



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



ΤΜΗΜΑ ΔΑΣΟΛΟΓΙΑΣ, ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΞΥΛΟΥ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Χαϊδάς Δημήτριος

Μηχανικός βιομηχανικού σχεδιασμού, MSc

Ποιοτική διερεύνηση (βελτιστοποίηση – μοντελοποίηση) παραμέτρων της τρισδιάστατης εκτύπωσης πολυμερών υλικών για την παραγωγή λεπτότοιχων φυσικών πρωτοτύπων με εφαρμογή στο σχεδιασμό και την κατασκευή διακοσμητικών αντικειμένων εσωτερικού χώρου.

ΚΑΡΔΙΤΣΑ 2023

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Σ. ΧΑΪΔΑΣ

Μηχανικός βιομηχανικού σχεδιασμού, MSc

Υποβλήθηκε στο τμήμα Δασολογίας, Επιστημών ξύλου
και Σχεδιασμού

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ : 29/06/2023

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ : Απόφαση Συνέλευσης
του Τμήματος Δασολογίας, Επιστημών ξύλου και
Σχεδιασμού αρ. 89/17.05.2023

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ	ΙΔΡΥΜΑ
ΚΕΧΑΓΙΑΣ ΙΩΑΝΝΗΣ	ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)	ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΝΤΑΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ	ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΜΑΡΟΠΟΥΛΟΣ ΣΤΕΡΓΙΟΣ	ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΚΑΡΑΣΤΕΡΓΙΟΥ ΣΩΤΗΡΙΟΣ	ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΚΑΡΒΕΛΗΣ ΜΙΧΑΗΛ	ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΖΑΟΥΤΣΟΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ	ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΓΕΡΑΡΔΗΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ	ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

© ΧΑΪΔΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ, 2023

© ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ, 2023

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας διατριβής, 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.

Ποιοτική διερεύνηση (βελτιστοποίηση – μοντελοποίηση) παραμέτρων της τρισδιάστατης εκτύπωσης πολυμερών υλικών για την παραγωγή λεπτότοιχων φυσικών πρωτοτύπων με εφαρμογή στο σχεδιασμό και την κατασκευή διακοσμητικών αντικειμένων εσωτερικού χώρου.

Στη γυναίκα μου Ίβανα
Στα παιδιά μου Ευαγγελία και Σταύρο

Ευχαριστίες

Η παρούσα διατριβή με τίτλο «Ποιοτική διερεύνηση (βελτιστοποίηση – μοντελοποίηση) παραμέτρων της τρισδιάστατης εκτύπωσης πολυμερών υλικών για την παραγωγή λεπτότοιχων φυσικών πρωτοτύπων με εφαρμογή στο σχεδιασμό και την κατασκευή διακοσμητικών αντικειμένων εσωτερικού χώρου» εκπονήθηκε στο τμήμα Δασολογίας, Επιστημών ξύλου και Σχεδιασμού από τον Απρίλιο του 2020 έως και τον Απρίλιο του 2023 για την απόκτηση του διδακτορικού τίτλου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου Κεχαγιά Ιωάννη για τη στήριξη, τη συνεχή ενθάρρυνση και τη σχολαστική και καρποφόρα καθοδήγησή του που οδήγησε στη δημοσίευση του συνόλου των κεφαλαίων της διδακτορικής μου Διατριβής όπως παρουσιάζεται στο Παράρτημα των Δημοσιεύσεων. Επίσης ευχαριστώ τους Καθηγητές Μαρόπουλο Στέργιο και Νταλό Γεώργιο για τις πολύτιμες συμβουλές τους κατά την διάρκεια εκπόνησης της διατριβής μου.

Θα ήθελα επιπλέον να ευχαριστήσω τους Καθηγητές Σαλωνίτη Κώστα, Βαξεβανίδη Νικόλαο και Βιδάκη Νεκτάριο για την βοήθεια στη διαμόρφωση του αρχικού κεφαλαίου. Τέλος, Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Ζαούτσο Στέφανο για την εκτέλεση των πειραμάτων αντοχής που παρουσιάζονται στο τέταρτο κεφάλαιο.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	14
Abstract.....	16
Εισαγωγή.....	18
Μηχανήματα –τεχνολογία.....	22
1. Διαδικασία προσθετικής κατασκευής.....	24
1.1 Ανάλυση παραμέτρων.....	26
1.1.1 Παράμετροι σήματος	26
1.1.2 Παράμετροι ελέγχου	29
1.1.3 Παράμετροι θορύβου	29
1.2 Επίδραση παραμέτρων στην ποιότητα της επιφάνειας και στη διαστατική ακρίβεια	30
1.3 Επιδράσεις των παραμέτρων σήματος	33
1.4 Επιδράσεις παραμέτρων ελέγχου	36
1.5 Επιδράσεις των παραμέτρων θορύβου	43
1.6 Συμπεράσματα	46
2. Εξέταση ποιότητας λεπτότοιχων τεμαχίων από PLA	85
2.1 Αναφορές παρόμοιων πειραμάτων	87
2.2 Υλικά και Μέθοδοι	92
2.3 Επιλογή διαδικασίας παραμέτρων	94
2.4 Σχεδιασμός πειράματος.....	96
2.5 Τεχνικές μέτρησης.....	97
2.6 Αποτελέσματα	99
2.7 Προσέγγιση Taguchi	100
2.8 Ανάλυση Grey.....	103
3. Επίδραση παραμέτρων σε Wood/PLA δοκίμια.....	113
3.1 Αναφορές σε πειράματα με Wood/PLA	115

3.2 Πειραματική διαδικασία	117
3.3 Σχεδιασμός πειράματος	120
3.4 Αποτελέσματα	123
3.5 Επίδραση πάχους στρώσης και θερμοκρασίας κεφαλής στη διαστατική ακρίβεια.....	126
4. Εφελκυσμός και μέτρο ελαστικότητας Wood/PLA δοκιμίων.....	131
4.1 Αναφορές στην αντοχή εξαρτημάτων	132
4.2 Μέθοδοι, υλικά και προετοιμασία πειράματος.....	134
4.3 Σχεδιασμός πειράματος	137
4.4 Αποτελέσματα και συζήτηση	140
4.5 Επιδράσεις των μεταβλητών παραμέτρων στην αντοχή σε εφελκυσμό και στην ελαστικότητα	142
5. Μοντέλα επικύρωσης - Συμπεράσματα πειραμάτων.....	155
5.1 Μοντέλα επικύρωσης – πειράματα αξιολόγησης για την επίδραση παραμέτρων σε Wood/PLA δοκίμια.....	155
5.2 Μοντελοποίηση και επικύρωση αντοχής Wood/PLA δοκιμίων.....	158
5.3 Συμπεράσματα επίδρασης παραμέτρων σε λεπτότοιχα δοκίμια από PLA	160
5.4 Συμπεράσματα επίδρασης παραμέτρων σε δοκίμια από Wood/PLA.....	162
5.5 Συμπεράσματα επίδρασης παραμέτρων στην αντοχή Wood/PLA δοκιμίων	163
6. Επίλογος.....	165

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 1 : Προτεινόμενες θερμοκρασίες ακροφυσίου, πλατφόρμας και θαλάμου για τυπικά συμβατικά αλλά και υψηλής απόδοσης πολυμερή που χρησιμοποιούνται στην FFF διαδικασία.....	40
Πίνακας 2 : Οι παράμετροι της FFF διαδικασίας που επιλέχθηκαν και οι τιμές τους.....	94
Πίνακας 3 : Ορθογωνική διάταξη L9 με τις παραμέτρους και τις τιμές τους.....	96
Πίνακας 4 : Μετρήσεις διαστατικής ακρίβειας.....	97
Πίνακας 5 : Υπολογισμοί διαστάσεων.....	98
Πίνακας 6 : Μετρήσεις παραμέτρων τραχύτητας επιφάνειας.....	99
Πίνακας 7 : Μέσες τιμές απόκλισης διαστάσεων.....	100
Πίνακας 8 : Μέσες τιμές για την τραχύτητα επιφάνειας.....	101
Πίνακας 9 : ANOVA για την απόκλιση διαστάσεων.....	102
Πίνακας 10 : ANOVA για τους παραμέτρους τραχύτητας.....	102
Πίνακας 11 : Κανονικοποίηση ποιοτικών αποκρίσεων.....	104
Πίνακας 12 : Αποτελέσματα συντελεστών κατά Grey.....	104
Πίνακας 13 : Αποτελέσματα σχεσιακού βαθμού Grey.....	105
Πίνακας 14 : Μέσες τιμές σχεσιακού βαθμού Grey.....	105
Πίνακας 15 : ANOVA για το σχεσιακό βαθμό Grey.....	106
Πίνακας 16 : Οι μεταβλητές και οι σταθερές παράμετροι του πειράματος.....	120
Πίνακας 17 : Τα πειράματα και οι μετρήσεις τραχύτητας και διαστατικής ακρίβειας.....	121
Πίνακας 18 : Ανάλυση διακύμανσης ANOVA για τις μεταβλητές Ra, Rt στο πάχος στρώσης και στη θερμοκρασία ακροφυσίου.....	124
Πίνακας 19-22 : Ανάλυση διακύμανσης ANOVA για τα DX, DY, DWX, DWY στο πάχος στρώσης και στη θερμοκρασία ακροφυσίου.....	127-128
Πίνακας 23 : Οι παράμετροι και οι τιμές τους.....	138
Πίνακας 24 : Οι συνδυασμοί παραμέτρων και οι μετρήσεις.....	139
Πίνακας 25 : Ανάλυση διακύμανσης : Αντοχή σε εφελκυσμό έναντι των τεσσάρων παραμέτρων.....	144
Πίνακας 26 : Ανάλυση διακύμανσης : Μέτρο ελαστικότητας έναντι των τεσσάρων παραμέτρων.....	144

Πίνακας 27 : Πείραμα επαλήθευσης (0,1 mm LT, 210°C): Μετρήσεις Ra, Rt, DX και DY.....	156
Πίνακας 28 : Δοκιμές επικύρωσης.....	159

Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 1 : Διάγραμμα αιτίας και επίδρασης στην τραχύτητα και τη διαστατική ακρίβεια κατά την FFF διαδικασία.....	25
Εικόνα 2 : Επίδραση των προδιαγραφών αρχείου STL στη γεωμετρική ακρίβεια εξαρτημάτων με την μέθοδο FFF.....	27
Εικόνα 3 : a) σύνδεση μεταξύ νημάτων και σχηματισμός στρώσεων b) μορφολογία των διατομών και σχηματισμοί πόρων c) επιδράσεις της ταχύτητας εκτύπωσης στην εναπόθεση υλικού d) το φαινόμενο σκαλοπατιού (stair stepping phenomenon) e) κεκλιμένη επιφάνεια με τη γωνία θ f) γεωμετρική αναπαράσταση μέσης τραχύτητας της επιφάνειας.....	31
Εικόνα 4 : Διάγραμμα ροής που παρουσιάζει τα αποτελέσματα των παραμέτρων διεργασίας στην ποιότητα επιφάνειας και στη διαστατική ακρίβεια μοντέλων που παράγονται με την FFF μέθοδο.....	45
Εικόνα 5 : Δοκίμια από PLA κατασκευασμένα με την FFF διαδικασία : a) μοντέλα CAD b) διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης δοκιμών για έλεγχο ποιότητας και διαστατικής ακρίβειας c) οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν d) λεπτομέρειες που προέκυψαν.....	46
Εικόνα 6 : Επιδράσεις των παραμέτρων διεργασίας στην επιφάνεια των κατασκευασμένων εξαρτημάτων (a, b και c), όπως προέκυψαν από αξονικές τομογραφίες.....	47
Εικόνα 7 : Σύγκριση μεταξύ των ονομαστικών σχημάτων (μοντέλο CAD) και των πραγματικών των τυπωμένων εξαρτημάτων FFF, όπως τεκμηριώνεται με τομογραφία (CT). Τμήματα και μεγεθύνσεις πλήρους αξονικής σάρωσης ιδιαίτερου ενδιαφέροντος, όπως άκρες, καμπύλες και λεπτομέρειες σχισμής. Τα εσωτερικά κενά των 3d τμημάτων είναι σαφώς εμφανή.....	48
Εικόνα 8 : Ποσοτικός προσδιορισμός της τραχύτητας της επιφάνειας μέσω οπτικής προφίλομετρίας (α) η τρισδιάστατη εκτύπωση του PA12 στη συσκευή μέτρησης, συνθήκες εκτύπωσης και η τεκμηρίωση προφίλ επιφάνειας. (β) το μοντέλο του τρισδιάστατου τμήματος από PLA, τα τμήματα σάρωσης CT που υποδεικνύουν τη δομή πλήρωσης και η οπτική σάρωση στην επιφάνεια του ίδιου δείγματος.....	49
Εικόνα 9 : Το τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο και οι ονομαστικές του διαστάσεις σε χιλιοστά (mm).....	92
Εικόνα 10 : Τα εννέα εκτυπωμένα μοντέλα. Από αριστερά προς τα δεξιά : Πρώτη σειρά (πάχος τοιχώματος 1 mm): Μοντέλα 9 (230°C), 8 (220°C) και 7 (210°C), (β) Δεύτερη σειρά (πάχος τοιχώματος 2 mm): Μοντέλα 6 (230°C), 5 (220°C) και 4 (210°C), (γ) Τρίτη σειρά (πάχος τοιχώματος 3 mm): Μοντέλα 3 (230°C), 2 (220°C) και 1 (210°C).....	95
Εικόνα 11 : Σημεία μετρήσεων σε X και Y κατεύθυνση.....	97
Εικόνα 12 : Διαγράμματα των μέσων για την απόκλιση διαστάσεων σε (a) διάσταση X και (b) διάσταση Y.....	100

Εικόνα 13 : Διαγράμματα μέσων για τις παραμέτρους τραχύτητας της επιφάνειας : (a) αριθμητικός μέσος τραχύτητας Ra, (b) βάθος τραχύτητας Rz, (c) συνολικό ύψος προφίλ τραχύτητας Rt, (d) μέσο πλάτος των προφίλ Rsm.....	101
Εικόνα 14 : Διάγραμμα μέσων για το σχεσιακό βαθμό Grey.....	105
Εικόνα 15 : Παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα FFF αντικειμένων.....	116
Εικόνα 16 : Το μοντέλο σε μορφή CAD και τα εκτυπωμένα δοκίμια.....	117
Εικόνα 17 : Μετρήσεις με a) Τραχύμετρο b) Μικρόμετρο και c) Παχύμετρο.....	121
Εικόνα 18 : Επίδραση θερμοκρασίας ακροφυσίου και πάχους στρώσης στις παραμέτρους τραχύτητας Ra και Rt.....	123
Εικόνα 19 : Επίδραση πάχους στρώσης και θερμοκρασίας ακροφυσίου στα Ra και Rt.....	124
Εικόνα 20 : Επίδραση LT, NT στα (a) DX, (b) DY, (c) DWX, (d) DWY.....	126
Εικόνα 21 : Δοκίμιο : (a) 2D όψεις (b) διαδικασία εκτύπωσης του δοκιμίου με την FFF μέθοδο.....	134
Εικόνα 22 : a) το δοκίμιο PLA/Wood τοποθετημένο στις λαβές εφελκυσμού του INSTRON 3382 Universal Testing Machine b) σπασμένα δοκίμια με πάχος στρώσης 0,1 mm.....	135
Εικόνα 23 : Καμπύλες τάσης – καταπόνησης για όλα τα δοκίμια : (a-c) με πάχος στρώσης 0,1 mm και (d-f) με πάχος στρώσης 0,3 mm.....	136
Εικόνα 24 : Εικόνες από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο από τη διαμήκη πολυεπίπεδη πλευρά των δειγμάτων (a, b) εγκάρσια τομή σπασμένης επιφάνειας (c, d, e, f) δοκιμίων με χαρακτηριστικά 0,3 mm -200°C - 0° -40 mm/s.....	141
Εικόνα 25 : Διαγράμματα κύριας επίδρασης για την αντοχή εφελκυσμού και για το μέτρο ελαστικότητας.....	142
Εικόνα 26 : Διαγράμματα αλληλεπίδρασης μεταξύ της γωνίας εναπόθεσης, της ταχύτητας εκτύπωσης, της θερμοκρασίας ακροφυσίου και του πάχους στρώσης σύμφωνα με την αντοχή σε εφελκυσμό και του μέτρου ελαστικότητας.....	143
Εικόνα 27 : Διαγράμματα κύριας επίδρασης a) γωνία εναπόθεσης, θερμοκρασία ακροφυσίου και ταχύτητα εκτύπωσης έναντι αντοχή σε εφελκυσμό για πάχος στρώσης 0,1 mm b)) γωνία εναπόθεσης, θερμοκρασία ακροφυσίου και ταχύτητα εκτύπωσης έναντι μέτρου ελαστικότητας για πάχος στρώσης 0,1 mm c) γωνία εναπόθεσης, θερμοκρασία ακροφυσίου και ταχύτητα εκτύπωσης έναντι αντοχή σε εφελκυσμό για πάχος στρώσης 0,3 mm d) γωνία εναπόθεσης, θερμοκρασία ακροφυσίου και ταχύτητα εκτύπωσης έναντι μέτρου ελαστικότητας για πάχος στρώσης 0,3 mm.....	146
Εικόνα 28 : Νέο μοντέλο με τις βέλτιστες τιμές (9 τεμάχια).....	155
Εικόνα 29 : Δοκίμια για έλεγχο αντοχής.....	157

Εικόνα 30 : Πειράματα επικύρωσης και καμπύλες καταπόνησης για τις βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων.....	159
---	-----

Πρόλογος

Η διαδικασία παραγωγής πρωτοτύπων με τη μέθοδο εξώθησης συντηγμένου νήματος (FFF) αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη τεχνική διότι κατασκευάζονται εξαρτήματα μικρής αλλά και μεγάλης πολυπλοκότητας με ιδιαίτερα χαμηλό κόστος. Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται συνήθως θερμοπλαστικά ως πρώτες ύλες και παράγονται αντικείμενα όπου κατασκευάζονται στρώση στρώση. Η πρώτη ύλη βρίσκεται σε στερεή κατάσταση, σε μορφή νήματος, όπου με τη χρήση μηχανισμών εξώθησης και σε συνδυασμό με τις υψηλές θερμοκρασίες λιώνει και δημιουργείται η επιθυμητή εναπόθεση σε σημεία όπου καθορίζει η κίνηση της κεφαλής. Οι συντεταγμένες σε X, Y και Z άξονες όπου κινείται η κεφαλή του μηχανήματος προέρχονται από κώδικα που δημιουργείται όταν εισαχθεί το ψηφιακό μοντέλο, που έχει σχεδιαστεί σε λογισμικό CAD (Computer Aided Design), στο λογισμικό που συνεργάζεται το μηχάνημα προσθετικής κατασκευής. Ο χρήστης του μηχανήματος έχει τη δυνατότητα να ρυθμίζει μέσω προγράμματος μεγάλη ποικιλία παραμέτρων που επηρεάζουν την προσθετική διαδικασία. Από τις πιο σημαντικές παραμέτρους που συναντάμε κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση είναι η ταχύτητα, η θερμοκρασία, το πάχος της κάθε στρώσης του αντικειμένου και το εσωτερικό του γέμισμα. Οι τιμές των παραμέτρων μπορεί να είναι διαφορετικές όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν διαφορετικοί τύποι θερμοπλαστικών αλλά και διαφορετικά τύπου μηχανήματα με τη μέθοδο της εξώθησης συντηγμένου νήματος. Η ποιότητα των αντικειμένων που παράγονται κατά την προσθετική κατασκευή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις τιμές των παραμέτρων που θα ορίσει ο χρήστης. Η διαστατική ακρίβεια των μοντέλων αλλά και η τραχύτητα της επιφάνειάς τους αποτελεί δυο πολύ σημαντικούς δείκτες που μπορούν να χαρακτηρίσουν την ποιότητα. Η επιλογή υψηλών τιμών πάχους στρώσης για το αντικείμενο που παράγεται οδηγεί σε μεγάλες αποκλίσεις από τις ονομαστικές του διαστάσεις και δημιουργεί ιδιαίτερα τραχείες επιφάνειες. Υψηλές ταχύτητες κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση οδηγούν επίσης σε ανεπιθύμητα αποτελέσματα καθώς δεν επιτυγχάνεται σωστά η εναπόθεση της κάθε στρώσης. Στην παρούσα διατριβή γίνεται ποιοτική διερεύνηση των παραμέτρων της προσθετικής διαδικασίας με τη μέθοδο της εξώθησης συντηγμένου νήματος σε πολυμερή και σύνθετα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή φυσικών αντικειμένων. Τα αντικείμενα αυτά είναι λεπτότοιχα (λόγω των πειραμάτων που έχουν πραγματοποιηθεί) και μπορούν να έχουν εφαρμογή στο χώρο της διακόσμησης εσωτερικού χώρου. Το μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων που παρουσιάζονται μπορούν να

χρησιμοποιηθούν και για την κατασκευή κάθε μορφής αντικειμένου με υψηλής ποιότητας χαρακτηριστικά και με το χαμηλότερο κόστος. Αρχικά, μέσω της βιβλιογραφίας αναλύονται οι παράμετροι που επηρεάζουν την τρισδιάστατη εκτύπωση με τη μέθοδο της εξώθησης συντηγμένου νήματος. Στη συνέχεια στην πρώτη πειραματική διάταξη εξετάζεται η επίδραση της θερμοκρασίας ακροφυσίου και του πάχους τοιχώματος στη διαστατική ακρίβεια και την τραχύτητα εκτυπωμένων δοκιμίων από PLA. Ύστερα από την ανάγνωση βιβλιογραφίας παρατηρήθηκε ότι υπάρχει ένα ερευνητικό κενό στην εξέταση της ποιότητας τρισδιάστατα εκτυπωμένων μοντέλων από σύνθετο υλικό που περιέχει ξυλόσκονη και βιοδιασπώμενο πολυμερές PLA (Wood/PLA). Στο δεύτερο πείραμα ερευνάται η επίδραση του πάχους στρώσης και της θερμοκρασίας ακροφυσίου στην ποιότητα λεπτότοιχων δοκιμίων από αυτό το σύνθετο υλικό (Wood/PLA) και στο τρίτο πείραμα εξετάζεται η αντοχή τους (εφελκυσμός, μέτρο ελαστικότητας) υπό την επίδραση διαφορετικών τιμών τεσσάρων μεταβλητών (πάχος στρώσης, θερμοκρασία ακροφυσίου, γωνία εναπόθεσης raster και ταχύτητα εκτύπωσης). Σε όλα τα πειράματα πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων και εύρεση βέλτιστων τιμών. Σε ξεχωριστό κεφάλαιο παρουσιάζονται ορισμένα πειράματα αξιολόγησης αλλά και τα μοντέλα επικύρωσης τιμών που έχουν βρεθεί.

Abstract

The fused filament fabrication (FFF) prototyping process is a quite promising technique because the parts of small as well as large complexity can be manufactured at low cost. The raw materials in this method are usually thermoplastics where objects were made layer by layer. The raw material is in solid state, in the form of thread, where by use of extrusion mechanisms and in combination with high temperature values it has been melted so the desired deposit is being created in places of the movement which is determined by printing head. The head machine movements defined by coordinates of X, Y and Z axes come from a code generated when the digital model designed in Computer Aided Design (CAD) software is fed into the software that the additive manufacturing machine works with. The user of the machine has the ability to set a variety of parameters that affect the additive process. Some of the most important parameters of 3D printing process are speed, temperature, thickness of each layer of the object and its internal filling. The parameter values can be different when different types of thermoplastics are used as well as different types of machines using the FFF method. The quality of objects produced during additive manufacturing highly depends on values of parameters set by the user. The dimensional accuracy of the models and the surface roughness are two very important indicators that have a great impact on quality. Choosing high layer thickness values for the produced object leads to large deviations from its nominal dimensions and creates significantly increased surface roughness. The high 3D printing speeds can also lead to undesired effects in the case of inadequate deposition of each layer. In this thesis, the parameters of the additive process were qualitatively examined by the fused filament fabrication (FFF) into polymers and composite materials that are used for the production of real objects. These objects have thin walls (due to the experiments that have been realized) and can be applied in the area of interior decoration. The great advantage is that the optimal values of the mentioned parameters can be used also for the manufacturing of any form of object with quality characteristics and at the lower cost. Firstly, the parameters that affect 3D printing by the method of material extrusion have been analyzed through the literature. Later, in the first experimental set-up, the effect of nozzle temperature and wall thickness on dimensional accuracy and roughness of PLA printed samples were examined. After reading the literature it was noticed that there was a research gap in examining the quality of 3D printed models made of composite material containing wood dust and biodegradable polymer PLA (Wood/PLA). In the second experiment the effect of layer thickness and nozzle temperature on the quality of thin-walled

samples made of this composite material (Wood/PLA) were investigated and in the third experiment their strength (tensile, modulus of elasticity) were examined under the impact of different values of four variables (thickness layer, nozzle temperature, raster deposition angle and print speed). In all these experiments, the statistical analysis of results and finding their optimal values have been performed. In a separate chapter, the evaluation experiments were presented as well as the models of result value validation that have been found.

Εισαγωγή

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας του αριθμητικού ελέγχου (NC Control) έφερε στην επιφάνεια μια διαφορετική πλευρά κατασκευής προϊόντων, αυτήν της τρισδιάστατης εκτύπωσης (3D Printing) ή της προσθετικής κατασκευής (Additive Manufacturing). Αποτελεί το νεότερο μέλος στην οικογένεια των κατασκευαστικών τεχνολογιών και απαιτεί την ύπαρξη ενός ψηφιακού μοντέλου βάσει του οποίου χτίζεται το τελικό προϊόν από μηδενική βάση. Έχει καθιερωθεί πλέον ο όρος Προσθετική Τεχνολογία, ενώ παλιότερα επικρατούσε η Ταχεία Πρωτοτυποποίηση (Rapid Prototyping), πιο γνωστός ως Τρισδιάστατη Εκτύπωση (3D Printing). Η βασική αρχή της προσθετικής κατασκευής (Additive Manufacturing - AM) είναι ότι το μοντέλο, που αρχικά δημιουργείται με τη χρησιμοποίηση ενός τρισδιάστατου συστήματος Computer Aided Design (3D CAD) είτε σχεδιάζοντάς το, είτε σαρώνοντάς το (3D scanning), μπορεί να κατασκευαστεί απευθείας χωρίς να απαιτείται ο προγραμματισμός της διαδικασίας παραγωγής του, κερδίζοντας έτσι σε χρόνο και κόστος [1]. Η προσθετική κατασκευή απλοποιεί σημαντικά τη διαδικασία κατασκευής τρισδιάστατων αντικειμένων απευθείας από ψηφιακά δεδομένα CAD σε σχέση με άλλους τρόπους κατασκευής που απαιτούν πιο λεπτομερή ανάλυση της γεωμετρικής μορφής του μοντέλου ώστε να καθοριστεί μια σειρά παραγόντων για τα μορφολογικά χαρακτηριστικά, ποια εργαλεία θα χρησιμοποιηθούν και άλλες διατάξεις που απαιτούνται για την ολοκλήρωσή του. Στην προσθετική κατασκευή το μοντέλο δημιουργείται με τη διαδοχική πρόσθεση υλικού σε στρώσεις (layers). Η κάθε στρώση (το πάχος της μπορεί να καθοριστεί) αντιστοιχεί σε μια λεπτή διατομή (cross-section) του μοντέλου που προκύπτει από τα δεδομένα CAD (ανάλυση συντεταγμένων σε XY επίπεδο). Όσο πιο λεπτή είναι η στρώση, τόσο πιο κοντά στο επιθυμητό είναι το αποτέλεσμα της εκτύπωσης. Η λειτουργία των μηχανών προσθετικής κατασκευής στηρίζεται στη στρωματική προσέγγιση, ενώ εκεί που διαφέρουν είναι στο υλικό (σαν πρώτη ύλη) αλλά και στον τρόπο συγκόλλησης των στρώσεων μεταξύ τους. Αυτές οι διαφορές καθορίζουν τα στοιχεία του τελικού κομματιού όπως τη γεωμετρική ακρίβεια (accuracy) και τις υλικές και μηχανικές ιδιότητές του, το χρόνο κατασκευής του, την απαιτούμενη μετεπεξεργασία (post-processing), το μέγεθος και το συνολικό κόστος της μηχανής εκτύπωσης αλλά και όλης της κατασκευαστικής διαδικασίας. Καθώς τα υλικά που χρησιμοποιούνται, η ακρίβεια και γενικά η όλη ποιότητα του αποτελέσματος της προσθετικής κατασκευής βελτιώνονται και η τεχνολογία συνεχώς εξελίσσεται, η μέθοδος αυτή έπαψε να είναι απλά μόνο ένα εργαλείο κατασκευής μοντέλων. Πολύ γρήγορα τα φυσικά μοντέλα που εκτυπώνονται άρχισαν να χρησιμοποιούνται για την παροχή πολύτιμων

πληροφοριών αναφορικά με αυτό που είναι γνωστό ως τα 3F (Form, Fit, Function) δηλαδή μορφή, συναρμογή, λειτουργία ή προς επέκταση τα 3C (Cad, Code, Create). Αρχικά τα μοντέλα χρησιμοποιούνταν για την κατανόηση της μορφής και γενικότερα το σχεδιασμό αυτών (μορφή – Form). Η βελτίωση της ακρίβειας των διεργασιών της προσθετικής κατασκευής επέτρεψε την κατασκευή μοντέλων με γεωμετρικές ανοχές, τέτοιες ώστε το μοντέλο να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δοκιμές συναρμολόγησης (συναρμογή – Fit). Η βελτίωση των υλικών κατασκευής (αντοχή, σκληρότητα, ελαστικότητα) έδωσε την δυνατότητα να μπορεί να αξιολογηθεί ένα αντικείμενο αναφορικά με το πώς μπορεί να λειτουργήσει (λειτουργία – Function). Η προσθετική κατασκευή σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μειώσει σημαντικά τους χρόνους και τα κόστη ενός προϊόντος. Κάποιες από τις τεχνολογίες γνωρίζουν τέτοια εξέλιξη που το κατασκευαστικό αποτέλεσμά τους είναι κατάλληλο για τελική χρήση. Για αυτό η ορολογία «ταχεία πρωτοτυποποίηση» μετεξελίχθηκε σε «προσθετική κατασκευή». Οι περισσότερες διεργασίες στην τρισδιάστατη εκτύπωση περιλαμβάνουν, σε κάποιο βαθμό τουλάχιστον, τα εξής βήματα :

1. CAD (Computer Aided Design). Όλα τα κομμάτια που τελικώς εκτυπώνονται αρχίζουν με ένα ψηφιακό μοντέλο που ή έχει σχεδιαστεί από κάποιο χρήστη σε λογισμικό στερεάς μοντελοποίησης ή έχει σαρωθεί με ειδικές συσκευές (οπτική σάρωση – reverse engineering) [2].
2. Μετατροπή του αρχείου σε STL. Όλες οι μηχανές προσθετικής κατασκευής δέχονται αρχεία μορφής STL (stereolithography - Standard Triangle Language) που εξάγονται εύκολα από τα προγράμματα CAD.
3. Μεταφορά αρχείου STL στο λογισμικό του εκτυπωτή. Το αρχείο STL που περιγράφει το κομμάτι μεταφέρεται στο κατάλληλο λογισμικό του εκτυπωτή και επεξεργάζεται ώστε να έχει σωστή θέση, κλίμακα κ.α.
4. Προετοιμασία εκτυπωτή. Ορίζονται κατασκευαστικές παράμετροι όπως πάχος στρώσης, θερμοκρασία εκτύπωσης [3], ταχύτητα κ.α.
5. Κατασκευή. Αυτοματοποιημένη διαδικασία που απαιτεί μόνο παρακολούθηση για την πρώτη ύλη ή την περίπτωση σφάλματος στην ηλεκτρική τροφοδοσία.
6. Απομάκρυνση. Αφού τελειώσει η κατασκευή το κομμάτι πρέπει να αφαιρεθεί.
7. Μετεπεξεργασία. Όταν το κομμάτι απομακρυνθεί από τον εκτυπωτή μπορεί να χρειαστεί κάποιο επιπλέον καθάρισμα ή αφαίρεση ορισμένων στηριγμάτων που πρέπει να γίνει από έμπειρο προσωπικό και απαιτεί χρόνο.

8. Εφαρμογή. Το κομμάτι είναι έτοιμο για χρήση αλλά μπορεί πάλι να απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία (βάψιμο, φινίρισμα) εξαρτάται που και πως θα χρησιμοποιηθεί (πιθανή συναρμολόγηση).

Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται ραγδαία είναι εφικτή και η προσθετική κατασκευή σε χώρους μη βιομηχανικούς με την παραγωγή μοντέλων σε σύντομο χρονικό διάστημα, ορισμένες φορές με μικρό κόστος, ειδικά αν πρόκειται για τρισδιάστατους εκτυπωτές «οικιακής χρήσης» (low cost 3d printers) [4]. Η μέθοδος εκτύπωσης με αυτούς τους «επιτραπέζιους» εκτυπωτές είναι γνωστή ως εναπόθεση λιωμένου υλικού (Fused Deposition Modeling - FDM ή Fused Filament Fabrication - FFF) όπου μια θερμαινόμενη κεφαλή χρησιμοποιείται για να λιώσει το υλικό εκτύπωσης και να το εξωθήσει χτίζοντας στρώση στρώση το μοντέλο από τη βάση μέχρι την κορυφή. Τα υλικά εκτύπωσης σε αυτά τα low cost μηχανήματα συνήθως είναι το PLA (Polylactic Acid) και το ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) αλλά υπάρχει τεράστια εξέλιξη και συνεχώς παράγονται και νέα όπως το PETG (Polyethylene terephthalate glycol) το TPU (Thermoplastic Polyurethane) και άλλα.

Η παρούσα διατριβή θα ασχοληθεί με τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων της τρισδιάστατης εκτύπωσης με τη μέθοδο της εναπόθεσης λιωμένου υλικού. Σκοπό θα έχει να ερευνηθούν όλες οι παράμετροι και οι τιμές τους που επηρεάζουν τη συγκεκριμένη μέθοδο ώστε να εκτυπώνεται ένα λεπτότοιχο μοντέλο όσο το δυνατόν πιο άρτια ποιοτικά.

Η στατιστική εδώ και πολλά χρόνια έχει αναγνωριστεί για τον κεντρικό ρόλο που παίζει στη διαχείριση ποιότητας, με σκοπό την παραγωγή προϊόντων υψηλής ποιότητας με χαμηλό κόστος. Η πιο δημοφιλής και πλήρης συλλογή τέτοιων μεθόδων είναι γνωστή με το όνομα «Μέθοδοι του Taguchi» (Taguchi Methods), θα εφαρμοστεί και στην έρευνα αυτή, όπου αποσκοπεί στη μείωση του παραγωγικού κόστους και την ποιοτική βελτίωση των προϊόντων μέσω του στατιστικού ποιοτικού ελέγχου πριν από την έναρξη της μαζικής παραγωγής (Off-line Quality Control) [5]. Ο Genichi Taguchi επινόησε μια τεχνική βελτίωσης, η οποία χρησιμοποιεί τις μεθόδους του στατιστικού σχεδιασμού πειραμάτων (Statistical Design of Experiments) για τον αποτελεσματικό χαρακτηρισμό ενός προϊόντος ή μέσων παραγωγής (όσον αφορά την ποιότητα), σε συνδυασμό με τη στατιστική ανάλυση της διασποράς τους (πόσο συγκεντρωμένες ή πόσο διασκορπισμένες είναι οι παρατηρήσεις του δείγματος γύρω από τον αριθμητικό μέσο), με κύρια επιδίωξη την ελαχιστοποίηση της μεταβλητότητας με το χαμηλότερο κόστος. Η μέθοδος αυτή, με τη βοήθεια του παραμετρικού σχεδιασμού (parameter design), εφαρμόζει την αρχή της αλλαγής πολλών παραγόντων κάθε φορά, κάτι που κοστίζει λιγότερο και έχει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, εν γένει. Ο Taguchi ορίζει την ποιότητα ενός προϊόντος με αρνητικό τρόπο, δηλαδή ως την

απώλεια που μεταβιβάζεται στην κοινωνία από τη στιγμή που της αποστέλλεται το προϊόν. Η απώλεια αυτή συμπεριλαμβάνει και το κόστος, το οποίο προέρχεται από την απόρριψη των προϊόντων που δεν ικανοποιούν τις προδιαγραφές, από τα έξοδα του ποιοτικού ελέγχου, από τη συντήρηση ή αντικατάσταση επιστρεφόμενης παραγωγής που πωλήθηκε με εγγύηση και από το χάσιμο πελατών που προέρχεται από την κακή ποιότητα του προϊόντος. Το σημαντικότερο, σύμφωνα με τον Taguchi, είναι ότι ένα προϊόν προξενεί απώλεια όχι μόνο όταν βρίσκεται εκτός προδιαγραφών, αλλά και όταν παρεκκλίνει του στόχου του. Κάθε πρόγραμμα ποιοτικής βελτίωσης θα πρέπει να έχει βασικό σκοπό την ελαχιστοποίηση της διασποράς της απόδοσης του προϊόντος σε σχέση με το στόχο του. Όσο μικρότερη είναι η διασπορά της απόδοσης, τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόκλιση από το στόχο, τόσο μεγαλύτερη είναι και η απώλειά του. Στην παρούσα διατριβή, η ποιοτική βελτίωση θα ερευνηθεί μέσω της σύγκρισης των τιμών διαφόρων παραμέτρων που θα έχουν επίπτωση στην προσθετική κατασκευή των μοντέλων.

Στην έρευνα αυτή οι παράμετροι που θα εφαρμοστούν προς βελτιστοποίηση, αφού αρχικά εξεταστούν πειραματικά, θα μπορούν να χρησιμοποιούνται για την τρισδιάστατη εκτύπωση λεπτότοιχων μοντέλων για χρήση διακόσμησης εσωτερικού χώρου και όχι μόνο, εφόσον έχουν σχεδιαστεί σε κατάλληλα λογισμικά, με σκοπό το άρτιο ποιοτικά αποτέλεσμα σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος παραγωγής και σε σύντομο χρονικό διάστημα κατασκευής. Η υλοποίηση (σχεδιασμός, τρισδιάστατη εκτύπωση, μετρήσεις κ.α.) της διατριβής πραγματοποιήθηκε στα εργαστήρια του τμήματος Δασολογίας, Επιστημών Ξύλου και Σχεδιασμού της Σχολής Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Μηχανήματα - τεχνολογία

Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές που εφαρμόζουν τη μέθοδο FFF είναι απλοί στο σχεδιασμό και αρκετά οικονομικοί [6]. Ο σχεδιασμός τους αποτελείται κυρίως από τρία μέρη που είναι τα μηχανικά εξαρτήματα, τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα και το λογισμικό τους. Τα μηχανικά μέρη αποτελούν τη δομή στήριξης και την κινηματική σύνδεση για τη μετακίνηση διαφόρων τμημάτων ενός εκτυπωτή FFF. Τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα παρέχουν τους μηχανισμούς κίνησης και ελέγχου του συστήματος. Μέσω του λογισμικού ο εκτυπωτής επικοινωνεί με το χρήστη και λειτουργεί σύμφωνα με τις εντολές του.

Με τους low cost εκτυπωτές είναι εφικτή η παραγωγή πρωτοτύπων (γενικής χρήσης, λειτουργικά, αισθητικά, ειδικών κατασκευών) με σχετικά απλό και οικονομικό τρόπο. Αποτελούν επαναστατικά μηχανήματα που κυριαρχούν την τελευταία δεκαετία σε πάρα πολλούς τομείς. Από το 2008 και έπειτα, μετά τη λήξη διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας, ένας μεγάλος αριθμός μηχανημάτων FFF έχει αναπτυχθεί παγκοσμίως. Τα μηχανήματα αυτά που αναφέρονται ως τρισδιάστατοι εκτυπωτές είναι τις περισσότερες φορές συστήματα ανοικτού κώδικα. Πωλούνται σε τιμές που ξεκινούν από ορισμένες εκατοντάδες ευρώ, αν πρόκειται για εξοπλισμό kit που συναρμολογείται από το χρήστη και μπορεί να φτάνουν τις δέκα χιλιάδες ευρώ για μηχανήματα με πιο στιβαρά υλικά όσον αφορά τα εξαρτήματα που τα αποτελούν. Το κόστος των μηχανημάτων μπορεί να αυξάνεται και από τις πολλαπλές κεφαλές, τη θερμική βάση, τον κλειστό θάλαμο αλλά και από άλλα ηλεκτρονικά μέρη (πλακέτες, κυκλώματα). Τα περισσότερα μοντέλα διαθέτουν αρχιτεκτονική τριών άξονων, με την κεφαλή εξώθησης να κινείται σε έναν, δυο ή ακόμα και τρεις άξονες. Η εγκατάσταση, η συναρμολόγηση και ο χειρισμός τους γίνεται συνήθως από το χρήστη σε αντίθεση με τα ακριβά βιομηχανικά συστήματα FFF που είχαν αναπτυχθεί από τη Stratasys όπου διαθέτουν ζεστό θάλαμο εργασίας και προηγμένες μηχανικές λύσεις για βελτιωμένη ακρίβεια, διπλές κεφαλές εξώθησης, εύκολη και γρήγορη αλλαγή πρώτης ύλης σε πιο αυτοματοποιημένη διαδικασία [7].

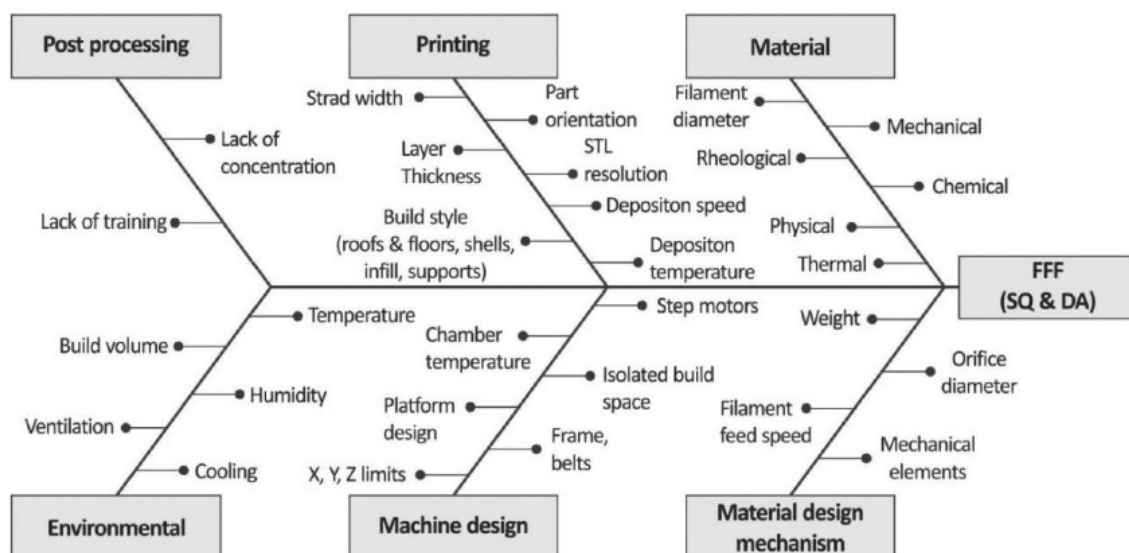
Η πρώτη εντύπωση που δίνεται σε εκθέσεις προώθησης FFF μηχανημάτων είναι ότι τα μηχανήματα αυτά αξίζουν όσο κοστίζουν από την άποψη διαστατικής ακρίβειας αλλά και ποιότητας επιφάνειας των μοντέλων που παράγουν. Από τα τέλη της δεκαετίας του '80 όταν ξεκίνησαν τα μηχανήματα ταχείας πρωτοτυποποίησης η έλλειψη ενός διεθνούς προτύπου οδηγιών, απόδοσης και ακρίβειας οδήγησε τους ερευνητές να υιοθετήσουν διαδικασίες συγκριτικής αξιολόγησης. Αυτές πραγματοποιούνται για τη σύγκριση απόδοσης των συστημάτων (προϊόντων, διαδικασιών, μηχανημάτων, υπηρεσιών). Στην περίπτωση

προϊόντων και μηχανημάτων η σύγκριση βασίζεται σε πραγματικές μετρήσεις γιατί παρόλο που τα τεχνικά χαρακτηριστικά αναφέρονται σε φύλλα δεδομένων, οι πληροφορίες δεν είναι πάντα αξιόπιστες με τις πραγματικές επιδόσεις των συγκρινόμενων συστημάτων. Σε ότι αφορά τη σύγκριση των μηχανών ταχείας πρωτοτυποποίησης, η απόδοσή τους αξιολογείται με βάση τη διαστατική ακρίβεια των κατασκευασμένων μοντέλων.

1. Διαδικασία προσθετικής κατασκευής

Η προσθετική κατασκευή (ΠΚ) είναι ένας αποκλειστικός όρος για την περιγραφή των τεχνολογιών που δημιουργούν τρισδιάστατα αντικείμενα [8-10] με μια διαδικασία «στρώση προς στρώση» ξεκινώντας από δεδομένα μοντέλου τριών διαστάσεων [11-13]. Τα μοντέλα δημιουργούνται ψηφιακά σε λογισμικά CAD, μετατρέπονται σε κώδικες μηχανικής κατεργασίας παρόμοιους με τη διαδικασία επεξεργασίας CNC (Computer Numerical Control) και κάθε στρώση κατασκευάζεται απευθείας πάνω από τις προηγούμενες στρώσεις για τη δημιουργία του φυσικού αντικείμενου [14, 15]. Όταν εφαρμόζεται η ΠΚ όλα τα δεδομένα του εικονικού μοντέλου 3D μετατρέπονται σε προϊόν μέσω μιας γρήγορης και εύκολης διαδικασίας [16-18]. Μικρότερος χρόνος κύκλου παραγωγής πρωτοτύπου αλλά και μειωμένο κόστος σε σύγκριση με τις συμβατικές διαδικασίες παραγωγής είναι τα κύρια οφέλη που προσφέρει αυτή η τεχνολογία [19-21]. Επιπλέον, η χρησιμότητα της ΠΚ αυξάνεται σημαντικά όταν το παραγόμενο αντικείμενο γίνεται όλο και πιο περίπλοκο [22]. Τα καταναλωτικά προϊόντα, η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική βιομηχανία και η ιατρική, είναι μερικά από τα πεδία όπου η ΠΚ μπορεί να φανεί ιδιαίτερα χρήσιμη [23-27].

Η διαδικασία FFF χρησιμοποιεί τον θερμαινόμενο μηχανισμό εξώθησης (ME), όπου ένα θερμοπλαστικό πολυμερές διαπερνάται μέσω ενός θερμαινόμενου ακροφυσίου, δημιουργώντας ένα φυσικό αντικείμενο αφού στερεοποιηθεί το υλικό. Η επιλογή του υλικού, ο προσανατολισμός του μοντέλου που θα εκτυπωθεί, η θερμοκρασία (ακροφυσίου, βάσης, θαλάμου), το πάχος στρώσης, η γωνία και το μοτίβο εναπόθεσης, το εσωτερικό γέμισμα (πλήρωση) είναι μερικές από τις παραμέτρους εκτύπωσης που πρέπει να ρυθμιστούν σωστά πριν ξεκινήσει η διαδικασία κατασκευής [20, 28-34]. Η σωστή επιλογή τιμών αλλά και ο έλεγχος των παραμέτρων εκτύπωσης οδηγεί στον καθορισμό της διαστατικής ακρίβειας του μοντέλου αλλά και της επιφανειακής τραχύτητάς του (εικόνα 1) [9, 18, 35-40].



Εικόνα 1. Διάγραμμα αιτίας και επίδρασης στην τραχύτητα και τη διαστατική ακρίβεια κατά την FFF διαδικασία.

Έχουν πραγματοποιηθεί διάφορες έρευνες που σχετίζονται με την προσθετική διαδικασία FFF όσον αφορά τη μηχανική απόκριση καθαρών πολυμερών (πολυγαλακτικά οξέα PLA κ.α.) ή με κάποια πρόσθετα (σύνθετων) [33, 41-53], τη διαστατική ακρίβεια και τραχύτητα επιφάνειας των μοντέλων [19, 54-57], τα ζητήματα των πρώτων υλών [58-63] και γενικότερα την κριτική των πιο σημαντικών συγγραφέων σε σχέση με το αντικείμενο που αναλύεται [64].

Ο σκοπός της διδακτορικής διατριβής είναι να αξιολογηθούν αλλά και να αναθεωρηθούν οι παράμετροι που καθορίζουν την ποιότητα της επιφάνειας και την ακρίβεια των διαστάσεων μοντέλων που εκτυπώνονται κατά την FFF διαδικασία. Σε αυτό το κεφάλαιο, ακολουθώντας την εύρωστη προσέγγιση του σχεδιασμού [65], αναλύονται οι τύποι σήματος, ελέγχου και θορύβου. Η επίδραση αυτών των παραμέτρων στα αποτελέσματα των διεργασιών της διαστατικής ακρίβειας και της επιφανειακής ποιότητας παρουσιάζονται σε επόμενη ενότητα. Τέλος, εξετάζονται οι τρέχουσες τάσεις και πιθανές μελλοντικές έρευνες που αφορούν τη βελτίωση της ποιότητας των μοντέλων που παράγονται με τη μέθοδο FFF. Για την καλύτερη οπτικοποίηση των εννοιών, έχουν σχεδιαστεί, εκτυπωθεί, μετρηθεί και αξιολογηθεί αποκλειστικά μοντέλα για όλες τις πειραματικές διαδικασίες.

Η παρούσα μελέτη παρέχει ένα πλαίσιο για μια συστηματική ανάλυση για τον έλεγχο των παραμέτρων της FFF διαδικασίας και αποσαφηνίζει πιθανούς τρόπους για την επιλογή μεταβλητών με σκοπό τη μεγιστοποίηση της απόδοσης από ένα δεδομένο σχέδιο.

1.1 Ανάλυση παραμέτρων

Η τρισδιάστατη εκτύπωση με την FFF διαδικασία περιλαμβάνει τον καθορισμό τιμών σε διάφορες μεταβλητές παραμέτρους. Αυτές μπορούν να διαμορφωθούν μέσω ενός λογισμικού ή μέσω της μονάδας ελέγχου της μηχανής.

1.1.1 Παράμετροι σήματος

Ο χειριστής ενός μηχανήματος τρισδιάστατης εκτύπωσης έχει τη δυνατότητα να προσαρμόζει τις παραμέτρους σήματος. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν όλες οι παράμετροι που μπορούν να αλλάξουν μέσω του λογισμικού του εκτυπωτή ή της μονάδας ελέγχου του. Αυτές οι παράμετροι επηρεάζουν συνήθως το κόστος των υλικών, την ενέργεια, τις μηχανικές ιδιότητες, την ακρίβεια, την ποιότητα της επιφάνειας, του περιβάλλοντος [66-71] και περιλαμβάνουν :

1. Την ανάλυση του αρχείου STL (stereolithography). Εξαρτάται από τις λεπτομέρειες και την ποιότητα του μοντέλου (εικόνα 2) που προκύπτει από ένα πρόγραμμα CAD. Κανονικά, η διαδικασία «μετάφρασης» του μοντέλου CAD πρέπει να καθορίζει την τιμή της παραμέτρου για το ύψος χορδής, της γωνίας ελέγχου και του μεγέθους βήματος. Αυτή η τιμή προσαρμόζεται συνήθως στις λεπτομέρειες του αρχείου STL. Ο καθορισμός της ανάλυσης του αρχείου αυτού είναι ένα στάδιο προεπεξεργασίας και εξαρτάται από τις δυνατότητες και τα χαρακτηριστικά του εκτυπωτή [72, 73]. Συνήθως αναλύσεις μικρότερες των 0.01 mm για το ύψος του νήματος δε θεωρούνται χρήσιμες κατά τη διαδικασία FFF [74-76]. Οι παράμετροι ελέγχου γωνίας και μεγέθους βήματος μπορούν να αυξήσουν την ακρίβεια του αρχείου STL σε σχηματικές λεπτομέρειες [77, 78].

	Rendered CAD model	Dense STL Chord height: 0.5 Angle control: 0.5 Step size: 0.5	Normal STL Chord height: 2.5 Angle control: 0.5 Step size: 2.5	Sparse STL Chord height: 10.0 Angle control: 0.5 Step size: 10.0	Coarse STL Chord height: 20.0 Angle control: 0.5 Step size: 20.0
model 1 prismatic					
model 2 prismatic and curved					
model 3 curved and prismatic					

Εικόνα 2. Επίδραση των προδιαγραφών αρχείου STL στη γεωμετρική ακρίβεια εξαρτημάτων με την μέθοδο FFF.

2. Τον προσανατολισμό. Ο προσανατολισμός της κατασκευής του μοντέλου δηλώνει τη γωνία με την οποία το μεγαλύτερο μήκος έχει κλίση στη βάση του τρισδιάστατου εκτυπωτή κάτι που είναι πολύ σημαντικό για τα αποτελέσματα της ποιότητας των επιφανειών από τα μοντέλα που παράγονται [14, 79, 80]. Καθορίζει τα όρια κατασκευής (X_{max} , Y_{max} , Z_{max}) και είναι ένας από τους κύριους παράγοντες για όλους τους δείκτες ποιότητας της διαδικασίας FFF [81-85]. Επιπλέον, επηρεάζει τη διάσταση Z_{max} , η οποία δίνει το συνολικό αριθμό των επιπέδων N όταν διαιρείται με το πάχος στρώσης LT (Layer Thickness), ένα μέγεθος ανάλογο με το συνολικό χρόνο προετοιμασίας των επιπέδων [86].
3. Το πάχος στρώσης LT . Το πάχος στρώσης υποδεικνύει το ύψος κάθε επιπέδου σε μια διαδρομή της κεφαλής του μηχανήματος και κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0,05 έως 0,5 ανάλογα με τις λεπτομέρειες της γεωμετρίας και των χαρακτηριστικών του εκτυπωτή. Η τιμή του πάχους ορίζεται πριν από τη διαδικασία τεμαχισμού (slicing) και σχετίζεται στενά με το συνολικό χρόνο εκτύπωσης ενός αντικειμένου. Επιπλέον, το πάχος στρώσης σχετίζεται με το φαινόμενο stair-step [87] που θα αναλυθεί στη συνέχεια και χαρακτηρίζει όλες τις διαδικασίες προσθετικής κατασκευής και επομένως είναι από τις πιο σημαντικές

παραμέτρους που επηρεάζει την ποιότητα της επιφάνειας των μοντέλων που παράγονται [35, 88, 89].

4. Τον τρόπο κατασκευής. Καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο κάθε επίπεδο τμήμα κατασκευάζεται κατά τη διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης που περιγράφεται. Αυτή η παράμετρος χωρίζεται σε τέσσερις διαφορετικές υποομάδες [90, 91] :
 - i. Επίπεδο βάσης και επίπεδο κορυφής. Αυτές είναι οι επιφάνειες του κάτω και του πάνω μέρους του μοντέλου. Δεν έχουν κενά μεταξύ των γραμμών τους και μετρώνται χρησιμοποιώντας το πάχος ή των αριθμό των στρώσεων [92].
 - ii. Κέλυφος. Το κέλυφος είναι η κάθε επιφάνεια του STL αρχείου του μοντέλου εκτός από το επίπεδο της βάσης και της κορυφής. Το πάχος του κελύφους αλλά και ο αριθμός τους μπορεί να καθοριστεί από το λογισμικό του εκτυπωτή [93, 94].
 - iii. Εσωτερικό γέμισμα (πλήρωση). Το γέμισμα αναφέρεται ως το υλικό που τοποθετείται στρώση στρώση εσωτερικά του μοντέλου [95, 96]. Ο τύπος του μοτίβου, η πυκνότητα, η γωνία απόθεσης (προσανατολισμός) είναι οι παράμετροι που καθορίζουν τα χαρακτηριστικά του όγκου πλήρωσης. Έχουν αναπτυχθεί από ερευνητές διάφορα μοτίβα γεμίσματος με πιο σημαντικά τα zig-zag, εξαγώνου και τα γραμμικά [97-99]. Η πυκνότητα του γεμίσματος είναι το ποσοστό του όγκου του υλικού που εκτυπώνει το μηχάνημα και γεμίζει εσωτερικά το μοντέλο [100, 101]. Η γωνία απόθεσης είναι η γωνία μεταξύ των υποστρωμάτων εξώθησης υλικού και του άξονα X του εκτυπωτή και επηρεάζει τη μηχανική απόκριση των μοντέλων που παράγονται όπως θα αποδειχθεί σε επόμενο κεφάλαιο [101, 102].
 - iv. Υποστηρίγματα. Τα υποστηρίγματα είναι λεπτές δομές που αφαιρούνται από τον όγκο των μοντέλων μετά από τη διαδικασία FFF [103]. Δημιουργούνται ταυτόχρονα με το μοντέλο συνήθως με το ίδιο υλικό αλλά με διαφορετικές παραμέτρους εκτύπωσης έτσι ώστε να αφαιρούνται πιο εύκολα [104,105].

Κάθε παράμετρος αυτών των υποομάδων πρέπει να καθοριστεί λεπτομερώς για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα στην εμφάνιση, στην ανθεκτικότητα και στην ακρίβεια του μοντέλου που κατασκευάζεται [106-109].

5. Την ταχύτητα εκτύπωσης. Η ταχύτητα εκτύπωσης, μετριέται συνήθως σε χιλιοστά ανά δευτερόλεπτο (mm/s), είναι η ταχύτητα που κινείται η κεφαλή σε ΧΥ επίπεδο τη στιγμή που εναποθέτει υλικό. Σε ορισμένα μηχανήματα την κίνηση στον Υ άξονα την πραγματοποιεί η βάση (πλατφόρμα). Ο χρήστης μπορεί να ορίσει διαφορετικές ταχύτητες για τη βάση, την κορυφή, το κέλυφος, το γέμισμα, τα υποστηρίγματα του αντικειμένου που παράγεται μέσω του λογισμικού του μηχανήματος [110-112]. Η ταχύτητα που προτείνεται να καθορίσει ο χρήστης διαφέρει για κάθε υλικό και προτείνεται να ακολουθούνται οδηγίες από τους κατασκευαστές των πρώτων υλών [19,101,102,110,112].
6. Τη θερμοκρασία ακροφυσίου. Είναι ο παράγοντας που καθορίζει την τήξη του νήματος κατά τη διάρκεια της διαδικασίας FFF. Διαφορετικά υλικά έχουν διαφορετικό εύρος τήξης θερμοκρασίας [38, 40, 102, 113, 114].
7. Τη Θερμοκρασία πλατφόρμας (βάσης). Για την αποφυγή αποτυχίας εκτύπωσης κατά την απόθεση υλικού στην πρώτη στρώση, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει να θερμάνει την πλατφόρμα σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κάθε υλικού [115-117].
8. Τη θερμοκρασία θαλάμου. Ορισμένα υλικά (όπως το PEEK) χρειάζονται συγκεκριμένες θερμοκρασίες εντός του θαλάμου εκτύπωσης ώστε να μην υπάρχουν αυξομειώσεις που μπορεί να οδηγήσουν σε αποτυχημένες εκτυπώσεις [118, 119].

1.1.2 Παράμετροι ελέγχου

Ο κατασκευαστής των τρισδιάστατων εκτυπωτών έχει τη δυνατότητα να καθορίσει τις παραμέτρους ελέγχου. Αυτές οι παράμετροι επηρεάζουν μερικές φορές το κόστος του εκτυπωτή [120]. Ο τύπος του υλικού που χρησιμοποιείται, η διάμετρος του ακροφυσίου, η διάμετρος του νήματος, ο όγκος κατασκευής [121], ο τύπος της πλατφόρμας [122], τα χαρακτηριστικά των μηχανικών στοιχείων του εκτυπωτή αποτελούν μερικές από τις παραμέτρους ελέγχου [123].

1.1.3 Παράμετροι θορύβου

Οι παράμετροι θορύβου είναι αυτές που ο χειριστής του μηχανήματος δε μπορεί να ελέγξει. Σε αυτές μπορούν να μετρηθούν μόνο στατιστικές τιμές [65]. Στην κατηγορία αυτή

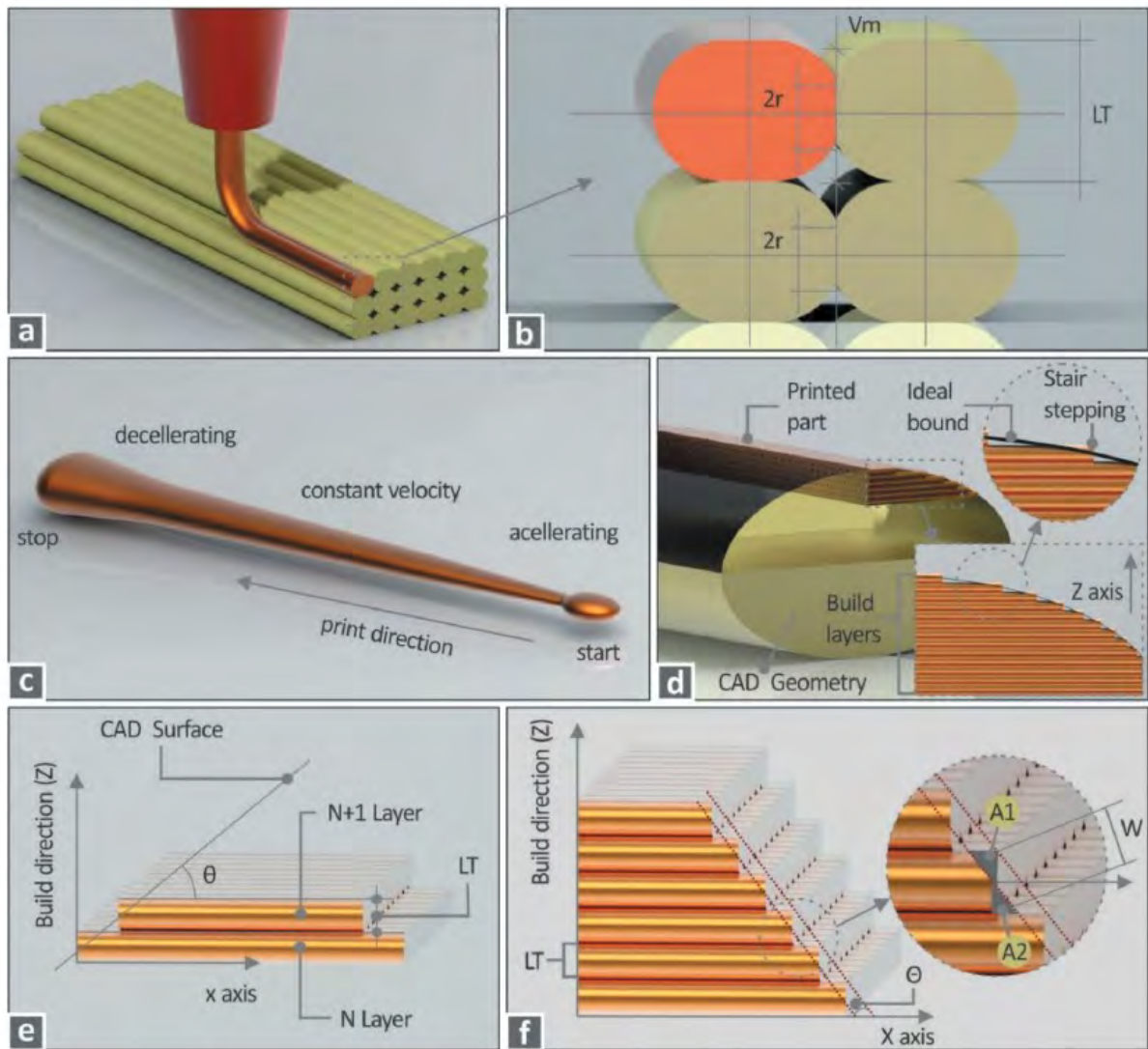
περιλαμβάνονται οι εσωτερικές και εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες (θερμοκρασία, υγρασία), οι δονήσεις του εκτυπωτή λόγω του σχεδιασμού των στοιχείων του, η διάταξη της συναρμολόγησης του μηχανήματος, οι κινητήρες, οι τύποι του ιμάντα κ.α. [124].

1.2 Επίδραση παραμέτρων στην ποιότητα της επιφάνειας και στη διαστατική ακρίβεια

Η ποιότητα της επιφάνειας (τραχύτητα) των μοντέλων που κατασκευάζονται με την τρισδιάστατη εκτύπωση επηρεάζεται από την προσκόλληση και τη σύντηξη μεταξύ των στρώσεων και από τις συνθήκες εξώθησης του υλικού που εναποτίθεται κατά τη διαδικασία FFF [40, 119, 125-127]. Έτσι, η προσεκτική αναγνώριση των μεταβλητών της FFF διεργασίας που επηρεάζουν την ποιότητα της επιφάνειας των παραγόμενων πρωτοτύπων είναι υψίστης σημασίας. Η κατανόηση της επίδρασης των μεταβλητών της FFF διαδικασίας στην ακεραιότητα των κατασκευασμένων μερών αποτελεί ένα κρίσιμο θέμα για πολλούς ερευνητές [34, 101, 128-130].

Αξίζει να σημειωθεί ότι η έλλειψη επαρκούς προσκόλλησης μεταξύ των στρωμάτων του νήματος επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα της επιφάνειας των μοντέλων και μπορεί να δημιουργήσει πόρους και ανεπιθύμητες ρωγμές [131-133]. Ο Wang [134] είχε αναφέρει ότι η επίδραση συμπίεσης του ακροφυσίου και της διάχυσης επηρεάζει τη μορφή της ποιότητας της επιφάνειας και ανέπτυξε ένα γεωμετρικό μοντέλο για την πρόβλεψη της επιφανειακής τραχύτητας για επίπεδες και κάθετες επιφάνειες. Το μέγιστο ύψος των επίπεδων ή των κατακόρυφων επιφανειών V_m (εικόνα 3a, 3b) υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση 1.

$$V_m = \frac{d-2r}{2} \quad (1)$$



Εικόνα 3. **a)** σύνδεση μεταξύ νημάτων και σχηματισμός στρώσεων **b)** μορφολογία των διατομών και σχηματισμοί πόρων **c)** επιδράσεις της ταχύτητας εκτύπωσης στην εναπόθεση υλικού **d)** το φαινόμενο σκαλοπατιού (stair stepping phenomenon) **e)** κεκλιμένη επιφάνεια με τη γωνία θ **f)** γεωμετρική αναπαράσταση μέσης τραχύτητας της επιφάνειας

Όπου d είναι το πάχος στρώσης και $2r_m$ είναι το μέγεθος της κόλλησης για επίπεδες επιφάνειες, το οποίο μπορεί να εκφραστεί ως μια συνάρτηση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του νήματος και των παραμέτρων εκτύπωσης κατά τη διαδικασία FFF όπως είναι η ταχύτητα εκτύπωσης, η θερμοκρασία του ακροφυσίου, ο προσανατολισμός του μοντέλου και πολλοί άλλοι.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό της ποιότητας εκτύπωσης κατά την FFF διαδικασία είναι η επιφάνεια τραχύτητας των μοντέλων [32, 34, 135, 136]. Κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης, το ακροφύσιο δημιουργεί τις λεγόμενες «βεράντες» (stair-stepping effect) επάνω στο κέλυφος (εικόνα 3d). Το πάχος της στρώσης και ο προσανατολισμός του μοντέλου σχετίζονται άμεσα

με αυτό το φαινόμενο το οποίο χαρακτηρίζει όλες τις διεργασίες της προσθετικής κατασκευής και είναι από τις πιο σημαντικές παραμέτρους που επηρεάζουν την ποιότητα της επιφάνειας [35, 86, 137].

Είναι γνωστό ότι το stair-stepping φαινόμενο διαφέρει αναλόγως τη διεργασία προσθετικής κατασκευής που χρησιμοποιείται. Έτσι, το αναλυτικό μοντέλο που έχει προταθεί από τους Reeves και Cobb [138] δεν προβλέπει ακριβής τιμή μέσης τραχύτητας επιφάνειας Ra σύμφωνα με την εξίσωση 2 [88, 138-141] (εικόνα 3e,f) :

$$Ra = \frac{1}{W} \int_0^W y dx = \frac{A_1 + A_2}{W} = L_t \cos \theta / 4 \quad (2)$$

Όπου L_t είναι το πάχος στρώσης και θ η γωνία μεταξύ του επιφανειακού διανύσματος και του άξονα Z.

Μια άλλη κρίσιμη παράμετρος που επηρεάζει το σχήμα των μοντέλων και την ακρίβεια είναι τα υποστηρίγματα που εξαλείφουν τη συρρίκνωση του εξαρτήματος στις αρχικές στρώσεις, όταν ξεκινά η κατασκευή και αλλοιώνουν την ποιότητα της επιφάνειας όπου εφαρμόζεται [142].

Τέλος, η συρρίκνωση του υλικού επηρεάζει την ακρίβεια των διαστάσεων. Η διαστατική ακρίβεια μπορεί να υποδείξει τις διαφορές μεταξύ του ψηφιακού μοντέλου και του πραγματικού, που παράγεται με την FFF μέθοδο, σε σχηματικές λεπτομέρειες (γραμμικές και κυκλικές διαστάσεις, επιπεδότητα, στρογγυλότητα). Η θερμοκρασία ακροφυσίου, πλατφόρμας αλλά και περιβάλλοντος επηρεάζουν την ακρίβεια του τελικού σχήματος λόγω του παράγοντα συρρίκνωσης, ο οποίος διαφέρει από υλικό σε υλικό [116, 143].

1.3 Επιδράσεις των παραμέτρων σήματος

Γενικά, οι περισσότεροι από τους υπάρχοντες τρισδιάστατους εκτυπωτές δεν επιτρέπουν την αλλαγή των τιμών των παραμέτρων κατά την εκτύπωση, ωστόσο αυτή η δυνατότητα ενδέχεται να είναι διαθέσιμη στο μέλλον σε εκτυπωτές τεσσάρων ή και πέντε αξόνων [144]. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια ανασκόπηση των παραμέτρων σήματος και των επιπτώσεών τους στην πρόσφυση και σύντηξη των στρώσεων αλλά και στο φαινόμενο stair stepping με άμεσο αντίκτυπό τους στην τραχύτητα της επιφάνειας των μοντέλων αλλά και στη διαστατική τους ακρίβεια.

- 1) Ο προσανατολισμός του μοντέλου αλληλεπιδρά με το πάχος των στρωμάτων και είναι πολύ σημαντικός για το φινίρισμα των μερών και συνεπώς για την ποιότητα της επιφάνειας [56,145]. Τόσο το πάχος στρώσης όσο και ο προσανατολισμός του μοντέλου καθορίζουν την ποιότητα για την FFF διαδικασία και προτείνεται να ληφθούν υπόψη κατά προτεραιότητα σε σχέση με άλλες παραμέτρους.
- 2) Πάχος στρώσης. Το πάχος στρώσης επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες του μοντέλου κατά την κατεύθυνση του επιπέδου. Έχει ερευνηθεί ότι μειώνοντας το πάχος στρώσης αυξάνεται η απόλυτη τιμή του εφελκυσμού σε μοντέλα από υλικό ABS με πλήρωση 100% [146]. Επιπλέον, το πάχος στρώσης αλληλεπιδρά και με άλλες παραμέτρους και έχει βρεθεί ότι επηρεάζει σχεδόν όλα τα ποιοτικά αποτελέσματα της διαδικασίας FFF [37,40,140,147-149]. Γενικά, ένα μικρό πάχος στρώσης οδηγεί σε ένα πιο ακριβές και λεπτομερές μοντέλο, ωστόσο ο συνολικός χρόνος παραγωγής του αυξάνεται σημαντικά [40]. Το φαινόμενο stair-stepping ελαχιστοποιείται με τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας τεμαχισμού (slicing) και του πάχους στρώσης στο λογισμικό που συνεργάζεται το μηχάνημα εκτύπωσης. Οι υψηλές τιμές πάχους στρώσης μειώνουν το χρόνο εκτύπωσης αλλά παράγουν μοντέλα με μεγάλη τραχύτητα [40]. Οπότε χαμηλές τιμές πάχους στρώσης μπορεί να αποφέρουν μεγαλύτερους χρόνους εκτύπωσης αλλά μειώνουν όμως την τραχύτητα στην επιφάνεια των μοντέλων [113,131].
- 3) Θερμοκρασία εκτύπωσης (θερμοκρασία ακροφυσίου). Η θερμοκρασία του ακροφυσίου είναι επίσης ένας παράγοντας που επηρεάζει την ποιότητα της επιφάνειας και τη διαστατική ακρίβεια των μοντέλων που παράγονται με την FFF διαδικασία [40,113,134,136]. Η τιμή της θερμοκρασίας αυτής πρέπει να ορίζεται εντός του σημείου τήξης του νήματος επειδή οι θερμικές ιδιότητές του θα επηρεάσουν τις συνθήκες τήξης μέσω του ακροφυσίου του εκτυπωτή. Η συνολική

ακρίβεια των εκτυπωμένων μοντέλων επηρεάζεται επίσης και από τις χημικές ιδιότητες του νήματος αλλά και από τη θερμοκρασία μετάβασης σε υαλώδες κατάσταση (glass transition temperature) [150, 151]. Η δύναμη και η τριβή του υλικού σε λιωμένη κατάσταση επηρεάζει την ακαμψία των εκτυπωμένων μοντέλων, την ικανότητα ροής του νήματος και αν αυτό το υλικό θα φράξει το ακροφύσιο ή όχι [38,152]. Θέματα ελέγχου της επιτάχυνσης ή της επιβράδυνσης τήξης του υλικού κατά την έναρξη ή το σταμάτημα της κίνησης μπορούν επίσης να προκαλέσουν επιφανειακές δυσλειτουργίες (εικόνα 3a,3c) [56].

- 4) Θερμοκρασία πλατφόρμας και θαλάμου. Αυτές οι δυο θερμοκρασίες είναι ιδιαίτερα σημαντικές αλλά και απαραίτητες για τα περισσότερα υλικά κατά τη διαδικασία FFF. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ρυθμίσει τη θερμοκρασία της βάσης έτσι ώστε να υπάρχει κατάλληλη πρόσφυση μεταξύ της πρώτης στρώσης του υλικού και της πλατφόρμας κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε επιτυχημένη παραγωγική διαδικασία [153]. Ακατάλληλες θερμοκρασίες μπορεί να οδηγήσουν σε παραμορφώσεις του μοντέλου λόγω της συρρίκνωσης του υλικού που εναποτίθεται επάνω στην πλατφόρμα του εκτυπωτή [154].
- 5) Ταχύτητα εκτύπωσης. Μια άλλη παράμετρος σήματος που επηρεάζει την ποιότητα της επιφάνειας αλλά και τη διαστατική ακρίβεια των μοντέλων που παράγονται με την FFF διαδικασία είναι η ταχύτητα εκτύπωσης. Εξαιρετικά χαμηλές ταχύτητες μπορούν να προκαλέσουν παραμόρφωση της εκτύπωσης εξαιτίας του μεγάλου χρονικού διαστήματος που αγγίζει το ακροφύσιο στην πλαστική στρώση που έχει ήδη τοποθετηθεί. Από την άλλη, γρήγορες ταχύτητες εκτύπωσης μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα υπερθέρμανσης σε ανεπαρκή ψύξη, υπο-εξώθηση και ανεπιθύμητη προσκόλληση των στρώσεων. Στις περισσότερες περιπτώσεις μια χαμηλή ταχύτητα ορίζεται ως προεπιλογή από το λογισμικό του μηχανήματος για την επίτευξη ποιοτικής εκτύπωσης. Η ταχύτητα εκτύπωσης επηρεάζει την ποιότητα των στρώσεων της βάσης, της κορυφής, του κελύφους, του γεμίσματος, των υποστηρίγμάτων και διαφέρει η τιμή της για καθένα από αυτά, όπως επίσης μπορεί να οριστεί και διαφορετική ταχύτητα μετακίνησης κεφαλής δίχως την εναπόθεση υλικού [110, 117, 155, 156].
- 6) Πυκνότητα πλήρωσης. Το ποσοστό και η μορφή γεμίσματος μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα και τη διαστατική ακρίβεια των εκτυπωμένων μοντέλων. Εκτός από τα συμβατικά μοτίβα κατασκευής έχουν αναπτυχθεί και ορισμένες εξελιγμένες μορφές γεμίσματος εμπνευσμένες από τη βιολογία [157] ή από κάποια ετερογενή αρχιτεκτονική για τη βελτίωση της αντοχής του αντικειμένου [99]. Το πόσο συμπαγές

και ισχυρό θα είναι ένα μοντέλο εξαρτάται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό από το πόσο γεμάτο ή κούφιο είναι [29,102,158]. Το κενό μεταξύ δυο γειτονικών εναποτιθέμενων σφαιριδίων (κυκλική διατομή του νήματος λόγω του ακροφυσίου) σε μία στρώση ονομάζεται κενό αέρος στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Όταν δυο στρώσεις αλληλοεπικαλύπτονται, αυτό το κενό ονομάζεται αρνητικό. Το πλάτος των εναποτιθέμενων σφαιριδίων εξαρτάται από τη διάμετρο του ακροφυσίου [84].

- 7) Γωνία εναπόθεσης (raster angle). Η διεύθυνση της εναπόθεσης του νήματος σε σχέση με τον άξονα X της πλατφόρμας αποτελεί τη γωνία εναπόθεσης (προσανατολισμός) [159]. Πολλές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί σχετικά με την επίδραση αυτής της γωνίας κατά την προσθετική διαδικασία μοντέλων με τη μέθοδο FFF [29,102,160]. Έχει αποδειχθεί ότι η μηδενική γωνία εναπόθεσης μεγιστοποιεί την τάση εφελκυσμού, τη δύναμη [159] και έχει πολύ μικρές επιπτώσεις στην ποιότητα της επιφάνειας αλλά και στη διαστατική ακρίβεια.
- 8) Ο αριθμός των κελυφών καθορίζει το πάχος του κελύφους των μοντέλων FFF. Επομένως, αυτός ο αριθμός επηρεάζει κυρίως τις μηχανικές ιδιότητες των μοντέλων που παράγονται και λιγότερο τη διαστατική ακρίβεια και την τραχύτητα των επιφανειών τους [29,95].
- 9) Τα υποστηρίγματα επηρεάζουν επίσης την ποιότητα των μοντέλων καθώς και το χρόνο αλλά και το κόστος της επεξεργασίας (μετεπεξεργασία). Μοντέλα χωρίς υποστηρίγματα με τη χρήση ρομποτικού βραχίονα πέντε αξόνων [161], με εκτύπωσή τους στον αέρα [142], μειώνοντας τον όγκο στήριξης [162], αφαιρώντας υποστηρίγματα ως διαλύτες [163,164] αποτελούν μελέτες σχετικά με τις επιδράσεις των στηριγμάτων στα χαρακτηριστικά ποιότητας με την FFF διαδικασία.

Για εφαρμογές τρισδιάστατης εκτύπωσης στην οδοντιατρική, τη βιοϊατρική αλλά και άλλους τομείς η χαμηλή ποιότητα επιφάνειας είναι ανεπιθύμητη [165, 166]. Επιπλέον, μοντέλα παραγόμενα με την FFF διαδικασία δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν λόγω του φαινομένου stair-stepping και της υγρασίας αλλά και άλλων ηλεκτρολυτών που μπορούν να διεισδύσουν στο εσωτερικό των στρώσεων (εικόνα 3b, 3d). Σε αυτές τις περιπτώσεις εφαρμόζονται μέθοδοι μετεπεξεργασίας (μηχανικές ή χημικές) για βελτίωση της ποιότητας της επιφάνειας [167]. Λείανση, στίλβωση, φινίρισμα είναι μερικές από τις μηχανικές μεθόδους για τη βελτίωση της επιφάνειας [164]. Οι χημικές μέθοδοι περιλαμβάνουν θέρμανση και εναπόθεση ατμών, βαφή και ειδική επίστρωση [12]. Η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται από την απόδοση και τις απαιτήσεις του υλικού των εκτυπωμένων τμημάτων. Ο Mali [168], σε μια σχετική έρευνα, βελτιστοποίησε βιώσιμα πολυμερή λειαντικά μέσα

χρησιμοποιώντας φυσικά πρόσθετα (φυτικά έλαια) για τη βελτίωση των μοντέλων με την FFF διαδικασία.

1.4 Επιδράσεις παραμέτρων ελέγχου

Οι παράμετροι ελέγχου επιλέγονται πριν από την προετοιμασία του μοντέλου για εκτύπωση. Ορισμένες παράμετροι μπορούν να αλλάξουν (τύπος υλικού, διάμετρος νήματος, διάμετρος ακροφυσίου κ.α.) ενώ κάποιες άλλες παραμένουν σταθερές (θερμαινόμενη πλατφόρμα, διαστάσεις όγκου κ.α.).

Η πιο σημαντική παράμετρος ελέγχου είναι ο τύπος του υλικού. Στο εμπόριο είναι διαθέσιμοι διάφοροι τύποι υλικών σε μεγάλη ποικιλία χρωμάτων [169]. Τα πιο συνηθισμένα υλικά εκτύπωσης με την FFF διαδικασία είναι το PLA (πολυγαλακτικό οξύ) [55,119,170-173] και το ABS (στυρόλιο βουταδιενίου ακρυλονιτριλίου) [174-182]. Ωστόσο η FFF διαδικασία μπορεί να επιτευχθεί και με το PC (πολυανθρακικό) [183-185], το PETG (τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο γλυκόλης) [191], το PA (πολυαμίδιο) [186,187], το PP (πολυπροπυλένιο) [188,189], το TPU (θερμοπλαστική πολυουρεθάνη) [102,183], το PBT (τερεφθαλικό πολυβουτυλένιο) [190], το PEEK (πολυαιθερικός αιθέρας ακετόνη) [32,118,192,193], το PAEK (πολυαρυλαιθεροκετόνη) [194], το PEI (Πολυθεραιμίδιο) [163], το PVA (πολυβινυλική αλκοόλη) [195,196] και το HIPS (πολυστυρόλιο υψηλής πρόσκρουσης) [197].

Τα PEEK, PEI, PAEK, PC είναι πολυμερή υψηλής απόδοσης και χρειάζονται θερμοκρασία θαλάμου μεγαλύτερη από 30°C. Το PVA και το HIPS χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη των εκτυπωμένων μοντέλων όποτε απαιτεί προϋπόθεση ότι ο εκτυπωτής είναι κατάλληλος για την παραγωγή αυτών των πολυμερών.

Το PLA είναι ένα πολυμερές που χρησιμοποιείται ευρέως από την πλειονότητα των εκτυπωτών FFF. Το εύρος θερμοκρασίας τήξης του είναι μεταξύ των 180°C και 220°C με προτεινόμενη θερμοκρασία πλατφόρμας βάσης μηχανήματος (θερμοκρασία μετάβασης σε υαλώδης κατάσταση) από 50°C έως 70°C [198, 199]. Το PLA είναι ένα φιλικό προς το περιβάλλον υλικό και όχι επιβλαβές για την ανθρώπινη υγεία. Είναι ένα βιοαποικοδομήσιμο υλικό που παράγεται από πηγές καλαμποκιού και ζαχαροκάλαμου και χρησιμοποιείται σε διακοσμητικά αντικείμενα αλλά και χρηστικά κάποιες φορές, σε συσκευασίες, σε απλή χύτευση και σε χύτευση με έγχυση ή περιστροφή [200]. Χαρακτηρίζεται από ικανοποιητικό

συντελεστή κάμψης και επαρκή αντοχή εφελκυσμού [201]. Σε σύγκριση με άλλα πλαστικά που έχουν εκτεθεί σε καταστάσεις αποσύνθεσης, το PLA κομποστοποιείται, διαλύεται γρήγορα και ανακυκλώνεται εύκολα [202]. Δεν υπάρχει ανάγκη θέρμανσης της πλατφόρμας του εκτυπωτή (αν και προτείνεται) για να επιτευχθεί πρόσφυση και για αυτό κυρίως το PLA συνιστάται σε μεγάλο αριθμό εκτυπωτών. Ο Soares [203] ερεύνησε ότι οι θερμοκρασίες υποβάθμισης και μετατροπής σε υαλώδης κατάσταση ποικίλουν ανάλογα με το χρώμα του PLA κάτι που με τη σειρά του επηρεάζει τη θερμοκρασία λειτουργίας κατά την FFF διαδικασία.

Το ABS είναι ένα θερμοπλαστικό υλικό με θερμοκρασία μετάβασης σε υαλώδης κατάσταση περίπου στους 105°C, χωρίς να έχει κανένα πραγματικό σημείο τήξης. Οι μηχανικές του ιδιότητες ποικίλλουν ανάλογα με τη θερμοκρασία (μεταξύ -20°C και 80°C). Η θερμοκρασία του ακροφυσίου προτείνεται να βρίσκεται μεταξύ 220°C και 250°C με θερμοκρασία πλατφόρμας από 80°C έως 100°C [63, 204-206].

Το TPU είναι ακόμη ένα άλλο πολυμερές υλικό που χρησιμοποιείται στην FFF διαδικασία. Κατέχει χαμηλότερη ακαμψία από εκείνη του PLA και του ABS, επομένως παρέχει επαρκή μηχανική ευελιξία. Η ευελιξία επιτρέπει στο TPU ένα μεγάλο φάσμα παραμόρφωσης κυρίως για αισθητήρες που παράγονται με την τρισδιάστατη εκτύπωση και έτσι είναι πολύ χρήσιμο για φορητές ηλεκτρονικές συσκευές που φοριούνται (wearable) [102, 207]. Η θερμοκρασία του ακροφυσίου κατά την εκτύπωση προτείνεται μεταξύ 190°C και 230°C (εξαρτάται από τον κατασκευαστή) με θερμοκρασία πλατφόρμας μεταξύ 60°C και 90°C.

Το PVA είναι ένα βιοσυμβατό συνθετικό πολυμερές που χρησιμοποιείται συχνά για την παραγωγή υποστηριγμάτων. Χρησιμοποιείται ως υλικό υποστήριξης στην FFF διαδικασία λόγω της υδατοδιαλυτότητάς του, της βιοσυμβατότητάς του, της μηχανικής του ευελιξίας αλλά και του χαμηλού κόστους του [195, 196, 208]. Η θερμοκρασία ακροφυσίου κατά την εκτύπωση προτείνεται μεταξύ 190°C και 220°C και η θερμοκρασία πλατφόρμας μεταξύ 45°C και 60°C.

Το PBT είναι ένα θερμοπλαστικό υλικό που χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές (βιομηχανίες ηλεκτρονικών, αυτοκινητοβιομηχανία κ.α.). Έχει καλή αντοχή, χημική και θερμική αντίσταση αλλά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μόνωσης καθώς και καλή αντοχή στο νερό και στα χαρακτηριστικά της επιφάνειας των μοντέλων [190]. Η θερμοκρασία ακροφυσίου κατά την εκτύπωση προτείνεται μεταξύ 230°C και 250°C με θερμοκρασία πλατφόρμας έως τους 60°C.

Το PP χρησιμοποιείται σε διάφορους τομείς εφαρμογής όπως ο ιατρικός, η αυτοκινητοβιομηχανία και η κλωστοϋφαντουργία. Έχει χαμηλή πυκνότητα, υψηλή αντοχή σε

οξέα και έλαια και είναι μη τοξικό [189]. Η θερμοκρασία ακροφυσίου προτείνεται μεταξύ 230°C και 250°C με θερμοκρασία πλατφόρμας μεταξύ 90°C και 100°C.

Το NYLON ή PA είναι ένα βιοσυμβατό πολυμερές με καλή αντοχή και αρκετά ικανοποιητικά μηχανικά χαρακτηριστικά. Χρησιμοποιείται σε αυτοκινητοβιομηχανίες και ιατρικές εφαρμογές [187]. Το κύριο μειονέκτημα είναι ότι απορροφά υγρασία, με αποτέλεσμα τη μειωμένη ανθεκτικότητα και την ακαμψία [209]. Η θερμοκρασία ακροφυσίου προτείνεται μεταξύ 220°C και 270°C με θερμοκρασία πλατφόρμας μεταξύ 75°C και 90°C.

Το PETG αποτελεί ένα σημαντικό υλικό στην τρισδιάστατη εκτύπωση κατά την FFF διαδικασία λόγω των ιδιοτήτων του όπως υψηλής αντοχής σε χημικές επιδράσεις, χαμηλή απορρόφηση υγρασίας, ανθεκτικότητα και αντοχή σε καιρικές συνθήκες όπου το καθιστούν αρκετά ευέλικτο [101, 210]. Είναι ένα εξαιρετικά σκληρό υλικό τρισδιάστατης εκτύπωσης και αποτελεί μια ιδανική εναλλακτική λύση για το PLA και το ABS [191]. Συνιστάται σε θερμοκρασίες ακροφυσίου μεταξύ 230°C και 250°C με θερμοκρασία πλατφόρμας μεταξύ 60°C και 80°C.

Το HIPS είναι ένα πολυμερές που έχει πολύ καλή κατεργασιμότητα. Χρησιμοποιείται για υποστηρικτικές εφαρμογές όταν υπάρχουν κριτήρια χαμηλού κόστους, χαμηλής αντοχής σε κρούση και μηχανική ικανότητα. Είναι ιδανικό για την παραγωγή πρωτοτύπων λόγω της κατάλληλης διαστατικής σταθερότητάς του και της εύκολης μετεπεξεργασίας (βαφή, κόλληση κ.α.) [197,211]. Η θερμοκρασία του ακροφυσίου κατά την εκτύπωση προτείνεται μεταξύ 220°C και 250°C και η θερμοκρασία πλατφόρμας μεταξύ 80°C και 110°C.

Το PEEK χαρακτηρίζεται από αντοχή σε περιβαλλοντικές συνθήκες και σε εκτεταμένες θερμοκρασίες (είναι βιοσυμβατό). Ο McLaughlin [192] ανέφερε ότι η επιθυμητή χημική σταθερότητα αλλά και η δυνατότητα επεξεργασίας του, το επιτρέπουν για εφαρμογές στο διάστημα ώστε να μειωθεί η ανάγκη για πρώτες ύλες [118]. Η τελική αντοχή εφελκυσμού του είναι περίπου διπλάσια από αυτή του ABS [110]. Χρησιμοποιείται κυρίως στο χώρο των ηλεκτρονικών συσκευών, των αυτοκινήτων, των μηχανικών και ιατρικών ανταλλακτικών. Η θερμοκρασία του ακροφυσίου κατά την εκτύπωση προτείνεται μεταξύ 350°C και 400°C με θερμοκρασία πλατφόρμας μεταξύ 110°C και 120°C και θερμοκρασία θαλάμου μεταξύ 70-90°C.

Το PC διαθέτει αρκετά καλές θερμικές και φυσικές ιδιότητες [212]. Χρησιμοποιείται στην ιατρική, στην αεροδιαστημική και στην αυτοκινητοβιομηχανία. Οι τυπικοί εκτυπωτές FFF χρησιμοποιούν θερμοκρασία ακροφυσίου μεταξύ 250°C και 310°C με θερμοκρασία πλατφόρμας μεταξύ 110°C και 130°C και θερμοκρασία θαλάμου μεταξύ 70-90°C.

Το PEI είναι ένα ημιδιαφανές υψηλής αντοχής πολυμερές. Είναι λειτουργικό σε περιβάλλον με υψηλές θερμοκρασίες, αντέχει σε ζεστό νερό αλλά και στον ατμό και έχει

εξαιρετικές ηλεκτρικές ιδιότητες με υψηλή διηλεκτρική δύναμη [213]. Η θερμοκρασία του ακροφυσίου κατά την εκτύπωση προτείνεται μεταξύ 360°C και 380°C με θερμοκρασία πλατφόρμας μεταξύ 140°C και 160°C και θερμοκρασία θαλάμου μεταξύ 70-90°C.

Το PAEK είναι ένα ημικρυσταλλικό πολυμερές με εξαιρετικά αρωματική μοριακή δομή, ενισχυμένο με δεσμούς αιθέρα και ακετόνης και διαθέτει μοναδικές φυσικές ιδιότητες [56]. Η θερμοκρασία του ακροφυσίου κατά την εκτύπωση προτείνεται μεταξύ 380°C και 400°C με θερμοκρασία πλατφόρμας μεταξύ 140°C και 160°C και θερμοκρασία θαλάμου μεταξύ 90-110°C.

Επιπλέον, παράγονται συνεχώς και νέα νήματα πρώτης ύλης για χρήση παιχνιδιών και παρόμοιων βιομηχανιών, αλλά και πολλά υλικά όπως βιοδιασπώμενα συνθετικά PLA και αντιμικροβιακά ABS που προτείνονται για καλούπια έγχυσης κατάλληλα για μικρή παραγωγή ή για εξατομικευμένα εργαλεία σε νοσοκομεία [137,209,214-216]. Στην παρούσα έρευνα δεν αναφέρονται νήματα μετάλλου (ρινίσματα σε ανάμειξη με πολυμερή) αλλά και συνθετικά, έξυπνα ή βιοσύνθετα υλικά [217-220].

Οι θερμοκρασίες ακροφυσίου, πλατφόρμας και θαλάμου όλων των υλικών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 1). Νήματα με ρινίσματα μετάλλου αλλά και έξυπνα, συνθετικά υλικά ή νέα βιοσύνθετα υλικά δεν αναφέρονται.

Conventional 3D Printing Polymers			
Polymeric matrix	Extruder Melting point	Bed Temperature	Chamber Temperature
PLA	180-220 °C	Non required	Non required
ABS	220-250 °C	80-100 °C	Non required
TPU	195-230 °C	60-90 °C	Non required
PVA	195-200 °C	45-60 °C	Non required
HIPS	220-250 °C	80-110 °C	Non required
PBT	230-250 °C	up to 60 °C	Non required
PP	230-250 °C	90-100 °C	Non required
PA	220-270 °C	75-90 °C	Non required
PET - G	230-250 °C	60-80 °C	Non required
High Performance 3D Printing Polymer			
Polymeric matrix	Extruder Melting point	Bed Temperature	Chamber Temperature
PEEK	410-430 °C	140-160 °C	70-90 °C
PEI (ULTEM)	360-380 °C	140-160 °C	70-90 °C
PAEK	380-400 °C	140-160 °C	90-110 °C
PC	250-310 °C	110-130 °C	30-70 °C

Πίνακας 1. Προτεινόμενες θερμοκρασίες ακροφυσίου, πλατφόρμας και θαλάμου για τυπικά συμβατικά αλλά και υψηλής απόδοσης πολυμερή που χρησιμοποιούνται στην FFF διαδικασία.

Όλα τα υλικά εκτός από το PLA απαιτούν θέρμανση για να κολλήσουν στην πλατφόρμα του εκτυπωτή (υπάρχουν και απλά μηχανήματα χαμηλού κόστους χωρίς θερμαινόμενη πλατφόρμα). Η θερμαινόμενη βάση είναι κατασκευασμένη από αλουμίνιο ή γυαλί ενώ προτείνονται μέσα από έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί και διαφορετικά υλικά πιο σύνθετα για την παραγωγή της όπως το πολυανθρακικό αργίλιο [122]. Όταν χρησιμοποιείται μη θερμαινόμενη πλατφόρμα μια συνηθισμένη πρακτική είναι η τοποθέτηση κόλλας ή άλλης χημικής ουσίας ώστε να επιτευχθεί σωστά η πρώτη στρώση εκτύπωσης. Ωστόσο, αυτό μπορεί να επηρεάσει τη διαστατική ακρίβεια του μοντέλου εκτύπωσης και αποτελεί κύρια αιτία μπλοκαρίσματος του ακροφυσίου, το οποίο με τη σειρά του οδηγεί σε μια αποτυχημένη εκτύπωση όπου μπορεί να φτάσει μέχρι και την αντικατάσταση ορισμένων εξαρτημάτων από την κεφαλή του μηχανήματος. Τέλος, τα υλικά PEEK, PEI και PAEK χρειάζονται θερμοκρασία θαλάμου μεταξύ 30°C και 110°C.

Εκτός από τον τύπο υλικού, η διάμετρος του ακροφυσίου είναι ένας άλλος σημαντικός παράγοντας ελέγχου. Το ακροφύσιο είναι ένα μέρος του εκτυπωτή όπου εξωθεί

το θερμαινόμενο συντηγμένο υλικό. Η διάμετρος του ακροφυσίου επηρεάζει την πίεση που δέχεται η πρώτη ύλη όταν είναι σε υγροποιημένη μορφή, όπου με τη σειρά του επηρεάζει τη συνοχή του πλάτους και έτσι την ποιότητα της επιφάνειας των μοντέλων που παράγονται [154,221]. Οι διάμετροι ακροφυσίων γενικά ποικίλουν μεταξύ των 0.1 mm και 1 mm. Αυτό το εύρος παρέχει στο χρήστη υψηλό επίπεδο ευελιξίας για την επίτευξη ποιοτικών αποτελεσμάτων τόσο σε διαστατική ακρίβεια όσο και σε τραχύτητα επιφάνειας.

Οι πιο δημοφιλείς διάμετροι ακροφυσίων στην FFF διαδικασία είναι εκείνες των 0.4 mm και 0.25 mm. Ο Han [222,223] σχεδίασε και προσομοίωσε ένα ακροφύσιο τρισδιάστατου εκτυπωτή που χρησιμοποιήθηκε για μίξη χρωμάτων. Χρησιμοποίησε κατάλληλα λογισμικά (UG/NX και ICEM CFD) και μελέτησε την επίδραση διαφορετικών θερμοκρασιών και πιέσεων. Ο Reiner [224] παρήγαγε πρωτότυπα χρησιμοποιώντας δυο έγχρωμες κεφαλές εκτυπωτών χαμηλού κόστους. Ο Balani [222] καθόρισε τη μέγιστη ταχύτητα του νήματος σύμφωνα με διάφορες παραμέτρους της διαδικασίας και μελέτησε τη συμπεριφορά ροής μέσω του ακροφυσίου του PLA χρησιμοποιώντας προσομοιώσεις. Τα αποτελέσματα έδειξαν μια διακύμανση του ρυθμού διάτμησης σχετικά με τη διάμετρο του ακροφυσίου και την ταχύτητα εισόδου. Ο Ali [225] πρότεινε ένα μηχανισμό εξώθησης προς το ακροφύσιο με πέντε διαφορετικά χρώματα και υλικά. Ο Khali [226] παρείχε πληροφορίες σχετικά με την εναπόθεση βιοπολυμερών χρησιμοποιώντας διαφορετικά σχέδια ακροφυσίων και διερεύνησε τις σχέσεις των μεταβλητών της διαδικασίας με το ρυθμό ροής της απόθεσης και τη δομική διαμόρφωση του ικριώματος.

Η τρίτη και κρίσιμη παράμετρος για την ακεραιότητα των εκτυπωμένων μοντέλων είναι ο όγκος κατασκευής. Εάν το μοντέλο είναι μεγαλύτερο από τον όγκο κατασκευής του μηχανήματος συνιστάται να εκτυπώνεται σε ξεχωριστά μέρη όπου στη συνέχεια ενώνονται από το χρήστη με διάφορους τρόπους (κόλλα, βίδες κ.α.). Υπάρχουν διάφορα μεγέθη κατασκευής στους εκτυπωτές FFF. Μια μικρή περιοχή εκτύπωσης των 10 λίτρων ή και λιγότερο είναι συνήθως ένα μηχάνημα που χρησιμοποιείται από αρχάριους ή για εκπαιδευτικούς σκοπούς ή για εφαρμογές χωρίς την ανάγκη για παραγωγή μεγάλων αντικειμένων [227]. Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει πολλούς χαμηλού κόστους εκτυπωτές όπου όλοι μπορούν να κατανοήσουν ή να διδαχθούν για την FFF διαδικασία χωρίς να τους ενδιαφέρει ιδιαίτερα η ποιότητα.

Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν αρκετά μεγάλοι εκτυπωτές FFF με όγκο κατασκευής περίπου το ένα κυβικό μέτρο. Τα μηχανήματα αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούνται για επαγγελματικούς σκοπούς όταν πρόκειται να εκτυπωθούν μεγάλα μοντέλα ώστε να αποφευχθεί η συναρμολόγηση [228]. Ωστόσο, η πιο συνηθισμένη περιοχή εκτύπωσης είναι περίπου αυτή που καταλαμβάνει περίπου όγκο μεταξύ των 20 και 30 λίτρων. Σε αυτήν την

κατηγορία ανήκουν πολλοί εκτυπωτές FFF που προσφέρονται από διάφορες εταιρίες σε όλο τον κόσμο. Η ποιότητα της εκτύπωσης σε αυτά τα μηχανήματα είναι αρκετά ικανοποιητική ώστε να παραχθεί ένα αντικείμενο έστω και από το σπίτι. Τέλος, υπάρχουν και οι μεγάλης κλίμακας εκτυπωτές για κατασκευές και αρχιτεκτονικές εφαρμογές που έχουν αναπτυχθεί με βάση το μηχανισμό εναπόθεσης που χρησιμοποιεί ρομποτικούς βραχίονες ως μηχανισμό τοποθέτησης και κίνησης της κεφαλής [229].

1.5 Επιδράσεις των παραμέτρων θορύβου

Οι επιδράσεις των παραμέτρων θορύβου συνήθως εξαρτώνται από το σχεδιασμό πλαισίου του τρισδιάστατου εκτυπωτή και από τα ηλεκτρικά και μηχανικά μέρη που αποτελείται.

Το πλαίσιο ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή αποτελεί ένα σημαντικό δομικό μέρος, καθώς υποστηρίζει όλα τα μηχανικά και ηλεκτρικά μέρη. Προσδιορίζει τον τελικό όγκο του αντικειμένου κατασκευής και συμβάλλει στη σταθερότητα αλλά και στην αισθητική του μηχανήματος. Η επιλογή ενός πλαισίου επηρεάζει το κόστος, την ευκολία συναρμολόγησης (εάν το μηχάνημα είναι αποσυναρμολογημένο), τη δύναμη, την αντοχή. Μέταλλο, κόντρα πλακέ, ακρυλικό ή πλαστικό είναι τα υλικά που κυριαρχούν στην κατασκευή του πλαισίου όπου κατεργάζονται με CNC ή με κοπή laser για την τελική χρήση.

Ο Zhang [230], σε μια σχετική έρευνα, μελέτησε τα χαρακτηριστικά της δόνησης από τρισδιάστατο εκτυπωτή FFF χρησιμοποιώντας τη θεωρία της μηχανικής και προσομοιώσεις από ειδικό λογισμικό (ANSYS). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το βέλτιστο αποτέλεσμα μπορεί να αποδώσει ικανοποιητικά χαρακτηριστικά συντονισμού του μηχανήματος και μείωση της συνολικής μετατόπισης. Ο Rao [231] κατέγραψε τρόπους αποτυχίας και ανωμαλιών κατά τη διαδικασία FFF. Διαπίστωσε ότι χρησιμοποιώντας έναν αισθητήρα ανίχνευσης σφαλμάτων που βασίζονται σε δεδομένα, διευκολύνεται ο εντοπισμός τους και η διόρθωση της FFF διαδικασίας σε πραγματικό χρόνο.

Ο ιμάντας κίνησης, που εφαρμόζεται στις κινούμενες μονάδες, εξασφαλίζει μια ακριβή τοποθέτηση που επηρεάζει την ποιότητα της εκτύπωσης. Είναι απαραίτητο να διατηρείται ο ιμάντας σε επαρκή τάση για να υπάρχει ακριβής καθοδήγηση. Έτσι, ο χρήστης πρέπει να τεντώνει τη ζώνη με τον ευκολότερο τρόπο για να επιτευχθεί το καλύτερο αποτέλεσμα. Οι κινητήρες των εκτυπωτών είναι σχετικά απλοί μηχανισμοί. Κατά την εκτύπωση, μια σειρά από ηλεκτρομαγνητικά πηνία ενεργοποιούνται για να περιστραφούν οι άξονες των κινητήρων για την επίτευξη συγκεκριμένων βαθμών ελευθερίας. Ο Shen [232] ανέπτυξε ένα δυναμικό μοντέλο για τον ιμάντα μεταφοράς σε ένα εκτυπωτή FFF, ένα στοιχείο που είναι ιδιαίτερα απαραίτητο για τη συνολική κίνηση και λειτουργία του μηχανήματος και κατά συνέπεια για όλη την κατασκευαστική διαδικασία.

Οι ανεμιστήρες βελτιώνουν την ποιότητα εκτύπωσης σε στρώσεις που δεν είναι συνδεδεμένες σωστά. Η ταχύτητα περιστροφής του ανεμιστήρα μπορεί να οριστεί μέσω του λογισμικού του μηχανήματος. Υπάρχουν πέντε περιοχές συνήθως όπου χρησιμοποιείται ένας ανεμιστήρας στην FFF διαδικασία :

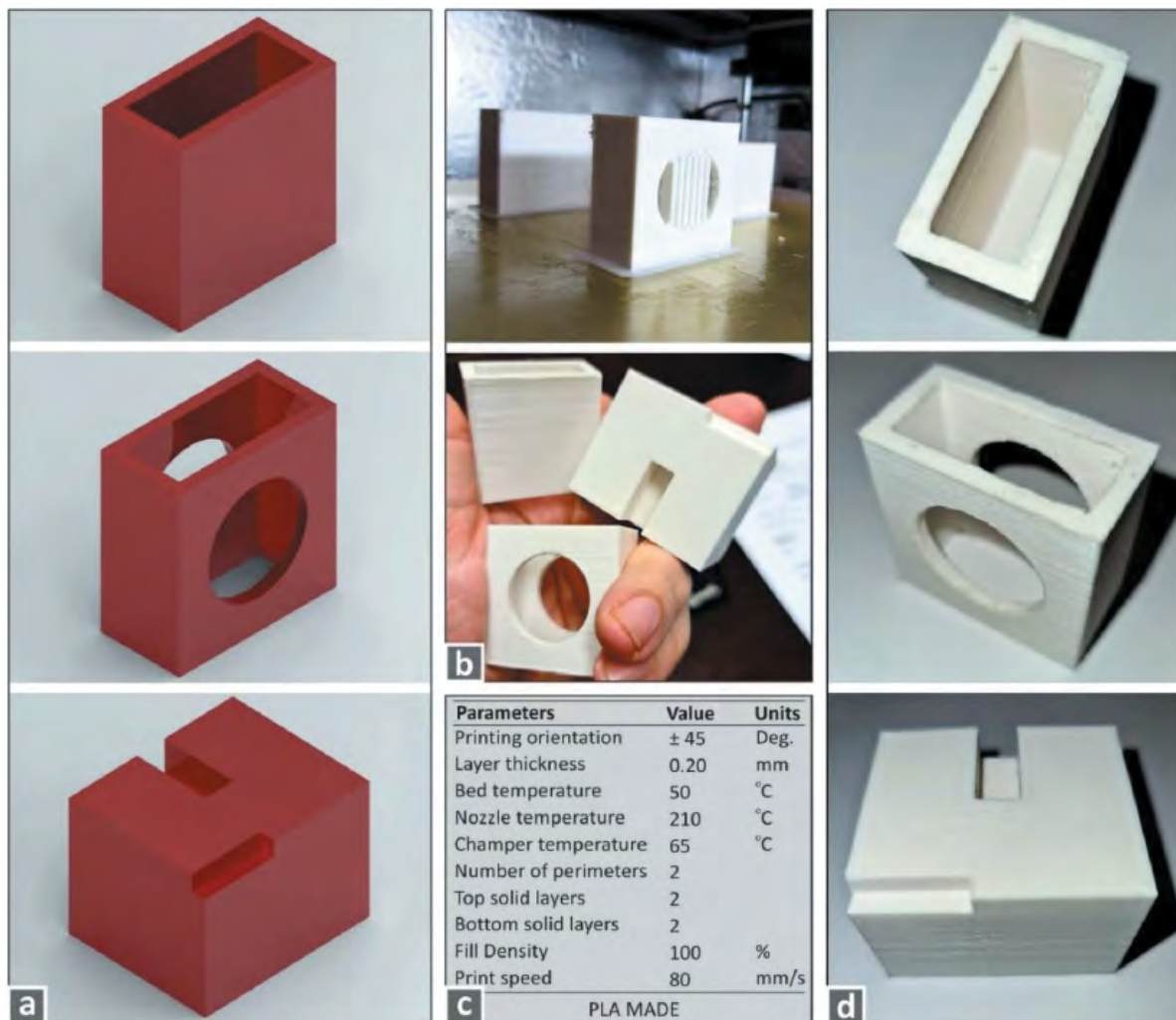
- i) Στον πίνακα ελέγχου, όπου οι ανεμιστήρες χρησιμοποιούνται για την ψύξη των κύριων κυκλωμάτων του εκτυπωτή, όπως ο επεξεργαστής και οι κινητήρες.
- ii) Στην κεφαλή, όπου οι ανεμιστήρες χρησιμοποιούνται για να διατηρηθεί μια χαμηλή θερμοκρασία κατά την εκτύπωση και την αποφυγή υπερθέρμανσης.
- iii) Στο μοντέλο που εκτυπώνεται, όπου ο αέρας ψύχει το πλαστικό που εξωθείται από την κεφαλή και στερεοποιείται.
- iv) Στην τροφοδοσία, όπου οι ανεμιστήρες προστατεύουν τους μετασχηματιστές υψηλής ισχύος από υπερθέρμανση.
- v) Στους κινητήρες, όπου μπορούν να έχουν έναν ανεμιστήρα για τη διατήρηση του βέλτιστου της θερμοκρασίας λειτουργίας.

Συνήθως, οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές χαμηλού κόστους είναι κατασκευασμένοι με ανοιχτό πλαίσιο δίχως εξαερισμό ή άλλες συσκευές εξαγωγής καπνού, σε αντίθεση με ακριβούς και πιο εμπορικούς εκτυπωτές που συνοδεύονται από ένα περίβλημα αλλά και συστήματα εξαέρωσης. Οι χρήστες σε μεγάλο ποσοστό, κατά την FFF διαδικασία, δεν έχουν αναπνευστική προστασία και ο εξαερισμός είναι ανεπαρκής έτσι ώστε να αναπνέουν τοξικό αέρα ειδικά αν εκτυπώνουν με υλικά όπως το ABS [233].

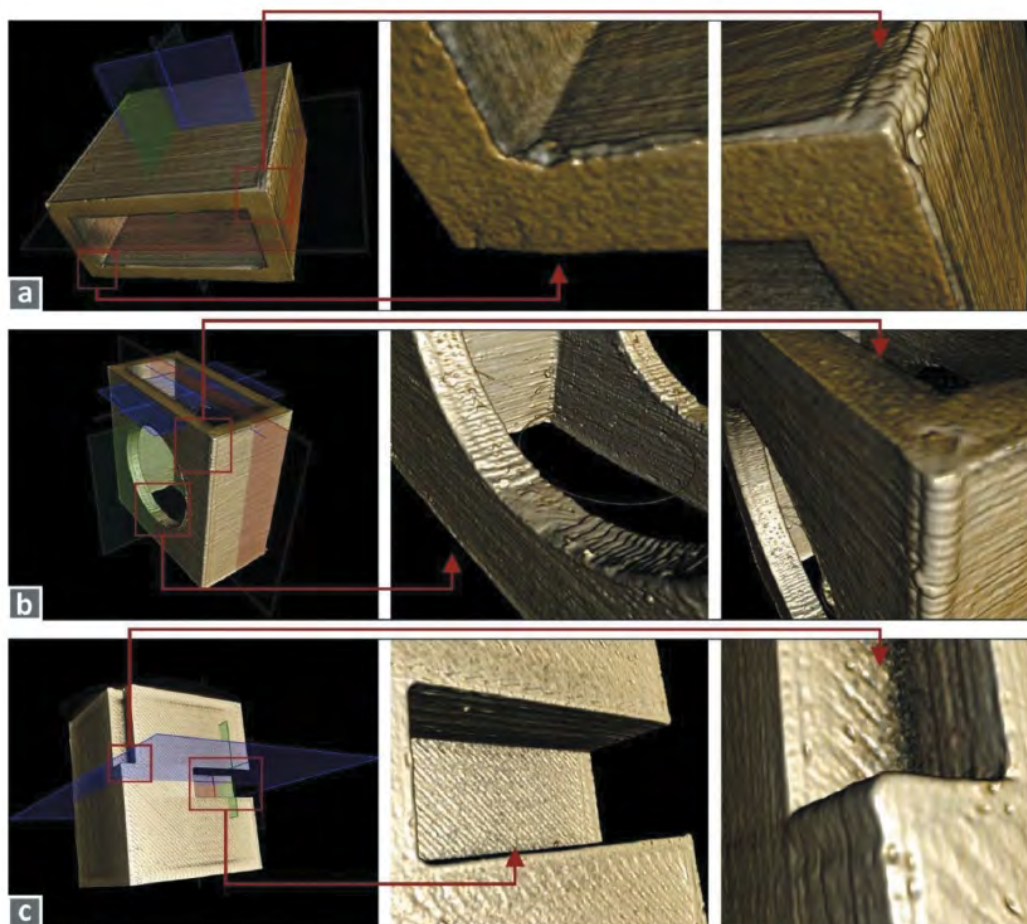
Η επίδραση των παραμέτρων διεργασίας σήματος, ελέγχου και θορύβου στις μετρήσεις ποιότητας (τραχύτητα, διαστατική ακρίβεια) του μοντέλου που κατασκευάζεται με την FFF διαδικασία συνοψίζεται στο διάγραμμα ροής που παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 4) :

1.6 Συμπεράσματα

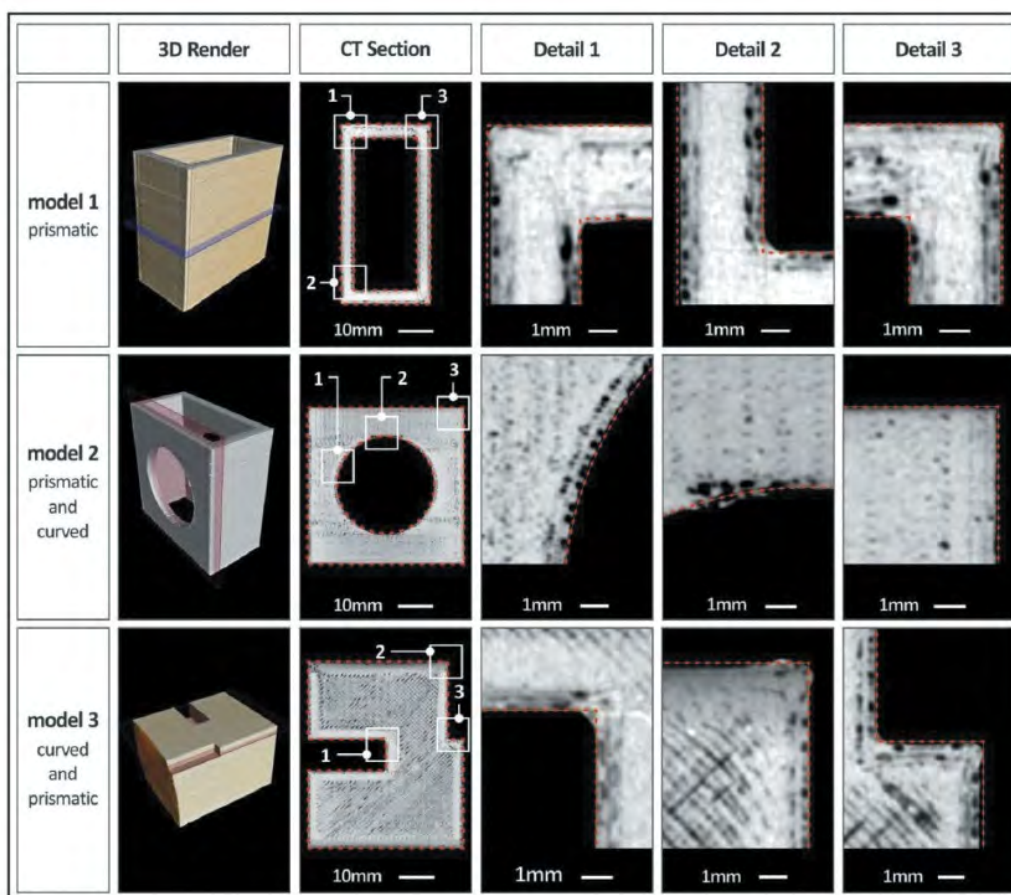
Τα βήματα της διαδικασίας FFF από PLA δοκίμια παρουσιάζονται στην εικόνα 5. Αρχικά, ο χρήστης προετοιμάζει τα μοντέλα σε ένα πρόγραμμα CAD, επιλέγει τις παραμέτρους της διαδικασίας και τέλος εκτυπώνει τα μοντέλα με διαφορετικά αποτελέσματα ποιότητας επιφάνειας, διαστατικής ακρίβειας και άλλων ποιοτικών λεπτομερειών του σχήματος [148,153,234,235].



Εικόνα 5. Δοκίμια από PLA κατασκευασμένα με την FFF διαδικασία : **a)** μοντέλα CAD **b)** διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης δοκιμών για έλεγχο ποιότητας και διαστατικής ακρίβειας **c)** οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν **d)** λεπτομέρειες που προέκυψαν



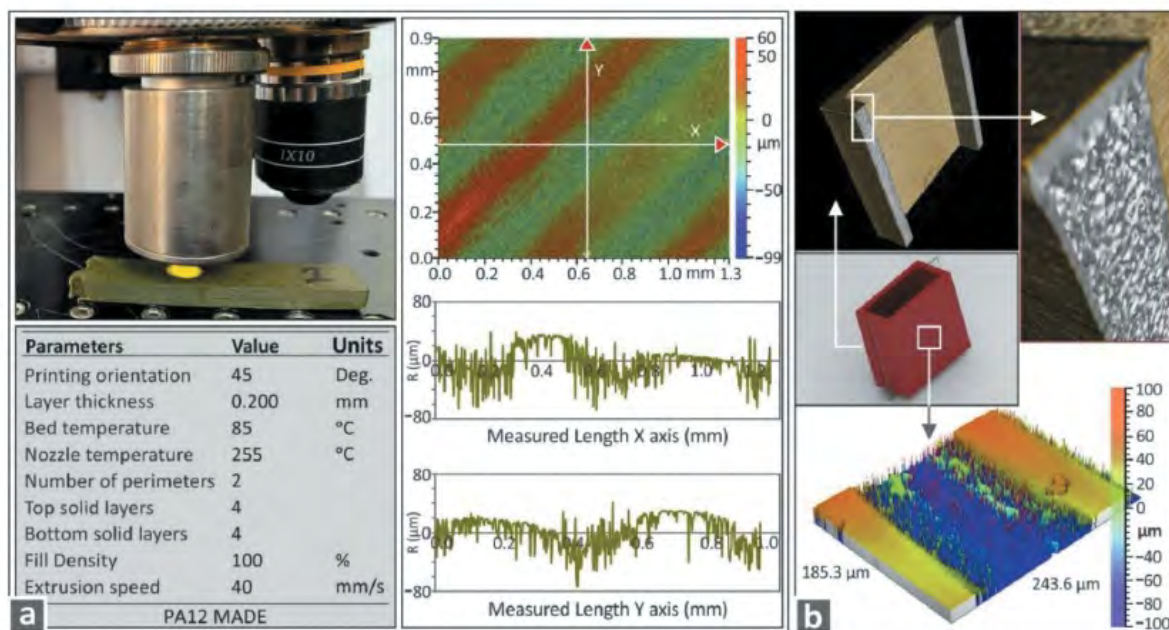
Εικόνα 6. Επιδράσεις των παραμέτρων διεργασίας στην επιφάνεια των κατασκευασμένων εξαρτημάτων (a, b και c), όπως προέκυψαν από αξονικές τομογραφίες.



Εικόνα 7. Σύγκριση μεταξύ των ονομαστικών σχημάτων (μοντέλο CAD) και των πραγματικών των τυπωμένων εξαρτημάτων FFF, όπως τεκμηριώνεται με τομογραφία (CT). Τμήματα και μεγεθύνσεις πλήρους αξονικής σάρωσης ιδιαίτερου ενδιαφέροντος, όπως άκρες, καμπύλες και λεπτομέρειες σχισμής. Τα εσωτερικά κενά των 3d τμημάτων είναι σαφώς εμφανή.

Η διαστατική ακρίβεια αναφέρεται στην ομοιότητα των πραγματικών διαστάσεων των εκτυπωμένων μοντέλων σε σχέση με τις ονομαστικές διαστάσεις όπου σχεδιάζονται τα μοντέλα αυτά σε CAD λογισμικά. Στις εικόνες 6 και 7 παρουσιάζονται οι διαφορές μεταξύ μοντέλων από CAD προγράμματα και σαρωμένων μοντέλων από αξονική τομογραφία. Επιπλέον, διακρίνονται οι διαφορές στις λεπτομέρειες των σχημάτων (ακμές, κυκλικότητες, εσοχές).

Στην εικόνα 8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραμέτρων κατά την διαδικασία FFF σε μια επιφάνεια μοντέλου με υλικά το PLA και το PA12. Ο τρόπος πλέξης της διαδικασίας αυτής επηρεάζει την υφή της επιφάνειας με διαφορετικούς τρόπους στην κορυφή, στη βάση και σε κεκλιμένες επιφάνειες του μοντέλου. Το εύρος του μέσου όρου τραχύτητας (Ra) ήταν μεταξύ 10-30 μm ανάλογα με το υλικό [164,191].



Εικόνα 8. Ποσοτικός προσδιορισμός της τραχύτητας της επιφάνειας μέσω οπτικής προφίλομετρίας (α) η τρισδιάστατη εκτύπωση του PA12 στη συσκευή μέτρησης, συνθήκες εκτύπωσης και η τεκμηρίωση προφίλ επιφάνειας. (β) το μοντέλο του τρισδιάστατου τμήματος από PLA, τα τμήματα σάρωσης CT που υποδεικνύουν τη δομή πλήρωσης και η οπτική σάρωση στην επιφάνεια του ίδιου δείγματος.

Ερευνητές έχουν ήδη εφαρμόσει διάφορες υπολογιστικές τεχνικές όπως πειράματα, τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, αλγορίθμους βελτιστοποίησης ώστε να πετύχουν τις κατάλληλες ρυθμίσεις παραμέτρων για καλύτερη ποιότητα στην επιφάνεια των μοντέλων αλλά και διαστατική ακρίβεια κατά την FFF διαδικασία [39, 131, 236-238, 239-243]. Ως εκ τούτου, εφαρμόστηκαν σχεδιασμοί πειραμάτων (πλήρεις ή κλασματικοί) που σχετίζονται με την παλινδρόμηση ή με άλλα υπολογιστικά μοντέλα. Δυστυχώς, οι περισσότερες διεργασίες εφαρμόζονται σε περιορισμένο αριθμό πειραμάτων (ή με μικρό αριθμό παραμέτρων) και τα αποτελέσματα δεν μπορούν να αναφέρονται γενικευμένα για όλα τα υλικά αλλά και τους εκτυπωτές της FFF μεθόδου. Έτσι αποτελεί ιδιαίτερη πρόκληση η περαιτέρω έρευνα για τη διερεύνηση των παραμέτρων που επηρεάζουν την ποιότητα των μοντέλων που παράγονται με αυτά τα μηχανήματα χαμηλού κόστους.

Έχουν επιτευχθεί διάφορες μελέτες σχετικά με τη διαστατική ακρίβεια αλλά και την ποιότητα της επιφάνειας μοντέλων που παράγονται από την προσθετική διαδικασία FFF. Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα που απορρέουν είναι ότι οι παράμετροι όπως ο τύπος υλικού, η θερμοκρασία του ακροφυσίου, το πάχος στρώσης και ο τρόπος χτισίματος επηρεάζουν περισσότερο την τελική ποιότητα των εκτυπωμένων δοκιμίων.

Πολλές μέθοδοι δημιουργίας πρωτοτύπων δημοσιεύτηκαν πριν αρκετά χρόνια με σκοπό να χαρακτηρίσουν τη διαστατική ακρίβεια των παραγόμενων δοκιμίων [244, 247]. Ο Wang [245] έδειξε ότι η πολυπαραμετρική και η πολύ-ποιοτική βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών θα μπορούσε να επιτευχθεί με την ενσωμάτωση της μεθοδολογίας Grey – Taguchi. Μελέτησε την επίδραση έξι μεταβλητών (πάχος στρώσης, προσανατολισμός σε X-Z άξονες, μορφή υποστηρίγματος και τοποθεσία της κατασκευής) στην επιφανειακή ποιότητα, στη διαστατική ακρίβεια και στην ανθεκτικότητα κατά τη διαδικασία FFF. Τόνισε τη σημασία του προσανατολισμού του μοντέλου που έχει στη διαστατική ακρίβεια και του πάχους στρώσης στην ποιότητα της επιφάνειας.

Γενικά, η διαδικασία FFF παρουσιάζει το μειονέκτημα της μεγάλης ακρίβειας [250]. Μια μεθοδολογία σχεδιασμού για τη βελτίωση της διαστατικής ακρίβειας έχει προταθεί και από τους Boschetto και Bottini. Μοντελοποίησαν τις διαστατικές αποκλίσεις ως συνάρτηση του πάχους στρώσης και της γωνίας προσανατολισμού. Στη συνέχεια επανασχεδίασαν τα μοντέλα γνωρίζοντας τις αποκλίσεις των διαστάσεων και έτσι πέτυχαν καλύτερη διαστατική ακρίβεια. Επίσης, πειραματίστηκαν [240] με τον προσανατολισμό του μοντέλου από υλικό ABS για τη μοντελοποίηση της ποιότητας της επιφάνειας (R_a , R_t , R_{ku}) χρησιμοποιώντας νευρωνικά δίκτυα.

Δεδομένου ότι η διαστατική ακρίβεια και η ποιότητα της επιφάνειας αποτελούν ζητήματα που μπορούν να δεχθούν βελτιστοποίηση, πολλοί ερευνητές εφάρμοσαν υπολογιστικές τεχνικές για την επίλυσή τους. Ο Noriega [246] ανέπτυξε ένα μοντέλο πρόβλεψης διαστατικής ακρίβειας, για δοκίμια από ABS που κατασκευάζονται με την FFF μέθοδο, με βάση τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούν τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και αλγόριθμους βελτιστοποίησης. Αν και είχαν προκύψει βελτιώσεις στη διαστατική ακρίβεια των μοντέλων δεν υπήρξε επαλήθευση με άλλα υλικά ή σχέδια.

Οι Durgun και Ertan [120] διαπίστωσαν ότι ο προσανατολισμός του μοντέλου είναι πιο σημαντικός από τη γωνία απόθεσης για την επιφανειακή ποιότητα αλλά και την ανθεκτικότητα των εκτυπωμένων μερών και ότι γενικότερα υπάρχει στενή σχέση μεταξύ τραχύτητας και ανθεκτικότητας. Ένα μοντέλο ποσοτικής και ποιοτικής αξιολόγησης κατασκευάστηκε από τον Johnson [247] χρησιμοποιώντας δυο εκτυπωτές. Διαπιστώθηκε ότι ο εκτυπωτής ανοικτού κώδικα κατασκεύαζε περισσότερες λεπτομέρειες και ήταν ποιοτικά πιο αποδεκτός.

Διαφορετικά υλικά αποδίδουν διαφορετική διαστατική ακρίβεια αλλά και ποιότητα επιφάνειας. Οι Moza [248] και Akbas [260] συμπέραναν με βάση πειράματα που πραγματοποίησαν ότι η μέση ακρίβεια δειγμάτων από PLA ήταν καλύτερη από αυτή από ABS. Οι Decker και Yee [57] πρότειναν ένα απλοποιημένο μοντέλο για την αξιολόγηση της

διαστατικής ακρίβειας κατά την FFF διαδικασία και το συγκρίναν με δυο διαφορετικές μεθόδους αξιολόγησης. Ο Melenka [128] παρουσίασε ότι διαφορετικά δοκίμια από PLA που παράγονται με την FFF μέθοδο είχαν σημαντικές παραλλαγές στη διαστατική τους ακρίβεια και ότι η πυκνότητα πλήρωσης επηρεάζει σημαντικά τη μηχανική τους απόκριση.

Ο Kitsakis [249] διερεύνησε την πιθανή αξιοποίηση των εκτυπωτών χαμηλού κόστους για εφαρμογές στην ιατρική σε θέματα που αφορούν τη διαστατική ακρίβεια και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι είναι εφικτή η χρήση δοκιμίων που παράγονται με την FFF μέθοδο μετά από παραμετρική βελτιστοποίηση.

Ένας άλλος κρίσιμος παράγοντας για τη διαστατική ακρίβεια είναι η θερμοκρασία της πλατφόρμας (βάσης). Ο Choi [251] μελέτησε τις επιπτώσεις της συρρίκνωσης δοκιμίων από ABS και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι όσο υψηλότερη θερμοκρασία υπάρχει στην πλατφόρμα (εντός επιτρεπτών ορίων από τον κατασκευαστή) τόσο χαμηλότερα είναι τα σφάλματα και οι παραμορφώσεις της γεωμετρίας.

Ο Polak [252] διερεύνησε την ακρίβεια των διαστάσεων από PLA δοκίμια αλλάζοντας τις τιμές του πάχους στρώσης, της θερμοκρασίας ακροφυσίου και της ταχύτητας εκτύπωσης. Διαπίστωσε, ύστερα από στατιστική ανάλυση, ότι η θερμοκρασία ακροφυσίου και το πάχος στρώσης επηρεάζουν κυρίως τη διαστατική ακρίβεια και ότι χαμηλότερες τιμές θερμοκρασίας κεφαλής και πάχους στρώσης οδηγούν σε καλύτερες τιμές των διαστάσεων.

Μια άλλη μεθοδολογία απόκρισης εφαρμόστηκε από τον Mohamed [253] για τη διερεύνηση της αλλαγής της διαστατικής ακρίβειας και των μηχανικών ιδιοτήτων κατά την αλλαγή των τιμών των μεταβλητών. Το πάχος στρώσης, η πυκνότητα γεμίσματος και το πάχος του κελύφους είχαν τη μεγαλύτερη επίδραση στη δυναμική ακαμψία και στη διαστατική ακρίβεια.

Ο Equbal [254] διερεύνησε το κενό αέρος (air gap), τη γωνία εναπόθεσης και το πλάτος raster στη διαστατική ακρίβεια μοντέλου παραγόμενου με την FFF διαδικασία. Κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ο πιο σημαντικός παράγοντας είναι η γωνία εναπόθεσης.

Ο Messimer [122] διαπίστωσε ότι αυστηρές ανοχές εμφανίζονται σε δοκίμια με καλύτερη διαστατική ακρίβεια. Ερεύνησε την καταλληλότητα θερμαινόμενης πλατφόρμας από πολυανθρακικό αλουμίνιο έναντι πλακών καθαρού γυαλιού ή αλουμινίου. Διαπίστωσε ότι η πλατφόρμα πολυανθρακικού βελτιώνει τη συμπεριφορά παραμόρφωσης δοκιμίων (PLA, PA, TPU, ABS, PET, HIPS, PC, PVA) που παράγονται με την FFF διαδικασία.

Ο Alsoufi [255] ανέφερε ότι το πάχος στρώσης και η διάμετρος του ακροφυσίου είναι σημαντικές παράμετροι για την ποιότητα της επιφάνειας, το χρόνο και το κόστος της κατασκευής. Η ποιότητα της επιφάνειας δεν άλλαζε και παρέμενε σχετικά σταθερή ακολουθώντας μια τάση για μικρές αλλαγές σε γωνίες προσανατολισμού 45° και 90°.

Διαφορετικά μηχανήματα εκτυπωτών χαμηλού κόστους που παράγουν δοκίμια με την FFF μέθοδο επηρεάζουν τη διαστατική ακρίβεια αλλά και την ταχύτητα των επιφανειών των τυπωμένων αντικειμένων αν πρόκειται για τα ίδια ψηφιακά μοντέλα. Ο Redza [256] διαπίστωσε ότι ο σχεδιασμός ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή FFF επηρεάζει τη διαστατική ακρίβεια και για να εξαχθούν ορθά αποτελέσματα απαιτείται ο καθορισμός βελτιστοποίησης του πάχους στρώσης και της πυκνότητας πλήρωσης.

Οι Alafaghani και Qattawi [257] μελέτησαν την επίδραση που έχει το πάχος στρώσης, η θερμοκρασία του ακροφυσίου, το ποσοστό και το μοτίβο γεμίσματος στην ανθεκτικότητα και διαστατική ακρίβεια πρωτοτύπων από PLA. Διαπίστωσαν, με τη χρήση στατιστικών αναλύσεων, ότι όταν μειωνόταν η θερμοκρασία του ακροφυσίου και η πυκνότητα του γεμίσματος, η διαστατική ακρίβεια βελτιωνόταν και η ισχύς μειώνονταν ενώ οι βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων ήταν διαφορετικές για τη διαστατική ακρίβεια και την ισχύ.

Οι Minetola και Galati [258] συγκρίναν τέσσερις βελτιστοποιημένης απόδοσης εκτυπωτές σε διαστατική ακρίβεια χρησιμοποιώντας διεθνείς βαθμούς ανοχής κατά τυποποίηση ISO. Ο Plaza [259] μελέτησε την επίδραση από το πάχος στρώσης, τον προσανατολισμό του μοντέλου και το ρυθμό τροφοδοσίας στις επιφάνειες και στη διαστατική ακρίβεια μοντέλων από PLA. Διαπίστωσε ότι τη μεγαλύτερη επιρροή έχει το πάχος στρώσης αλλά και ο προσανατολισμός του μοντέλου στην ακρίβεια των διαστάσεων.

Γενικότερα έχουν μελετηθεί σε διάφορες έρευνες οι επιδράσεις της ογκομετρικής συρρίκνωσης στη διαστατική ακρίβεια εκτυπωμένων μοντέλων με την FFF διαδικασία [116, 266, 267]. Ο Dilberoglu [116] απέδειξε τη σχέση εξάρτησης μεταξύ του ύψους ενός μοντέλου με τη διαστατική ακρίβεια, χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.

Ο Jain [261] ανέφερε ότι το πάχος στρώσης, το ποσοστό γεμίσματος και η ταχύτητα εκτύπωσης είναι οι πιο σημαντικοί παράγοντες για την ποιότητα της επιφάνειας, τη διαστατική ακρίβεια και το χρόνο εκτύπωσης για τα μοντέλα που παράγονται χρησιμοποιώντας τον πειραματικό σχεδιασμό του Taguchi.

Ο Elkaseer [262] μελέτησε πέντε παραμέτρους (πάχος στρώσης, πυκνότητα πλήρωσης, ταχύτητα εκτύπωσης, θερμοκρασία ακροφυσίου και προσανατολισμό μοντέλου) χρησιμοποιώντας ορθογώνιους πίνακες και διαπίστωσε ότι το πάχος στρώσης και η ταχύτητα εκτύπωσης επηρεάζουν σημαντικά τη διαστατική ακρίβεια ενώ τόσο το πάχος στρώσης όσο και ο προσανατολισμός του μοντέλου επηρεάζουν την ποιότητα της επιφάνειας των πειραματικών δοκιμών κατά την FFF διαδικασία.

Ο Chohan [263] εφάρμοσε την πολυμεταβλητή βελτιστοποίηση της FFF διαδικασίας χρησιμοποιώντας αλγόριθμους διδασκαλίας και μάθησης. Ο Vyavahare [129] βελτιστοποίησε την ποιότητα της επιφάνειας, την ακρίβεια των διαστάσεων και το χρόνο από ABS δοκίμια σύμφωνα με πέντε παραμέτρους (θερμοκρασία ακροφυσίου, ταχύτητα εκτύπωσης, πυκνότητα πλήρωσης, προσανατολισμός μοντέλου και αριθμός κελυφών). Διαπίστωσε ότι το πάχος στρώσης και ο προσανατολισμός μοντέλου είναι σημαντικές παράμετροι για την ποιότητα της επιφάνειας των μοντέλων ενώ για τη διαστατική ακρίβεια παίζει επιπλέον ρόλο και η ταχύτητα εκτύπωσης. Ο Fountas [264] διερεύνησε την τραχύτητα της επιφάνειας δοκιμίων από PLA και απέδειξε ότι όσο αυξανόταν η θερμοκρασία τόσο βελτιωνόταν οι επιφάνειες.

Ο Corral [265] χρησιμοποίησε ένα πλήρες παραγοντικό πείραμα δύο επιπέδων για τη διερεύνηση της επίδρασης τεσσάρων παραμέτρων (πάχος στρώσης, θερμοκρασία ακροφυσίου, ταχύτητα εκτύπωσης και ρυθμός ροής με σταθερή πυκνότητα πλήρωσης 40%) στη διαστατική ακρίβεια και επιφανειακή ποιότητα σε κυβοειδούς γεωμετρίας δοκίμια από PLA κατά την FFF διαδικασία. Μέτρησε τιμές Ra μεταξύ 3,9 μm και 19 μm και έδειξε πειραματικά ότι το πάχος στρώσης και ο ρυθμός ροής επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια και την τραχύτητα των δοκιμίων.

Από τις παραπάνω αναφορές απορρέει το συμπέρασμα ότι πρέπει να εφαρμοστεί περισσότερη έρευνα κατά τη διαδικασία FFF για τον εντοπισμό της επιρροής των παραμέτρων ελέγχου στην ποιότητα επιφάνειας και στη διαστατική ακρίβεια δοκιμίων. Επιπλέον, πρέπει να πραγματοποιείται βελτιστοποίηση πρώτα της θερμοκρασίας ακροφυσίου και του πάχους στρώσης και έπειτα της ταχύτητας εκτύπωσης και της γωνίας εναπόθεσης, σύμφωνα πάντα με τον τύπο υλικού που εφαρμόζεται. Τέλος, για την αποφυγή των παραμορφώσεων αλλά και πολλών υποστηριγμάτων στα παραγόμενα δοκίμια απαιτείται βελτιστοποίηση στη θερμοκρασία πλατφόρμας των μηχανημάτων, στη θερμοκρασία θαλάμου εκτύπωσης αλλά και στον προσανατολισμό των μοντέλων.

Η ποιότητα εκτύπωσης επηρεάζεται συχνά από παραμέτρους που οι χρήστες δε μπορούν να ελέγξουν μέσω του λογισμικού του εκτυπωτή. Ανωμαλίες στην πρώτη ύλη, όπως διαφορετική διάμετρος από αυτή που αναγράφεται, μπορεί να επιφέρει σφάλμα στην κεφαλή ή ακόμα και στο γρανάζι εξώθησης. Μια άλλη σημαντική παράμετρος είναι η ευθυγράμμιση της βάσης του μηχανήματος και το σωστό ύψος της. Πρέπει να υπάρχει μια ορισμένη απόσταση από το ακροφύσιο (ούτε πολύ κοντά αλλά ούτε και πολύ μακριά). Όταν το ακροφύσιο της κεφαλής είναι πολύ κοντά στη βάση, χαλάει το πάχος της πρώτης στρώσης του μοντέλου με αποτέλεσμα να εμφανίζονται σημαντικά σφάλματα στη διαστατική ακρίβεια του μοντέλου. Όταν το ακροφύσιο είναι πολύ μακριά από τη βάση δημιουργείται ένα κενό

μεταξύ της βάσης και της πρώτης στρώσης, αυξάνοντας την πιθανότητα του μοντέλου να ξεκολλήσει από τη βάση και να ακολουθήσει μια αποτυχημένη εκτύπωση. Πολλοί εκτυπωτές πραγματοποιούν αυτόματη ευθυγράμμιση της βάσης, ωστόσο πολλοί χρήστες που επιλέγουν χαμηλού κόστους μηχανήματα εκτελούν μια χειροκίνητη διαδικασία ευθυγράμμισης.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση με τη μέθοδο FFF συχνά δεν οδηγεί στο αναμενόμενο αποτέλεσμα, με αντίκτυπο στην απώλεια χρόνου, υλικού και ενέργειας [268]. Η προσαρμογή όλων των παραμέτρων της FFF διαδικασίας στις κατάλληλες τιμές είναι υψίστης σημασίας για την παραγωγή ενός βέλτιστου αντικειμένου.

Αυτή η έρευνα εξετάζει την επίδραση των κρίσιμων παραμέτρων της διαδικασίας FFF στην ποιότητα της επιφάνειας και διαστατικής ακρίβειας των παραγόμενων μοντέλων. Στην αρχή του κεφαλαίου αναλύθηκε ένα διάγραμμα αιτίας και αποτελέσματος που απεικόνισε τη σχέση των μεταβλητών της μεθόδου FFF στα αποτελέσματα τραχύτητας και διαστατικής ακρίβειας. Στη συνέχεια, αναλύθηκε ο τύπος σήματος, ελέγχου και θορύβου της προσθετικής αυτής διαδικασίας και τέλος παρουσιάστηκε η επίδραση των παραμέτρων αυτών βασισμένη σε δημοσιευμένη βιβλιογραφία.

Γενικά, οι μεταβλητές της FFF διαδικασίας επηρεάζουν σοβαρά την ποιότητα της επιφάνειας και της διαστατικής ακρίβειας των μοντέλων που παράγονται. Ελαττώματα και προβλήματα πρόσφυσης ενδέχεται να εμφανιστούν αν ο χρήστης ορίσει λανθασμένες τιμές στις παραμέτρους μέσω του λογισμικού του μηχανήματος. Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του ακροφυσίου (κάθε υλικό λειτουργεί σε διαφορετικό εύρος θερμοκρασιών) οι επίπεδες διαστάσεις μπορεί να αυξηθούν. Αυξάνοντας την τιμή του πάχους στρώσης, η παράμετρος του χρόνου μειώνεται με αποτέλεσμα τη χαμηλή ποιότητα στην επιφάνεια και τη χαμηλή αντοχή. Υψηλή τιμή του πάχους κελύφους αυξάνει το χρόνο εκτύπωσης και την ισχύ του εκτυπωμένου μοντέλου χωρίς μεγάλη επίδραση στην ποιότητα της επιφάνειας. Διαφορετικός προσανατολισμός κατασκευής, μεγάλη εξώθηση υλικού και θερμοκρασία της βάσης επηρεάζουν την τραχύτητα και την αντοχή του μοντέλου. Υψηλές τιμές εσωτερικού γεμίσματος και διαφορετικού μοτίβου καθώς και πλάτους raster και γωνίας απόθεσης, αυξάνουν το χρόνο εκτύπωσης και τη δύναμη του μοντέλου. Επιπλέον, υψηλή ταχύτητα μπορεί να εξοικονομήσει χρόνο, αλλά οδηγεί σε κακή ποιότητα επιφάνειας.

Συμπεραίνεται ότι απαιτείται περισσότερη έρευνα για να συσχετιστούν πλήρως οι πολλαπλές αλληλένδετες παράμετροι διαδικασίας που επιδρούν στην τραχύτητα της επιφάνειας και την ακρίβεια του μοντέλου ώστε να θεωρηθεί επιτυχής η εφαρμογή της FFF μεθόδου. Βελτιστοποίηση διαδικασιών και ανάπτυξη νέων υλικών είναι μεταξύ των κύριων μελλοντικών προκλήσεων της προσθετικής διαδικασίας που αναλύθηκε.

Αναφορές 1ου κεφαλαίου

- [1] Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής (Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker) ISBN 978-960-586-189-6
- [2] Sonn A.E. & Dimitrov D.M., 2009, Reverse innovative design in rapid modelling and reverse engineering industrial applications
- [3] Dimitrios Chaidas, Konstantinos Kitsakis, John Kechagias, Stergios Maropoulos, 2016 The impact of temperature changing on surface roughness of FFF process
- [4] Taha Hasan Masood Siddique, Iqra Samit, Malik Zohaib Nisar, Mashal Naeem, Abid Karim and Muhammad Usman, 2019 Low Cost 3D Printing for Rapid Prototyping and its Application
- [5] An Overview on Taguchi Method Shyam Kumar Karna Ph.D. Scholar, A.P. (Mech), ACME, Palwal Dr. Rajeshwar Sahai Associate Professor (Mech), MRIU, Faridabad.
- [6] Soni, Shivam, and Mohammad Taufik. "Design and assembly of fused filament fabrication (FFF) 3D printers." *Materials Today: Proceedings* (2020).
- [7] Minetola, P., Iuliano, L., & Marchiandi, G. (2016). Benchmarking of FDM machines through part quality using IT grades. *Procedia Cirp*, 41, 1027-1032.
- [8] van Dang, L.; Makhanov, S. Enhanced Vector Flow of Significant Directions for Five-Axis Machining of STL Surfaces. *Int. J. Prod. Res.* 2021, 59(12), 3664–3695.
- [9] Yu, W.; Nie, Z.; Lin, Y. Research on the Slicing Method with Equal Thickness and Low Redundancy Based on STL Files. *J. Chin. Inst. Eng.* 2021, 44(5), 469–477. DOI: 10.1080/02533839.2021.1919563.
- [10] Gardan, J. Additive Manufacturing Technologies: State of the Art and Trends. *Int. J. Prod. Res.* 2016, 54(10), 3118–3132. DOI: 10.1080/00207543.2015.1115909.

- [11] Saengchairat, N.; Tran, T.; Chua, C.-K. A Review: Additive Manufacturing for Active Electronic Components. *Virtual Phys. Prototyp.* 2017, *12*(1), 31–46.
- [12] Tamburrino, F.; Barone, S.; Paoli, A.; Razionale, A. V. Post- Processing Treatments to Enhance Additively Manufactured Polymeric Parts: A Review. *Virtual Phys. Prototyp.* 2021, *16*(2), 218–251.
- [13] Lavecchia, F.; Percoco, G.; Pei, E.; Galantucci, L. M. Computer Numerical Controlled Grinding and Physical Vapor Deposition for Fused Deposition Modelled Workpieces. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2018, *2018*, 1–7.
- [14] Kechagias, J.; Maropoulos, S.; Karagiannis, S. Process Build-time Estimator Algorithm for Laminated Object Manufacturing. *Rapid Prototyp. J.* 2004, *10*(5), 297–304.
- [15] Reymus, M.; Liebermann, A.; Diegritz, C.; Keßler, A. Development and Evaluation of an Interdisciplinary Teaching Model via 3D Printing. *Clin. Exp. Dent.* 2021, *7*(1), 3–10.
- [16] Onuh, S. O.; Yusuf, Y. Y. Rapid Prototyping Technology: Applications and Benefits for Rapid Product Development. *J. Intell. Manuf.* 1999, *10*(3/4), 301–311.
- [17] Hofmann, M. 3D Printing Gets a Boost and Opportunities with Polymer Materials. *ACS Macro Lett.* 2014, *3*(4), 382–386.
- [18] Baumann, F.; Bugdayci, H.; Grunert, J.; Keller, F.; Roller, D. Influence of Slicing Tools on Quality of 3D Printed Parts. *Comput. Aided Des. Appl.* 2016, *13*(1), 14–31.
- [19] Kim, G. D.; Oh, Y. T. A Benchmark Study on Rapid Prototyping Processes and Machines: Quantitative Comparisons of Mechanical Properties, Accuracy, Roughness, Speed, and Material Cost. *Proc. Inst. Mech. Eng. B J. Eng. Manuf.* 2008, *222*(2), 201–215.
- [20] Kitsakis, K.; Aslani, K. E.; Vaxevanidis, N.; Kechagias, J. An Internal Combustion Engine Visualization Physical Prototype Applying Digital Manufacturing. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2019, *564*(1), 012022.

- [21] Kechagias, J.; Kitsakis, K.; Zacharias, A.; Theocharis, K.; Aslani, K.- E.; Petousis, M.; Fountas, N. A.; Vaxeavadnidis, N. M. Direct 3D Printing of a Hand Splint Using Reverse Engineering. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2021, *1037*(1), 012019.
- [22] Kirby, B.; Kenkel, J. M.; Zhang, A. Y.; Amirlak, B.; Suszynski, T. M. T.-D. (3D) Synthetic Printing for the Manufacture of Non-Biodegradable Models, Tools and Implants Used in Surgery: A Review of Current Methods. *J. Med. Eng.* 2021, *45*(1), 14–21.
- [23] Chua, C. K.; Leong, K. F.; Lim, C. S. *Rapid Prototyping*; World Scientific: Singapore, 2010.
- [24] Debnath, S. K.; Debnath, M.; Srivastava, R.; Omri, A. Intervention of 3D Printing in Health Care: Transformation for Sustainable Development. *Expert Opin. Drug. Deliv.* 2021, *18*(11), 1659–1672.
- [25] Yap, Y. L.; Yeong, W. Y. Additive Manufacture of Fashion and Jewellery Products: A Mini Review. *Virtual Phys. Prototyp.* 2014, *9* (3), 195–201.
- [26] Muhammad, M. S.; Kerbache, L.; Elomri, A. Potential of Additive Manufacturing for Upstream Automotive Supply Chains. *Supply Chain Forum.* 2021, 1–19.
- [27] Khoo, Z. X.; Teoh, J. E. M.; Liu, Y.; Chua, C. K.; Yang, S.; An, J.; Leong, K. F.; Yeong, W. Y. 3D Printing of Smart Materials: A Review on Recent Progresses in 4D Printing. *Virtual Phys. Prototyp.* 2015, *10* (3), 103–122.
- [28] Tsiolikas, A.; Mikrou, T.; Vakouftsi, F.; Aslani, K. E.; Kechagias, J. Robust Design Application for Optimizing ABS Fused Filament Fabrication Process: A Case Study. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2019, 564.
- [29] Aslani, K.-E.; Kitsakis, K.; Kechagias, J. D.; Vaxevanidis, N. M.; Manolakos, D. E. On the Application of Grey Taguchi Method for Benchmarking the Dimensional accuracy of the PLA Fused Filament Fabrication Process. *SN Appl. Sci.* 2020, *2*(6).

- [30] Bhardwaj, T.; Jain, P.; Singh, D. Experimental Study on Dimensional Accuracy of Freeform Fabricated Thermoplastic Polyurethane. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2021, *1136*(1), 012060.
- [31] Zharylkassyn, B.; Perveen, A.; Talamona, D. *Effect of Process Parameters and Materials on the Dimensional Accuracy of FDM Parts*; Mater. Proc: Today, 2021. Vol. 44. 1307–1311.
- [32] Khunt, C. P.; Makhesana, M. A.; Mawandiya, B. K.; Patel, K. M. Investigations on the Influence of Printing Parameters during Processing of Biocompatible Polymer in Fused Deposition Modelling (FDM). *Adv. Mater. Process. Technol.* 2021, 1–17.
- [33] Rahim, T. N. A. T.; Abdullah, A. M.; Md Akil, H. Recent Developments in Fused Deposition Modeling-Based 3D Printing of Polymers and Their Composites. *Polym. Rev.* 2019, *59*(4), 589–624.
- [34] Vinoth Babu, N.; Venkateshwaran, N.; Rajini, N.; Ismail, S. O.; Mohammad, F.; Al-Lohedan, H. A.; Siengchin, S. Influence of Slicing Parameters on Surface Quality and Mechanical Properties of 3D-Printed CF/PLA Composites Fabricated by FDM Technique. *Mater. Technol.* 2021, 1–18.
- [35] Armillotta, A. Assessment of Surface Quality on Textured FDM Prototypes. *Rapid Prototyp. J.* 2006, *12*(1), 35–41.
- [36] Bodaghi, M.; Mobin, M.; Ban, D.; Lomov, S. V.; Nikzad, M. Surface Quality of Printed Porous Materials for Permeability Rig Calibration. *Mater. Manuf. Process.* 2021, 1–11.
- [37] Anitha, R.; Arunachalam, S.; Radhakrishnan, P. Critical Parameters Influencing the Quality of Prototypes in Fused Deposition Modelling. *J. Mater. Process. Technol.* 2001, *118*(1–3), 385–388.
- [38] Sun, Q.; Rizvi, G. M.; Bellehumeur, C. T.; Gu, P. Effect of Processing Conditions on the Bonding Quality of FDM Polymer Filaments. *Rapid Prototyp. J.* 2008, *14*(2), 72–80.

- [39] Radhwan, H.; Shayfull, Z.; Nasir, S. M.; Abdellah, A. E.-H.; Irfan, A. R. Optimization Parameter Effects on the Quality Surface Finish of 3D-Printing Process Using Taguchi Method. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2020, *864*(1), 012143.
- [40] Chaidas, D.; Kechagias, J. D. An Investigation of PLA/W Parts Quality Fabricated by FFF. *Mater. Manuf. Process.* 2021, 1–9.
- [41] Palanisamy, C.; Raman, R.; Dhanraj, P. Additive Manufacturing: A Review on Mechanical Properties of Polyjet and FDM Printed Parts. *Polym. Bull.* 2021.
- [42] Bhagia, S.; Bornani, K.; Agrawal, R.; Satlewal, A.; Ďurkovič, J.; Lagaña, R.; Bhagia, M.; Yoo, C. G.; Zhao, X.; Kunc, V., et al. Critical Review of FDM 3D Printing of PLA Biocomposites Filled with Biomass Resources, Characterization, Biodegradability, Upcycling and Opportunities for Biorefineries. *Appl. Mater. Today.* 2021, 24.
- [43] Aida, H. J.; Nadlene, R.; Mastura, M. T.; Yusriah, L.; Sivakumar, D.; Ilyas, R. A. Natural Fibre Filament for Fused Deposition Modelling (FDM): A Review. *Int. J. Sustainable Eng.* 2021, *14*(6), 1988–2008.
- [44] Ahmadifar, M.; Benfriha, K.; Shirinbayan, M.; Tcharkhtchi, A. Additive Manufacturing of Polymer-Based Composites Using Fused Filament Fabrication (FFF): A Review. *Appl. Compos. Mater.* 2021, *28*(5), 5.
- [45] Pervaiz, S.; Qureshi, T. A.; Kashwani, G.; Kannan, S. 3D Printing of Fiber-Reinforced Plastic Composites Using Fused Deposition Modeling: A Status Review. *Materials.* 2021, *14*(16), 4520.
- [46] Ferreira, I.; Machado, M.; Alves, F.; Torres Marques, A. A Review on Fibre Reinforced Composite Printing via FFF. *Rapid Prototyp. J.* 2019, *25*(6), 972–988.
- [47] Cuan-Urquizo, E.; Barocio, E.; Tejada-Ortigoza, V.; Pipes, R.; Rodriguez, C.; Roman-Flores, A. Characterization of the Mechanical Properties of FFF Structures and Materials: A Review on the Experimental, Computational and Theoretical Approaches. *Materials.* 2019, *12*(6), 895.

- [48] Al-Maharma, A. Y.; Patil, S. P.; Markert, B. Effects of Porosity on the Mechanical Properties of Additively Manufactured Components: A Critical Review. *Mater. Res. Express*. 2020, 7(12), 122001.
- [49] Rashid, A. A.; Koç, M. Fused Filament Fabrication Process: A Review of Numerical Simulation Techniques. *Polymers*. 2021, 13(20), 3534.
- [50] Ahmadifar, M.; Benfriha, K.; Shirinbayan, M.; Tcharkhtchi, A. Additive Manufacturing of Polymer-Based Composites Using Fused Filament Fabrication (FFF): A Review. *Appl. Compos. Mater.* 2021, 28(5), 1335–1380.
- [51] Kehinde Aworinde, A.; Oluropo Adeosun, S.; Adekunle Oyawale, F.; Titilayo Akinlabi, E.; Akinlabi, S. A. Parametric Effects of Fused Deposition Modelling on the Mechanical Properties of Polylactide Composites: A Review. *J. Phys. Conf. Ser.* 2019, 1378(2), 022060.
- [52] Peterkin, F. E.; Stevens, J. L.; Sharrow, J. F.; Pitman, R. K. High Voltage Breakdown Strength of Rapid Prototype Materials. In *14th IEEE Int. Pulsed Power Conf.*; IEEE: Dallas, TX, USA, 2003; pp 1025–1028.
- [53] Bermudez, D.; Quiñonez, P. A.; Vasquez, E. J.; Carrete, I. A.; Word, T. J.; Roberson, D. A. A Comparison of the Physical Properties of Two Commercial 3D Printing PLA Grades. *Virtual Phys. Prototyp.* 2021, 16(2), 178–195.
- [54] Pérez, C. J. L. Analysis of the Surface Roughness and Dimensional Accuracy Capability of Fused Deposition Modelling Processes. *Int. J. Prod. Res.* 2002, 40(12), 2865–2881.
- [55] Singh, R.; Kumar, R.; Singh, M.; Preet, P. O. F. Wear and Morphological Properties of 3D Printed Almond Skin Powder Reinforced PLA Matrix. *Adv. Mater. Process. Technol.* 2021, 1–25.
- [56] Turner, B. N.; Gold, S. A. A Review of Melt Extrusion Additive Manufacturing Processes: II. Materials, Dimensional Accuracy, and Surface Roughness. *Rapid Prototyp. J.* 2015, 21(3), 250–261.

- [57] Decker, N.; Yee, A. A Simplified Benchmarking Model for the Assessment of Dimensional Accuracy in FDM Processes. *Int. J. Rapid Manuf.* 2015, 5(2), 145.
- [58] Park, S.; Fu, K. (Kelvin) Polymer-Based Filament Feedstock for Additive Manufacturing. *Compos. Sci. Technol.* 2021, 213.
- [59] Dey, A.; Roan Eagle, I. N.; Yodo, N. A Review on Filament Materials for Fused Filament Fabrication. *J. Manuf. Mater. Process.* 2021, 5, 3.
- [60] Pricci, A.; de Tullio, M. D.; Percoco, G. Analytical and Numerical Models of Thermoplastics: A Review Aimed to Pellet Extrusion-Based Additive Manufacturing. *Polymers.* 2021, 13(18), 18.
- [61] Vaes, D.; van Puyvelde, P. Semi-Crystalline Feedstock for Filament-Based 3D Printing of Polymers. *Prog. Polym. Sci.* 2021, 118.
- [62] Mohamed, O. A.; Masood, S. H.; Bhowmik, J. L. Experimental Investigations of Process Parameters Influence on Rheological Behavior and Dynamic Mechanical Properties of FDM Manufactured Parts. *Mater. Manuf. Process.* 2016, 31(15), 1983–1994.
- [63] Mosleh, N.; Rezadoust, A. M.; Dariushi, S. Determining Process-Window for Manufacturing of Continuous Carbon Fiber-Reinforced Composite Using 3D-Printing. *Mater. Manuf. Process.* 2021, 36(4), 409–418.
- [64] Parvanda, R.; Kala, P.; Sharma, V. Bibliometric Analysis-Based Review of Fused Deposition Modeling 3D Printing Method (1994–2020). *3D Print. Addit. Manuf.* 2021.
- [65] Phadke, M. S. *Quality Engineering Using Robust Design*; Englewood Cliffs, New Jersey 07632: Prentice Hall PTR, 1989. PTR Prentice Hall
- [66] Al-Ghamdi, K. A. Sustainable FDM Additive Manufacturing of ABS Components with Emphasis on Energy Minimized and Time Efficient Lightweight Construction. *Int. J. Lightweight Mater. Manuf.* 2019, 2(4), 338–345.

- [67] Gul, J. Z.; Sajid, M.; Rehman, M. M.; Siddiqui, G. U.; Shah, I.; Kim, K.-H.; Lee, J.-W.; Choi, K. H. 3D Printing for Soft Robotics – A Review. *Sci. Technol. Adv. Mater.* 2018, *19*(1), 243–262.
- [68] Compton, B. G.; Kemp, J. W.; Novikov, T. V.; Pack, R. C.; Nlebedim, C. I.; Duty, C. E.; Rios, O.; Paranthaman, M. P. Direct- Write 3D Printing of NdFeB Bonded Magnets. *Mater. Manuf. Process.* 2018, *33*(1), 109–113.
- [69] Baumann, F. W.; Wellekötter, J.; Roller, D.; Bonten, C. Software- Aided Measurement of Geometrical Fidelity for 3D Printed Objects. *Comput. Aided Des. Appl.* 2017, *14*(4), 486–497.
- [70] Roth, G. A.; Geraci, C. L.; Stefaniak, A.; Murashov, V.; Howard, J. Potential Occupational Hazards of Additive Manufacturing. *J. Occup. Environ. Hyg.* 2019, *16*(5), 321–328.
- [71] Väisänen, A. J. K.; Hyttinen, M.; Ylönen, S.; Alonen, L. Occupational Exposure to Gaseous and Particulate Contaminants Originating from Additive Manufacturing of Liquid, Powdered, and Filament Plastic Materials and Related Post-Processes. *J. Occup. Environ. Hyg.* 2019, *16*(3), 258–271.
- [72] Lee, A. Y.; Zhou, A.; An, J.; Chua, C. K.; Zhang, Y. Contactless Reversible 4D-Printing for 3D-to-3D Shape Morphing. *Virtual Phys. Prototyp.* 2020, *15*(4), 481–495.
- [73] Urbanic, R. J. From Thought to Thing: Using the Fused Deposition Modeling and 3D Printing Processes for Undergraduate Design Projects. *Comput. Aided Des. Appl.* 2016, *13*(6), 768–785.
- [74] Pereira, T.; Scaffaro, R.; Nieh, S.; Arias, J.; Guo, Z.; Hahn, H. T. The Performance of Thin-Film Li-Ion Batteries under Flexural Deflection. *J. Micromech. Microeng.* 2006, *16*(12), 2714.
- [75] Chu, C.; Graf, G.; Rosen, D. W. Design for Additive Manufacturing of Cellular Structures. *Comput. Aided Des. Appl.* 2008, *5*(5), 686–696.

- [76] Gohari, H.; Kishawy, H.; Barari, A. Adaptive Variable Layer Thickness and Perimetral Offset Planning for Layer-Based Additive Manufacturing Processes. *Int. J. Comput. Integr. Manuf.* 2021, *34*(9), 964–974.
- [77] Kechagias, J. An Experimental Investigation of the Surface Roughness of Parts Produced by LOM Process. *Rapid Prototyp. J.* 2007, *13*(1), 17–22.
- [78] Hedrick, R. W.; Urbanic, R. J. Integration of Additive Manufacturing and Virtual Verification Strategies within a Commercial CAM System. *Comput. Aided Des. Appl.* 2013, *10* (4), 567–583.
- [79] Ruffo, M.; Tuck, C.; Hague, R. Empirical Laser Sintering Time Estimator for Duraform PA. *Int. J. Prod. Res.* 2006, *44*(23), 5131–5146.
- [80] Di Angelo, L.; Di Stefano, P. Parametric Cost Analysis for Web-Based e-Commerce of Layer Manufactured Objects. *Int. J. Prod. Res.* 2010, *48*(7), 2127–2140.
- [81] Cheng, W.; Fuh, J. Y. H.; Nee, A. Y. C.; Wong, Y. S.; Loh, H. T.; Miyazawa, T. Multi-objective Optimization of Part- Building Orientation in Stereolithography. *Rapid Prototyp. J.* 1995, *1*(4), 12–23.
- [82] Frank, D.; Fadel, G. Expert System-Based Selection of the Preferred Direction of Build for Rapid Prototyping Processes. *J. Intell. Manuf.* 1995, *6*(5), 339–345.
- [83] Zhang, Y.; Bernard, A.; Harik, R.; Karunakaran, K. P. Build Orientation Optimization for Multi-Part Production in Additive Manufacturing. *J. Intell. Manuf.* 2017, *28*(6), 1393–1407.
- [84] Fernández, E.; Ayas, C.; Langelaar, M.; Duysinx, P. Topology Optimisation for Large-Scale Additive Manufacturing: Generating Designs Tailored to the Deposition Nozzle Size. *Virtual Phys. Prototyp.* 2021, *16*(2), 196–220.
- [85] Bochnia, J.; Blasiak, M.; Kozior, T. A Comparative Study of the Mechanical Properties of FDM 3D Prints Made of PLA and Carbon Fiber-Reinforced PLA for Thin-Walled Applications. *Materials.* 2021, *14*(22), 7062.

- [86] Kechagias, J.; Anagnostopoulos, V.; Zervos, S.; Chryssolouris, G. Estimation of Build Times in Rapid Prototyping Processes. In *6th Eur. Conf. Rapid Prot. Manuf*; Dickens, P. M., Ed.; University of Nottingham: Nottingham, 1997; pp 137–148.
- [87] Alam, F.; Elsherif, M.; AlQattan, B.; Ali, M.; Ahmed, I. M. G.; Salih, A.; Antonysamy, D. S.; Yetisen, A. K.; Park, S.; Butt, H. Prospects for Additive Manufacturing in Contact Lens Devices. *Adv. Eng. Mater.* 2021, 23(1), 2000941.
- [88] Chryssolouris, G.; Kechagias, J. D.; Kotselis, J. L.; Mourtzis, D. A.; Zannis, S. G. Surface Roughness Modelling of the Helisys Laminated Object Manufacturing (LOM) Process. In *8th Eur. Conf. Rapid Prot. Manuf*; Dickens, P. M., Ed.; Manuf.; University of Nottingham: Nottingham, 1999; pp 141–152.
- [89] Mohamed, O. A.; Masood, S. H.; Bhowmik, J. L. M. Analysis, and Optimization of Dimensional Accuracy of FDM-Fabricated Parts Using Definitive Screening Design and Deep Learning Feedforward Artificial Neural Network. *Adv. Manuf.* 2021, 9(1), 115–129.
- [90] Dey, A.; Yodo, N. A Systematic Survey of FDM Process Parameter Optimization and Their Influence on Part Characteristics. *J. Manuf. Mater. Process.* 2019, 3(3), 64.
- [91] Kristiawan, R. B.; Imaduddin, F.; Ariawan, D.; Ubaidillah,; Arifin, Z. A Review on the Fused Deposition Modeling (FDM) 3D Printing: Filament Processing, Materials, and Printing Parameters. *Open Eng.* 2021, 11(1), 639–649.
- [92] Kabir, S. M. F.; Mathur, K.; Seyam, A.-F. M. Impact Resistance and Failure Mechanism of 3D Printed Continuous Fiber-Reinforced Cellular Composites. *J. Text. Inst.* 2021, 112(5), 752–766.
- [93] Skawiński, I.; Goetzendorf-Grabowski, T. FDM 3D Printing Method Utility Assessment in Small RC Aircraft Design. *Aircr. Eng. Aerosp. Technol.* 2019, 91(6), 865–872.
- [94] Singh, R.; Verma, M. Investigations for Deducing Wall Thickness of Aluminium Shell Casting Using Three Dimensional Printing Analysis and Modelling. *J. Achiev. Mater. Manuf.* 2008, 31(2), 565–569.

- [95] Yu, H.; Huang, J.; Zou, B.; Shao, W.; Liu, J. Stress-Constrained Shell-Lattice Infill Structural Optimisation for Additive Manufacturing. *Virtual Phys. Prototyp.* 2020, *15*(1), 35–48.
- [96] Harpool, T. D.; Alarifi, I. M.; Alshammari, B. A.; Aabid, A.; Baig, M.; Malik, R. A.; Mohamed Sayed, A.; Asmatulu, R.; EL- Bagory, T. M. A. A. Evaluation of the Infill Design on the Tensile Response of 3D Printed Polylactic Acid Polymer. *Materials.* 2021, *14*(9), 2195.
- [97] Nukala, P. K.; Palekar, S.; Patki, M.; Patel, K. Abuse Deterrent Immediate Release Egg-Shaped Tablet (Egglets) Using 3D Printing Technology: Quality by Design to Optimize Drug Release and Extraction. *AAPS PharmSciTech.* 2019, *20*(2), 1–12.
- [98] Cho, E. E.; Hein, H. H.; Lynn, Z.; Hla, S. J.; Tran, T. Investigation on Influence of Infill Pattern and Layer Thickness on Mechanical Strength of PLA Material in 3D Printing Technology. *J. Eng. Sci. Res.* 2019, *3*(2), 27–37.
- [99] Vassilakos, A.; Giannatsis, J.; Dedoussis, V. Fabrication of Parts with Heterogeneous Structure Using Material Extrusion Additive Manufacturing. *Virtual Phys. Prototyp.* 2021, *16*(3), 267–290.
- [100] Es-Said, O. S.; Foyos, J.; Noorani, R.; Mendelson, M.; Marloth, R.; Pregger, B. A. Effect of Layer Orientation on Mechanical Properties of Rapid Prototyped Samples. *Mater. Manuf. Process.* 2000, *15*(1), 107–122.
- [101] Fountas, N. A.; Papantoniou, I.; Kechagias, J. D.; Manolakos, D. E.; Vaxevanidis, N. M. *Experimental Investigation on Flexural Properties of FDM-Processed PET-G Specimen Using Response Surface Methodology*; MATEC Web Conf.: France, 2021; Vol. 349. 01008.
- [102] Kechagias, J. D.; Vidakis, N.; Petousis, M. Parameter Effects and Process Modeling of FFF-TPU Mechanical Response. *Mater. Manuf. Process.* 2021, 1–11.

- [103] Das, P.; Mhapsekar, K.; Chowdhury, S.; Samant, R.; Anand, S. Selection of Build Orientation for Optimal Support Structures and Minimum Part Errors in Additive Manufacturing. *Comput. Aided Des. Appl.* 2017, *14*(sup1), 1–13.
- [104] Rubies, E.; Palacín, J. Design and FDM/FFF Implementation of a Compact Omnidirectional Wheel for a Mobile Robot and Assessment of ABS and PLA Printing Materials. *Robotics*. 2020, *9* (2), 43.
- [105] Xu, B.; Han, Y.; Zhao, L.; Xie, Y. M. Topological Optimization of Continuum Structures for Additive Manufacturing considering Thin Feature and Support Structure Constraints. *Eng. Optim.* 2021, *53*(12), 2122–2143.
- [106] Torres, J.; Coteló, J.; Karl, J.; Gordon, A. P. Mechanical Property Optimization of FDM PLA in Shear with Multiple Objectives. *JOM*. 2015, *67*(5), 1183–1193.
- [107] Zaman, U. K. U.; Boesch, E.; Siadat, A.; Rivette, M.; Baqai, A. A. Impact of Fused Deposition Modeling (FDM) Process Parameters on Strength of Built Parts Using Taguchi's Design of Experiments. *Int. J. Adv. Manuf. Syst.* 2019, *101*(5–8), 1215–1226.
- [108] Chen, D.; Xu, X.-Y.; Li, R.; Zang, G.-A.; Zhang, Y.; Wang, M.-R.; Xiong, M.-F.; Xu, J.-R.; Wang, T. Preparation and in Vitro Evaluation of FDM 3D-Printed Ellipsoid-Shaped Gastric Floating Tablets with Low Infill Percentages. *AAPS PharmSciTech.* 2019, *21* (1), 1–13.
- [109] Qureshi, A. J.; Mahmood, S.; Wong, W. L. E.; Talamona, D. Design for Scalability and Strength Optimisation for Components Created through FDM Process. In *20th Int. Conf. On Engineering Design (ICED 15)*; Newcastle University; ICED: Milan, 2015; pp 255–266.
- [110] Geng, P.; Zhao, J.; Wu, W.; Ye, W.; Wang, Y.; Wang, S.; Zhang, S. Effects of Extrusion Speed and Printing Speed on the 3D Printing Stability of Extruded PEEK Filament. *J. Manuf. Process.* 2019, *37*, 266–273.
- [111] El Magri, A.; El Mabrouk, K.; Vaudreuil, S.; Ebn Touhami, M. Experimental Investigation and Optimization of Printing Parameters of 3D Printed Polyphenylene Sulfide through Response Surface Methodology. *J. Appl. Polym. Sci.* 2021, *138*(1), 49625.

- [112] Bergonzi, L.; Pirondi, A.; Moroni, F.; Frascio, M.; Avalle, M. A Study on Additive Manufacturing Build Parameters as Bonded Joint Design Factors. *J. Adhes.* 2021, 1–30.
- [113] Chaidas, D.; Kitsakis, K.; Kechagias, J.; Maropoulos, S. The Impact of Temperature Changing on Surface Roughness of FFF Process. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2016, *161*, 012033.
- [114] Hertle, S.; Drexler, M.; Drummer, D. Additive Manufacturing of Poly(Propylene) by Means of Melt Extrusion. *Macromol. Mater. Eng.* 2016, *301*(12), 1482–1493.
- [115] Rinaldi, M.; Ghidini, T.; Nanni, F. Fused Filament Fabrication of Polyetheretherketone/Multiwalled Carbon Nanotube Nanocomposites: The Effect of Thermally Conductive Nanometric Filler on the Printability and Related Properties. *Polym. Int.* 2021, *70*(8), 1080–1089.
- [116] Dilberoglu, U. M.; Simsek, S.; Yaman, U. Shrinkage Compensation Approach Proposed for ABS Material in FDM Process. *Mater. Manuf. Process.* 2019, *34*(9), 993–998.
- [117] Christiyana, K. G. J.; Chandrasekhar, U.; Venkateswarlu, K. A Study on the Influence of Process Parameters on the Mechanical Properties of 3D Printed ABS Composite. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2016, *114*, 012109.
- [118] Rahman, K. M.; Letcher, T.; Reese, R. Mechanical Properties of Additively Manufactured PEEK Components Using Fused Filament Fabrication. In *Vol. 2A: Adv. Manuf.*; ASME: Houston, Texas, USA., 2015.
- [119] Harris, M.; Potgieter, J.; Archer, R.; Arif, K. M. In-Process Thermal Treatment of Polylactic Acid in Fused Deposition Modelling. *Mater. Manuf. Process.* 2019, *34*(6), 701–713.
- [120] Durgun, I.; Ertan, R. Experimental Investigation of FDM Process for Improvement of Mechanical Properties and Production Cost. *Rapid Prototyp. J.* 2014, *20*(3), 228–235. DOI: 10.1108/RPJ-10-2012-0091.

- [121] Nyika, J.; Mwema, F. M.; Mahamood, R. M.; Akinlabi, E. T.; Jen, T. Advances in 3D Printing Materials Processing-Environmental Impacts and Alleviation Measures. *Adv. Mater. Process. Technol.* 2021, 1–11.
- [122] Messimer, S. L.; Patterson, A. E.; Muna, N.; Deshpande, A. P.; Rocha Pereira, T. Characterization and Processing Behavior of Heated Aluminum-Polycarbonate Composite Build Plates for the FDM Additive Manufacturing Process. *J. Manuf. Mater. Process.* 2018, 2(1), 12.
- [123] Arigela, S. H.; Ch, R.; K, V. Investigation on Dual Nozzle Fused Deposition Modelling Using Industrial Robot. *Adv. Mater. Process. Technol.* 2020, 1–19.
- [124] Scheffel, R. M.; Fröhlich, A. A.; Silvestri, M. Automated Fault Detection for Additive Manufacturing Using Vibration Sensors. *Int. J. Comput. Integr. Manuf.* 2021, 34(5), 500–514.
- [125] Tamburrino, F.; Graziosi, S.; Bordegoni, M. The Influence of Slicing Parameters on the Multi-Material Adhesion Mechanisms of FDM Printed Parts: An Exploratory Study. *Virtual Phys. Prototyp.* 2019, 14 (4), 316–332.
- [126] Hashemi Sanatgar, R.; Campagne, C.; Nierstrasz, V. Investigation of the Adhesion Properties of Direct 3D Printing of Polymers and Nanocomposites on Textiles: Effect of FDM Printing Process Parameters. *Appl. Surf. Sci.* 2017, 403, 551–563.
- [127] Deisenroth, D. C.; Moradi, R.; Shooshtari, A. H.; Singer, F.; Bar-Cohen, A.; Ohadi, M. Review of Heat Exchangers Enabled by Polymer and Polymer Composite Additive Manufacturing. *Heat Transfer Engineering.* 2018, 39(19), 1648–1664.
- [128] Melenka, G. W.; Schofield, J. S.; Dawson, M. R.; Carey, J. P. Evaluation of Dimensional Accuracy and Material Properties of the MakerBot 3D Desktop Printer. *Rapid Prototyp. J.* 2015, 21(5), 618–627.
- [129] Vyavahare, S.; Kumar, S.; Panghal, D. Experimental Study of Surface Roughness, Dimensional Accuracy and Time of Fabrication of Parts Produced by Fused Deposition Modelling. *Rapid Prototyp. J.* 2020, 26 (9), 1535–1554.

- [130] Zandi, M. D.; Jerez-Mesa, R.; Lluma-Fuentes, J.; Jorba-Peiro, J.; Travieso-Rodriguez, J. A. Study of the Manufacturing Process Effects of Fused Filament Fabrication and Injection Molding on Tensile Properties of Composite PLA-Wood Parts. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2020, *108*(5–6), 1725–1735.
- [131] Aslani, K.-E.; Chaidas, D.; Kechagias, J.; Kyratsis, P.; Salonitis, K. Quality Performance Evaluation of Thin Walled PLA 3D Printed Parts Using the Taguchi Method and Grey Relational Analysis. *J. Manuf. Mater. Process.* 2020, *4*(2).
- [132] Pérez, M.; Medina-Sánchez, G.; García-Collado, A.; Gupta, M.; Carou, D. Surface Quality Enhancement of Fused Deposition Modeling (FDM) Printed Samples Based on the Selection of Critical Printing Parameters. *Materials*. 2018, *11*(8), 1382.
- [133] Garg, A.; Bhattacharya, A.; Batish, A. On Surface Finish and Dimensional Accuracy of FDM Parts after Cold Vapor Treatment. *Mater. Manuf. Process.* 2016, *31*(4), 522–529.
- [134] Wang, P.; Zou, B.; Ding, S. Modeling of Surface Roughness Based on Heat Transfer considering Diffusion among Deposition Filaments for FDM 3D Printing Heat-Resistant Resin. *Appl. Therm. Eng.* 2019, *161*, 114064.
- [135] Ahn, D.; Kweon, J.-H.; Kwon, S.; Song, J.; Lee, S. Representation of Surface Roughness in Fused Deposition Modeling. *J. Mater. Process. Technol.* 2009, *209*(15–16), 5593–5600.
- [136] Kim, M. K.; Lee, I. H.; Kim, H.-C. Effect of Fabrication Parameters on Surface Roughness of FDM Parts. *Int. J. Precis. Eng.* 2018, *19*(1), 137–142.
- [137] Jackiewicz, J. Manufacturing of Instructional Aids for Students at Low Cost by Means of 3D Printing. *Mater. Manuf. Process.* 2017, *32*(10), 1116–1130.
- [138] Reeves, P. E.; Cobb, R. C. Surface Deviation Modeling of LMT Processes—A Comparative Analysis. In *Fifth Eur. Conf. Rapid Prot. Manuf.*; Dickens, P. M., Ed.; Manuf.; University of Nottingham: Nottingham, 1995; pp 59–77.

- [139] Kumar, K.; Kumar, G. S. An Experimental and Theoretical Investigation of Surface Roughness of Poly-Jet Printed Parts. *Virtual Phys. Prototyp.* 2015, *10*(1), 23–34.
- [140] Bikas, H.; Stavropoulos, P.; Chrysosolouris, G. Additive Manufacturing Methods and Modelling Approaches: A Critical Review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016, *83*(1–4), 389–405.
- [141] Vidakis, N.; Petousis, M.; Vaxevanidis, N.; Kechagias, J. Surface Roughness Investigation of Poly-Jet 3D Printing. *Mathematics*. 2020, *8*(10), 10.
- [142] Fazzini, G.; Paolini, P.; Paolucci, R.; Chiulli, D.; Barile, G.; Leoni, A.; Muttillio, M.; Pantoli, L.; Ferri, G. Print On Air: FDM 3D Printing Without Supports. In *MetroInd4.0*, Naples, Italy; IEEE, 2019; pp 350–354.
- [143] Gurralla, P. K.; Regalla, S. P. Multi-Objective Optimisation of Strength and Volumetric Shrinkage of FDM Parts. *Virtual Phys. Prototyp.* 2014, *9*(2), 2.
- [144] Faria, C.; Fonseca, J.; Bicho, E. FIBR3DEmul—an Open-Access Simulation Solution for 3D Printing Processes of FDM Machines with 3+ Actuated Axes. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2020, *106*(7–8), 3609–3623.
- [145] Langelaar, M. Combined Optimization of Part Topology, Support Structure Layout and Build Orientation for Additive Manufacturing. *Struct. Multidiscip. Optim.* 2018, *57*(5), 1985–2004.
- [146] Syamsuzzaman, M.; Mardi, N. A.; Fadzil, M.; Farazila, Y. Investigation of Layer Thickness Effect on the Performance of Low-Cost and Commercial Fused Deposition Modelling Printers. *Mater. Res. Innov.* 2014, *18*(sup6), SS6–489.
- [147] Rankouhi, B.; Javadpour, S.; Delfanian, F.; Letcher, T. Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D Printed ABS with respect to Layer Thickness and Orientation. *J. Fail. Anal. Prev.* 2016, *16*(3), 467–481.

- [148] D’Amico, A. A.; Debaie, A.; Peterson, A. M. Effect of Layer Thickness on Irreversible Thermal Expansion and Interlayer Strength in Fused Deposition Modeling. *Rapid Prototyp. J.* 2017, 23(5), 943–953.
- [149] Goh, G. D.; Yap, Y. L.; Tan, H. K. J.; Sing, S. L.; Goh, G. L.; Yeong, W. Y. Process–Structure–Properties in Polymer Additive Manufacturing via Material Extrusion: A Review. *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.* 2020, 45(2), 113–133.
- [150] Wach, R. A.; Wolszczak, P.; Adamus-Włodarczyk, A. Enhancement of Mechanical Properties of FDM-PLA Parts via Thermal Annealing. *Macromol. Mater. Eng.* 2018, 303(9), 1800169.
- [151] Wojtyła, S.; Klama, P.; Baran, T. Is 3D Printing Safe? Analysis of the Thermal Treatment of Thermoplastics: ABS, PLA, PET, and Nylon. *J. Occup. Environ. Hyg.* 2017, 14(6), D80–D85.
- [152] Cuiffo, M. A.; Snyder, J.; Elliott, A. M.; Romero, N.; Kannan, S.; Halada, G. P. Impact of the Fused Deposition (FDM) Printing Process on Polylactic Acid (PLA) Chemistry and Structure. *Appl. Sci.* 2017, 7(6), 579.
- [153] Marwah, O. M. F.; Yahaya, N. F.; Darsani, A.; Mohamad, E. J.; Haq, R. H. A.; Johar, M. A.; Othman, M. H. Investigation For Shrinkage Deformation In The Desktop 3D Printer Process By Using DOE Approach Of The ABS Materials. *J. Phys. Conf. Ser.* 2019, 1150, 012038.
- [154] Choi, Y.-H.; Kim, C.-M.; Jeong, H.-S.; Youn, J.-H. Influence of Bed Temperature on Heat Shrinkage Shape Error in FDM Additive Manufacturing of the ABS-Engineering Plastic. *World J. Eng. Tech.* 2016, 4(3), 186–192.
- [155] Žarko, J.; Vladić, G.; Pál, M.; Dedijer, S. Influence of Printing Speed on Production of Embossing Tools Using FDM 3d Printing Technology. *J. Graph. Eng. Des.* 2017, 8(1), 19–27.

- [156] Lyu, J.; Manoochchri, S. Online Convolutional Neural Network-Based Anomaly Detection and Quality Control for Fused Filament Fabrication Process. *Virtual Phys. Prototyp.* 2021, *16*(2), 160–177.
- [157] Kain, S.; Ecker, J. V.; Haider, A.; Musso, M.; Petutschnigg, A. Effects of the Infill Pattern on Mechanical Properties of Fused Layer Modeling (FLM) 3D Printed Wood/Polylactic Acid (PLA) Composites. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 2020, *78*(1), 65–74.
- [158] Gopsill, J. A.; Shindler, J.; Hicks, B. J. Using Finite Element Analysis to Influence the Infill Design of Fused Deposition Modelled Parts. *Prog. Addit. Manuf.* 2018, *3*(3), 145–163.
- [159] Wu, W.; Geng, P.; Li, G.; Zhao, D.; Zhang, H.; Zhao, J. Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS. *Materials.* 2015, *8*(9), 5834–5846.
- [160] Alsoufi, M. S.; Elsayed, A. E. Surface Roughness Quality and Dimensional Accuracy—A Comprehensive Analysis of 100% Infill Printed Parts Fabricated by a Personal/Desktop Cost- Effective FDM 3D Printer. *Mater. Sci. Appl.* 2018, *9*(1), 11–40.
- [161] Wu, C.; Dai, C.; Fang, G.; Liu, Y.-J.; Wang, C. C. L. RoboFDM: A Robotic System for Support-Free Fabrication Using FDM. In *Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA)*, Singapore; IEEE, 2017; pp 1175–1180.
- [162] Lee, J.; Lee, K. Block-Based Inner Support Structure Generation Algorithm for 3D Printing Using Fused Deposition Modeling. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2017, *89*(5–8), 2151–2163.
- [163] Chueca de Bruijn, A.; Gómez-Gras, G.; Pérez, M. A. Mechanical Study on the Impact of an Effective Solvent Support-Removal Methodology for FDM Ultem 9085 Parts. *Polym. Test.* 2020, *85*, 106433.
- [164] Valerga Puerta, A. P.; Lopez-Castro, J. D.; Ojeda López, A.; Fernández Vidal, S. R. On Improving the Surface Finish of 3D Printing Polylactic Acid Parts by Corundum Blasting. *Rapid Prototyp. J.* 2021, *27*(7), 1398–1407.

- [165] Javaid, M.; Haleem, A. Additive Manufacturing Applications in Medical Cases: A Literature Based Review. *Alexandria J. Med.* 2018, *54*(4), 411–422.
- [166] Hurst, E. J. 3D Printing in Healthcare: Emerging Applications. *J. Hosp. Librariansh.* 2016, *16*(3), 255–267.
- [167] Taufik, M.; Jain, P. K. On the Achieving Uniform Finishing Allowance through Identifying Shape Deviation for Additive Manufacturing. *Aust. J. Mech. Eng.* 2021, 1–19.
- [168] Mali, H. S.; Prajwal, B.; Gupta, D.; Kishan, J. Abrasive Flow Finishing of FDM Printed Parts Using a Sustainable Media. *Rapid Prototyp. J.* 2018, *24*(3), 593–606.
- [169] Pal, A. K.; Mohanty, A. K.; Misra, M. Additive Manufacturing Technology of Polymeric Materials for Customized Products: Recent Developments and Future Prospective. *RSC Adv.* 2021, *11* (58), 36398–36438.
- [170] Rodríguez-Panes, A.; Claver, J.; Camacho, A. The Influence of Manufacturing Parameters on the Mechanical Behaviour of PLA and ABS Pieces Manufactured by FDM: A Comparative Analysis. *Materials.* 2018, *11*(8), 1333.
- [171] Kechagias, J. D.; Ninikas, K.; Petousis, M.; Vidakis, N.; Vaxevanidis, N. An Investigation of Surface Quality Characteristics of 3D Printed PLA Plates Cut by CO2 Laser Using Experimental Design. *Mater. Manuf. Process.* 2021, *36*(13), 1544–1553.
- [172] Gardan, J. Smart Materials in Additive Manufacturing: State of the Art and Trends. *Virtual Phys. Prototyp.* 2019, *14*(1), 1–18.
- [173] Chokshi, H.; Shah, D. B.; Patel, K. M.; Joshi, S. J. Experimental Investigations of Process Parameters on Mechanical Properties for PLA during Processing in FDM. *Adv. Mater. Process. Technol.* 2021, 1–14.
- [174] Harris, M.; Potgieter, J.; Ray, S.; Archer, R.; Arif, K. M. Preparation and Characterization of Thermally Stable ABS/HDPE Blend for Fused Filament Fabrication. *Mater. Manuf. Process.* 2020, *35*(2), 230–240.

- [175] Cazón, A.; Prada, J. G.; García, E.; Larraona, G. S.; Ausejo, S. Pilot Study Describing the Design Process of an Oil Sump for a Competition Vehicle by Combining Additive Manufacturing and Carbon Fibre Layers. *Virtual Phys. Prototyp.* 2015, *10*(3), 149–162.
- [176] Savvakis, K.; Petousis, M.; Vairis, A.; Vidakis, N.; Bikmeyer, A. T. Experimental Determination of the Tensile Strength of Fused Deposition Modeling Parts. *IMECE2014*; ASME: Montreal, Quebec, Canada, 2014; 6.
- [177] Vidakis, N.; Petousis, M.; Vairis, A.; Savvakis, K.; Maniadi, A. A Parametric Determination of Bending and Charpy's Impact Strength of ABS and ABS-plus Fused Deposition Modeling Specimens. *Prog. Addit. Manuf.* 2019, *4*(3), 323–330.
- [178] Vidakis, N.; Petousis, M.; Vairis, A.; Savvakis, K.; Maniadi, A. On the Compressive Behavior of an FDM Steward Platform Part. *J. Comput. Des. Eng.* 2017, *4*(4), 339–346.
- [179] Vidakis, N.; Vairis, A.; Petousis, M.; Savvakis, K.; Kechagias, J. Fused Deposition Modelling Parts Tensile Strength Characterisation. *Academic J. Manuf. Eng.* 2016, *14*(2), 87–94.
- [180] Vidakis, N.; Petousis, M.; Maniadi, A.; Koudoumas, E.; Vairis, A.; Kechagias, J. Sustainable Additive Manufacturing: Mechanical Response of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene over Multiple Recycling Processes. *Sustainability.* 2020, *12*(9), 3568.
- [181] Vidakis, N.; Maniadi, A.; Petousis, M.; Vamvakaki, M.; Kenanakis, G.; Koudoumas, E. Mechanical and Electrical Properties Investigation of 3D-Printed Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Graphene and Carbon Nanocomposites. *J. Mater. Eng. Perform.* 2020, *29*(3), 1909–1918.
- [182] Vidakis, N.; Petousis, M.; Maniadi, A.; Koudoumas, E.; Kenanakis, G.; Romanitan, C.; Tutunaru, O.; Suche, M.; Kechagias, J. The Mechanical and Physical Properties of 3D-Printed Materials Composed of ABS-ZnO Nanocomposites and ABS-ZnO Microcomposites. *Micromachines.* 2020, *11*(6), 615.

- [183] Vidakis, N.; Petousis, M.; Korlos, A.; Velidakis, E.; Mountakis, N.; Charou, C.; Myftari, A. Strain Rate Sensitivity of Polycarbonate and Thermoplastic Polyurethane for Various 3D Printing Temperatures and Layer Heights. *Polymers*. 2021, *13*(16), 2752.
- [184] Reich, M. J.; Woern, A. L.; Tanikella, N. G.; Pearce, J. M. Mechanical Properties and Applications of Recycled Polycarbonate Particle Material Extrusion-Based Additive Manufacturing. *Materials*. 2019, *12*(10), 1642.
- [185] Vidakis, N.; Petousis, M.; Velidakis, E.; Spiridaki, M.; Kechagias, J. D. Mechanical Performance of Fused Filament Fabricated and 3D-Printed Polycarbonate Polymer and Polycarbonate/Cellulose Nanofiber Nanocomposites. *Fibers*. 2021, *9*(11), 74.
- [186] Vidakis, N.; Petousis, M.; Tzounis, L.; Maniadi, A.; Velidakis, E.; Mountakis, N.; Kechagias, J. D. Sustainable Additive Manufacturing: Mechanical Response of Polyamide 12 over Multiple Recycling Processes. *Materials*. 2021, *14*(2), 466.
- [187] Rahim, T. N. A. T.; Abdullah, A. M.; Md Akil, H.; Mohamad, D.; Rajion, Z. A. The Improvement of Mechanical and Thermal Properties of Polyamide 12 3D Printed Parts by Fused Deposition Modelling. *Express Polym. Lett.* 2017, *11*(12), 963–982.
- [188] Leng, J.; Gu, X.; Hong, R.; Zhang, J. Tailored Crystalline Structure and Enhanced Impact Strength of Isotactic Polypropylene/ High-Density Polyethylene Blend by Controlling the Printing Speed of Fused Filament Fabrication. *J. Mater. Sci.* 2020, *55*(28), 14058–14073.
- [189] Vidakis, N.; Petousis, M.; Velidakis, E.; Tzounis, L.; Mountakis, N.; Kechagias, J.; Grammatikos, S. Optimization of the Filler Concentration on Fused Filament Fabrication 3D Printed Polypropylene with Titanium Dioxide Nanocomposites. *Materials*. 2021, *14*(11), 3076.
- [190] Cao, S.; Yu, D.; Xue, W.; Zeng, Z.; Zhu, W. Synthesis and Properties of Modified PBT for FDM. *Rapid Prototyp. J.* 2017, *23* (4), 804–810.
- [191] Kechagias, J. D.; Fountas, N. A.; Ninikas, K.; Petousis, M.; Vidakis, N.; Vaxevanidis, N. Surface Characteristics Investigation of 3D-Printed PET-G Plates during CO₂ Laser Cutting. *Mater. Manuf. Process.* 2021, 1–11.

- [192] Honigmann, P.; Sharma, N.; Okolo, B.; Popp, U.; Msallem, B.; Thieringer, F. M. Patient-Specific Surgical Implants Made of 3D Printed PEEK: Material, Technology, and Scope of Surgical Application. *BioMed. Res. Int.* 2018, 2018, 1–8.
- [193] McLauchlin, A. R.; Ghita, O. R.; Savage, L. Studies on the Reprocessability of Poly(Ether Ether Ketone) (PEEK). *J. Mater. Process. Technol.* 2014, 214(1), 75–80.
- [194] Garcia-Leiner, M.; Streifel, B.; Başgöl, C.; MacDonald, D. W.; Kurtz, S. M. Characterization of Polyaryletherketone (PAEK) Filaments and Printed Parts Produced by Extrusion-based Additive Manufacturing. *Polym. Int.* 2021, 70(8), 1128–1136.
- [195] Ni, F.; Wang, G.; Zhao, H. Fabrication of Water-Soluble Poly(Vinyl Alcohol)-Based Composites with Improved Thermal Behavior for Potential Three-Dimensional Printing Application. *J. Appl. Polym. Sci.* 2017, 134, 24.
- [196] Park, S. J.; Lee, J. E.; Park, J. H.; Lee, N. K.; Lyu, M.-Y.; Park, K.; Koo, M. S.; Cho, S. H.; Son, Y.; Park, S.-H. Enhanced Solubility of the Support in an FDM-Based 3D Printed Structure Using Hydrogen Peroxide under Ultrasonication. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2018, 2018, 1–10.
- [197] Mizera, A.; Bednarik, M.; Mizera, M.; Tomanova, K.; Mohorko, M. *Tensile Impact Behaviour of 3D Printed Parts on FFF/FDM Printer Zortrax M200*; MATEC Web Conf.: France, 2018; Vol. 210. 04049.
- [198] Samouh, Z.; Molnar, K.; Boussu, F.; Cherkaoui, O.; El Moznine, R. Mechanical and Thermal Characterization of Sisal Fiber Reinforced Polylactic Acid Composites. *Polym. Adv. Technol.* 2019, 30(3), 529–537.
- [199] Santo, J.; Penumakala, P. K.; Adusumalli, R. B. Mechanical and Electrical Properties of Three-dimensional Printed Polylactic Acid–Graphene–Carbon Nanofiber Composites. *Polym. Compos.* 2021, 42(7), 3231–3242.
- [200] Zgryza, Ł.; Raczyńska, A.; Paśnikowska-Łukaszuk, M. Thermovisual Measurements of 3D Printing of ABS and PLA Filaments. *Adv. Sci. Technol. Res. J.* 2018, 12(3), 266–271.

- [201] Yusoff, R. B.; Takagi, H.; Nakagaito, A. N. Tensile and Flexural Properties of Polylactic Acid-Based Hybrid Green Composites Reinforced by Kenaf, Bamboo and Coir Fibers. *Ind. Crop Prod.* 2016, 94, 562–573.
- [202] Lanzotti, A.; Martorelli, M.; Maietta, S.; Gerbino, S.; Penta, F.; Gloria, A. A Comparison between Mechanical Properties of Specimens 3D Printed with Virgin and Recycled PLA. *Procedia CIRP.* 2019, 79, 143–146.
- [203] Soares, J. B.; Finamor, J.; Silva, F. P.; Roldo, L.; Cândido, L. H. Analysis of the Influence of Polylactic Acid (PLA) Colour on FDM 3D Printing Temperature and Part Finishing. *Rapid Prototyp. J.* 2018, 24(8), 1305–1316.
- [204] Ahn, S.; Montero, M.; Odell, D.; Roundy, S.; Wright, P. K. Anisotropic Material Properties of Fused Deposition Modeling ABS. *Rapid Prototyp. J.* 2002, 8(4), 248–257.
- [205] Chockalingam, K.; Jawahar, N.; Praveen, J. Enhancement of Anisotropic Strength of Fused Deposited ABS Parts by Genetic Algorithm. *Mater. Manuf. Process.* 2016, 31(15), 2001–2010.
- [206] Kechagias, J.; Ninikas, K.; Petousis, M.; Vidakis, N. Laser Cutting of 3D Printed Acrylonitrile Butadiene Styrene Plates for Dimensional and Surface Roughness Optimization. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2021.
- [207] Corsi, M.; Bagassi, S.; Moruzzi, M. C.; Weigand, F. Additively Manufactured Negative Stiffness Structures for Shock Absorber Applications. *Mech. Adv. Mater. Struct.* 2020, 1–12.
- [208] Cho, S. H.; Oh, S. H.; Lee, J. H. Fabrication and Characterization of Porous Alginate/Polyvinyl Alcohol Hybrid Scaffolds for 3D Cell Culture. *J. Biomater. Sci. Polym. Educ.* 2005, 16(8), 933–947.
- [209] Jia, N.; Fraenkel, H. A.; Kagan, V. A. Effects of Moisture Conditioning Methods on Mechanical Properties of Injection Molded Nylon 6. *J. Reinf. Plast. Compos.* 2004, 23(7), 729–737.

- [210] Barrios, J. M.; Romero, P. E. Improvement of Surface Roughness and Hydrophobicity in PETG Parts Manufactured via Fused Deposition Modeling (FDM): An Application in 3D Printed Self-Cleaning Parts. *Materials*. 2019, *12*(15), 2499.
- [211] Kumar, R.; Singh, R.; Farina, I. On the 3D Printing of Recycled ABS, PLA and HIPS Thermoplastics for Structural Applications. *PSU Res. Rev.* 2018, *2*(2), 115–137.
- [212] Salazar-Martín, A. G.; Pérez, M. A.; García-Granada, -A.-A.; Reyes, G.; Puigoriol-Forcada, J. M. A Study of Creep in Polycarbonate Fused Deposition Modelling Parts. *Mater. Des.* 2018, *141*, 414–425.
- [213] Chen, R. K.; Lo, T. T.; Chen, L.; Shih, A. J. Nano-CT Characterization of Structural Voids and Air Bubbles in Fused Deposition Modeling for Additive Manufacturing. In *ASME 2015 International Manufacturing Science and Engineering Conference*; Charlotte: North Carolina, USA, 2015; Vol. 1:Processing.
- [214] Verma, D.; Dong, Y.; Sharma, M.; Chaudhary, A. K. Advanced Processing of 3D Printed Biocomposite Materials Using Artificial Intelligence. *Mater. Manuf. Process.* 2021, 1–21.
- [215] Vidakis, N.; Petousis, M.; Velidakis, E.; Mountakis, N.; Fischer-Griffiths, P. E.; Grammatikos, S. A.; Tzounis, L. Mechanical Reinforcement Course of 3D Printed Polypropylene–Antimony Doped Tin Oxide Nanocomposites versus Filler Loading. *Adv. Compos. Mater.* 2021, 1–22.
- [216] Vidakis, N.; Petousis, M.; Kourinou, M.; Velidakis, E.; Mountakis, N.; Fischer-Griffiths, P. E.; Grammatikos, S.; Tzounis, L. Additive Manufacturing of Multifunctional Polylactic Acid (PLA)—multiwalled Carbon Nanotubes (MWCNTs) Nanocomposites. *Nanocomposites*. 2021, *7*(1), 184–199.
- [217] Rafiee, M.; Abidnejad, R.; Ranta, A.; Ojha, K.; Karakoç, A.; Paltakari, J. Exploring the Possibilities of FDM Filaments Comprising Natural Fiber-Reinforced Biocomposites for Additive Manufacturing. *AIMS Mater. Sci.* 2021, *8*(4), 524–537.

- [218] Martinez, L.; Palessonga, D.; Roquefort, P.; Chevalier, A.; Maalouf, A.; Ville, J.; Laur, V. Development of a High Temperature Printable Composite for Microwave Absorption Applications. *AIMS Mater. Sci.* 2021, 8(5), 739–747.
- [219] Zhang, Z.; Demir, K. G.; Gu, G. X. Developments in 4D-Printing: A Review on Current Smart Materials, Technologies, and Applications. *Int. J. Smart Nano Mater.* 2019, 10(3), 205–224.
- [220] Parmar, H.; Khan, T.; Tucci, F.; Umer, R.; Carlone, P. Advanced Robotics and Additive Manufacturing of Composites: Towards a New Era in Industry 4.0. *Mater. Manuf. Process.* 2021, 1–35.
- [221] Sukindar, N. A.; Ariffin, M. K. A.; Baharudin, B. T. H. T.; Jaafar, C. N. A.; Ismail, M. I. S. Analyzing the Effect of Nozzle Diameter in Fused Deposition Modeling for Extruding Polylactic Acid Using Open Source 3D Printing. *J. Teknol.* 2016, 78(10).
- [222] Bakrani Balani, S.; Chabert, F.; Nassiet, V.; Cantarel, A. Influence of Printing Parameters on the Stability of Deposited Beads in Fused Filament Fabrication of Poly(Lactic) Acid. *Addit. Manuf.* 2019, 25, 112–121.
- [223] Han, S.; Xiao, Y.; Qi, T.; Li, Z.; Zeng, Q. Design and Analysis of Fused Deposition Modeling 3D Printer Nozzle for Color Mixing. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2017, 2017, 1–12.
- [224] Reiner, T.; Carr, N.; Měch, R.; Št'ava, O.; Dachsbacher, C.; Miller, G. Dual-Color Mixing for Fused Deposition Modeling Printers. *Comp. Graph. Forum.* 2014, 33(2), 479–486.
- [225] Ali, M.; Mir-Nasiri, H.; Ko, N.; L, W. Multi-Nozzle Extrusion System for 3D Printer and Its Control Mechanism. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016, 86(1–4), 999–1010.
- [226] Khalil, S.; Nam, J.; Sun, W. Multi-nozzle Deposition for Construction of 3D Biopolymer Tissue Scaffolds. *Rapid Prototyp. J.* 2005, 11(1), 9–17.
- [227] Widden, M.; Gunn, K. Design–Build–Test of Model Aerofoils for Engineering Education Using FDM. *Virtual Phys. Prototyp.* 2010, 5 (4), 189–194.

- [228] Canessa, E.; Fonda, C.; Zennaro, M.; Deadline, N. Low--cost 3D Printing for Science, Education and Sustainable Development. *Low-Cost 3D Print.* 2013, *11*, 1.
- [229] Horta, J. F.; Simões, F. J. P.; Mateus, A. Large Scale Additive Manufacturing of Eco-Composites. *Int. J. Mater. Form.* 2018, *11* (3), 375–380.
- [230] Zhang, D.; Li, Z.; Qin, S.; Han, S. Optimization of Vibration Characteristics of Fused Deposition Modeling Color 3D Printer Based on Modal and Power Spectrum Method. *Appl. Sci.* 2019, *9* (19), 4154.
- [231] Rao, P. K.; Liu, J. (Peter); Roberson, D.; Kong, Z. (James); Williams, C. Online Real-Time Quality Monitoring in Additive Manufacturing Processes Using Heterogeneous Sensors. *J. Manuf. Sci. Eng.* 2015, *137*(6), 6.
- [232] Shen, X.; Wang, Q.; Fu, Z. Y.; Bai, S. W.; Sun, Z. Y. Dynamic States Specific Analysis for Belt Conveyor Based on FDM. *Appl. Mech. Mater.* 2013, *278–280*, 27–30.
- [233] Floyd, E. L.; Wang, J.; Regens, J. L. Fume Emissions from a Low-Cost 3-D Printer with Various Filaments. *J. Occup. Environ. Hyg.* 2017, *14*(7), 523–533.
- [234] Lyu, J.; Manoochehri, S. Error Modeling and Compensation for FDM Machines. *Rapid Prototyp. J.* 2019, *25*(10), 1565–1574.
- [235] Hernandez, D. Factors Affecting Dimensional Precision of Consumer 3D Printing. *Int. J. Aviat. Aeronaut.* 2015.
- [236] Tsiolikas, A.; Mikrou, T.; Vakouftsi, F.; Aslani, K. E.; Kechagias, J. Robust Design Application for Optimizing ABS Fused Filament Fabrication Process: A Case Study. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2019, *564*(1), 012021.
- [237] Saad, M. S.; Nor, A. M.; Baharudin, M. E.; Zakaria, M. Z.; Aiman, A. F. Optimization of Surface Roughness in FDM 3D Printer Using Response Surface Methodology, Particle Swarm Optimization, and Symbiotic Organism Search Algorithms. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019, *105*(12), 5121–5137.

- [238] Vahabli, E.; Rahmati, S. Application of an RBF Neural Network for FDM Parts' Surface Roughness Prediction for Enhancing Surface Quality. *Int. J. Precis. Eng.* 2016, *17*(12), 1589–1603.
- [239] Mahapatra, S. S.; Sood, A. K. Bayesian Regularization-Based Levenberg–Marquardt Neural Model Combined with BFOA for Improving Surface Finish of FDM Processed Part. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2012, *60*(9–12), 1223–1235.
- [240] Boschetto, A.; Giordano, V.; Veniali, F. Surface Roughness Prediction in Fused Deposition Modelling by Neural Networks. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2013, *67*(9–12), 2727–2742.
- [241] Vijayaraghavan, V.; Garg, A.; Lam, J. S. L.; Panda, B.; Mahapatra, S. S. Process Characterisation of 3D-Printed FDM Components Using Improved Evolutionary Computational Approach. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2015, *78*(5–8), 781–793.
- [242] Wankhede, V.; Jagetiya, D.; Joshi, A.; Chaudhari, R. *Experimental Investigation of FDM Process Parameters Using Taguchi Analysis*; Mater. Proc: Today, 2020. Vol. 27. 2117–2120.
- [243] Srivastava, M.; Rathee, S. Optimisation of FDM Process Parameters by Taguchi Method for Imparting Customised Properties to Components. *Virtual Phys. Prototyp.* 2018, *13*(3), 203–210.
- [244] Ippolito, R.; Iuliano, L.; Gatto, A. Benchmarking of Rapid Prototyping Techniques in Terms of Dimensional Accuracy and Surface Finish. *CIRP Annals.* 1995, *44*(1), 157–160. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62296-3.
- [245] Chung Wang, C.; Lin, T.; Hu, S. Optimizing the Rapid Prototyping Process by Integrating the Taguchi Method with the Gray Relational Analysis. *Rapid Prototyp. J.* 2007, *13*(5), 304–315.

- [246] Noriega, A.; Blanco, D.; Alvarez, B. J.; Garcia, A. Dimensional Accuracy Improvement of FDM Square Cross-Section Parts Using Artificial Neural Networks and an Optimization Algorithm. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2013, 69(9–12), 2301–2313.
- [247] Johnson, M.; Rowell, W.; Deason, M.; Eubanks M, B. Comparative Evaluation of an Open-Source FDM System. *Rapid Prototyp. J.* 2014, 20(3), 205–214.
- [248] Moza, Z.; Kitsakis, K.; Kechagias, J.; Mastorakis, N. Optimizing Dimensional Accuracy of Fused Filament Fabrication Using Taguchi Design. In *14th Int. Conf. Instr. Measur. Circ. Systems (IMCAS-15)*, Salerno, Italy, 27–29 June 2015; pp 110–114.
- [249] Kitsakis, K.; Alabey, P.; Kechagias, J.; Vaxevanidis, N. A Study of the Dimensional Accuracy Obtained by Low Cost 3D Printing for Possible Application in Medicine. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2016, 161, 012025. DOI: 10.1088/1757-899X/161/1/012025.
- [250] Boschetto, A.; Bottini, L. Design for Manufacturing of Surfaces to Improve Accuracy in Fused Deposition Modeling. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 2016, 37, 103–114.
- [251] Choi, Y.-H.; Kim, C.-M.; Jeong, H.-S.; Youn, J.-H.; Choi, Y.-H.; Kim, C.-M.; Jeong, H.-S.; Youn, J.-H. Influence of Bed Temperature on Heat Shrinkage Shape Error in FDM Additive Manufacturing of the ABS-Engineering Plastic. *World J. Eng. Technol.* 2016, 4(3), 186–192.
- [252] Polak, R.; Sedlacek, F.; Raz, K. Determination of FDM Printer Settings with Regard to Geometrical Accuracy. In *28th DAAAM Int. Symposium*; Katalinic, B., Ed.; DAAAM International: Vienna, Austria, 2017; pp 0561–0566.
- [253] Mohamed, O. A.; Masood, S. H.; Bhowmik, J. L. Experimental Investigation for Dynamic Stiffness and Dimensional Accuracy of FDM Manufactured Part Using IV-Optimal Response Surface Design. *Rapid Prototyp. J.* 2017, 23(4), 736–749.
- [254] Equbal, A.; Sood, A. K.; Ansari, A. K.; Equbal, A. Optimization of Process Parameters of FDM Part for Minimizing Its Dimensional Inaccuracy. *Int. J. Mech. Prod. Eng. Res. Develop.* 2017, 7(2), 57–65.

- [255] Alsoufi, M. S.; Elsayed, A. E. How Surface Roughness Performance of Printed Parts Manufactured by Desktop FDM 3D Printer with PLA+ Is Influenced by Measuring Direction. *Am. J. Mech. Eng.* 2017, 5(5), 211–222.
- [256] Redza Ramli, F.; Afdhal Nazan, M.; Sudin, M.; Ramli, F. R.; M Faudzie, M. S.; Nazan, M. A.; Alkahari, M. R.; Sudin, M. N.; Mat, S.; Khalil, S. N. Dimensional Accuracy and Surface Roughness of Part Features Manufactured by Open Source 3D Printer. *ARPJ. Eng. Appl.* 2018, 13(3), 1139–1144.
- [257] Alafaghani, A.; Qattawi, A. Investigating the Effect of Fused Deposition Modeling Processing Parameters Using Taguchi Design of Experiment Method. *J. Manuf. Process.* 2018, 36, 164–174.
- [258] Minetola, P.; Galati, M. A Challenge for Enhancing the Dimensional Accuracy of A Low-Cost 3D Printer by Means of Self-Replicated Parts. *Addit. Manuf.* 2018, 22, 256–264.
- [259] García Plaza, E.; Núñez López, P.; Caminero Torija, M.; Chacón Muñoz, J. Analysis of PLA Geometric Properties Processed by FFF Additive Manufacturing: Effects of Process Parameters and Plate-Extruder Precision Motion. *Polymers.* 2019, 11(10), 1581.
- [260] Akbaş, O. E.; Hira, O.; Hervan, S. Z.; Samankan, S.; Altınkaynak, A. Dimensional Accuracy of FDM-Printed Polymer Parts. *Rapid Prototyp. J.* 2019, 26(2), 288–298.
- [261] Jain, R.; Nauriyal, S.; Gupta, V.; Khas, K. S. Effects of Process Parameters on Surface Roughness, Dimensional Accuracy and Printing Time in 3D Printing. *Adv. Prod. Ind. Eng.* 2021, 187–197.
- [262] Elkaseer, A.; Schneider, S.; Scholz, S. G. Experiment-Based Process Modeling and Optimization for High-Quality and Resource-Efficient FFF 3D Printing. *Appl. Sci.* 2020, 10(8), 2899.
- [263] Chohan, J. S.; Mittal, N.; Kumar, R. Parametric Optimization of Fused Deposition Modeling Using Learning Enthusiasm Enabled Teaching Learning Based Algorithm. *SN Appl. Sci.* 2020, 2(12), 1978.

- [264] Fountas, N. A.; Kitsakis, K.; Aslani, K.-E.; Kechagias, J. D.; Vaxevanidis, N. M. An Experimental Investigation of Surface Roughness in 3D-Printed PLA Items Using Design of Experiments. *Proc. Inst. Mech. Eng. J: J. Eng. Tribol.* 2021, 135065012110593.
- [265] Buj-Corral, I.; Bagheri, A.; Sivatte-Adroer, M. Effect of Printing Parameters on Dimensional Error, Surface Roughness and Porosity of FFF Printed Parts with Grid Structure. *Polymers.* 2021, 13(8), 1213.
- [266] Huang, Q.; Zhang, J.; Sabbaghi, A.; Dasgupta, T. Optimal Offline Compensation of Shape Shrinkage for Three-Dimensional Printing Processes. *IIE Trans.* 2015, 47(5), 431–441.
- [267] Quarto, M.; Carminati, M.; D’Urso, G. Density and Shrinkage Evaluation of AISI 316L Parts Printed via FDM Process. *Mater. Manuf. Process.* 2021, 36(13), 1535–1543.
- [268] Kamio, T.; Hayashi, K.; Onda, T.; Takaki, T.; Shibahara, T.; Yakushiji, T.; Shibui, T.; Kato, H. Utilizing a Low-Cost Desktop 3D Printer to Develop a “One-stop 3D Printing Lab” for Oral and Maxillofacial Surgery and Dentistry Fields. *3D Print. Med.* 2018, 4 (1), 6.

2. Εξέταση ποιότητας λεπτότοιχων τεμαχίων από PLA

Στην έρευνα που ακολουθεί διερευνήθηκε η ποιοτική απόδοση λεπτότοιχων μοντέλων που κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο FFF. Ο σχεδιασμός των πειραμάτων περιλάμβανε την κατασκευή εννέα μοντέλων από PLA, ίδιου μεγέθους, από έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή χαμηλού κόστους. Μελετήθηκε η επίδραση δυο παραμέτρων, της θερμοκρασίας του ακροφυσίου και του πάχους τοιχώματος στη διαστατική ακρίβεια αλλά και στην τραχύτητα των εκτυπωμένων δοκιμίων. Μετρήθηκαν οι εξωτερικές διαστάσεις σε X και Y κατεύθυνση με ένα μικρόμετρο και οι τέσσερις παράμετροι τραχύτητας της επιφάνειας (R_a , R_z , R_t , R_{sm}) με ένα τραχύμετρο. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν δυο τεχνικές βελτιστοποίησης (Taguchi, Grey) μαζί με τη στατιστική ανάλυση για να εξεταστεί πως η θερμοκρασία και το πάχος τοιχώματος επιδρά στην ακρίβεια των διαστάσεων και την ποιότητα της επιφάνειας των δοκιμίων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η υψηλή θερμοκρασία του ακροφυσίου και οι ενδιάμεσες τιμές του πάχους τοιχώματος βελτιστοποιούν τόσο τη διαστατική ακρίβεια όσο και την τραχύτητα και επίσης διαπιστώθηκε ότι η θερμοκρασία είναι η πιο σημαντική παράμετρος σε σχέση με το πάχος τοιχώματος.

Η προσθετική κατασκευή είναι μια προηγμένη τεχνολογία κατασκευής καθώς μοντέλα σχεδιασμένα σε προγράμματα CAD χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση των φυσικών τους πρωτοτύπων προσθέτοντας υλικό στρώση στρώση [269]. Αυτή η μέθοδος έχει το όφελος παραγωγής σύνθετων εξαρτημάτων σε μικρό χρονικό διάστημα αλλά και με μικρότερο κόστος σε σχέση με άλλες παραδοσιακές διαδικασίες παραγωγής [270, 271]. Η προσθετική κατασκευή έχει βρει εφαρμογές σε διάφορους τομείς όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική, η ιατρική, η μόδα και πολλούς άλλους [272]. Η μέθοδος FFF είναι μια από τις πιο διαδεδομένες προσθετικές διαδικασίες κατασκευής [273-275]. Σε αυτή τη μέθοδο, όπως έχει προαναφερθεί, ένα πολυμερές υλικό θερμαίνεται και εξωθείται από ένα ζεστό ακροφύσιο το οποίο το αποθέτει ελεγχόμενα στην πλατφόρμα εκτύπωσης για την κατασκευή ενός αντικειμένου [276]. Το κύριο πλεονέκτημα της διαδικασίας FFF είναι η απλότητά της, η υψηλή ταχύτητα εκτύπωσης και το χαμηλό κόστος της [277, 278].

Σε ερευνητικό επίπεδο έχουν πραγματοποιηθεί πάρα πολλά πειράματα σχετικά με την επίδραση των παραμέτρων τόσο στη διαστατική ακρίβεια όσο και στην τραχύτητα της επιφάνειας των πρωτοτύπων που εκτυπώνονται με την FFF διαδικασία. Τόσο η διαστατική

ακρίβεια όσο και η τραχύτητα αποτελούν δυο κύριους δείκτες ποιότητας στη διαδικασία της μηχανικής κατασκευής, ειδικά στην προσθετική κατασκευή [279].

Η ακρίβεια των διαστάσεων αναφέρεται στην ομοιότητα των πραγματικών διαστάσεων ενός εκτυπωμένου μοντέλου με τις ονομαστικές διαστάσεις που υπάρχουν στο ηλεκτρονικό αρχείο CAD. Αντικείμενα με καλύτερη διαστατική ακρίβεια μπορούν να επιτύχουν πιο επιθυμητές ανοχές [280]. Η ποιότητα της επιφάνειας των εκτυπωμένων αντικειμένων χαρακτηρίζεται από την τραχύτητα της επιφάνειας. Χαμηλότερες τιμές τραχύτητας οδηγούν σε καλύτερη υφή της επιφάνειας. Στη συνέχεια ακολουθεί αναφορά σε ερευνητικό επίπεδο του προσδιορισμού των παραμέτρων εκτύπωσης με την FFF διαδικασία όπου επηρεάζουν τόσο την ακρίβεια των διαστάσεων όσο και την τραχύτητα των εκτυπωμένων προϊόντων.

2.1 Αναφορές παρόμοιων πειραμάτων

Ο Alafaghani [281] ερεύνησε την επίδραση τεσσάρων παραμέτρων διεργασίας όπως το ποσοστό πλήρωσης, το μοτίβο πλήρωσης, το πάχος στρώσης και τη θερμοκρασία εξώθησης στις μηχανικές ιδιότητες αλλά και στην ακρίβεια των διαστάσεων από εξαρτήματα που έχουν εκτυπωθεί με την FFF μέθοδο. Χρησιμοποιήθηκε ως υλικό εκτύπωσης το PLA και εφαρμόστηκε για το σχεδιασμό των πειραμάτων ένας πίνακας Taguchi L9 ορθογωνικής διάταξης. Διαπιστώθηκε ότι οι χαμηλότερες τιμές της θερμοκρασίας εξώθησης, του πάχους στρώσης και του ποσοστού πλήρωσης (δηλαδή 190°C, 0.2 mm και 20% αντίστοιχα) μαζί με το εξαγωνικής μορφής μοτίβο πλήρωσης ελαχιστοποιούσε τα σφάλματα των διαστάσεων. Ο Hyndhavi [282] μελέτησε την ακρίβεια των διαστάσεων εκτυπωμένων πρωτοτύπων με την μέθοδο FFF με τη χρήση της ανάλυσης κατά Grey. Χρησιμοποιήθηκαν δυο υλικά εκτύπωσης (ABS και PLA) και εξετάστηκε η επίδραση στη διαστασιολογική ακρίβεια των παραμέτρων του πάχους στρώσης, της γωνίας raster και του προσανατολισμού χτισίματος του μοντέλου. Στην περίπτωση του ABS, οι τιμές 0.2 mm πάχους στρώσης, 0° γωνίας raster και 90° προσανατολισμού κατασκευής βελτιστοποιούσαν την ακρίβεια των διαστάσεων ενώ στην περίπτωση του PLA, στις αντίστοιχες παραμέτρους, οι τιμές 0.2mm, 0°, 0° βρέθηκαν ως οι τιμές με την προσδοκώμενη βελτιστοποίηση. Και για τα δυο αυτά υλικά, η γωνία raster και ο προσανατολισμός κατασκευής βρέθηκε ότι επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια των διαστάσεων. Ο Sood [283] χρησιμοποίησε τη μέθοδο των Grey, Taguchi για να μελετήσει την επίδραση του πάχους στρώσης, του προσανατολισμού εκτύπωσης, της γωνίας raster, του διάκενου αέρα και του πλάτους raster στην ακρίβεια των διαστάσεων εκτυπωμένων πρωτοτύπων από PLA. Εφαρμόστηκε ένας ορθογωνικής διάταξης πίνακας Taguchi L27 για το σχεδιασμό πειραμάτων. Η ανάλυση κατά Grey έδειξε ότι το πάχος στρώσης 0.178 mm, ο προσανατολισμός του μοντέλου 0°, η γωνία raster 0°, το πλάτος raster των 0.4564 mm και το διάκενο αέρα 0.008 mm βελτιστοποιεί τη συνολική διαστατική ακρίβεια. Επιπλέον, βρέθηκε ότι μεγάλος αριθμός παραμέτρων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μπορεί να έχουν επιρροή στα σφάλματα των διαστάσεων των μοντέλων. Η Moza [284] εξέτασε τη διαστατική ακρίβεια εκτυπωμένων πρωτοτύπων με την τεχνολογία FFF. Για το σχεδιασμό των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ένας ορθογωνικής διάταξης πίνακας L9 και οι παράμετροι που ελέγχθηκαν στα υλικά PLA και ABS ήταν το ποσοστό πλήρωσης (20%, 50%, 70%), ο αριθμός των κελυφών (1, 2, 3) και το πάχος στρώσης (0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm). Διαπιστώθηκε ότι το PLA με ποσοστό πλήρωσης 20% έδινε την καλύτερη ακρίβεια στις

διαστάσεις των μοντέλων, ενώ το πάχος των στρωμάτων και ο αριθμός των κελυφών ήταν οι πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη διαστατική ακρίβεια. Ο Tsolikas [285] πραγματοποίησε μια μελέτη σχετικά με την ακρίβεια διαστάσεων σε μοντέλα από ABS με την FFF διαδικασία. Τέσσερις ήταν οι παράμετροι που μελετήθηκαν, η γωνία εναπόθεσης, το πάχος στρώσης, το ποσοστό και το μοτίβο πλήρωσης. Ως αποτέλεσμα αναφέρθηκε ότι το πάχος στρώσης ήταν η κυρίαρχη παράμετρος που επηρεάζει τη διαστατική ακρίβεια. Ο Mahmood [286] διεξήγαγε μια πειραματική έρευνα σχετικά με τη διακύμανση των επιπτώσεων στις ρυθμίσεις παραμέτρων εκτύπωσης για την ακρίβεια των διαστάσεων των μοντέλων που κατασκευάζονται με την FFF διαδικασία. Σχεδιάστηκε ένα πρωτότυπο με μια ποικιλία γεωμετρικών χαρακτηριστικών και χρησιμοποιήθηκε ένας πίνακας Taguchi L27 για το σχεδιασμό των πειραμάτων και της στατιστικής ανάλυσης ώστε να εντοπισθεί η σχέση που υπάρχει μεταξύ των τιμών των παραμέτρων. Αυτές οι παράμετροι ήταν η θερμοκρασία του θαλάμου, το πάχος στρώσης, η θερμοκρασία εξώθησης, η θερμοκρασία πλατφόρμας, ο αριθμός των κελυφών, ο πολλαπλασιαστής του διαστήματος πλήρωσης του κελύφους, η εσωτερική απόσταση του πολλαπλασιαστή, το πάχος βάσης και οροφής, το μοτίβο πλήρωσης, η πυκνότητα πλήρωσης, η ταχύτητα πλήρωσης, η ταχύτητα του περιγράμματος και η ένθετη ταχύτητα. Βρέθηκε ότι ο αριθμός των κελυφών, ο πολλαπλασιαστής της απόστασης, η θερμοκρασία του θαλάμου, ο πολλαπλασιαστής του διαστήματος πλήρωσης του κελύφους και η πυκνότητα πλήρωσης ήταν οι παράμετροι που επηρέαζαν περισσότερο στην εκτύπωση. Ο Singh [287] διερεύνησε τις παραμέτρους της διαδικασίας FFF και CVS (chemical vapour smoothing) εξομάλυνσης χημικών ατμών που επηρεάζουν τις διαστάσεις εκτυπωμένων μοντέλων από ABS υλικό. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν ο προσανατολισμός και η πυκνότητα του μοντέλου για τη διαδικασία FFF ενώ για τη CVS ήταν ο χρόνος επίδρασης των χημικών ατμών. Διαπιστώθηκε ότι ο προσανατολισμός αλλά και η πυκνότητα του μοντέλου είχαν σημαντικό αντίκτυπο στην ακρίβεια των διαστάσεων. Οι Camproseco και Negrete [288] διεξήγαγαν μια μελέτη σχετικά με τη βελτιστοποίηση τριών δεικτών ποιότητας της FFF διαδικασίας, το χρόνο διεργασίας, την κατανάλωση ενέργειας και τη διαστατική ακρίβεια. Χρησιμοποιήθηκε ένας πίνακας Taguchi L27 για το σχεδιασμό των πειραμάτων ενώ με στατιστική ανάλυση προσδιορίστηκε η επίδραση πέντε παραμέτρων εκτύπωσης (μοτίβο πλήρωσης, πάχος στρώσης, γωνία προσανατολισμού, επίπεδο εκτύπωσης και θέσης του τεμαχίου στην επιφάνεια εκτύπωσης). Διαπιστώθηκε ότι για τη διαστατική ακρίβεια του πλάτους ο κυρίαρχος παράγοντας ήταν το μοτίβο πλήρωσης, ενώ το μήκος και το πάχος του μοντέλου επηρεαζόταν κυρίως από το πάχος στρώσης και το επίπεδο εκτύπωσης αντίστοιχα. Η Aslani [289] χρησιμοποίησε τις στατιστικές μεθόδους Grey, Taguchi για να καθορίσει την επίδραση τεσσάρων παραμέτρων εκτύπωσης, τον αριθμό

κελυφών, τη θερμοκρασία εκτύπωσης, το ρυθμό πλήρωσης και το μοτίβο εκτύπωσης στη διαστατική ακρίβεια των εκτυπωμένων εξαρτημάτων με την FFF διαδικασία. Χρησιμοποιήθηκε ένας πίνακας ορθογωνικής διάταξης L9 για τον πειραματικό σχεδιασμό και το PLA ως υλικό εκτύπωσης. Διαπιστώθηκε ότι η θερμοκρασία εκτύπωσης (θερμοκρασία ακροφυσίου) επηρέαζε περισσότερο τη διαστατική ακρίβεια των μοντέλων.

Πολλές έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί και για τις παραμέτρους που επηρεάζουν την επιφάνεια των μοντέλων που κατασκευάζονται με την FFF διαδικασία. Ο Galantucci [290] εξέτασε την επίδραση των παραμέτρων της μεθόδου FFF στο φινίρισμα της επιφάνειας εκτυπωμένων αντικειμένων από ABS. Ο πειραματικός σχεδιασμός αποτελούνταν από 2^3 πλήρεις παραγοντικές συστοιχίες και οι παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν το πλάτος raster και το πάχος στρώσης. Διαπιστώθηκε ότι τόσο το πάχος στρώσης όσο και το πλάτος του raster επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα της επιφάνειας. Ο Barrios [291] διερεύνησε τις ιδιότητες της επιφάνειας (φινίρισμα, υδρόφοβα χαρακτηριστικά) εκτυπωμένων μοντέλων με την FFF διαδικασία. Εφαρμόστηκε ένας πίνακας πειραμάτων L27 με πέντε παράγοντες (πάχος στρώσης, θερμοκρασία εκτύπωσης, ταχύτητα εκτύπωσης, επιτάχυνση και ρυθμός ροής) και τρεις τιμές. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο ρυθμός ροής και η επιτάχυνση εκτύπωσης ήταν οι παράμετροι με τη μεγαλύτερη επίπτωση στην επιφάνεια των μοντέλων. Η Anitha [292] μελέτησε την επίδραση τριών παραμέτρων (πάχος στρώσης, πλάτος γραμμής υλικού και ταχύτητα εναπόθεσης) στην τραχύτητα της επιφάνειας πρωτοτύπων που κατασκευάστηκαν με την FFF διαδικασία. Για την εξέταση αυτή χρησιμοποιήθηκε ένας πειραματικός σχεδιασμός 2^3 μαζί με τη στατιστική ανάλυση και διαπιστώθηκε ότι το πάχος στρώσης ήταν ο πιο σημαντικός παράγοντας. Ο Perez [293] πραγματοποίησε μια μελέτη σχετικά με τη βελτιστοποίηση της επιφάνειας εκτυπωμένων δειγμάτων PLA με τη μέθοδο FFF. Εξέτασε πέντε παραμέτρους, το πάχος στρώσης, τη διαδρομή εκτύπωσης, την ταχύτητα εκτύπωσης, τη θερμοκρασία εκτύπωσης και το πάχος των τοιχωμάτων. Κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το πάχος στρώσης και το πάχος τοιχωμάτων ήταν οι σημαντικότεροι παράμετροι που έχουν επιρροή στην τραχύτητα της επιφάνειας των μοντέλων. Όταν οι τιμές αυτών των παραμέτρων αυξάνονταν, αντίστοιχα αυξάνονταν και η τραχύτητα με αποτέλεσμα να κατασκευάζεται μια ανεπιθύμητη ποιότητα επιφάνειας. Η ταχύτητα και η θερμοκρασία εκτύπωσης διαπιστώθηκε ότι δεν επηρέαζαν την τραχύτητα της επιφάνειας.

Διάφορες μελέτες έχουν διεξαχθεί προκειμένου να εξετασθεί τόσο η ακρίβεια των διαστάσεων όσο και η τραχύτητα της επιφάνειας εκτυπωμένων μοντέλων με την FFF διαδικασία. Ο Wang [294] μελέτησε την επίδραση έξι παραμέτρων διεργασίας (πάχος στρώσης, γωνία εναπόθεσης, μορφή υποστηρίγματα, προσανατολισμός εναπόθεσης κατά την κατεύθυνση σε άξονα Z και X, θέση εκτύπωσης) στην αντοχή εφελκυσμού, την ακρίβεια

των διαστάσεων και την τραχύτητα της επιφάνειας μοντέλων που κατασκευάστηκαν με την FFF μέθοδο. Ως τεχνικές βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι Taguchi και Gray. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο προσανατολισμός εναπόθεσης προς τον Z άξονα ήταν η πιο σημαντική παράμετρος για την ακρίβεια των διαστάσεων, ενώ το πάχος στρώσης ήταν η πιο σημαντική παράμετρος για την τραχύτητα της επιφάνειας. Επιπλέον, βρέθηκε ότι οι βέλτιστοι συνδυασμοί παραμέτρων για όλα τα αποτελέσματα ελήφθησαν με λιγότερα πειράματα με χρήση της μεθόδου Taguchi σε σύγκριση με τον πλήρη παραγοντικό σχεδιασμό (full factorial design). Ο Nancharaiiah [295] εξέτασε την ακρίβεια των διαστάσεων και την τραχύτητα εκτυπωμένων μοντέλων κατά την FFF διαδικασία με τη χρήση πειραματικού σχεδιασμού και στατιστικής ανάλυσης του Taguchi. Ερευνήσε την επίδραση τεσσάρων παραμέτρων διαδικασίας (πάχος στρώσης, πλάτος διαδρομής, γωνία raster, διάκενο αέρα) με τρεις τιμές για κάθε συντελεστή. Κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το πάχος στρώσης και το πλάτος της διαδρομής είχε μεγάλο αντίκτυπο τόσο στην τραχύτητα της επιφάνειας όσο και στην ακρίβεια των διαστάσεων των μοντέλων. Η γωνία raster βρέθηκε να είναι η πιο σημαντική παράμετρος στην ακρίβεια των διαστάσεων παρά στην τραχύτητα της επιφάνειας. Ο Mohamed [296] ερευνήσε τις παραμέτρους που επηρεάζουν την ποιότητα εκτυπωμένων μοντέλων με την FFF διαδικασία. Στην περίπτωση της τραχύτητας της επιφάνειας, το πάχος στρώσης βρέθηκε να είναι η κυρίαρχη παράμετρος. Επιπλέον, διαπίστωσε ότι η χαμηλότερη τιμή στο πάχος στρώσης και η υψηλότερη θερμοκρασία εκτύπωσης οδηγούσε σε ομαλότερο φινίρισμα επιφάνειας (χαμηλές τιμές τραχύτητας). Σημαντικότεροι παράμετροι που επηρέαζαν τη διαστατική ακρίβεια ήταν το πάχος στρώσης και το κενό αέρα. Οι περισσότερες μελέτες διερευνούν την επίδραση πολύ συγκεκριμένων παραμέτρων όπως το πάχος στρώσης, τον προσανατολισμό του τμήματος, το πλάτος της διαδρομής, το κενό αέρα και τη γωνία raster. Ο Sheoran [277] έκανε μια ανασκόπηση σχετικά με τις παραμέτρους της διαδικασίας που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες και την ποιότητα των εξαρτημάτων που κατασκευάζονται με την τεχνολογία FFF. Διαπίστωσε ότι μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους διεργασίας για τη διαστατική ακρίβεια είναι το πάχος στρώσης. Γενικά, το χαμηλό πάχος στρώσης, η ταχύτητα εκτύπωσης και η θερμοκρασία εξώθησης βελτιστοποιούν τόσο την ακρίβεια των διαστάσεων όσο και την τραχύτητα της επιφάνειας των μοντέλων. Ωστόσο, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για τον προσδιορισμό των επιπτώσεων και άλλων παραμέτρων. Ο Dey [297] διερεύνησε τις παραμέτρους της FFF διεργασίας και τις ρυθμίσεις τους για να προσδιορίσει ποιες από αυτές βελτιστοποιούν τη διαστατική ακρίβεια και την τραχύτητα της επιφάνειας των μοντέλων. Διαπίστωσε ότι επιτυγχάνεται υψηλή ακρίβεια διαστάσεων στις χαμηλές τιμές του πάχους στρώσης, της θερμοκρασίας εξώθησης και του αριθμού κελυφών, ενώ υψηλή ποιότητα

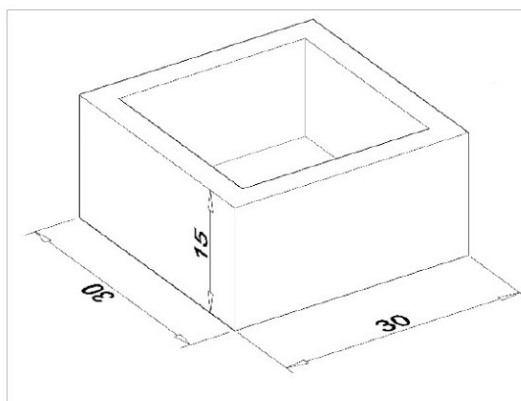
επιφάνειας μπορεί να επιτευχθεί με χαμηλό πάχος στρώσης και υψηλή θερμοκρασία εξώθησης. Παράγοντες όπως το μοτίβο πλήρωσης, η ταχύτητα εκτύπωσης, το πλάτος του κελύφους ή η θερμοκρασία εξώθησης ήταν λιγότερο ερευνητικά εξεταζόμενες σε σύγκριση με το πάχος στρώσης, τον προσανατολισμό κατασκευής, το πλάτος raster ή τον προσανατολισμό του. Επιπλέον, ανέφερε ότι υπάρχουν περιορισμένες μελέτες που βελτιστοποιούν τα χαρακτηριστικά πολλών μοντέλων ταυτόχρονα (βελτιστοποίηση πολλαπλών στόχων).

Με κίνητρο την παραπάνω βιβλιογραφική ανασκόπηση, στην πρώτη μελέτη που ακολουθεί, θα διερευνηθεί η επίδραση δυο παραμέτρων εκτύπωσης, της θερμοκρασίας του ακροφυσίου και του πάχους τοιχώματος, στη διαστατική ακρίβεια και την τραχύτητα των επιφανειών λεπτότοιχων μοντέλων από PLA που έχουν κατασκευαστεί με τη μέθοδο FFF. Ως πειραματικός σχεδιασμός θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος Taguchi (ορθογώνια διάταξη L9) λαμβάνοντας υπόψη τρία επίπεδα για κάθε παράγοντα. Τόσο η μέθοδος Taguchi όσο και η μέθοδος Grey χρησιμοποιούνται ως τεχνικές βελτιστοποίησης, ενώ χρησιμοποιείται στατιστική ανάλυση (ανάλυση μέσου όρου ANOM – Analysis of Means και ανάλυση διακύμανσης ANOVA – Analysis of Variance) για τον προσδιορισμό της επίδρασης των παραμέτρων της διαδικασίας στην ποιότητα των μοντέλων και στις βέλτιστες τιμές τους. Η βελτιστοποίηση της διαστατικής ακρίβειας αλλά και της τραχύτητας μοντέλων που έχουν παραχθεί με την FFF μέθοδο όσον αφορά τη θερμοκρασία του ακροφυσίου αλλά και του πάχους τοιχώματος είναι κάτι που δεν έχει μελετηθεί στο παρελθόν. Μόνο δυο μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί σχετικά με την ακρίβεια διαστάσεων και τις μετρήσεις τραχύτητας της επιφάνειας των FFF μοντέλων με λεπτό τοίχωμα στις οποίες δεν υπάρχει βελτιστοποίηση και δεν έχει γίνει ανάλυση αξιολόγησης [298, 299].

2.2 Υλικά και Μέθοδοι

Σε αυτή την έρευνα δημιουργήθηκε ένα τρισδιάστατο μοντέλο όπως φαίνεται στην εικόνα 9 όπου διακρίνονται και οι ονομαστικές διαστάσεις του. Σχεδιάστηκε στο λογισμικό Autocad (AUTODESK Inc, San Rafael CA, US) και στη συνέχεια μετατράπηκε σε αρχείο STL προσβάσιμο σε λογισμικά που συνεργάζονται οι FFF εκτυπωτές. Το STL μέσω του ελεύθερου λογισμικού Cura τεμαχίστηκε σε ψηφιακές στρώσεις και μετατράπηκε σε κώδικα (G – Code) ώστε να αναγνωριστεί απευθείας από το μηχάνημα που θα κατασκεύαζε τα μοντέλα. Το μηχάνημα αυτό είναι ο χαμηλού κόστους εκτυπωτής Ultimaker Original όπου έχει βραβευτεί για την ακρίβειά του το 2012 και αποτελεί έναν από τους πρώτους και πιο επιτυχημένους εμπορεύσιμα εκτυπωτές που βασίζονται στην FFF διαδικασία. Ορισμένες από τις τεχνικές προδιαγραφές του τρισδιάστατου εκτυπωτή είναι οι παρακάτω :

- Ανάλυση στρώσης : έως 20 μm
- Όγκος κατασκευής : 21x21x20.5 cm
- Ταχύτητα εκτύπωσης : 30-300 mm/s
- Διάμετρος νήματος υλικού : 2.85 mm
- Διάμετρος ακροφυσίου : 0,4 mm
- Θερμοκρασία ακροφυσίου (λειτουργίας) : 180°C - 260°C
- Μη θερμαινόμενη πλατφόρμα



Εικόνα 9. Το τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο και οι ονομαστικές του διαστάσεις σε χιλιοστά (mm)

Όπως προαναφέρθηκε, το υλικό εκτύπωσης που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα είναι το πολυγαλακτικό οξύ (PLA). Έχει διαπιστωθεί ότι το PLA δίνει ακριβέστερα αποτελέσματα στη διαστατική ακρίβεια σε σχέση το ABS υλικό που είναι ευρείας χρήσης στην FFF διαδικασία [284].

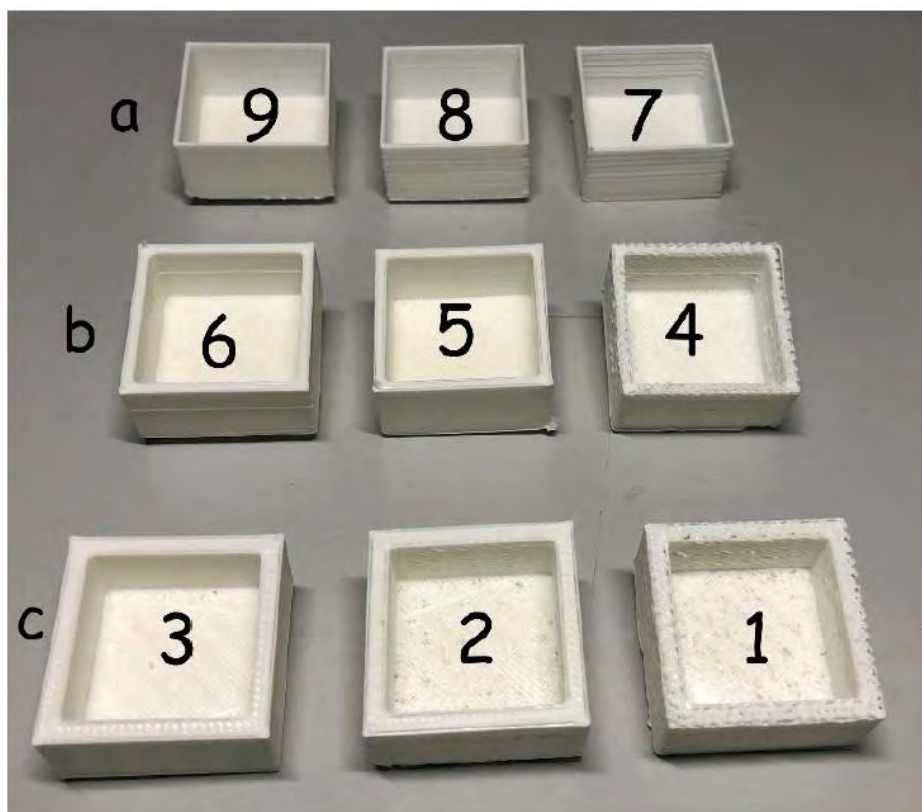
2.3 Επιλογή διαδικασίας παραμέτρων

Όπως προαναφέρθηκε, η ακρίβεια των διαστάσεων και η τραχύτητα της επιφάνειας μοντέλων που κατασκευάζονται με την FFF μέθοδο επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τις παραμέτρους και τις τιμές τους κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης. Οι παράμετροι εκτύπωσης που επηρεάζουν τη διαστατική ακρίβεια και την τραχύτητα της επιφάνειας σε αυτή την πρώτη έρευνα είναι η θερμοκρασία του ακροφυσίου και το πάχος του τοιχώματος. Ελάχιστες μελέτες υπάρχουν σχετικά με την επίδραση αυτών των δυο παραγόντων σε μοντέλα που παράγονται με την FFF μέθοδο. Για την εκτέλεση των πειραμάτων, καθορίστηκαν τρεις τιμές για κάθε παράμετρο διεργασίας. Οι παράμετροι διεργασίας αλλά και οι τιμές τους που χρησιμοποιούνται φαίνονται στον πίνακα 2. Αυτές οι παράμετροι ορίζονται ως εξής :

- Θερμοκρασία ακροφυσίου (εκτύπωσης) : Είναι η θερμοκρασία που θερμαίνει το υλικό εκτύπωσης μέσα στο ακροφύσιο κατά το στάδιο της διαδικασίας εξώθησης, όπως έχει προαναφερθεί. Αυτός ο παράγοντας εξαρτάται από τον τύπο του θερμοπλαστικού που χρησιμοποιείται. Η προτεινόμενη τιμή της θερμοκρασίας για το PLA είναι μεταξύ των 195°C και 230°C [277, 300]. Οι τιμές αυτής της παραμέτρου επιλέχθηκαν έτσι ώστε να βρίσκονται εντός αυτού του εύρους στο πείραμα που περιγράφεται.
- Πάχος τοιχώματος : Αυτή η παράμετρος αφορά τον όρο «λεπτότοιχα μοντέλα» και αποτελεί ένα γεωμετρικό παράγοντα που σπάνια λαμβάνεται υπόψη σε μελέτες σχετικά με την ποιότητα των εξαρτημάτων της FFF μεθόδου. Είναι το πάχος των τοιχωμάτων των μοντέλων όπως φαίνεται στην εικόνα 10. Οι τιμές αυτής της παραμέτρου επιλέχθηκαν σύμφωνα με την ένδειξη ότι το πάχος του τοιχώματος πρέπει να είναι δυο φορές μεγαλύτερο από το μέγεθος της διαμέτρου της κεφαλής (του ακροφυσίου), όπου είναι στην περίπτωση που εξετάζεται 0,4 mm [277, 301].

Parameters	Levels		
	1	2	3
Wall Thickness (mm)	1	2	3
Extraction Temperature (°C)	210	220	230

Πίνακας 2. Οι παράμετροι της FFF διαδικασίας που επιλέχθηκαν και οι τιμές τους.



Εικόνα 10. Τα εννέα εκτυπωμένα μοντέλα. Από αριστερά προς τα δεξιά : Πρώτη σειρά (πάχος τοιχώματος 1 mm): Μοντέλα 9 (230°C), 8 (220°C) και 7 (210°C), (β) Δεύτερη σειρά (πάχος τοιχώματος 2 mm): Μοντέλα 6 (230°C), 5 (220°C) και 4 (210°C), (γ) Τρίτη σειρά (πάχος τοιχώματος 3 mm): Μοντέλα 3 (230°C), 2 (220°C) και 1 (210°C).

Ορισμένες παράμετροι έχουν παραμείνει σταθερές σε όλη τη διαδικασία της εκτύπωσης. Οι τιμές από αυτές τις παραμέτρους έχουν επιλεγεί σύμφωνα με τις βελτιστοποιημένες τιμές που προτείνονται από σχετικές μελέτες που αναφέρθηκαν σε προηγούμενη παράγραφο. Αυτοί οι παράγοντες είναι :

- Πάχος στρώσης : 0.2 mm [281, 282]
- Πυκνότητα πλήρωσης : 20% [284]
- Μοτίβο πλήρωσης : πλέγμα
- Γωνία εναπόθεσης raster : 45°
- Ταχύτητα εκτύπωσης : 100 mm/s [277]
- Προσανατολισμός κατασκευής : 0 [277, 282]
- Θερμοκρασία πλατφόρμας : 20°C
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος : 20°C

2.4 Σχεδιασμός πειράματος

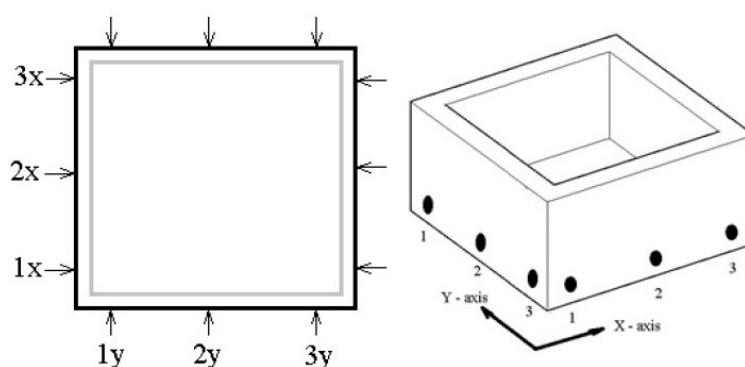
Σε αυτή τη μελέτη, ο πειραματικός σχεδιασμός που χρησιμοποιείται είναι η ορθογώνια διάταξη του Taguchi. Γενικά, η μέθοδος του Taguchi χρησιμοποιείται από πολλούς μηχανικούς και ερευνητές για τη διεξαγωγή πειραμάτων με έναν μικρό αριθμό δοκιμών [302-305]. Θεωρείται μια απλή και αποτελεσματική μέθοδος για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης της ποιότητας και του κόστους [306]. Στη μέθοδο Taguchi είναι υποχρεωτική η επιλογή κατάλληλου ορθογώνιου πίνακα προκειμένου να εξαχθούν στατιστικά έγκυρα συμπεράσματα. Στο πείραμα που αναλύεται υπάρχουν δυο παράμετροι που εξετάζονται με τρεις τιμές ο καθένας και έτσι ο σωστός πειραματικός σχεδιασμός είναι η επιλογή του ορθογώνιου πίνακα L9 [307]. Ο συγκεκριμένος πειραματικός σχεδιασμός έχει χρησιμοποιηθεί σε ποικίλες έρευνες σχετικά με την επίδραση των παραμέτρων της διαδικασίας FFF στην ακρίβεια των διαστάσεων και στην τραχύτητα της επιφάνειας των μοντέλων όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη παράγραφο. Η διάταξη L9 με τις παραμέτρους εκτύπωσης και τις τιμές τους παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 3.

Experiment No.	Wall Thickness (mm)	Extraction Temperature (°C)
1	1	210
2	1	220
3	1	230
4	2	210
5	2	220
6	2	230
7	3	210
8	3	220
9	3	230

Πίνακας 3. Ορθογωνική διάταξη L9 με τις παραμέτρους και τις τιμές τους.

2.5 Τεχνικές μέτρησης

Τα εννέα μοντέλα που εκτυπώθηκαν σε αυτή την έρευνα μετρήθηκαν ως προς τη διαστατική ακρίβεια και την τραχύτητα της επιφάνειάς τους. Πραγματοποιήθηκαν τρεις μετρήσεις σε X και Y κατεύθυνση για κάθε μοντέλο (εικόνα 11) και υπολογίστηκε η μέση τιμή τους. Στη συνέχεια, προέκυψε η απόκλιση διαστάσεων η οποία είναι η διαφορά μεταξύ της ονομαστικής και της μέσης τιμής που μετρήθηκε και αντιπροσωπεύει την ακρίβεια διαστάσεων των μοντέλων. Για τις μετρήσεις των διαστάσεων χρησιμοποιήθηκε ένα μικρόμετρο με εύρος 25-50 mm και ακρίβεια 0,01 mm [299]. Οι μετρήσεις των διαστάσεων για κάθε μοντέλο και κατεύθυνση XY παρουσιάζονται στον πίνακα 4 ενώ οι υπολογισμοί των διαστάσεων στον πίνακα 5.



Εικόνα 11. Σημεία μετρήσεων σε X και Y κατεύθυνση

Experiment No.	Measured Dimensional Values (mm)					
	X Direction			Y Direction		
	1	2	3	1	2	3
1	29.91	29.95	29.81	29.96	29.92	29.95
2	29.94	29.90	29.94	29.98	29.96	30.04
3	29.99	29.91	30.00	30.01	30.01	30.04
4	29.91	29.95	29.81	29.96	29.92	29.95
5	29.94	29.90	29.94	29.98	29.96	30.04
6	29.99	29.91	30.00	30.01	30.01	30.04
7	29.85	29.96	29.94	30.04	30.04	30.07
8	29.93	29.85	29.75	30.01	30.00	30.00
9	30.04	30.03	30.04	30.03	30.03	30.07

Πίνακας 4. Μετρήσεις διαστατικής ακρίβειας

Experiment No.	Averaged Dimensional Values (mm)		Dimensional Deviation (mm)	
	X Direction	Y Direction	X Direction	Y Direction
1	29.89	29.94	-0.110	-0.060
2	29.93	29.99	-0.070	-0.010
3	29.97	30.02	-0.030	0.020
4	29.89	29.94	-0.110	-0.060
5	29.93	29.99	-0.073	-0.001
6	29.97	30.02	-0.030	0.020
7	29.92	30.05	-0.080	0.050
8	29.84	30.00	-0.160	0.000
9	30.04	30.04	0.040	0.040

Πίνακας 5. Υπολογισμοί διαστάσεων

Στην περίπτωση των μετρήσεων ποιότητας της επιφάνειας των μοντέλων, χρησιμοποιήθηκε το τραχύμετρο Mitutoyo Surftest SJ-210 με μήκος κοπής 0,8 mm κατά την κατεύθυνση του άξονα Z [298]. Οι τέσσερις παράμετροι τραχύτητας που μετρήθηκαν είναι οι παρακάτω [308] :

- Αριθμητική μέση τραχύτητα επιφάνειας R_a (μm) : Είναι ο αριθμητικός μέσος όρος των απόλυτων τιμών των υψών προφίλ σε σχέση με το μήκος αξιολόγησης.
- Μέγιστο ύψος προφίλ τραχύτητας R_t (μm) : Είναι η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ του υψηλότερου και του χαμηλότερου σημείου του προφίλ εντός του μήκους αξιολόγησης.
- Ύψος τραχύτητας R_z (μm) : Είναι η μέση τιμή του αθροίσματος των υψηλότερων κορυφών και των πιο χαμηλών κοιλάδων, που υπολογίζεται για το μήκος αξιολόγησης.
- Αριθμητικό μέσο πλάτος R_{sm} (μm) : Είναι η μέση τιμή του πλάτους των στοιχείων προφίλ.

Όλες οι μετρήσεις της τραχύτητας φαίνονται στον πίνακα 6.

Experiment No.	Ra (μm)	Rz (μm)	Rt (μm)	Rsm (μm)
1	17.00	83.47	123.80	229.73
2	14.66	75.96	103.90	224.10
3	14.08	63.98	68.86	203.10
4	16.48	85.74	85.74	321.00
5	13.04	62.20	83.07	205.46
6	12.84	62.26	69.22	196.73
7	21.77	128.48	74.39	204.30
8	19.49	98.21	145.60	248.50
9	12.98	57.84	65.62	198.50

Πίνακας 6. Μετρήσεις παραμέτρων τραχύτητας επιφάνειας

2.6 Αποτελέσματα

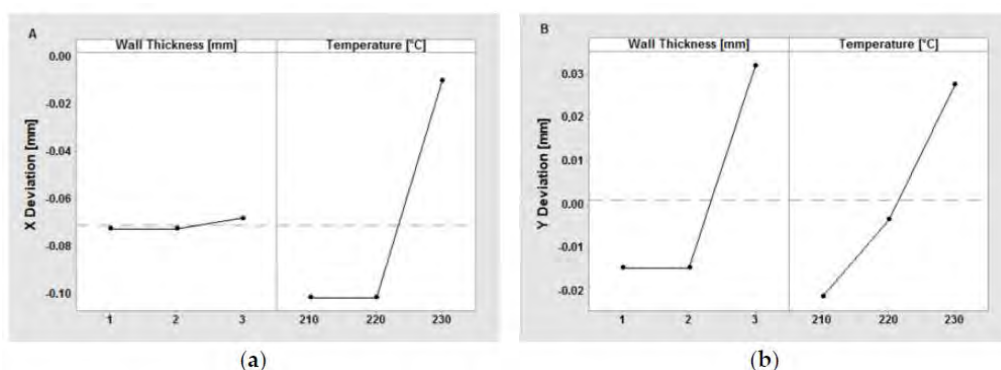
Όπως προαναφέρθηκε, στόχος της μελέτης που περιγράφεται είναι η βελτιστοποίηση της ακρίβειας των διαστάσεων και της τραχύτητας των επιφανειών των μοντέλων που κατασκευάζονται με την προσθετική διαδικασία FFF. Αυτό επιτυγχάνεται με τον υπολογισμό των τιμών των παραμέτρων που ελαχιστοποιούν τις απόλυτες τιμές της απόκλισης των διαστάσεων και των παραμέτρων τραχύτητας της επιφάνειας. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται δυο τεχνικές βελτιστοποίησης που είναι η προσέγγιση Taguchi και η ανάλυση Grey, μαζί με τη στατιστική ανάλυση. Όλοι οι υπολογισμοί και τα διαγράμματα πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό Minitab 17.

2.7 Προσέγγιση Taguchi

Η προσέγγιση Taguchi χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της επιρροής των παραμέτρων αλλά και των τιμών τους στην ποιότητα των προϊόντων. Στη μελέτη που εξετάζεται χρησιμοποιούνται δυο πολύ δημοφιλή στατιστικά εργαλεία, της ανάλυσης μέσω ANOM και της ανάλυσης διακύμανσης (ANOVA). Τα αποτελέσματα από τη στατιστική ανάλυση χρησιμοποιούνται για να προσδιοριστεί η επίδραση της θερμοκρασίας του ακροφυσίου και του πάχους τοιχώματος στην απόκλιση διαστάσεων σε X και Y κατεύθυνση και στις παραμέτρους τραχύτητας της επιφάνειας των μοντέλων. Σύμφωνα με τους υπολογισμούς ανάλυσης μέσω ANOM (πίνακας 7 και εικόνα 12) ο συνδυασμός της τιμής της παραμέτρου που ελαχιστοποιεί την απόλυτη τιμή της απόκλισης X και Y είναι αντίστοιχα : πάχος τοιχώματος 3 mm, θερμοκρασία ακροφυσίου 230°C και πάχος τοιχώματος 1-2 mm, θερμοκρασία ακροφυσίου 220°C.

Level	Response Table for X Direction		Response Table for Y Direction	
	Wall Thickness (mm)	Extraction Temperature (°C)	Wall Thickness (mm)	Extraction Temperature (°C)
1	-0.072	-0.101	-0.014	-0.021
2	-0.072	-0.101	-0.014	-0.003
3	-0.068	-0.010	0.032	0.028

Πίνακας 7. Μέσες τιμές απόκλισης διαστάσεων



Εικόνα 12. Διαγράμματα των μέσων για την απόκλιση διαστάσεων σε (a) διάσταση X και (b) διάσταση Y

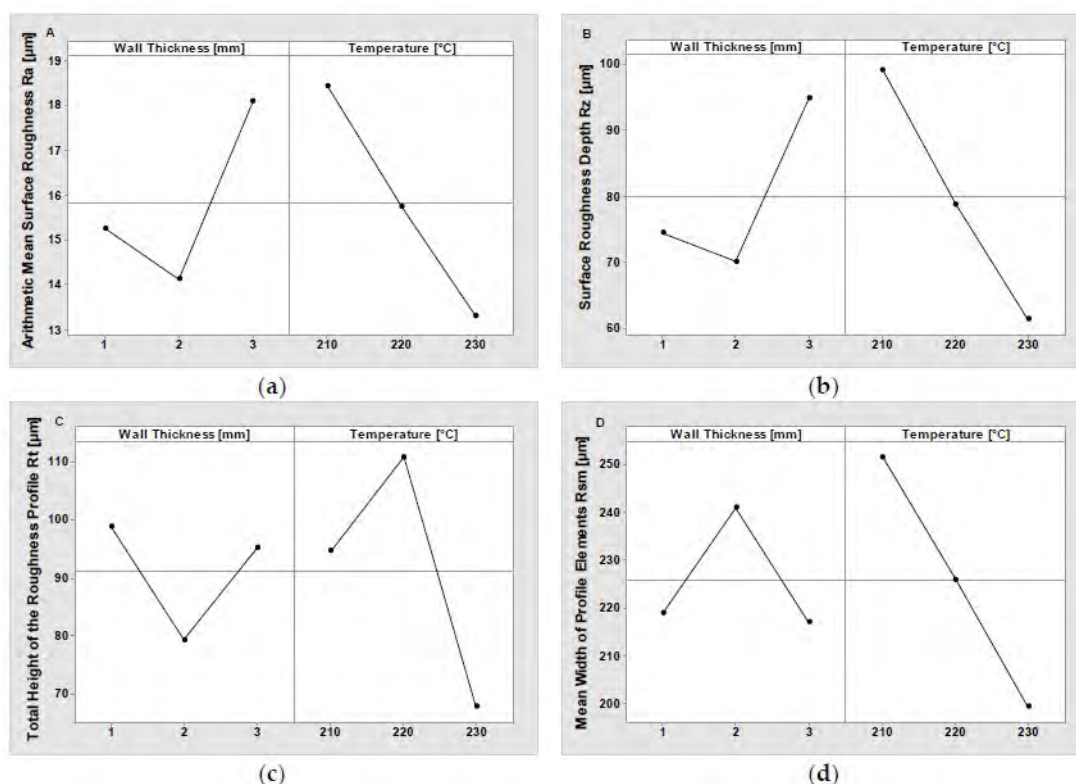
Στην περίπτωση των παραμέτρων τραχύτητας επιφάνειας, τα αποτελέσματα ANOM έδειξαν ότι οι τιμές που τα ελαχιστοποιούν είναι : πάχος τοιχώματος 2 mm και θερμοκρασία ακροφυσίου 230°C για το Ra, πάχος τοιχώματος 2 mm και θερμοκρασία ακροφυσίου 230°C για το Rz, πάχος τοιχώματος 2 mm και θερμοκρασία ακροφυσίου 230°C για το Rt και πάχος

τοιχώματος 3 mm και θερμοκρασία ακροφυσίου 230°C για το Rsm (πίνακας 8 και εικόνα 13).

Level	Response Table for Ra		Response Table for Rz	
	Wall Thickness (mm)	Extraction Temperature (°C)	Wall Thickness (mm)	Extraction Temperature (°C)
1	15.25	18.42	74.47	99.23
2	14.12	15.73	70.07	78.79
3	18.08	13.30	94.84	61.36

Level	Response Table for Rt		Response Table for Rsm	
	Wall Thickness (mm)	Extraction Temperature (°C)	Wall Thickness (mm)	Extraction Temperature (°C)
1	98.85	94.64	219.0	251.7
2	79.34	110.86	241.1	226.0
3	95.20	67.90	217.1	199.4

Πίνακας 8. Μέσες τιμές για την τραχύτητα επιφάνειας



Εικόνα 13. Διαγράμματα μέσων για τις παραμέτρους τραχύτητας της επιφάνειας : (α) αριθμητικός μέσος τραχύτητας Ra, (β) βάθος τραχύτητας Rz, (γ) συνολικό ύψος προφίλ τραχύτητας Rt, (δ) μέσο πλάτος των προφίλ Rsm.

Η ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) χρησιμοποιείται για τη διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων στους δείκτες απόδοσης. Σε αυτή την ανάλυση, υπολογίζεται η τιμή F, η οποία είναι ο λόγος διακύμανσης, όπου μας δείχνει την επίδραση της παραμέτρου στο δείκτη ποιότητας. Μια παράμετρος με τιμή F μεγαλύτερη από 4 θεωρείται πολύ

σημαντική, ενώ αν έχει τιμή μικρότερη από 1 θεωρείται ασήμαντη. Η τιμή P χρησιμοποιείται για στατιστικό έλεγχο υποθέσεων, ειδικά σε σημαντικές δοκιμές μηδενικής υπόθεσης. Μια τιμή P μικρότερη από 0,05 υποδηλώνει σημαντικότητα. Η ανάλυση διακύμανσης ANOVA για την απόκλιση διαστάσεων στις κατευθύνσεις X και Y παρουσιάζεται στον πίνακα 9, ενώ για την τραχύτητα της επιφάνειας οι παράμετροι βρίσκονται στον πίνακα 10.

Response Table for X Direction					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
Wall Thickness (mm)	2	0.0000	0.0000	0.01	0.991
Extraction Temperature (°C)	2	0.0166	0.0083	3.99	0.112
Error	4	0.0083	0.0021	-	-
Total	8	0.0249	-	-	-

Response Table for Y Direction					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
Wall Thickness (mm)	2	0.0044	0.0022	2.38	0.208
Extraction Temperature (°C)	2	0.0037	0.0018	2.01	0.249
Error	4	0.0037	0.0009	-	-
Total	8	0.0117	-	-	-

Πίνακας 9. ANOVA για την απόκλιση διαστάσεων

Response Table for Ra					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
Wall Thickness (mm)	2	24.98	12.489	3.23	0.146
Extraction Temperature (°C)	2	39.30	19.652	5.08	0.080
Error	4	15.46	3.866	-	-
Total	8	79.75	-	-	-

Response Table for Rz					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
Wall Thickness (mm)	2	1048.3	524.2	2.28	0.218
Extraction Temperature (°C)	2	2155.7	1077.9	4.70	0.089
Error	4	918.0	229.5	-	-
Total	8	4122.1	-	-	-

Response Table for Rt					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
Wall Thickness (mm)	2	645.5	322.8	0.47	0.654
Extraction Temperature (°C)	2	2823.4	1411.7	2.07	0.242
Error	4	2729.5	682.4	-	-
Total	8	6198.4	-	-	-

Response Table for Rsm					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
Wall Thickness (mm)	2	1066	532.8	0.29	0.765
Extraction Temperature (°C)	2	4093	2046.5	1.10	0.415
Error	4	7420	1854.9	-	-
Total	8	12578	-	-	-

Πίνακας 10. ANOVA για τους παραμέτρους τραχύτητας

2.8 Ανάλυση Grey

Αν και η προσέγγιση Taguchi χρησιμοποιείται ευρέως για τη βελτιστοποίηση μεμονωμένης απόδοσης χαρακτηριστικών, είναι ακατάλληλη για βελτιστοποίηση πολλαπλών αποκρίσεων [309]. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ανάλυση κατά Grey όπου είναι μια προηγμένη μορφή της μεθόδου Taguchi [310]. Χρησιμοποιείται για την ανάλυση διαφόρων σχέσεων και τη βελτιστοποίηση πολλαπλών χαρακτηριστικών γνωρισμάτων [311]. Στη συγκεκριμένη έρευνα, όλες οι αποκρίσεις ακρίβειας διαστάσεων και τραχύτητας επιφάνειας (αποκλίσεις διαστάσεων σε X και Y κατεύθυνση και οι τέσσερις παράμετροι τραχύτητας) βελτιστοποιούνται με τη χρήση της ανάλυσης Grey. Όλες οι αποκρίσεις ακρίβειας διαστάσεων και τραχύτητας κανονικοποιούνται σε ένα εύρος μεταξύ των τιμών 0 – 1. Εφόσον αντιστοιχούν στην επιλογή «χαμηλότερο – καλύτερο» (lower the better), οι κανονικοποιημένες τιμές υπολογίζονται σύμφωνα με τον τύπο :

$$x_{ij} = \frac{\max y_{ij} - y_{ij}}{\max y_{ij} - \min y_{ij}}$$

Όπου x_{ij} είναι η κανονικοποιημένη τιμή απόκλισης, $\min y_{ij}$ είναι η χαμηλότερη τιμή του χαρακτηριστικού i στην απόκριση j και το $\max y_{ij}$ είναι η ψηλότερη τιμή του i χαρακτηριστικού στην απόκριση j . Ο πίνακας 11 περιγράφει όλα τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα απόκρισης ακρίβειας διαστάσεων και τραχύτητας επιφάνειας.

Στη συνέχεια δημιουργείται ο συντελεστής γ κατά Grey προκειμένου να συνδέσει τα επιθυμητά και τα πραγματικά κανονικοποιημένα δεδομένα [312] :

$$\gamma_{ij} = \frac{\Delta_{\min} + \zeta \Delta_{\max}}{\Delta_{ij} + \zeta \Delta_{\max}}$$

όπου $\Delta_{ij} = |x_{0j} - x_{ij}|$, $\Delta_{\min}$ είναι το ελάχιστο ($\min$) Δ_{ij} για όλα τα i και j , $\Delta_{\max}$ = μέγιστο ($\max$) Δ_{ij} για όλα τα i και τα j ενώ ζ είναι ο διακριτικός συντελεστής (0 – 1). Εδώ, ο διακριτικός συντελεστής θεωρείται το 0,5. Τα αποτελέσματα των συντελεστών κατά Grey παρουσιάζονται στον πίνακα 12.

Experiment No.	X Deviation	Y Deviation	Ra	Rz	Rt	Rsm
1	0.3846	0.0000	0.5342	0.6372	0.2726	0.7345
2	0.6923	0.8333	0.7962	0.7435	0.5214	0.7798
3	1.0000	0.6667	0.8611	0.9131	0.9595	0.9487
4	0.3846	0.0000	0.5924	0.6050	0.7484	0.0000
5	0.6692	0.9833	0.9776	0.9383	0.7818	0.9298
6	1.0000	0.6667	1.0000	0.9374	0.9550	1.0000
7	0.6154	0.1667	0.0000	0.0000	0.8903	0.9391
8	0.0000	1.0000	0.2553	0.4285	0.0000	0.5834
9	0.9231	0.3333	0.9843	1.0000	1.0000	0.9858

Πίνακας 11. Κανονικοποίηση ποιοτικών αποκρίσεων

Experiment No.	X Deviation	Y Deviation	Ra	Rz	Rt	Rsm
1	0.4483	0.3333	0.5177	0.5795	0.4074	0.6531
2	0.6190	0.7500	0.7104	0.6609	0.5109	0.6942
3	1.0000	0.6000	0.7826	0.8519	0.9251	0.9070
4	0.4483	0.3333	0.5509	0.5587	0.6653	0.3333
5	0.6019	0.9677	0.9571	0.8901	0.6962	0.8768
6	1.0000	0.6000	1.0000	0.8888	0.9174	1.0000
7	0.5652	0.3750	0.3333	0.3333	0.8201	0.8914
8	0.3333	1.0000	0.4017	0.4666	0.3333	0.5455
9	0.8667	0.4286	0.9696	1.0000	1.0000	0.9723

Πίνακας 12. Αποτελέσματα συντελεστών κατά Grey

Τέλος, υπολογίζεται ο βαθμός κατά Grey, με τη λήψη του μέσου όρων των τιμών των συντελεστών Grey. Η βελτιστοποίηση του βαθμού Grey είναι ισοδύναμη με τη βελτιστοποίηση όλων των τιμών ποιότητας που εξετάστηκαν στην παραπάνω μελέτη. Οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων διεργασίας προκύπτουν από το βαθμό Grey :

$$\alpha_i = \sum_{j=1}^n \gamma_{ij}$$

Ο πίνακας 13 παρουσιάζει όλα τα αποτελέσματα για τη διαστατική ακρίβεια και την τραχύτητα επιφάνειας κατά Grey αλλά και τη σειρά βελτιστοποίησής τους.

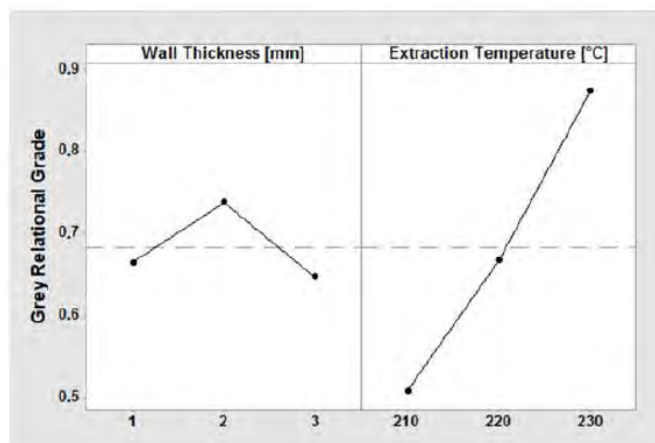
Experiment No.	Wall Thickness (mm)	Extraction Temperature (°C)	Grey Relational Grade (-)	Order
1	1	210	0.4899	8
2	1	220	0.6576	5
3	1	230	0.8444	3
4	2	210	0.4816	9
5	2	220	0.8316	4
6	2	230	0.9010	1
7	3	210	0.5531	6
8	3	220	0.5134	7
9	3	230	0.8729	2

Πίνακας 13. Αποτελέσματα σχεσιακού βαθμού Grey

Η ανάλυση των μέσων και η ανάλυση διακύμανσης παρουσιάστηκαν στους παραπάνω πίνακες για την προσέγγιση Grey. Από τα αποτελέσματα ANOM (πίνακας 14) διαπιστώθηκε ότι η θερμοκρασία του ακροφυσίου έχει μεγαλύτερη επιρροή από ότι το πάχος τοιχώματος. Οι βέλτιστες τιμές παραμέτρων είναι αυτές που έχουν μεγαλύτερο βαθμό κατά Grey όπως φαίνεται στο διάγραμμα των μέσων (εικόνα 14). Αυτές οι τιμές είναι για το πάχος τοιχώματος τα 2 mm και για τη θερμοκρασία ακροφυσίου οι 230°C.

Level	Wall Thickness (mm)	Extraction Temperature (°C)
1	0.664	0.508
2	0.738	0.667
3	0.646	0.873
Delta	0.092	0.365
Rank	2	1

Πίνακας 14. Μέσες τιμές σχεσιακού βαθμού Grey



Εικόνα 14. Διάγραμμα μέσων για το σχεσιακό βαθμό Grey

Τα αποτελέσματα ANOVA για τη σχέση κατά Grey φαίνονται στον πίνακα 15. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα ANOM έδωσαν τα ίδια αποτελέσματα με τα ANOVA ως προς τη σημαντικότητα του παράγοντα (η θερμοκρασία ακροφυσίου ήταν πιο σημαντική από ότι το πάχος τοιχώματος).

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
Wall Thickness (mm)	2	0.0142	0.0071	0.69	0.553
Extraction Temperature (°C)	2	0.2004	0.1002	9.72	0.029
Error	4	0.0412	0.0103	-	-
Total	8	0.2559	-	-	-

Πίνακας 15. ANOVA για το σχεσιακό βαθμό Grey

Αναφορές 2^ο κεφαλαίου

- [269] Jiang, J.; Lou, J.; Hu, G. Effect of support on printed properties in fused deposition modelling processes. *Virtual Phys. Prototyp.* 2019, 14, 308–315.
- [270] Messimer, S.L.; Patterson, A.E.; Muna, N.; Deshpande, A.P.; Rocha Pereira, T. Characterization and processing behavior of heated aluminum-polycarbonate composite build plates for the FDM additive manufacturing process. *J. Manuf. Mater. Process.* 2018, 2, 12.
- [271] Zhang, X.; Chen, L.; Mulholland, T.; Osswald, T.A. Characterization of mechanical properties and fracture mode of PLA and copper/PLA composite part manufactured by fused deposition modeling. *SN Appl. Sci.* 2019, 1.
- [272] Kitsakis, K.; Aslani, K.E.; Vaxevanidis, N.; Kechagias, J. An internal combustion engine visualization physical prototype applying digital manufacturing. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2019, 564, 012022.
- [273] Messimer, S.L.; Rocha Pereira, T.; Patterson, A.E.; Lubna, M.; Drozda, F.O. Full-density fused deposition modeling dimensional error as a function of raster angle and build orientation: Large dataset for eleven materials. *J. Manuf. Mater. Process.* 2019, 3, 6.
- [274] Vidakis, N.; Petousis, M.; Maniadi, A.; Koudoumas, E.; Vairis, A.; Kechagias, J. Sustainable Additive Manufacturing: Mechanical Response of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene over Multiple Recycling Processes. *Sustainability* 2020, 12, 3568.
- [275] Wu, H.; Sulkis, M.; Driver, J.; Saade-Castillo, A.; Thompson, A.; Koo, J.H. Multi-functional ULTEM.1010 composite filaments for additive manufacturing using Fused Filament Fabrication (FFF). *Addit. Manuf.* 2018, 24, 298–306.
- [276] Xia, H.; Lu, J.; Tryggvason, G. A numerical study of the effect of viscoelastic stresses in fused filament fabrication. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 2019, 346, 242–259.

- [277] Jaisingh Sheoran, A.; Kumar, H. Fused Deposition modeling process parameters optimization and effect on mechanical properties and part quality: Review and reflection on present research. *Mater. Today-Proc.* 2020, 21, 1659–1672.
- [278] Bikas, H.; Stavropoulos, P.; Chryssolouris, G. Additive manufacturing methods and modelling approaches: A critical review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016, 83, 389–405.
- [279] Turner, B.N.; Gold, S.A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness. *Rapid Prototyp. J.* 2015, 21, 250–261.
- [280] Tiwari, K.; Kumar, S. Analysis of the factors affecting the dimensional accuracy of 3D printed products. *Mater. Today-Proc.* 2018, 5, 18674–18680.
- [281] Alafaghani, A.a.; Qattawi, A. Investigating the effect of fused deposition modeling processing parameters using Taguchi design of experiment method. *J. Manuf. Process.* 2018, 36, 164–174.
- [282] Hyndhavi, D.; Babu, G.R.; Murthy, S.B. Investigation of Dimensional Accuracy and Material Performance in Fused Deposition Modeling. *Mater. Today-Proc.* 2018, 5, 23508–23517.
- [283] Sood, A.K.; Ohdar, R.K.; Mahapatra, S.S. Improving dimensional accuracy of Fused Deposition Modelling processed part using grey Taguchi method. *Mater. Des.* 2009, 30, 4243–4252.
- [284] Moza, Z.; Kitsakis, K.; Kechagias, J.; Mastorakis, N. Optimizing dimensional accuracy of fused filament fabrication using Taguchi design. In *Proceedings of the 14th International Conference on Instrumentation, Measurement, Circuits and Systems, Salerno, Italy, 27–29 June 2015*; pp. 110–114.
- [285] Tsiolikas, A.; Mikrou, T.; Vakouftsi, F.; Aslani, K.E.; Kechagias, J. Robust design application for optimizing ABS fused filament fabrication process: A case study. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2019, 564, 012021.

- [286] Mahmood, S.; Qureshi, A.J.; Talamona, D. Taguchi based process optimization for dimension and tolerance control for fused deposition modelling. *Addit. Manuf.* 2018, 21, 183–190.
- [287] Singh, J.; Singh, R.; Singh, H. Repeatability of linear and radial dimension of ABS replicas fabricated by fused deposition modelling and chemical vapor smoothing process: A case study. *Measurement* 2016, 94, 5–11.
- [288] Camposeco-Negrete, C. Optimization of FDM parameters for improving part quality, productivity and sustainability of the process using Taguchi methodology and desirability approach. *Prog. Addit. Manuf.* 2020, 5, 59–65.
- [289] Aslani, K.-E.; Kitsakis, K.; Kechagias, J.D.; Vaxevanidis, N.M.; Manolakos, D.E. On the application of grey Taguchi method for benchmarking the dimensional accuracy of the PLA fused filament fabrication process. *SN Appl. Sci.* 2020, 2, 1016.
- [290] Galantucci, L.M.; Lavecchia, F.; Percoco, G. Experimental study aiming to enhance the surface finish of fused deposition modeled parts. *Cirp Ann-Manuf. Techn.* 2009, 58, 189–192.
- [291] Barrios, J.M.; Romero, P.E. Improvement of Surface Roughness and Hydrophobicity in PETG Parts Manufactured via Fused Deposition Modeling (FDM): An Application in 3D Printed Self-Cleaning Parts. *Materials* 2019, 12.
- [292] Anitha, R.; Arunachalam, S.; Radhakrishnan, P. Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling. *J. Mater. Process. Technol.* 2001, 118, 385–388.
- [293] Perez, M.; Medina-Sanchez, G.; Garcia-Collado, A.; Gupta, M.; Carou, D. Surface Quality Enhancement of Fused Deposition Modeling (FDM) Printed Samples Based on the Selection of Critical Printing Parameters. *Materials* 2018, 11, 1382.
- [294] ChungWang, C.; Lin, T.W.; Hu, S.S. Optimizing the rapid prototyping process by integrating the Taguchi method with the Gray relational analysis. *Rapid Prototyp. J.* 2007, 13, 304–315.

- [295] Nancharaiah, T.; Raju, D.R.; Raju, V.R. An experimental investigation on surface quality and dimensional accuracy of FDM components. *Int. J. Emerg. Tech.* 2010, 1, 106–111.
- [296] Mohamed, O.A.; Masood, S.H.; Bhowmik, J.L. Optimization of fused deposition modeling process parameters: A review of current research and future prospects. *Adv. Manuf.* 2015, 3, 42–53.
- [297] Dey, A.; Yodo, N. A Systematic Survey of FDM Process Parameter Optimization and Their Influence on Part Characteristics. *J. Manuf. Mater. Process.* 2019, 3, 64.
- [298] Chaidas, D.; Kitsakis, K.; Kechagias, J.; Maropoulos, S. The impact of temperature changing on surface roughness of FFF process. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2016, 161, 012033.
- [299] Chaidas, D.; Mastorakis, N.; Kechagias, J. The impact of temperature changing on dimensional accuracy of FFF process. *Int. J. Appl. Phys.* 2016, 1, 1–5.
- [300] Yao, T.; Deng, Z.; Zhang, K.; Li, S. A method to predict the ultimate tensile strength of 3D printing polylactic acid (PLA) materials with different printing orientations. *Compos. Part B* 2019, 163, 393–402.
- [301] Noorani, R. *3D Printing: Technology, Applications, and Selection*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2017.
- [302] Ghani, J.A.; Choudhury, I.A.; Hassan, H.H. Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters. *J. Mater. Process. Technol.* 2004, 145, 84–92.
- [303] Kechagias, J.D.; Aslani, K.-E.; Fountas, N.A.; Vaxevanidis, N.M.; Manolakos, D.E. A comparative investigation of Taguchi and full factorial design for machinability prediction in turning of a titanium alloy. *Measurement* 2020, 151, 107213.

- [304] Padhi, S.K.; Sahu, R.K.; Mahapatra, S.S.; Das, H.C.; Sood, A.K.; Patro, B.; Mondal, A.K. Optimization of fused deposition modeling process parameters using a fuzzy inference system coupled with Taguchi philosophy. *Adv. Manuf.* 2017, 5, 231–242.
- [305] Zhou, X.; Hsieh, S.-J.; Ting, C.-C. Modelling and estimation of tensile behaviour of polylactic acid parts manufactured by fused deposition modelling using finite element analysis and knowledge-based library. *Virtual Phys. Prototyp.* 2018, 13, 177–190.
- [306] Yang, W.H.; Tarng, Y.S. Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method. *J. Mater. Process. Technol.* 1998, 84, 122–129.
- [307] Singh, J.; Singh, R.; Singh, H. Dimensional accuracy and surface finish of biomedical implant fabricated as rapid investment casting for small to medium quantity production. *J. Manuf. Process.* 2017, 25, 201–211.
- [308] Mitutoyo. Quick Guide to Surface Roughness Measurement. Reference Guide for Laboratory and Workshop; Mitutoyo America Corporation: Aurora, IL, USA, 2016.
- [309] Chen, K.-T.; Kao, J.-Y.; Hsu, C.-Y.; Hong, P.-D. Multi-response optimization of mechanical properties for ZrWN films grown using grey Taguchi approach. *Ceram. Int.* 2019, 45, 327–333.
- [310] Aslani, K.-E.; Vakouftsi, F.; Kechagias, J.D.; Mastorakis, N.E. Surface Roughness Optimization of Poly-Jet 3D Printing Using Grey Taguchi Method. In *Proceedings of the 2019 International Conference on Control, Artificial Intelligence, Robotics & Optimization (ICCAIRO)*, Majorca Island, Spain, 3–5 May 2019; pp. 213–218.
- [311] Wu, H.-H. A Comparative Study of Using Grey Relational Analysis in Multiple Attribute Decision Making Problems. *Qual. Eng.* 2002, 15, 209–217.
- [312] Lin, C.L. Use of the Taguchi Method and Grey Relational Analysis to Optimize Turning Operations with Multiple Performance Characteristics. *Mater. Manuf. Process.* 2004, 19, 209–220.

3. Επίδραση παραμέτρων σε Wood/PLA δοκίμια

Στο επόμενο πείραμα επίσης γίνεται διερεύνηση παραμέτρων αλλά και των τιμών τους, που βελτιστοποιούν τη διαστατική ακρίβεια και την τραχύτητα επιφανειών μοντέλων που έχουν κατασκευαστεί με την προσθετική διαδικασία FFF. Ένα από τα υλικά που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των πειραματικών δοκιμίων είναι το Wood/PLA το οποίο αποτελείται από σκόνη ξύλου σε ποσοστό 30% και βιοδιασπώμενο πολυμερές PLA σε ποσοστό 70%. Το οργανικό αυτό υλικό μπορεί να βρίσκεται σε διαφορετικές αναλογίες σύστασης (20%-80%, 40%-60%) και είναι κατάλληλο για να χρησιμοποιηθεί με μηχανήματα της προσθετικής διαδικασίας FFF. Στο πείραμα που περιγράφεται διερευνήθηκε η επίδραση δυο παραμέτρων, της θερμοκρασίας κεφαλής (NT, °C) και του πάχους στρώσης (LT, mm), στην ποιότητα της επιφάνειας (Ra, Rt) και στην ακρίβεια διαστάσεων (X,Y κατευθύνσεις) των εκτυπωμένων μοντέλων. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα είναι εμπορικά διαθέσιμο κυρίως στη σύσταση σκόνης ξύλου (πεύκο) και πολυμερούς σε αναλογία αντίστοιχα 30% - 70%. Τα αποτελέσματα αναλύονται χρησιμοποιώντας στατιστικά εργαλεία (ANOM, ANOVA και γραφήματα αλληλεπίδρασης) και ανάλυση παλινδρόμησης για τη μοντελοποίησή τους. Διαπιστώθηκε ότι χαμηλότερες τιμές του πάχους στρώσης (LT) αλλά και της θερμοκρασίας κεφαλής (NT) βελτιστοποιούν τόσο την ποιότητα της επιφάνειας όσο και την ακρίβεια των διαστάσεων και επιπλέον το πάχος στρώσης βρέθηκε ότι ήταν η κυρίαρχη παράμετρος για την ποιότητα της επιφάνειας, ενώ τόσο το πάχος στρώσης όσο και η θερμοκρασία κεφαλής αποτέλεσαν σημαντικούς παραμέτρους για την ακρίβεια των διαστάσεων.

Γενικότερα, όπως έχει προαναφερθεί, η προσθετική διεργασία FFF είναι μια από τις διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης όπου κατασκευάζονται πρωτότυπα στρώση-στρώση χρησιμοποιώντας ψηφιακά δεδομένα CAD [313]. Οι μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης περιλαμβάνουν, εκτός από τη διαδικασία που περιγράφεται (FFF), τον φωτοπολυμερισμό, την πλαστικοποίηση φύλλων, τη σύντηξη σε σκόνη και πολλές άλλες [314]. Η διαδικασία FFF χρησιμοποιείται σε διάφορους κλάδους [315] και έχει γίνει αρκετά δημοφιλής στις μέρες μας για την απλότητά της, την προσιτή τιμή της σε μηχανήματα και πρώτες ύλες, τα ελάχιστα απόβλητα αλλά και την ποικιλία υλικών που υπάρχουν αλλά και που συνεχώς εμφανίζονται νέα [316].

Η τραχύτητα της επιφάνειας (Surface Quality - SQ) και η ακρίβεια των διαστάσεων (Dimensional Accuracy - DA) αποτελούν τους κύριους δείκτες ποιότητας των εκτυπωμένων αντικειμένων στη διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης [317]. Η ποιότητα των

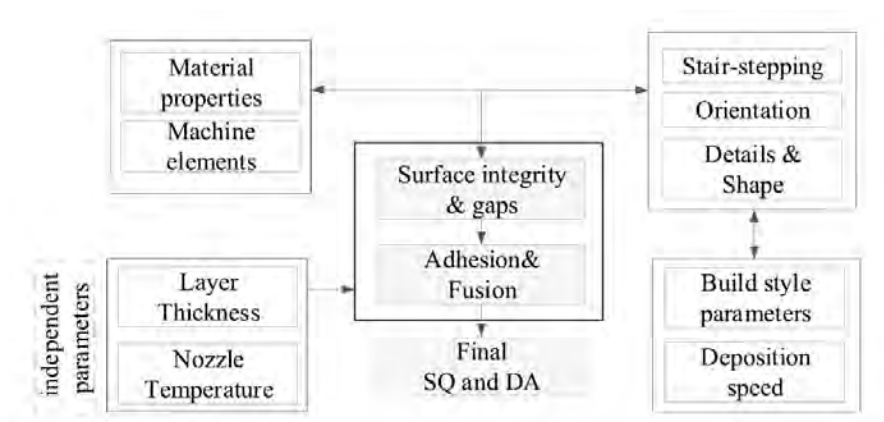
αντικειμένων αυτών επηρεάζεται από την πρόσφυση και τη σύντηξη μεταξύ των στρώσεων του υλικού. Για να επιτευχθεί όσο το δυνατόν καλύτερο εκτυπωμένο αποτέλεσμα χρησιμοποιούνται στη διαδικασία FFF διάφορες παράμετροι μηχανής αλλά και υλικού [318]. Αυτές οι παράμετροι έχουν ένα σημαντικό αντίκτυπο στην αποτελεσματικότητα της προσθετικής αυτής διαδικασίας [319]. Πάχος στρώσης, θερμοκρασία εκτύπωσης, προσανατολισμός κατασκευής, ταχύτητα εκτύπωσης, αριθμός κελυφών, μοτίβο πλήρωσης είναι μερικές από τις πιο κοινές παραμέτρους της μεθόδου FFF [320]. Κατά τη διαδικασία αυτή, όπως έχει προαναφερθεί, ένα ψηφιακό μοντέλο μετατρέπεται σε ένα πραγματικό αντικείμενο από ένα νήμα που διέρχεται από το ακροφύσιο ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή. Ως κύρια υλικά χρησιμοποιούνται συνήθως διάφορα θερμοπλαστικά σε μορφή νήματος (καρούλι) με πιο συνηθισμένα να είναι τα PLA, ABS, PETG, TPU. Χωρίς αμφιβολία, η ανάπτυξη νέων σύνθετων υλικών αποτελεί σημαντικό θέμα στην κοινότητα της τρισδιάστατης εκτύπωσης [321].

3.1 Αναφορές σε πειράματα με Wood/PLA

Η σκόνη ξύλου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρόσθετο συστατικό στο PLA για να βελτιωθούν οι θερμικές ιδιότητες και να μειωθεί το κόστος του [322,323], προσδίδοντας έτσι και μια επιπλέον οικολογική αξία. Διαφορετικοί τύποι σκόνης επηρεάζουν τις ιδιότητες του νέου αυτού υλικού που μετονομάζεται πλέον σε Wood/PLA. Συνήθως, η προσθήκη ξυλόσκονης από 20% έως 50% είναι ικανή για να αλλάξει ορισμένες από τις ιδιότητες του PLA σε εφελκυσμό και κάμψη [324]. Ο Huda [325] παρατήρησε ότι το Wood/PLA έχει μεγαλύτερη αντοχή όταν περιέχει σκόνη ξύλου από σφένδαμο από το καθαρό PLA. Η πολύ καλή πρόσφυση της σκόνης ξύλου και του PLA βοηθά αρκετά για να κατασκευαστούν μοντέλα με την FFF διαδικασία [326, 327]. Ο Kariz [328] εξέτασε την επίδραση διαφορετικού ποσοστού ξυλόσκονης στο PLA από 10% έως 50%. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα δείγματα με υψηλότερο ποσοστό ξυλόσκονης εμφάνιζαν μεγάλη περιεκτικότητα σε υγρασία, διόγκωση των διαστάσεων και χαμηλό συντελεστή ελαστικότητας. Ο Kain [329] απέδειξε πειραματικά ότι μοντέλα εκτυπωμένα από Wood/PLA με διαφορετική σύσταση ξυλόσκονης (15%-25%) αλλά και διαφορετική γωνία εναπόθεσης παρουσιάζουν αύξηση αντοχής όσο αυξάνεται η περιεκτικότητά τους σε φυτικές ίνες. Ο Ayilimis [330] διερεύνησε την επίδραση του πάχους στρώσης στην απορρόφηση νερού αλλά και στην αντοχή των Wood/PLA αντικειμένων όπου ανέδειξε σημαντικά αποτελέσματα. Αυξάνοντας το πάχος στρώσης, αυξάνονταν και η απορρόφηση του νερού ενώ μειώνοντας το πάχος στρώσης μεγάλωνε η δύναμη του μοντέλου. Επιπλέον, όσο αυξάνονταν το πάχος στρώσης αναλογικά αυξάνονταν και το πορώδες τμήμα της διατομής στις στρώσεις. Διαπιστώθηκε ακόμα ότι αυξάνοντας την ποσότητα Wood/PLA από 0% σε 50%, αυξάνονταν και η ποιότητα της επιφάνειας των δειγμάτων. Ο Guessasma [331] εξέτασε την αντοχή αντικειμένων από Wood/PLA σε διαφορετικές θερμοκρασίες κεφαλής από 210°C έως 250°C. Η αντοχή σε εφελκυσμό βελτιώνονταν ελαφρώς όσο η θερμοκρασία αυξάνονταν από τους 210°C στους 230°C. Τα αποτελέσματα έδειξαν επίσης ότι όσο η θερμοκρασία κεφαλής αυξάνονταν πάνω από 230°C εμφανιζόταν μικρές αποικοδομήσεις σωματιδίων ξύλου όπου μπορούσε να επηρεάσει και τη δύναμη του μοντέλου. Τέλος, ο Zandi [332] σε άλλη έρευνα διαπίστωσε ότι το μεγαλύτερο αντίκτυπο σε μοντέλα εκτυπωμένα με Wood/PLA υλικό τον έχει η παράμετρος του πάχους στρώσης σε σχέση με τη διάμετρο του ακροφυσίου, την πυκνότητα πλήρωσης αλλά και την ταχύτητα εκτύπωσης.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την εκτύπωση αντικείμενων από Wood/PLA όσον αφορά την ποιότητα της επιφάνειας και τη διαστατική ακρίβεια είναι η ενδιάμεση πρόσφυση

και σύντηξη (εικόνα 15) όπου επηρεάζονται από την ακεραιότητα της επιφάνειας αλλά και τα κενά του υλικού μεταξύ των στρώσεων. Το πάχος στρώσης είναι ο βασικός παράγοντας για την ποιότητα της επιφάνειας και η θερμοκρασία του ακροφυσίου για την ενδιάμεση σύνδεση (κενά) των στρώσεων.

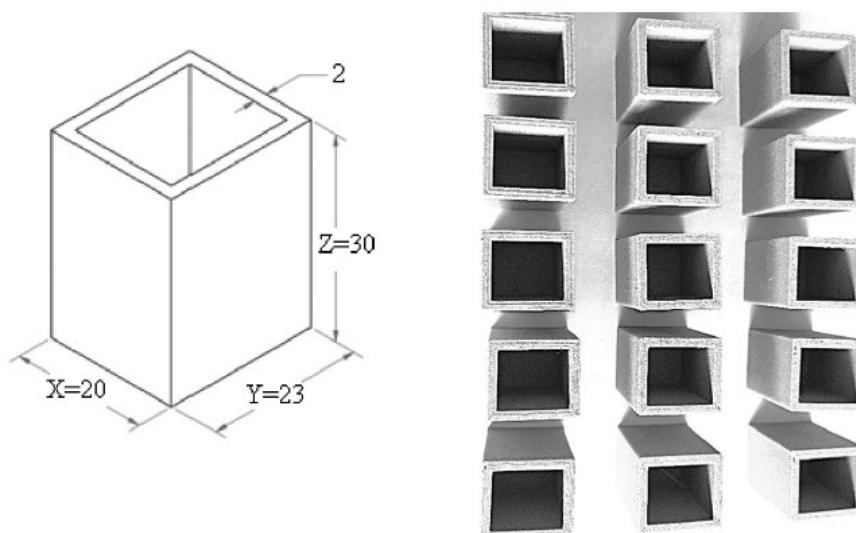


Εικόνα 15. Παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα FFF αντικειμένων

Οι παραπάνω αναφορές δείχνουν ότι έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές έρευνες σχετικά με την επιρροή των μεταβλητών της FFF διαδικασίας για την απορρόφηση του νερού αλλά και την αντοχή των μοντέλων από Wood/PLA, ωστόσο έχει παρατηρηθεί ένα κενό σχετικά με τη διερεύνηση της διαστατικής ακρίβειας αλλά και της ποιότητας των επιφανειών. Έτσι, εφόσον το πάχος στρώσης και η θερμοκρασία ακροφυσίου αποτελούν βασικούς παράγοντες στην FFF διαδικασία, η παρούσα έρευνα που περιγράφεται εξετάζει πως αυτές οι δύο παράμετροι επηρεάζουν την τραχύτητα της επιφάνειας (R_a , R_t) και την ακρίβεια των εξωτερικών γραμμικών διαστάσεων (D_X , D_Y) αλλά και του πάχους του τοιχώματος (D_{WX} , D_{WY}) των εκτυπωμένων Wood/PLA αντικειμένων. Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, η σύσταση του υλικού Wood/PLA είναι σταθερή όπως και τα στοιχεία του μηχανήματος, ο προσανατολισμός και η θέση των δοκιμών αλλά και η ταχύτητα εκτύπωσης.

3.2 Πειραματική διαδικασία

Ένα λεπτότοιχο δοκίμιο (20x23x30 mm, XYZ) όπου σχεδιάστηκε στο λογισμικό SOLIDWORKS™ επιλέχθηκε για τα πειράματα της δεύτερης αυτής πειραματικής διάταξης με πάχος τοιχώματος 2 mm (εικόνα 16).



Εικόνα 16. Το μοντέλο σε μορφή CAD και τα εκτυπωμένα δοκίμια

Το μηχάνημα (τρισδιάστατος εκτυπωτής) που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των δοκιμίων ήταν ο Craftbot Plus Pro. Είναι ένας πολυβραβευμένος εκτυπωτής, κατασκευασμένος στην Ευρώπη (Ουγγαρία), αναβαθμισμένος (Pro) από την αρχική του έκδοση που πρωτοξεκίνησε στην αγορά το 2016. Η επιφάνεια εκτύπωσής του είναι από γυαλί όπου έχει υψηλό συντελεστή ελαστικότητας και είναι θερμικά σταθερή με αποτέλεσμα να παραμένει επίπεδη, διασφαλίζοντας μια σταθερή ευθυγράμμιση πλατφόρμας (bed levelling). Η γυάλινη επιφάνεια επιπλέον εγγυάται ένα ομαλό φινίρισμα, δίνοντας γυαλιστερές βάσεις στα μοντέλα κάτι που δε μπορεί να επιτευχθεί στις περισσότερες επιφάνειες άλλων FFF εκτυπωτών. Σε πολλές περιπτώσεις η επιφάνεια εκτύπωσης πρέπει να θερμανθεί για να αποφευχθούν φαινόμενα στρέβλωσης (warping). Το μηχάνημα αυτό διαθέτει μια θερμικά σταθερή επιφάνεια που δε μπορεί να επηρεαστεί από ξαφνικές αλλαγές θερμοκρασίας (αυξήσεις, μειώσεις). Επίσης, ο τύπος του γυαλιού της επιφάνειας είναι τέτοιος ώστε να αντέχει σε υψηλές πιέσεις και να μη σπάει, αλλά και είναι αρκετά ανθεκτικός στις γρατσουνιές χωρίς να είναι ευαίσθητος σε φθορά ή σε κάποια χημική ζημιά. Αποτελείται από λιγότερα εξαρτήματα και συνδέσεις σε σχέση με παρόμοια μοντέλα έτσι ώστε να υπάρχουν

λιγότερες εμπλοκές αλλά και να καθαρίζεται πιο εύκολα. Η κεφαλή (hotend) που διαθέτει είναι εξ'ολοκλήρου μεταλλική και έτσι μπορεί να εκτυπώσει σε εξαιρετική ποιότητα όχι μόνο τα δημοφιλή υλικά αλλά και πιο εξειδικευμένα, όπως νήματα από ξύλο και ορείχαλκο. Επιπλέον, το μεταλλικό hotend έχει ενεργή ψύξη για να απομονωθεί η ζώνη τήξης με σκοπό πιο καθαρές ανακλήσεις (retractions) για μια καλύτερη ποιότητα εκτύπωσης. Διαθέτει πρόσθετα εξαρτήματα για συνολικά καλύτερη εμπειρία εκτύπωσης από το χρήστη, όπως πόρτα ασφαλείας από Plexiglas για προστασία από παιδιά αλλά και καμπυλωτό καπάκι από το ίδιο υλικό. Εκτός από την προστασία, που παρέχουν αυτά τα καπάκια, το μεγάλο πλεονέκτημα είναι η διατήρηση της θερμοκρασίας εσωτερικά (θάλαμος), ειδικά όταν εκτυπώνονται μοντέλα που απαιτούν υψηλές θερμοκρασίες (ABS, ASA, PETG κ.α.) και πρέπει να αποφευχθούν ξαφνικές αλλαγές θερμοκρασίες από εξωτερικούς παράγοντες. Η αξιοπιστία αυτού του μοντέλου οφείλεται και στη σταθερότητα που παρέχει το χαλύβδινο πλαίσιο από το οποίο είναι κατασκευασμένο. Λειτουργικά διαθέτει ένα φιλικό περιβάλλον εργασίας με έγχρωμη οθόνη LCD αφής όπου δεν απαιτεί ιδιαίτερη εκπαίδευση για ένα νέο χρήστη. Μπορεί να διακοπεί η εκτύπωση με επιλογή «print – pause - resume» και να συνεχιστεί με το ίδιο υλικό ή κάποιο άλλο κατασκευάζοντας μοντέλα από δυο ή και περισσότερα χρώματα (αλλά και τύπους).

Τεχνικά χαρακτηριστικά του Craftbot Plus Pro

Τεχνολογία εκτύπωσης :	FFF
Διαστάσεις πλαισίου :	40.6x35x38,5 cm
Διαστάσεις εκτύπωσης :	25x20x20 cm
Ανάλυση :	0,05 mm (με κεφαλή 0,25 mm)
Ακρίβεια θέσης :	X,Y 4 micron, Z 2 micron
Διάμετρος νήματος :	1,75 mm
Ταχύτητα εκτύπωσης :	50-200 mm/s
Θερμοκρασία κεφαλής :	180-260°C
Θερμοκρασία πλατφόρμας :	50-110°C
Τύποι υλικών :	PLA, ABS, PETG, HIPS, nylon κ.α.
Λογισμικό λειτουργίας :	Craftware
Υποστηριζόμενα αρχεία :	STL, OBJ, CWPRJ
Θόρυβος (κατά την εκτύπωση) :	48-49 decibels
Βάρος :	14,45 Kg

Για την εκτύπωση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε το σύνθετο νήμα Wood/PLA (NEEMA3D™) με περιεκτικότητα σε συστατικά 30% σκόνης ξύλου και 70% PLA, πυκνότητας 1,1-1,2 g/cm, εύρος τήξης 140-150°C και διαμέτρου 1,75 mm.

3.3 Σχεδιασμός πειράματος

Η τραχύτητα της επιφάνειας αλλά και η διαστατική ακρίβεια των μοντέλων που παράγονται με την FFF διαδικασία εξετάστηκαν μετά την επίδραση διαφορετικών τιμών των βασικών παραμέτρων της θερμοκρασίας ακροφυσίου αλλά και του πάχους στρώσης (εικόνα 15). Η σύσταση της σκόνης ξύλου, η μορφή και ο προσανατολισμός του δοκιμίου, η ταχύτητα εκτύπωσης καθώς και οι παράμετροι κατασκευής διατηρήθηκαν σταθερές. Αν άλλαζε η σύσταση του υλικού θα υπήρχαν διαφορετικές φυσικές και θερμικές ιδιότητες (εύρος σημείου τήξης, μετάβαση θερμοκρασίας, δείκτης ιξώδους κ.α.) επηρεάζοντας τη σύνδεση μεταξύ των εναποτιθέμενων στρωμάτων. Για αυτό επιλέχθηκε ένα συγκεκριμένο υλικό για την πραγματοποίηση των πειραμάτων ώστε να μην υπάρχουν άλλοι παράμετροι που να επηρεάσουν το τελικό αποτέλεσμα των μετρήσεων της ποιότητας των δοκιμίων.

Το κύριο μέλημα της έρευνας ήταν η διερεύνηση της επίδρασης δυο ανεξάρτητων παραμέτρων (πάχος στρώσης LT, θερμοκρασία ακροφυσίου NT) στις γραμμικές διαστάσεις ενός απλού κυβοειδούς δοκιμίου και στην ποιότητα της επιφάνειάς του (μετρήσεις κατά άξονα Z). Στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 16) συνοψίζονται οι μεταβλητές (και οι τιμές τους) και οι σταθερές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν.

Parameters	Units	Levels				
		1	2	3	4	5
Variable parameters						
Nozzle Temperature (NT)	(°C)	180	190	200	210	220
Layer Thickness (LT)	(mm)	0.1	0.2	0.3		
Constant parameters						
Travel speed (This speed occurs when 3D printer is not extruding material)	mm/s			40		
Infill printing speed	mm/s			30		
Infill	%			20		
Bed temperature	°C			60		
Room temperature	°C			20		
Room humidity	%			50		
Outline/perimeter shells	Number			4		
Raster angle	Degrees			±45		
Top solid layers	Number			6		
Bottom solid layers	Number			5		

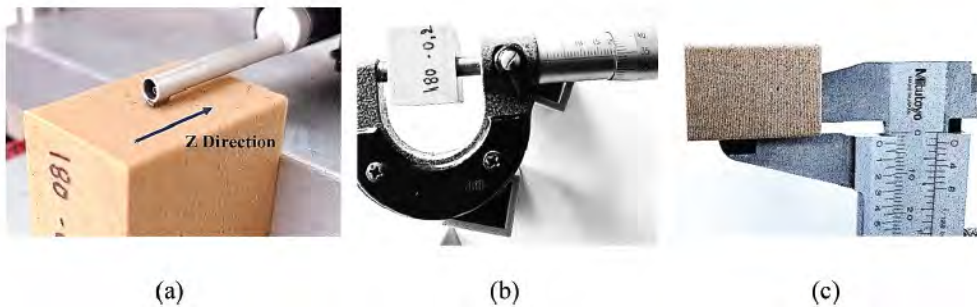
Πίνακας 16. Οι μεταβλητές και οι σταθερές παράμετροι του πειράματος

Επιλέχθηκε ένα πλήρες παραγοντικό (full factorial) σχέδιο και αναλύθηκε ένας πίνακας πειραμάτων με όλους τους συνδυασμούς μεταξύ του πάχους στρώσης LT και της θερμοκρασίας ακροφυσίου NT για την κατασκευή 15 δειγμάτων (πίνακας 17).

No exp.	Parameters	Measurements						
	NT (°C)	LT (mm)	Ra (μm)	Rt (μm)	DX (mm)	DY (mm)	DWX (mm)	DWY (mm)
1	180	0.3	23.6	117.3	0.463	0.417	0.530	0.530
2	190	0.3	23.3	117.2	0.470	0.460	0.550	0.560
3	200	0.3	23.5	116.3	0.510	0.510	0.580	0.580
4	210	0.3	24.0	132.4	0.527	0.527	0.610	0.610
5	220	0.3	24.3	126.6	0.627	0.583	0.640	0.650
6	180	0.2	16.1	89.5	0.450	0.323	0.470	0.460
7	190	0.2	17.6	95.0	0.427	0.370	0.510	0.500
8	200	0.2	15.2	81.4	0.460	0.427	0.530	0.510
9	210	0.2	18.4	105.3	0.497	0.457	0.550	0.550
10	220	0.2	18.0	104.8	0.580	0.507	0.580	0.580
11	180	0.1	16.0	100.6	0.383	0.330	0.450	0.470
12	190	0.1	15.0	103.3	0.410	0.337	0.460	0.480
13	200	0.1	16.9	105.5	0.420	0.343	0.490	0.480
14	210	0.1	13.3	91.6	0.433	0.387	0.480	0.490
15	220	0.1	17.0	109.4	0.443	0.407	0.510	0.520
Average			18.8	106.4	0.473	0.426	0.529	0.531
Min			13.3	81.4	0.383	0.323	0.450	0.460
Max			24.3	132.4	0.627	0.583	0.640	0.650

Πίνακας 17. Τα πειράματα και οι μετρήσεις τραχύτητας και διαστατικής ακρίβειας

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων της ποιότητας της επιφάνειας κατά τον άξονα Z (μέσος όρος τιμών) χρησιμοποιήθηκε ένα τραχύμετρο με μήκος δείγματος / μήκος αξιολόγησης : 0,8 mm / 4mm (εικόνα 17a). Οι παράμετροι της ποιότητας της επιφάνειας που μετρήθηκαν σε αυτή την έρευνα ήταν το Ra και το Rt. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε ένα μικρόμετρο (0-25 mm, ακρίβεια 0,01 mm) για τις εξωτερικές πλευρές του δοκιμίου (εικόνα 17b) και ένα παχύμετρο για τις μετρήσεις από τα πάχη των δοκιμίων με ακρίβεια 0,05 mm (εικόνα 17c).



Εικόνα 17. Μετρήσεις με a) Τραχύμετρο b) Μικρόμετρο και c) Παχύμετρο

Στη συνέχεια με βάση τις μετρήσεις του τραχύμετρου υπολογίσθηκαν οι γραμμικές αποστάσεις DX, DY χρησιμοποιώντας τις παρακάτω εξισώσεις :

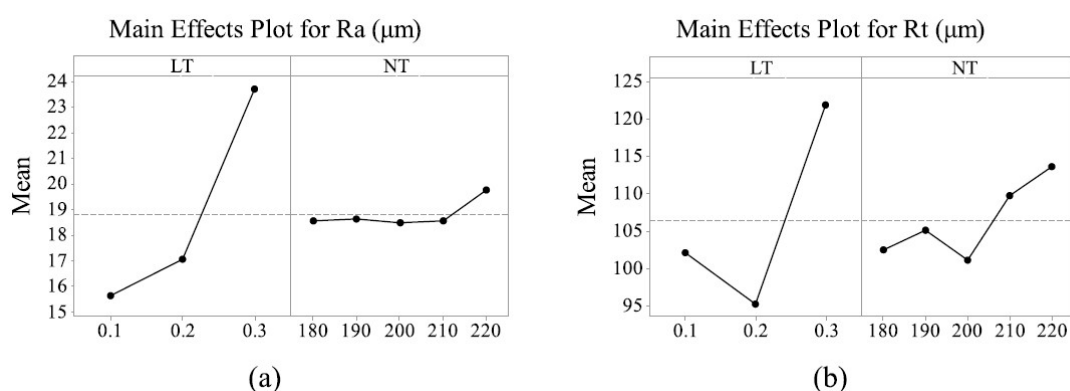
$$D_X = \frac{X_{up} + X_{middle} + X_{down}}{3} - 20$$

$$D_Y = \frac{Y_{up} + Y_{middle} + Y_{down}}{3} - 23$$

Οι εξωτερικές διαστάσεις X και Y μετρήθηκαν σε τρεις θέσεις (πάνω, μέση, κάτω) και υπολογίστηκε η μέση τιμή τους. Στην πραγματικότητα, οι ονομαστικές τιμές των διαστάσεων σε X και Y αφαιρούνται από τις μέσες τιμές. Οι διαφορές των αποστάσεων σε X, Y κατευθύνσεις από τις ονομαστικές τιμές του πάχους των τοιχωμάτων ορίζονται ως DWX και DWY. Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου στους 20°C.

3.4 Αποτελέσματα

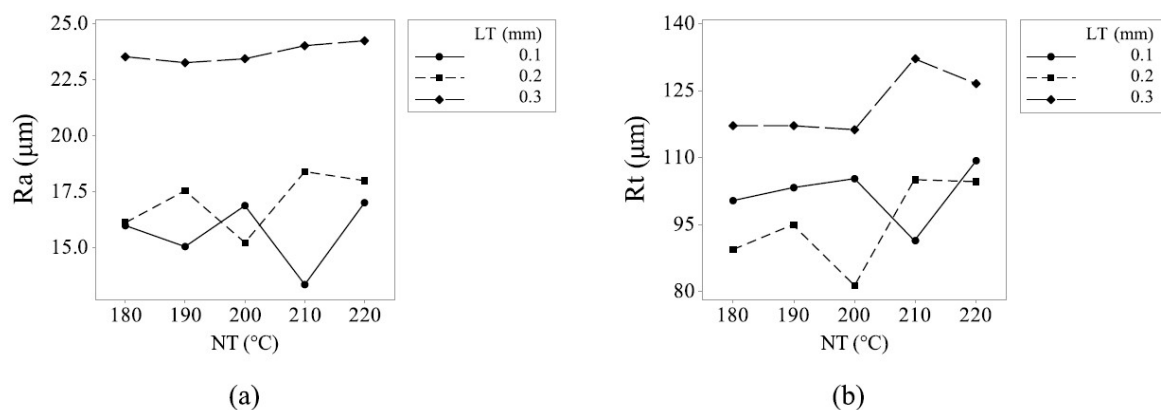
Τόσο το Ra όσο και το Rt είναι πολύ δημοφιλή στοιχεία στον χαρακτηρισμό των επιφανειών των μοντέλων που μπορούν να επηρεάσουν ακόμα και την απόδοσή τους στο στάδιο της συναρμολόγησης, αν χρειαστεί. Τα παρακάτω διαγράμματα (εικόνα 18) απεικονίζουν την επίδραση της θερμοκρασίας ακροφυσίου NT και του πάχους στρώσης LT στα Ra και Rt των εκτυπωμένων δοκιμίων από Wood/PLA. Παρατηρείται ότι η εξάπλωση των μέσων τιμών είναι μεγαλύτερη για το LT από ότι για το NT.



Εικόνα 18. Επίδραση θερμοκρασίας ακροφυσίου και πάχους στρώσης στις παραμέτρους τραχύτητας Ra και Rt.

Διαπιστώθηκε ότι όσο το πάχος στρώσης μεγάλωνε τόσο το Ra και το Rt αυξανόταν, με αποτέλεσμα τη χαμηλότερη ποιότητα των επιφανειών. Όσο αυξανόταν το πάχος στρώσης, στις μεταξύ τους στρώσεις του υλικού δημιουργούνταν βαθύτερα αυλάκια με αποτέλεσμα την αύξηση της τραχύτητας. Η θερμοκρασία του ακροφυσίου διαπιστώθηκε ότι επηρεάζει ελαφρώς τόσο το Ra όσο και το Rt. Όσο η θερμοκρασία αυξανόταν από τους 180°C στους 200°C, τα Ra, Rt μειωνότανε με ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα στην επιφάνεια των δοκιμίων. Στη συνέχεια όσο η θερμοκρασία ανέβαινε από τους 200°C στους 220°C εμφανιζόταν μη επιθυμητές τιμές στα Ra και Rt. Άρα οι 200°C βελτιστοποιούσαν την ακεραιότητα της επιφάνειας των μοντέλων με αποτέλεσμα την ομαλότερη συγκόλληση των στρώσεων και την εμφάνιση μικρότερων κοιλάδων σε ύψος (αυλάκια).

Η αλληλεπίδραση του πάχους στρώσης LT και της θερμοκρασίας του ακροφυσίου NT επάνω στα Ra και Rt φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα (εικόνα 19).



Εικόνα 19. Επίδραση πάχους στρώσης και θερμοκρασίας ακροφυσίου στα Ra και Rt.

Παρατηρείται από το διάγραμμα ότι οι τιμές 0,1 και 0,2 του πάχους στρώσης αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με έναν πολύπλοκο τρόπο.

Η ανάλυση των διακυμάνσεων (Analysis of variances - ANOVA) χρησιμοποιήθηκε για να προσδιορίσει τον αντίκτυπο κάθε μεταβλητής στις παραμέτρους Ra, Rt (πίνακας 18).

Ra

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	%
LT (mm)	2	186.64	93.32	54.38	0.00	91.6
NT (°C)	4	3.47	0.87	0.51	0.73	1.7
Error	8	13.73	1.72			6.7
Total	14	203.84				100.0
R-sq						93.27
R-sq (adj)						88.21
R-sq (pred)						76.32

Rt

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	%
LT (mm)	2	1933.1	966.57	16.23	0.002	70.6
NT (°C)	4	327.4	81.84	1.37	0.324	12.0
Error	8	476.4	59.55			17.4
Total	14	2736.9				100.0
R-sq						82.59
R-sq (adj)						69.54
R-sq (pred)						38.80

Πίνακας 18. Ανάλυση διακύμανσης ANOVA για τις μεταβλητές Ra, Rt στο πάχος στρώσης και στη θερμοκρασία ακροφυσίου

Μια παράμετρος χαρακτηρίζεται σημαντική αν η τιμή F είναι υψηλότερη από 4 ή η τιμή P είναι χαμηλότερη από 0,05. Η ανάλυση ANOVA τόσο για το Ra όσο και για το Rt έδειξε παρόμοια αποτελέσματα. Η κυρίαρχη παράμετρος είναι το πάχος στρώσης που έχει τιμές F μεγαλύτερες από 4 και τιμές P μικρότερες από 0,05. Επιπλέον, η θερμοκρασία ακροφυσίου είναι ασήμαντη με τιμές $F < 2$ και $P > 0,05$ τόσο για το Ra όσο και για το Rt.

Τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση διακύμανσης των Ra, Rt ήταν τα μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης χωρίς αλληλεπίδραση.

$$Ra = 5.99 + 40.44LT + 0.0236T \pm e$$

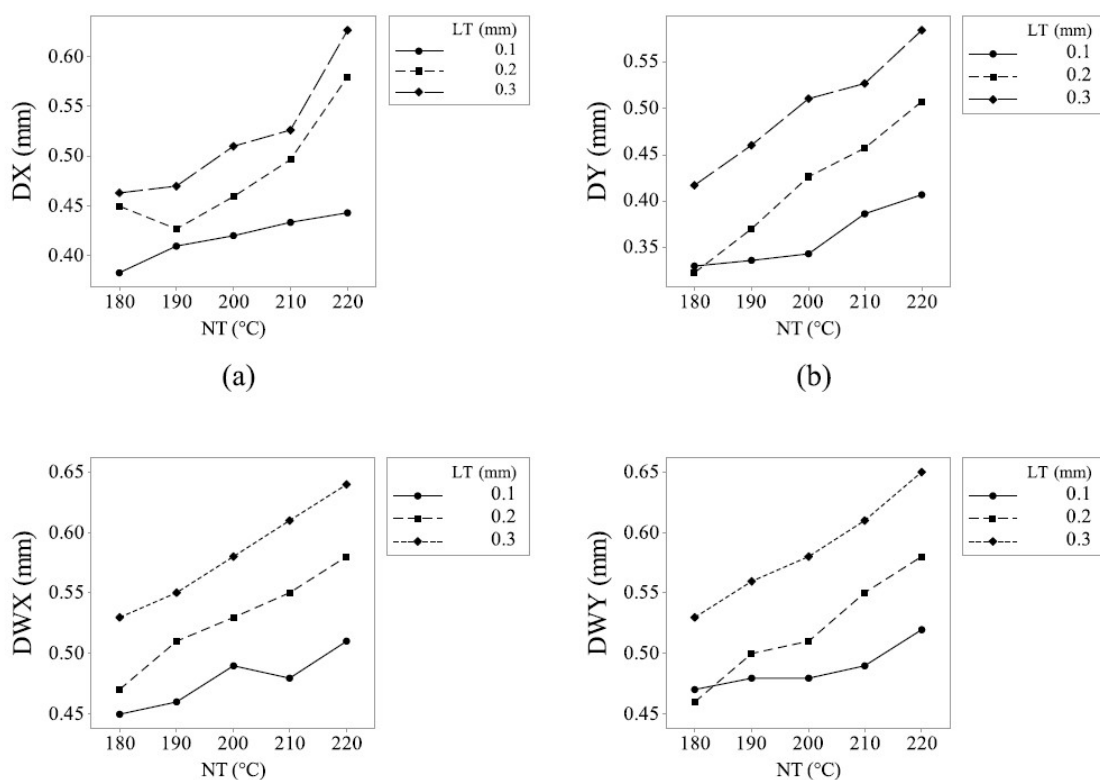
$$Rt = 32.7 + 99.4LT + 0.269T \pm e$$

Η προβλεπόμενη τιμή R-sq (pred) του Ra είναι περίπου 76% που είναι κοντά στο R-sq με τιμή 93%. Ωστόσο το R-sq (pred) του Rt έχει μεγάλη διαφορά με το R-sq (82% και 39% αντίστοιχα). Αυτό σημαίνει ότι οι προβλέψεις του Ra θα είναι πιο ακριβείς από τις προβλέψεις του Rt.

3.5 Επίδραση πάχους στρώσης και θερμοκρασίας κεφαλής στη διαστατική ακρίβεια

Η διαστατική ακρίβεια των εκτυπωμένων δοκιμίων είναι πολύ σημαντική γιατί επηρεάζει πολλά στάδια στην εξέλιξη του προϊόντος (συναρμολόγηση, λειτουργικότητα) [318]. Όλες οι τιμές απόκλισης (DX, DY, DWX, DWY) στην παρούσα έρευνα είναι κατά μέσο όρο μεταξύ 0,426 και 0,531 mm (πίνακας 17) εξαιτίας της διαμέτρου του ακροφυσίου που είναι 0,4 mm.

Στα παρακάτω διαγράμματα (εικόνα 20) διακρίνεται η επίδραση της θερμότητας του ακροφυσίου NT και του πάχους στρώσης LT στη γραμμική διαστατική ακρίβεια των εκτυπωμένων δοκιμίων από Wood/PLA.



Εικόνα 20. Επίδραση LT, NT στα (a) DX, (b) DY, (c) DWX, (d) DWY

Διαπιστώθηκε ότι όσο αυξανόταν το πάχος στρώσης LT, αυξανόταν και οι διαστάσεις σε DX, DY, DWX, DWY. Κατά συνέπεια, οι υψηλότερες θερμοκρασίες του ακροφυσίου αυξάνουν το λιωμένο υλικό με αποτέλεσμα να υπάρχει τραχύτερη εναπόθεση που επηρεάζει τις τιμές Ra και Rt και επιφέρει μεγαλύτερες τελικές διαστάσεις.

Η ανάλυση ANOVA χρησιμοποιήθηκε και στις μετρήσεις διαστατικής ακρίβειας και παρατηρήθηκαν τιμές F υψηλότερες από 4 και τιμές P μικρότερες από 0,05 (πίνακες 19-22). Συμπεραίνεται λοιπόν ότι τόσο το LT όσο και το NT είναι σημαντικές παράμετροι για τη διαστατική ακρίβεια.

DX

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	%
LT (mm)	2	0.026324	0.013162	17.46	0.001	43.8
NT (°C)	4	0.027733	0.006933	9.2	0.004	46.2
Error	8	0.006031	0.000754			10.0
Total	14	0.060089				100.0
R-sq						89.96
R-sq (adj)						82.44
R-sq (pred)						64.71

DY

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	%
LT (mm)	2	0.048664	0.024332	45.43	0.00	53.9
NT (°C)	4	0.037311	0.009328	17.42	0.001	41.3
Error	8	0.004284	0.000536			4.7
Total	14	0.090259				100.0
R-sq						95.25
R-sq (adj)						91.69
R-sq (pred)						83.31

DWX

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	%
LT (mm)	2	0.027053	0.013527	73.12	0.00	61.4
NT (°C)	4	0.01556	0.00389	21.03	0.00	35.3
Error	8	0.00148	0.000185			3.4
Total	14	0.044093				100.0
R-sq						96.64
R-sq (adj)						94.13
R-sq (pred)						88.20

DWY

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	%
LT (mm)	2	0.024973	0.012487	43.56	0	57.3
NT (°C)	4	0.016307	0.004077	14.22	0.001	37.4
Error	8	0.002293	0.000287			5.3
Total	14	0.043573				100.0
R-sq						94.74
R-sq (adj)						90.79
R-sq (pred)						81.50

Πίνακες 19-22. Ανάλυση διακύμανσης ANOVA για τα DX, DY, DWX, DWY στο πάχος στρώσης και στη θερμοκρασία ακροφυσίου

Τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση ANOVA των DX, DY, DWX, DWY ήταν μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης χωρίς αλληλεπίδραση.

$$DX = -0.199 + 0.5067LT + 0.002856T \pm e$$

$$DY = -0.4176 + 0.6933LT + 0.003522T \pm e$$

$$DWX = -0.0280 + 0.5200LT + 0.002267T \pm e$$

$$DWY = -0.0267 + 0.4900LT + 0.002300T \pm e$$

Οι προβλεπόμενες τιμές R-sq(pred) και R-sq είναι κοντά για όλες τις τιμές (DX, DY, DWX και DWY). Αυτό σημαίνει ότι οι προβλέψεις τιμών DX, DY, DWX και DWY αναμένεται να είναι αξιόπιστες για όλα τα χαρακτηριστικά της διαστατικής ακρίβειας DA.

Αναφορές 3^{ου} κεφαλαίου

- [313] Jackiewicz, J., Manufacturing of Instructional Aids for Students at Low Cost by Means of 3D Printing. *Mater. Manuf. Processes*. **2017**, 32(10), 1116–1130.
- [314] Horn, T. J.; Harrysson, O. L., Overview of Current Additive Manufacturing Technologies and Selected Applications. *Sci. Prog.* **2012**, 95(3), 255–282.
- [315] Najmon, J. C.; Raeisi, S.; Tovar, A. 2 - Review of Additive Manufacturing Technologies and Applications in the Aerospace Industry. In *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*; Froes, F., Boyer, R., Eds. Elsevier: **2019**; pp 7–31.
- [316] Spoerk, M.; Gonzalez-Gutierrez, J.; Sapkota, J. Schuschnigg, S.; Holzer, C.; Effect of the Printing Bed Temperature on the Adhesion of Parts Produced by Fused Filament Fabrication. *Plast., Rubber Compos.* **2018**, 47(1), 17–24.
- [317] Turner, B. N.; Gold, S. A. A. Review of Melt Extrusion Additive Manufacturing Processes: II. Materials, Dimensional Accuracy, and Surface Roughness. *Rapid. Prototyp. J.* **2015**, 21(3), 250–261.
- [318] Chaidas, D.; Kitsakis, K.; Kechagias, J. Maropoulos, S. The Impact of Temperature Changing on Surface Roughness of FFF Process. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2016**, 161, 012033.
- [319] Vyavahare, S.; Kumar, S.; Panghal, D. Experimental Study of Surface Roughness, Dimensional Accuracy and Time of Fabrication of Parts Produced by Fused Deposition Modelling. *Rapid. Prototyp. J.* **2020**, 26(9), 1535–1554.
- [320] Dey, A.; Yodo, N.; Systematic, A. Survey of FDM Process Parameter Optimization and Their Influence on Part Characteristics. *J. Manuf. Mater. Process.* **2019**, 3(3), 64.
- [321] Somireddy, M.; Singh, C.; Czekanski, A. Analysis of the Material Behavior of 3D Printed Laminates via FFF. *Exp. Mech.* **2019**, 59(6), 871–881.
- [322] Matuana, L.; Faruk, O. Effect of Gas Saturation Conditions on the Expansion Ratio of Microcellular Poly (Lactic Acid)/Wood-Flour Composites. *Express Polym. Lett.* **2010**, 4(10), 621–631.
- [323] Lv, S.; Gu, J.; Tan, H.; Zhang, Y. Modification of Wood Flour/PLA Composites by Reactive Extrusion with Maleic Anhydride. *J. Appl. Polym. Sci.* **2016**, 133(15), 1–9.
- [324] Meng, Q.; Hetzer, M.; De Kee, D. PLA/Clay/Wood Nanocomposites: Nanoclay Effects on Mechanical and Thermal Properties. *J. Compos. Mater.* **2011**, 45(10), 1145–1158.
- [325] Huda, M.; Drzal, L.; Misra, M.; Mohanty, A. Wood-Fiber- Reinforced Poly (Lactic Acid) Composites: Evaluation of the Physicomechanical and Morphological Properties. *J. Appl. Polym. Sci.* **2006**, 102(5), 4856–4869.

- [326] Wimmer, R.; Steyrer, B.; Woess, J.; Koddenberg, T.; Mundigler, N. 3D Printing and Wood. *Pro Ligno*. **2015**, *11*(4), 144–149.
- [327] Faludi, G.; Dora, G.; Renner, K.; Móczó, J.; Improving Interfacial, P. B. Adhesion in PLA/Wood Biocomposites. *Compos. Sci. Technol.* **2013**, *89*, 77–82.
- [328] Kariz, M.; Sernek, M.; Kuzman, M. K. Effect of Humidity on 3D-Printed Specimens from Wood-PLA Filaments. *Wood Res.* **2018**, *63*(5), 917–922.
- [329] Kain, S.; Ecker, J.; Haider, A.; Musso, M. Petutschnigg, A. Effects of the Infill Pattern on Mechanical Properties of Fused Layer Modeling (FLM) 3D Printed Wood/Polylactic Acid (PLA) Composites. *Eur. J. Wood Wood Prod.* **2020**, *78*(1), 65–74.
- [330] Ayırlmis, N.; Kariž, M.; Kitek Kuzman, M. Effect of Wood Flour Content on Surface Properties of 3D Printed Materials Produced from Wood Flour/PLA Filament. *Int. J. Polym. Anal. Charact.* **2019**, *24*(7), 659–666.
- [331] Guessasma, S.; Belhabib, S.; Nouri, H. Microstructure and Mechanical Performance of 3D Printed Wood-PLA/PHA Using Fused Deposition Modelling: Effect of Printing Temperature. *Polymers*. **2019**, *11*(11), 1778.
- [332] Zandi, M. D.; Jerez-Mesa, R.; Lluma-Fuentes, J.; Roa, J. J.; Travieso-Rodriguez, J. A. Experimental Analysis of Manufacturing Parameters' Effect on the Flexural Properties of Wood-PLA Composite Parts Built through FFF. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2020**, *106*(9–10), 3985–3998.

4. Εφελκυσμός και μέτρο ελαστικότητας Wood/PLA δοκιμίων

Στη συνέχεια ακολουθεί μια τρίτη μελέτη που διερευνά τις επιδράσεις τεσσάρων μεταβλητών κατά την παραγωγή πρωτοτύπων με τη μέθοδο συντηγμένου νήματος από βιοδιασπώμενο σύνθετο υλικό PLA με σκόνη ξύλου καρύδας (Wood/PLA), στην αντοχή σε εφελκυσμό αλλά και στην ελαστικότητα εκτυπωμένων μοντέλων. Η βελτιστοποίηση παραμέτρων πραγματοποιήθηκε μέσω της στατιστικής μεθόδου Taguchi (L18 ορθογώνιο πίνακα) όπου χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό και την παλινδρόμηση των μοντέλων. Οι μεταβλητές που εξετάστηκαν ήταν το πάχος στρώσης, η θερμοκρασία του ακροφυσίου, η γωνία εναπόθεσης raster και η ταχύτητα εκτύπωσης. Οι επιδράσεις αυτών των μεταβλητών στην αντοχή των εκτυπωμένων μοντέλων θεωρήθηκε απαραίτητο να εξεταστούν για τη βελτίωση της μηχανικής τους απόκρισης. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων διερευνήθηκαν χρησιμοποιώντας την ανάλυση ANOM και ANOVA και μοντελοποιήθηκαν μέσω μοντέλων γραμμικής παλινδρόμησης. Επιπλέον, ένα ανεξάρτητο πείραμα επαναλήφθηκε τρεις φορές με τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων για αξιολόγηση της μεθοδολογίας, δίνοντας λάθη προβλέψεων μικρότερα από 3%. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η γωνία απόθεσης raster ήταν η κυρίαρχη παράμετρος μεταξύ των άλλων μεταβλητών σύμφωνα με τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν.

Η προσθετική κατασκευή (ΠΚ), όπως προαναφέρθηκε, είναι μια υποομάδα διαδικασιών παραγωγής που χρησιμοποιεί πλαστικά, κεραμικά, μεταλλικά και σύνθετα υλικά σε στερεή κατάσταση (σκόνες, νήματα, φύλλα, ράβδοι) ή υγρή (ρητίνες) που εναποτίθενται χρησιμοποιώντας πολλούς διαφορετικούς μηχανισμούς και τεχνικές εναπόθεσης [333-335]. Η κατασκευή μοντέλων με τη χρήση λιωμένου νήματος γνωστή ως Fused Filament Fabrication (FFF) είναι η πιο δημοφιλής μεταξύ των διεργασιών της προσθετικής κατασκευής λόγω του απλού μηχανισμού εναπόθεσης και της ποικιλίας διαθέσιμων υλικών που υπάρχουν στην αγορά. Στις μέρες μας, χρησιμοποιούνται ευρέως και πιο καινοτόμα υλικά αλλά και χρώματα με έναν τρόπο φιλικό προς το περιβάλλον σε πολλούς τομείς [336-341].

4.1 Αναφορές στην αντοχή εξαρτημάτων

Η αντοχή των εξαρτημάτων της μεθόδου FFF είναι μια από τις κύριες ανησυχίες των χρηστών κατά την επιλογή των παραμέτρων εκτύπωσης πριν ξεκινήσει η διαδικασία [342-344]. Τα χαρακτηριστικά αντοχής των μοντέλων που παράγονται με τη μέθοδο FFF διερευνώνται για περισσότερο από δυο δεκαετίες [333, 345-348]. Ο προσανατολισμός του μοντέλου μέσα στο χώρο κατασκευής και οι παράμετροι εναπόθεσης επηρεάζουν τη διαστρωματική αντοχή μεταξύ του αποτιθέμενου υλικού [349,350] και κατά συνέπεια της αντοχής αλλά και της ποιότητας της επιφάνειας του [351-356]. Έχει ερευνηθεί ότι η γωνία απόθεσης raster επηρεάζει επίσης την τάση εφελκυσμού των FFF μοντέλων του πολυγαλακτικού οξέος PLA. Σε μοντέλα PLA με προσανατολισμό κατασκευής κατά X (0° γωνία απόθεσης) εμφανίζεται υψηλότερη τάση εφελκυσμού από μοντέλα που έχουν κατεύθυνση απόθεσης κατά Y και γωνία απόθεσης 45° και 90° [357]. Σε όλα τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε λειτουργία συμπαγούς εκτύπωσης και επιπλέον οι παράμετροι της προσθετικής διαδικασίας όπως η θερμοκρασία ακροφυσίου, η ταχύτητα εκτύπωσης και το πάχος στρώσης διατηρήθηκαν σταθερές. Επίσης έχει διαπιστωθεί ότι το πάχος στρώσης και ο προσανατολισμός των δειγμάτων στην πλατφόρμα κατά X-Y κατεύθυνση επηρεάζουν την αντοχή εφελκυσμού των εξαρτημάτων από υλικό ABS με τη μέθοδο FFF [358].

Πολλές μελέτες έχουν εξετάσει τα αποτελέσματα του πάχους στρώσης, του προσανατολισμού των μοντέλων κατά την κατασκευή τους, της γωνίας και του πλάτους του raster αλλά και του διάκενου αέρα στα χαρακτηριστικά αντοχής των δοκιμίων που παράγονται με τη μέθοδο FFF [346,359,360]. Η αντοχή αυτών των δοκιμίων ποικίλλει ανάλογα με την ποιότητα του δεσίματος μεταξύ των στρώσεων [359,361]. Οι θερμικές ιδιότητες των πολυμερών αλλά και ο ρυθμός εναπόθεσης απαιτούν βελτιστοποίηση για να επιτευχθεί ένας ισχυρός δεσμός διεπαφής αλλά και μια καλύτερη αντοχή [362]. Όλες οι έρευνες καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι διαφορετικές παράμετροι εκτύπωσης είναι κατάλληλες για κάθε υλικό για τη βελτιστοποίηση της ποιότητας των μοντέλων με την FFF μέθοδο, όπως της αντοχής και του σχήματος ακριβείας (διαστατική ακρίβεια) [363].

Όσον αφορά τα οργανικά βιοσυμβατά σύνθετα υλικά, όπως το PLA αναμειγμένο με ρινίσματα ξύλου (Wood/PLA), έχουν πραγματοποιηθεί διάφορες έρευνες ανάλυσης ιδιοτήτων αντοχής σύμφωνα με τη σύνθεση του υλικού [344, 364-367] και τις συνθήκες εκτύπωσης με τη μέθοδο FFF [368-370]. Ο Faludi [344] αναφέρθηκε στη σταθερή πρόσφυση μεταξύ του PLA και της σκόνης ξύλου και απέδειξε ότι είναι ιδιαίτερα ισχυρή. Ο Chansoda [367] πειραματίστηκε με σκόνη ξύλου που προερχόταν από τη βιομηχανία επίπλων και τη

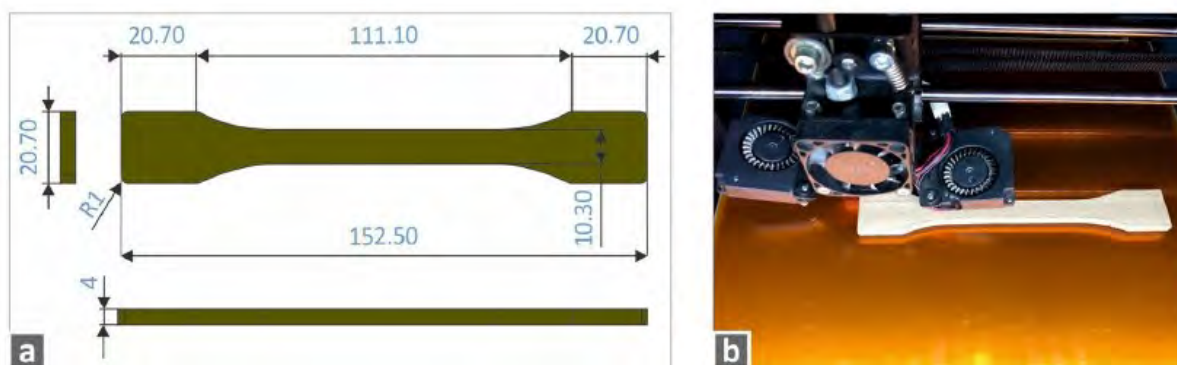
χρησιμοποίησε σαν υλικό ανάμειξης με το PLA. Ο Zandi [370] διερεύνησε την αντοχή ενός Wood/PLA που έχει παραχθεί με την FFF μέθοδο, εξετάζοντας διαφορετικά επίπεδα τιμών των παραμέτρων του πάχους στρώσης, της διαμέτρου του ακροφυσίου, της πυκνότητας πλήρωσης και της ταχύτητας εκτύπωσης. Χρησιμοποίησε έναν ορθογώνιο πίνακα Taguchi L27 και διαπίστωσε ότι το πάχος στρώσης ήταν η πιο κρίσιμη παράμετρος. Ο Kain [351] χρησιμοποίησε δυο διαφορετικές περιεκτικότητες σε ίνες ξύλου (15% και 25%, ARBOCEL C100) για την ανάμειξη με PLA (Ingeo™ 3251D) και δοκίμασε διαφορετική γωνία raster (0-90° με βήμα 15°). Διαπιστώθηκε ότι η περιεκτικότητα 25% σε ξύλο δίνει καλύτερη αντοχή από αυτήν της 15% και ότι η γωνία εναπόθεσης της πλήρωσης επηρεάζει την αντοχή των εξαρτημάτων που παράγονται με την FFF μέθοδο. Διερευνήθηκε επίσης η αντοχή των δοκιμίων με Wood/PLA αλλάζοντας θερμοκρασία ακροφυσίου μεταξύ των τιμών 210°C και 250°C [371]. Η αύξηση της θερμοκρασίας από 210°C έως τους 230°C βελτιώνει ελαφρώς την αντοχή, κάτι που επιβεβαιώνεται και από άλλες έρευνες με υλικό το PLA κατά την FFF διαδικασία [350, 363]. Πάνω από τους 230°C η αντοχή επηρεάζεται από την αποικοδόμηση των σωματιδίων του ξύλου και είναι κάτι που γενικότερα δεν προτείνεται. Ο Ayrilmis [369] διερεύνησε την επίδραση του πάχους στρώσης στην απορρόφηση νερού και την αντοχή δειγμάτων που κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο FFF. Αυξάνοντας το πάχος στρώσης, η απορρόφηση νερού και η πορώδης διατομή αυξάνονταν και η ανθεκτικότητα μειώνονταν. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι η πυκνότητα των παραγόμενων δοκιμίων αυξάνονταν καθώς μειώνονταν η ταχύτητα εκτύπωσης και ότι η αντοχή σε εφελκυσμό και οι ιδιότητες κάμψης δεν μεταβαλλόταν σημαντικά από τους ρυθμούς εναπόθεσης [368].

Οι παραπάνω ερευνητές εξέτασαν την επίδραση των παραμέτρων της μεθόδου FFF στην αντοχή δοκιμίων με διαφορετική περιεκτικότητα σε σκόνη ξύλου αναμειγμένο με PLA. Συμπερασματικά, δεν έχει αναφερθεί καμία έρευνα όπου εξετάζεται η επίδραση του πάχους στρώσης, της θερμοκρασίας ακροφυσίου, της γωνίας raster και της ταχύτητας εκτύπωσης σε δοκίμια τρισδιάστατα εκτυπωμένα με υλικό Wood/PLA. Επίσης, στο πείραμα που ακολουθεί διερευνάται η προτεινόμενη περιοχή εύρους τιμών από τις παραμέτρους που εξετάστηκαν και η επίδραση που έχουν στην αντοχή σε εφελκυσμό και στην ελαστικότητα του PLA αναμειγμένο με σκόνη ξύλου καρύδας.

Τα αποτελέσματα που αναλύθηκαν, παρουσιάζονται με τη χρήση στατιστικών εργαλείων όπως τα διαγράμματα κύριας επίδρασης (MEP), την ανάλυση διακυμάνσεων (ANOVA), τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης και τα μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης. Τέλος, προτείνονται οι τιμές παραμέτρων που βελτιστοποιούν την αντοχή των δοκιμίων από το σύνθετο υλικό wood/PLA.

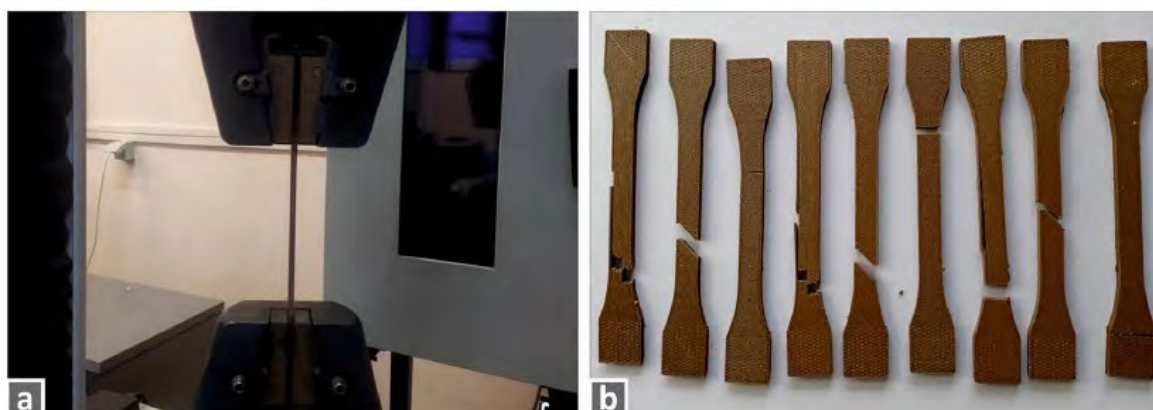
4.2 Μέθοδοι, υλικά και προετοιμασία πειράματος

Σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM D638 – American Society for Testing Materials (εικόνα 21a) σχεδιάστηκε ένα δοκίμιο με πάχος 4 χιλιοστά και μετατράπηκε σε αρχείο STL μέσω του προγράμματος SOLIDWORKS™. Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν τα δείγματα με τον τρισδιάστατο εκτυπωτή Craftbot Plus Pro (εικόνα 21β) με τη μέθοδο FFF. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα ήταν το Wood/PLA όπου εμπορικά το παράγει η NEEMA3D™ στην Ολλανδία. Αποτελείται από 30% ίνες ξύλου καρύδας και 70% καθαρό πολυμερές PLA με διάμετρο νήματος 1,75 χιλιοστά με ειδικό βάρος 1,2g/cc (ASTM D1505) και σημείο τήξης μεταξύ 140°C και 150°C. Η διάμετρος του ακροφυσίου που χρησιμοποιήθηκε ήταν 0,4 χιλιοστά, όπου και γενικότερα αποτελεί μια επιλογή που διαθέτουν οι περισσότεροι εκτυπωτές FFF. Η ελάχιστη παραγόμενη αντοχή εφελκυσμού και ελαστικότητα είναι 70 MPa και 1900 MPa αντίστοιχα (ASTM D882).



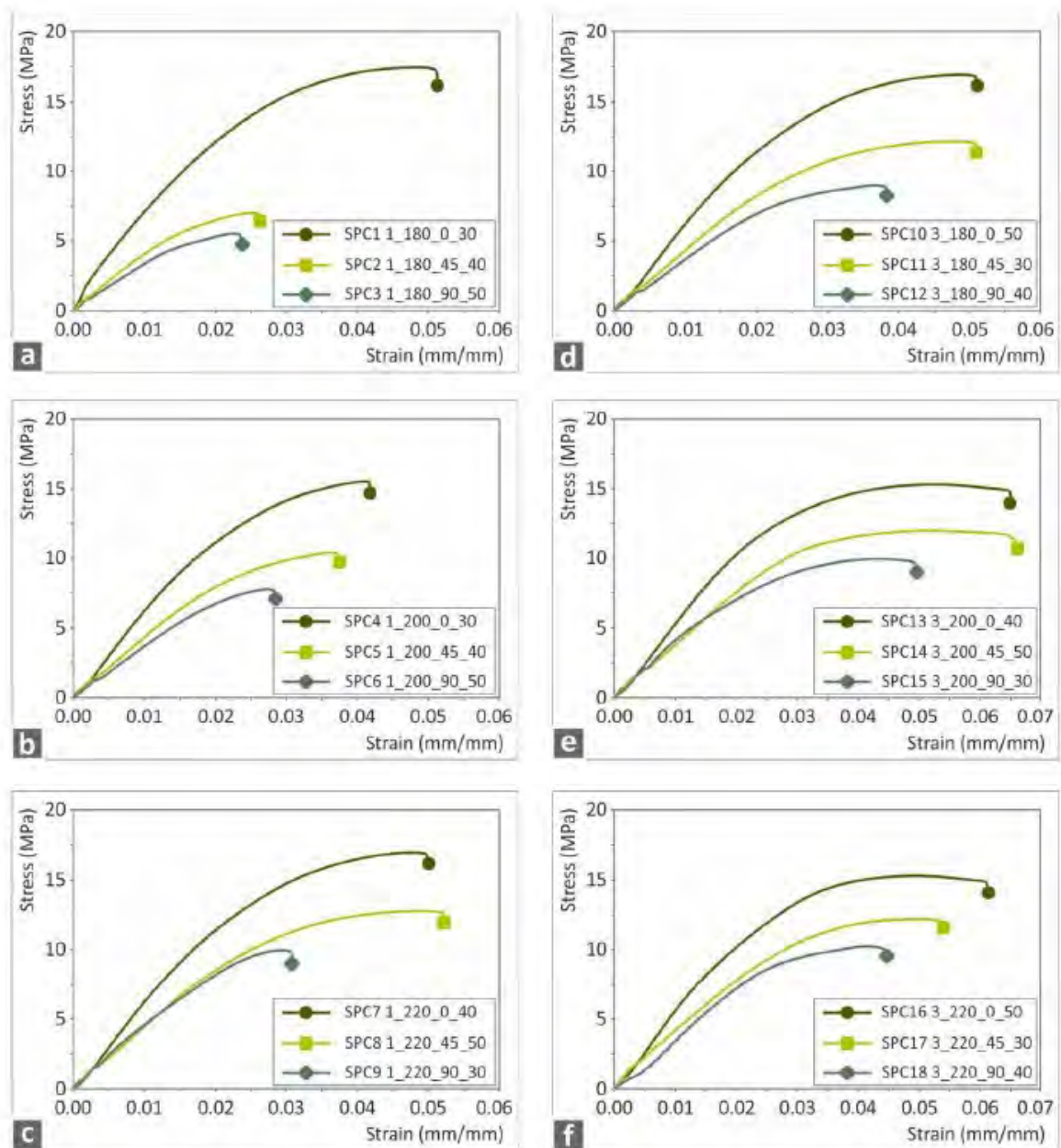
Εικόνα 21. Δοκίμιο : (a) 2D όψεις (b) διαδικασία εκτύπωσης του δοκιμίου με την FFF μέθοδο

Τα πειράματα εφελκυσμού πραγματοποιήθηκαν σε ένα ελεγχόμενο μηχάνημα καταπονήσεων, το Instron 3382 Universal, με χωρητικότητα φορτίου τα 100 kN, σύμφωνα με το ISO, εξοπλισμένο με ειδικό εξάρτημα λαβής όπως φαίνεται στην εικόνα 22. Όλα τα δείγματα υποβλήθηκαν σε δοκιμές σε αυτό το μηχάνημα με ταχύτητα σταυροειδούς κεφαλής 1 χιλιοστό ανά λεπτό (mm/min). Η δύναμη και τα δεδομένα μετατόπισης για κάθε δοκίμιο καταγράφηκαν σε ένα σύστημα απόκτησης δεδομένων και αποθηκεύτηκαν μέσω του λογισμικού BlueHill για περαιτέρω επεξεργασία.



Εικόνα 22. a) το δοκίμιο PLA/Wood τοποθετημένο στις λαβές εφελκυσμού του INSTRON 3382 Universal Testing Machine b) σπασμένα δοκίμια με πάχος στρώσης 0,1 mm

Τα διαγράμματα στην εικόνα 23 (a–f) παρουσιάζουν όλα τα γραφήματα των δεκαοκτώ πειραμάτων της ορθογώνιας διάταξης L18 του Taguchi. Διαπιστώνεται ότι η γωνία εναπόθεσης raster επηρεάζει περισσότερο την αντοχή σε εφελκυσμό και την ελαστικότητα των εκτυπωμένων μοντέλων. Η τιμή 0° παρουσιάζει την υψηλότερη επίδραση σε όλα τα γραφήματα και η τιμή 90° τη χαμηλότερη. Ωστόσο, οι επιπτώσεις από τις άλλες παραμέτρους δεν είναι εμφανείς και κρίνεται αναγκαίο να εφαρμοστούν μοντέλα στατιστικής για τη βελτιστοποίηση των επιπέδων αυτών των παραμέτρων.



Εικόνα 23. Καμπύλες τάσης – καταπόνησης για όλα τα δοκίμια : (a-c) με πάχος στρώσης 0,1 mm και (d-f) με πάχος στρώσης 0,3 mm.

4.3 Σχεδιασμός πειράματος

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε η προσέγγιση Taguchi L18 ($2^1 \times 3^7$) [372-374]. Αυτή η μεθοδολογία χρησιμοποιεί πειράματα σύμφωνα με τους ορθογώνιους πίνακες του Taguchi. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν βρίσκουν τις καλύτερες τιμές των παραμέτρων και κατασκευάζουν μαθηματικά μοντέλα πρόβλεψης [352, 375]. Τέλος, εφαρμόστηκαν τρία πειράματα επικύρωσης αποτελεσμάτων για την επαλήθευση του πειραματικού σχεδιασμού και την αξιολόγησή του στις βέλτιστες συνθήκες.

Το πρώτο βήμα στην παραπάνω προσέγγιση είναι η επιλογή των μεταβλητών παραμέτρων που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της αντοχής σε εφελκυσμό και του μέτρου ελαστικότητας. Αυτή η διεργασία είναι σημαντική και έχει δυο βασικούς προβληματισμούς: (i) να επιλεχθούν οι κατάλληλες μεταβλητές παράμετροι και οι τιμές τους και (ii) όλα τα πειράματα του ορθογώνιου πίνακα να είναι εφικτά να πραγματοποιηθούν (θα πρέπει να περιέχονται όλα στον ορθογώνιο πίνακα).

Στον πίνακα 23 αναφέρονται οι σταθερές και οι μεταβλητές παράμετροι που επιλέχθηκαν. Σύμφωνα με τις έρευνες που έχουν αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα, το πάχος στρώσης και η θερμοκρασία του ακροφυσίου επηρεάζουν τη διαστατική ακρίβεια, την τραχύτητα της επιφάνειας και τη μηχανική απόκριση των μοντέλων που παράγονται με την FFF μέθοδο [342]. Επιπλέον, η γωνία raster είναι επίσης μια απαραίτητη παράμετρος [350] και επηρεάζει την αντοχή των μοντέλων καθώς καθορίζει την κατεύθυνση του μοτίβου αποτύπωσης. Τέλος, η ταχύτητα εκτύπωσης καθορίζει το δέσιμο μεταξύ των επιπέδων – στρώσεων και αυτό επιδρά στη διαστρωματική ποιότητα [362]. Όλες οι άλλες παράμετροι της μεθόδου FFF διατηρήθηκαν σταθερές για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος θορύβου.

Parameters	Units	Levels		
		1	2	3
Variable parameters				
Layer Thickness (LT)	(mm)	0.1	0.3	-
Nozzle Temperature (NT)	(°C)	180	200	220
Deposition Angle (DA)	(°)	0	45	90
Printing Speed (PS)	mm/s	30	40	50
Constant parameters				
Travel speed	mm/s	40		
Infill density	%	100		
Bed temperature	°C	60		
Room temperature	°C	20		
Room humidity	%	50		
Outline/perimeter shells/top layers/bottom layers	Number	1/1/1		

Πίνακας 23. Οι παράμετροι και οι τιμές τους.

Για τις παραπάνω παραμέτρους εφαρμόστηκε ο ορθογώνιος πίνακας Taguchi L18. Αυτός ο πίνακας αποτελείται από δεκαοκτώ συστοιχίες και οκτώ στήλες [376, 377]. Οι δεκαοκτώ συστοιχίες δείχνουν τον αριθμό των πειραμάτων και οι στήλες δείχνουν τις μεταβλητές [373]. Χρησιμοποιήθηκαν μόνο τέσσερις από τις οκτώ στήλες, δηλαδή οι τέσσερις παράμετροι που είναι το πάχος στρώσης, η θερμοκρασία ακροφυσίου, η γωνία εναπόθεσης και η ταχύτητα εκτύπωσης. Σύμφωνα με την προσέγγιση Taguchi οι κενές στήλες συμβάλλουν στον υπολογισμό του σφάλματος. Έτσι, δεν είναι απαραίτητο να επαναληφθούν και τα 18 πειράματα. Ο πίνακας 24 παραθέτει τις μεταβλητές παραμέτρους με τα μετρούμενα χαρακτηριστικά και τους 18 συνδυασμούς πειραμάτων σύμφωνα με τον Taguchi L18 ($2^1 \times 3^7$) ορθογώνιο πίνακα. Δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην εκτύπωση των δεκαοκτώ δοκιμών ώστε να εξαλειφθούν σφάλματα θορύβου.

Από τον πίνακα 24 διαπιστώνεται ότι υπάρχουν σημαντικές μέγιστες και ελάχιστες τιμές μεταξύ των δεκαοκτώ πειραμάτων όπου οι τιμές των τεσσάρων παραμέτρων που εξετάζονται αλλάζουν.

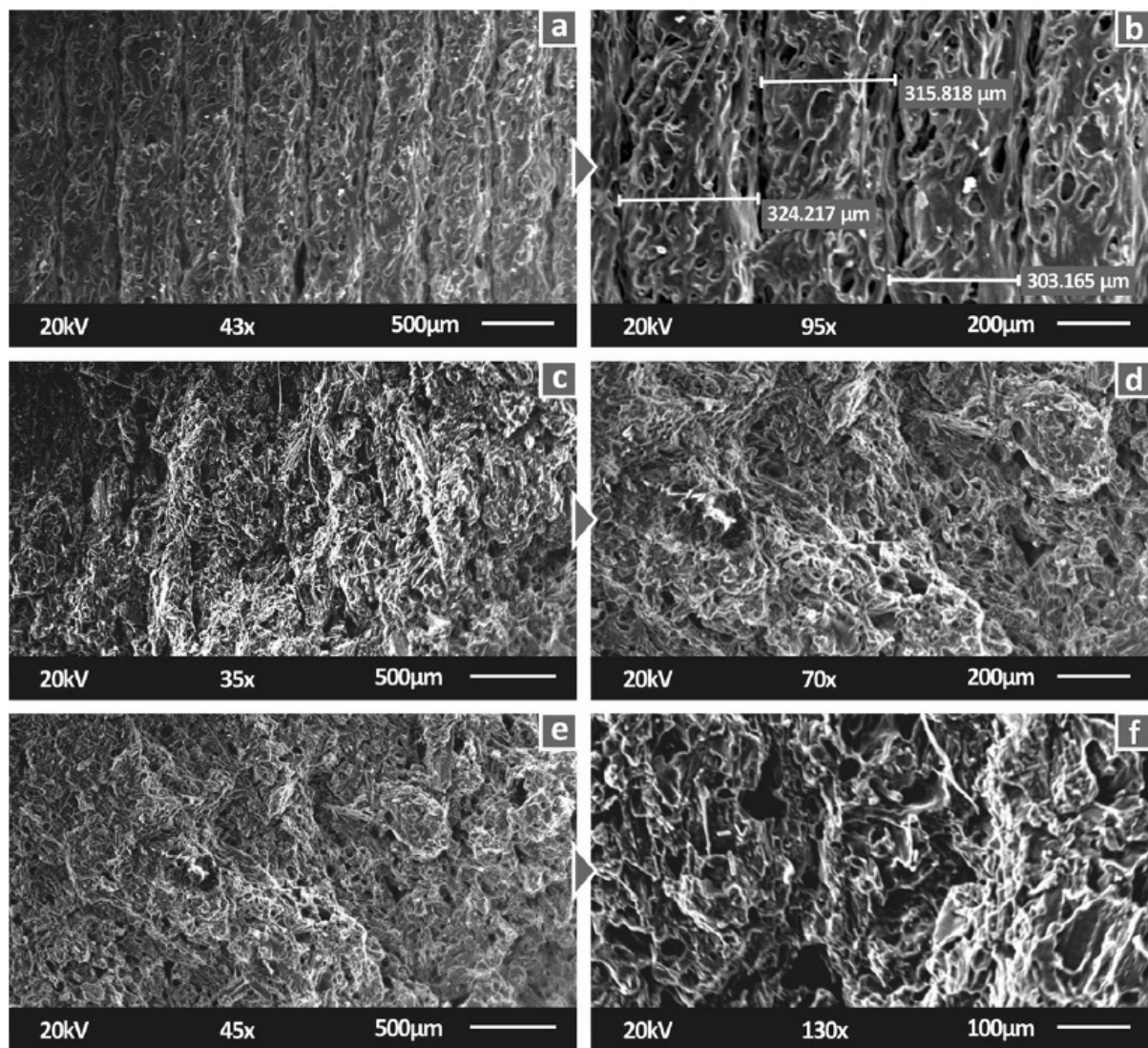
No exp	Variable parameters, $L_{18} (1^2 \times 7^3)$								Attributes measured	
	1	2	3	4	5	6	7	8		
	LT (mm)	NT (°C)	DA (°)	PS (mm/s)	Empty Columns				UTS (Mpa)	E (MPa)
1	0.1	180	0	30	1	1	1	1	17.420	692.62
2	0.1	180	45	40	2	2	2	2	7.043	410.59
3	0.1	180	90	50	3	3	3	3	5.480	347.95
4	0.1	200	0	30	2	2	3	3	15.410	627.77
5	0.1	200	45	40	3	3	1	1	10.240	448.88
6	0.1	200	90	50	1	1	2	2	7.745	375.92
7	0.1	220	0	40	1	3	2	3	16.920	651.88
8	0.1	220	45	50	2	1	3	1	12.580	478.50
9	0.1	220	90	30	3	2	1	2	10.010	445.97
10	0.3	180	0	50	3	2	2	1	16.920	678.84
11	0.3	180	45	30	1	3	3	2	12.145	425.52
12	0.3	180	90	40	2	1	1	3	8.970	374.89
13	0.3	200	0	40	3	1	3	2	15.420	624.65
14	0.3	200	45	50	1	2	1	3	12.080	468.83
15	0.3	200	90	30	2	3	2	1	10.010	402.12
16	0.3	220	0	50	2	3	1	2	15.210	611.23
17	0.3	220	45	30	3	1	2	3	12.007	483.17
18	0.3	220	90	40	1	2	3	1	10.150	431.88
Average									11.987	498.96
Min									5.480	347.95
Max									17.420	692.62
Spread									11.94	344.67

Πίνακας 24. Οι συνδυασμοί παραμέτρων και οι μετρήσεις

4.4 Αποτελέσματα και συζήτηση

Όλα τα πειράματα και τα αποτελέσματα που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα παρουσιάζονται στον πίνακα 24. Η αντοχή σε εφελκυσμό είναι η υψηλότερη τάση που μπορεί να διατηρήσει ένα υλικό ενώ πιέζεται, πριν σπάσει. Το μέτρο ελαστικότητας είναι η γραμμική αναλογία μεταξύ της τάσης και της έντασης στη ζώνη ελαστικής παραμόρφωσης, της καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης. Έτσι, τόσο η αντοχή σε εφελκυσμό όσο και το μέτρο ελαστικότητας χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό των ιδιοτήτων αντοχής του υλικού. Επιπλέον, στον πίνακα 24 παρουσιάζονται τα βασικά στατιστικά αποτελέσματα της απόδοσης της διαδικασίας (μέση, ελάχιστη, μέγιστη, εξάπλωση). Είναι προφανές ότι οι τιμές εξάπλωσης της μηχανικής απόκρισης είναι σημαντικές, 100% για την αντοχή σε εφελκυσμό και 69% για το μέτρο ελαστικότητας. Επομένως, η στατιστική μοντελοποίηση της διαδικασίας είναι πολύ σημαντική ώστε να μειωθεί σημαντικά η μεταβλητότητα. Τέλος, η βελτιστοποίηση της διαδικασίας είναι κάτι που είναι αναγκαίο να γίνει ώστε να είναι πιο βιώσιμη η εκτύπωση με την μέθοδο FFF [378].

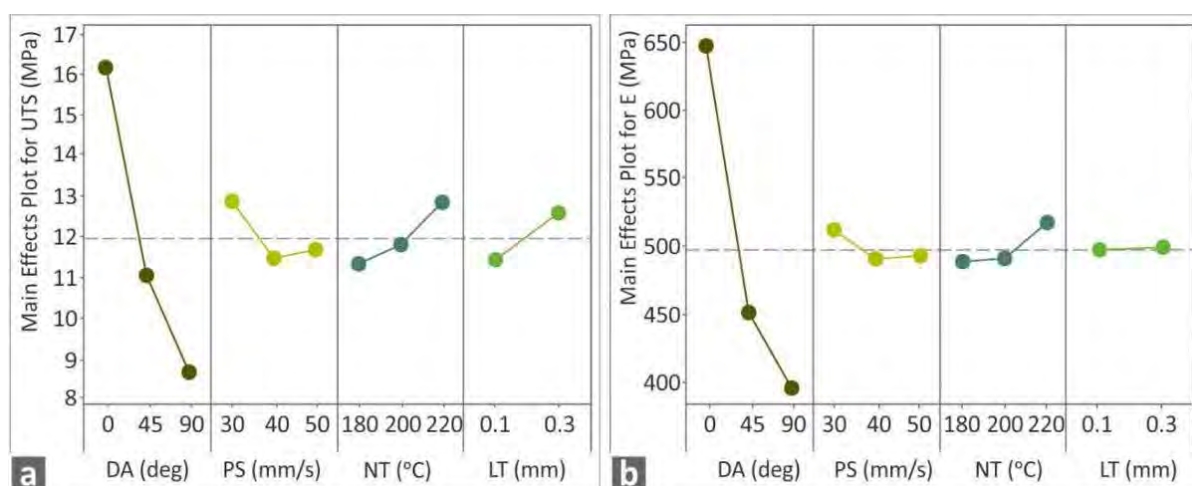
Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι η διαδικασία ψύξης της πλατφόρμας εκτύπωσης επηρεάζει την πρόσφυση και τη σύντηξη μεταξύ των διαδοχικών στρώσεων, όπου με τη σειρά τους, επηρεάζονται από το πάχος στρώσης, τη θερμοκρασία ακροφυσίου και την ταχύτητα εκτύπωσης [342, 379-382]. Επομένως, είναι πολύ σημαντικό να υπάρχει σωστός έλεγχος των παραπάνω παραμέτρων κατά τη διαδικασία FFF [370, 383-386]. Στην εικόνα 24, παρουσιάζονται φωτογραφίες από ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο όπου διακρίνονται πλευρικές όψεις και σπασμένες επιφάνειες για τα δοκίμια με πάχος στρώσης 0,3 mm, που παρουσιάζουν καλή διαστρωματική πρόσφυση και συγκόλληση. Η ηλεκτρονική σάρωση του μικροσκοπίου εξέτασε λεπτομερώς την περιοχή αστοχίας αλλά και τον τρόπο αστοχίας των δειγμάτων. Από το μορφολογικό σχήμα της θραυσμένης επιφανειακής διατομής συνεπάγεται ένας εύθραυστος τρόπος αποτυχίας και αστοχίας (εικόνα 24a-f). Το γεγονός αυτό επαληθεύει ήδη πράγματα που έχουν παρατηρηθεί, ότι η λειτουργία αστοχίας εμφανίστηκε οπτικά σε δοκιμές εφελκυσμού χωρίς φαινόμενα εμφάνισης «λαιμού» (no necking phenomena) στο εξεταζόμενο δοκίμιο. Οι εικόνες 24a, b παρουσιάζουν μια μεγέθυνση των φωτογραφιών του μικροσκοπίου της πλάγιας όψης ενός δείγματος όπου απεικονίζονται τόσο ο αριθμός όσο και το πάχος των στρώσεων του υλικού. Εξάλλου, από τις εικόνες 24c, d επιβεβαιώνεται επίσης η εύθραυστη φύση της αστοχίας από την προκύπτουσα υφή της επιφάνειας.



Εικόνα 24. Εικόνες από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο από τη διαμήκη πολυεπίπεδη πλευρά των δειγμάτων (a, b) εγκάρσια τομή σπασμένης επιφάνειας (c, d, e, f) δοκιμίων με χαρακτηριστικά 0,3 mm -200°C - 0° -40 mm/s

4.5 Επιδράσεις των μεταβλητών παραμέτρων στην αντοχή σε εφελκυσμό και στην ελαστικότητα.

Τα διαγράμματα που δείχνουν τα αποτελέσματα των μεταβλητών παραμέτρων σε ένα χαρακτηριστικό είναι γνωστά ως ANOM διαγράμματα (ανάλυση μέσων) αλλά και διαγράμματα κύριας επίδρασης (MEP). Αυτά τα διαγράμματα αναδεικνύουν την επιρροή της κάθε μιας μεταβλητής γραφικά λαμβάνοντας υπόψη το μέτρο του χαρακτηριστικού και χρησιμοποιούνται για την εύρεση της βέλτιστης τιμής των μεταβλητών. Για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας αυτές τις γραφικές παραστάσεις, μπορούν να εξαχθούν τα αποτελέσματα των τεσσάρων παραμέτρων διεργασίας που εξετάζονται τόσο για την αντοχή σε εφελκυσμό όσο και για το μέτρο ελαστικότητας (εικόνα 25).



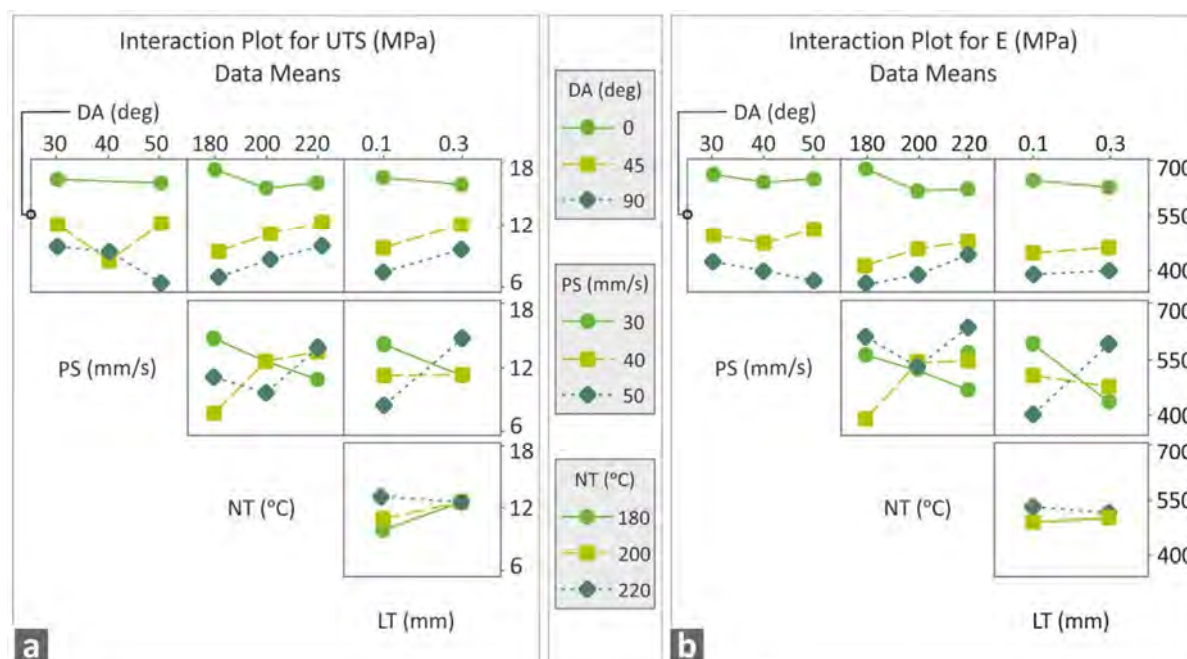
Εικόνα 25. Διαγράμματα κύριας επίδρασης για την αντοχή εφελκυσμού και για το μέτρο ελαστικότητας.

Τα διαγράμματα της κύριας επίδρασης έδειξαν ότι η κυρίαρχη παράμετρος κατά την πειραματική διαδικασία για την αντοχή σε εφελκυσμό και για το μέτρο ελαστικότητας είναι η γωνία απόθεσης. Και οι άλλες τρεις μεταβλητές είναι σημαντικές αλλά σε χαμηλότερο επίπεδο. Τόσο για τον εφελκυσμό όσο και για την ελαστικότητα οι μέγιστες τιμές είναι οι καλύτερες, που συνεπάγεται ότι οι βέλτιστες τιμές για τις μεταβλητές ήταν η μηδενική γωνία εναπόθεσης, η ταχύτητα εκτύπωσης 30 mm/s, η θερμοκρασία ακροφυσίου 220°C και το πάχος στρώσης 0,3 mm.

Ένας τρόπος για τον προσδιορισμό του τρόπου με τον οποίο μια παράμετρος αλληλεπιδρά με μια άλλη είναι χρησιμοποιώντας τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης

[376,385,387-389]. Τα διαγράμματα στις εικόνες 26a και 26b δείχνουν πως αλληλεπιδρούν οι τέσσερις παράμετροι που εξετάστηκαν στην αντοχή σε εφελκυσμό και στο μέτρο ελαστικότητας. Αυτά τα δυο διαγράμματα δείχνουν μια ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ της κυρίαρχης παραμέτρου που είναι η γωνία εναπόθεσης και των άλλων τριών.

Αναλυτικά, τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης έδειξαν ότι: (i) το πάχος στρώσης αλληλεπιδρά συνεργιστικά με τη θερμοκρασία ακροφυσίου και τη γωνία εναπόθεσης, δηλαδή οι γραμμές τάσης έχουν παρόμοιες κατευθύνσεις, (ii) το πάχος στρώσης αλληλεπιδρά αντι-συνεργιστικά με την ταχύτητα εκτύπωσης, δηλαδή οι γραμμές τάσης έχουν σύνθετες κατευθύνσεις, (iii) η γωνία εναπόθεσης αλληλεπιδρά συνεργιστικά με τη θερμοκρασία ακροφυσίου και την ταχύτητα εκτύπωσης και (iv) η θερμοκρασία ακροφυσίου και η ταχύτητα εκτύπωσης αλληλεπιδρούν αντι-συνεργιστικά.



Εικόνα 26a, b. Διαγράμματα αλληλεπίδρασης μεταξύ της γωνίας εναπόθεσης, της ταχύτητας εκτύπωσης, της θερμοκρασίας ακροφυσίου και του πάχους στρώσης σύμφωνα με την αντοχή σε εφελκυσμό και του μέτρου ελαστικότητας.

Μετά τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης, η ανάλυση των διακυμάνσεων (ANOVA) αποτελεί ένα ποιοτικό εργαλείο για τη διερεύνηση της σημασίας της κάθε μεταβλητής παραμέτρου στα χαρακτηριστικά ποιότητας. Με αυτή την ανάλυση γίνεται αποσύνθεση των σφαλμάτων κάθε μεταβλητής στο συνολικό σφάλμα όταν ένα μαθηματικό μοντέλο προσαρμόζεται στα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα της γραφικής παράστασης έδειξαν ότι η γωνία εναπόθεσης είναι η κυρίαρχη παράμετρος. Έτσι, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν

μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης για την ανάλυση διακυμάνσεων για την αντοχή σε εφελκυσμό και για το μέτρο ελαστικότητας (πίνακες 25 και 26).

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	%
DA	2	176.746	88.373	35.68	0.000	80.1%
PS	2	6.592	3.296	1.33	0.307	3.0%
NT	2	6.857	3.428	1.38	0.295	3.1%
LT	1	5.627	5.627	2.27	0.163	2.6%
Error	10	24.766	2.477			11.2%
Total	17	220.587				100.0%
R ²						88.77%
R ² adj						80.91%
R ² pred						63.62%

Πίνακας 25. Ανάλυση διακύμανσης : Αντοχή σε εφελκυσμό έναντι των τεσσάρων παραμέτρων.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	%
DA	2	208,926	104,463	88.24	0.000	92.6%
PS	2	1769	884	0.75	0.498	0.8%
NT	2	2991	1495	1.26	0.324	1.3%
LT	1	25	25	0.02	0.888	0.0%
Error	10	11,838	1184			5.2%
Total	17	225,548				100.0%
R ²						94.75%
R ² adj						91.08%
R ² pred						82.99%

Πίνακας 26. Ανάλυση διακύμανσης : Μέτρο ελαστικότητας έναντι των τεσσάρων παραμέτρων.

Η ανάλυση διακύμανσης έδειξε ότι η γωνία εναπόθεσης επηρεάζει κατά 80,1% και 92,6% την αντοχή σε εφελκυσμό και το μέτρο ελαστικότητας αντίστοιχα. Οι άλλες τρεις μεταβλητές ήταν ασήμαντες και για τα δυο χαρακτηριστικά ποιότητας που εξετάστηκαν. Οι τιμές F είναι κάτω από την τιμή δυο (2) και οι τιμές P είναι υψηλότερες από την τιμή 0,05.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις εικόνες διαγραμμάτων 25 και 26 καθώς και από τους πίνακες 25 και 26 καταλήγουν στα ακόλουθα:

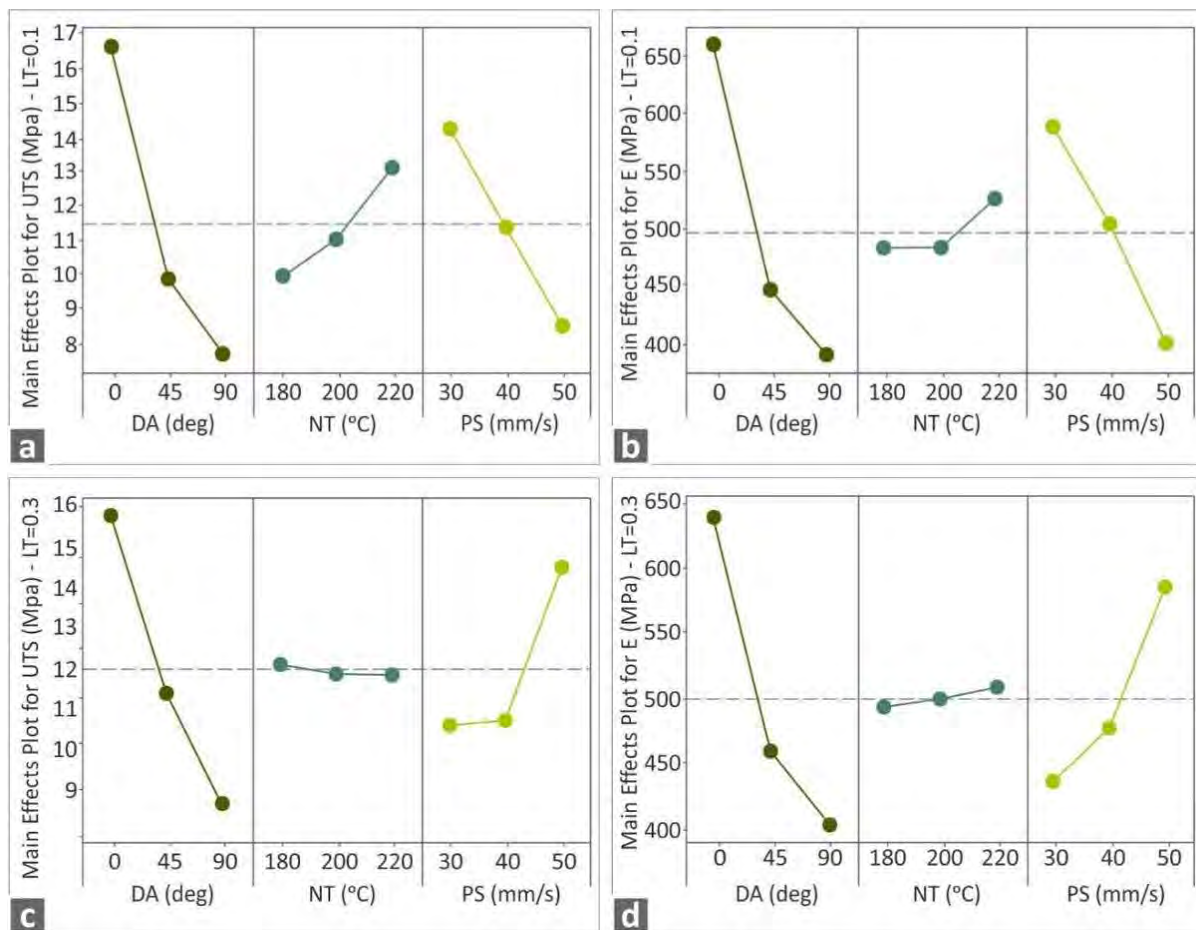
Η παράμετρος της γωνίας εναπόθεσης raster κυριαρχούσε στις τιμές των χαρακτηριστικών ποιότητας. Οι τιμές του F ήταν υψηλότερες του τέσσερα (4) και οι τιμές του P μικρότερες από το 0,05 κάτι που σημαίνει ότι είναι στατιστικά σημαντική. Η καλύτερη τιμή για τη γωνία εναπόθεσης ήταν οι μηδέν (0) μοίρες και η χειρότερη οι ενενήντα (90)

μοίρες. Οι αλληλεπιδράσεις της γωνίας raster με τις άλλες παραμέτρους ήταν ελαφρώς συνεργιστικές (εικόνα 26). Η απόκριση των χαρακτηριστικών που εξετάζονται αυξάνονταν, μειώνοντας τη γωνία εναπόθεσης raster. Αυτό σημαίνει ότι η ευθυγραμμισμένη σε οριζόντια διάταξη των μηδέν μοιρών του νήματος έδινε τις υψηλότερες τιμές για την αντοχή σε εφελκυσμό και για το μέτρο ελαστικότητας.

Οι άλλες τρεις παράμετροι είχαν μικρότερη σημασία στο συγκεκριμένο πείραμα που πραγματοποιήθηκε. Οι τιμές F ήταν μικρότερες από δυο (2) και οι τιμές P μεγαλύτερες από 0,05 ($F < 2$ και $P > 0,05$). Η τιμή F για το πάχος στρώσης που αφορά την αντοχή σε εφελκυσμό ήταν μεταξύ 2 και 4 κάτι που σημαίνει ότι στατιστικά είναι πιο σημαντικό από τη θερμοκρασία ακροφυσίου και την ταχύτητα εκτύπωσης. Αυτές οι στατιστικές τιμές των τριών παραμέτρων δείχνουν ότι επηρεάζουν τη βέλτιστη τιμή της κατάστασης συγκόλλησης (των συνδέσεων) με αντι-συνεργιστικό τρόπο (διαγράμματα αλληλεπίδρασης, εικόνα 26).

Λαμβάνοντας υπόψη προηγούμενες πειραματικές εργασίες και γνωρίζοντας ότι οι συνθήκες διαστρωματικής σύνδεσης επηρεάζονται αρχικά από την ταχύτητα εκτύπωσης και τη θερμοκρασία ακροφυσίου και δεύτερον, από το πάχος στρώσης [390], σχεδιάστηκαν τα ακόλουθα διαγράμματα κύριας επίδρασης (εικόνα 27) για τα πάχη στρώσεων 0,1 και 0,3 mm. Από τα διαγράμματα αυτά διαφαίνεται καλύτερα η επιρροή της γωνίας raster, της θερμοκρασίας ακροφυσίου και της ταχύτητας εκτύπωσης σε κάθε τιμή του πάχους στρώσης. Συμπεραίνεται ότι η θερμοκρασία ακροφυσίου ήταν μια σημαντική παράμετρος για το πάχος στρώσης με 0,1 mm και όχι τόσο σημαντική για το πάχος στρώσης 0,3 mm που σημαίνει ότι οι διαστρωματικές συνθήκες ήταν διαφορετικές στην περίπτωση των 0,3 και 0,1 χιλιοστών.

Συγκεκριμένα, η διαδικασία ψύξης των εναποτιθέμενων στρώσεων επηρεάζεται περισσότερο από την ταχύτητα εκτύπωσης σε σχέση με τη θερμοκρασία ακροφυσίου για πάχος στρώσης 0,3 mm, ενώ για πάχος στρώσης 0,1 mm επηρεάζεται ομοιόμορφα τόσο από τη θερμοκρασία ακροφυσίου όσο και από την ταχύτητα εκτύπωσης. Επιπλέον, ο Coogan και ο Kazmer [361] απέδειξαν ότι όσο περισσότερο παραμένει το υλικό σε υψηλότερη θερμοκρασία από το επίπεδο υαλώδους μετάβασης, τόσο καλύτερο δέσιμο επιτυγχάνεται. Επομένως, αυξάνοντας τη θερμοκρασία ακροφυσίου ή μειώνοντας την ταχύτητα εκτύπωσης αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της αντοχής εφελκυσμού αλλά και ελαστικότητας για πάχος στρώσης 0,1 mm, κάτι που επαληθεύεται από παρόμοια έρευνα για το ίδιο εύρος τιμών ταχύτητας εκτύπωσης 30-50 mm/s [391].



Εικόνα 27. Διαγράμματα κύριας επίδρασης α) γωνία εναπόθεσης, θερμοκρασία ακροφυσίου και ταχύτητα εκτύπωσης έναντι αντοχή σε εφελκυσμό για πάχος στρώσης 0,1 mm β)) γωνία εναπόθεσης, θερμοκρασία ακροφυσίου και ταχύτητα εκτύπωσης έναντι μέτρου ελαστικότητας για πάχος στρώσης 0,1 mm γ) γωνία εναπόθεσης, θερμοκρασία ακροφυσίου και ταχύτητα εκτύπωσης έναντι αντοχή σε εφελκυσμό για πάχος στρώσης 0,3 mm δ) γωνία εναπόθεσης, θερμοκρασία ακροφυσίου και ταχύτητα εκτύπωσης έναντι μέτρου ελαστικότητας για πάχος στρώσης 0,3 mm

Η θερμοκρασία ακροφυσίου έχει διαφορετικές γραμμές τάσης για τα δυο πάχη στρώσεων 0,1 mm και 0,3 mm. Στην περίπτωση του πάχους 0,1 mm όταν αυξάνονταν η θερμοκρασία, αυξάνονταν και η αντοχή σε εφελκυσμό αλλά και το μέτρο ελαστικότητας (εικόνα 27a και 27b). Από την άλλη πλευρά, για το πάχος 0,3 mm η θερμοκρασία ακροφυσίου ήταν ασήμαντη και για τα δυο χαρακτηριστικά που εξετάστηκαν (εικόνα 27c και 27d).

Τέλος, όσον αφορά την παράμετρο της ταχύτητας εκτύπωσης, τα διαγράμματα στις εικόνες 27a-d έδειξαν σημαντική επιρροή τόσο στην αντοχή σε εφελκυσμό όσο και στο μέτρο ελαστικότητας και για τα δυο πάχη στρώσης. Αύξηση των τιμών της ταχύτητας είχε ως

αποτέλεσμα τη μείωση των τιμών των δυο χαρακτηριστικών ποιότητας για το πάχος στρώσης 0,1 mm ενώ για το πάχος 0,3 mm υπήρχε αύξηση τιμών των ποιοτικών χαρακτηριστικών. Στα πλαίσια όλων των πειραμάτων (εικόνα 5) η γραμμή τάσης της ταχύτητας εκτύπωσης ήταν παρόμοια με αυτήν του πάχους στρώσης 0,1 mm (εικόνα 27a και 27b). Η ανάλυση διακύμανσης έδειξε ότι η ταχύτητα εκτύπωσης είναι μια ασήμαντη παράμετρος με τιμή F μικρότερη από 2 και τιμή P μεγαλύτερη από 0,05 (πίνακες 25 και 26) σύμφωνα και με τον Zandi [370]. Στις εικόνες 27a-d χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση γραφημάτων κύριας επίδρασης για τα δύο διαφορετικά πάχη στρώσεων και για την κατασκευή ακριβέστερων γραμμικών μοντέλων παλινδρόμησης και δεν αντικαθιστούν τα διαγράμματα της εικόνας 25(a, b). Η βελτιστοποίηση της διαδικασίας χρησιμοποιεί την ορθογωνική διάταξη L18.

Αναφορές 4^ο κεφαλαίου

- [333] Wong KV, Hernandez A (2012) A Review of Additive Manufacturing. *ISRN Mech Eng* 2012:1–10.
- [334] Oliveira JP, Santos TG, Miranda RM (2020) Revisiting fundamental welding concepts to improve additive manufacturing: From theory to practice. *Prog Mater Sci* 107:100590.
- [335] Oliveira JP, LaLonde AD, Ma J (2020) Processing parameters in laser powder bed fusion metal additive manufacturing. *Mater Des* 193:108762.
- [336] Pringle AM, Rudnicki M, Pearce JM (2018) Wood Furniture Waste–Based Recycled 3-D Printing Filament. *For Prod J* 68:86–95.
- [337] Yap YL, Yeong WY (2014) Additive manufacture of fashion and jewellery products: a mini review. *Virtual Phys Prototyp* 9:195–201.
- [338] Goh GD, Yap YL, Tan HKJ et al (2020) Process–structure–properties in polymer additive manufacturing via material extrusion: A review. *Crit Rev Solid State Mater Sci* 45:113–133.
- [339] Aida HJ, Nadlene R, Mastura MT et al (2021) Natural fibre filament for Fused Deposition Modelling (FDM): a review. *Int J Sustain Eng*.
- [340] Vidakis N, Petousis M, Savvakis K et al (2019) A comprehensive investigation of the mechanical behavior and the dielectrics of pure polylactic acid (PLA) and PLA with graphene (GnP) in fused deposition modeling (FDM). *Int J Plast Technol* 23:195–206.
- [341] Vidakis N, Petousis M, Velidakis E et al (2020) Three-dimensional printed antimicrobial objects of polylactic acid (PLA)-Silver nanoparticle nanocomposite filaments produced by an in-situ reduction reactive melt mixing process. *Biomimetics* 5:42.
- [342] Chaidas D, Kechagias JD (2021) An investigation of PLA/W parts quality fabricated by FFF. *Mater Manuf Process*.

- [343] Vidakis N, Petousis M, Maniadi A et al (2020) Sustainable additive manufacturing: mechanical response of acrylonitrile-butadienestyrene over multiple recycling processes. *Sustainability* 12:3568.
- [344] Faludi G, Dora G, Renner K et al (2013) Improving interfacial adhesion in pla/wood biocomposites. *Compos Sci Technol* 89:77– 82.
- [345] Ćwikła G, Grabowik C, Kalinowski K et al (2017) The influence of printing parameters on selected mechanical properties of FDM/FFF 3D-printed parts. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng* 227:012033.
- [346] Mohan N, Senthil P, Vinodh S, Jayanth N (2017) A review on composite materials and process parameters optimisation for the fused deposition modelling process. *Virtual Phys Prototyp* 12:47–59.
- [347] Bikas H, Stavropoulos P, Chrysosolouris G (2016) Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *Int J Adv Manuf Technol* 83:389–405.
- [348] Vidakis N, Petousis M, Velidakis E et al (2020) On the strain rate sensitivity of fused filament fabrication (FFF) processed PLA, ABS, PETG, PA6, and PP thermoplastic polymers. *Polymers* 12:2924.
- [349] Durgun I, Ertan R (2014) Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost. *Rapid Prototyp J* 20:228–235.
- [350] Kechagias JD, Vidakis N, Petousis M (2021) Parameter effects and process modeling of FFF-TPU mechanical response. *Mater Manuf Process*.
- [351] Kain S, Ecker JV, Haider A et al (2020) Effects of the infill pattern on mechanical properties of fused layer modeling (FLM) 3D printed wood/polylactic acid (PLA) composites. *Eur J Wood Wood Prod* 78:65–74.

- [352] Fountas NA, Kechagias JD, Manolakos DE, Vaxevanidis NM (2020) Single and multi-objective optimization of FDM-based additive manufacturing using metaheuristic algorithms. *Procedia Manuf* 51:740–747.
- [353] Fountas NA, Kitsakis K, Aslani K-E et al (2021) An experimental investigation of surface roughness in 3D-printed PLA items using design of experiments. *Proc Inst Mech Eng J: J Eng Tribol*.
- [354] Kechagias J, Kitsakis K, Zacharias A et al (2021) Direct 3D Printing of a hand splint using Reverse Engineering. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng* 1037:012019.
- [355] Chaidas D, Kitsakis K, Kechagias J, Maropoulos S (2016) The impact of temperature changing on surface roughness of FFF process. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng* 161:012033.
- [356] Aslani K-E, Chaidas D, Kechagias J et al (2020) Quality performance evaluation of thin walled PLA 3D printed parts using the taguchi method and grey relational analysis. *J Manuf Mater Process*.
- [357] Afrose MF, Masood SH, Iovenitti P et al (2016) Effects of part build orientations on fatigue behaviour of FDM-processed PLA material. *Prog Addit Manuf* 1:21–28.
- [358] Vidakis N, Vairis A, Petousis M et al (2016) Fused deposition modelling parts tensile strength characterisation. *Academic J Manuf Eng* 14
- [359] Gurralla PK, Regalla SP (2014) Multi-objective optimisation of strength and volumetric shrinkage of FDM parts. *Virtual Phys Prototyp* 9:127–138.
- [360] Srivastava M, Rathee S (2018) Optimisation of FDM process parameters by Taguchi method for imparting customised properties to components. *Virtual Phys Prototyp* 13:203–210.
- [361] Coogan TJ, Kazmer DO (2017) Bond and part strength in fused deposition modeling. *Rapid Prototyp J* 23:414–422.

- [362] Vanaei HR, Shirinbayan M, Deligant M et al (2021) In-Process Monitoring of Temperature Evolution during Fused Filament Fabrication: A Journey from Numerical to Experimental Approaches. *Thermo* 1:332–360.
- [363] Chen K, Yu L, Cui Y et al (2021) Optimization of printing parameters of 3D-printed continuous glass fiber reinforced polylactic acid composites. *Thin-Walled Struct* 164:107717.
- [364] Motas JG, Gorji NE, Nedelcu D et al (2021) XPS, SEM, DSC and Nanoindentation Characterization of Silver Nanoparticle-Coated Biopolymer Pellets. *Appl Sci* 11:7706.
- [365] Bhagia S, Lowden RR, Erdman D et al (2020) Tensile properties of 3D-printed wood-filled PLA materials using poplar trees. *Appl Mater Today* 21:100832.
- [366] Bulanda K, Oleksy M, Oliwa R et al (2020) Biodegradable polymer composites based on polylactide used in selected 3D technologies. *Polimery* 65:557–562.
- [367] Chansoda K, Suwanjamrat C, Chookaew W (2020) Study on processability and mechanical properties of parawood-powder filled PLA for 3D printing material. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng* 773:012053.
- [368] Yang T-C, Yeh C-H (2020) Morphology and Mechanical Properties of 3D Printed Wood Fiber/Polylactic Acid Composite Parts Using Fused Deposition Modeling (FDM): The Effects of Printing Speed. *Polymers* 12:1334.
- [369] Ayrimis N, Kariz M, Kwon JH, Kitek Kuzman M (2019) Effect of printing layer thickness on water absorption and mechanical properties of 3D-printed wood/PLA composite materials. *Int J Adv Manuf Technol* 102:2195–2200.
- [370] Zandi MD, Jerez-Mesa R, Lluma-Fuentes J et al (2020) Experimental analysis of manufacturing parameters' effect on the flexural properties of wood-PLA composite parts built through FFF. *Int J Adv Manuf Technol* 106:3985–3998.
- [371] Guessasma S, Belhabib S, Nouri H (2019) Microstructure and mechanical performance of 3D printed wood-PLA/PHA using fused deposition modelling: Effect of printing temperature. *Polymers* 11:1778.

- [372] Tsiolikas A, Mikrou T, Vakouftsi F et al (2019) Robust design application for optimizing ABS fused filament fabrication process: A case study. IOP Conf Ser: Mater Sci Eng 564:012021.
- [373] Kechagias J, Petropoulos G, Vaxevanidis N (2012) Application of Taguchi design for quality characterization of abrasive water jet machining of TRIP sheet steels. Int J Adv Manuf Technol 62:635–643.
- [374] Zhang JZ, Chen JC, Kirby ED (2007) Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method. J Mater Process Technol 184:233–239.
- [375] Kechagias JD, Aslani K-E, Fountas NA et al (2020) A comparative investigation of Taguchi and full factorial design for machinability prediction in turning of a titanium alloy. Measurement 151:107213.
- [376] Phadke MS (1989) Quality engineering using robust design. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, p 07632
- [377] Gopinath C, Lakshmanan P, Palani S (2021) Fiber laser microcutting on duplex steel: parameter optimization by TOPSIS. Mater Manuf Process.
- [378] Saxena P, Stavropoulos P, Kechagias J, Salonitis K (2020) Sustainability assessment for manufacturing operations. Energies.
- [379] Harris M, Potgieter J, Archer R, Arif KM (2019) In-process thermal treatment of polylactic acid in fused deposition modelling. Mater Manuf Process 34:701–713.
- [380] Tamburrino F, Graziosi S, Bordegoni M (2019) The influence of slicing parameters on the multi-material adhesion mechanisms of FDM printed parts: an exploratory study. Virtual Phys Prototyp 14:316–332.
- [381] Hashemi Sanatgar R, Campagne C, Nierstrasz V (2017) Investigation of the adhesion properties of direct 3D printing of polymers and nanocomposites on textiles: Effect of FDM printing process parameters. Appl Surf Sci 403:551–563.

- [382] Deisenroth DC, Moradi R, Shooshtari AH et al (2018) Review of heat exchangers enabled by polymer and polymer composite additive manufacturing. *Heat Transf Eng* 39:1648–1664.
- [383] Melenka GW, Schofield JS, Dawson MR, Carey JP (2015) Evaluation of dimensional accuracy and material properties of the MakerBot 3D desktop printer. *Rapid Prototyp J* 21:618–627.
- [384] Vyavahare S, Kumar S, Panghal D (2020) Experimental study of surface roughness, dimensional accuracy and time of fabrication of parts produced by fused deposition modelling. *Rapid Prototyp J* 26:1535–1554.
- [385] Fountas NA, Papantoniou I, Kechagias JD et al (2021) Experimental investigation on flexural properties of FDM-processed PET-G specimen using response surface methodology. *MATEC Web Conf* 349:01008.
- [386] Vinoth Babu N, Venkateshwaran N, Rajini N et al (2021) Influence of slicing parameters on surface quality and mechanical properties of 3D-printed CF/PLA composites fabricated by FDM technique. *Mater Technol*.
- [387] Kechagias JD, Ninikas K, Petousis M et al (2021) An investigation of surface quality characteristics of 3D printed PLA plates cut by CO2 laser using experimental design. *Mater Manuf Process* 36:1544–1553.
- [388] Kechagias JD, Fountas NA, Ninikas K et al (2021) Surface characteristics investigation of 3D-printed PET-G plates during CO2 laser cutting. *Mater Manuf Process*.
- [389] Kechagias J, Ninikas K, Petousis M, Vidakis N (2021) Laser cutting of 3D printed acrylonitrile butadiene styrene plates for dimensional and surface roughness optimization. *Int J Adv Manuf Technol*
- [390] Savvakis K, Petousis M, Vairis A et al (2014) Experimental determination of the tensile strength of fused deposition modelling parts. In: *IMECE2014*. ASME, Montreal, Quebec, Canada

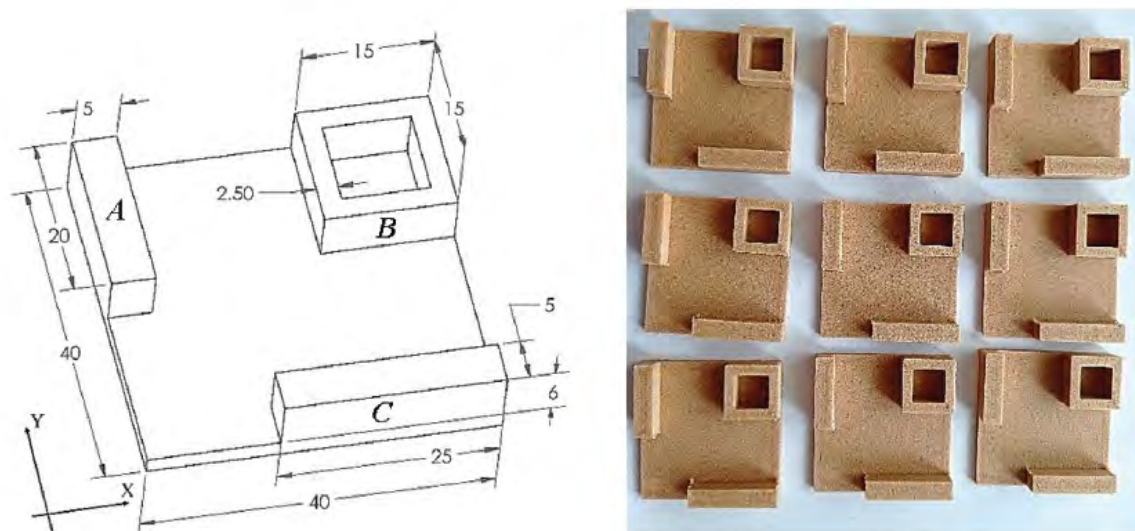
[391] Christiyan KGJ, Chandrasekhar U, Venkateswarlu K (2016) A study on the influence of process parameters on the Mechanical Properties of 3D printed ABS composite. IOP Conf Ser: Mater Sci Eng 114:012109.

5 Μοντέλα επικύρωσης - Συμπεράσματα πειραμάτων

Στη συνέχεια ακολουθούν ορισμένα πειράματα αξιολόγησης αλλά και η επικύρωση μοντέλων για τις τρεις πειραματικές διατάξεις που αναλύθηκαν. Επιπλέον, επισημαίνονται συμπεράσματα της επίδρασης παραμέτρων στη διαστατική ακρίβεια, στην τραχύτητα επιφάνειας αλλά και στην αντοχή δοκιμίων από Wood/PLA αλλά και από PLA.

5.1 Μοντέλα επικύρωσης – πειράματα αξιολόγησης για την επίδραση παραμέτρων σε Wood/PLA δοκίμια

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας για την επίδραση παραμέτρων στην ποιότητα των λεπτότοιχων Wood/PLA δοκιμίων, το προτεινόμενο ποιοτικά μοντέλο είναι αυτό με τις τιμές παραμέτρων πάχους στρώσης 0,1 mm και θερμοκρασία ακροφυσίου 210°C. Ένα νέο μοντέλο από Wood/PLA με αυτές τις τιμές κατασκευάστηκε ξανά σε εννέα αντίγραφα για νέο πείραμα διατηρώντας σταθερές όλες τις παραμέτρους εκτύπωσης αλλά και το δοκίμιο εκτυπωμένο στο ίδιο ακριβώς σημείο (εικόνα 28).



Εικόνα 28. Νέο μοντέλο με τις βέλτιστες τιμές (9 τεμάχια)

Οι μετρήσεις τραχύτητας και διαστάσεων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 27). Διαπιστώθηκε ότι οι προβλέψεις R_a , και R_t ήταν χαμηλότερες κατά 15,1% και 9,6% από το μέσο όρο των επαναλήψεων, όλα τα χαρακτηριστικά της διαστατικής ακρίβειας είχαν ένα σφάλμα που κυμαίνεται μεταξύ του -1,4% και +25,8% και τέλος οι συνολικοί

μέσοι όροι στις κατευθύνσεις X, Y ήταν 0,39 mm και 0,42 mm, έχοντας μια μικρή διαφορά λόγω της στατιστικής αβεβαιότητας. Οι αποκλίσεις (τιμές μέγιστου – ελάχιστου) των δεδομένων X, Y ήταν παρόμοιες και περίπου 0,12 mm και 0,11 mm.

Surface quality (Measurements in Z Direction, μm)												
No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Average	Predicted	error (%)
Ra	16.8	18.0	17.3	17.1	15.5	19.8	18.2	17.3	18.4	17.6	14.9 (Eq.3)	-15.1
Rt	97.0	109.2	123.6	109.1	96.5	111.0	109.0	124.6	106.4	109.6	99.1 (Eq. 4)	-9.6
DX-Dimensional Accuracy in X Direction (mm)												
No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Average	Predicted (Eq. 5)	error (%)
DX-A1	0.44	0.45	0.44	0.45	0.44	0.44	0.44	0.45	0.44	0.44	0.45	1.8
DX-A2	0.43	0.42	0.43	0.43	0.41	0.42	0.41	0.42	0.42	0.42	0.45	7.2
DX-A3	0.42	0.42	0.42	0.43	0.42	0.41	0.40	0.41	0.42	0.42	0.45	8.3
DX-B1	0.36	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.38	0.37	0.38	0.37	0.45	21.6
DX-B2	0.36	0.35	0.36	0.35	0.36	0.36	0.37	0.35	0.37	0.36	0.45	25.8
DX-B3	0.36	0.34	0.36	0.35	0.36	0.36	0.37	0.38	0.36	0.36	0.45	25.4
DX-C	0.33	0.37	0.35	0.35	0.34	0.33	0.33	0.34	0.33	0.34	0.45	32.3
Min-Max = 0.12 mm Overall average = 0.39 mm												
Nominal dimensions; X-A = 5 mm, X-B = 15 mm, X-C = 25 mm												
DY-Dimensional Accuracy in Y Direction (mm)												
No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Average	Predicted (Eq. 6)	error (%)
DY-C1	0.45	0.45	0.44	0.44	0.44	0.45	0.44	0.45	0.43	0.44	0.45	1.8
DY-C2	0.43	0.45	0.44	0.44	0.44	0.42	0.44	0.45	0.45	0.44	0.45	2.6
DY-C3	0.46	0.45	0.46	0.46	0.45	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.45	-1.4
DY-B1	0.42	0.42	0.42	0.43	0.43	0.43	0.41	0.42	0.42	0.42	0.45	6.9
DY-B2	0.40	0.41	0.40	0.40	0.40	0.40	0.41	0.40	0.40	0.40	0.45	12.2
DY-B3	0.38	0.38	0.40	0.38	0.38	0.40	0.39	0.39	0.35	0.38	0.45	17.8
DY-A	0.36	0.37	0.38	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.45	22.0
Min-Max = 0.11 mm Overall average = 0.42 mm												
Nominal dimensions; Y-C = 5 mm, Y-B = 15 mm, Y-A = 20 mm												

Πίνακας 27. Πείραμα επαλήθευσης (0,1 mm LT, 210°C): Μετρήσεις Ra, Rt, DX και DY

Όσον αφορά την ποιότητα της διαστρωματικής συγκόλλησης των μοντέλων κατασκευάστηκαν δυο δοκίμια με γωνία εναπόθεσης 45°, πάχος στρώσης 0,3 mm και θερμοκρασίες 180°C και 220°C και διαπιστώθηκε εξαιρετική αντοχή στις ενδιάμεσες συνδέσεις κατά το σπάσιμό τους με το μηχάνημα Instron 3382 Universal (Εικόνα 29).



Εικόνα 29. Δοκίμια για έλεγχο αντοχής

5.2 Μοντελοποίηση και επικύρωση αντοχής Wood/PLA δοκιμίων

Στο ζήτημα της βελτιστοποίησης για την έρευνα της αντοχής των Wood/PLA δοκιμίων, είναι προφανές ότι η γωνία raster επηρεάζει περισσότερο την πειραματική περιοχή που εξετάζεται ενώ οι άλλες τρεις παράμετροι είχαν μικρές επιπτώσεις. Η ανάλυση ANOVA (πίνακες 25 και 26) επικύρωσε αυτά τα αποτελέσματα, όπου οι τιμές F του πάχους στρώσης, της ταχύτητας εκτύπωσης και της θερμοκρασίας ακροφυσίου ήταν όλες κάτω από την τιμή 4, που στατιστικά σημαίνει ότι έχουν μικρή σημασία. Η μόνη σημαντική παράμετρος σύμφωνα με τους πίνακες 25 και 26 ήταν η γωνία raster που είχε τιμές F υψηλότερες από 4 και τιμές P μικρότερες από 0,05.

Λαμβάνοντας υπόψη την ανάλυση των πινάκων 25 και 26, τις γραφικές παραστάσεις κύριας επίδρασης (εικόνα 25 και 27) καθώς και τα διαγράμματα αλληλεπιδράσεων (εικόνα 26) αναπτύχθηκαν μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης τόσο για την αντοχή σε εφελκυσμό όσο και για το μέτρο ελαστικότητας και για τα δυο πάχη στρώσεων 0,1 mm και 0,3 mm (εξισώσεις 1-4).

$$UTS_{LT=0.1mm} = 2.84 - 0.0889 * DA - 0.0839 * PS + 0.0797 * NT \pm e \quad (1)$$

$$E_{LT=0.1mm} = 549 - 2.570 * DA - 3.62 * PS + 1.04 * NT \pm e \quad (2)$$

$$UTS_{LT=0.3mm} = 15.89 - 0.06615 * DA + 0.0186 * PS - 0.0056 * NT \pm e \quad (3)$$

$$E_{LT=0.3mm} = 444 - 2.379 * DA + 2.12 * PS + 0.392 * NT \pm e \quad (4)$$

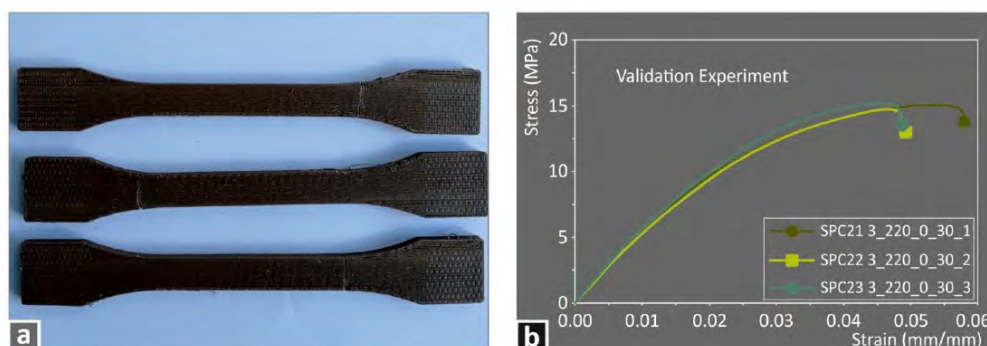
Ο πίνακας 28 συνοψίζει τις προβλέψεις του μοντέλου (εξισώσεις 1-4) και τα ποσοστά σφαλμάτων. Τέλος, εκτελέστηκαν τρία πειράματα αξιολόγησης για την επικύρωση των αναπτυγμένων μοντέλων παλινδρόμησης (πίνακας 28, εικόνα 30). Τα δείγματα για τα πειράματα επικύρωσης κατασκευάστηκαν με τις βελτιστοποιημένες παραμέτρους σύμφωνα με τα διαγράμματα κύριας επίδρασης στην εικόνα 25 (γωνία εναπόθεσης μηδέν, πάχος στρώσης 0,3 mm, ταχύτητα εκτύπωσης 30 mm/s και θερμοκρασία ακροφυσίου 220°C). Και τα τρία πειράματα διαπιστώθηκε ότι έδιναν ακριβείς προβλέψεις και για τα δυο χαρακτηριστικά ποιότητας (αντοχή σε εφελκυσμό και μέτρο ελαστικότητας).

Αξίζει να σημειωθεί ότι το πείραμα επικύρωσης πραγματοποιήθηκε τρεις φορές στα βέλτιστα επίπεδα για την αντοχή εφελκυσμού και ελαστικότητας σύμφωνα με το διάγραμμα κύριας επίδρασης και για τα 18 πειράματα (εικ. 25, γωνία raster 0°, ταχύτητα εκτύπωσης 30 mm/s, θερμοκρασία ακροφυσίου 220°C και πάχος στρώσης 0,3 mm). Επομένως, τα διαγράμματα της εικόνας 25 θα πρέπει να ληφθούν υπόψη για τη βελτιστοποίηση της

διαδικασίας καθώς έχουν την ιδιότητα της ορθογωνικότητας, που σημαίνει ότι όλοι οι συνδυασμοί μεταξύ δύο στηλών υπάρχουν στον έναν ορθογώνιο πίνακα και εμφανίζονται ομοιόμορφα [44].

No	LT	NT	DA	PS	UTS	E	UTS	E	UTS	E
					Actual	Predicted (Eqs. 1 & 2)		error		
1	0.1	180	0	30	17.42	692.6	14.66	627.6	-15.8%	-9.4%
2	0.1	180	45	40	7.043	410.6	9.82	475.7	39.6%	15.9%
3	0.1	180	90	50	5.48	348.0	4.99	323.9	-8.9%	-6.9%
4	0.1	200	0	30	15.41	627.8	16.26	648.4	5.5%	3.3%
5	0.1	200	45	40	10.24	448.9	11.42	496.5	11.6%	10.6%
6	0.1	200	90	50	7.745	375.9	6.58	344.7	-15.0%	-8.3%
7	0.1	220	0	40	16.92	651.9	17.01	633	0.6%	-2.9%
8	0.1	220	45	50	12.58	478.5	12.17	481.1	-3.2%	0.6%
9	0.1	220	90	30	10.01	446.0	9.85	437.9	-1.5%	-1.8%
Predicted (Eqs. 3 & 4)										
10	0.3	180	0	50	16.92	678.8	15.81	620.5	-6.5%	-8.6%
11	0.3	180	45	30	12.145	425.5	12.465	471.1	2.6%	10.7%
12	0.3	180	90	40	8.97	374.9	9.67	385.2	7.8%	2.8%
13	0.3	200	0	40	15.42	624.7	15.51	607.2	0.6%	-2.8%
14	0.3	200	45	50	12.08	468.8	12.725	521.3	5.3%	11.2%
15	0.3	200	90	30	10.01	402.1	9.37	371.8	-6.3%	-7.5%
16	0.3	220	0	50	15.21	611.2	15.58	636.2	2.5%	4.1%
17	0.3	220	45	30	12.007	483.2	12.235	486.7	1.9%	0.7%
18	0.3	220	90	40	10.15	431.9	9.44	400.9	-6.9%	-7.2%
Evaluation experiments										
					Predicted (Eqs. 3 & 4)					
19	0.3	220	0	30	14.93	591.1	15.23	593.8	2.0%	0.5%
20	0.3	220	0	30	14.79	579.4	15.23	593.8	3.0%	2.5%
21	0.3	220	0	30	15.28	578.8	15.23	593.8	-0.3%	2.6%
Average					15.23	593.8	15.23	593.8	1.5%	1.8%

Πίνακας 28. Δοκιμές επικύρωσης



Εικόνα 30. Πειράματα επικύρωσης και καμπύλες καταπόνησης για τις βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων

5.3 Συμπεράσματα επίδρασης παραμέτρων σε λεπτότοιχα δοκίμια από PLA

Η πρώτη πειραματική διάταξη της διατριβής αφορούσε τη βελτιστοποίηση δυο πολύ σημαντικών δεικτών ποιότητας, της διαστατικής ακρίβειας και της τραχύτητας επιφάνειας για εννέα μοντέλα εκτυπωμένα με τη μέθοδο FFF. Οι παράμετροι αυτής της διαδικασίας που ελήφθησαν υπόψη ήταν η θερμοκρασία εκτύπωσης (ακροφυσίου) και το πάχος τοιχώματος όπου και οι δύο είχαν ερευνηθεί ξεχωριστά όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία. Ο πειραματικός σχεδιασμός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένας ορθογώνιος πίνακας L9 του Taguchi, που χρησιμοποιείται συνήθως και από άλλες μελέτες που αφορούν τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Οι αποκρίσεις διαστατικής ακρίβειας ήταν η απόκλιση διαστάσεων που μετρήθηκε σε X και Y κατευθύνσεις, ενώ τέσσερις παράμετροι τραχύτητας επιφάνειας (αριθμητικός μέσος τραχύτητας επιφάνειας Ra, βάθος τραχύτητας επιφάνειας Rz, συνολικό ύψος του προφίλ τραχύτητας επιφάνειας Rt, μέσο πλάτος στοιχείων προφίλ Rsm) χρησιμοποιήθηκαν ως αποκρίσεις φινιρίσματος επιφάνειας. Οι τεχνικές βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η μέθοδος Taguchi και η ανάλυση κατά Grey. Η μέθοδος του Taguchi χρησιμοποιείται για βελτιστοποίηση μεμονωμένων χαρακτηριστικών απόδοσης, ενώ η Grey ανάλυση είναι κατάλληλη για βελτιστοποίηση πολλαπλών δεδομένων.

Από τα αποτελέσματα της προσέγγισης Taguchi διαπιστώθηκε ότι διαφορετικές παράμετροι εκτύπωσης βελτιστοποιούν τις X και Y αποκλίσεις των διαστάσεων. Για την κατεύθυνση X, το πάχος τοιχώματος 3 mm και η θερμοκρασία ακροφυσίου 230°C βελτιστοποιούσε την απόκλιση διαστάσεων, ενώ τα αντίστοιχα επίπεδα για την κατεύθυνση Y ήταν 1 – 2 mm και 220°C. Στην περίπτωση της τραχύτητας επιφάνειας, το πάχος τοιχώματος 2 mm και η θερμοκρασία ακροφυσίου 230°C βελτιστοποιούσε όλες τις παραμέτρους τραχύτητας εκτός από το Rsm που γινόταν βέλτιστο στα 3 mm πάχους τοιχώματος και θερμοκρασία ακροφυσίου στους 230°C. Επιπλέον, βρέθηκε ότι η θερμοκρασία ακροφυσίου είχε υψηλότερο αντίκτυπο στην απόκλιση διαστάσεων σε X κατεύθυνση και σε όλες τις παραμέτρους τραχύτητας της επιφάνειας από το πάχος του τοιχώματος. Για την απόκλιση διαστάσεων στην κατεύθυνση Y, το πάχος του τοιχώματος βρέθηκε να είναι πιο σημαντικό από τη θερμοκρασία εκτύπωσης. Με παρόμοιο τρόπο, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την Grey ανάλυση ήταν πολύ κοντά σε αυτά που προέρχονταν από την προσέγγιση Taguchi. Η βελτιστοποίηση του υπολογισμένου βαθμού Grey αντιστοιχούσε στη βελτιστοποίηση όλων των αποκρίσεων διαστατικής ακρίβειας και

τραχύτητας επιφάνειας. Διαπιστώθηκε ότι 2 mm πάχους τοιχώματος και 230°C θερμοκρασίας κεφαλής βελτιστοποιούσαν το βαθμού Grey, ενώ η θερμοκρασία ακροφυσίου είχε μεγαλύτερη επιρροή από το πάχος του τοιχώματος. Στην πραγματικότητα, η θερμοκρασία ακροφυσίου ήταν πολύ σημαντική παράμετρος για την ακρίβεια των διαστάσεων και την τραχύτητα επιφάνειας ($F = 9.72$, $P = 0.029$). Το πάχος τοιχώματος βρέθηκε ότι δεν είναι σημαντικό ($F = 0.69$, $P = 0.553$).

Αν και αυτή η πειραματική μελέτη εξέτασε μια σειρά από ζητήματα της ποιοτικής απόδοσης των FFF εκτυπωμένων μοντέλων, είχε ορισμένες περιοριστικές πτυχές. Όπως προαναφέρθηκε, η θερμοκρασία εκτύπωσης (ακροφυσίου) και το πάχος του τοιχώματος είναι δύο παράγοντες που δεν είχαν ερευνηθεί σε μεγάλο εύρος. Για την αξιολόγηση του φινιρίσματος της επιφάνειας, ελήφθησαν υπόψη τέσσερις παράμετροι τραχύτητας επιφάνειας ενώ σε άλλες σχετικές μελέτες διερευνάται μόνο η μέση αριθμητική τραχύτητα επιφάνειας R_a . Η παρούσα μελέτη ήταν μια βελτιστοποίηση πολλαπλών στόχων, μια μέθοδος που χρειάζεται περισσότερη έρευνα όπως γίνεται κατανοητό από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση. Ωστόσο, επιπλέον σημαντικές παράμετροι της ίδιας FFF διαδικασίας μπορούν να ληφθούν υπόψη σε μελλοντικές έρευνες όπως η ταχύτητα εκτύπωσης, το μοτίβο πλήρωσης και πολλές άλλες. Σε επόμενες μελέτες διερευνήθηκε ένα μοντέλο επιφάνειας απόκρισης το οποίο είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον όταν λαμβάνονται υπόψη περισσότεροι από τρεις παράγοντες (πολυπαραγοντική παραμετροποίηση).

Τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα μελέτη είναι :

1. Τα αποτελέσματα από την προσέγγιση Taguchi έδειξαν ότι διαφορετικές τιμές παραμέτρων βελτιστοποιούσαν την απόκλιση διαστάσεων στην κατεύθυνση X και Y, ενώ οι υψηλές τιμές θερμοκρασίας ακροφυσίου βελτιστοποιούσαν τις παραμέτρους τραχύτητας της επιφάνειας. Η θερμοκρασία ακροφυσίου ήταν πιο σημαντική από το πάχος τοιχώματος στην περίπτωση παραμέτρων τραχύτητας επιφάνειας και απόκλισης διαστάσεων στην κατεύθυνση X.
2. Από την ανάλυση Grey διαπιστώθηκε ότι η υψηλή θερμοκρασία εκτύπωσης (ακροφυσίου) και οι ενδιάμεσες τιμές του πάχους τοιχώματος βελτιστοποιούσαν τόσο την ακρίβεια διαστάσεων όσο και το φινίρισμα της επιφάνειας. Βρέθηκε επίσης ότι η θερμοκρασία ακροφυσίου ήταν ο κυρίαρχος παράγοντας, ενώ το πάχος του τοιχώματος μπορεί να θεωρηθεί ασήμαντη παράμετρος.

5.4 Συμπεράσματα επίδρασης παραμέτρων σε δοκίμια από Wood/PLA

Στην δεύτερη πειραματική διάταξη ερευνήθηκε κατά πόσο επηρεάζεται από τις διαφορετικές τιμές του πάχους στρώσης αλλά και της θερμοκρασίας του ακροφυσίου η διαστατική ακρίβεια και η τραχύτητα δοκιμίων, από το υλικό Wood/PLA, που έχουν κατασκευαστεί με τη μέθοδο FFF. Το πάχος στρώσης ήταν πολύ σημαντικό για τις παραμέτρους ποιότητας επιφάνειας (R_a , R_t) αλλά και για τη διαστατική ακρίβεια (DX , DY , DW_X και DW_Y). Όσο αυξάνονταν το πάχος στρώσης, αυξάνονταν και οι παράμετροι της τραχύτητας αλλά και της διαστατικής ακρίβειας. Η θερμοκρασία του ακροφυσίου δεν αποτελούσε σημαντικό παράγοντα για την τραχύτητα των δοκιμίων αλλά ήταν σημαντική για την ακρίβεια των διαστάσεων. Όταν αυξανόταν η θερμοκρασία του ακροφυσίου, τα R_a και R_t αυξανόταν ελαφρώς μετά τους 210°C. Όλες οι τιμές του R_a (πίνακας 17) ήταν μεταξύ 13 μm έως 25 μm και του R_t μεταξύ 81 μm έως 132 μm (πίνακας 17). Η διαστατική ακρίβεια έδειξε μια μέση τιμή 0,49 mm που οφείλονταν στη διάμετρο του ακροφυσίου.

Σύμφωνα με την ανάλυση διακύμανσης ANOVA το πάχος στρώσης αποτελούσε σημαντική παράμετρο ($F > 4$ και $P < 0.05$) και επηρέαζε τόσο την τραχύτητα όσο και τη διαστατική ακρίβεια. Η θερμοκρασία ακροφυσίου διαπιστώθηκε ότι ήταν ασήμαντη παράμετρος τόσο για το R_a όσο και για το R_t ($F < 2$ και $P > 0.05$) αλλά σημαντική για τις παραμέτρους διαστατικής ακρίβειας ($F > 4$ και $P < 0.05$). Οι τιμές $R\text{-sq}$ υποδήλωναν ότι τα γραμμικά μοντέλα ήταν κατάλληλα για τις προβλέψεις των παραμέτρων R_a , R_t και της διαστασιολογικής ακρίβειας.

Σε μελλοντική έρευνα μπορούν να διερευνηθούν περισσότεροι παράμετροι της προσθετικής διαδικασίας FFF σε διαφορετικά σχέδια δοκιμίων και να εξεταστεί η επίδρασή τους στη διαστατική ακρίβεια και στην τραχύτητα των επιφανειών τους. Επίσης μπορεί να εξεταστεί η εφαρμογή γενετικών αλγορίθμων και νευρωνικών δικτύων για πιο ακριβείς προβλέψεις.

5.5 Συμπεράσματα επίδρασης παραμέτρων στην αντοχή Wood/PLA δοκιμίων

Στο τρίτο πείραμα της διατριβής εξετάστηκε η επίδραση τεσσάρων μεταβλητών παραμέτρων, του πάχους στρώσης, της θερμοκρασίας ακροφυσίου, της γωνίας εναπόθεσης και της ταχύτητας εκτύπωσης στην αντοχή εφελκυσμού και στο μέτρο ελαστικότητας δοκιμίων από Wood/PLA σε ποσοστό 70% PLA και 30% ξυλόσκονης που κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο FFF.

Οι τιμές της αντοχής σε εφελκυσμό που παρατηρήθηκαν ήταν μεταξύ 5,48 - 17,42 Mpa και του μέτρου ελαστικότητας μεταξύ 347 - 692 Mpa. Ο Afroze [357] διαπίστωσε ότι για δείγματα από καθαρό PLA οι αντίστοιχες τιμές ήταν μεταξύ 31 - 39 MPa και 1246 – 1538 Mpa. Διαπιστώθηκε ότι η αντοχή εφελκυσμού και το μέτρο ελαστικότητας του Wood/PLA ήταν σημαντικά μικρότερα από αυτές του καθαρού PLA. Στην έρευνα του Afroze [357] η μηδενική γωνία εναπόθεσης βελτιστοποιούσε επίσης την αντοχή σε εφελκυσμό για καθαρό PLA, κάτι που παρατηρήθηκε και στην έρευνα με το σύνθετο υλικό Wood/PLA. Επιπλέον, είναι αξιοσημείωτο ότι οι προδιαγραφές του Wood/PLA έχουν ελάχιστες τιμές 70 MPa για εφελκυσμό και 1900 MPa για μέτρο ελαστικότητας, διαπιστώνοντας μέσω των πειραμάτων ότι έχουν το 25% και το 36% των αντίστοιχων χαρακτηριστικών ποιότητας.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων αναλύθηκαν χρησιμοποιώντας τα διαγράμματα κύριας επίδρασης, διαγράμματα αλληλεπίδρασης και ανάλυσης ANOVA και διαπιστώθηκε ότι:

- Η παράμετρος της γωνίας εναπόθεσης κυριαρχούσε και στα δυο χαρακτηριστικά ποιότητας που εξετάστηκαν. Όταν η παράμετρος αυτή αυξάνονταν τόσο η αντοχή σε εφελκυσμό αλλά και το μέτρο ελαστικότητας μειώνονταν. Η ίδια παράμετρος επηρέαζε τα δυο αυτά χαρακτηριστικά σε ποσοστό 80% και 90% αντίστοιχα. Η μηδενική γωνία εναπόθεσης εμφάνιζε υψηλότερες τιμές τόσο στον εφελκυσμό όσο και στην ελαστικότητα όπως συμβαίνει και στην έρευνα του Afroze [357] κατά τον ίδιο πειραματισμό σε καθαρό PLA.
- Η βέλτιστη κατάσταση θερμικής συγκόλλησης των στρώσεων επηρεάζονταν από την ταχύτητα εκτύπωσης, τη θερμοκρασία ακροφυσίου και το πάχος

στρώσης με αντι-συνεργιστικό τρόπο (διαγράμματα αλληλεπίδρασης, εικόνα 26) αλλά σχετικά σε μικρό βαθμό.

- Η παράμετρος της ταχύτητας εκτύπωσης επηρέαζε ελαφρώς τα δυο χαρακτηριστικά ποιότητας που εξετάστηκαν. Όσο μειώνονταν η ταχύτητα, βελτιώνονταν η αντοχή σε εφελκυσμό αλλά και το μέτρο ελαστικότητας για πάχος στρώσης 0,1 mm ενώ μειώνονταν και στα δυο χαρακτηριστικά για πάχος στρώσης 0,3 mm.
- Η θερμοκρασία ακροφυσίου επηρέαζε σε μικρό βαθμό την αντοχή σε εφελκυσμό και το μέτρο ελαστικότητας. Για πάχος στρώσης 0,1 mm, όταν αυξάνονταν η θερμοκρασία, αυξάνονταν ελαφρώς και οι τιμές των χαρακτηριστικών ποιότητας.
- Το πάχος στρώσης αποτέλεσε σημαντική παράμετρο αλλά εξαρτιόταν σε μεγάλο βαθμό από την κατάσταση συγκόλλησης των στρώσεων (επηρεαζόμενη από την ταχύτητα εκτύπωσης και θερμοκρασίας ακροφυσίου) και προτείνεται να μελετηθεί μεμονωμένα.
- Τέλος, τα μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης που αναπτύχθηκαν, αποδείχθηκαν επαρκή, έχοντας ακρίβεια μεγαλύτερη από 5% με τρία ανεξάρτητα πειράματα επικύρωσης.

Οι τρεις επαναλήψεις στις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων αποδεικνύουν ότι :

- (i) οι τιμές εξάπλωσης ήταν πολύ κοντινές, άρα επικυρώνεται η βελτιστοποίηση (σε βέλτιστες συνθήκες, οι τιμές εξάπλωσης ελαχιστοποιούνται), και
- (ii) ότι το μοντέλο παλινδρόμησης έδινε ακριβείς προβλέψεις, άρα η μεθοδολογία Taguchi επικυρώνεται. Σε περίπτωση που υπήρχαν υψηλότερες τιμές εξάπλωσης ή ανακριβείς προβλέψεις, η βελτιστοποίηση θα είχε ελαττώματα και σε αυτή την περίπτωση, θα χρειαζόταν ένας νέος σχεδιασμός.

Προτείνεται ως συνέχεια της παραπάνω έρευνας μια πολυπαραμετρική βελτιστοποίηση δοκιμίων από το σύνθετο υλικό του Wood/PLA, συμπεριλαμβανομένων περισσότερων τύπων με διαφορετικές περιεκτικότητες σκόνης ξύλου.

6. Επίλογος

Στην παρούσα έρευνα αναλύθηκε η μέθοδος προσθετικής κατασκευής FFF ή FDM (Fused Filament Fabrication – Fused Deposition Modeling) που αποτελεί μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους κατασκευής πρωτοτύπων της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Υπάρχουν πολλά κοινά χαρακτηριστικά με όλα τα συστήματα εκτύπωσης, με βάση την εξώθηση, όπου είναι η τροφοδοσία και η ρευστοποίηση υλικού, η εφαρμογή πίεσης για την κίνηση του υλικού διαμέσου του ακροφυσίου (κεφαλή), η τελική εξώθηση, η σχεδιογράφηση σε καθορισμένη διαδρομή, η συγκόλληση στρώσεων του υλικού με στόχο ένα στερεό σχηματισμό και η ενσωμάτωση υποστηριγμάτων ώστε να κατασκευάζονται πολύπλοκες γεωμετρίες. Η τροφοδοσία γίνεται με προωθητικό μηχανισμό συνεχούς υλικού (νήματος) μέσα σε ένα θάλαμο. Η μέθοδος της εξώθησης βασίζεται στην αρχή ότι το υλικό που βρίσκεται μέσα σε ένα θάλαμο θα ρευστοποιηθεί με κατάλληλες θερμοκρασίες ώστε να μπορέσει να ωθηθεί με πίεση μέσω ενός ακροφυσίου. Το ακροφύσιο καθορίζει τη μορφή και το μέγεθος του εξωθούμενου νήματος. Μια μεγάλη διάμετρος ακροφυσίου επιτρέπει το υλικό να ρέει ταχύτερα με αποτέλεσμα όμως το αντικείμενο που κατασκευάζεται να έχει μικρή ακρίβεια σε σχέση με το σχέδιο του στο CAD λογισμικό. Αφού το υλικό εξωθηθεί, πρέπει να διατηρεί το ίδιο σχήμα και μέγεθος. Ωστόσο, η βαρύτητα και η επιφανειακή τάση μπορεί να προκαλέσουν αλλαγή στο σχήμα και το μέγεθος μπορεί να μεταβληθεί σύμφωνα με φαινόμενα ψύξης αλλά και ξήρανσής του. Τα συστήματα εξώθησης χρησιμοποιούν μια κατασκευαστική πλατφόρμα ώστε να εξασφαλίζεται η δυνατότητα δημιουργίας των μεμονωμένων στρώσεων. Το ακροφύσιο είναι προσαρμοσμένο σε ένα σχεδιογραφικό σύστημα που επιτρέπει τη μετακίνησή του σε οριζόντιο επίπεδο. Για να εξασφαλίζεται ομαλή και σταθερή εναπόθεση υλικού, η σχεδιογράφηση αυτή πρέπει να είναι συντονισμένη με το ρυθμό εξώθησης. Είναι αναγκαίο να υπάρχει αρκετή παραμένουσα θερμική ενέργεια για να ενεργοποιήσει τις επιφάνειες των γειτονικών σημείων, προκαλώντας τη συγκόλληση του υλικού. Εφόσον λοιπόν εξωθείται το υλικό πρέπει να στερεοποιείται και να συγκολληθεί με το γειτονικό υλικό. Τα περισσότερα συστήματα προσθετικής κατασκευής διαθέτουν κάποιο τρόπο για να στηρίζουν τα ελεύθερα και ασύνδετα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, καθώς και να διατηρούν όλα τα χαρακτηριστικά ενός κομματιού στην ακριβή θέση τους κατά τη διάρκεια της κατασκευαστικής διαδικασίας. Αυτό επιτυγχάνεται με την επιπρόσθετη κατασκευή υποστηριγμάτων είτε από το κύριο υλικό κατασκευής είτε από κάποιο δευτερεύον (PVA, HIPS). Ο χρήστης είναι αποκλειστικά υπεύθυνος για την προσθήκη των υποστηριγμάτων είτε με αυτόματο τρόπο μέσω λογισμικών είτε με επιπλέον μεμονωμένο σχεδιασμό τους. Στις πιο πολλές διεργασίες προσθετικής κατασκευής, αφού δημιουργηθεί το

πρωτότυπο, απαιτείται μετεπεξεργασία, προκειμένου να αποκτήσει όλα τα χαρακτηριστικά σχετικά με τη μορφή του, τις πιθανές συναρμογές του ή την τελική λειτουργία του ώστε να χρησιμοποιηθεί έτσι όπως σχεδιάστηκε. Η αφαίρεση υποστηριγμάτων, η βελτίωση της υφής και των ιδιοτήτων με θερμικές ή μη τεχνικές, η βαφή και άλλες αισθητικές βελτιώσεις αποτελούν τις πιο συχνές μεθόδους μετεπεξεργασίας.

Υπάρχουν διάφοροι παράμετροι που αναλύθηκαν και επηρεάζουν σε μεγάλο ποσοστό την ποιότητα της εκτύπωσης με αυτή την προσθετική κατασκευαστική διαδικασία. Η ποιότητα αναφέρεται στην απόκλιση από τις ονομαστικές διαστάσεις των ψηφιακών μοντέλων που έχουν σχεδιαστεί σε CAD προγράμματα, στην τραχύτητα των επιφανειών τους αλλά και στην αντοχή τους. Οι πιο συνηθισμένοι παράμετροι που παίζουν μεγάλο ρόλο στην ποιότητα των παραγόμενων αντικειμένων είναι το πάχος της κάθε στρώσης, η θερμοκρασία του ακροφυσίου, η ταχύτητα εκτύπωσης αλλά και η γωνία εναπόθεσης. Διενεργήθηκαν τρία διαφορετικά πειράματα σε λεπτότοιχα δοκίμια όπου θα μπορούσαν να παίξουν το ρόλο διακοσμητικών αλλά και χρηστικών αντικειμένων. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το βιοδιασπώμενο πολυμερές PLA και το σύνθετο Wood/PLA όπου περιέχει σκόνη ξύλου αναμειγμένη με πολυμερές. Διαπιστώθηκε ότι η σωστή επιλογή παραμέτρων αλλά και των τιμών τους επηρεάζει άμεσα την τελική ποιότητα αλλά και χρήση των εκτυπωμένων αντικειμένων.

Με την τρισδιάστατη εκτύπωση αναδεικνύονται συνεχώς νέες προκλήσεις όπου μπορούν να αποτελέσουν σημαντική έρευνα για μελλοντικούς πειραματισμούς. Προσθετική διαδικασία με παραπάνω βαθμούς ελευθερίας, χρησιμοποίηση επιπλέον κεφαλών εκτύπωσης (τριών, τεσσάρων) για επίτευξη πολλών χρωμάτων αλλά και διαφορετικών υλικών ταυτόχρονα, πολυ-παραμετροποίηση για εξέταση επίδρασής τους στην τελική ποιότητα είναι ορισμένα ζητήματα όπου είναι αναγκαίο να μελετηθούν με πειραματικές διαδικασίες έτσι ώστε να εξελιχθεί ακόμη πιο πολύ αυτή η νέα τεχνολογία. Η προσθετική κατασκευή αποτελεί ένα από τα πιο σύγχρονα και γρήγορα αναπτυσσόμενα πεδία στο χώρο των τεχνολογιών ψηφιακής αλλά και αυτοματοποιημένης παραγωγής. Ενσωματώνει απόλυτα τον χαρακτήρα και τη φιλοσοφία των τεχνολογιών CAD/CAM (Computer-Aided Design/Manufacturing) καθώς απαιτεί την ύπαρξη ψηφιακού μοντέλου με βάση το οποίο κατασκευάζεται το τελικό προϊόν, με την προϋπόθεση ότι έχει γίνει η σωστή επιλογή παραμέτρων της διαδικασίας.