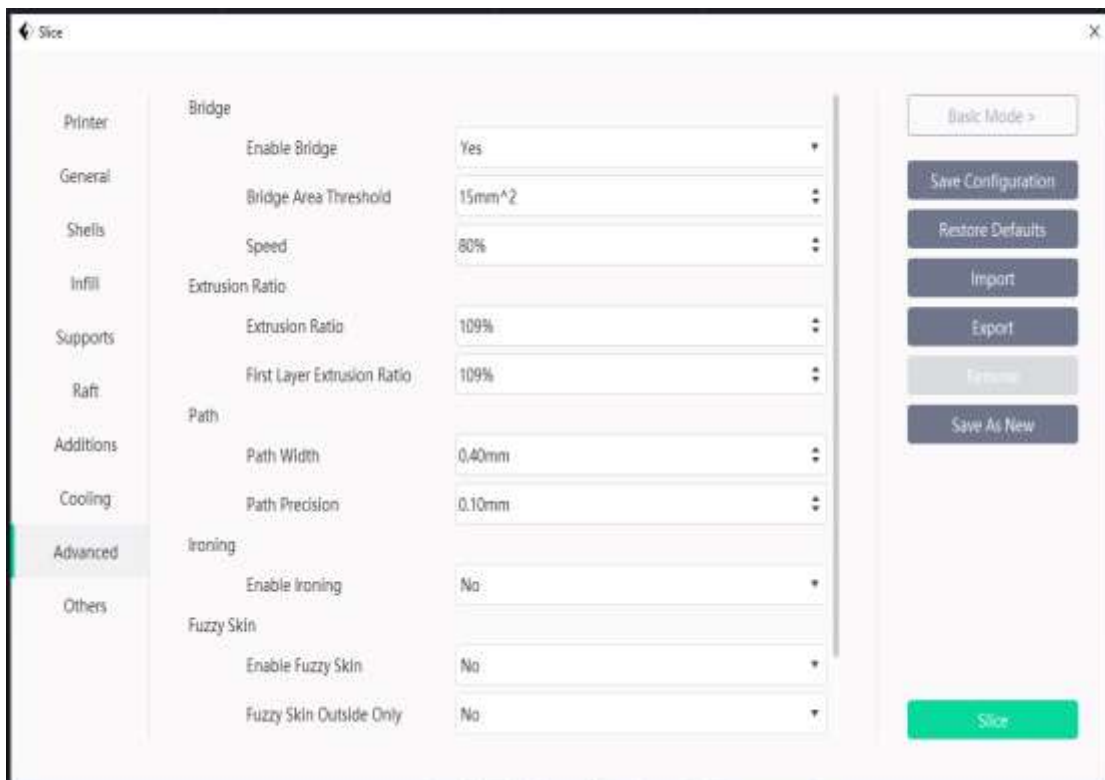
Εικόνα 21: Ρύθμιση Παραμέτρων Εκτύπωσης. [Φωτο]



Εικόνα 22: Ρύθμιση Παραμέτρων Εκτύπωσης. [Φωτο]

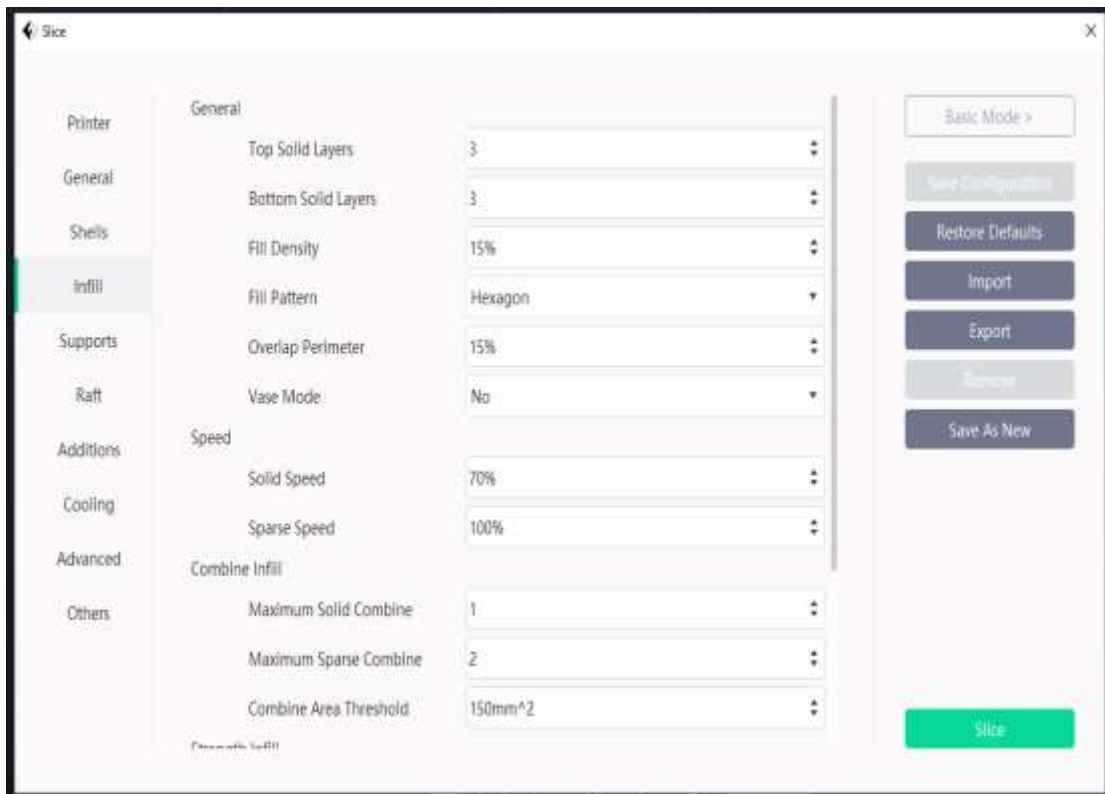


Εικόνα 23: Ρύθμιση Παραμέτρων Εκτύπωσης. [Φωτο]

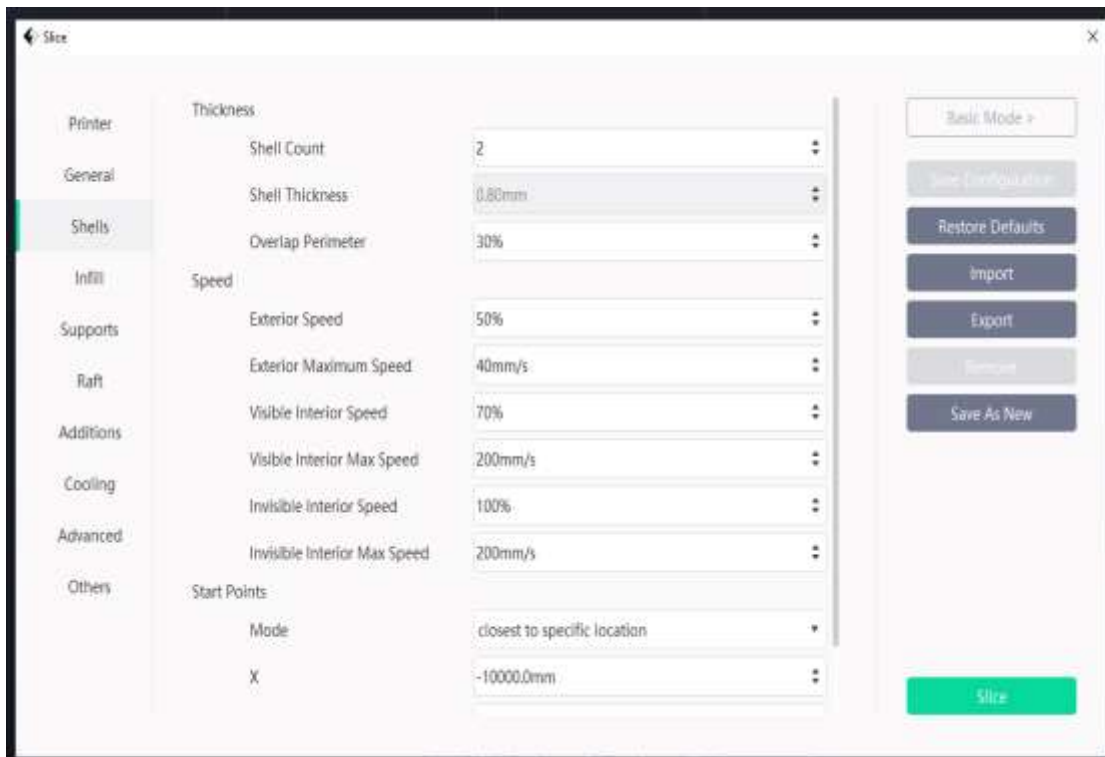


Εικόνα 24: Ρύθμιση Παραμέτρων Εκτύπωσης. [Φωτο]

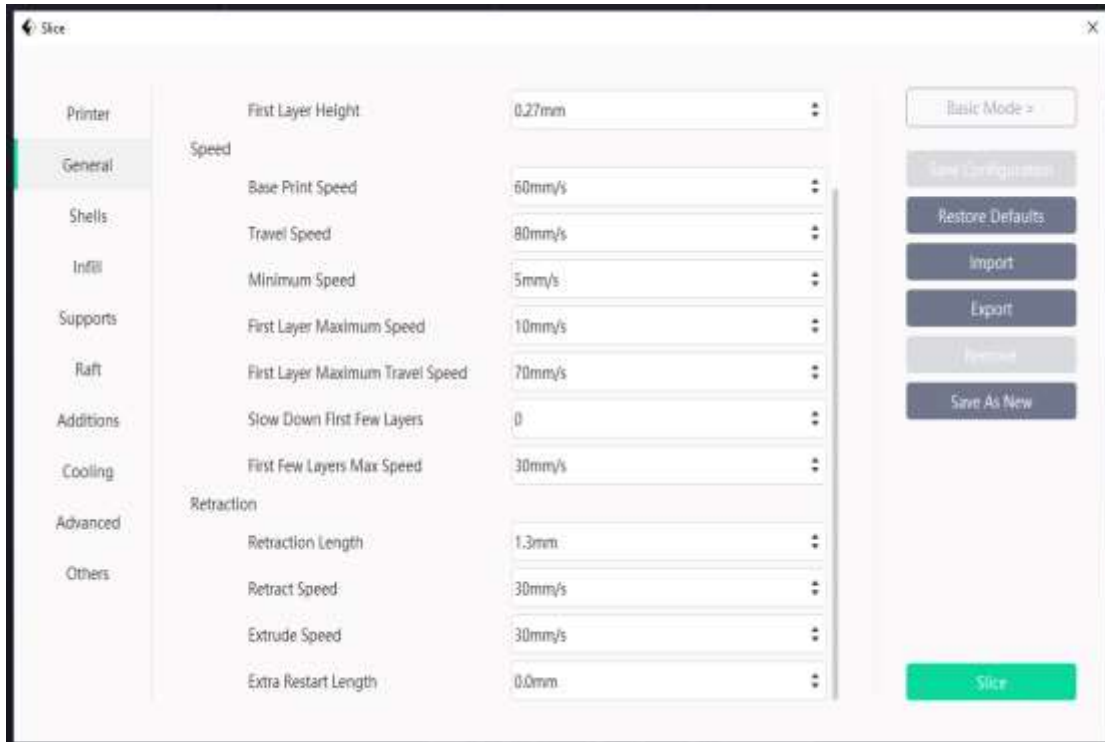




Εικόνα 25: Ρύθμιση Παραμέτρων Εκτύπωσης. [Φωτο]



Εικόνα 26: Ρύθμιση Παραμέτρων Εκτύπωσης. [Φωτο]



Εικόνα 27: Ρύθμιση Παραμέτρων Εκτύπωσης. [Φωτο]

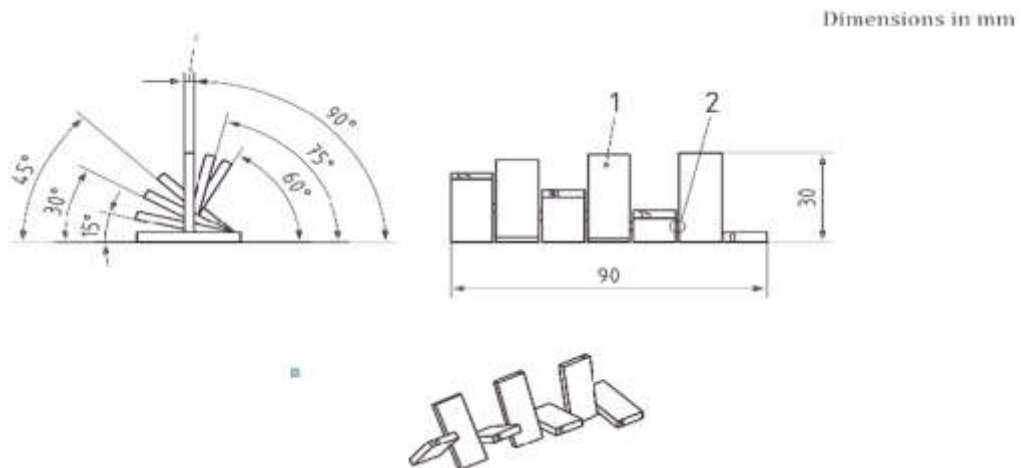


Εικόνα 28: Ρύθμιση Παραμέτρων Εκτύπωσης. [Φωτο]

Οι μετρήσεις ελήφθησαν και στις δύο πλευρές των δοκιμαστικών εκτυπώσεων, με αυτές τις πλευρές να ονομάζονται "UP" - <FRONT> και "DOWN" - <BACK> αντίστοιχα. Για τις μετρήσεις τραχύτητας επιφάνειας, χρησιμοποιήθηκε ένα προφیلόμετρο Taylor Hobson Surtronic 3+. Με βάση το ISO ASTM 52902-2021, σε κάθε πλευρά δείγματος **ελήφθησαν έξι (6) μετρήσεις τραχύτητας σε διαφορετικές τοποθεσίες σε κάθε δείγμα**, σε κατεύθυνση

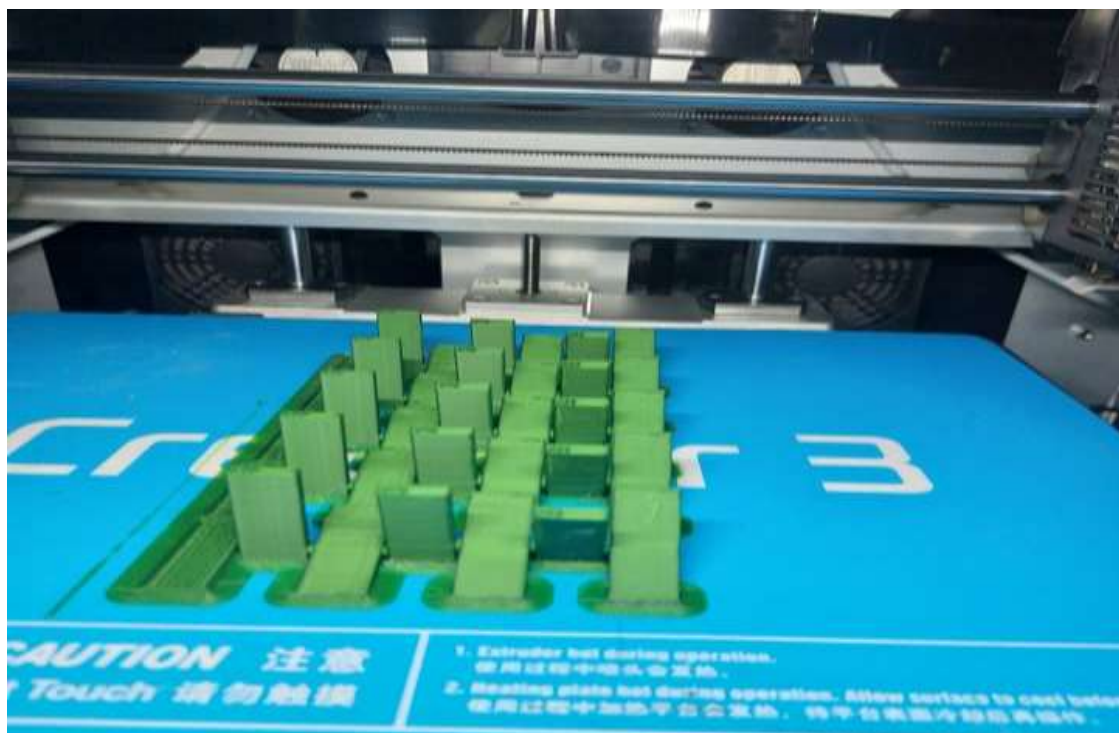
κάθετη προς την τοποθέτηση της υφής (δηλ. κατά μήκος του length των δειγμάτων). Το μήκος αξιολόγησης ορίστηκε στα 12,5 mm και το μήκος δειγματοληψίας ( $\lambda_c$ ) στα 2,5 mm.

Σύμφωνα με το πρότυπο που χρησιμοποιήθηκε η μορφή του δοκιμίου έπρεπε να έχει την παρακάτω μορφή:



Εικόνα 29: Μορφολογία εκτύπωσης (ASTM52902-2021).

Με το πέρασ της εκτύπωσης λήφθηκε το παρακάτω δοκίμιο από κάθε εκτυπωτή:



Εικόνα 30: Τελικό Αποτέλεσμα Εκτύπωσης [Φωτογραφία].

**Ο προτεινόμενος αριθμός δειγμάτων για αυτή τη δοκιμή είναι πέντε (5)** σύμφωνα με το AS ISO ASTM 52902-2021. Οι μετρούμενες τιμές είναι η αριθμητική μέση απόκλιση του αξιολογημένου αρχείου που είναι γνωστό ως Ra και η μέση απόσταση μεταξύ της

υψηλότερης κορυφής και της χαμηλότερης κοιλάδας σε κάθε μήκος δειγματοληψίας γνωστό ως Rz, οι οποίες υπολογίζονται με τις παρακάτω εξισώσεις :

Εξίσωση 3: Υπολογισμός τραχύτητας Ra

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |z(x)| dx$$

όπου lr είναι το μήκος όπου λαμβάνονται οι μετρήσεις, X είναι ο άξονας μήκους και Z είναι το ύψος από τις κοιλάδες έως τις κορυφές.



Εικόνα 31: Taylor Hobson Surtronic 3+ Προφιλόμετρο

Εξίσωση 4: Υπολογισμός τραχύτητας Rz

$$R_z = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s R_{t_i}$$

όπου s είναι ο αριθμός των μηκών δειγματοληψίας και Rti είναι Rt ο τουίσοτού δείγματος. Η εκτίμηση της τραχύτητας της επιφάνειας γίνεται με βάση τις μέσες τιμές Ra και Rz για κάθε γωνία, καθώς και τον αντίστοιχο συντελεστή διακύμανσης. Ο συντελεστής διακύμανσης λαμβάνει υπόψη τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση, και υπολογίζεται από:

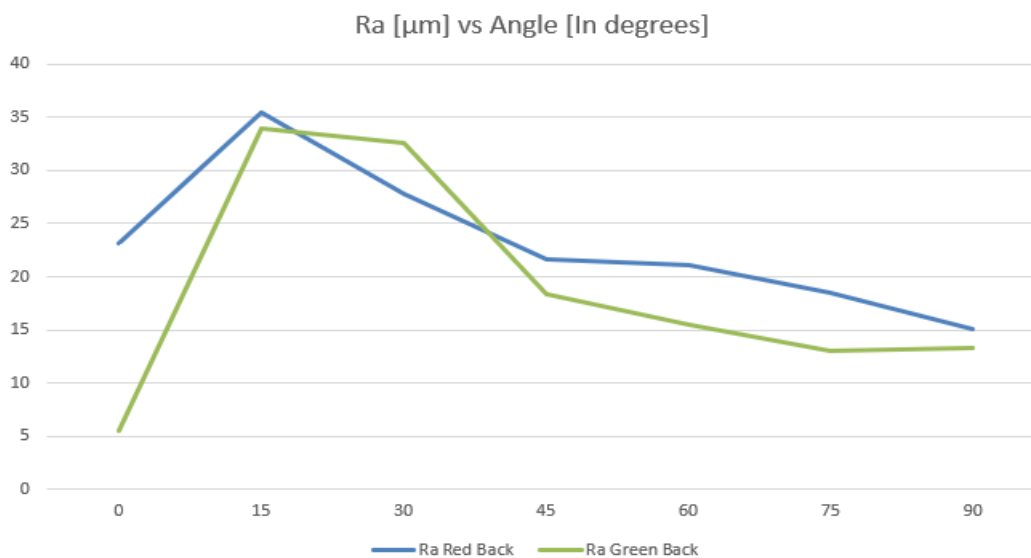
Εξίσωση 5: Υπολογισμός Συντελεστή Διακύμανσης

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu}$$

όπου σ είναι η τυπική απόκλιση και μ ο μέσος όρος του δείγματος.

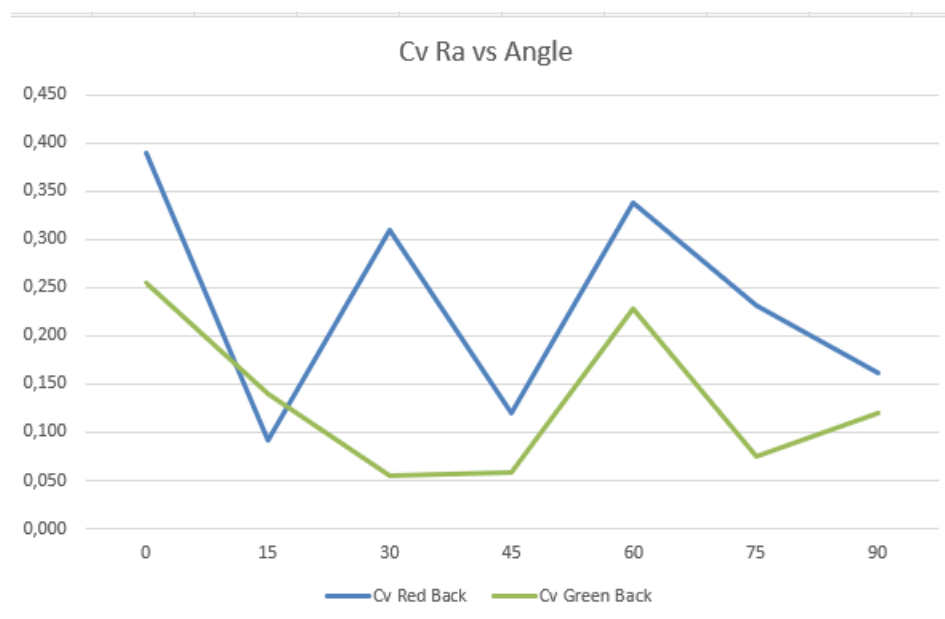
## 4.2. Ανάλυση Αποτελεσμάτων

### 4.2.1. Διαγράμματα Συσχέτισης



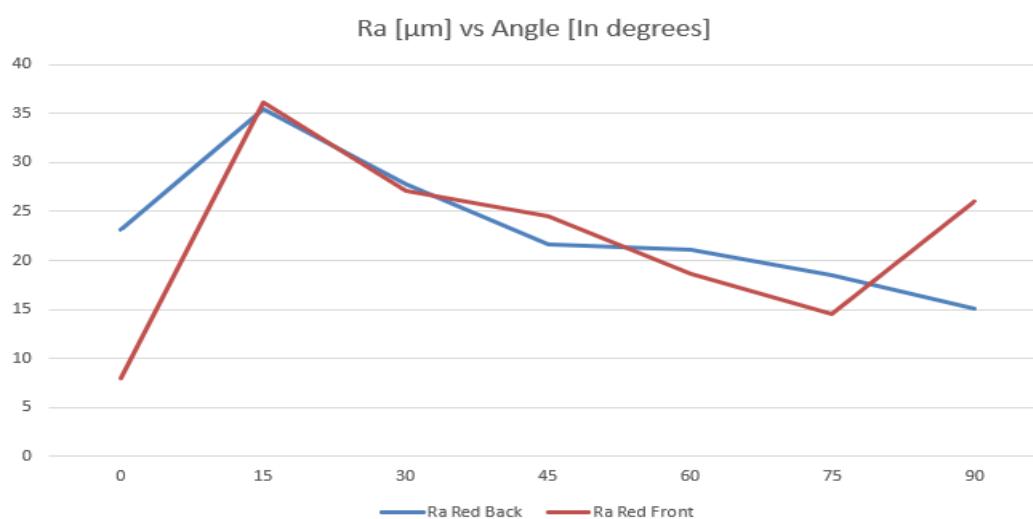
Διάγραμμα: 3 Ra vs Angle για Back πλευρά των δύο εκτυπωτών

Από τις παραπάνω μετρήσεις παρατηρείται ότι η τραχύτητα Ra [μm] και για τους δύο εκτυπωτές καθώς αυξάνει η γωνία εκτύπωσης βελτιώνεται σημαντικά από γωνίες 15 [°] μέχρι και γωνία 90 [°]. Για την επίπεδη εκτύπωση η πίσω πλευρά του πράσινου εκτυπωτή παρουσιάζει σαφώς πολύ καλύτερη – χαμηλότερη τραχύτητα σε σχέση με αυτή του κόκκινου εκτυπωτή.



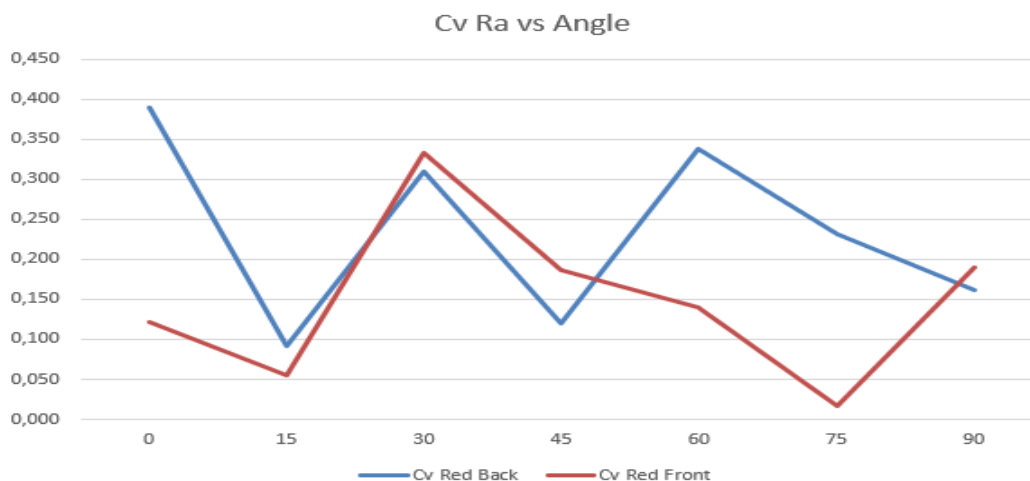
Διάγραμμα: 4 Cv vs Angle για Back πλευρά των δύο εκτυπωτών

Στο διάγραμμα Cn Ra-Angle, όσον αφορά το κάτω μέρος, βλέπουμε ότι το Cn ακολουθεί μια καθοδική πορεία για τον πράσινο εκτυπωτή, με μια κορυφή (peak) στις 60 μοίρες. Συνολικά, οι χαμηλές τιμές του Cn για τον πράσινο εκτυπωτή εξασφαλίζουν αξιοπιστία των μετρήσεων. Από την άλλη, στον κόκκινο εκτυπωτή παρατηρείται μια πιο ακανόνιστη πορεία (πολλαπλά spikes) με την αύξηση των μοιρών. Ξεκινώντας καθοδικά από 0 μοίρες, οι χαμηλότερες τιμές του Cn είναι στις 15 και 45 μοίρες (με χαμηλότερη αυτή των 15 μοιρών), ενώ οι υψηλότερες σημειώνονται στις 0,30 και 60 μοίρες (με υψηλότερη αυτή των 0 μοιρών). Συμπερασματικά ο RED – Low Cost δεν παρουσιάζει αξιοπιστία μετρήσεων.



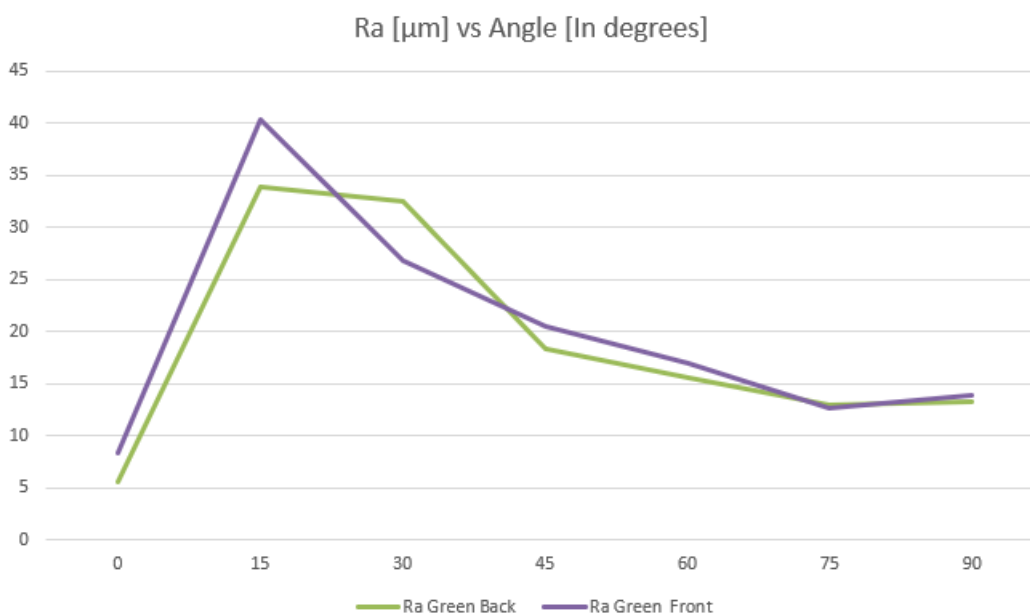
Διάγραμμα: 5 Ra vs Angle για δύο πλευρές του RED εκτυπωτή.

Στο διάγραμμα Ra-Angle για τον RED- Low Cost εκτυπωτή, για το επάνω και κάτω μέρος του δοκιμίων του κόκκινου εκτυπωτή παρατηρείται μια σχετική ομοιομορφία κατά την αύξηση των μοιρών. Υπάρχει μια κορυφή για κάθε καμπύλη γύρω στις 15 μοίρες και στα 35 [μm] τραχύτητας. Στη συνέχεια οι καμπύλες ακολουθούν καθοδική πορεία, με μια μικρή διαφοροποίηση της τραχύτητας στις 45 μοίρες όπου η τιμή είναι μεγαλύτερη για το επάνω μέρος (Red Front). Η πορεία της καμπύλης για το κάτω μέρος παραμένει καθοδική, ενώ για το πάνω μέρος παρατηρείται πτώση (drop) στις 75 μοίρες και στη συνέχεια άνοδος της τραχύτητας. Συνολικά, δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές στην τραχύτητα του επάνω και κάτω μέρους για τον κόκκινο εκτυπωτή.



Διάγραμμα: 6 Cv vs Angle για δύο πλευρές του RED εκτυπωτή.

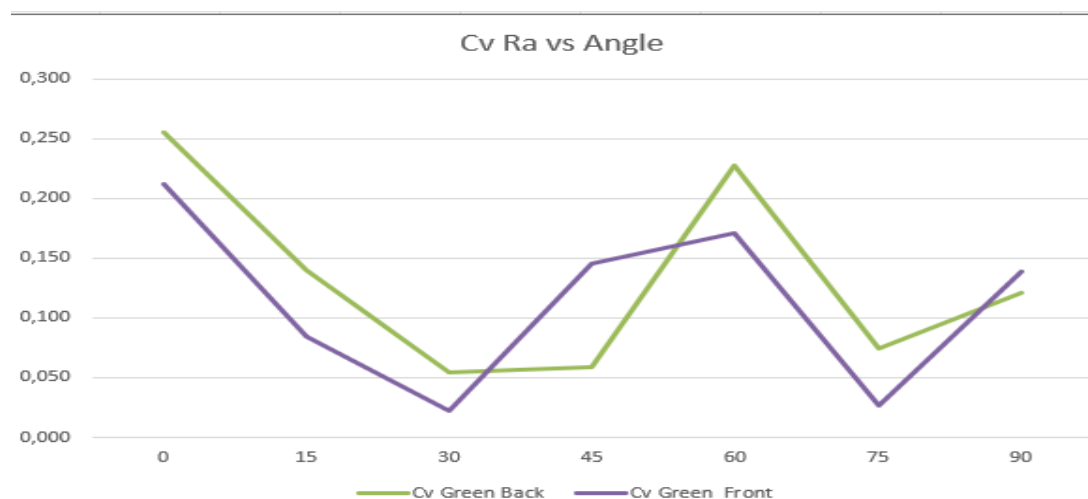
Στο διάγραμμα Cv Ra-Angle, όσον αφορά το επάνω και κάτω μέρος του κόκκινου εκτυπωτή, παρατηρούμε ότι η καμπύλη του κάτω μέρους ακολουθεί μια ακανόνιστη πορεία, με peaks στις 0,30 και 60 μοίρες όπως αναφέρθηκε και πριν. Η καμπύλη του επάνω μέρους παρουσιάζει πτώση στις 15 μοίρες και μια μεγαλύτερη πτώση στις 75 μοίρες, ενώ υπάρχει μοναδικό peak στις 30 μοίρες για την τιμή των περίπου 0,330. Φαίνεται ότι οι τιμές των Cv για το επάνω μέρος παραμένουν χαμηλότερες από αυτές για το κάτω μέρος. Επίσης, εμφανίζουν έλλειψη επαναληψιμότητας και αξιοπιστίας.



Διάγραμμα: 7 Ra vs Angle για δύο πλευρές του GREEN εκτυπωτή.

Στο διάγραμμα Ra-Angle για τον πράσινο εκτυπωτή, υπάρχει ένα ξεκάθαρο peak στις 15 μοίρες για την καμπύλη του επάνω μέρους (Green Front) και στη συνέχεια οι τιμές

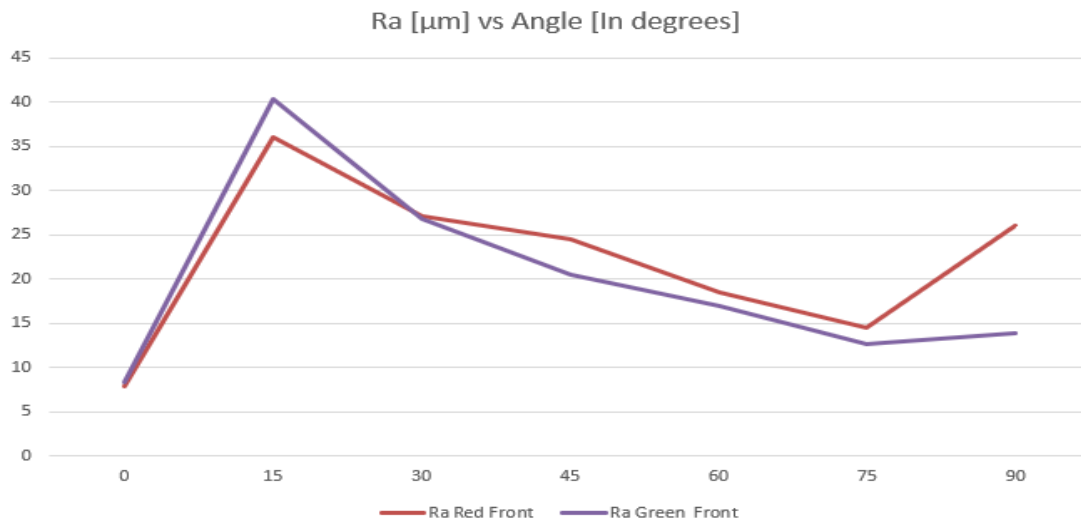
πέφτουν, με μια πολύ μικρή άνοδο μετά τις 75 μοίρες. Για το κάτω μέρος η πορεία των τιμών είναι παρόμοια, με τη διαφορά ότι υπάρχουν δύο, χαμηλότερα από πριν, peaks στις 15 και 30 μοίρες. Στο σημείο των 75 μοιρών οι τιμές της τραχύτητας για το επάνω και κάτω μέρος φαίνονται να είναι πάρα πολύ κοντά.



Διάγραμμα: 8 Cv vs Angle για δύο πλευρές του GREEN εκτυπωτή.

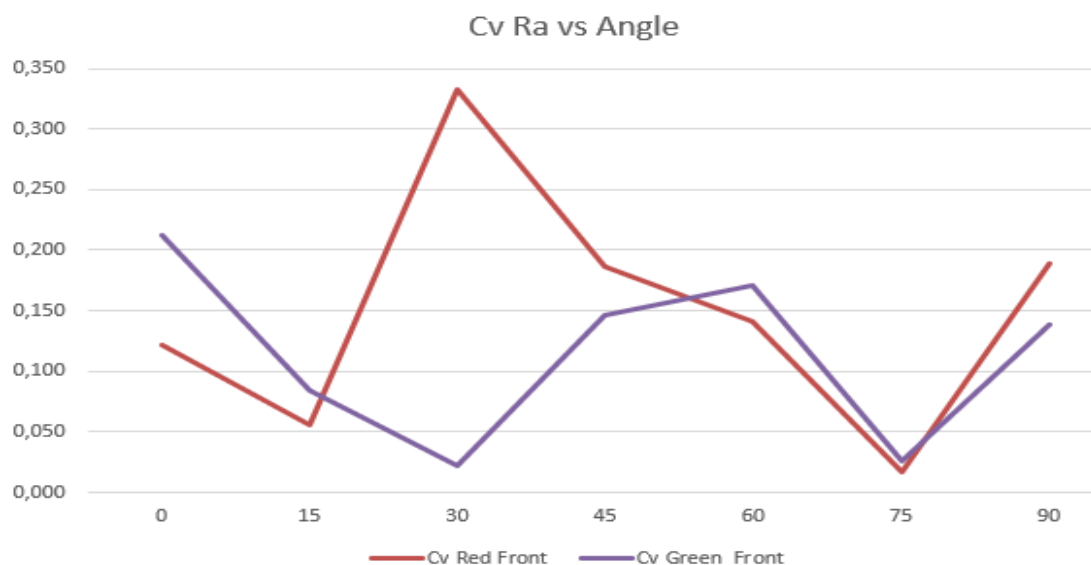
Στο διάγραμμα Cv Ra-Angle για τον πράσινο εκτυπωτή, οι καμπύλες των Green Front και Green Back σημειώνουν καθοδική πορεία μέχρι τις 30 μοίρες, όπου η τιμή του Cv για το επάνω μέρος αυξάνει σημαντικά σε σχέση με το κάτω. Η καμπύλη του επάνω μέρους παρουσιάζει δύο peaks στις 45 και 60 μοίρες και στη συνέχεια πέφτει στις 75 μοίρες. Η καμπύλη του κάτω μέρους έχει ένα εμφανές peak στις 60 μοίρες και παρομοίως οι τιμές πέφτουν μέχρι τις 75 μοίρες. Μετά τις 75 μοίρες οι τιμές των Cv ανεβαίνουν ξανά και για τις δύο καμπύλες. Οι δύο καμπύλες φαίνεται να έχουν ομοιότητες, χωρίς σημαντικές διαφορές στις τιμές των Cv.





Διάγραμμα: 9 Ra vs Angle για FRONT πλευρά των δύο εκτυπωτών

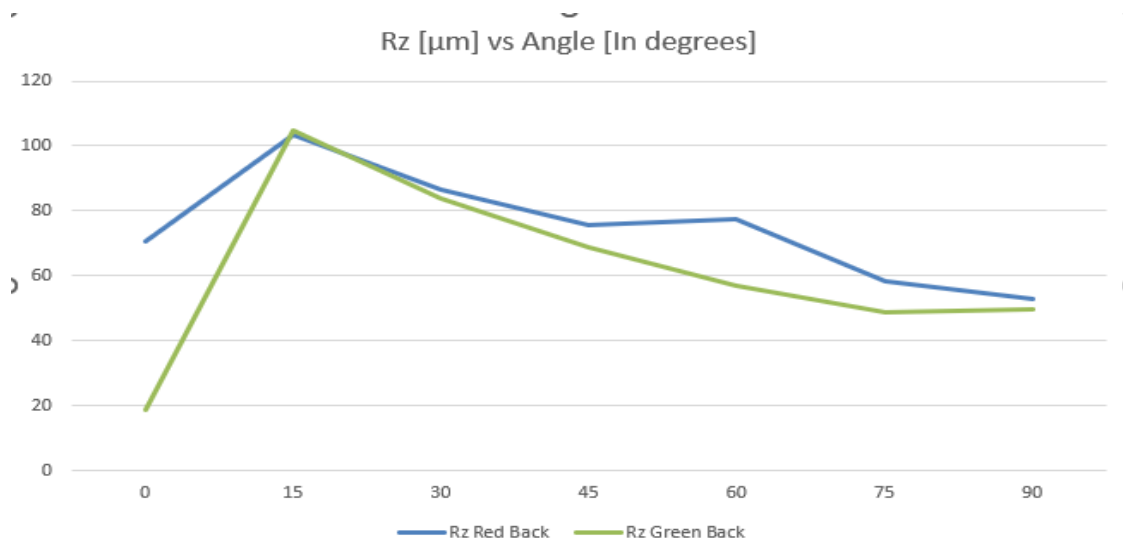
Στο διάγραμμα Ra-Angle για το επάνω μέρος στους δύο εκτυπωτές υπάρχει μεγάλη ομοιομορφία. Υπάρχουν δύο peaks στις 15 μοίρες για τους δύο εκτυπωτές, με τον πράσινο να έχει αυξημένη τραχύτητα σε εκείνη τη γωνία. Στη συνέχεια η πορεία είναι καθοδική και για τις δύο καμπύλες, με μια μικρή διακύμανση στις 45 μοίρες όπου η τραχύτητα είναι υψηλότερη για τον κόκκινο εκτυπωτή. Στη γωνία των 75 μοιρών οι τιμές της τραχύτητας αρχίζουν να αυξάνονται και για τους δύο εκτυπωτές. Σε κάθε περίπτωση σε μικρές μοίρες και οι δύο παρουσιάζουν λιγότερο ικανοποιητικές μετρήσεις σε μικρές μοίρες εκτύπωσης.



Διάγραμμα: 10 Cv vs Angle για FRONT πλευρά των δύο εκτυπωτών

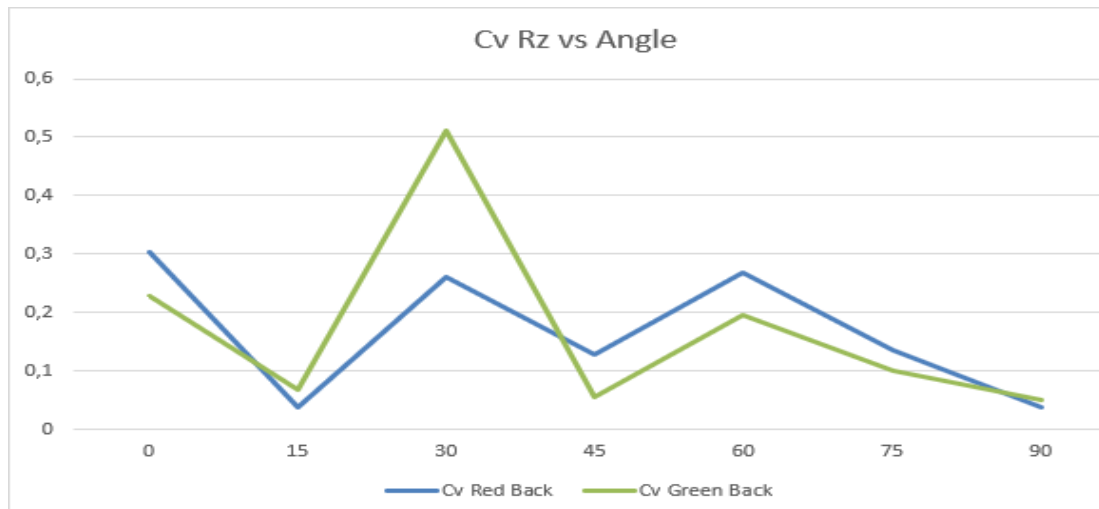
Στο διάγραμμα Cv Ra-Angle για το επάνω μέρος στους δύο εκτυπωτές υπάρχει σημαντική διαφορά. Περνώντας το σημείο των 15 μοιρών βλέπουμε ένα ξεκάθαρο peak στην καμπύλη του κόκκινου εκτυπωτή στις 30 μοίρες που φτάνει μέχρι την τιμή των περίπου 0,330.

Από την άλλη, η τιμή του  $C_v$  πέφτει κοντά στο 0,025 στη γωνία των 30 μοιρών. Οι δύο καμπύλες τέμνονται κοντά στις 55 μοίρες και οι τιμές μειώνονται ταυτόχρονα έως τις 75 μοίρες, όπου αρχίζουν και ανεβαίνουν ξανά. Επιδεικνύεται ότι οι μετρήσεις του κόκκινου εκτυπωτή σε μικρές μοίρες δοκιμών δεν παρουσιάζουν επαναληψιμότητα.



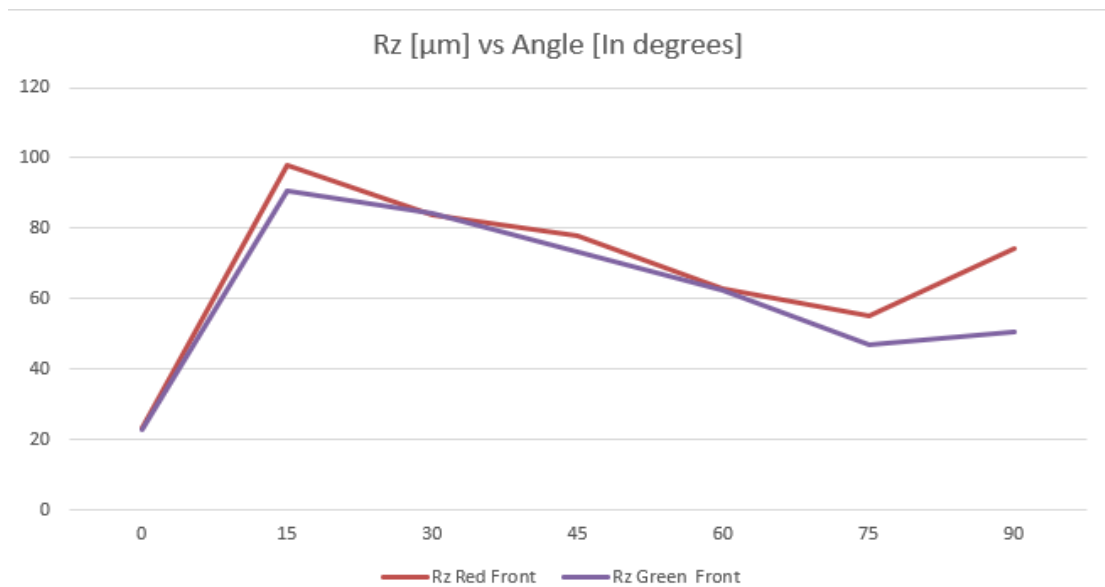
Διάγραμμα: 11 Rz vs Angle για Back πλευρά των δύο εκτυπωτών

Στο διάγραμμα Rz-Angle για το κάτω μέρος στους δύο εκτυπωτές οι καμπύλες έχουν κάποιες μικρές διαφορές. Η πορεία των τιμών Rz είναι ανοδική έως τις 15 μοίρες, όπου οι τιμές του πράσινου εκτυπωτή μειώνονται συνεχώς έως και τις 75 μοίρες, από όπου παρατηρείται μια αμελητέα αύξηση. Οι τιμές του κόκκινου εκτυπωτή μειώνονται μέχρι τις 45 μοίρες, από όπου αυξάνονται ελάχιστα μέχρι τις 60 μοίρες και η ίδια διαφοροποίηση παρατηρείται ξανά στο εύρος 60 έως 90 μοιρών. Συνολικά, είναι εμφανές ότι οι τιμές του Rz παραμένουν χαμηλότερες με τον πράσινο εκτυπωτή, με εξαίρεση τις τιμές κοντά στο peak των 15 μοιρών.



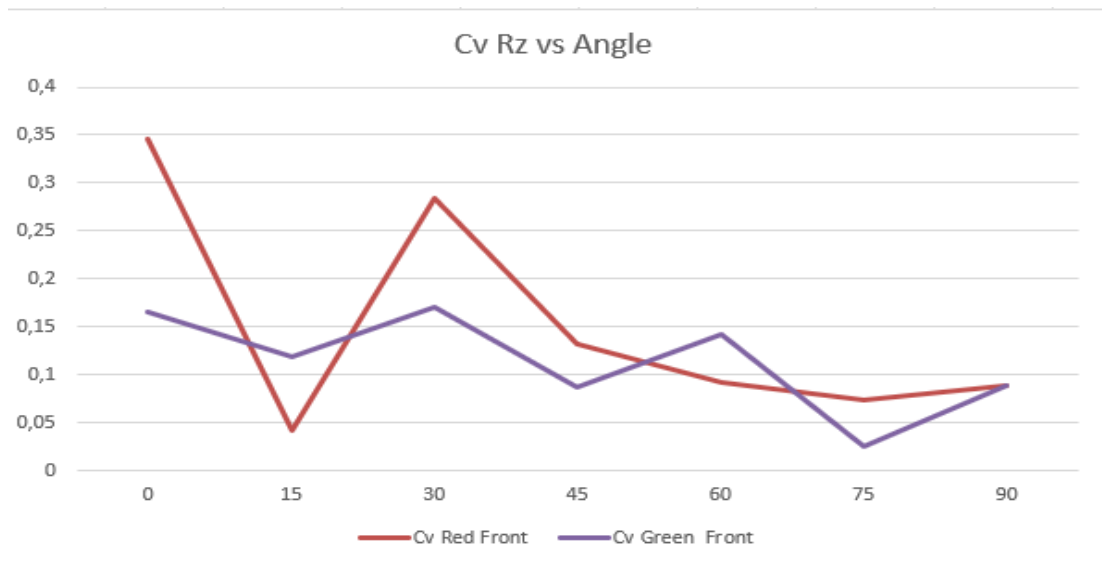
Διάγραμμα: 12 Cv Rz vs Angle για Back πλευρά των δύο εκτυπωτών

Στο διάγραμμα Cv Rz-Angle για το κάτω μέρος στους δύο εκτυπωτές υπάρχουν διαφορές. Η καμπύλη του πράσινου εκτυπωτή παρουσιάζει μέγιστο peak στις 30 μοίρες, ενώ στη συνέχεια οι τιμές ταλαντεύονται κάτω από 0,2. Η καμπύλη του κόκκινου εκτυπωτή είναι πιο ακανόνιστη, με μέγιστες τιμές στις 30 και 60 μοίρες και ελάχιστη στις 15 μοίρες. Οι τιμές του Cv φαίνεται να παραμένουν χαμηλότερες με τον κόκκινο εκτυπωτή.



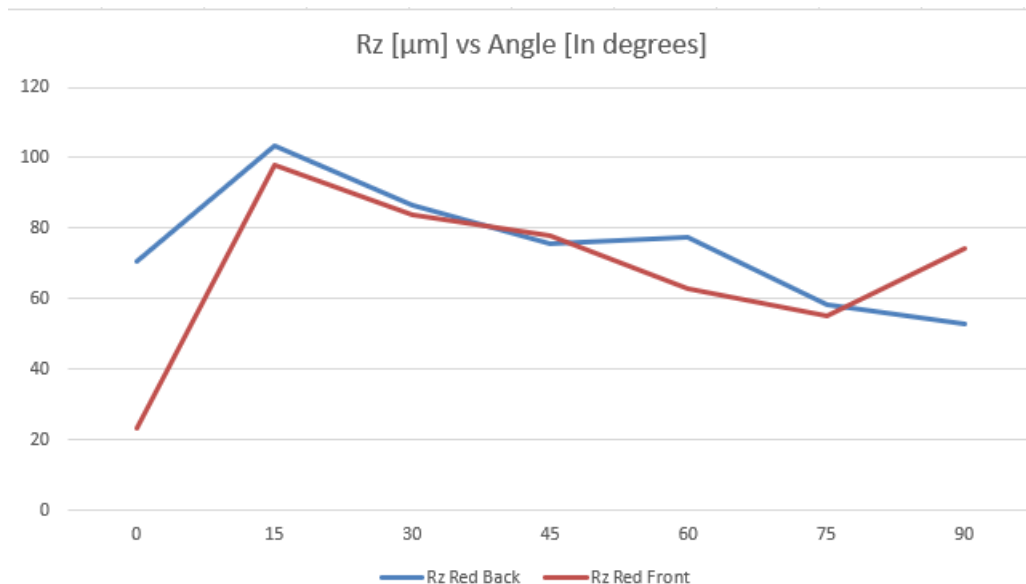
Διάγραμμα: 13 Rz vs Angle για FRONT πλευρά των δύο εκτυπωτών

Στο διάγραμμα Rz-Angle για το επάνω μέρος, οι καμπύλες των δύο εκτυπωτών είναι παρόμοιες. Μετά από τα peaks στις 15 μοίρες οι τιμές των Rz αρχίζουν και μειώνονται έως τις 75 μοίρες, όπου ξεκινάει αύξηση των τιμών. Είναι εμφανές ότι οι τιμές Rz για τον πράσινο εκτυπωτή παραμένουν χαμηλότερες (γίνονται το πολύ ίσες με αυτές του κόκκινου σε γωνίες 0, 30 και 60 μοιρών).



Διάγραμμα: 14 Cv Rz vs Angle για FRONT πλευρά των δύο εκτυπωτών

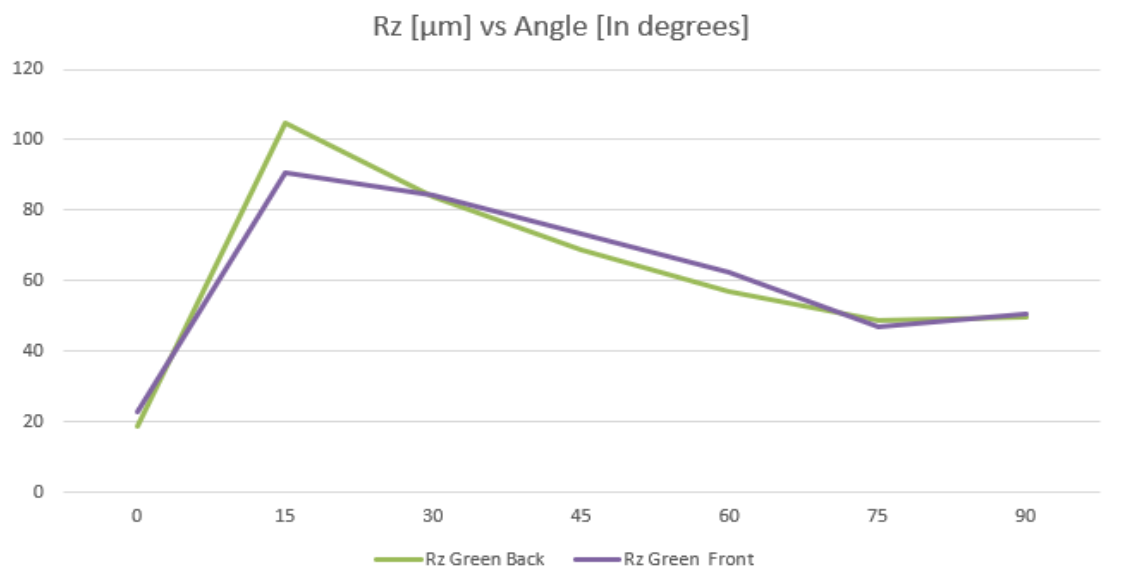
Στο διάγραμμα Cv Rz-Angle για το επάνω μέρος, οι καμπύλες για τους δύο εκτυπωτές έχουν εμφανείς διαφορές. Στην καμπύλη του κόκκινου εκτυπωτή παρατηρείται ελάχιστο στις 15 μοίρες με τιμή κοντά στο 0,05 και μέγιστο στις 30 μοίρες με τιμή κοντά στο 0,3. Μετά το μέγιστο οι τιμές έχουν καθοδική πορεία. Στην καμπύλη του πράσινου εκτυπωτή υπάρχουν πολλαπλά μέγιστα στις 0, 30, 60 και 90 μοίρες και ελάχιστα στις 15, 45 και 75 μοίρες, με το τελευταίο να παίρνει την χαμηλότερη τιμή, κοντά στο 0,03. Οι δύο εκτυπωτές παίρνουν την ίδια τιμή στη γωνία των 90 μοιρών.



Διάγραμμα: 15 Rz vs Angle για RED εκτυπωτή

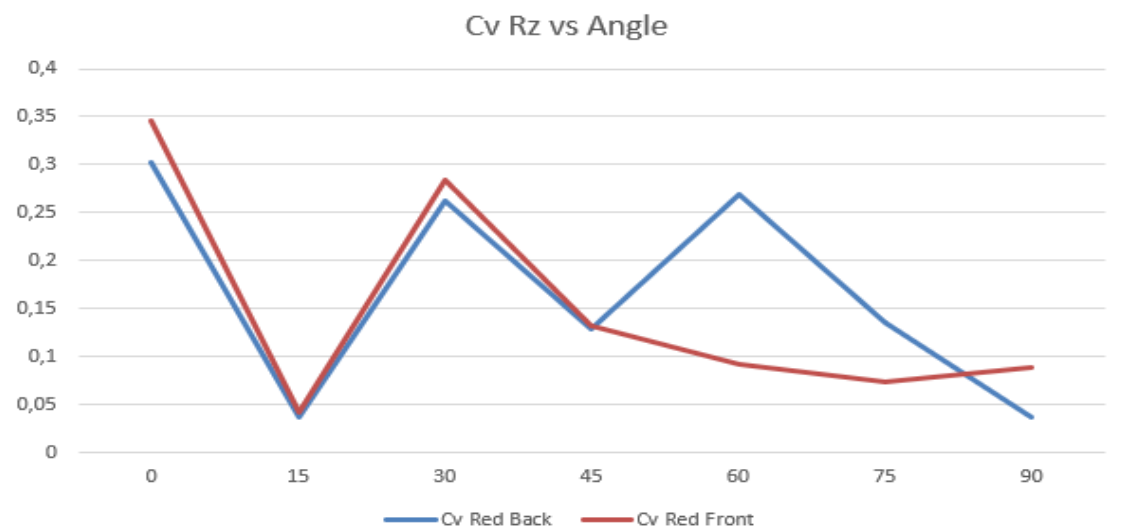
Στο διάγραμμα Rz-Angle για τον κόκκινο εκτυπωτή, οι καμπύλες για το επάνω και κάτω μέρος παρουσιάζουν peak στις 15 μοίρες. Στις 60 μοίρες υπάρχει μέγιστο για το κάτω

μέρος και μετά τις 75 μοίρες οι τιμές μειώνονται, ενώ για το επάνω μέρος υπάρχει ελάχιστο και μετά τις 75 μοίρες οι τιμές αυξάνονται.



Διάγραμμα: 16 Rz vs Angle για GREEN εκτυπωτή

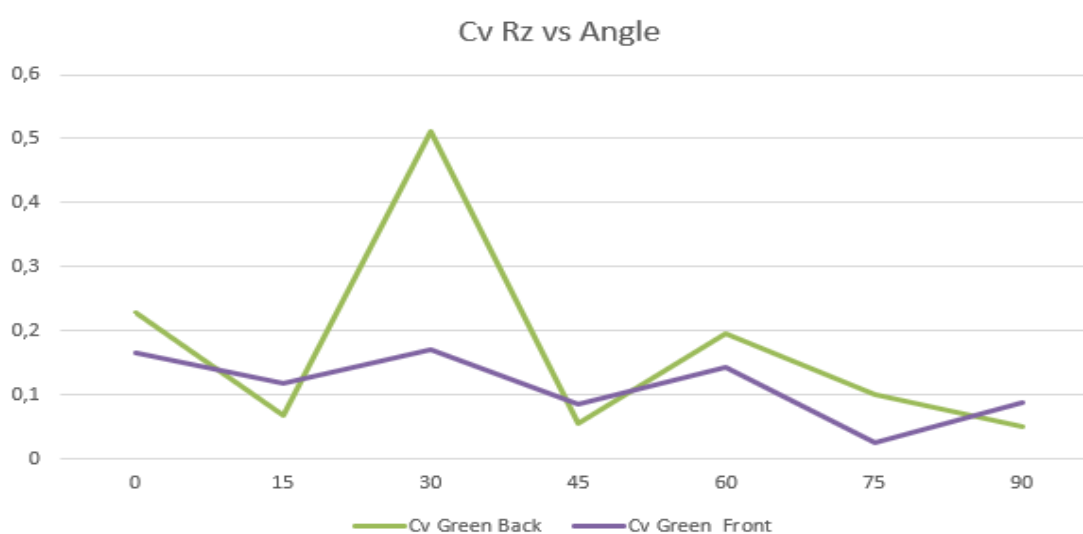
Στο διάγραμμα Rz-Angle για τον πράσινο εκτυπωτή οι καμπύλες είναι όμοιες. Μετά τα peaks στις 15 μοίρες ακολουθεί κάθοδος των τιμών. Στο εύρος από 30 έως περίπου 75 μοίρες, οι τιμές του κάτω μέρους παραμένουν σχετικά χαμηλότερες από αυτές του πάνω μέρους. Από 75 έως 90 μοίρες οι τιμές ταυτίζονται σε κάποια σημεία.



Διάγραμμα: 17 Cv Rz vs Angle για RED εκτυπωτή

Στο διάγραμμα Cv Rz-Angle για τον κόκκινο εκτυπωτή υπάρχει μεγάλη ομοιότητα στις καμπύλες έως τη γωνία των 45 μοιρών, με ελάχιστες τιμές στις 15 μοίρες και μέγιστες στις 30 μοίρες. Μετά τις 45 μοίρες, η καμπύλη του κάτω μέρους παρουσιάζει κι άλλο μέγιστο στις 60

μοίρες και στη συνέχεια κατεβαίνει. Από την άλλη, η καμπύλη του επάνω μέρους αρχίζει να πέφτει ομαλά κάτω από το 0,1 και σημειώνει μια αμελητέα άνοδο μετά τις 75 μοίρες.



Διάγραμμα: 18 Rz vs Angle για GREEN εκτυπωτή

Στο διάγραμμα Cv Rz-Angle για τον πράσινο εκτυπωτή παρατηρείται μεγάλη διαφορά στις τιμές του επάνω και κάτω μέρους, με τις τιμές του επάνω μέρους να παραμένουν χαμηλότερες. Η καμπύλη του κάτω μέρους παρουσιάζει ένα εμφανές peak στις 30 μοίρες, με τιμή λίγο πάνω από 0,5. Κοντά στη γωνία των 45 μοιρών πέφτει κάτω από 0,1 και στη συνέχεια ανεβαίνει μέχρι τις 60 μοίρες, όπου ξεκινάει και κατεβαίνει ξανά. Αντίθετα, η καμπύλη του επάνω μέρους δεν παίρνει τιμές πάνω από 0,2 και έχει μικρά peaks στις 30 και 60 μοίρες. Η μικρότερη τιμή παρατηρείται στις 75 μοίρες (κάτω από 0,05).

## 4.2.2. Στατιστικά σημαντικά δεδομένα

### 4.2.2.1. Tukey Method

Η μέθοδος Tukey, γνωστή επίσης ως δοκιμή εύρους Tukey ή ως Tukey's honest significant difference (HSD), είναι μια στατιστική μέθοδος που χρησιμοποιείται συχνά στην ανάλυση δεδομένων και στον έλεγχο υποθέσεων. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιπτώσεις όπου χρειάζεται να γίνουν πολλαπλές συγκρίσεις ζευγών μέσων των ομάδων. Η μέθοδος Tukey βοηθά να εντοπιστούν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μέσων των ομάδων ενώ ελέγχεται ο ρυθμός σφάλματος της οικογένειας των υποθέσεων. Η διαδικασία περιλαμβάνει τον υπολογισμό του στατιστικού εύρους, που είναι η απόλυτη διαφορά μεταξύ των μέσων των κάθε ζεύγους ομάδων. Συγκρίνοντας αυτές τις τιμές εύρους με μια κρίσιμη τιμή (βασισμένη στο επίπεδο σημαντικότητας και στον αριθμό των ομάδων), μπορεί να

καθοριστεί ποια μέσα των ομάδων διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Η μέθοδος Tukey παρέχει έναν απλό τρόπο ερμηνείας και παρουσίασης των αποτελεσμάτων, συχνά με τη μορφή διαστημάτων εμπιστοσύνης ή ομάδων γραμμάτων. Κάθε ομάδα αντιστοιχεί σε ένα γράμμα, και οι ομάδες με επικαλυπτόμενα γράμματα υποδηλώνουν ότι δεν υπάρχει σημαντική διαφορά, ενώ οι μη επικαλυπτόμενες ομάδες υποδηλώνουν σημαντικές διαφορές. Με τη χρήση της μεθόδου Tukey, παρουσιάζονται παρακάτω τα αποτελέσματα σχετικά με τα πειραματικά δεδομένα μας.

### Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

C1	N	Mean	Grouping
GREEN_Front_15	5	40,31	A
RED_Front_15	5	36,092	A B
RED_Back_15	5	35,44	A B C
GREEN_Back_15	5	33,93	A B C D
GREEN_Back_30	5	32,564	A B C D E
RED_Back_30	5	27,80	B C D E F
RED_Front_30	5	27,17	B C D E F
GREEN_Front_30	5	26,887	B C D E F
RED_Front_90	5	25,97	C D E F G
RED_Front_45	5	24,49	D E F G H
RED_Back_0	5	23,18	E F G H I
RED_Back_45	3	21,71	E F G H I J
RED_Back_60	5	21,07	F G H I J
GREEN_Front_45	5	20,51	F G H I J
RED_Front_60	5	18,57	F G H I J
RED_Back_75	5	18,46	F G H I J
GREEN_Back_45	5	18,342	F G H I J
GREEN_Front_60	5	16,88	G H I J K
GREEN_Back_60	5	15,50	H I J K
RED_Back_90	5	15,12	H I J K L
RED_Front_75	5	14,544	I J K L
GREEN_Front_90	5	13,851	I J K L
GREEN_Back_90	5	13,324	I J K L
GREEN_Back_75	5	12,957	J K L
GREEN_Front_75	5	12,572	J K L
GREEN_Front_0	5	8,346	K L
RED_Front_0	5	7,902	K L
GREEN_Back_0	5	5,487	L

*Means that do not share a letter are significantly different.*

Διάγραμμα: 19 Στατιστικά σημαντικά με Tukey Method.

#### 4.2.2.2. Fisher Method

Η μέθοδος Fisher (ANOVA) είναι μια στατιστική τεχνική που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των στατιστικών διαφορών μεταξύ των μέσων τιμών τριών ή περισσότερων ομάδων. Βασίζεται στην ανάλυση της διακύμανσης, δηλαδή της μεταβλητότητας, μεταξύ των ομάδων και της μεταβλητότητας εντός των ομάδων. Με την χρήση της μεθόδου Fisher, μπορούμε να αξιολογήσουμε αν οι μέσες τιμές των ομάδων είναι στατιστικά διαφορετικές ή όχι. Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος Tukey (Tukey's range test) είναι μια στατιστική μέθοδος που χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση πολλαπλών συγκρίσεων μεταξύ των μέσων τιμών διαφόρων ομάδων. Η μέθοδος Tukey βασίζεται στον υπολογισμό των διαφορών των μέσων τιμών όλων των δυνατών ζευγών ομάδων και στον έλεγχο της απόρριψης ή μη απόρριψης των μηδενικών υποθέσεων. Η μέθοδος Tukey επιτρέπει την ανίχνευση των ομάδων που έχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ τους.

Και οι δύο μέθοδοι είναι σημαντικές στατιστικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση διαφορών μεταξύ ομάδων, αλλά με διαφορετικές προσεγγίσεις. Η μέθοδος Fisher εστιάζει στη συνολική αξιολόγηση των διαφορών μεταξύ όλων των ομάδων, ενώ η μέθοδος Tukey εστιάζει στην ανίχνευση των συγκεκριμένων ζευγών ομάδων που έχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές. Ανάλογα με το ερευνητικό ερώτημα και τον στόχο της μελέτης, μπορεί να επιλεγεί η κατάλληλη μέθοδος για την ανάλυση και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.



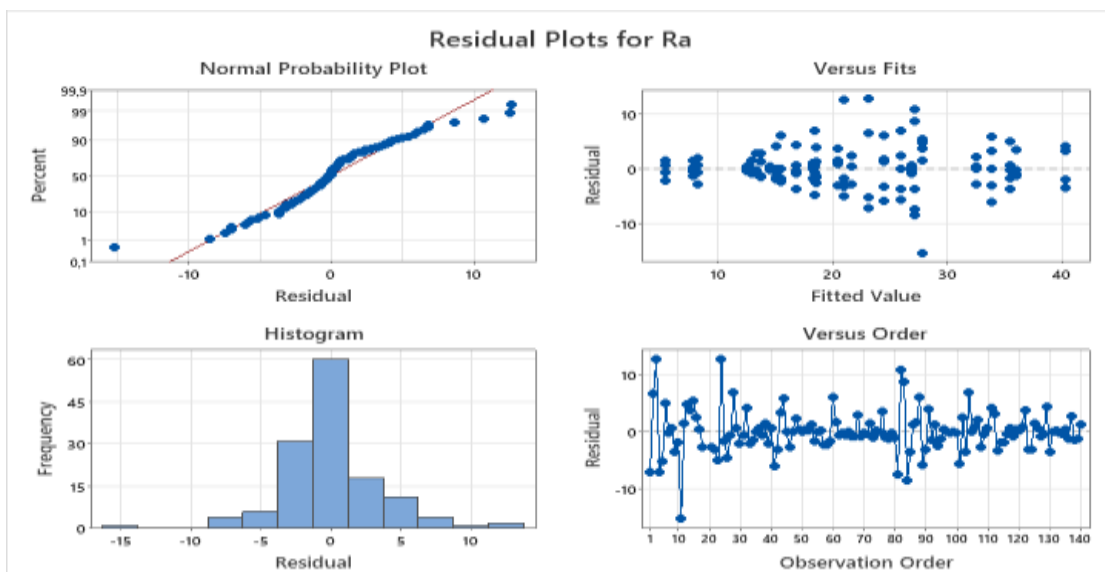
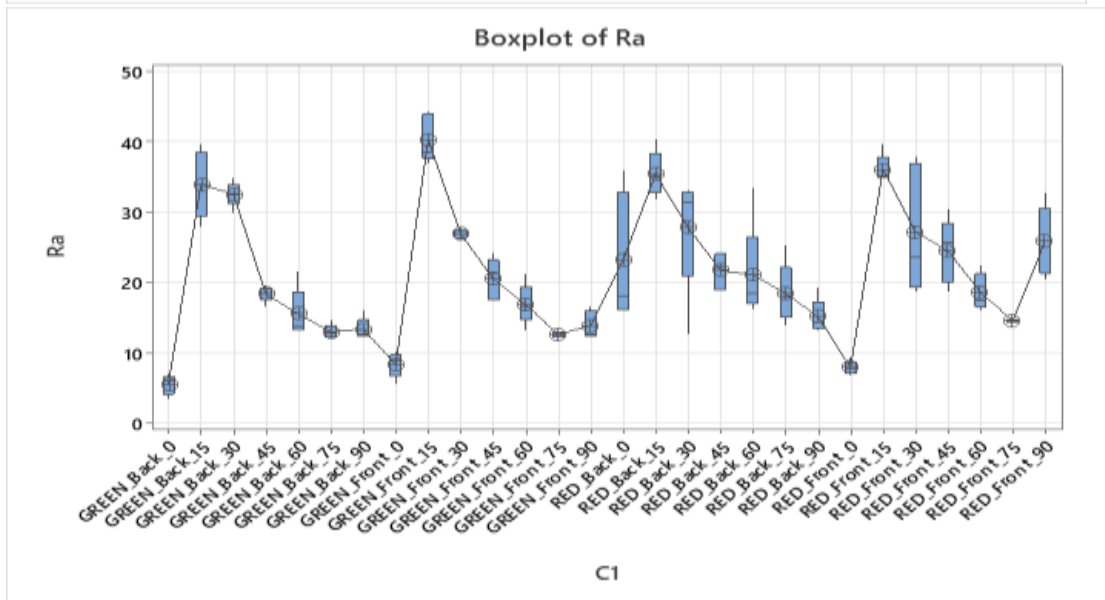
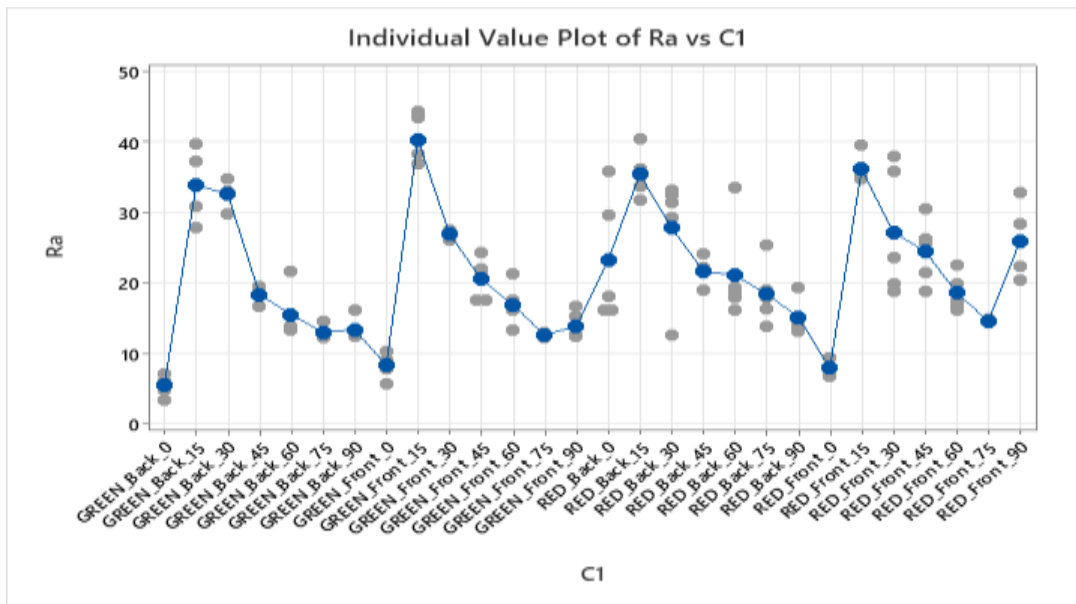
## Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

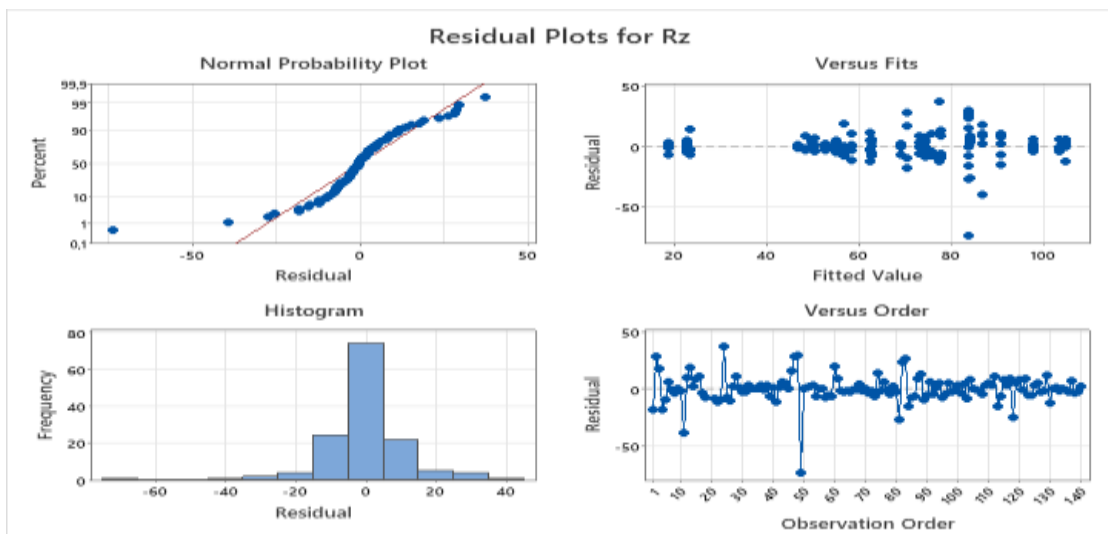
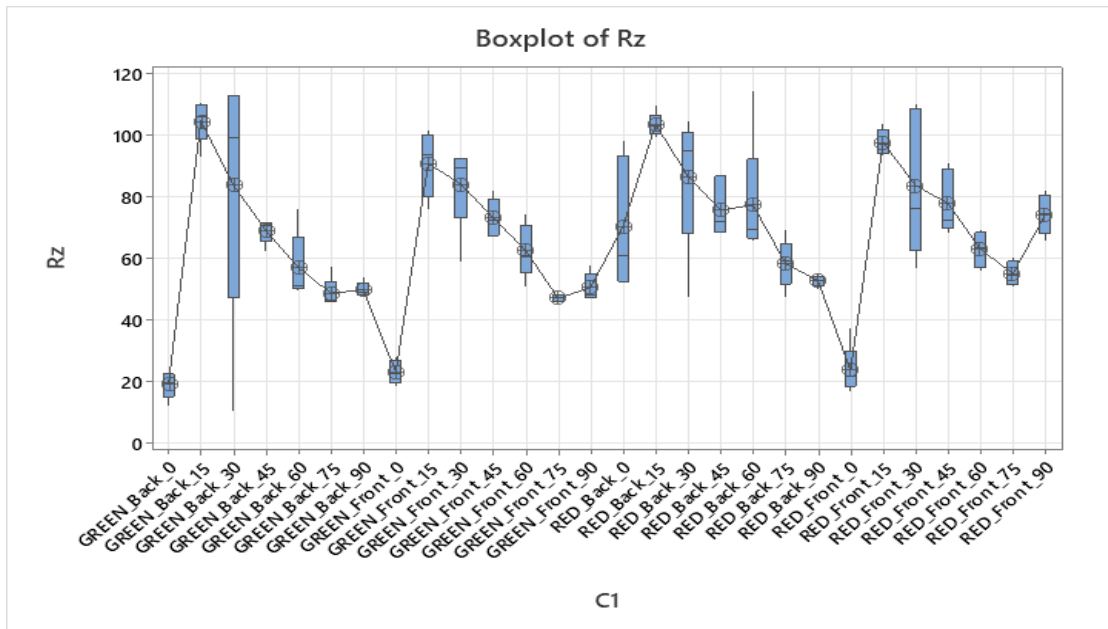
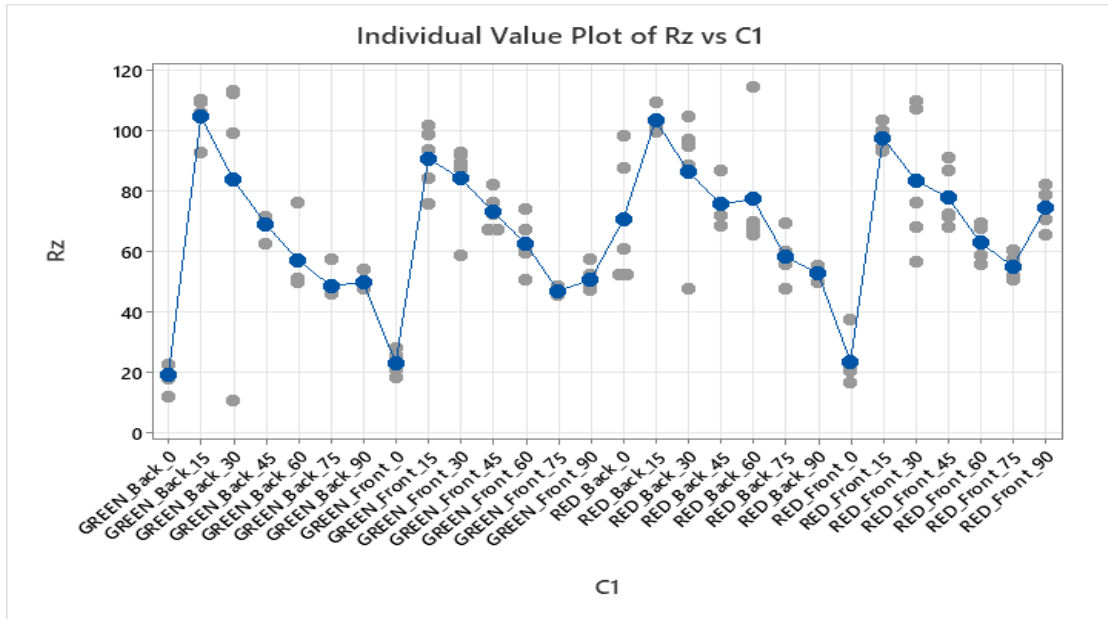
C1	N	Mean	Grouping
GREEN_Front_15	5	40,31	A
RED_Front_15	5	36,092	A B
RED_Back_15	5	35,44	A B
GREEN_Back_15	5	33,93	B
GREEN_Back_30	5	32,564	B C
RED_Back_30	5	27,80	C D
RED_Front_30	5	27,17	D E
GREEN_Front_30	5	26,887	D E
RED_Front_90	5	25,97	D E F
RED_Front_45	5	24,49	D E F G
RED_Back_0	5	23,18	D E F G H
RED_Back_45	3	21,71	E F G H I
RED_Back_60	5	21,07	F G H I
GREEN_Front_45	5	20,51	G H I J
RED_Front_60	5	18,57	H I J K
RED_Back_75	5	18,46	H I J K L
GREEN_Back_45	5	18,342	H I J K L
GREEN_Front_60	5	16,88	I J K L M
GREEN_Back_60	5	15,50	J K L M
RED_Back_90	5	15,12	K L M
RED_Front_75	5	14,544	K L M
GREEN_Front_90	5	13,851	K L M
GREEN_Back_90	5	13,324	L M N
GREEN_Back_75	5	12,957	M N O
GREEN_Front_75	5	12,572	M N O
GREEN_Front_0	5	8,346	N O P
RED_Front_0	5	7,902	O P
GREEN_Back_0	5	5,487	P

Means that do not share a letter are significantly different.

Διάγραμμα: 20 Σημαντικά στατιστικά με Fisher Method.

### 4.2.2.3. Λοιπά στατιστικά διαγράμματα





## 5. Συμπεράσματα

Ο κόκκινος εκτυπωτής παρουσιάζει διακυμάνσεις στην απόδοση του σε διαφορετικές γωνίες, ενώ οι αποδόσεις στο front και back είναι παρόμοιες, με λίγο καλύτερη αυτή του front (λόγω χαμηλότερης τραχύτητας). Οι τιμές του C<sub>v</sub> R<sub>a</sub> παρουσιάζουν αυξομειώσεις σε διαφορετικές γωνίες και δεν προσφέρουν σταθερό συμπέρασμα για τις μετρήσεις. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει μεγάλη επαναληψιμότητα των μετρήσεων.

Στον πράσινο εκτυπωτή οι διαφορές μεταξύ front και back είναι λιγότερο ξεκάθαρες, με ελάχιστα καλύτερη απόδοση να έχει το front (χαμηλό C<sub>v</sub> R<sub>z</sub>). Ο πράσινος εκτυπωτής έχει μια πιο σταθερή συμπεριφορά σε διαφορετικές γωνίες, καθώς υπάρχουν εμφανή μέγιστα και ελάχιστα χωρίς συνεχόμενες ταλαντεύσεις των τιμών.

Ο κόκκινος εκτυπωτής φαίνεται να έχει μεγαλύτερη τραχύτητα από τον πράσινο, καθώς οι τιμές στα διαγράμματα παραμένουν υψηλότερες καθώς αυξάνεται η γωνία. Επομένως η επιφάνεια του πράσινου είναι πιο λεία.

Ομοιότητες για τους δύο εκτυπωτές φαίνονται στα διαγράμματα R<sub>a</sub>-Angle front και back, R<sub>z</sub>-Angle front και back. Ωστόσο στα C<sub>v</sub> διαγράμματα φαίνονται έντονα οι διακυμάνσεις των τιμών καθώς αλλάζει η γωνία. Οι μετρήσεις για τον πράσινο εκτυπωτή φαίνονται συνολικά πιο αξιόπιστες, καθώς οι τιμές των C<sub>v</sub> παραμένουν αρκετά χαμηλότερες σε σχέση με τον κόκκινο εκτυπωτή.

Για τον κόκκινο εκτυπωτή φαίνεται πως σε γενικές γραμμές οι τιμές της τραχύτητας στο κάτω μέρος μειώνονται όσο αυξάνεται η γωνία σε μοίρες. Συνεπώς, όσο μεγαλύτερη η γωνία, τόσο καλύτερη απόδοση όσον αφορά την επιφάνεια. Η μέγιστη τιμή τραχύτητας παρατηρείται για το R<sub>z</sub> στις 15 μοίρες, ενώ η ελάχιστη για το R<sub>a</sub> στις 75 μοίρες. Επιπλέον, οι τιμές φαίνεται να είναι χαμηλότερες όσον αφορά το επάνω μέρος και άρα τα αποτελέσματα είναι καλύτερα. Οι μέσες τιμές τραχύτητας δεν εμφανίζουν σημαντικές διαφορές, με υψηλότερη αυτή του R<sub>z</sub> στις 15 μοίρες (όπως και στο κάτω μέρος) και χαμηλότερη αυτή του R<sub>a</sub> για τις 0 μοίρες.

Όμοια με πριν, για τον πράσινο εκτυπωτή οι μέγιστες τιμές τραχύτητας στο επάνω και κάτω μέρος παρατηρούνται για το R<sub>z</sub> στις 15 μοίρες. Οι ελάχιστες τιμές είναι του R<sub>a</sub> και R<sub>p</sub> στις 0 μοίρες αντίστοιχα.

Ένα μηχάνημα χαμηλού προϋπολογισμού μπορεί να παράγει αξιόπιστα εξαρτήματα με χαμηλές τιμές R<sub>a</sub> και R<sub>z</sub> αλλά όμως όχι τόσο αξιόπιστες.

Θα πρέπει να διεξάγεται συμβιβασμός μεταξύ εξαρτημάτων αξιόπιστης παραγωγής με μεγάλες τιμές Ra και Rz ή αναξιόπιστων και μη επαναλαμβανόμενων εξαρτημάτων με μικρές τιμές Ra και Rz.

Ο κόκκινος εκτυπωτής ίσως λόγω έλλειψης βελτιστοποιημένου λογισμικού και υλικολογισμικού, δεν μπορεί να παράγει αξιόπιστα εξαρτήματα με καλή τραχύτητα επιφάνειας και στις δύο πλευρές, δηλαδή FRONT και BACK.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Καριοφύλλης, Πάντος.** *Η επανάσταση της τρισδιάστατης εκτύπωσης.* Αθήνα : Διπλωματική Εργασία «Athens MBA», 2016.
2. **Hernandez, Kaufi V. Wong and Aldo.** A review of Additive Manufacture. *International Scholarly Research Network* . May 29, 2012, p. 10.
3. **Ashley, S.** Rapid Prototyping systems. *Mechanical Engineering* . 1991, σ. 34.
4. **Ελένη, Γκάρτζου.** *Νέα Υλικά για τεχνολογία Τρισδιάστατης Εκτύπωσης.* Αθήνα : Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ, 2016.
5. **Grimm, T.** User' s Guide for Rapid Prototyping . *Society of Manufacturing Enginners.* 2004.
6. **Prakash, K. S., Nancharaih, T., & Rao, V. S.** Additive manufacturing techniques in manufacturing-an overview. . *Materials Today.* 2018, pp. 3873-3882.
7. *Experimental analysis of high temperature PEEK materials on 3D printing test.* In 2017 9th International conference on measuring technology and mechatronics automation. **Xiaoyong, S., Liangcheng, C., Honglin, M., Peng, G., Zhanwei, B., & Cheng, L.** 2017. ICMTMA.
8. *The emergence of “4D printing”.* **Tibbits, S.** 2013. In TED conference.
9. **Aslanzadeh, S., Saghlatoon, H., Honari, M. M., Mirzavand, R., Montemagno, C., & Mousavi, P.** Investigation on electrical and mechanical properties of 3D printed nylon 6 for RF/microwave electronics applications. *Additive Manufacturing.* 2018, σσ. 69-75.
10. **P.F., Egan.** Integrated Desing Approaches foe 3D Printed Tissue Scaffolds:Review and Outlook Materials 2019. 2019, Vol. 2355, 12.
11. **Ngo, Kashani, Imbalzano, Nguyen, Hui.** Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Compos. Part B Eng.* 2018, 143, 172–196. [Google Scholar] [CrossRef].
12. **Ventola.** Medical applications for 3D printing: Current and projected uses. *Pharm. Ther.* 2014, 39, 704. [Google Scholar].
13. **Ligon, S.C., και συν.** Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing. *Chem. Rev.* 2017, 117, 10212–10290. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version].
14. **Egan, P.F., Shea, K.A. και Ferguson, S.J.** *Simulated tissue growth for 3D printed scaffolds.* *Biomech. Model. Mechanobiol.* 2018, 17, 1481–1495. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed].
15. **Liaw, C.-Y. Guvendiren, M.** *Current and emerging applications of 3D printing in medicine.* *Biofabrication* 2017, 9, 024102. [Google Scholar] [CrossRef].
16. **Jonathan, G. και Karim, A.** *3D printing in pharmaceuticals: A new tool for designing customized drug delivery systems.* *Int. J. Pharm.* 2016, 499, 376–394. [Google Scholar].
17. **Kang, H., και συν.** *Porous biodegradable lumbar interbody fusion cage design and fabrication using integrated global-local topology optimization with laser sintering.* *J. Biomech. Eng.* 2013, 135, 101013. .
18. **Seaman, S., και συν.** *Titanium vs. polyetheretherketone (PEEK) interbody fusion: Meta-analysis and review of the literature.* *J. Clin. Neurosci.* 2017, 44, 23–29. [Google Scholar].

19. **Miller, A.T., και συν.** *Deformation and fatigue of tough 3D printed elastomer scaffolds processed by fused deposition modeling and continuous liquid interface production.* *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 2017.
20. **Steyrer, B., και συν.** *Visible light photoinitiator for 3D-printing of tough methacrylate resins.* *Materials* 2017, 10, 1445. .
21. **Zarek, M., και συν.** *3D printing of shape memory polymers for flexible electronic devices.* *Adv. Mater.* 2016, 28, 4449–4454.
22. **Crump, M.R., και συν.** *Sensorized tissue analogues enabled by a 3D-printed conductive organogel.* *Npj Flex. Electron.* 2021, 5, 1–8. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)].
23. **Nuseir, A., και συν.** *Direct 3D printing of flexible nasal prosthesis: Optimized digital workflow from scan to fit.* *J. Prosthodont.* 2019, 28, 10–14. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)].
24. **Egan, P., και συν.** *Mechanical and biological characterization of 3D printed lattices.* *3d Print. Addit. Manuf.* 2019, 6, 73–81. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)].
25. **Melchels, F.P., Feijen, J. και Grijpma, D.W.** A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering. *Biomaterials* 2010, 31, 6121–6130. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)][[Green Version](#)].
26. **Leigh, S.J., και συν.** *A simple, low-cost conductive composite material for 3D printing of electronic sensors.* *PLoS ONE* 2012, 7, e49365. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)].
27. **Dong, G., και συν.** Optimizing process parameters of fused deposition modeling by Taguchi method for the fabrication of lattice structures. *Addit. Manuf.* 19, 62–72. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)][[Green Version](#)]. 2018.
28. **Carneiro, O.S., Silva, A. και Gomes, R.** Fused deposition modeling with polypropylene. *Mater. Des.* 2015, 83, 768–776. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)].
29. **Skylar-Scott, M.A., και συν.** Biomanufacturing of organ-specific tissues with high cellular density and embedded vascular channels. *Sci. Adv.* 2019, 5, eaaw2459. [[Google Scholar](#)] [[CrossR](#)].
30. **Pham, D.T. και Gault, R.S.** A comparison of rapid prototyping technologies. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 1998, 38, 1257–1287. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)].
31. **Brighenti, R., και συν.** Laser-based additively manufactured polymers: A review on processes and mechanical models. *J. Mater. Sci.* 2020, 56, 961–998. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)].
32. **Goodridge, R.D., Tuck, C.J. και Hague, R.J.M.** Laser sintering of polyamides and other polymers. *Prog. Mater. Sci.* 2012, 57, 229–267. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)].
33. **Mohamed, O.A., Masood, S.H. και Bhowmik, J.L.** Optimization of fused deposition modeling process parameters: A review of current research and future prospects. *Adv. Manuf.* 2015, 3, 42–53. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)].

34. **Ding, S., και συν.** Effects of nozzle temperature and building orientation on mechanical properties and microstructure of PEEK and PEI printed by 3D-FDM. *Polym. Test.* 2019, 78. [Google Scholar] [CrossRef].
35. **Νέστωρας, Λάμπρος.** *Σχεδίαση και κατασκευή συσκευασίας αισθητήρα SARS-CoV-2 μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης*. 2022.
36. **Compton, B.G. και Lewis, J.A.** 3D-printing of lightweight cellular composites. *Adv Mater* 2014, 26, 5930–5935. [Google Scholar] [CrossRef].
37. **Cesarano, J.** A Review of Robocasting Technology. *MRS Proc.* 2011, 542. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version].
38. **Lewis, J.A. και Gratson, G.M.** Direct writing in three dimensions. *Mater. Today* 2004, 7, 32–39. [Google Scholar] [CrossRef].
39. **Kokkinis, D., Schaffner, M. και Studart, A.R.** Multimaterial magnetically assisted 3D printing of composite materials. *Nat Commun.* 2015, 6, 8643. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed][Green Version].
40. **Active mixing of complex fluids at the microscale. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 2015, 112, 12293–12298.** [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed][Green Version]. Active mixing of complex fluids at the microscale. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2015, 112, 12293–12298. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed][Green Version].
41. **Wong, K.V. and A. Hernandez,.** *A Review of Additive Manufacturing*.
42. **Gibson, I., W.D. Rosen, and B. Stucker.** *Introduction and Basic Principles, in AM Technologies Springer 2010 Boston, 20-35.*
43. **Kazmer, D.** *Applied Plastics Engineering Handbook. Elsevier Inc., 2017. doi: 10.1016/b978-0-323-39040-8.00029-8.* .
44. **Discovery, UCL.** Fused deposition modeling (FDM) 3D printing of oral modified release dosage forms - UCL Discovery. <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10107632/> . [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: ]
45. **SLA vs. DLP: Guide to Resin 3D Printers.** <https://formlabs.com/blog/resin-3dprinter-comparison-sla-vs-dlp/>. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: ]
46. <https://www.hubs.com/knowledge-base/sla-3d-printing-materials-compared/> (accessed May 01, 2022). . [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: ]
47. **Wendel, B., και συν.** *Additive Processing of Polymers. Macromol. Mater. Eng.* 2008, 293, 799–809. [Google Scholar] [CrossRef].
48. **Sodupe-Ortega, E., και συν.** *Accurate Calibration in Multi-Material 3D Bioprinting for Tissue Engineering. Materials* 2018, 11, 1402. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed][Green Version].
49. **Stansbury, J.W. και Idacavage, M.J.** *3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities. Dent. Mater.* 2016, 32, 54–64. [Google Scholar] [CrossRef].



50. Wallace, J., και συν. *Validating continuous digital light processing (cDLP) additive manufacturing accuracy and tissue engineering utility of a dye initiator package.*
51. Cooke, M.N., και συν. *Use of stereolithography to manufacture critical-sized 3D biodegradable scaffolds for bone ingrowth. J. Biomed. Mater. Res. B Appl. Biomater. 2003, 64, 65–69. [Google Scholar] [CrossRef] [Pu.*
52. Mendes-Felipe, C., και συν. *61. Mendes-Felipe, C.; Patrocinio, D.; LazaEvaluation of postcuring process on the thermal and mechanical properties of the Clear02™ resin used in stereolithography. Polym. Test. 2018, 72, 115–121. [Google Schola.*
53. Cummins, G. και Desmulliez, M.P.Y. *Inkjet printing of conductive materials: A review. Circuit World 2012, 38, 193–213. [Google Scholar] [CrossRef].*
54. Taylor, A.P. και Velasquez-Garcia, L.F. *63. Taylor, Miniaturized Diaphragm Vacuum Pump by Multi-Material Additive Manufacturing. J. Microelectromech. Syst. 2017, 26, 1316–1326. [Google Scholar] [CrossRef].*
55. Li, F., και συν. *Increasing the functionalities of 3D printed microchemical devices by single material, multimaterial, and print-pause-print 3D printing. Lab. Chip. 2018, 19, 35–49. [Google Scholar] [CrossRef] [Pub.*
56. Egan, P.F., και συν. *Mechanics of Three-Dimensional Printed Lattices for Biomedical Devices. J. Mech. Des. 2019, 141, 031703. [Google Scholar] [CrossRef].*
57. Wang, Y., και συν. *Current Status and Prospects of Polymer Powder 3D Printing Technologies. Materials 2020, 13, 2406. [Google Scholar] [CrossRef].*
58. Ziaee, M. και Crane, N.B. Binder. *A review of process, materials, and methods. Addit. Manuf. 2019, 28, 781–801. [Google Scholar] [CrossRef].*
59. Valdevit, L., και συν. *Architected materials: Syntesis, characterization, modeling, and optimal design. J. Mater. Res. 2018, 33, 241–246. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version].*
60. Liu, H., και συν. *Computational and experimental characterization of 3D-printed PCL structures toward the design of soft biological tissue scaffolds. Mater. Des. 2020, 188. [Google Scholar] [CrossRef].*
61. Jiang, Y. και Wang, Q. *Highly-stretchable 3D-architected Mechanical Metamaterials. Sci. Rep. 2016, 6, 34147. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version].*
62. Schaedler, T.A. και Carter, W.B. *Architected cellular materials. Annu. Rev. Mater. Res. 2016, 46, 187–210. [Google Scholar] [CrossRef].*
63. Mohamad Nordin Mohamad Norani 1, Muhammad Ilman Hakimi Chua Abdullah 2,3\*, Mohamad Nordin Mohamad Norani 1, Muhammad Ilman Hakimi Chua Abdullah 2,3\*, Mechanical and tribological propertis of FFF 3D printed polymers, A brief review. 2021, Τόμ. 29.
64. Horvath, Dayton. AMT. <https://www.amtonline.org/article/investment-trends-in-additive-manufacturing-shifting-focus>. [Ηλεκτρονικό]

65. Dizon, J.R.C., Espera, A.H., Jr. και Chen, Q. *Mechanical characterization of 3D-printed polymers. Addit. Manuf.* 2018, 20, 44–67. [Google Scholar] [CrossRef].
66. Peters, E.N. *Thermoplastics, Thermosets, and Elastomers; Wiley-Interscience: New York, NY, USA, 2002.* [Google Scholar].
67. Butt, J. και Bhaskar, R. *Investigating the Effects of Annealing on the Mechanical Properties of FFF-Printed Thermoplastics. J. Manuf. Mater. Process.* 2020, 4, 38. [Google Scholar] [CrossRef].
68. Tibbits, S. *Experiments in Programming Matter; Taylor & Francis: London, UK, 2016.* [Google Scholar].
- 69.. *4D printing: Multi-material shape change. Archit. Des.* 2014, 84, 116–121. [Google Scholar] [CrossRef].
70. Ding, Z., και συν. *3D structures via programmable 1D composite rods. Mater. Des.* 2018, 137, 256–265. [Google Scholar] [CrossRef].
71. Ge, Q., και συν. *Multimaterial 4D printing with tailorable shape memory polymers. Sci. Rep.* 2016, 6, 31110. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version].
72. Wang, G., και συν. *4D printing morphing non-developable mesh surfaces. In Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, Berlin, Germany, 14. Germany : s.n., 10/2018. 623-635.*
73. Mansouri, M.R., και συν. *3D-printed multimaterial composites tailored for compliancy and strain recovery. Compos. Struct.* 2018, 184, 11–17. [Google Scholar] [CrossRef].
74. Melchels, F.P., και συν. *Mathematically defined tissue engineering scaffold architectures prepared by stereolithography. Biomaterials* 2010, 31, 6909–6916. [Google Scholar] [CrossRef][Green .
75. Alifui-Segbaya, F., και συν. *Biocompatibility of Photopolymers in 3D Printing. 3d Print. Addit. Manuf.* 2017, 4, 185–191. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version].
76. Yin, J., και συν. *3D Printed Multi-material Medical Phantoms for Needle-tissue Interaction Modelling of Heterogeneous Structures. J. Bionic Eng.* 2021, 18, 346–360. [Google Scholar] [CrossRef].
77. Boley, J.W., και συν. *Shape-shifting structured lattices via multimaterial 4D printing. Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2019, 116, 20856–20862. [Google Scholar].
78. Zhang, N., και συν. *Functionally Graded Materials: An Overview of Stability, Buckling, and Free Vibration Analysis. Adv. Mater. Sci. Eng.* 2019, 2019, 1–18. [Google Scholar].
79. Li, Y., και συν. *A Review on Functionally Graded Materials and Structures via Additive Manufacturing: From Multi-Scale Design to Versatile Functional Properties. .*
80. Monzón, M., και συν. *Functionally graded additive manufacturing to achieve functionality specifications of osteochondral scaffolds. Bio-Des. Manuf.* 2018, 1, 69–75. .
81. Cengiz, I.F., και συν. *Building the basis for patient-specific meniscal scaffolds: From human knee MRI to fabrication of 3D printed scaffolds. Bioprinting* 2016, 1–.

82. Kunrath, M.F. *Manufacturing processes, topography, osseointegration and future perspectives of 3D fabricated implants. Bioprinting 2020, 20. [Google Scholar].*
83. Shah, P. και Chong. *3D imaging, 3D printing and 3D virtual planning in endodontics. Clin. Oral. Investig. 2018, 22, 641–654. [Google Scholar].*
84. . Filippou, V. και Tsoumpas, C. *Recent advances on the development of phantoms using 3D printing for imaging with CT, MRI, PET, SPECT, and ultrasound. Med. Phys. 2018, 45, e740–e760. [Google Scholar] .*
85. Egan, P.F., και συν. *Computationally designed lattices with tuned properties for tissue engineering using 3D printing. PLoS ONE 2017, 12, e0182902. [Google Scholar] [CrossRef].*
86. Revilla-León, M., και συν. *Position accuracy of implant analogs on 3D printed polymer versus conventional dental stone casts measured using a coordinate measuring machine. J. Prosthodont. 201.*
87. R. Singh, J. Singh, and S. Singh. *Investigation for Dimensional Accuracy of AMC Prepared by FDM Assisted Investment Casting Using Nylon-6 Waste Based Reinforced Filament, Meas. J. Int. Meas. Confed., 2016, 78, p 253–259 23. .*
88. Ober, T.J., Foresti, D. και Lewis, J.A. *Active mixing of complex fluids at the microscale. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 2015, 112, 12293–12298. .*
89. Singh, S., και συν. *Optimization and reliability analysis to improve surface quality and mechanical characteristics of heat-treated fused filament fabricated parts. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2019, 102,.*
90. Yao, Q., και συν. *Design, construction and mechanical testing of digital 3D anatomical data-based PCL–HA bone tissue engineering scaffold. J. Mater. Sci. Mater. Med. 2015, 26, 51. [G.*
91. Egan, P.F., Ferguson, S.J. και Shea, K. *Design of hierarchical three-dimensional printed scaffolds considering mechanical and biological factors for bone tissue engineering. J. Mech. Des. 2017, 139, 061401. [Google Scholar] [CrossRef].*
92. J. Beniak, P. Krizˇan, Lˇ Sˇ oosˇ, and M. Matu´ sˇ, . *Research on Shape and Dimensional Accuracy of FDM Produced Parts, IOP Conf Ser: Mater Sci Eng, 2019, 501, p 012030. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/501/1/012030> 24. .*
93. D. Hyndhavi, G.R. Babu, and S.B. Murthy. *Investigation of Dimensional Accuracy and Material Performance in Fused Deposition Modeling, Mater. Today Proc., 2018, 5(11), p 23508–23517 25. .*
94. J. Kozak and T. Zakrzewski. *Accuracy Problems of Additive Manufacturing Using SLS/SLM Processes. AIP Conf. Proc., 2018, 2017 26. R.*
95. K. Sahu, S.S. Mahapatra, and A.K. Sood. *A Study on Dimensional Accuracy of Fused Deposition Modeling (FDM) Processed Parts Using Fuzzy Logic, J. Manuf. Sci. Prod., 2014, 13(3), p 183–197 27. A. Noriega, D. Blanco, B.J. Alvarez, and A. Garcia, Dimensi.*
96. S.A. Tronvoll, C.W. Elverum, and T. Welo. *Dimensional Accuracy of Threads Manufactured by Fused Deposition Modeling, Procedia Manuf., 2018, 26, p 763–773 29. .*

97. Y.A. Mou and M. Koc. *Dimensional Capability of Selected 3DP Technologies, Rapid Prototyp. J.*, 2019, 25(5), p 915–924 30. .
98. Ashu Garg, Anirban Bhattacharya, and Ajay Batish. *On Surface Finish and Dimensional Accuracy of FDM Parts after Cold Vapor Treatment, Mater Manuf Process*, 2015, 31(4), p 522–529. <https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1070425> 31.
99. Q. Yang, L. Zhongliang, J. Zhou, K. Miao, and D. Li,. *A Novel Method for Improving Surface Finish of Stereolithography Apparatus, Int J Adv Manuf Technol*, 2017, 93(5–8), p 1537–1544. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0529-1>.
100. Rubio-Perez, I. και Diaz Lantada. A. *Surgical Planning of Sacral Nerve Stimulation Procedure in Presence of Sacral Anomalies by Using Personalized Polymeric Prototypes Obtained with Additive Manufacturing Techniques. Polymers* 2020, 12, 581. [Google Schola.
101. Erickson, M.M., και συν. *Modification to PPE With 3D Printing During the COVID-19 Pandemic at Duke University Medical Center: A Novel Technique. J. Arthroplast.* 2020, 35, S23–S27.