

ΑΝΔΡΕΑΔΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ
ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΤΟΥ
ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΡΑCF
ΕΠΕΙΤΑ ΑΠΟ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ FFF

Τομέας: Τεχνολογίας των Κατεργασιών

Επιβλέπων: Μαρκόπουλος Άγγελος, Αναπληρωτής Καθηγητής
ΕΜΠ

Αθήνα 2023

--- κενή σελίδα ---

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ανδρεάδης Δημήτριος

Περίληψη

Τις τελευταίες δεκαετίες, οι τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής (AM – Additive Manufacturing) αποτελούν πρωτοκλασάτο ζήτημα τόσο στον ερευνητικό όσο και στο βιομηχανικό κόσμο. Οι τεχνολογίες AM δίνουν τη δυνατότητα κατασκευής αντικειμένων μέσω διαδοχικής πρόσθεσης επάλληλων στρώσεων υλικού.

Εκ των τεχνολογιών AM, η τεχνολογία διαστρωματικής εξώθησης τηγμένου συρματοειδούς υλικού (FDM – Fused Deposition Modeling), με την συνεισφορά της Open Source δράση Replication Rapid Prototyper Project (RepRap), αποτελεί πλέον την πιο δημοφιλή τεχνολογία εκ των τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής (Additive Manufacturing). Στη τεχνολογία αυτή θερμοπλαστικό υλικό συρματοειδούς μορφής τήκεται και εναποτίθεται διαστρωματικά επί πλατφόρμας έως ότου παραχθεί το τελικό προϊόν. Η δράση RepRap, με βασική ιδέα τη κατασκευή και τη χρήση μηχανών για ιδιοπαραγωγή, οδήγησε σήμερα στην ύπαρξη χαμηλού κόστους μηχανών εκτύπωσης, υλικών αλλά και λογισμικών διαθέσιμα για ελεύθερη εμπορική χρήση.

Μέσω της διεργασίας αυτής μπορούν να κατασκευαστούν σύνθετα σχεδιαστικά προϊόντα σε μικρό χρόνο και κόστος άλλα χαμηλής ποιότητας και επαναληψιμότητας λόγω της χαμηλής ποιότητας του εξοπλισμού και των λογισμικών. Ωστόσο η πρόκληση να επιτευχθεί η κατασκευή υψηλής ποιότητας προϊόντων ικανά να χρησιμοποιηθούν σε βιομηχανικές εφαρμογές βρίσκεται στο ερευνητικό επίκεντρο. Ιδιαίτερα το κομμάτι του λογισμικού εμπεριέχει την ύπαρξη πολλών παραμέτρων κατεργασίας ικανά να επηρεάσουν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των τελικών προϊόντων.

Ένα από τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των παραγόμενων προϊόντων που ενδιαφέρουν είναι η μηχανική συμπεριφορά, όπου για τα κοινά θερμοπλαστικά υλικά βρίσκουμε πληθώρα ερευνών. Στο προσκήνιο πλέον βρίσκονται θερμοπλαστικά σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες ως κατεργαζόμενα υλικά προκειμένου να βελτιωθεί η μηχανική συμπεριφορά.

Σκοπός παρούσα διπλωματική εργασία είναι ο πειραματισμός με ένα νέο εμπορικό μηχάνημα εκτύπωσης (Flash Forge - Creator 3) με το οποίο εξοπλίστηκε το Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών καθώς και η αξιολόγηση στις μηχανικές ιδιότητες εφελκυσμού των προϊόντων παραγόμενα αυτό. Το υλικό που εξετάζεται είναι το ενισχυμένο πολυαμίδιο με 15% ίνες άνθρακα (Carbon fiber PA) της εταιρείας BASF. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το CURA ενώ οι παράμετροι κατεργασίας που εξετάζονται είναι το μοτίβο πλήρωσης (infill pattern), το ποσοστό πλήρωσης (infill density) και το πολλαπλάσιο γραμμών πλήρωσης (infill line multiplier). Η μηχανική αξιολόγηση τους γίνεται σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D638:2014. Για τον σχεδιασμό των πειραμάτων (design of experiments) χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Taguchi, ενώ για την ανάλυση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση διακύμανσης ANOVA.

Abstract

Last decades, Additive Manufacturing (AM) technologies have become a hot topic in both the research and industrial worlds. AM technologies enable the construction of objects through the successive addition of parallel material layers.

Among Additive Manufacturing (AM) technologies, the technology of Material Extrusion (Fused Deposition Modeling), with the contribution of the Open Source initiative Replication Rapid Prototyper Project (RepRap), has now become the most popular technology among Additive Manufacturing technologies. In this technology, thermoplastic filament material is melted and deposited layer by layer on a platform until the final product is produced. The RepRap initiative, with its fundamental idea of building and using machines for self-replication, has led to the existence of low-cost printing machines, materials, and software available for free commercial use today.

Through this process, complex design products can be manufactured quickly and at low cost, but with low quality and repeatability due to the subpar quality of equipment and software. However, the challenge of achieving the construction of high-quality products suitable for industrial applications is at the forefront of research. In particular, the software component involves the existence of many processing parameters capable of influencing the quality characteristics of the final products.

One of the quality characteristics of the produced products of interest is their mechanical behavior, where numerous research studies have been conducted for common thermoplastic materials. Now in the forefront are thermoplastic composite materials reinforced with fibers as processed materials in order to enhance their mechanical performance.

The purpose of this thesis is to experiment with a new commercial 3D printing machine (Flash Forge - Creator 3) recently acquired by the Laboratory of Manufacturing Technology and to evaluate the parts tensile mechanical properties as well. The material under examination is the 15% carbon fiber-reinforced polyamide (PACF) by BASF. The software used is CURA, and the processing parameters investigated include infill pattern, infill density, and infill line multiplier. The mechanical evaluation is conducted according to ASTM D638:2014 standards. The Taguchi method, was utilized for experiment design. Finally the results of the measurements are analyzed using Taguchi and ANOVA.

Ευχαριστίες

Δια αυτού του κειμένου θα ήθελα να εκφράσω τις βαθιές ευχαριστίες μου στην οικογένειά μου και στους κοντινούς μου ανθρώπους για την υπομονή, συμπαράσταση και υποστήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια εκτέλεσης της παρούσα διπλωματικής εργασίας.

Επιπλέον, ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Άγγελο Μαρκόπουλο για την επιλογή μου, καθώς και τον υποψήφιο διδάκτορα Γιάννη Χριστοδούλου για το ενδιαφέρον που επέδειξε, τη καθοδήγηση και τις χρήσιμες γενικές και ειδικότερες συμβουλές του, όπως επίσης για τη όλη συνεργασία.

Περιεχόμενα

Περίληψη	4
Abstract	5
Ευχαριστίες	6
1. Εισαγωγή	9
1.1 Βασικοί ορισμοί - Ορολογία	9
1.2 Ιστορική Αναδρομή	11
1.2.1 Βιολογικά συστήματα.....	11
1.2.2 Μηχανές πρόσθεσης υλικού	13
2. Κατασκευή με πρόσθεση υλικού	18
2.1 Αρχή λειτουργίας	18
2.2 Ροή δεδομένων ελέγχου	21
2.3 Τεχνολογίες.....	23
2.3.1 Φωτοπολυμερισμός (Vat Photopolymerisation)	23
2.3.2 Στερεολιθογραφία (Stereolithography (SLA))	24
2.3.3 Εκτόξευσης υλικού (Material jetting).....	24
2.3.4 Εκτόξευσης συνδετικού υλικού (Binder Jetting).....	25
2.3.5 Συνένωσης Σκόνης (Powder Bed Fusion)	26
2.3.6 Εναπόθεση με Κατευθυνόμενη Ενέργεια (Directed Energy Deposition).28	
2.3.7 Διαστρωμάτωση Φύλλων (Sheet Lamination)	29
2.4 Εφαρμογές και περιορισμοί της Προσθετική Κατασκευής	30
3. Τεχνολογία εξώθησης υλικού - FDM.....	32
3.1 Ανάλυση λειτουργίας.....	32
3.2 Υλικά κατεργασίας της τεχνολογίας FDM.....	33
3.3 Παράμετροι ελέγχου κατεργασίας της τεχνολογίας FDM.....	34
3.4 Χαρακτηριστικά προϊόντων της τεχνολογίας FDM.....	37
4. Σχεδιασμός Πειραμάτων (Design of Experiments).....	43
4.1 Παραγοντικός Σχεδιασμός (Factorial Design).....	43
4.1.1 Πλήρης παραγοντικός σχεδιασμός (Full factorial design)	43
4.1.2 Κλασματικός παραγοντικός σχεδιασμός (Fractional factorial design)	44
4.2 Μέθοδος Taguchi.....	44
4.2.1 Ορθογώνιοι πίνακες Taguchi.....	45
4.2.2 Βαθμοί ελευθερίας.....	46
4.2.3 Signal to Noise Ratio (SNR)	47
4.2.4 ANOVA	48
5. Πειραματική διαδικασία	49
5.1 Σχεδιασμός πειραμάτων (DOE)	49
5.2 Διεξαγωγή πειραμάτων	51
5.2.1 ASTM D639 – 14.....	51
5.2.2 Διαδικασία εκτύπωσης.....	51
5.2.3 Εφέλκυσμός δοκιμίων - Συλλογή δεδομένων	55
6. Ανάλυση αποτελεσμάτων	70
6.1 Εισαγωγή δεδομένων στο Minitab	70
6.2 Αποτελέσματα αναλύσεων.....	72
6.3 Ανάλυση επαναληψιμότητας μετρήσεων	80
7. Συμπεράσματα και μελλοντικές εργασίες	86
8. Κατάλογος Πινάκων.....	88

9. Κατάλογος Εικόνων	89
10. Βιβλιογραφία.....	91
Παράρτημα.....	98
Flashforge Creator 3 – Data Sheet.....	98
Ultrafuse® PAHT CF15 – Data sheet	99
Διαγράμματα Τάσης - Παραμόρφωσης	103

1. Εισαγωγή

1.1 Βασικοί ορισμοί - Ορολογία

Η **Προσθετική Κατασκευή (Additive Manufacturing)** είναι μια μέθοδος κατεργασίας για την μορφοποίηση και την δημιουργία τρισδιάστατων στερεών προϊόντων και αποτελείται από ένα σύνολο τεχνολογιών που λειτουργούν κυρίως βάση διαστρωματικής πρόσθεσης υλικού σε αντίθεση με τη συμβατική μέθοδο μηχανουργικής αφαίρεσης υλικού που χρησιμοποιείται από τους τομείς των κατασκευών.

Οι συγκεκριμένες τεχνολογίες αναπτύχθηκαν επίσημα τη δεκαετία του 80' ως μια διαδικασία με το όρο **Ταχεία Πρωτοτυποποίησης (Rapid Prototyping)**, λόγω της ταχείας χρονικά διαδικασίας σχεδιασμού και παραγωγής πρωτότυπων μοντέλων (ταχεία μετάβαση από το άυλο τρισδιάστατο σχέδιο στο τελικό προϊόν), σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους κατεργασίας αλλά και λόγω των περιορισμών σε διαθέσιμα υλικά, ιδιότητες τελικών προϊόντων [1]. Έκτοτε, οι τεχνολογίες κατεργασίας με τη συγκεκριμένη μέθοδο από τη περίοδο εμφάνισης τους έχουν περιγραφεί με διάφορους όρους όπως: **Διαστρωματική Κατασκευή (Layer Manufacturing)**, **Ταχεία Κατασκευή (Rapid Manufacturing)**, **Ταχεία Κατασκευή Εργαλείων (Rapid Tooling)**, **Τρισδιάστατη Εκτύπωση (Three Dimensional (3D) Printing)**. Ο Αμερικάνικος οργανισμός τυποποίησης γνωστή ως Αμερικανική Εταιρεία Δοκιμών και Υλικών (**American Society for Testing and Material – ASTM**) ορίζει ως επίσημο όρο περιγραφής της μεθόδου τον όρο **Κατασκευή με Πρόσθεση Υλικού/Προσθετική Κατασκευή (Additive Manufacturing)**. Συγκεκριμένα στο πρότυπο ASTM F2792-12a [2] αναφέρεται ότι:

"Η κατασκευή με πρόσθεση υλικού είναι μια κατεργασία ένωσης υλικού για τη παραγωγή αντικειμένων από δεδομένα τρισδιάστατων μοντέλων και πραγματοποιείται συνήθως στρώμα επί στρώματος, σε αντίθεση με τις μεθοδολογίες κατεργασίας με αφαίρεση υλικού όπως οι παραδοσιακές μηχανουργικές κατεργασίες"

Η μέθοδος είναι προγραμματιζόμενη και αυτοματοποιημένη, για τη παραγωγή του κώδικα ελέγχου της λειτουργίας των μηχανών προσθετικής παραγωγής/ τρισδιάστατων εκτυπωτών χρησιμοποιούνται δεδομένα τρισδιάστατων ψηφιακών μοντέλων τα οποία προέρχονται από τρισδιάστατη σχεδίαση μέσω Η/Υ (3D CAD) ή από ψηφιοποίηση υπαρχόντων απτών μοντέλων (3D scanning/ 3D digitizing) χρησιμοποιώντας μηχανήματα τρισδιάστατης σάρωσης (3D scanners), μέτρησης συντεταγμένων (Coordinate Measuring Machines (CMMs) ή τομογράφους (όπως ακτίνων Χ, μαγνητικών κ.α.).

Τα διαθέσιμα κατεργαζόμενα υλικά, η ποιότητα επιφάνειας, η διαστασιολογική ακρίβεια, οι μηχανικές και φυσικοχημικές ιδιότητες και άλλα χαρακτηριστικά των προϊόντων διαφέρουν από τεχνολογία σε τεχνολογία και από μηχανήμα σε μηχανήμα. Το κατεργαζόμενο υλικό μπορεί να βρίσκεται σε ρευστή κατάσταση (φωτοσκληρυνόμενα πολυμερή, θερμοσκληρυνόμενα, ελαστομερή, θερμοπλαστικά,

πάστες, μείγματα) ή στερεή κατάσταση σκόνης (μεταλλική, κράματα μετάλλων, κεραμική, πλαστική, σύνθετη), σύρματος (μέταλλα, αμιγώς θερμοπλαστικά ή με προσμίξεις) ή φύλλων (χαρτί, πολυμερή, κεραμικά, μεταλλικά, σύνθετα).

Από το 2010, η ειδική τεχνική επιτροπή "ASTM F42 - Additive Manufacturing" του Αμερικάνικου οργανισμού τυποποίησης ASTM είναι σχετική με θέματα τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής και έχει ως στόχο την έκδοση πρότυπων σχετικά με τις τεχνολογίες, τα κατεργαζόμενα υλικά, τα λογισμικά, τους ελέγχους και τις δοκιμές. Σύμφωνα με την επιτροπή οι τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής ταξινομούνται σε επτά κατηγορίες όπως ακολούθως παρουσιάζονται στο «Πίνακας 1».

Πίνακας 1: Κατηγορίες τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής [3].

Τύπος Κατεργασίας	Περιγραφή	Τεχνολογία	Εμπορική Εταιρεία	Υλικά
Φωτοπολυμερισμός (Vat Photopolymerization)	Φωτο-πολυμερές ρευστό το οποίο βρίσκεται εντός δοχείου προσβάλλεται σε επιλεκτικά σημεία από ακτινοβολία κατάλληλης συχνότητας και στερεοποιείται μόνο σημεία προσβολής του.	Stereo lithography (SLA), Digital light processing (DLP)	3D Systems, 3D Ceram, EnvisionTec, Teijin Seiki/ CMET	Φωτο-πολυμερή
Εκτόξευσης υλικού (Material Jetting)	Σταγονίδια ή σωματίδια κατεργαζόμενου υλικού εναποτίθενται με εκτόξευσης επιλεκτικά επί πλατφόρμας	Multi-jet Modelling	Objet (Israel), 3DSYSTEMS (US)	Πολυμερή, Κεριά
Εκτόξευσης συνδετικού υλικού (Binder Jetting)	Ρευστό συνδετικό στοιχείο εναποτίθεται επιλεκτικά για την πρόσδεση κόκκων σκόνης κατεργαζόμενου υλικού.	Powder bed and inkjet head (PBH), Plaster-based 3D Printing (PP)	3D Systems (US), Ex One (US)	Πολυμερή, Άμμο Χύτευσης, Μέταλλα
Εξώθησης Υλικού (Material Extrusion)	Το κατεργαζόμενο υλικό τήκεται και εξωθείται δια στομίου σε επιλεκτικά σημεία επί πλατφόρμας	Fused deposition modelling (FDM) or FFF – Fused Filament Fabrication	Stratasys (Israel), Bits from Bytes (UK)	Πολυμερή
Συνένωσης Σκόνης (Powder Bed Fusion)	Θερμική ενέργεια προσβάλλει και συνενώνει επιλεκτικά κόκκους κατεργαζόμενης σκόνης επί πλατφόρμας	Electron beam melting (EBM), Selective Laser Sintering (SLS), Selective Heat Sintering (SHS), Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	EOS (Germany), 3D Systems(US), Arcam (Sweden)	Μέταλλα, Πολυμερή
Εναπόθεση με Κατευθυνόμενη Ενέργεια (Directed Energy Deposition)	Εστιασμένη θερμική ενέργεια προσβάλλει και τήκει το κατεργαζόμενο υλικό καθώς αυτό εναποτίθεται	Laser metal deposition (LMD)	Optomec (US), POM (US)	Μέταλλα

Διαστρωμάτωση Φύλλων (Sheet Lamination)	Φύλλα υλικού συνενώνονται διαστρωματικά για να σχηματίσουν το τρισδιάστατο αντικείμενο	Laminated object Manufacturing (LOM), Ultrasonic Consolidation (UC)	Fabrisonic (US), Mcor (Ireland)	Χαρτί, Μέταλλα
--	--	--	---------------------------------------	-------------------

1.2 Ιστορική Αναδρομή

1.2.1 Βιολογικά συστήματα

Η μέθοδος κατασκευής με πρόσθεση υλικού (Additive Manufacturing) ή Τρισδιάστατη Εκτύπωση (Three Dimensional Printing) δεν είναι κάτι καινούργιο που ανακαλύφθηκε πρόσφατα από τον άνθρωπο, υπήρχε, υπάρχει, εφαρμόζεται διαρκώς από τη φύση και συναντάται στις δομές και λειτουργίες των βιολογικών συστημάτων.

Στη πραγματικότητα, η ανάπτυξη και εξέλιξη όλων των βιολογικών συστημάτων και δομών λαμβάνουν χώρα με χωρική ή διαστρωματική πρόσθεση υλικού. Για παράδειγμα, οι βελτιστοποιημένες προσεγγισμένες δομές όπως το δέρμα, το μαλλί, το μετάξι, τα οστά, τα δόντια, τα δέντρα, οι εξωσκελετοί των αρθρόποδων και άλλα βιολογικά πορώδη, κυψελώδη, αφρώδη, πλεγματούδη συστήματα χτίζονται προσθετικά, διότι έτσι κατά το χτίσιμο μπορεί ελεγχόμενα να μορφοποιηθεί η απαιτούμενη μικρο και μακρο, εσωτερική και επιφανειακή δομή του προϊόντος στο χώρο για να εκτελεί ορισμένες εργασίες [4].

Παρά το γεγονός ότι η φύση χρησιμοποιεί μια περιορισμένη σχετικά παλέτα βασικών στοιχείων όπως C, O, H, P, N, S, Ca, Si, η περίπλοκη και πολύπλοκη διαφορετική τους διάταξη και κατανομή στο χώρο σχηματίζει διαφορετική δομή και χαρίζει τελείως διαφορετικές ιδιότητες βελτιστοποιώντας ως προς κάποιες λειτουργίες και καταπονήσεις. Έτσι αναπτύσσονται τα φυσικά βιολογικά οργανικά πολυμερή (πολυνουκλεοτίδια όπως το DNA, RNA, πολυσακχαρίτες όπως το άμυλο, κυτταρίνη, γλυκογόνο, χιτίνη, πολυπεπτίδια και πρωτεΐνες όπως ένζυμα, μετάξι, κερατίνη, κολαγόνο, ελαστίνη), τα ανόργανα φυσικά υλικά και τα βιοσύνθετα.

Οι P. Fratzl, R. Weinkamer [5] και οι P.Y. Chen et al [6], [7], [8], [9] στις εκθέσεις του αναφέρονται στα βιολογικά, βιο-υλικά και βιοσύνθετα συστήματα καθώς και στη δομή και στις ιδιότητές αυτών όπου δίνουν μια πολύ καλή βιβλιογραφική επισκόπηση και πολλές αναφορές.

Η μέθοδος δεν συναντάται μόνο κατά την ανάπτυξη των βιολογικών συστημάτων αλλά εφαρμόζεται και από τα ίδια για τη κατασκευή προϊόντων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η κατασκευή της κυψέλης από τις μέλισσες οι οποίες μασούν το αποθηκευμένο κερι και έπειτα το εναποθέτουν χτίζοντας τοιουτοτρόπως. Στην Εικόνα 1 φαίνονται διάφορα προϊόντα που παρήχθησαν αξιοποιώντας, ελέγχοντας και οδηγώντας πλήθος μελισσών να χτίσουν επί ενός μοντέλου, τα αποτελέσματα είναι ενδιαφέροντα. Παρόμοιο τρόπο κατασκευής ακολουθούν οι σφήκες, μασώντας ξύλο ή χαρτί ώσπου να παραχθεί χαρτοπολτός τον οποίο εναποθέτουν για το χτίσιμο της φωλιάς τους (Εικόνα 2), επίσης, διάφορα πτηνά εργάζονται ομοίως.

Άλλα χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι αράχνες και οι μεταξοσκώληκες τα οποία παράγουν και κατεργάζονται το μετάξι ομοίως. Στην Εικόνα 3 εικονίζεται το θαυμαστό διαφορετικό από τα συνηθισμένα κουκούλι που κατασκεύασε η προνύμφη της οικογένειας Urodidae, φιλοξενείται εντός αυτής όντας στο στάδιο της μεταμόρφωσης και μελλοντικό λεπιδόπτερο. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται ο ιστός τον οποίο σχημάτισε εναποθέτοντας το μετάξι μια αράχνη *Nephila clavipes*.

Παρόμοια εργάστηκαν επιστήμονες από το MIT στην εργασία με τίτλο **silk pavillion** [10], οδηγώντας πλήθος από μεταξοσκώληκες να εναποθέσει επιλεκτικά και ελεγχόμενα το μετάξι και να σχηματιστεί η μορφή που φαίνεται στις φωτογραφίες της Εικόνα 4.

Φαίνεται λοιπόν ότι η μέθοδος εφαρμόζεται διαρκώς από τη φύση για την ανάπτυξη βελτιστοποιημένων προσεγγμένων δομών αλλά και από τα ίδια τα βιολογικά όντα τα οποία μπορούν να χαρακτηριστούν ως «βιολογικές μηχανές πρόσθεσης υλικού/ τρισδιάστατης εκτύπωσης».



Source: nymag.com

Εικόνα 1: Αξιοποίηση μελισσών για τη παραγωγή τρισδιάστατων μορφών



Source: shutterstock.com

Εικόνα 2: Κατασκευή κυψελών και φωλιάς από σφήκες



Source:blog.cleveland.com

Εικόνα 3: Κουκούλι νύμφης και ιστός αράχνης

Silk Pavillion MIT Project



Source: matter.media.mit.edu

Εικόνα 4: Αξιοποίηση μεταξοσκωλήκων για τη παραγωγή τρισδιάστατης μορφής

1.2.2 Μηχανές πρόσθεσης υλικού

Οι ρίζες των σημερινών τεχνολογιών παραγωγής τρισδιάστατων στερεών προϊόντων με διαστρωματική πρόσθεση υλικού που εφαρμόστηκαν από τον άνθρωπο μπορούν να εντοπιστούν στο παρελθόν κατά τη κατασκευή των μεγάλων πυραμίδων όπως διαστρωματικά επίσης έλαβε και λαμβάνει χώρα έως και σήμερα η κατασκευή των κτιρίων.

Αναζητώντας στα διπλώματα ευρεσιτεχνίας παγκοσμίως μπορεί κάποιος να εντοπίσει πλήθος τεχνικών και μηχανημάτων διαστρωματικής αλλά και χωρικής πρόσθεσης υλικού για τη παραγωγή τρισδιάστατων προϊόντων, ειδικά από το τη δεκαετία του 80' και έπειτα όπου παρουσιάστηκαν οι πρώτες σχετικές αυτόματες προγραμματιζόμενες μηχανές κατεργασίας, εμφανίστηκαν με ταχύ ρυθμό νέες και βελτιωμένες μηχανές, τεχνολογίες, κατεργαζόμενα υλικά και πεδία εφαρμογών.

Η επίσημη αρχή των τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής εντοπίζεται τον Αύγουστο του 1984, όπου ο Charle Hull από την Ultraviolet Products (UVP) περιέγραψε ένα σύστημα διαστρωματικού φωτοπολυμερισμού με χρήση laser υπεριώδους ακτινοβολίας τη τεχνολογία την οποία και ονόμασε Στερεολιθογραφία (Stereolithography) [11]. Ο ίδιος το 1986 ίδρυσε την 3D Systems η οποία το 1987 στο Auto-Fact Show του Detroit παρουσίασε στην αγορά το πρώτο παγκοσμίως ολοκληρωμένο εμπορικό μηχάνημα διαστρωματικού φωτοπολυμερισμού με όνομα SLA-1 (Stereolithography Apparatus – «Εικόνα 5») και εταιρίες όπως AMP, General Motors, Baxter Health Care, Eastman Kodak και Pratt and Whitney το εγκατέστησαν το 1988. Το μηχάνημα λειτουργούσε φωτοπολυμερίζοντας την ελεύθερη επιφάνεια του φωτοσκληρυνόμενου ρευστού σαρώνοντάς τη σημειακά με δέσμη laser HeCd η οποία κατευθύνεται δια ενός συστήματος περιστρεφόμενων καθρεπτών (galvanometer driven dynamic mirror), έτσι, σχηματίζεται επιφανειακά στερεό στρώμα η μορφή του οποίου αντιστοιχεί σε μια διατομή του προς παραγωγή προϊόντος ενώ μόλις ολοκληρωθεί η παραγωγή ενός στρώματος διατομής, η πλατφόρμα μαζί με το κατεργαζόμενο προϊόν βυθίζεται εντός του ρευστού και η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου στρώμα επί στρώματος σχηματιστεί η τρισδιάστατη μορφή, τέλος, αφού αφαιρεθεί το προϊόν έπρεπε να εισέλθει σε ειδικό φούρνο ακτινοβολίας UV για την πλήρη σκλήρυνσή του αφού το κατεργαζόμενο υλικό ήταν τότε ακρυλικό [12].



Πηγή: 3D Systems Circa 1987

Εικόνα 5: Μηχάνημα SLA-1 της 3D Systems

Το 1988, η 3D Systems παρουσίασε το δημοφιλές μηχάνημα SLA-250, ενώ συνεχίζει έως και σήμερα να αναπτύσσει μηχανήματα διαφόρων τεχνολογιών. Ο Charle Hull εκτός του εφηύρε τη στερεολιθογραφία, συνέβαλε και στο σχεδιασμό και τη δημιουργία μιας ολοκληρωμένης αλυσίδας λογισμικών Η/Υ, ένα εξ αυτών ήταν και ο σχεδιασμός του αρχείου .stl, μορφή αποδεκτή από λογισμικό τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Αμέσως μετά την εμπορευματοποίηση της στερεολιθογραφίας από την 3D Systems, πολλές εταιρείες από διάφορες χώρες παρουσίασαν τα δικά τους μηχανήματα στερεολιθογραφίας. Στην Ιαπωνία, η ιδρυθείσα από τη Mitsubishi, Computer Modeling and Engineering Technology (CMET) με τις τεχνολογίες Solid Object Ultraviolet Laser Plotting (SOUP) και η Sony & Japan Synthetic Rubber (JSR) με την Design-Model and Engineering Center (D-MEC) στη τεχνολογία Solid Creation System (SCS), δημοσίευσαν τη δικιά του εκδοχή της στερεολιθογραφίας το 1988 και 1989 αντίστοιχα. Στη Γερμανία, το 1990, η Electro Optical Systems (EOS) ανέπτυξε το πρώτο της μηχάνημα στερεολιθογραφίας με την ονομασία STEREOS όπως και η Quadrax με το μηχάνημα Mark 1000 [13].

Πλέον της κλασικής διάταξης της στερεολιθογραφίας του C. Hull όπου η σάρωση της δέσμης laser ήταν επιφανειακή, εμφανίστηκαν και διατάξεις που χρησιμοποιούν δέσμη laser όπου ακτινοβολούν από εκατέρωθεν του διαφανούς δοχείου και όχι επιφανειακά. Τέτοιες διατάξεις χρησιμοποίησαν οι Denken Engineering μαζί με την Autostrade το 1991 στη τεχνολογία Solid Laserdiode Plotter (SLP) [14].

Παραλλαγή της στερεολιθογραφίας ήταν η χρήση λαμπτήρα κατάλληλης ακτινοβολίας αντί laser και η προβολή του ολικά επί της διατομής με βοήθεια μασκών με ανοίγματα η μορφή των οποίων είναι σύμφωνη με τη μορφή της εκάστοτε διατομής, η ακτινοβολία διέρχεται δια των ανοιγμάτων των μασκών και έτσι, το ρευστό στερεοποιείται και σχηματίζεται αμέσως ένα ολόκληρο στρώμα. Από το Ισραήλ η Cubital το 1991 ανέπτυξε σχετικό μηχάνημα βάση της ιδέας με όνομα Solider Framework και η τεχνολογία κατεργασίας ονομάστηκε Solid Ground Curing (SGC). Την ίδια χρονιά οι L.D. Mitcham, W.E. Nelson για την Texas Instruments [15] περιέγραψαν ένα σύστημα επιφανειακού φωτοπολυμερισμού ρευστού χρησιμοποιώντας μια δυναμική μάσκα προβολής των διατομών και ένα προβολέα τεχνολογίας Deformable Micromirror Device (DMD) ο οποίος μπορούσε να μένει στάσιμος ή να κινείται κατά το επίπεδο xy.

Παράλληλα το 1991, επιπλέον δύο τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής εμπορευματοποιήθηκαν, η τεχνολογία διαστρωματικής εξώθησης υλικών (Fused Deposition modelling – FDM) από την εταιρεία Stratasys, η οποία ανέπτυξε σχετικό μηχάνημα με όνομα 3D Modeler και η τεχνολογία με την ονομασία laminated object manufacturing (LOM). Η τελευταία αναπτύχθηκε από την Helisys όπου η κατασκευή των αντικειμένων γινόταν με διαστρωμάτωση φύλλων, κοπή και έπειτα συνένωση [16].

Το 1992, παρουσιάστηκε από τη Desk Top Manufacturing (DTM) το μηχάνημα Sinterstation 2000 τεχνολογίας συνένωσης σκόνης Selective Laser Sintering (SLS). Το μηχάνημα σάρωνε με laser CO₂ εντός θερμαινόμενου θαλάμου και παρήγαγε άμεσα πλαστικά και έμμεσα μεταλλικά και κεραμικά προϊόντα (σκόνες με πολυμερή) αφού αυτά απαιτούσαν πυροσυσσωμάτωση [17]. Ένα χρόνο αργότερα το 1993, η Soligen ανέπτυξε μηχανήματα τεχνολογίας εκτόξευσης συνδετικού υλικού (binder jetting). Η τεχνολογία αυτή εφευρέθηκε και κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τους E.M. Sachs et al [18] το 1989 από το πανεπιστήμιο του MIT (Massachusetts Institute of Technology), όπου συνδετικό υλικό εκτοξεύεται σε επιλεκτικά σημεία επί κατεργαζόμενης σκόνης που βρίσκεται σε πλατφόρμα κατεργασίας για το διαστρωματικό σχηματισμό του τελικού αντικειμένου.

Το 1994, η Electro Optical Systems (EOS) ανέπτυξε μηχάνημα το οποίο ονόμασε EOSINT P για την παραγωγή πλαστικών προϊόντων, έπειτα το μηχάνημα EOSINT S για τη παραγωγή προϊόντων από άμμο για εφαρμογές χύτευσης και ύστερα το μηχάνημα EOSINT M τεχνολογίας Direct Metal Laser Sintering (DMLS) το οποίο παράγαγε άμεσα μεταλλικά προϊόντα δια μερικής τήξης [19].

Οι R.C. Sanders et al το 1994 παρουσίασαν ένα ολοκληρωμένο σύστημα εκτόξευσης θερμοπλαστικών/κεριού όπου και η εταιρεία Sanders Prototypes ανέπτυξε σχετικό μηχάνημα με όνομα ModelMaker [20]. Η 3D Systems το 1996 ανέπτυξε όμοιο μηχάνημα εκτόξευσης θερμοπλαστικού/κεριού από κεφαλή με πολλαπλά στόμια με όνομα Actua 2100. Η τεχνολογία ονομάστηκε MultiJet Modeling (MJM).

Το 1997, από την Arcam αναπτύχθηκαν διάφορα σχετικά μηχανήματα τεχνολογίας Electron Beam Melting (EBM). Το 1998, η Optomec πουλάει το πρώτο της σύστημα μεταλλικής εκτόξευσης και παράλληλης τήξης κατά την εναπόθεση δια δεσμών laser (Directed Energy Deposition) [21]. Το 1999, ο D. White [22] παρουσίασε μια υβριδική μέθοδο παραγωγής στρωσιγενών μεταλλικών προϊόντων με συνένωση δια υπερηχητικών ταλαντώσεων (Ultrasonic Consolidation (UC)) και κοπής με κοπτικά εργαλεία. Τα φύλλα συνενώνονται διαστρωματικά με υπερηχητικά χτυπήματα μέσω ενός εργαλείου (Sonotrode) και κόβονται περιοδικά με κοπτικό εργαλείο. Τα προϊόντα μπορεί να έχουν εσωτερικούς αυλούς, όπως επίσης να ενσωματώνονται και άλλα στοιχεία όπως ηλεκτρονικά.

Το 2001, ο J. Hendrik [23] περιέγραψε ένα σύστημα με ακτινοβολήση από εκατέρωθεν διαφανούς δοχείου χρησιμοποιώντας ως δυναμική μάσκα ένα προβολέα τεχνολογίας Digital Light Processing (DLP). Ο ίδιος ίδρυσε την EnvisionTec η οποία ανέπτυξε το Perfactory (Personal Factory). Στην Εικόνα 6 φαίνεται το μηχάνημα Perfactory της EnvisionTec μαζί με κάποια προϊόντα αυτού.



Πηγή: Envisiontec

Εικόνα 6: Perfactory της EnvisionTec και πλαστικά προϊόντα

Οι δεκαετίες του 1990 και του 2000 ανέδειξαν πλήθος πολλών άλλων νέων τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής άλλα και παραλλαγές αυτών που αναφέρθηκαν, με επίκεντρο τόσο τις βιομηχανικές εφαρμογές όσο και τις διαδικασίες πρωτοτυποποίησης. Η λήξη των παλαιών διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας, όπως της τεχνολογίας εξώθησης θερμοπλαστικού υλικού (Fused Deposition modelling – FDM) το 2009, οδήγησε στη ταχεία ανάπτυξη χαμηλού κόστους μηχανημάτων¹.

¹ Ένα κατάλογος υπάρχει στην ιστοσελίδα <http://www.3ders.org/priccompare/3dprinters>

2. Κατασκευή με πρόσθεση υλικού

2.1 Αρχή λειτουργίας

Το γεγονός του προσθετικού χτίσιματος του προϊόντος συνεπάγεται δυνατότητα σχεδόν ελεύθερης και απεριόριστης μορφοποίησης αυτού τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά/ επιφανειακά διότι κατά το χτίσιμο μπορεί να αναπτυχθεί κάθε επιθυμητή μορφή. Γενικότερα, και βάση κινηματικής, η μορφοποίηση ενός αντικειμένου δια πρόσθεσης υλικού μπορεί να λάβει χώρα με δυο τρόπους:

- Χωρικά (Τρισδιάστατα): Η πρόσθεση υλικού λαμβάνει χώρα τρισδιάστατα με ανάπτυξη του προϊόντος χωρικά ενώ μπορεί να γίνει σημείο-σημείο ή επιφάνεια-επιφάνεια με συνεχή ή διακριτό τρόπο.
- Διαστρωματικά (Δισδιάστατα): Η διαδικασία λαμβάνει χώρα με επάλληλο στοίβαγμα στρωμάτων από τα οποία έκαστο αντιστοιχεί σε μια διατομή του προς παραγωγή προϊόντος, έτσι, η τρισδιάστατη ανάπτυξη αυτού προκύπτει από τη συνένωση των επιμέρους στρωμάτων.

Η πλειοψηφία των τεχνολογιών προσθετικής παραγωγής λειτουργεί κατά διαστρωματικό τρόπο αφού ο σχεδιασμός και προγραμματισμός της κατεργασίας είναι απλούστερος και ταχύτερος. Η μέθοδος βασίζεται στην αρχή ότι οποιοδήποτε τρισδιάστατο στερεό υλικό αντικείμενο μπορεί να προκύψει εάν:

- "Τεμαχιστεί" νοητά η τρισδιάστατη γεωμετρία βάση μοντέλου/ σχεδίου πραγματοποιώντας τομές σε αυτή με οριζόντια παράλληλα επίπεδα και υπολογιστούν οι διατομές από τα σημεία συμβολής της γεωμετρίας με τα επίπεδα αυτά.
- Κατεργαστούν κατάλληλα υλικά για τη κατασκευή στρωμάτων βάση των αντίστοιχων διατομών της γεωμετρίας με πάχος στρώματος ίσο με την απόσταση μεταξύ δυο τομών.
- Συνενωθούν επάλληλα και διαστρωματικά τα στρώματα κατά την κατεύθυνση τεμαχισμού και κατά την ίδια σειρά.

Επομένως, δια της κατασκευής στρωμάτων από τα οποία έκαστο αντιστοιχεί σε μια διατομή ενός τρισδιάστατου μοντέλου/ σχεδίου και της επάλληλης συνένωσης των στρωμάτων αυτών εις ένα ενιαίο σώμα, θα σχηματιστεί η τελική υλική τρισδιάστατη μορφή του. Βάση αυτής της αρχής λειτουργούν οι αυτόματες προγραμματιζόμενες μηχανές πρόσθεσης υλικού/ τρισδιάστατης εκτύπωσης, κατασκευάζοντας, στοιβάζοντας και συνενώνοντας κάθε στρώμα διατομής του μοντέλου με το εκατέρωθεν.

Ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία της μεθόδου, μια μηχανή πρόσθεσης υλικού περιλαμβάνει διάφορα συστήματα ελέγχου και περιφερειακά για την υποστήριξη της κατεργασίας. Μακροσκοπικά, τα δυο βασικά συστήματα είναι:

- Σύστημα κεφαλής κατεργασίας: είναι το σύστημα δια του οποίου κατεργάζεται το άμορφο υλικό. Μπορεί να είναι για παράδειγμα κεφαλή εκτόξευσης, εξώθησης, κοπής υλικού, κεφαλή ακτινοβολήσης για προσβολή και στερεοποίηση ρευστού

υλικού ή θερμικής ακτινοβολήσης για θέρμανση και συνένωση των κόκκων της σκόνης.

- Σύστημα πλατφόρμας κατεργασίας: η βάση επί της οποίας χτίζεται το αντικείμενο.

Η σχετική κίνηση μεταξύ των δυο αυτών συστημάτων πρέπει να είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει την παραγωγή του τρισδιάστατου αντικειμένου.

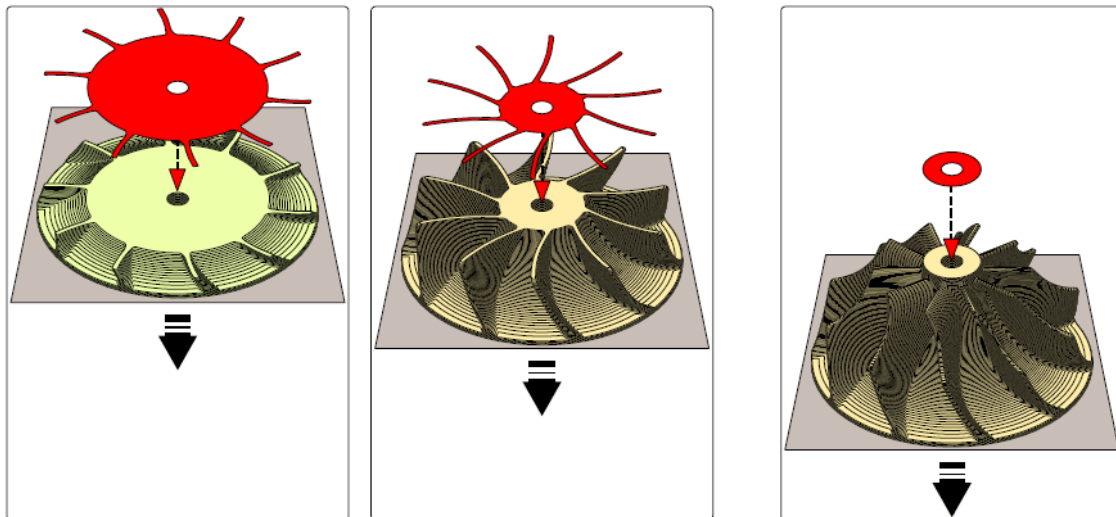
Η κατεργασία και η λειτουργία των μηχανών είναι κυκλικά επαναλαμβανόμενη και εκτελείται ως εξής:

- Κατεργασία υλικού για τη παραγωγή στρώματος διατομής (κατεργασία κατά το επίπεδο xy).
- Συνένωση στρώματος με το εκατέρωθεν στρώμα. Ολοκλήρωση συνένωσης στρώματος διατομής, κατακόρυφη βύθιση πλατφόρμας (ή ανύψωση κεφαλής) κατά μήκος ίσο με το πάχος στρώματος και παραγωγή νέου στρώματος.

Η συνένωση των στρωμάτων μπορεί να γίνει:

- Με αυτογενή συνένωση χωρίς να παρεμβάλλεται ξένο υλικό, έτσι, το ίδιο το κατεργαζόμενο υλικό των στρωμάτων συνενώνεται δια θέρμανσης, ακτινοβολήσης κ.α. με φυσικό ή χημικό τρόπο.
- Με ετερογενή συνένωση όταν παρεμβάλλεται ξένο υλικό συνδετικό στοιχείο όπως κόλλα κ.α. μεταξύ των στρωμάτων και το οποίο ενεργοποιείται με φυσικό ή χημικό τρόπο με θέρμανση, ακτινοβολήση κ.α.

Στην Εικόνα 7 παρουσιάζεται η διαστρωματική κατασκευή μιας πτερωτής σύμφωνα με τα προηγούμενα.



Εικόνα 7: Διαστρωματικής κατασκευή πτερωτής

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ανάλογα με την μορφή και την επιλεγμένη κατεύθυνση διαστρωμάτωσης του προς παραγωγή προϊόντος, εάν δηλαδή υπάρχουν απότομες κλίσεις, εσοχές, προεξοχές ή αιωρούμενα τμήματα του προς παραγωγή προϊόντος, μπορεί να απαιτούνται υποστηρίγματα κατά το χτίσιμό του τα οποία με το πέρασ της

κατεργασίας θα πρέπει εύκολα να αφαιρούνται. Στη βιβλιογραφία παρουσιάζονται δυο τύποι υποστηριγμάτων.

Ο πρώτος τύπος υποστηριγμάτων εφαρμόζεται επί το πλείστον από τις τεχνολογίες διαστρωμάτωσης φύλλων με συνένωση και έπειτα κοπή αυτών, έτσι, κάποια τμήματα αυτού χρησιμοποιούνται για το χτίσιμο του προϊόντος και άλλα θυσιάζονται για την υποστήριξή του.

Ο δεύτερος τύπος υποστηριγμάτων εφαρμόζεται από τις υπόλοιπες τεχνολογίες πρόσθεσης υλικού όχι μόνο για την υποστήριξη του προϊόντος αλλά και για την συγκράτηση αυτού επί της πλατφόρμας κατεργασίας και για να αποτραπούν τυχόν παραμορφώσεις. Το υλικό χτισίματος κατεργάζεται και εναποτίθεται για την ανάπτυξη του προϊόντος ενώ παράλληλα και όπου απαιτείται χτίζονται συμπαγή ή πλεγματούδη υποστηρίγματα από ίδιο ή διαφορετικό υλικό (υδατοδιαλυτό, χαμηλότερης θερμοκρασίας τήξης) από το υλικό χτισίματος.

Ωστόσο, υπάρχουν μερικές τεχνολογίες όπου το κατεργαζόμενο προϊόν ανεξάρτητα από τη κατεύθυνση διαστρωμάτωσης και τη μορφή του δεν απαιτεί υποστηρίγματα αφού το ίδιο το κατεργαζόμενο υλικό το υποστηρίζει, τέτοιες είναι οι τεχνολογίες συνένωσης σκόνης επί πλατφόρμας και οι τεχνολογίες εκτόξευσης κόλλας επί σκόνης όπου το ίδιο το κατεργαζόμενο κοκκώδες υλικό υποστηρίζει το κατεργαζόμενο προϊόν καθώς αυτό βυθίζεται εντός της σκόνης διαστρωματικά.



Πηγή: 3D Systems

Εικόνα 8: Πρώτος τύπος υποστηριγμάτων



Πηγή: 3D Systems

Εικόνα 9: Δεύτερος τύπος υποστηριγμάτων

2.2 Ροή δεδομένων ελέγχου

Η βασική πορεία εργασιών (process chain) σε επίπεδο λογισμικού για τον έλεγχο μιας μηχανής διαστρωματικής πρόσθεσης υλικού με σκοπό τη παραγωγή ενός τρισδιάστατου προϊόντος περιλαμβάνει τα εξής βήματα [24]:

1. Σχεδίαση τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου με λογισμικά συστήματα 3D CAD ή τρισδιάστατη ψηφιοποίηση υπάρχοντος απτού μοντέλου.
2. Πλεγματοποίηση επιφάνειας του ψηφιακού μοντέλου (προσέγγιση με τρίγωνα, εξαγωγή σε αρχείο .stl ή .amf).
3. Λογισμικό σχεδιασμού κατεργασίας, επιλογές μεταβλητών και συνθηκών κατεργασίας, διαχείριση του πλεγματοποιημένου μοντέλου, τεμαχισμός αυτού και παραγωγή κώδικα ελέγχου μηχανής.
4. Προετοιμασία μηχανής.
5. Ελεγχόμενη λειτουργία. Διαστρωματική κατεργασία υλικού βάση του κώδικα ελέγχου.
6. Παραλαβή προϊόντος, αφαίρεση υποστηριγμάτων εάν υπάρχουν, καθαρισμός και άλλες μετεπεξεργασίες.

Αν και ο σχεδιασμός της κατεργασίας διαφέρει από τεχνολογία σε τεχνολογία πρόσθεσης υλικού και από μηχανή σε μηχανή, η βασική πορεία εργασίας είναι όπως προαναφέρθηκε. Αρχική προϋπόθεση είναι η ύπαρξη ενός τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου.

Από την άλλη, ένα υπάρχον απτό μοντέλο μπορεί να ψηφιοποιηθεί και να προκύψει το τρισδιάστατο ψηφιακό αντίγραφο το οποίο μπορεί να παραμείνει αυτούσιο ή να μεταβληθούν στοιχεία του (επισκευή, ανασκευή). Η διαδικασία αυτή της ψηφιοποίησης και αντιγραφής υπάρχοντων μοντέλων για την επισκευή, ανασκευή ή παραγωγή κλώνων αυτών ονομάζεται αντίστροφη μηχανοτεχνία (reverse engineering).

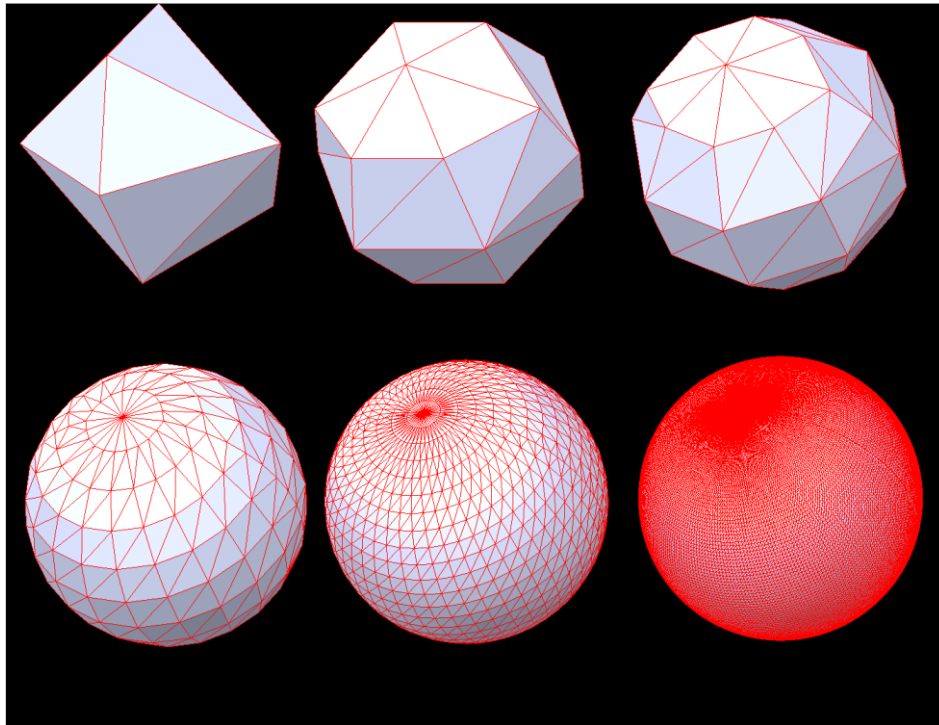
Το τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο ως προϊόν είτε ψηφιοποίησης/ σάρωσης είτε σχεδίασης δια 3D CAD μπορεί να τεμαχιστεί με δυο τρόπους:

- Το ίδιο το λογισμικό σχεδίασης ή ψηφιοποίησης να τεμαχίσει και να υπολογίσει τις διατομές του τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου. Τα λογισμικά θα πρέπει να είναι συμβατά με συγκεκριμένες μηχανές πρόσθεσης υλικού και να υποστηρίζουν το σχεδιασμό της κατεργασίας (επιλογές μεταβλητών και συνθηκών) για τη παραγωγή του κώδικα ελέγχου.
- Το τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο να μετατραπεί σε μια απλή μεταβιβάσιμη μορφή ώστε κάθε σημείο της γεωμετρίας του να είναι εύκολα υπολογίσιμο από κάποιο άλλο λογισμικό το οποίο θα αναλάβει να το τεμαχίσει, να υπολογίσει τις διατομές, να επιτρέπει επιλογές συνθηκών και μεταβλητών κατεργασίας ώστε παράξει τον κώδικα ελέγχου για συγκεκριμένη μηχανή.

Από τα προηγούμενα, πιο πρακτικό είναι η εξαγωγή του τρισδιάστατου μοντέλου από το λογισμικό σχεδίασης ή ψηφιοποίησης σε μια μορφή η οποία θα περιγράφει τη

γεωμετρία με τέτοιο τρόπο ώστε να υπολογίζεται εύκολα από ένα αποκλειστικά αφοσιωμένο λογισμικό τεμαχισμού και παραγωγής κώδικα ελέγχου για συγκεκριμένη μηχανή. Τα περισσότερα προγράμματα σχεδίασης τρισδιάστατων στερεών προσφέρουν τη δυνατότητα πλεγματοποίησης του τρισδιάστατου μοντέλου με τρίγωνα και εξαγωγής στη μορφή αρχείου .stl (Standard Tessellation Language) η οποία είναι η καθιερωμένη που βασικά χρησιμοποιείται από τα λογισμικά συστήματα τρισδιάστατων εκτυπωτών. Ο τύπος .stl αναπτύχθηκε για την 3D Systems το 1987 [25] από την Albert Consulting Group και χρησιμοποιείται έως και σήμερα.

Κατά τη πλεγματοποίηση του μοντέλου βάση του προτύπου .stl, όλη η επιφάνειά του προσεγγίζεται με επίπεδα τρίγωνα, έτσι, η προσέγγιση των επίπεδων οριζόντιων, κατακόρυφων ή υπό σταθερή κλίση επιφανειών του μοντέλου είναι απόλυτη σε αντίθεση με τη περίπτωση των καμπύλων επιφανειών (μεταβλητή κλίση), για αυτό, θα πρέπει να επιλέγεται η επιθυμητή ανοχή και ακρίβεια προσέγγισης των καμπύλων επιφανειών ενώ όσο μεγαλύτερη είναι τόσο μεγαλύτερο θα είναι το πλήθος των τριγώνων προσέγγισης άρα μεγαλύτερο και το μέγεθος του αρχείου. Στην Εικόνα 10 φαίνεται μια σφαίρα και το αποτέλεσμα της προσέγγισης αυτής με διαφορετικό αριθμό επίπεδων τριγώνων



Πηγή: 3D Systems

Εικόνα 10: Προσέγγιση σφαίρας με διαφορετικό αριθμό τριγώνων

Το αρχείο .stl περιέχει πληροφορίες πλεγματοποίησης μιας επιφάνειας με επίπεδα τρίγωνα ορίζοντας για κάθε τρίγωνο τα τρία σημεία του στο χώρο και το διάνυσμα που είναι κάθετο στην επιφάνεια του τριγώνου.

Όσον αφορά το τεμαχισμός μιας τρισδιάστατης γεωμετρίας είναι μια διαδικασία κατά την οποία πραγματοποιούνται τομές σε αυτήν με δισδιάστατα επίπεδα όπου βάση της δισδιάστατης διατομής κατασκευάζεται το αντίστοιχο στρώμα συγκεκριμένου πάχους

ίσο με την απόσταση μεταξύ δυο τομών το οποίο μαζί με άλλα και όταν συνενωθούν θα αποτελέσουν την τελική τρισδιάστατη.

Έτσι, σύμφωνα με τα προηγούμενα και συμπληρώνοντας, η τελική ποιότητα επιφάνειας και διαστασιολογική ακρίβεια ενός διαστρωματικού προϊόντος θα είναι συνάρτηση των κάτωθι αλληλεξαρτώμενων στοιχείων:

- Πυκνότητα στρωμάτων προσέγγισης (πάχος στρώματος) και τεχνική πλήρωσης αυτών.
- Τεχνική παρεμβολής στρωμάτων μεταξύ των τομών.
- Κατεύθυνση διαστρωμάτωσης.
- Ακρίβεια πλεγματοποίησης του τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου.
- Τεχνολογία πρόσθεσης υλικού, κατασκευαστικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών (σφάλματα, αποκλίσεις) του μηχανήματος κατεργασίας και άλλων επιλεγμένων συνθηκών και μεταβλητών κατεργασίας.
- Ιδιοτήτων κατεργαζόμενων υλικών.

2.3 Τεχνολογίες

Η προσθετική παραγωγή αποτελείται από πολλές τεχνολογίες και η ομαδοποίηση αυτών γίνεται από το ASTM F2792-12a [2] όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο.

2.3.1 Φωτοπολυμερισμός (Vat Photopolymerisation)

Ο φωτοπολυμερισμός περιγράφει μια ομάδα διαφορετικών τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής. Στις τεχνολογίες φωτοπολυμερισμού, πολυμερές ρευστό το οποίο βρίσκεται εντός δοχείου προσβάλλεται με ακτινοβολία κατάλληλης συχνότητας σε επιλεκτικά σημεία και με διάφορες διατάξεις, όπου και στερεοποιείται στα σημεία προσβολής του. Η ανάπτυξη του προϊόντος μπορεί να λάβει χώρα διαστρωματικά ή χωρικά.

Τα συστατικά των κατεργαζόμενων φωτοπολυμερών ρευστών είναι: φωτοενεργοποιητές, ολιγομερή τα οποία καθορίζουν τις βασικές ιδιότητες, μονομερή τα οποία ρυθμίζουν τη ταχύτητα φωτοπολυμερισμού και το ιξώδες, ελαστικοποιητές, σταθεροποιητές και αντιδραστικός διαλύτης. Όταν οι φωτοενεργοποιητές εκτεθούν σε κατάλληλης συχνότητας ακτινοβολία, αντιδρούν με τα μονομερή και ξεκινάει η διαδικασία σχηματισμού αλυσίδων πολυμερών (πολυμερισμός). Η ακτινοβολία ενεργοποίησης είναι συνήθως υπέρυθη, μπορεί όμως να είναι και άλλου τύπου ανάλογα με το είδος των φωτοενεργοποιητών. Αρχικά, τα πρώτα φωτοπολυμερή ήταν ακρυλικής βάσης ενώ έπειτα αναπτύχθηκαν εποξικά και βινυλαιθερικά η και με προσμίξεις άλλων υλικών και μορίων όπως μεταλλικών, κεραμικών κόκκων ή να είναι υδρογέλες, πολτώδη, πάστες [26]. Επίσης μπορεί να είναι διαφανή ή μη και αρκετά ελαστικά ενώ η σύσταση αυτών διαφέρει, έτσι, οι ιδιότητές τους μιμούνται διάφορα υλικά όπως τα βιομηχανικά πλαστικά.

Εταιρείες που αναπτύσσουν φωτοπολυμερή για διάφορα μηχανήματα, με διαφορετική σύσταση, μηχανικές και φυσικοχημικές ιδιότητες είναι μεταξύ άλλων: Huntsman, Adeka, Japan Synthetic Rubber (JSR), DSM Somos όπως και εταιρείες κατασκευής μηχανημάτων που παράλληλα αναπτύσσουν και ρευστά όπως η 3D Systems, Teijin Seiki/ CMET, Prodways, 3D Ceram, EnvisionTec, Dreve (Innovation Meditech), Formlabs.

2.3.2 Στερεολιθογραφία (Stereolithography (SLA))

Μια δέσμη laser κατάλληλης συχνότητας εστιάζεται, οδηγείται δια περιστρεφόμενων καθρεπτών, σαρώνει επιλεκτικά σημειακά και στερεοποιεί το φωτοσκληρυνόμενο ρευστό σύμφωνα με τη μορφή της εκάστοτε διατομής του προς παραγωγή προϊόντος ενώ μόλις ολοκληρωθεί η παραγωγή ενός στρώματος, η πλατφόρμα βυθίζεται εντός του ρευστού μαζί με το κατεργαζόμενο προϊόν, ένας σαρωτής (sweeper) σαρώνει την επιφάνεια του ρευστού για να εξασφαλιστεί η επιπεδότητα και η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου προκύψει το τελικό τρισδιάστατο στερεό προϊόν. Ανάλογα με τη μορφή του προϊόντος μπορεί να παράγονται και υποστηρίγματα από το ίδιο υλικό.

Τη διάταξη αυτή χρησιμοποιεί η 3D Systems από το 1987 όταν διέθεσε τη παγκοσμίως πρώτη μηχανή πρόσθεσης υλικού τεχνολογίας φωτοπολυμερισμού την οποία και ονόμασε **στερεολιθογραφία (stereolithography (SLA))**. Το σύγχρονο μηχάνημά της Projet 7000 και πλαστικά προϊόντα αυτού φαίνονται στην Εικόνα 11.



Source: 3D Systems

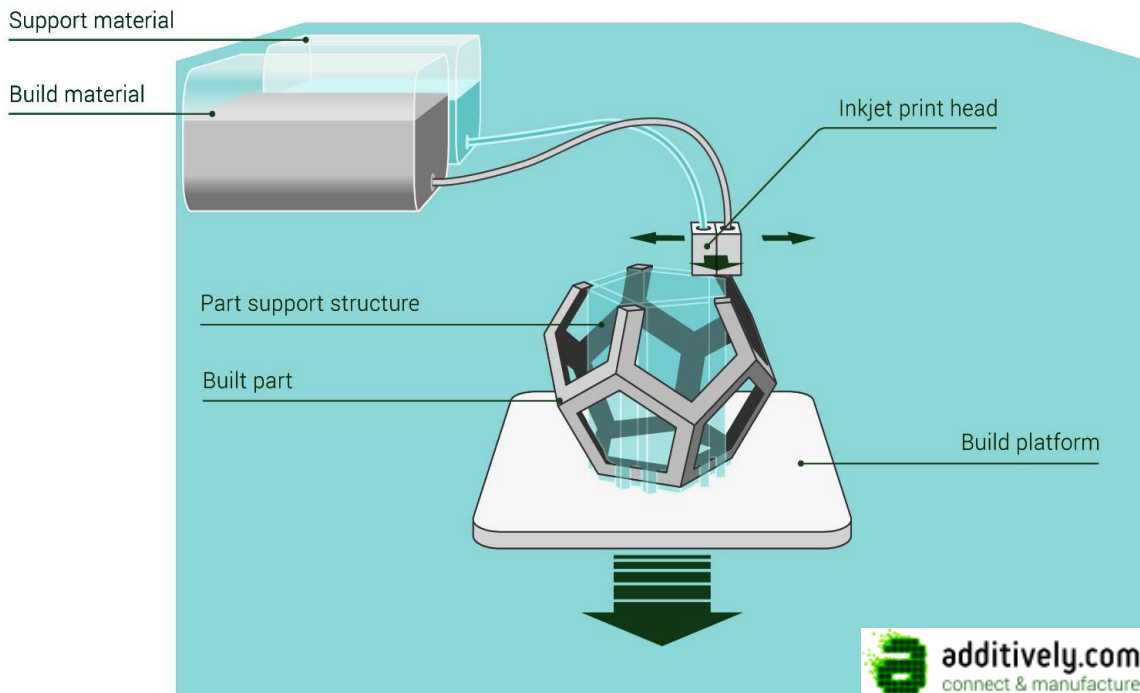
Εικόνα 11: Projet7000 της 3D Systems και προϊόντα

2.3.3 Εκτόξευσης υλικού (Material jetting)

Η προσθετική παραγωγή προϊόντων εφαρμόζοντας τη τεχνολογία εκτόξευσης υλικού πραγματοποιείται εναποθέτοντας δια εκτόξευσης σταγονίδια ή σωματίδια κατεργαζόμενου υλικού σε επιλεκτικά σημεία επί πλατφόρμας με διάφορες διατάξεις και μέσα ενώ η ανάπτυξη του προϊόντος μπορεί να λάβει χώρα διαστρωματικά (τουλάχιστον τρεις βαθμοί κινηματικής ελευθερίας) ή χωρικά (τουλάχιστον πέντε βαθμοί κινηματικής ελευθερίας). Τα προϊόντα μπορεί να είναι έγχρωμα είτε

χρωματίζοντας τα εκτοξευόμενα υλικά είτε εκτοξεύοντας υλικά διαφορετικού χρώματος.

Η βασική διάταξη των μηχανημάτων εκτόξευσης υλικού κατά διαστρωματικό τρόπο παρουσιάζεται στην Εικόνα 12. Μια ή περισσότερες κεφαλές εκτόξευσης υλικού χρησιμοποιούνται για την επιλεκτική σημειακή εκτόξευση ενός υλικού χτισίματος του προϊόντος και ενός δεύτερου διαφορετικού υλικού (αν υπάρχει δεύτερη κεφαλή) χτισίματος των υποστηριγμάτων του επί της πλατφόρμας. Μόλις ολοκληρωθεί η παραγωγή ενός στρώματος το οποίο αντιστοιχεί σε μια διατομή του προς παραγωγή προϊόντος, η πλατφόρμα κατεργασίας κατέρχεται (είτε ανέρχεται η κεφαλή) για τη κατεργασία του επόμενου και η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου προκύψει το τελικό προϊόν. Η κίνηση μεταξύ τις κεφαλής και της πλατφόρμας πρέπει να είναι σχετική κατά τους άξονες x , y , z , συνήθως η κεφαλή κινείται κατά το επίπεδο xy και η πλατφόρμα κατά τον άξονα z , όμως, η κατανομή των αξόνων μπορεί να διαφέρει αλλά και να μην είναι καρτεσιανή. Η κάθε κεφαλή μπορεί να έχει πολλαπλά ανεξαρτήτως ελεγχόμενα στόμια εκτόξευσης.

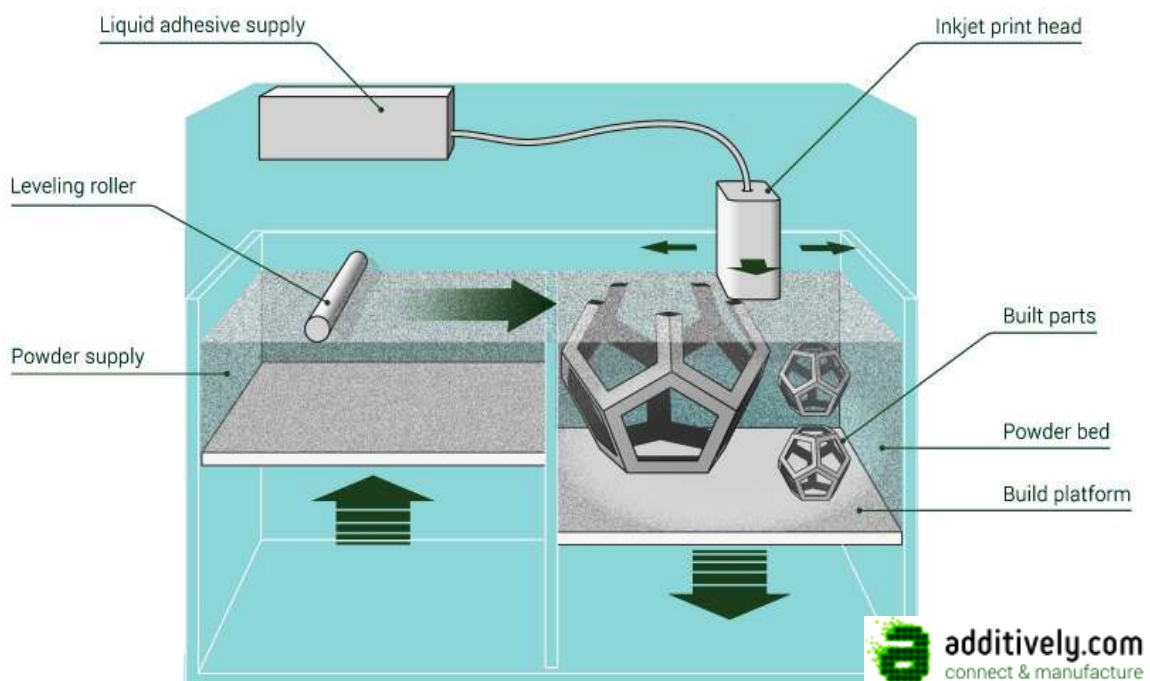


Εικόνα 12: Βασική διάταξη εκτόξευσης υλικού

2.3.4 Εκτόξευσης συνδετικού υλικού (Binder Jetting)

Η προσθετική παραγωγή προϊόντων εφαρμόζοντας τη τεχνολογία εκτόξευσης κόλλας πραγματοποιείται εκτοξεύοντας το συνδετικό στοιχείο (κόλλα) σε επιλεκτικά σημεία επί της κατεργαζόμενης σκόνης που βρίσκεται επί πλατφόρμας για τη συνένωση των κόκκων της ενώ η ανάπτυξη του προϊόντος λαμβάνει χώρα διαστρωματικά. Τα προϊόντα μπορεί να είναι έγχρωμα αφού η εκτοξευόμενη κόλλα μπορεί να χρωματίζεται ενώ τα κατεργαζόμενα υλικά μπορεί να είναι οποιαδήποτε σε κατάσταση σκόνης όπως, άμμος, πολυμερή, μέταλλα, κεραμικά, γύψος, σύνθετα. Όσον αφορά τα μεταλλικά και κεραμικά προϊόντα, αυτά θα πρέπει αφού έχουν πρώτα μορφοποιηθεί, να πυροσυσσωματωθούν ή/ και να εμποτιστούν με κατάλληλο υλικό πλήρωσης για το κλείσιμο τυχόν πόρων.

Στην Εικόνα 13 φαίνεται η βασική διάταξη των μηχανημάτων διαστρωματικής εκτόξευσης κόλλας επί κοκκώδους υλικού. Η κεφαλή εκτόξευσης κινείται κατά το επίπεδο xy πάνω από τη πλατφόρμα κατεργασίας επί της οποίας βρίσκεται η σκόνη και εκτοξεύει σε επιλεκτικά σημεία τη κόλλα συνενώνοντας τους κόκκους σχηματίζοντας έτσι ένα συνεκτικό στρώμα το οποίο αντιστοιχεί σε μια διατομή του προς παραγωγή προϊόντος ενώ μόλις ολοκληρωθεί η παραγωγή ενός στρώματος διατομής, η πλατφόρμα κατεργασίας κατέρχεται, νέο υλικό απλώνεται και επιπεδώνεται για την κατεργασία του επόμενου στρώματος και η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου προκύψει το τελικό προϊόν. Τα κατεργαζόμενα προϊόντα δια της συγκεκριμένης τεχνολογίας δεν απαιτούν υποστηρίγματα σε καμία περίπτωση αφού το υποστηρίζει η ίδια η σκόνη εντός της οποίας βυθίζεται το προϊόν και δεν υπάρχουν δυνάμεις που μπορούν να το παραμορφώσουν. Η κεφαλή μπορεί να έχει πολλαπλά ελεγχόμενα ανεξάρτητα στόμια εκτόξευσης.



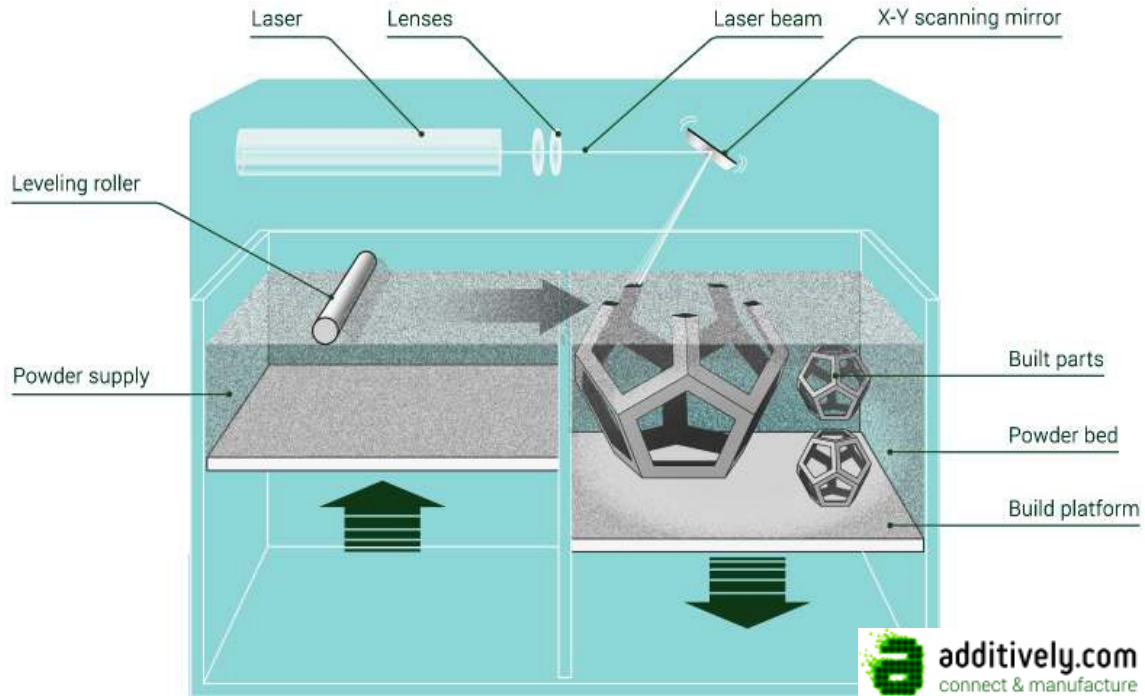
Εικόνα 13: Βασική διάταξη εκτόξευση κόλλας

2.3.5 Συνένωσης Σκόνης (Powder Bed Fusion)

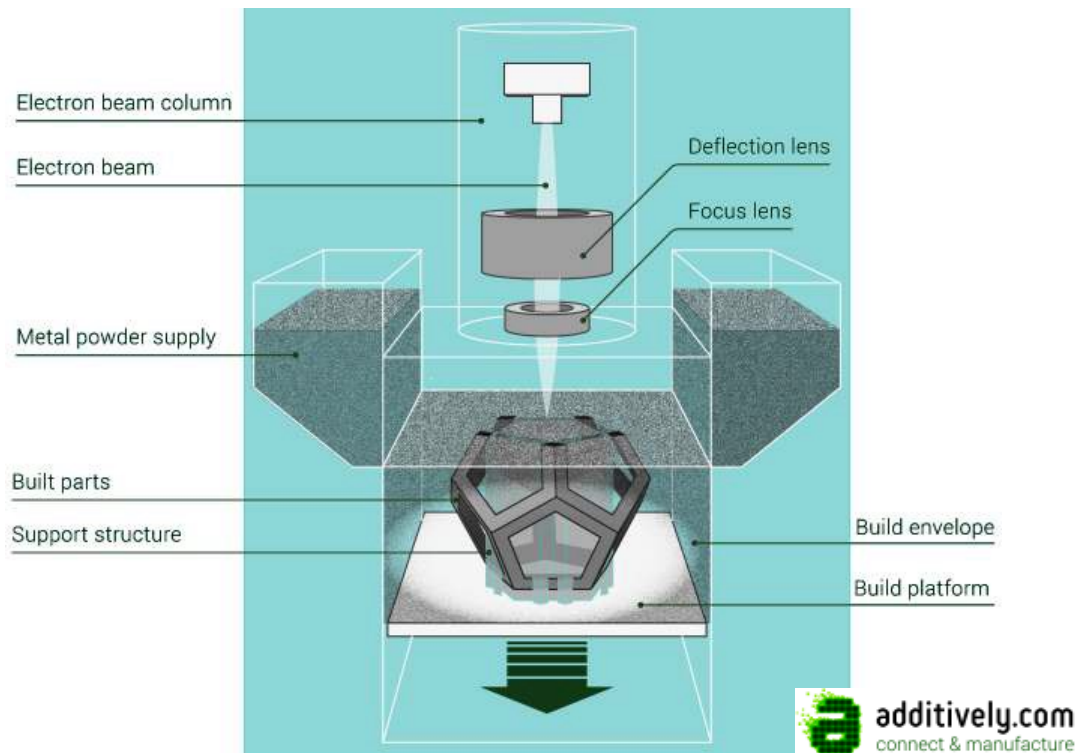
Η προσθετική παραγωγή προϊόντων εφαρμόζοντας τη τεχνολογία συνένωσης σκόνης επί πλατφόρμας πραγματοποιείται συνενώνοντας δια επιλεκτικής πρόσδοσης θερμικής ενέργειας τους κόκκους της κατεργαζόμενης σκόνης ενώ η κατεργασία λαμβάνει χώρα διαστρωματικά. Τα κατεργαζόμενα υλικά είναι οποιαδήποτε κοκκώδη και ικανά για συσσωμάτωση δια θέρμανσης, για παράδειγμα αμιγώς μέταλλα, πολυμερή, κεραμικά, φυσική άμμος είτε με προσμίξεις, κράματα και σύνθετα.

Η βασική διάταξη συνένωσης σκόνης με δέσμη laser φαίνεται στην Εικόνα 14. Η δέσμη εστιάζεται, οδηγείται δια συστήματος περιστροφικών καθρεπτών και σαρώνει σημειακά επί της σκόνης τη μορφή της εκάστοτε διατομής ενώ μόλις συνενωθεί ένα στρώμα, τότε η πλατφόρμα κατέρχεται, τροφοδοτείται με νέο υλικό, επιπεδώνεται για την κατεργασία του επόμενου στρώματος και η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου

προκύψει το τελικό προϊόν. Ανάλογα με τη κατεργαζόμενη σκόνη και το μηχανισμό συνένωσης το προϊόν μπορεί παραμορφωθεί, για αυτό πρέπει να χτίζονται και υποστηρίγματα παρά του ότι η ίδια η σκόνη το υποστηρίζει, στην Εικόνα 14 και Εικόνα 15 φαίνονται διατάξεις μερικής και πλήρους τήξης μεταλλικής σκόνης δια δέσμης laser (SLM) και ηλεκτρονίων (EBM).



Εικόνα 14: Βασική διάταξη συνένωσης σκόνης με δέσμη laser



Εικόνα 15: Βασική διάταξη συνένωσης σκόνης με δέσμη ηλεκτρονίων

2.3.6 Εναπόθεση με Κατευθυνόμενη Ενέργεια (Directed Energy Deposition)

Η προσθετική παραγωγή προϊόντων εφαρμόζοντας τη τεχνολογία εναπόθεσης υλικού με κατευθυνόμενη ενέργεια πραγματοποιείται εναποθέτοντας το κατεργαζόμενο κοκκώδες ή συρματοειδές υλικό και παράλληλα συνενώνοντάς το δια εστιασμένης θερμικής ενέργειας. Τα προϊόντα σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις απαιτούν μετεπεξεργασία αφού αυτά έχουν σε μεγάλο ή μικρό βαθμό τη βασική της τελικής τους μορφής. Τα κατεργαζόμενα υλικά μπορεί να είναι οποιαδήποτε σε μορφή σκόνης ή σύρματος και ικανά για τουλάχιστον μερική τήξη ώστε να συνενωθούν. Η ανάπτυξη μπορεί να λάβει χώρα διαστρωματικά (τουλάχιστον τρεις βαθμοί κινηματικής ελευθερίας) ή χωρικά (τουλάχιστον πέντε βαθμοί κινηματικής ελευθερίας).

Η τεχνολογία χρησιμοποιήθηκε αρχικά για επιστρώσεις και συμπλήρωση για επισκευές μηχανολογικών εξαρτημάτων και κυρίως μερών κινητήρων αεροσκαφών όπως πτερυγίων του στροβίλου και του συμπιεστή, ύστερα, ξεκίνησε η χρήση της για παραγωγή τρισδιάστατων προϊόντων. Η έρευνα και ανάπτυξη μηχανών αυτής της τεχνολογιών όπως και άλλων που μπορούν να κατεργαστούν και να μορφοποιήσουν μεταλλικά προϊόντα χρηματοδοτούνται έντονα από κρατικούς οργανισμούς και εταιρείες ενώ εταιρείες με αντικείμενο την αεροδιαστημική δείχνουν μεγάλο ενδιαφέρον.

Electron Beam Free Form Forming. Pre and Post Machining



Source: Nasa

Εικόνα 16: Προϊόν τεχνολογίας EBFFF της NASA και μετεπεξεργασία αφαίρεσης υλικού

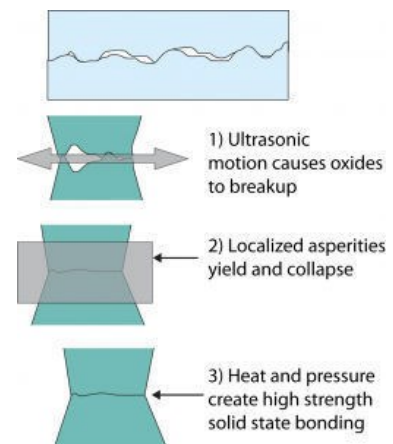
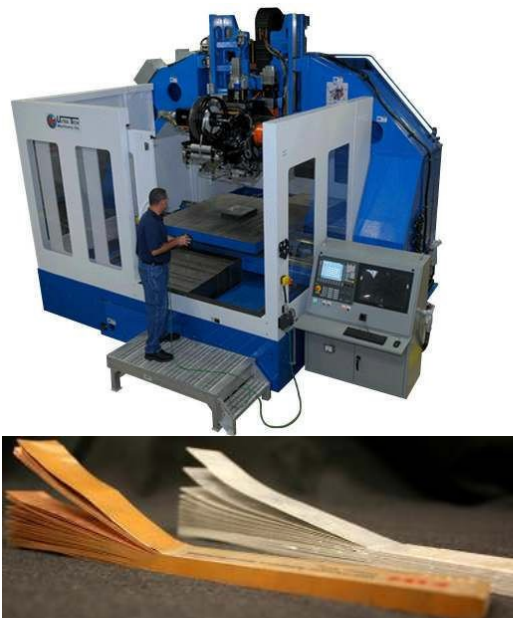
2.3.7 Διαστρωμάτωση Φύλλων (Sheet Lamination)

Η προσθετική παραγωγή προϊόντων εφαρμόζοντας τη τεχνολογία διαστρωμάτωσης φύλλων πραγματοποιείται συνενώνοντας επάλληλα και διαστρωματικά φύλλα από τα οποία έκαστο αντιστοιχεί σε μια διατομή του προς παραγωγή προϊόντος. Η διαστρωμάτωση μπορεί να πραγματοποιηθεί:

- Κόβοντας πρώτα τα κατεργαζόμενα φύλλα και έπειτα στοιβάζοντας και συνενώνοντάς τα επάλληλα διαστρωματικά. Τα φύλλα είναι ήδη μορφοποιημένα και απαιτούν μόνο στοίβαγμα.
- Στοιβάζοντας, συνενώνοντας και έπειτα κόβοντας τα κατεργαζόμενα φύλλα. Τα τμήματα των φύλλων που δεν θα αποτελέσουν το στρωσιγενές τελικό προϊόν, τα υποστηρίγματα δηλαδή, πρέπει με το πέρας της διαστρωμάτωσης να αφαιρούνται.

Η πρώτη περίπτωση μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε αυτόματα δια μηχανημάτων είτε χειροκίνητα ενώ τα κατεργαζόμενα υλικά μπορεί να είναι οποιαδήποτε ικανά για κοπή όπως χαρτί, πολυμερή, κεραμικά, μέταλλα και σύνθετα. Όσον αφορά τη δεύτερη περίπτωση, έχουν αναφερθεί διάφορα αυτόματα συστήματα για τη πραγματοποίηση της κατεργασίας.

Στην φαίνεται το τεχνολογίας Ultrasonic Consolidation μηχάνημα SonicLayer της Fabrisonic το οποίο λειτουργεί με συνένωση δια υπερηχητικών ταλαντώσεων (Ultrasonic Consolidation (UC)) και κοπής με κοπτικά εργαλεία. Τα φύλλα συνενώνονται διαστρωματικά με υπερηχητικά χτυπήματα μέσω ενός εργαλείου (sonotrode) και κόβονται περιοδικά με κοπτικό εργαλείο. Τα προϊόντα μπορεί να έχουν εσωτερικούς αυλούς, όπως επίσης να ενσωματώνονται και άλλα στοιχεία όπως ηλεκτρονικά.



Source:Fabrisonic

Εικόνα 17: Τεχνολογία Ultrasonic Consolidation και μηχάνημα SonicLayer της Fabrisonic

2.4 Εφαρμογές και περιορισμοί της Προσθετική Κατασκευής

Έως τώρα, η μορφοποίηση πολύπλοκων τρισδιάστατων στερεών αντικειμένων γίνεται κυρίως με τις τεχνολογίες κατεργασίας αφαίρεσης υλικού. Κάτα την κατεργασία, αφαιρείται σταδιακά και επιλεκτικά υλικό δια κοπτικών από ένα κομμάτι μεγαλύτερων διαστάσεων και μάζας. Έτσι, προκύπτει η τελική μορφή του προϊόντος. Από την άλλη η κατασκευή τρισδιάστατων αντικειμένων με προσθετική κατεργασία μορφοποιεί το εκάστοτε τρισδιάστατο αντικείμενο με πρόσθεση υλικού. Αυτό δίνει στις τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής τη δυνατότητα να μπορούν να δημιουργήσουν τρισδιάστατα αντικείμενα σύνθετης και πολύπλοκης γεωμετρίας. Οι τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής με την εμφάνιση τους κατέστησαν ταχύτερη την μέθοδο πρωτοτυποποίησης προϊόντων, ενώ με τη πάροδο του χρόνου και την ανάπτυξή τους βρίσκουν αρκετές εφαρμογές τόσο σε βιομηχανικό, παραγωγικό, επαγγελματικό επίπεδο όσο και σε προσωπικό, ερασιτεχνικό [27].

Οι τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής ωφελούν ένα ευρύ φάσμα τομέων όπως της αυτοκινητοβιομηχανίας, της ιατρική, της αεροδιαστημικής, των ακαδημαϊκών ιδρυμάτων, του στρατού, της αρχιτεκτονικής και πολλών άλλων. Έτσι, από την ταχεία πρωτοτυποποίηση οδεύει προς τη κατασκευή τελικών προϊόντων. Στην Εικόνα 18 παρατηρούμε την αύξηση του ποσοστού χρήσης των τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής έως το 2013 για κατασκευές τελικών προϊόντων.



Πηγή: Wohlers Report 2014

Εικόνα 18: Ποσοστά χρήσης μεθόδου για τελική κατασκευή

Μερικές αναφορές όσον αφορά την έμμεση παραγωγή τελικών προϊόντων είναι η κατασκευή μοντέλων για χρήση σε τεχνικές επενδεδυμένης χύτευσης για παραγωγή μεταλλικών προϊόντων, η κατασκευή καλουπιών και πυρήνων από άμμο για τη χύτευση μεταλλικών τμημάτων, η κατασκευή μόνιμων καλουπιών για πλήρωση πλαστικών η κατασκευή εργαλείων και βοηθημάτων παραγωγής και πολλά άλλα.

Παρά τα επαναστατικά αποτελέσματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης, εξακολουθεί να είναι μια αρκετά εξελισσόμενη τεχνολογία και έχει τα όριά της. Περιορισμοί που σχετίζονται κυρίως με ζητήματα όπως η διαστασιολογική ακρίβεια και η ποιότητα

επιφανείας τα παραγόμενα προϊόντα, τα οποία απαιτούν μετεπεξεργασία από συμβατικές μεθόδους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί τα μηχανήματα της εταιρίας Fabrisonic², η οποία ασχολείται με μηχανήματα συνένωσης φύλλων, κατασκευάζει υβριδικά μηχανήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης μαζί με CNC φρέζα. Ένα άλλο ζήτημα είναι το υψηλό κόστος αγοράς των προηγμένων συστημάτων καθώς και επίσης η αντικοινωνική και αργή μαζική παραγωγή [28].

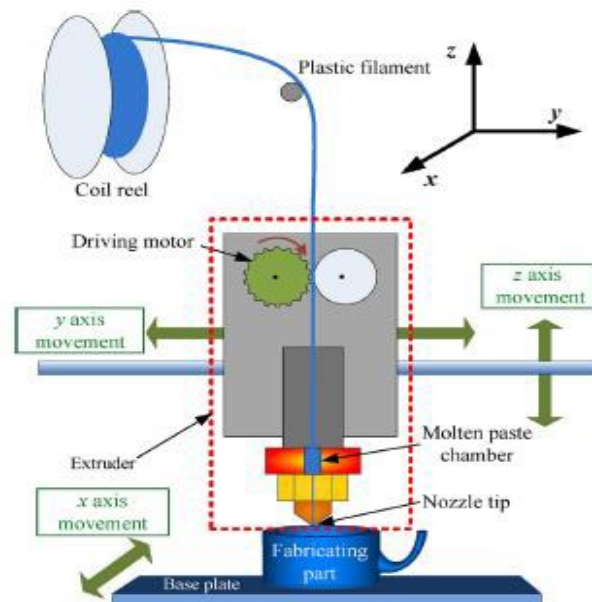
² <https://fabrisonic.com/>

3. Τεχνολογία εξώθησης υλικού - FDM

3.1 Ανάλυση λειτουργίας

Εκ των τεχνολογιών προσθετικής παραγωγής, η τεχνολογία εξώθησης υλικού (FDM) ανήκει σε αυτές των οποίων τα προϊόντα είναι λειτουργικά και ικανά να εργαστούν σε πραγματικό περιβάλλον. Επίσης, οι ιδιότητες των πλαστικών προϊόντων πλησιάζουν σε μεγάλο βαθμό τις ιδιότητες των αντίστοιχων παραγόμενων με συμβατικές βιομηχανικές μεθόδους, από την άλλη όμως, η ποιότητα επιφάνειας είναι φτωχότερη συγκριτικά με κάποιες άλλες τεχνολογίες της μεθόδου αλλά με κατάλληλες μετεπεξεργασίες βελτιώνεται (χημική προσβολή, λείανση, επίστρωση).

Στη τεχνολογία Fused Deposition Modelling (FDM), ή αλλιώς Fused Filament Fabrication (FFF), το κατεργαζόμενο υλικό βρίσκεται σε μορφή σύρματος τυλιγμένο σε καρούλι. Η βασική διάταξη των μηχανών εξώθησης τηγμένου υλικού (FDM machines) περιλαμβάνει τη κεφαλή εξώθησης, η οποία με κατάλληλη εσωτερική διάταξη (κυλίνδρων ή οδοντωτών τροχών) οδηγεί το συρμάτινο υλικό προς το θερμαινόμενο στόμιο το οποίο διαθέτει, όπου και φτάνει σε ημίρρευστη κατάσταση. Κινούμενη συνολικά η κεφαλή σε σχέση με τη κινούμενη πλατφόρμα κατεργασίας εξωθεί και εναποθέτει το ημίρρευστο υλικό. Το εναποτεθέν υλικό ονομάζεται 'δρόμος' (raster or road) το οποίο μετά τη εναπόθεση ψύχεται και στερεοποιείται. Το τελικό επιθυμητό αντικείμενο κατασκευάζεται με την ακριβή εναπόθεση λεπτών στρώσεων ημίρρευστου υλικού σε μια διαδικασία στρώσης με στρώση. Η σχετική κίνηση αυτών ορίζεται σύμφωνα με τον αριθμητικό έλεγχο CNC. Η συνηθέστερη κίνηση της κεφαλής είναι κατά τον x-y άξονα και της πλατφόρμας κατά τον z άξονα, ενώ αυτές τροποποιούνται ανάλογα το κατασκευαστή του μηχανήματος [29].



Εικόνα 19: Αρχή λειτουργίας FDM Εκτυπωτή [29]

Στις ιδιαιτερότητες της τεχνολογίας είναι η δυνατότητα κατασκευής σύνθετων γεωμετρικά αντικειμένων. Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο για την υποστήριξη της δυνατότητας απαιτείται χρήση υποστηρικμάτων (supports) τα οποία

μπορεί να προέρχονται από το ίδιο το υλικό κατασκευή ή από άλλο βοηθητικό υλικό. Τα υποστηρίγματα χρησιμοποιούνται για τη στήριξη των προεξέχουσων δομών και την διατήρηση της ακεραιότητάς του. Τα υποστηρίγματα μετά το πέρας της κατεργασίας αφαιρούνται.

Η τεχνολογία περιεγράφηκε από τον S.S Crump το 1989 ως ένα αυτόματο προγραμματιζόμενο τρι-αξονικό σύστημα διαστρωματικής εξώθησης και εναπόθεσης κατεργαζόμενων υλικών επί πλατφόρμας [30]. Το 1991 ο Crump ίδρυσε την εταιρεία Stratasys η οποία και ανέπτυξε το σχετικής τεχνολογίας μηχάνημα 3D Modeler, ενώ όλα τα μετέπειτα παραγόμενα μηχανήματα της εταιρείας βασίζονται στη τήξη και εξώθηση συρματοειδούς θερμοπλαστικού υλικού. Η τεχνολογία κατεργασίας ονομάστηκε Fused Deposition Modeling (FDM).

Το 2004 από το πανεπιστήμιο Bath του Ηνωμένου Βασιλείου, ο A. Bowyer ξεκίνησε την Open Source δράση Replication Rapid Prototyper Project (RepRap) με στόχο τη παροχή και διακίνηση πληροφοριών σχετικά με το σχεδιασμό και τη κατασκευή χαμηλού κόστους εκτυπωτών και λογισμικών. Η δράση αυτή πυροδότησε την ανάπτυξη της μεθόδου και την εμφάνιση πολλών εταιρειών κατασκευής μηχανημάτων [31].

Πλέον οι σχετικές πηγές πληροφόρησης (άρθρα, διπλώματα ευρεσιτεχνίας κ.α.) περί της τεχνολογίας εξώθησης υλικού (μηχανήματα, λειτουργία, έλεγχος, λογισμικά, κατεργαζόμενα υλικά) είναι πολλές, όπως επίσης οι σχετικές δράσεις λογισμικών και μηχανών (Open Source) δια των οποίων τα μέλη διαμοιράζουν ελεύθερα και ανοικτά τις γνώσεις, τα δημιουργήματά τους, έτσι κάθε μέλος ή χρήστης των διαμοιραζόμενων στοιχείων μπορεί να συνεισφέρει στο κοινωφελή σκοπό αναδραστικά, με αποτέλεσμα να επωφελούνται όλοι από αυτή τη δημιουργική, δημοκρατική και ελεύθερη διεργασία. Για παράδειγμα, η δράση RepRap έχει ως αντικείμενο την παροχή και διαμοίραση πληροφοριών σχετικά με την ανάπτυξη τρισδιάστατων εκτυπωτών κυρίως τεχνολογίας εξώθησης υλικού. Τα ηλεκτρονικά κυκλώματα όπως το ArduinoRaspberry Pi, BeagleBoard, Smoothieboard και CNC USB Controller μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο μηχανών κατεργασίας. Τα λογισμικά όπως το LinuxCNC και Printron, τα λογισμικά μετάφρασης του κώδικα ελέγχου (G-Code, M-Code) και προοριζόμενα για μικροελεγκτές όπως το Grbl και Marlin επιτρέπουν τον έλεγχο μηχανημάτων κατεργασίας και τρισδιάστατων εκτυπωτών. Τα διάσημα λειτουργικά συστήματα Linux και Android βασισμένα σε Unix μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο μηχανών και να λειτουργήσουν σε πλατφόρμες όπως το Raspberry Pi και BeagleBoard. Οι διαδικτυακοί ιστότοποι Thingiverse και Grabcad προσφέρουν τρισδιάστατα ψηφιακά μοντέλα τα οποία μπορούν να υλοποιηθούν δια της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

3.2 Υλικά κατεργασίας της τεχνολογίας FDM

Η τεχνολογία FDM εστιάζεται κυρίως στην εξώθηση θερμοπλαστικών (πολυμερή) υλικών κατεργασίας λόγω των χαρακτηριστικών τήξης τους. Τα θερμοπλαστικά υλικά μαλακώνουν σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών έως τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (glass transition temperature - Tg), σχηματίζοντας ένα υλικό με υψηλό ιξώδες ιδανικό για εξώθηση μέσω ακροφυσίου. Στις βασικές ιδιότητες των θερμοπλαστικών περιλαμβάνεται η θερμοκρασία τήξης (melting temperature – Tm), η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (glass transition temperature - Tg) και ο

συντελεστής θερμικής διαστολής (coefficient of thermal expansion - CTE). Η θερμοκρασία τήξης (Tm) επηρεάζει την θερμοκρασία που απαιτείται στο θερμαινόμενο στόμιο εξώθησης, ενώ η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης σε συνδυασμό με το συντελεστή θερμικής διαστολής σχετίζονται με το ποσό της θερμικής τάσης που δημιουργείται κατά την εκτύπωση το οποίο με τη σειρά του μπορεί να επηρεάσει την προσκόλληση του υλικού στη πλατφόρμα κατεργασίας [32].

Τα πιο δημοφιλέστερα θερμοπλαστικά υλικά είναι το πολύ-γαλακτικό οξύ (**polylactic acid - PLA**), το πολύ-ακρυλονιτρίλιο-βουταδιένιο-στυρόλιο (**ABS**), το τερεφθαλικό πολυπροπυλένιο (**polyethylene terephthalate - PET**), το πολυανθρακικό (**polycarbonate - PC**), η ελαστομερή θερμοπλαστική πολουρεθάνη (**thermoplastic polyurethane (TPU) elastomer**), το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (**high-density-polyethylene-HDPE**), το πολυστυρένιο υψηλής αντοχής (**high impact polystyrene - HIPS**) και το πολυαμίδιο ή νάιλον (**polyamide -PA, nylon**), υλικά με χαμηλές θερμικές και μηχανικές ιδιότητες ιδανικά ώστε να χρησιμοποιηθούν σε χαμηλού κόστους εμπορικούς εκτυπωτές άλλα μη ικανοποιητικά για χρήση σε βιομηχανικές εφαρμογές. Για πιο εξειδικευμένες εφαρμογές επιλέγονται θερμοπλαστικά υψηλής ποιότητας όπως πολύ-αιθεροκετόνη (PEEK) ή το πολύ-αιθεριμίδιο (PEI, ULTEM1000) τα οποία όμως απαιτούν θερμοκρασία τήξης μεγαλύτερη των 350°C, πράγμα επιτεύξιμο μόνο σε ειδικούς υψηλής θερμοκρασίας τρισδιάστατους εκτυπωτές. Στο Πίνακα 2 συνοψίζονται οι βασικές ιδιότητες των κοινών θερμοπλαστικών υλικών της τεχνολογίας FDM.

Πίνακας 2 Ιδιότητες υλικών κατεργασίας FDM [32]

Υλικά \ Ιδιότητες	PLA	ABS	PET	PC	TPU	HIPS	Nylon
Θερμοκρασία εξώθησης °C	180-220	220-240	230-255	270-315	230-260	220-230	270-315
Θερμοκρασία πλατφόρμας °C	20-55	80-110	55-70	90-120	40-60	50-60	90-120
CTE (μm/m-°C)	85	68-110	60-92	50-70	89-170	80-90	50-70
Tg (°C)	60-65	105-110	70-78	145-150	-35	100	145-150

Η βελτίωση των ιδιοτήτων των κοινών θερμοπλαστικών επιτεύχθηκε με την προσθήκη ινών ενίσχυσης δευτέρου υλικού σε αυτά. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι ινών ενίσχυσης είναι η ενίσχυση με ίνες άνθρακα (carbon fibre-CF), με ίνες γυαλιού (glass fibre -GF) και με ίνες Kevlar (Kevlar fibre- KF).

3.3 Παράμετροι ελέγχου κατεργασίας της τεχνολογίας FDM

Η ποιότητα ενός τελικού εξαρτήματος που κατασκευάζεται με τη μέθοδο FDM εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις επιλεγμένες παραμέτρους ελέγχου κατεργασίας. Η φύση της διεργασίας με την εναπόθεση ημίρρευστου θερμοπλαστικού υλικού καθιστά τα τελικά αντικείμενα ανισοτροπικά. Γενικά οι παράμετροι που έχουν επιρροή σε όλη τη διεργασία ταξινομούνται ως παράμετροι σχεδιασμού, περιβαλλοντικοί παράμετροι,

παράμετροι υλικού και παράμετροι ελέγχου κατεργασίας. Εξ' αυτών συγκεκριμένα οι παράμετροι ελέγχου της κατεργασίας παρουσιάζουν μεγαλύτερη επιρροή στη διεργασία εκτύπωσης και στο τελικό αποτέλεσμα, συγκριτικά με του υπόλοιπους, καθώς επηρεάζουν άμεσα την καλή σύντηξη μεταξύ των εναποθέσεων, την μείωση των κενών υλικού κ.α.. Επιπλέον τα σφάλματα που δημιουργούνται εξ αυτών των παραμέτρων έχουν σημαντική επίδραση στα χαρακτηριστικά και τη ποιότητα του τελικού αντικειμένου. Έτσι, με τη ενδελεχή μελέτη τους μπορεί να επιτευχθεί καλής ποιότητας προϊόντα. Παρακάτω παρουσιάζονται οι παράμετροι κατεργασίας βάση της σειράς διαχείρισης τους [33]:

➤ **Προσανατολισμός κατασκευής (Build orientation).**

Σχετίζεται με τον τρόπο με τον οποίο το προς κατασκευή αντικείμενο είναι προσαρμοσμένο επί της πλατφόρμας κατεργασίας ως προς τους τρεις κύριους άξονες x, y, z. Αυτή η παράμετρος αποτελεί ιδιαίτερα σημαντική για όλο το σχεδιασμό της κατεργασίας καθώς καθορίζει την ύπαρξη υποστηριγμάτων, τον αριθμό των τεμαχισμών που θα γίνουν, τη διαδρομή της κεφαλής.

➤ **Ύψος διαστρωμάτωσης ή πάχος διαστρωμάτωσης (Layer height or Layer thickness).**

Αφορά το ύψος της στρώσης υλικού που εναποτίθεται από το στόμιο, σε ένα πλήρης κύκλο λειτουργίας κατά το κατακόρυφο επίπεδο. Το ύψος αυτό βασίζεται στο τύπο του ακροφυσίου που χρησιμοποιείται, και είναι πάντοτε μικρότερο από τη διάμετρο του ακροφυσίου.

➤ **Αριθμός περιγραμμάτων και Πλάτος περιγράμματος (Number of walls and Wall width).**

Αναφέρεται, αριθμό των εξωτερικών τοιχωμάτων που επιλέγεται να κατασκευαστούν καθώς και στο πλάτος του εναποτεθέν υλικού (road) των εξωτερικών τοιχωμάτων. Το πλάτος μπορεί να είναι ίσο, μικρότερο ή μεγαλύτερο από τη διάμετρο του στομίου εξώθησης και μπορεί να ελέγχεται με τη ρύθμιση της παροχής εξώθησης υλικού.

➤ **Αριθμός άνω-κάτω συμπαγών στρώσεων (Top-bottom solid layers).**

Πόσα θα είναι τα συμπαγή στρώματα ανάμεσα στα οποία βρίσκονται μη συμπαγή στρώματα τα οποία θα πληρωθούν με κάποια πυκνότητα

➤ **Μοτίβο πλήρωσης (Infill pattern).**

Ανάγεται στον τύπο πλήρωσης που χρησιμοποιείται για την εσωτερική δομή. Υπάρχουν πολλά διαθέσιμα μοτίβα πλήρωσης όπως γραμμικό, διαγώνιο, ορθογωνικό, τριγωνικό, εξαγωνικό, διαμαντοειδές, κυψελοειδές κ.α..

➤ **Πυκνότητα πλήρωσης (Infill density).**

Η πυκνότητα πλήρωσης υποδηλώνει τον όγκο υλικού που εκτυπώνεται στο εσωτερικό κάθε στρώσης. Η πυκνότητα λαμβάνει τιμές από 0% (κοίλο) έως 100% (όχι πλήρως συμπαγής).

➤ **Κατεύθυνση πλήρωσης (Raster angle).**

Δηλώνει την γωνία εναπόθεσης υλικού κατά μήκος της περιοχής κατασκευής ως προς το x – άξονα. Η γωνία αυτή μπορεί να μεταβάλλεται από 0 έως 90 μοίρες και να είναι σταθερή ή εναλλάξιμη.

➤ **Πλάτος πλήρωσης (Raster width).**

Είναι το πλάτος εναπόθεσης υλικού που χρησιμοποιείται για την πλήρωση εσωτερικών περιοχών του προς κατασκευή αντικειμένου. Το πάχος αυτό επηρεάζεται από τη διάμετρο του ακροφυσίου και όμοια μπορεί να ελέγχεται με τη ρύθμιση της παροχής εξώθησης υλικού.

➤ **Διάκενο ή κενό αέρος (Air gap).**

Αντιπροσωπεύει το εσωτερικό κενό δομής μεταξύ δύο γειτονικών εναποθέσεων στην ίδια στρώση. Το κενό αέρος μπορεί να λάβει μηδενική τιμή, θετική ή αρνητική τιμή. Στη περίπτωση του μηδενικού κενού αέρος οι γειτονικές εναποθέσεις είναι σε απλή επαφή μεταξύ τους. Στη θετική τιμή του κενού αέρος οι γειτονικές εναποθέσεις χωρίζονται μεταξύ τους με αποτέλεσμα τη πιο χαλαρή δομή. Στη αρνητική τιμή κενού αέρος οι γειτονικές εναποθέσεις καταλαμβάνουν σχεδόν την ίδια θέση με αποτέλεσμα την πιο πυκνή δομή. Το διάκενο δε μπορεί να προσδιοριστεί πρακτικά και συνεπώς η πραγματική πυκνότητα ποικίλλει ανά μηχανήμα και λογισμικό.

➤ **Ταχύτητα εκτύπωσης & ταχύτητα εξώθησης (Printing speed & Extrusion speed).**

Η ταχύτητα κεφαλής εκτύπωσης αφορά την ταχύτητα κίνησης της κεφαλής όταν αυτή εναποθέτει υλικό επί της πλατφόρμας, ενώ η ταχύτητα εξώθησης αντιστοιχεί στο ρυθμό εξώθησης με το οποίο το ακροφύσιο εναποθέτει το κατεργαζόμενο υλικό.

➤ **Θερμοκρασία εξώθησης & Θερμοκρασία πλατφόρμας (Extrusion temperature & Building platform temperature).**

Η θερμοκρασία εξώθησης σχετίζεται με τη θερμοκρασία που διατηρείται εντός του θερμαινόμενου ακροφυσίου και επηρεάζει το ιξώδες του υλικού που χρησιμοποιείται. Η σωστή ρύθμιση της θερμοκρασίας της πλατφόρμας είναι απαραίτητη για την αποφυγή σφαλμάτων από τυχόν απότομη στερεοποίηση ή εισχώρηση υγρασίας κατά τη διεργασία.

➤ **Διάμετρος ακροφυσίου (Nozzle diameter)**

Η διάμετρος του ακροφυσίου έχει σημαντική επίδραση στο πάχος του εναποτεθέν υλικού, καθώς επηρεάζει άμεσα την πτώση πίεσης κατά μήκος του στομιού.

➤ **Μήκος αναρρόφησης (Retraction length or Retraction distance).**

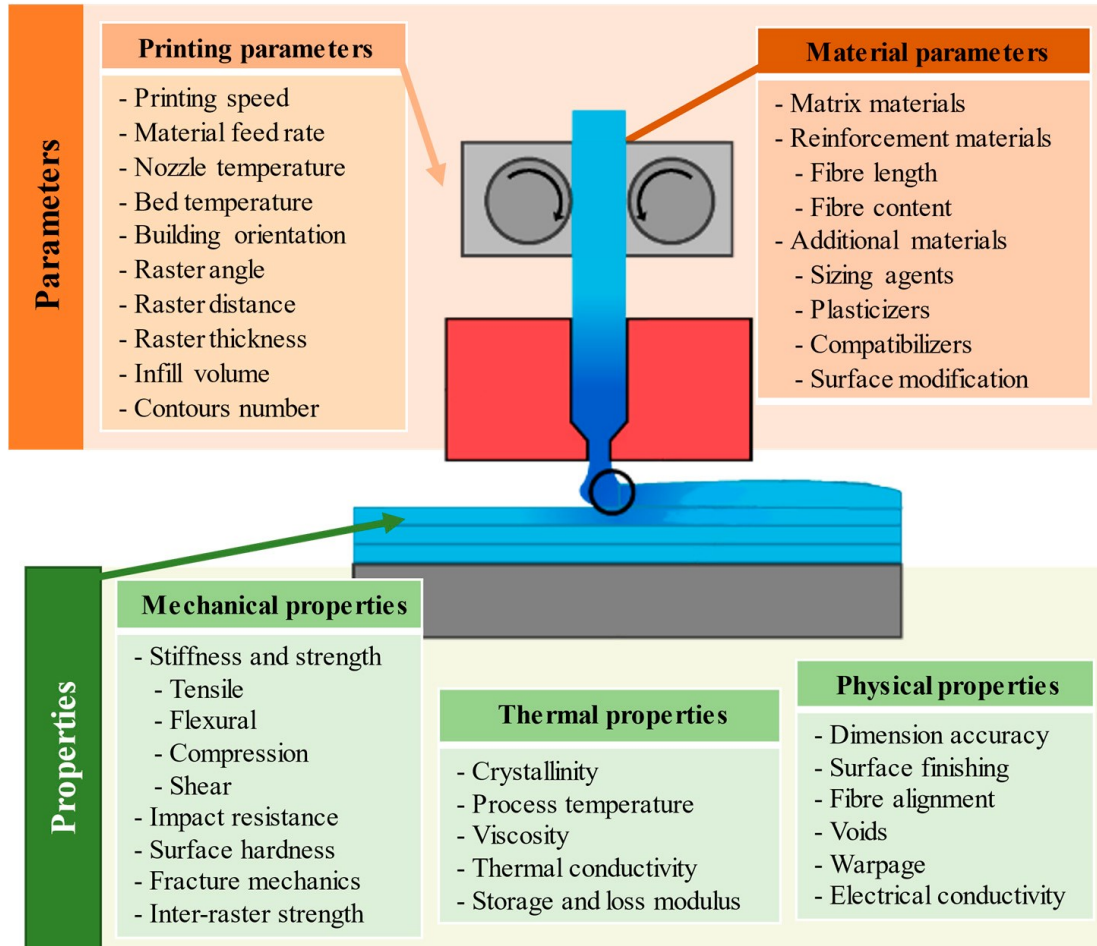
Η παράμετρος αυτή καθορίζει το μήκος του νήματος το οποίο εξωθείται από το ακροφύσιο, και πρέπει να ρυθμίζεται με ακρίβεια ώστε να αποφεύγονται τυχόν σφάλματα κατά την εκτύπωση.

➤ **Περιβάλλον εργασίας (Work environment).**

Το περιβάλλον στο οποίο γίνεται μία διεργασία FDM είναι συνήθως οι συνθήκες περιβάλλοντος, ωστόσο έρευνες έχουν αποδείξει ότι ένα ειδικό περιβάλλον εργασίας

επηρεάζει τα χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος. Το ειδικό περιβάλλον εργασίας περιλαμβάνει ελεγχόμενη ψύξη του εξωθούμενου υλικού συνήθως με ανεμιστήρα.

Στη παρακάτω εικόνα «Εικόνα 20» παρουσιάζονται συγκεντρωμένα οι παράμετροι και οι ιδιότητες των τελικών προϊόντων της τεχνολογίας FDM.



Εικόνα 20: Παράμετροι και Ιδιότητες της Τεχνολογίας FDM

3.4 Χαρακτηριστικά προϊόντων της τεχνολογίας FDM

Προκειμένου τα τελικά παραγόμενα προϊόντα της τεχνολογίας FDM να είναι αποδεκτά ώστε να χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές εφαρμογές, θα πρέπει αυτά να διαθέτουν κάποια χαρακτηριστικά. Τα χαρακτηριστικά που κυρίως λαμβάνονται υπόψιν στα παραγόμενα προϊόντα της τεχνολογίας FDM, είναι η διαστασιολογική ακρίβεια (dimensional accuracy), η επιφανειακή τραχύτητα (surface roughness) και η μηχανική συμπεριφορά (mechanical behavior). Οι παράμετροι που αναφέρθηκαν παραπάνω έχουν έμμεση ή άμεση επιρροή στα χαρακτηριστικά αυτά, πράγμα που καθιστά την περαιτέρω έρευνά τους αναγκαία.

▪ Διαστασιολογική ακρίβεια (Dimensional Accuracy)

Τα παραγόμενα προϊόντα της τεχνολογίας FDM υστερούν σε διαστασιολογική ακρίβεια σε σύγκριση με άλλες μεθόδους Προσθετικής κατασκευής όπως της τεχνολογίας του φωτοπολυμερισμού ή της συνένωσης σκόνης. Στη τεχνολογία FDM, οι παράμετροι

ελέγχου της κατεργασίας είναι αυτές που μπορούν να επηρεάσουν την ακρίβεια των διαστάσεων σε μεγάλο βαθμό. Οι βέλτιστες ρυθμίσεις των παραμέτρων αυτών είναι ζωτικής σημασίας για την διαστασιολογική ακρίβεια των παραγόμενων αντικειμένων.

Αρκετές είναι οι προσπάθειες που έχουν γίνει για την βελτίωση της διαστασιολογικής ακρίβειας μέσω προσαρμογής των παραμέτρων ελέγχου κατεργασίας. Οι Sood et al [34] μελέτησαν την επιρροή των παραμέτρων κατεργασίας στη διαστασιολογική ακρίβεια χρησιμοποιώντας μεθόδους βελτιστοποίησης. Το συμπέρασμα στο οποίο κατέληξαν είναι ότι δύσκολο να επιτευχθεί βέλτιστη επιλογή παραμέτρων που θα αποδώσει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Παρόμοια και στις δημοσιεύσεις [35], [36] δεν μπόρεσα να δώσουν μια απάντηση από την άποψη της συνολικής λύσης σε αυτό το πρόβλημα. Οι κινήσεις επιτάχυνσης/ επιβράδυνσης της κεφαλής κατά τη διάρκεια της εναπόθεσης έχουν μεγάλη επίδραση σύμφωνα με τους Agarwala et al [37], όπου αυτό μπορεί να προσαρμοστεί ελέγχοντας τη τροφοδοσία του υλικού.

Οι Azhikannickal & Uhrin [38] μελέτησαν διαστασιολογική ακρίβεια δοκιμίων ABS εξετάζοντας τις παραμέτρους μοτίβο πλήρωσης, πυκνότητα πλήρωσης και αριθμό περιγραμμάτων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η παράμετρος του μοτίβου πλήρωσης απέδωσε το λιγότερο σφάλμα. Οι Oguzhan Emre Akbas et al. [39] την επιρροή της θερμοκρασίας ακροφυσίου καθώς και τη τροφοδοσία υλικό για δοκίμια κατασκευασμένα από ABS και PLA. Η ταχύτητα τροφοδοσίας έδειξε την μεγαλύτερη επιρροή στα διαστασιολογική ακρίβεια. Οι M. Vishwas et al [40] αναφέρουν ότι η επίδραση του πάχους διαστρωμάτωσης συμβάλει στο 85% της ακρίβειας του εκτυπωμένου αντικειμένου σε σύγκριση με άλλες παραμέτρους. Οι T. Nancharaiiah et al [41] ομοίως αναφέρουν την άμεση συσχέτιση μεταξύ πάχους διαστρωμάτωσης και διαστασιολογικής ακρίβειας. Οι Moza Z et al. [42] με τα πειράματα τους υπέδειξαν ότι η διαστασιολογική ακρίβεια στο επίπεδο XY επηρεάζεται κυρίως από το υλικό εκτύπωσης σε ποσοστό (39.9%), ακολουθεί η πυκνότητα πλήρωσης (23.9%), ο αριθμός περιγραμμάτων (22.5%) και το πάχος διαστρωμάτωσης (13.7%).

Η θερμοκρασία εξώθησης δείχνει να είναι ένας σημαντικός παράγοντας επιρροής της διαστασιολογικής ακρίβειας καθώς από τη μία εάν η θερμοκρασία είναι πολύ χαμηλή, το υλικό θα έχει υψηλό ιξώδες και θα είναι δύσκολο να εξωθηθεί, από την άλλη εάν η θερμοκρασία είναι υψηλή το υλικό θα είναι αρκετά ρευστό. Παρόλα αυτά η θερμοκρασία εξώθησης σύμφωνα με αρκετές μελέτες [43], [44], δείχνει να μην έχει τόσο σημαντική επιρροή στη διαστασιολογική ακρίβεια αλλά επηρεάζει σημαντικά την επιφανειακή τραχύτητα. Από την άλλη οι Valerga et al [45] εξετάζοντας τους παραμέτρους ελέγχου κατεργασίας και τα χαρακτηριστικά των υλικών διαπίστωσαν ότι η θερμοκρασία εξώθησης είναι η πιο σημαντική παράμετρος ενώ εξίσου σημαντική είναι η ποιότητα του υλικού και η περιβαλλοντική υγρασία όπου αυτό θα αποθηκευτεί. Οι Dey and Yodo [46] εξετάζοντας την διαστασιολογική ακρίβεια κατέληξαν στο ότι το χαμηλό πάχος διαστρωμάτωσης, ο μικρός αριθμός εξωτερικών περιγραμμάτων και η χαμηλή θερμοκρασία εξώθησης δώσαν την καλύτερη διαστασιολογική ακρίβεια στα πειράματά τους.

Οι Sudin et al. [47] ισχυρίζονται ότι οι ανοχές των μηχανημάτων FDM έχουν την σημαντικότερη επιρροή στις διαστασιολογική ακρίβεια των τελικών προϊόντων. Οι

Alafaghani et al. [48] εξέτασαν την επιρροή έξι (6) παραμέτρων κατεργασίας (προσανατολισμός κατασκευής, ποσοστό πλήρωσης, ταχύτητα εκτύπωσης, θερμοκρασία εξώθησης, πάχος διαστρωμάτωσης και μοτίβο πλήρωσης) σε διαστασιολογική ακρίβεια και μηχανική συμπεριφορά. Χρησιμοποίησε έναν L_{18} πίνακα πειραμάτων και κατέληξε με την σειρά επιρροής ως εξής: προσανατολισμός κατασκευής, θερμοκρασία εξώθησης, πάχος διαστρωμάτωσης και έπειτα ποσοστό πλήρωσης, μοτίβο πλήρωσης και ταχύτητα εκτύπωσης. Οι Alafaghani and Qattawi [49] πάλι έδειξαν ότι οι χαμηλές τιμές σε θερμοκρασία εξώθησης, πάχος διαστρωμάτωσης και ποσοστό πλήρωσης με εξαγωγικό μοτίβο πλήρωσης είναι απαιτούμενα για καλή διαστασιολογική ακρίβεια, από την άλλη για να αυξηθεί η αντοχή των αντικειμένων η αυξημένη θερμοκρασία εξώθησης, το βέλτιστο πάχος διαστρωμάτωσης, το τριγωνικό μοτίβο πλήρωσης και το υψηλό ποσοστό πλήρωσης είναι απαιτούμενα.

▪ Επιφανειακή τραχύτητα (Surface Roughness)

Η επιφανειακή τραχύτητα είναι ένα εξίσου σημαντικό χαρακτηριστικό το οποίο μπορεί να κρίνει ποιότητα ενός προϊόντος και πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν. Οι Turner and Gold [50] μελέτησαν την επιφανειακή τραχύτητα και διαστασιολογική ακρίβεια των παραγόμενων αντικειμένων. Βρήκαν ότι η ικανότητα ρύθμισης της ροής τροφοδοσίας υλικού προς το στόμιο βελτιώνει σημαντικά την επιφανειακή τραχύτητα καθώς και τις διαστάσεις. Οι Sandhu et al. [51] εξέτασαν την επίδραση του πάχους διαστρωμάτωσης (0.16mm, 0.2mm, 0.28mm), της κατεύθυνσης πλήρωσης (30°, 45°, 60°) και του μοτίβου πλήρωσης ως προς την επιφανειακή τραχύτητα. Ο συνδυασμός του πάχους διαστρωμάτωσης στο 0.16mm, της κατεύθυνσης πλήρωσης στις 60° και κυβικού (cubic) μοτίβου πλήρωσης έδωσε το καλύτερο αποτέλεσμα.

Οι S. Dinesh Kumar et al. [52] ομοίως εξέτασαν πειραματικά τους παραμέτρους κατεργασίας (πάχος διαστρωμάτωσης, πάχος πλήρωσης, κατεύθυνση πλήρωσης, αριθμός εξωτερικών περιγραμμάτων και διάκενο) ως προς την επιφανειακή τραχύτητα. Κατέληξαν ότι τα επιφανειακά σφάλματα μειώνονται χρησιμοποιώντας χαμηλό πάχος διαστρωμάτωσης, αρνητική τιμή κενού αέρος ανάμεσα στις εναποθέσεις και χαμηλό πάχος πλήρωσης. Επίσης τόνισαν την σημασία αποφυγής χρήσης υποστηριγμάτων για την βελτίωση της επιφανειακής τραχύτητας. Οι R. Anitha et al [53] μελέτησαν την επίδραση τριών παραμέτρων ελέγχου (πάχος διαστρωμάτωσης, ταχύτητα εναπόθεσης και πάχος πλήρωσης) ως προς την επιφανειακή τραχύτητα σε δοκίμια από ABS. Βρήκαν ότι η επιφανειακή τραχύτητα επηρεάζεται σημαντικά από το πάχος διαστρωμάτωσης. Οι K. Thrimurthulu et al. [54] βελτιστοποίησαν την παράμετρο του προσανατολισμού κατασκευής για να επιτύχουν μείωση του χρόνου κατασκευής και βελτίωση της επιφανειακής τραχύτητας.

Οι D Chaidas et al [55] ερεύνησαν την επίδραση της θερμοκρασίας εξώθησης σε συνδυασμό με το πάχος των εξωτερικών περιγραμμάτων ως προς την επιφανειακή τραχύτητα σε δοκίμια PLA. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η άυξηση της θερμοκρασίας εξώθησης μειώνει τα επιφανειακά σφάλματα. Οι I.T. Christodoulou et al [56] μελέτησαν την επιφανειακή τραχύτητα κατά ISO ASTM 52902-2021 σε δοκίμια από υλικό PLA χρησιμοποιώντας έναν κοινό εμπορικό εκτυπωτή χαμηλού κόστους, όπου και συμπέραναν ότι οι κοινοί χαμηλού κόστους εκτυπωτές δε μπορούν να κατασκευάσουν καλής επιφανειακής τραχύτητας αντικείμενα λόγω της χαμηλής ποιότητας σε λογισμικό και μηχανήματα.

▪ Μηχανική συμπεριφορά (Mechanical Behavior)

Η μηχανική συμπεριφορά σχετίζεται με ορισμένες μηχανικές ιδιότητες όπως αντοχή σε εφελκυσμό, θλίψη, κάμψη, κρούση, κόπωση κ.α.. Υπάρχουν πολλά δημοσιευμένα άρθρα σχετικά με την αξιολόγηση παραμέτρων που επηρεάζουν της μηχανικές ιδιότητες των παραγόμενων προϊόντων.

Ο προσανατολισμός εκτύπωσης επιδρά σημαντικά στη μεταβολή της δομής του αντικειμένου που θα κατασκευαστεί καθώς μεταβάλλει τον αριθμό των τεμαχισμών που απαιτούνται για τη κατασκευή του. Κατά συνέπεια και οι μηχανικές ιδιότητες επηρεάζονται από τον προσανατολισμό κατασκευής του αντικειμένου. Αρκετοί ερευνητές όπως στις δημοσιεύσεις [57] , [58], [59] εξέτασαν την παράμετρο του προσανατολισμού κατασκευής σε δοκίμια εφελκυσμού. Συμμεριζόμενοι πως ο αριθμός των στρώσεων εξαρτάται σημαντικά από τον προσανατολισμό παρατήρησαν ότι η αύξηση του αριθμού των στρώσεων εναπόθεσης οδηγεί στη συσσώρευση τάσεων. Έτσι, κατέληξαν ότι ο οριζόντιος προσανατολισμός παρουσίασε την καλύτερη μηχανική αντοχή. Ο Raut, S. et al [60] ερεύνησε την επίδραση του προσανατολισμού κατασκευής στις μηχανικές ιδιότητες και στο συνολικό κόστος των παραγόμενων προϊόντων από την FDM τεχνολογία. Ως προς τις μηχανικές ιδιότητες εξέτασαν τη βελτιστοποίηση της παραμέτρου ως προς την αντοχή σε εφελκυσμό και κάμψη χρησιμοποιώντας ABS υλικό. Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM σε τρεις διαφορετικούς προσανατολισμούς (0°, 45°, 90°) στους τρεις άξονες σε διάταξη όπου η μεγαλύτερη επιφάνεια του δοκιμίου ήταν παράλληλη στον άξονα περιστροφής. Στη διάταξη του δοκιμίου στο γ-άξονα σε 0° προσανατολισμό παρουσίασε την καλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό, ενώ η αντίστοιχη διάταξη κατά το x-άξονα εμφάνισε την καλύτερη αντοχή σε κάμψη.

Η διαμόρφωση του πάχους διαστρωμάτωσης έχει αποδειχθεί ότι αλληλοεπιδρά στη δημιουργία δυνατών εσωτερικών δεσμών και την αντίστοιχη μείωση των διακένων. Οι Kadir Günaydin & Halit Süleyman Türkmén [61] ερεύνησαν την επιρροή του πάχους διαστρωμάτωσης όσον αφορά την αντοχή σε εφελκυσμό. Το προ εξέταση υλικό ήταν ABS και τα πάχη που επέλεξαν ήταν 0.09, 0.14, 0.19, 0.29, 0.39 mm. Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων παρατήρησαν μη γραμμική συμπεριφορά, ενώ η μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό ήταν σε 0,29mm πάχος διαστρωμάτωσης. Ομοίως οι Siti Maryam Md Nor et al. [62] εξέτασαν την επίδραση του πάχους διαστρωμάτωση στον εφελκυσμό για τα υλικά ABS και Carbon fiber reinforce A [63]BS, όπου επέλεξαν τα πάχη 0.18, 0.25, 0.31. Αυτό που προέκυψε ήταν ότι για το ABS η αύξηση του πάχους επέφερε μείωση της αντοχής σε εφελκυσμό, ενώ για το CF-ABS παρουσίασε μια σταθερή συμπεριφορά. Παρομοίως οι Dr. Tahseen Fadhil Abbas et al. [64] αναφέρονται στην επίδραση του πάχους διαστρωμάτωσης σε αντοχή εφελκυσμού για δοκίμια PLA, όπου παρατήρησαν ότι η μείωση του πάχους διαστρωμάτωσης οδηγεί στην αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό.

Η κατασκευή εξωτερικών περιγραμμάτων ή αλλιώς εξωτερικών τοιχωμάτων μειώνει την συγκέντρωση τάσεων στα σημεία μεταβολής της διατομής. Οι Crocchio et al. [65] εργάστηκαν πάνω σε ABS-M30 υλικό εξετάζοντας την επιρροή του αριθμού των περιγραμμάτων στις μηχανικές ιδιότητες, όπως αντοχή σε εφελκυσμό, σε κάμψη καθώς και το μέτρο ελαστικότητας, τόσο πειραματικά όσο και με αναλυτική μοντελοποίηση. Πειραματικά κατασκεύασαν τέσσερις τύπους δοκιμίων μεταβάλλοντας τον αριθμό των

εξωτερικών περιγραμμάτων, ο τύπος 1 είχε ένα εξωτερικό περίγραμμα, ο 2 τέσσερα εξωτερικά περιγράμματα, ο 3 επτά και ο 4 δέκα. Παρατηρήθηκε ότι η αύξηση του αριθμού των περιγραμμάτων επέφερε καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Επίσης, οι Ahn et al. [66] επισήμαναν την σημαντικότητα των εξωτερικών περιγραμμάτων, τονίζοντας η κατασκευή πολλαπλών περιγραμμάτων βελτιώνει την ανισοτροπία υλικού και αποτρέπει την έναρξη ρωγμών σε περιοχή εκτός της στένωσης του δοκιμίου εφελκυσμού. Επιπλέον, πρότειναν ότι το πλάτος εναπόθεσης των τοιχωμάτων θα πρέπει να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του πλάτους εσωτερικής πλήρωσης.

Η διαμόρφωση της εσωτερικής δομής του αντικειμένου καθορίζει εξίσου τις μηχανικές ιδιότητες. Η εσωτερική διαμόρφωση σχετίζεται από την επιλογή του στυλ ή μοτίβου πλήρωσης καθώς και του όγκου υλικού πλήρωσης. Για το γραμμικό μοτίβο (Linear pattern) σημαντική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες έχει η κατεύθυνση πλήρωσης (raster angle), η πυκνότητα πλήρωσης, το πλάτος πλήρωσης (raster width), και το διάκενο (air gap) μεταξύ γειτονικών εναποθέσεων. Οι Es-Said et al. [67] ανέλυσαν την επιρροή της κατεύθυνσης εναπόθεσης σχετικά με την αντοχή σε εφελκυσμό, κάμψη και κρούση. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν το ABS, ενώ κατευθύνσεις που εξετάστηκαν ήταν οι 0°, 45°, και 90°. Η καλύτερη αντοχή εφελκυσμού και κάμψης παρουσιάστηκε στις 0° γωνία εναπόθεσης. Καταλήγοντας, επισήμαναν την ογκομετρική συρρίκνωση που λαμβάνει χώρα εξαιτίας της αλλαγής φάσης (ρευστοποίηση-στερεοποίηση), δημιουργώντας ασθενής εσωτερικούς δεσμούς. Οι Lanzotti et al. [68] επίσης ερεύντησαν την επιρροή των παραμέτρων όπως πάχος διαστρωμάτωσης, κατεύθυνση πλήρωσης και αριθμό περιγραμμάτων σε δοκίμια PLA. Αυτό που παρατηρήθηκε ήταν ότι η αύξηση της γωνία εναπόθεσης μείωνε τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων. Οι Sung-Hoon Ahn et al. [69] εξέτασαν την επιρροή του διακένου μεταβάλλοντας το πλάτος εναπόθεσης και τη κατεύθυνση εναπόθεσης. Κατά την αξονική εναπόθεση η μείωση του διακένου οδήγησε σε μικρή αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό, ενώ στις άλλες κατευθύνσεις παρουσίασε μεγάλη αύξηση. Από την άλλη, οι Sood et al [70] εξέτασαν πειραματικά την επίδραση παραμέτρων όπως κατεύθυνση πλήρωσης, πάχος πλήρωσης και διάκενο, χρησιμοποιώντας ABS υλικό. Τα συμπεράσματα στα οποία οδηγήθηκαν ήταν ότι οι μικρές γωνίες εναπόθεσης δεν προτείνονται διότι παράγουν μακριές εναποθέσεις με συνέπεια τη δημιουργία τάσεων κατά μήκος της εναπόθεσης το οποίο οδηγεί σε στρεβλώσεις καθώς και σε αδύναμους δεσμούς μεταξύ γειτονικών εναποθέσεων. Το ίδιο συμβαίνει και κατά την πλήρωση λεπτών εναποθέσεων κατά το πλάτος του αντικειμένου.

Η διασταυρούμενη εναλλαγή στρώσεων (Criss-cross meshing) υπό μία συγκεκριμένη γωνία αποτελεί μια εξέλιξη του απλού γραμμικού μοτίβου όπου παρατηρείται η ικανότητα κατανομής των τάσεων. Οι L. Baich et al [71] πειραματίστηκαν με τέσσερα διαφορετικά στυλ γεμίσματος συμπεριλαμβάνοντας το απλό γραμμικό στυλ με μηδενική και θετική τιμή διακένου, το διασταυρούμενο γραμμικό με θετική τιμή διακένου και το αντίστοιχο πλήρως συμπαγής. Εκτελώντας τα αντίστοιχα πειράματα κατέληξαν στο ότι το πιο συμπαγές στυλ γεμίσματος έδωσε τη καλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό, θλίψη και κάμψη. Οι Dawoud et al [72] αξιολόγησαν τη μηχανική συμπεριφορά του ABS υλικού σε δοκίμια υλικού κατασκευασμένα μέσω τεχνολογίας FDM και τα σύγκρινε με αντίστοιχα κατασκευασμένα μέσω τεχνικών χύτευσης μέσω έγχυσης. Οι παράμετροι που έλαβε υπόψιν στη τρισδιάστατη εκτύπωση ήταν οι διαφορετικές γωνίες των διασταυρούμενων στρώσεων καθώς και του θετικού και

αρνητικού κενού αέρος. Οι γωνίες που εξέτασε είναι $0^\circ/90^\circ$, $30^\circ/-60^\circ$, $45^\circ/-45^\circ$, $75^\circ/-75^\circ$ και τιμές κενού $\pm 0,05\text{mm}$. Τα χαρακτηριστικά που έλαβε υπόψιν ήταν η πυκνότητα υλικού των δοκιμών, αντοχή σε εφελκυσμό, κάμψη και κρούση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι χρησιμοποιώντας αρνητικές τιμές κενού η πυκνότητα έφτασε στο 98% του αντίστοιχου χυτού με έγχυση. Η αντίστοιχη δοκιμή εφελκυσμού έδειξε την επίδραση τόσο της συνολικής διεργασίας όσο και των αντίστοιχων παραμέτρων, όπου μέγιστη αντοχή εφελκυσμού στα 34.3 MPa παρουσίασε η $45^\circ/-45^\circ$ γωνία διασταύρωσης έναντι των 37.7 MPa του χυτού.

Πέραν των εσωτερικών διαμορφώσεων που αναφέρθηκαν, υπάρχουν πληθώρα στυλ γεμίσματος τα οποία δεν έχουν εξεταστεί και μπορεί να έχουν σημαντική επιρροή στις μηχανικές ιδιότητες. Οι Osman et al [73] διενήργησε πειραματική έρευνα για να αξιολογήσει τις μηχανικές ιδιότητες, εφελκυσμού και θλίψης, συναρτήσει των ποικίλων μοτίβων γεμίσματος. Το κυψελοειδές μοτίβο γεμίσματος έδειξε την καλύτερη μηχανική συμπεριφορά συγκρινόμενο με το αντίστοιχο τριγωνικό, τετραγωνικό, κυκλικό και διαμαντοειδές μοτίβο. Οι Anurindi and Zolfagharian [74] εξέτασαν την θλιπτική συμπεριφορά του κυψελοειδούς μοτίβου πλήρωσης για τα υλικά ABS και PLA. Οι μεταβλητοί παράμετροι ήταν η πυκνότητα πλήρωσης (25% και 50%), το πάχος διαστρωμάτωσης (0.1mm και 0.2mm) και προσανατολισμός κατασκευής (0° και 45°). Τα συμπεράσματα στο οποίο οδηγήθηκαν ήταν ότι το κυψελοειδές στυλ γεμίσματος αποτελεί ιδανική επιλογή μοτίβου καθώς προσφέρει υψηλή ακαμψία και ισότροπη συμπεριφορά. Από την άλλη, οι Miguel Fernandez-Vicente et al. [75] χρησιμοποιώντας ως στυλ πλήρωσης το γραμμικό, το διαγώνιο και το κυψελοειδές με ποσοστό πλήρωσης 20%, 50% και 100%, παρατήρησε ότι μέγιστη αντοχή εφελκυσμού είχε το διαγώνιο στυλ ($45^\circ/-45^\circ$) με 100% πυκνότητα πλήρωσης.

Οι S. Garzon-Hernandez et al [76] ασχολήθηκαν με τον καθορισμό των παραμέτρων για τη βελτίωση της εσωτερικής πυκνότητας των δοκιμών και κατά συνέπεια των μηχανικών ιδιοτήτων. Μια εκ των παραμέτρων που εξετάστηκαν ήταν και η ταχύτητα εκτύπωσης, όπου παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της ταχύτητας οδήγησε σε πολύ ελαφριά αύξηση των διακένων της δομής.

4. Σχεδιασμός Πειραμάτων (Design of Experiments)

4.1 Παραγοντικός Σχεδιασμός (Factorial Design)

Ο σχεδιασμός πειραμάτων (Design of experiments – DOE) είναι μια τεχνική καθορισμού και διερεύνησης όλων των πιθανών συνθηκών σε ένα πείραμα το οποίο περιλαμβάνει πολλαπλούς παράγοντες. Στην βιβλιογραφία, η τεχνική αυτή αναφέρεται ως παραγοντικός σχεδιασμός (factorial design). Προκειμένου να αναπτυχθεί οποιαδήποτε διαδικασία, πρέπει να μελετηθεί ένας αριθμός παραγόντων. Η μελέτη όμως του κάθε παράγοντα είναι αρκετά κουραστική και χρονοβόρα. Ο παραγοντικός σχεδιασμός χρησιμοποιείται για τη μείωση του συνολικού αριθμού των πειραμάτων για να επιτευχθεί η καλύτερη συνολική βελτιστοποίηση της διαδικασίας. Ο σχεδιασμός καθορίζει την επίδραση του κάθε παράγοντα στην απόκριση, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο ο κάθε παράγοντας επιδρά ανάλογα με τη μεταβολή των άλλων παραγόντων. Οι επιδράσεις αλληλεπίδρασης διαφόρων παραγόντων θα μπορούσαν να επιτευχθούν μόνο με το σχεδιασμό πειραμάτων [77].

Ο παραγοντικός σχεδιασμός επιλέγεται προκειμένου να εκτιμηθεί η επίδραση των διάφορων παραγόντων. Οι παραγοντικοί σχεδιασμοί χρησιμοποιούνται ευρέως για τη διερεύνηση των επιδράσεων των πειραματικών παραγόντων και των αλληλεπιδράσεων μεταξύ αυτών των παραγόντων. Η αλληλεπίδραση σημαίνει πως το αποτέλεσμα ενός παράγοντα ποικίλει ανάλογα με το επίπεδο των άλλων παραγόντων σε μια απόκριση. Στα πλεονεκτήματα των παραγοντικών πειραμάτων περιλαμβάνονται το σχετικά χαμηλό κόστος, ο μειωμένος αριθμός πειραμάτων και οι αυξημένες δυνατότητες αξιολόγησης των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των παραγόντων ελέγχου. Ο παραγοντικός σχεδιασμός μπορεί να ταξινομηθεί σε δύο κατηγορίες: πλήρης παραγοντικός σχεδιασμός (full factorial design) και κλασματικός παραγοντικός σχεδιασμός (fractional factorial design) [78], [79].

4.1.1 Πλήρης παραγοντικός σχεδιασμός (Full factorial design)

Σε έναν πλήρη παραγοντικό σχεδιασμό, εξετάζεται κάθε συνδυασμός κάθε επιπέδου παράγοντα. Για παράδειγμα, ο αριθμός των εκτελέσεων-επαναλήψεων για ένα πλήρη παραγοντικό σχεδιασμό τριών επιπέδων είναι $a \times b \times c$, υποδεικνύοντας ότι ο πρώτος παράγοντας εξετάζεται σε a επίπεδα, ο δεύτερος παράγοντας σε b επίπεδα, ενώ ο τρίτος παράγοντας σε c επίπεδα. Ο αριθμός των εκτελέσεων για ένα πλήρη παραγοντικό σχεδιασμό n παραγόντων, ο καθένας με a επίπεδα ισούται με a^n . Ο συνηθέστερα χρησιμοποιούμενος πλήρης παραγοντικός σχεδιασμός είναι ο σχεδιασμός δύο επιπέδων, ο οποίος συμβολίζεται ως 2^n όταν υπάρχουν n παράγοντες. Μερικές φορές, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα κατάλληλο πολυωνυμικό μοντέλο για την περιγραφή των επιδράσεων των παραγόντων που μελετήθηκαν σε μια απόκριση και στη συνέχεια να βελτιστοποιηθεί η απόκριση εφόσον είναι απαραίτητο. Ο αριθμός των επαναλήψεων για έναν πλήρη παραγοντικό σχεδιασμό αυξάνεται γεωμετρικά καθώς αυξάνεται ο αριθμός των παραγόντων. Σε πολλές περιπτώσεις, όταν πρέπει να μελετηθούν οι επιδράσεις ενός μεγάλου αριθμού παραγόντων ταυτόχρονα, απαιτείται ένας πολύ μεγάλος αριθμός επαναλήψεων. Γενικά, αυτό θα αποτελέσει ένα μεγαλύτερο πείραμα το οποίο δεν είναι οικονομικά και πρακτικά εφικτό [79].

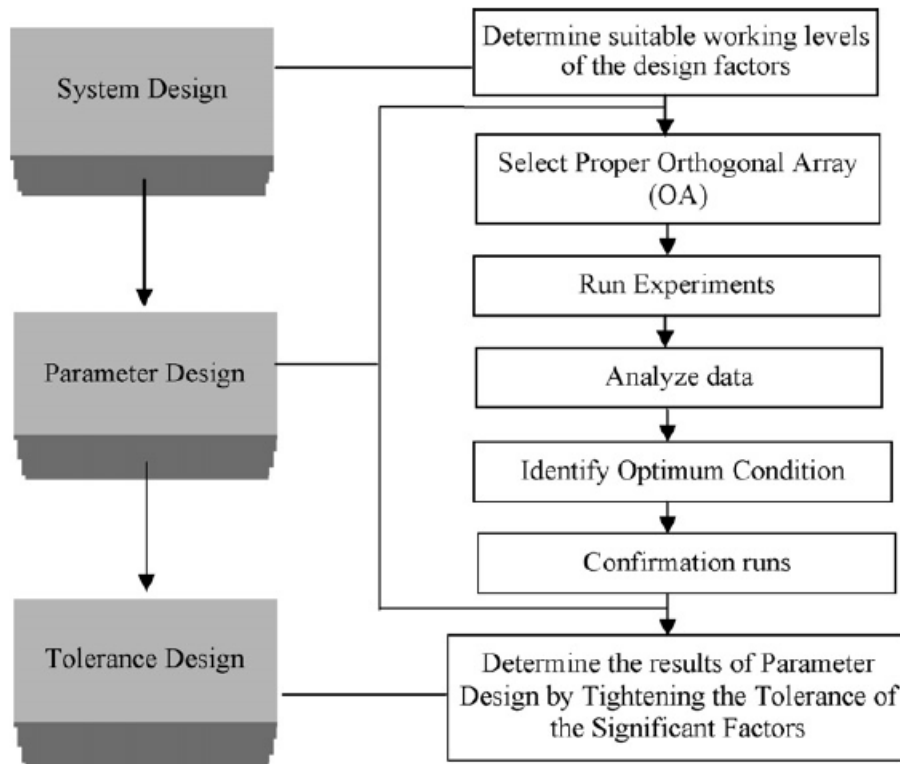
4.1.2 Κλασματικός παραγοντικός σχεδιασμός (Fractional factorial design)

Όταν ο αριθμός των επαναλήψεων για έναν πλήρη παραγοντικό σχεδιασμό είναι σχετικά μεγάλος, οι επιθυμητές πληροφορίες μπορούν συχνά να ληφθούν εκτελώντας μόνο ένα κλάσμα (fraction) του πλήρους παραγοντικού σχεδιασμού, ο οποίος συχνά αναφέρεται ως κλασματικός παραγοντικός σχεδιασμός. Ο κλασματικός παραγοντικός σχεδιασμός παρέχει μια εναλλακτική λύση όταν ο αριθμός των επαναλήψεων για έναν πλήρη παραγοντικό σχεδιασμό είναι πολύ μεγάλος για να είναι εφικτός. Με αυτόν τον σχεδιασμό, οι επιδράσεις ορισμένων παραγόντων σε μια απόκριση μπορούν να μελετηθούν υπό μια οικονομική και πρακτική κατάσταση. Ο σχεδιασμός Taguchi (Taguchi design), ο σχεδιασμός Plackett-Burman (Plackett-Burman design), ο κεντρικός σύνθετος σχεδιασμός (central composite design) και ο σχεδιασμός Box-Behnken (Box-Behnken design) ανήκουν στη κατηγορία του κλασματικού παραγοντικού σχεδιασμού [79].

4.2 Μέθοδος Taguchi

Η μέθοδος Taguchi είναι μια τεχνική σχεδιασμού πειραμάτων, η οποία είναι χρήσιμη στη μείωση του αριθμού των πειραμάτων, χρησιμοποιώντας ορθογώνιους πίνακες προσπαθώντας να ελαχιστοποιήσει τις επιδράσεις των παραγόντων εκτός ελέγχου. Η βασική φιλοσοφία της μεθόδου Taguchi είναι να εξασφαλίσει τη ποιότητα στη φάση σχεδιασμού. Τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι η μείωση του χρόνου διεξαγωγής πειραμάτων, η μείωση του κόστους και η διαπίστωση σημαντικών παραγόντων σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Το σημαντικότερο στάδιο στο σχεδιασμό ενός πειράματος έγκειται στην επιλογή των παραγόντων ελέγχου (control factors). Πρέπει να συμπεριληφθούν όσο το δυνατόν περισσότεροι παράγοντες για να είναι δυνατός ο εντοπισμός μη σημαντικών μεταβλητών σε πρώιμο στάδιο [79], [80].

Στο σχεδιασμό του συστήματος, ο μηχανικός χρησιμοποιεί επιστημονικές και μηχανικές αρχές για να καθορίσει τη βασική διαμόρφωση. Στο στάδιο σχεδιασμού παραμέτρων, προσδιορίζονται συγκεκριμένες τιμές για τις παραμέτρους του συστήματος. Συνήθως, ο στόχος είναι να καθοριστούν οι ονομαστικές τιμές για αυτές τις παραμέτρους, με αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση της μεταβλητότητας προερχόμενη από ανεξέλεγκτες μεταβλητές (μεταβλητές θορύβου). Ο σχεδιασμός ανοχών χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των καλύτερων ανοχών των παραμέτρων. Ο Taguchi συνιστά να χρησιμοποιούνται στατιστικές πειραματικές μέθοδοι για να βοηθήσουν στη βελτίωση της ποιότητας, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού παραμέτρων και ανοχών [79].



Εικόνα 21: Διαδικασία σχεδιασμού Taguchi [81]

4.2.1 Ορθογώνιοι πίνακες Taguchi

Ο Δρ. Taguchi χρησιμοποίησε ένα ειδικό σύνολο ορθογώνιων πινάκων (Orthogonal arrays - OA) για να παρουσιάσει τα πειράματά του. Οι ορθογώνιοι πίνακες προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα. Πρώτον, τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τέτοιου είδους πειράματα ισχύουν σε ολόκληρη τη πειραματική περιοχή και καλύπτονται από τους παράγοντες ελέγχου και τις ρυθμίσεις τους. Δεύτερον, υπάρχει μεγάλη εξοικονόμηση στη πειραματική προσπάθεια. Τρίτον, η ανάλυση των δεδομένων είναι πολύ εύκολη και τέταρτον, μπορεί να ανιχνεύσει αναχώρηση από το πρόσθετο μοντέλο. Η διαδικασία προσαρμογής ενός ορθογώνιου πίνακα σε ένα συγκεκριμένο έργο έχει γίνει ιδιαίτερα εύκολη με τη βοήθεια ενός γραφικού εργαλείου που ονομάζεται γραμμικό γράφημα (linear graph), το οποίο αναπτύχθηκε από τον Taguchi για την αναπαράσταση αλληλεπιδράσεων μεταξύ ζευγών στηλών σε ορθογώνιους πίνακες [79].

Υπάρχουν τρεις τύποι ορθογώνιων πινάκων, εκείνοι που ασχολούνται με παράγοντες δύο επιπέδων, εκείνοι που ασχολούνται με παράγοντες τριών επιπέδων και εκείνοι που ασχολούνται με παράγοντες μικτού επιπέδου (mixed level factors). Η επιλογή του κατάλληλου ορθογώνιου πίνακα βασίζεται στα ακόλουθα κριτήρια: ο αριθμός των παραγόντων και των αλληλεπιδράσεων που μας ενδιαφέρουν και η επιθυμητή πειραματική ανάλυση ή οι περιορισμοί κόστους. Οι πρώτοι δύο τύποι καθορίζουν το μικρότερο ορθογώνιο πίνακα που είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί, ενώ ο τρίτος τύπος δίνει τη δυνατότητα να διεξαχθεί ένα μεγαλύτερο πείραμα με μεγαλύτερη ανάλυση. Η ανάλυση μπορεί να κυμαίνεται από 1 (μικρότερη) έως 4 (μεγαλύτερη) υποδεικνύοντας τη σαφήνεια με την οποία κάθε επιμέρους επίδραση παραγόντων και αλληλεπιδράσεων μπορεί να αξιολογηθεί σε ένα πείραμα [79].

Ο Taguchi έχει δημιουργήσει 18 βασικούς ορθογώνιους πίνακες που ονομάζονται πρότυποι ορθογώνιοι πίνακες (standard orthogonal arrays – «Εικόνα 22») οι περισσότεροι από τους οποίους μπορούν να βρεθούν και σε ελαφρώς διαφοροποιημένες μορφές.

Orthogonal Array*	Number of Rows	Maximum Number of Factors	Maximum Number of Columns at These Levels			
			2	3	4	5
<i>L</i> ₄	4	3	3	-	-	-
<i>L</i> ₈	8	7	7	-	-	-
<i>L</i> ₉	9	4	-	4	-	-
<i>L</i> ₁₂	12	11	11	-	-	-
<i>L</i> ₁₆	16	15	15	-	-	-
<i>L'</i> ₁₆	16	5	-	-	5	-
<i>L</i> ₁₈	18	8	1	7	-	-
<i>L</i> ₂₅	25	6	-	-	-	6
<i>L</i> ₂₇	27	13	-	13	-	-
<i>L</i> ₃₂	32	31	31	-	-	-
<i>L'</i> ₃₂	32	10	1	-	9	-
<i>L</i> ₃₆	36	23	11	12	-	-
<i>L'</i> ₃₆	36	16	3	13	-	-
<i>L</i> ₅₀	50	12	1	-	-	11
<i>L</i> ₅₄	54	26	1	25	-	-
<i>L</i> ₆₄	64	63	63	-	-	-
<i>L'</i> ₆₄	64	21	-	-	21	-
<i>L</i> ₈₁	81	40	-	40	-	-

* 2-level arrays: *L*₄, *L*₈, *L*₁₂, *L*₁₆, *L*₃₂, *L*₆₄
 3-level arrays: *L*₉, *L*₂₇, *L*₈₁
 Mixed 2- and 3-level arrays: *L*₁₈, *L*₃₆, *L'*₃₆, *L*₅₄

Εικόνα 22: Πρότυποι ορθογώνιοι πίνακες

4.2.2 Βαθμοί ελευθερίας

Για την επιλογή του κατάλληλου ορθογώνιου πίνακα Taguchi για τα πειράματα, πρέπει να υπολογιστούν οι συνολικοί βαθμοί ελευθερίας (degrees of freedom - DOF). Οι βαθμοί ελευθερίας ορίζονται ως ο αριθμός των συγκρίσεων μεταξύ των παραμέτρων σχεδιασμού οι οποίοι είναι αναγκαίοι να γίνουν, ούτως ώστε να προσδιοριστεί ποιο επίπεδο είναι καλύτερο και συγκεκριμένα πόσο καλύτερο είναι. Γενικά, ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας που σχετίζονται με έναν παράγοντα ισούται με έναν μικρότερο από τον αριθμό των επιπέδων για αυτόν τον παράγοντα. Για παράδειγμα, μια παράμετρος σχεδιασμού τριών επιπέδων μετράει για δύο βαθμούς ελευθερίας (DOF). Οι βαθμοί ελευθερίας που συνδέονται με την αλληλεπίδραση μεταξύ δύο παραμέτρων σχεδιασμού δίνονται από το γινόμενο των βαθμών ελευθερίας για τις δύο παραμέτρους σχεδιασμού. Μετά τον υπολογισμό των απαιτούμενων βαθμών ελευθερίας, το επόμενο βήμα είναι η επιλογή του κατάλληλου ορθογώνιου πίνακα προκειμένου να ταιριάζει στο συγκεκριμένο πείραμα [79].

Ο αριθμός των σειρών ενός ορθογώνιου πίνακα αντιπροσωπεύει τον αριθμό των πειραμάτων. Προκειμένου ένας πίνακας να μπορεί να επιλεγεί, ο αριθμός των σειρών πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσος με τους βαθμούς ελευθερίας που απαιτούνται στη μελέτη περίπτωσης. Ο αριθμός των στηλών ενός πίνακα αντιπροσωπεύει το μέγιστο αριθμό παραγόντων που μπορούν να μελετηθούν χρησιμοποιώντας τον συγκεκριμένο

πίνακα. Επιπλέον, για να χρησιμοποιήσουμε απευθείας έναν Πρότυπο Ορθογώνιο πίνακα, πρέπει να είμαστε σε θέση να ταιριάξουμε τον αριθμό των επιπέδων των παραγόντων με τον αριθμό των επιπέδων των στηλών στο πίνακα. Συνήθως η διεξαγωγή πειραμάτων είναι ακριβή, επομένως για αυτό το λόγο χρησιμοποιούμε τον μικρότερο δυνατό πίνακα που πληροί τις απαιτήσεις του πειράματος [79].

4.2.3 Signal to Noise Ratio (SNR)

Η μεταβολή των χαρακτηριστικών ποιότητας ενός προϊόντος που αποτελεί αντικείμενο έρευνας ως απόκριση (response) σε έναν παράγοντα που εισάγεται στον πειραματικό σχεδιασμό είναι το “σήμα” (signal) του επιθυμητού αποτελέσματος. Ωστόσο, όταν διεξάγεται ένα πείραμα, υπάρχουν πολλοί εξωτερικοί και εσωτερικοί παράγοντες οι οποίοι δεν έχουν σχεδιαστεί στο πείραμα αλλά επηρεάζουν το αποτέλεσμα. Αυτοί οι ανεξέλεγκτοι παράγοντες ονομάζονται παράγοντες “θορύβου” και η επίδραση τους στο αποτέλεσμα του χαρακτηριστικού ποιότητας που εξετάζεται ονομάζεται “θόρυβος”. Η έννοια του λόγου σήματος προς θόρυβο (S/N) προέρχεται από τον τομέα της ηλεκτρολογίας. Ο Taguchi εφάρμοσε αποτελεσματικά αυτή την έννοια για να καθορίσει τη βέλτιστη κατάσταση από τα πειράματα.

Ο στόχος οποιουδήποτε πειράματος είναι να προσδιοριστεί πάντα ο υψηλότερος δυνατός λόγος S/N για το αποτέλεσμα. Μια υψηλή τιμή του λόγου S/N υποδηλώνει ότι το σήμα είναι πολύ μεγαλύτερο από τις τυχαίες επιδράσεις των παραγόντων θορύβου. Ο σχεδιασμός του προϊόντος/διαδικασίας σύμφωνα με τον υψηλότερο λόγο S/N αποδίδει πάντα τη βέλτιστη ποιότητα με την ελάχιστη διακύμανση. Οι λόγοι S/N μετασηματίζουν αρκετές επαναλήψεις σε μία τιμή, η οποία υποδεικνύει τη ποσότητα της διακύμανσης που υπάρχει και τη μετατόπιση της μέσης απόκρισης προκειμένου να εντοπιστούν οι παράγοντες ελέγχου που μπορούν να μειώσουν τις διακυμάνσεις και να βελτιώσουν τη ποιότητα [79].

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες χαρακτηριστικών ποιότητας για την ανάλυση του λόγου S/N:

- όσο μικρότερο τόσο καλύτερο (smaller the better)

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \left(\sum y^2 \right)$$

- όσο μεγαλύτερο τόσο καλύτερο (larger the better)

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \left(\sum \frac{1}{y^2} \right)$$

- το ονομαστικό είναι το καλύτερο (nominal is best)

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \left(\frac{\bar{y}^2}{s_y^2} \right)$$

όπου \bar{y} ο μέσος όρος των παρατηρήσεων, s_y^2 η διακύμανση του y , n ο αριθμός των παρατηρήσεων και y τα παρατηρούμενα δεδομένα ή ο κάθε τύπος χαρακτηριστικού. Η

απόκλιση μεταξύ πειραματικών και επιθυμητών τιμών ορίζεται ως συνάρτηση απώλειας (loss function). Η συνάρτηση απώλειας μετατρέπεται περαιτέρω σε λόγο S/N.

4.2.4 ANOVA

Η ανάλυση διακύμανσης (Analysis of Variance - ANOVA) είναι η στατιστική μέθοδος που χρησιμοποιείται περισσότερο για την ερμηνεία πειραματικών δεδομένων. Εφαρμόζεται στα αποτελέσματα των πειραμάτων για τον προσδιορισμό της ποσοστιαίας % συμβολής κάθε παραμέτρου. Η ανάλυση ANOVA ανιχνεύει διαφορές στη μέση απόδοση των ομάδων των αντικειμένων που εξετάζονται, αναλύοντας τη συνολική μεταβολή στις πηγές της. Ο κύριος στόχος της ANOVA είναι να εξαγάγει από τα αποτελέσματα τη μεταβολή που προκαλεί ο κάθε παράγοντας σε σχέση με τη συνολική μεταβολή που παρατηρείται στο αποτέλεσμα. Επίσης χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της σημαντικότητας (significance) όλων των κύριων παραγόντων και των αλληλεπιδράσεων τους, συγκρίνοντας το μέσο τετράγωνο με μία εκτίμηση των πειραματικών σφαλμάτων σε συγκεκριμένα επίπεδα εμπιστοσύνης (confidence levels). Τα σχεδιαγράμματα που αναπαριστούν τις κύριες επιδράσεις (main effects plots) επιτρέπουν τον προσδιορισμό του επιπέδου του κάθε παράγοντα που παρέχει την ελάχιστη τιμή απόκρισης. Μέσω της ανάλυσης διακύμανσης και του ποσοστού επιρροής του κάθε παράγοντα μπορεί να αποφασιστεί ποιοι από αυτούς μπορούν να απομακρυνθούν από το πείραμα. Το αποτέλεσμα είναι λιγότεροι παράγοντες προς μελέτη και μείωση του συνολικού χρόνου και κόστους εκτέλεσης του πειράματος [79].

5. Πειραματική διαδικασία

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των δοκιμών εφελκυσμού σε εκτυπωμένα δοκίμια PA-CF, με τη μέθοδο FDM. Όπως παρατηρήθηκε από τη βιβλιογραφία το μεγαλύτερο μέρος της μέχρι τώρα έρευνας αφορά τη μηχανική συμπεριφορά αντικειμένων από πολυμερές υλικό, τα οποία κατασκευάζονται από επαγγελματικούς εκτυπωτές, όπου συγκεκριμένα εστιάζει στην συγκόλληση μεταξύ των ινών και κατ' επέκταση στα κενά που δημιουργούνται. Όπως σημειώνεται, η συγκόλληση μεταξύ των νημάτων δεν είναι τόσο ισχυρή και τα χαρακτηριστικά του αντικειμένου είναι υποδεέστερα σε σύγκριση με την περίπτωση που το υλικό δεν ήταν εκτυπωμένο. Στην παρούσα εργασία επιλέγουμε να εξετάσουμε την εσωτερική δομή των εκτυπωμένων αντικειμένων μέσω τριών παραμέτρων ελέγχου της κατεργασίας. Το εσωτερικό μοτίβο (infill pattern), διότι αλλάζει σημαντικά την εσωτερική διάταξη του υλικού, το ποσοστό πλήρωσης αυτού (infill density), διότι αυξάνει την πυκνότητα της εσωτερικής δομής και μιας νέας λειτουργίας που εμφανίζεται στα λογισμικά τεμαχισμού, η οποία εναποθέτει πολλαπλάσιες γραμμές πλήρωσης (infill line multiplier) σε κάθε εναπόθεση στην εσωτερική δομή.

5.1 Σχεδιασμός πειραμάτων (DOE)

Για το σχεδιασμό των πειραμάτων που καθορίζουν τον τρόπο κατασκευής των δοκιμών εφελκυσμού χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Taguchi. Οι παράμετροι ελέγχου, που επιλέχθηκαν βάσει της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, είναι το μοτίβο πλήρωσης (infill pattern), η πυκνότητα πλήρωσης (infill density) και ο πολλαπλασιαστής γραμμής πλήρωσης (infill line multiplier). Οι παραπάνω παράμετροι ελέγχου επιλέγονται ως οι παράγοντες ελέγχου (control factors) για το πείραμά μας και εξετάζονται σε τρία επίπεδα (levels) ο καθένας. Στον παρακάτω **Πίνακας 3** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι παράγοντες ελέγχου και τα αντίστοιχα επίπεδα που επιλέγονται για το σχεδιασμό του πειράματος που εξυπηρετεί τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής.

Πίνακας 3: Οι παράγοντες ελέγχου και τα επίπεδά τους

Level \ Factor	Levels		
	1	2	3
Infill pattern	Grid	Lines	Triangles
Infill density	5%	15%	25%
Infill line multiplier	1	2	3

Στη συνέχεια, πρέπει να γίνει η κατάλληλη επιλογή του ορθογώνιου πίνακα Taguchi που θα στεγάσει το πείραμα. Αρχικά, υπολογίζονται οι βαθμοί ελευθερίας του συγκεκριμένου πειράματος, προκειμένου να αποφανθούμε ποιοι πίνακες θα μπορούσαν να είναι κατάλληλοι. Έχουμε τρεις παράγοντες, με τρία επίπεδα ο καθένας. Άρα συνολικά προκύπτει ότι $DOF: 3 \times (3-1) + 1 = 7$, συνεπώς χρειάζεται να διεξαχθούν τουλάχιστον 7 ξεχωριστά πειράματα για να μπορέσουν να υπολογιστούν οι επιδράσεις του κάθε παράγοντα. Σύμφωνα με τους 18 βασικούς ορθογώνιους πίνακες του Taguchi «Εικόνα 22» έχουμε 3-level arrays και με 3 number of factors επιλέγουμε το L_9 ορθογώνιο πίνακα του Taguchi. Ο κοινός ορθογώνιος πίνακας L_9 για παράγοντες τριών επιπέδων παρουσιάζεται στον Πίνακα 4, όπου για το πείραμά μας διαμορφώνεται όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 4: Ορθογώνιος πίνακας L_9

Run \ Factor	Factor 1	Factor 2	Factor 3
1°	1	1	1
2°	1	2	2
3°	1	3	3
4°	2	1	2
5°	2	2	3
6°	2	3	1
7°	3	1	3
8°	3	2	1
9°	3	3	2

Πίνακας 5: Ορθογώνιος πίνακας L_9 του πειράματος

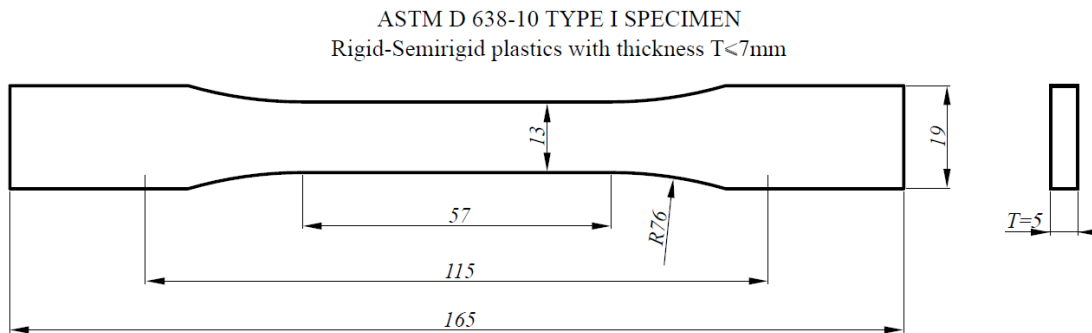
Run \ Factor	Infill pattern	Infill density	Infill Line Multiplier
1°	Grid (0,90)	5%	1
2°	Grid (0,90)	15%	2
3°	Grid (0,90)	25%	3
4°	Lines (0,0)	5%	2
5°	Lines (0,0)	15%	3

6°	Lines (0,0)	25%	1
7°	Triangles	5%	3
8°	Triangles	15%	1
9°	Triangles	25%	2

5.2 Διεξαγωγή πειραμάτων

5.2.1 ASTM D639 – 14

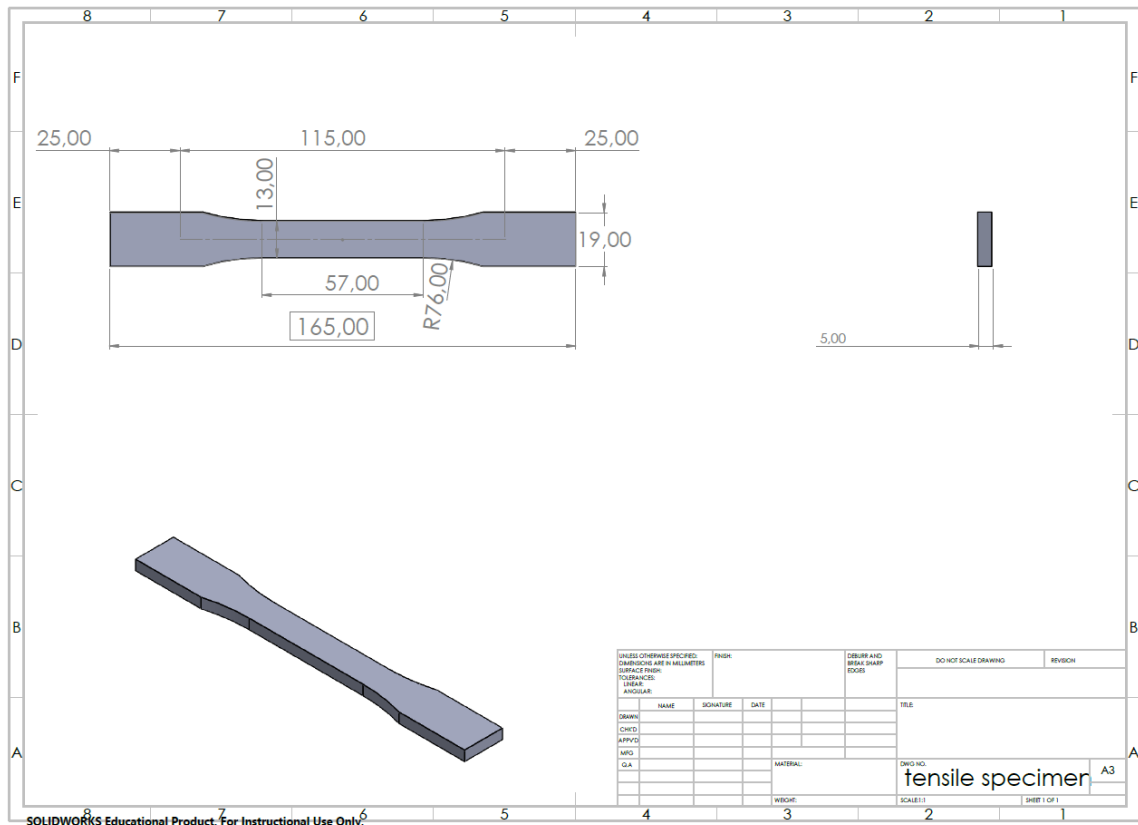
Η επόμενη φάση είναι η αναζήτηση του κατάλληλου πρότυπου που θα εφαρμοστεί για τη διεξαγωγή των δοκιμών εφελκυσμού. Το πρότυπο ASTM D638 [82] θεωρήθηκε το ιδανικότερο, καθώς χρησιμοποιείται για εφελκυσμό πλαστικών δοκιμίων. Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες το συγκεκριμένο πρότυπο θεωρείται ακατάλληλο για τη μέθοδο FDM. Οι Ahn et al. [83] πρότειναν τη χρησιμοποίηση του πρότυπου ASTM D3039, το οποίο αφορά εφελκυσμό για δοκίμια σύνθετων υλικών. Συγκεκριμένα, εξήγησαν ότι λόγω της γεωμετρίας των δοκιμίων του πρότυπου ASTM D638 παρατηρήθηκε συγκέντρωση τάσεων στα σημεία όπου σταματούσαν οι ίνες. Από την άλλη οι Gribbins και Steinhauer [84] προτίμησαν το ASTM D638 αντί του ASTM D3039, διότι τα πειράματα που έκαναν με το πρώτο ήταν έγκυρα σε αντίθεση με αυτά που βασίστηκαν στο δεύτερο. Ως επί το πλείστον όμως, η βιβλιογραφία χρησιμοποιεί το πρότυπο ASTM D638. Έτσι, και στη παρούσα εργασία επιλέγεται το πρότυπο ASTM D638.



Εικόνα 23: Σχέδιο δοκιμίου βάσει του προτύπου ASTM D638

5.2.2 Διαδικασία εκτύπωσης

Το επόμενο βήμα μετά τον σχεδιασμό των πειραμάτων και την επιλογή του προτύπου δοκιμίου που θα κατασκευαστεί είναι η δημιουργία του μοντέλου σε λογισμικό τρισδιάστατης σχεδίασης (3D CAD Software). Το λογισμικό που επιλέχθηκε ήταν το SolidWorks όπου σχεδιάστηκε το δοκίμιο εφελκυσμού σύμφωνα με της διαστάσεις της Εικόνα 24. Το τρισδιάστατο δοκίμιο πρέπει να αποθηκευτεί σε μορφή *.stl*, ώστε να είναι αναγνώσιμο από οποιοδήποτε λογισμικό τεμαχισμού (slicing software).



Εικόνα 24: Μηχανολογικό σχέδιο του προτύπου δοκιμίου εφελκυσμού

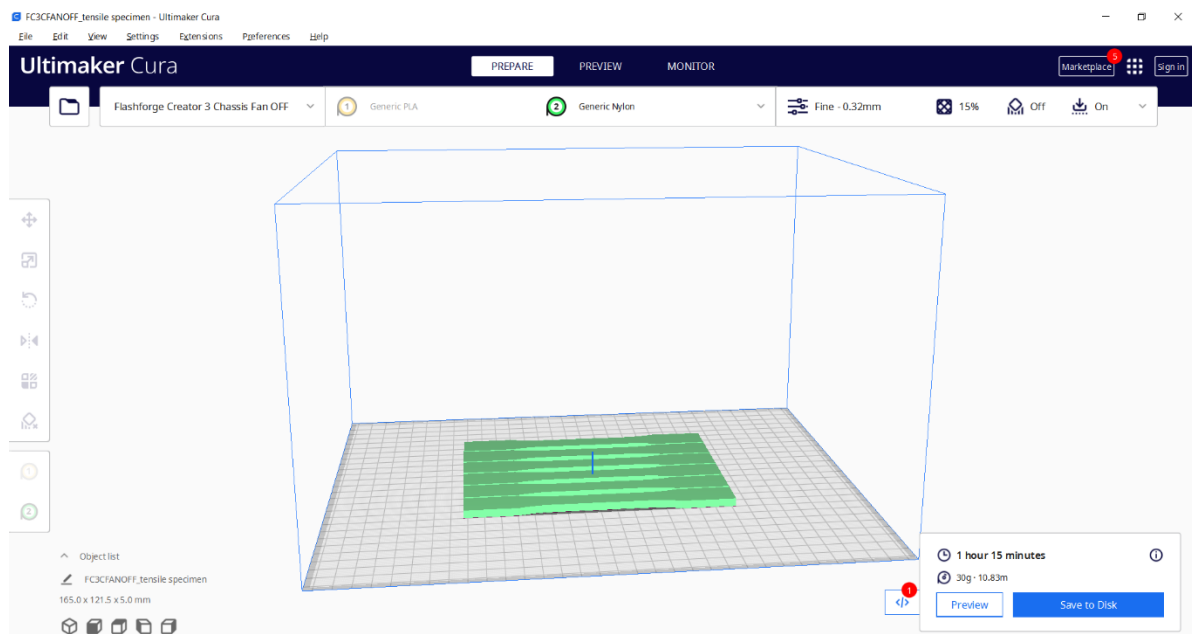
Μετά τη δημιουργία του δοκιμίου σε μορφή *.stl*, ακολουθεί η διαδικασία του τεμαχισμού και η επιλογή των παραμέτρων κατεργασίας. Ως λογισμικό τεμαχισμού επιλέχθηκε το Cura 5.0 της Ultimaker. Σε καθεμία από τις εννιά εκτελέσεις του πίνακα Taguchi θα χρειαστεί να επαναληφθεί η διαδικασία εισαγωγής των δεδομένων στο λογισμικό Cura με διαφορετικές τιμές των παραμέτρων που εξετάζονται. Τα στοιχεία τα οποία κάθε φορά θα συμπληρώνονται αυτούσια είναι οι μεταβλητές που παραμένουν σταθερές σε κάθε εκτέλεση του πειράματος μας. Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται οι επιλογές των σταθερών παραμέτρων στα πειράματα μας.

Πίνακας 6: Σταθερές παράμετροι

Επιλογές σταθερών παραμέτρων	
Διάμετρος ακροφυσίου	0,8 mm
Προσανατολισμός κατασκευής	Οριζόντιος
Πάχος διαστρωμάτωσης	0,32 mm
Αριθμός τοιχωμάτων	2
Πάχος τοιχωμάτων	1,8 mm
Συμπαγής στρώσεις (Άνω – Κάτω)	0
Θερμοκρασία εξώθησης	270 °C

Θερμοκρασία πλατφόρμας	120 °C
Ταχύτητα εκτύπωσης	50 mm/s
Αναρρόφηση (Retraction)	Ανενεργή

Έπειτα από κάθε εισαγωγή των δεδομένο, το λογισμικό τεμαχισμού εξάγει το G-κώδικα ελέγχου της μηχανής προκειμένου να περιγραφεί η διαδρομή που θα ακολουθηθεί έτσι ώστε να κατασκευαστεί το δοκίμιο. Όπως παρατηρούμε στην Εικόνα 25 τα δοκίμια που εισήχθησαν για τεμαχισμό είναι πέντε. Η ενέργεια αυτή πραγματοποιήθηκε ώστε να εξασφαλίσουμε την επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων. Έτσι κάθε για κάθε μία από τις εννιά εκτελέσεις κατασκευάστηκαν πέντε δοκίμια εφελκυσμού.



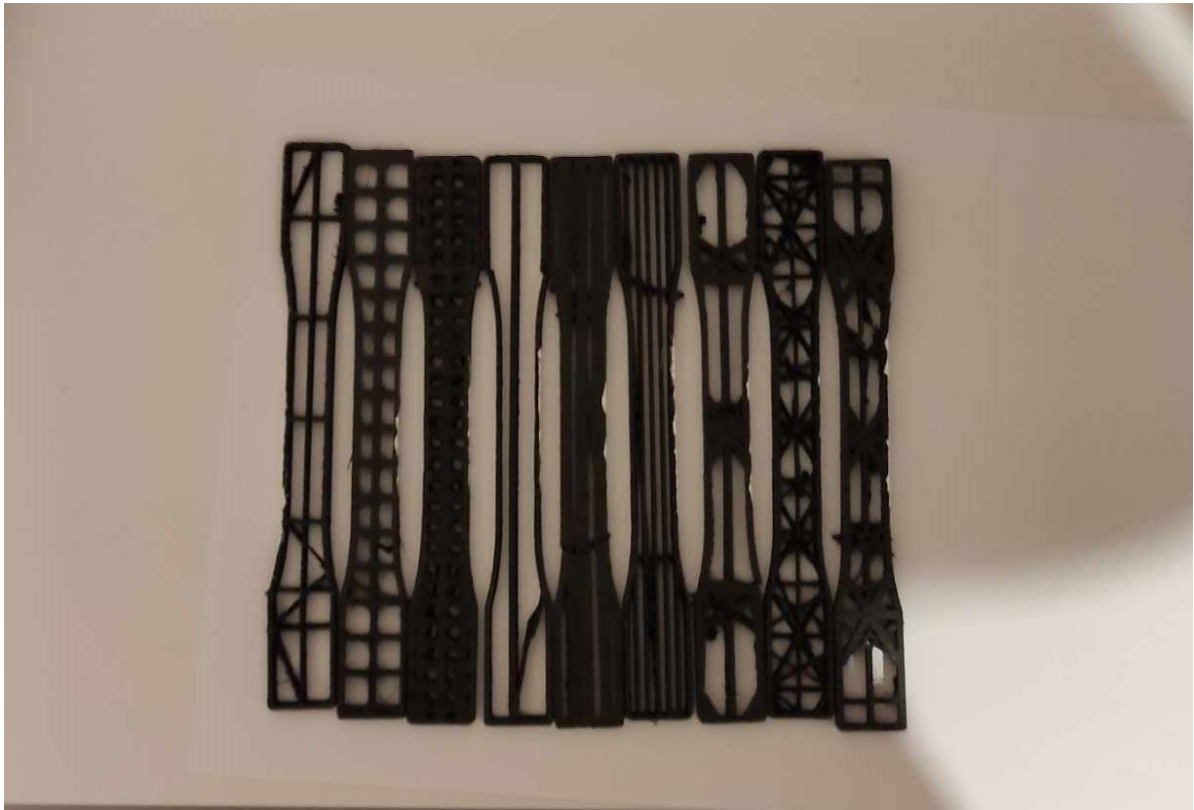
Εικόνα 25: Slicing software

Αφού εξαχθεί ο G-κώδικας ελέγχου της μηχανής, συνέχεια έχει η εκτύπωσή τους. Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής που χρησιμοποιήθηκε για τη κατασκευή των δοκιμών είναι ο Creator 3 της FlashForge του εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών. Εξ αρχής το λογισμικό Cura δεν ήταν συμβατό με τον εκτυπωτή έτσι ώστε να μεταβιβαστεί ο G-κώδικας, όμως το πρόβλημα λύθηκε εγκαθιστώντας ένα plugin στο λογισμικό Cura. Στην Εικόνα 26 παρουσιάζεται ο εκτυπωτής του εργαστηρίου όπου διακρίνεται η πλατφόρμα εκτύπωσης, η οθόνη αφής μέσω της οποίας ο χρήστης επικοινωνεί με τον εκτυπωτή και το USB stick το οποίο διαθέτει την πληροφορία για την εκτύπωση των δοκιμών. Το υλικό που εξετάζεται είναι το PA-CF με διάμετρο 1,75mm τυλιγμένο στο καρούλι και τοποθετημένο στο αριστερό μέρος του εκτυπωτή. Αναλυτικές πληροφορίες τόσο για τον εκτυπωτή όσο και για υλικό κατεργασίας παρατίθενται στο Παράρτημα.



Εικόνα 26: FlashForge Creator 3

Εφόσον έχουν δημιουργηθεί όλα τα αρχεία για κάθε μία από τις εννιά εκτελέσεις ακολουθεί η εκτύπωσή τους. Από το μενού της οθόνης επιλέγουμε το αρχείο που επιθυμούμε και πατάμε εκτύπωση. Σε κάθε εκτέλεση του πειράματος, ο χρόνος ποικίλλει ανάλογα τις τιμές των παραμέτρων από 1 hr έως και 2 hr. Μετά το πέρας της κάθε εκτύπωσης τα δοκίμια αφαιρούνται προσεκτικά από τη πλατφόρμα κατεργασίας και αποκολλώνται μεταξύ τους. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλες τις εκτελέσεις. Στην Εικόνα 27 παρουσιάζονται τα δοκίμια εφελκυσμού, που όπως αναφέρθηκε προηγουμένως πραγματοποιήθηκαν πέντε εκτελέσεις εφελκυσμού για κάθε μία εκτέλεση του πίνακα Taguchi. Άρα συνολικά είχαμε πέντε σειρές δοκιμών όπως της Εικόνα 27.



Εικόνα 27: Τα εννιά εκτυπωμένα δοκίμια εφελκυσμού

5.2.3 Εφελκυσμός δοκιμών - Συλλογή δεδομένων

Η τελευταία φάση πριν την ανάλυση των αποτελεσμάτων είναι η διεξαγωγή της δοκιμής εφελκυσμού των δοκιμών και η συλλογή των δεδομένων φορτίου-επιμήκυνσης για το κάθε ένα από αυτά. Πριν από τη διεξαγωγή της δοκιμής του εφελκυσμού πραγματοποιήθηκε μέτρηση των διαστάσεων για κάθε ένα δοκίμιο. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση παχυμέτρου και τα δεδομένα παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακας 7.

Πίνακας 7: Διαστάσεις δοκιμών

Specimen	ΜΗΚΟΣ mm	ΠΛΑΤΟΣ mm	ΠΑΧΟΣ mm
1	165	14,4	5,4
1	166	14,3	5,3
1	165,5	14	5,3
1	165,5	14	5,4
1	165	14,1	5,3
2	166	13,9	5,3
2	166	13,7	5,3
2	166	13,52	5,38
2	166	13,64	5,3
2	166	13,6	5,37
3	166	13,8	5,3
3	166	14	5,3
3	166	14,1	5,38
3	166	14,1	5,3

3	165,5	14,3	5,4
4	166	13,7	5,48
4	166	13,7	5,4
4	166	12,8	5,48
4	166	13,3	5,3
4	165,5	12,6	5,3
5	166	13,9	5,3
5	166	13,7	5,4
5	166	13,74	5,4
5	166	13,7	5,3
5	166	14	5,3
6	166	13,38	5,38
6	166	13,7	5,7
6	166	13,48	5,3
6	166	13,2	5,48
6	166	13,5	5,3
7	166	14	5,38
7	166	13,9	5,4
7	166	14	5,3
7	166	13,8	5,4
7	166	13,88	5,3
8	166	13,8	5,68
8	166	13,8	5,4
8	166	13,9	5,3
8	166	13,7	5,4
8	166	13,8	5,4
9	166	13,9	5,4
9	166	13,7	5,3
9	166	13,9	5,4
9	166	13,9	5,4
9	166	13,7	5,28

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η δοκιμή εφελκυσμού των 45 εκτυπωμένων δοκιμίων. Η μηχανή εφελκυσμού που χρησιμοποιήθηκε ήταν η Instron 4482 του εργαστηρίου. Οι δοκιμές έγιναν με ρυθμό-ταχύτητα 5mm/min σε συνθήκες περιβάλλοντος 30 °C, 45% υγρασίας ενώ για τη λήψη των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Bluehill της Instron.



Εικόνα 28: Μηχανή δοκιμών εφελκυσμού Instron 4482

Τα δεδομένα που λαμβάνονται από τη δοκιμή εφελκυσμού είναι οι τιμές εφελκυστικής δύναμης και επιμήκυνσης (ή μετατόπισης) των δοκιμίων μέχρι την πλήρη θραύση αυτών. Οι ανωτέρω μετρήσεις επεξεργάζονται κατάλληλα ώστε να προκύψουν οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για κάθε ένα δοκίμιο της κάθε κατηγορίας. Το κάθε διάγραμμα απεικονίζει τις καμπύλες εφελκυσμού των πέντε δοκιμίων που δοκιμάστηκαν μηχανικά για κάθε ένα από τα εννιά πειράματα του Πίνακα Taguchi.

Αυτό που εξετάζεται στην παρούσα εργασία είναι η επίδραση των επιλεγθέντων παραμέτρων κατεργασίας στις κύριες μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων. Οι ιδιότητες αυτές επιλέγονται να είναι η μέγιστη εφελκυστική τάση ή όριο θραύσης σε εφελκυσμό, το μέτρο ελαστικότητας και η δυσθραυστότητα ή ενέργεια ανά μονάδα όγκου που απορροφάται μέχρι τη θραύση. Έτσι, από τα δεδομένα μας πρέπει να εξαχθούν οι μέγιστες εφελκυστικές τάσεις για κάθε μία δοκιμή εφελκυσμού. Τα στοιχεία αυτά θα χρησιμοποιηθούν στη ανάλυση Taguchi και ANOVA τα οποία θα αποδώσουν ένα στατιστικό αποτέλεσμα για το πείραμα μας. Στους παρακάτω Πίνακας 8, Πίνακας 9 και Πίνακας 10 παρουσιάζονται αντίστοιχα η μέγιστη εφελκυστική αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας και η δυσθραυστότητα για κάθε ένα από τα σαράντα πέντε δοκίμια που δοκιμάστηκαν στη μηχανή εφελκυσμού.

Πίνακας 8: Ultimate Tensile Strength

Run \ Factor	Infill Pattern	Infill Density	Infill Line Multiplier	Ultimate Tensile Strength				
				MPa				
Run 1°	Grid (0,90)	5%	1	6,04	5,53	3,76	2,17	2,23
Run 2°	Grid (0,90)	15%	2	6,30	7,99	10,85	9,10	9,63
Run 3°	Grid (0,90)	25%	3	18,61	15,74	12,92	16,96	18,43
Run 4°	Lines (0,0)	5%	2	12,77	13,17	10,10	9,60	9,37
Run 5°	Lines (0,0)	15%	3	37,48	24,06	26,87	19,65	33,88
Run 6°	Lines (0,0)	25%	1	7,88	15,74	17,21	11,95	12,49
Run 7°	Triangles	5%	3	8,27	6,29	8,86	10,34	10,18
Run 8°	Triangles	15%	1	3,56	5,76	9,47	3,74	5,58
Run 9°	Triangles	25%	2	4,69	10,76	10,48	11,91	11,50

Από τα δεδομένα του Πίνακα 8 προκύπτουν ορισμένα αξιοσημείωτα συμπεράσματα για τις μέγιστες τάσεις που εμφανίζονται στα δοκίμια κατά τη μηχανική δοκιμή. Αρχικά, παρατηρείται ότι με σταθερό το μοτίβο πλήρωσης (infill pattern), όσο αυξάνεται το ποσοστό πλήρωσης (infill density), αυξάνεται και το όριο αντοχής του δοκιμίου. Για παράδειγμα, συγκρίνοντας τα δοκίμια μέγιστης αντοχής των πειραμάτων με «infill pattern Grid (0,90)», βλ. Run 1°, Run 2°, Run 3°, το όριο αντοχής αυξάνεται από τα 6,04 MPa, στα 10,85 MPa και στα 18,61 MPa αντίστοιχα. Το αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο, καθώς μειωμένη πυκνότητα πλέγματος σημαίνει λιγότερο υλικό ικανό να παραλάβει το εφελκυστικό φορτίο, καθώς και πιθανές μεγαλύτερες συγκεντρώσεις τάσεων σε σημεία όπου έχει αφαιρεθεί υλικό, άρα δοκίμιο μικρότερης αντοχής. Επιπλέον, σημειώνεται ότι το δοκίμιο στο infill pattern Grid (0,90) με την ελάχιστη πυκνότητα 5%, έχει και το ελάχιστο infill line multiplier, δίνοντας ακόμα μικρότερη αντοχή στο δοκίμιο. Στη συνέχεια, όσον αφορά το infill pattern Lines (0,0) παρατηρείται ότι η αύξηση της πυκνότητας, αν δεν ληφθεί υπόψιν και η παράμετρος infill line multiplier ταυτοχρόνως, δεν οδηγεί στα ίδια συμπεράσματα με προηγουμένως. Παρατηρείται ότι η αντοχή μεγιστοποιείται για την ενδιάμεση τιμή της πυκνότητας πλήρωσης 5%, όταν το infill line multiplier μεγιστοποιείται στην τιμή 3 (Run 5°). Επιπλέον, στην ελάχιστη πυκνότητα 5%, όταν το infill line multiplier είναι 2, το όριο αντοχής προκύπτει ίσο με 13,17 MPa, ενώ όταν η πυκνότητα μεγιστοποιείται στο 25% με το infill line multiplier να είναι 1, το μέγιστο όριο θραύσης προκύπτει ίσο με 15,74 MPa. Με άλλα λόγια, οι παράμετροι infill density και infill line multiplier οφείλουν να εξετάζονται ταυτόχρονα, όταν το infill pattern παραμένει σταθερό. Τέλος, όσον αφορά τα Triangles, παρατηρείται ότι η αντοχή μεγιστοποιείται στα 11,91 MPa, όταν μεγιστοποιείται η πυκνότητα στο 25% και το infill line multiplier ισούται με 2. Αξίζει να σημειωθεί επίσης ότι το δοκίμιο με την ελάχιστη πυκνότητα 5% (Run 7°) εμφανίζει μεγαλύτερη αντοχή από το δοκίμιο μέσης πυκνότητας 15% (Run 8°), καθώς διαθέτει μεγαλύτερο infill line multiplier.

Μεταξύ των τριών μοτίβων πλήρωσης, το Lines(0,0) ενδιάμεσου επιπέδου πυκνότητας 15% και μέγιστου επιπέδου infill line multiplier ίσο με 3, εμφανίζει τη μέγιστη αντοχή, η οποία ισούται με 37,48 MPa. Η αντίστοιχη τιμή για το πλέγμα Grid (0,90) είναι 18,61 MPa (πυκνότητα μέγιστη 25% και infill line multiplier μέγιστο και ίσο με 3) και 11,91 MPa για το Triangles (πυκνότητα μέγιστη 25% και infill line multiplier μέσο και ίσο με 2). Το

ποια από τις τρεις παραμέτρους ελέγχου επιδρά σημαντικότερα στον καθορισμό του ορίου αντοχής του δοκιμίου, εξετάζεται στην επόμενη παράγραφο με τη χρήση στατιστικής.

Πίνακας 9: Young's Modulus

Run	Factor	Infill Pattern	Infill Density	Infill Line Multiplier	Young's Modulus				
					GPa				
Run 1°		Grid (0,90)	5%	1	0,86	0,56	0,44	0,57	0,36
Run 2°		Grid (0,90)	15%	2	0,46	0,85	0,83	0,85	0,61
Run 3°		Grid (0,90)	25%	3	1,34	1,21	1,24	1,28	1,21
Run 4°		Lines (0,0)	5%	2	0,63	0,65	0,59	0,63	0,64
Run 5°		Lines (0,0)	15%	3	1,72	1,61	1,79	1,87	2,00
Run 6°		Lines (0,0)	25%	1	1,16	1,19	1,65	1,67	1,52
Run 7°		Triangles	5%	3	1,09	1,43	1,09	0,86	1,03
Run 8°		Triangles	15%	1	1,57	0,67	1,08	0,85	1,06
Run 9°		Triangles	25%	2	0,84	0,83	0,87	0,99	1,09

Στον Πίνακα 9 συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας του κάθε δοκιμίου. Το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται από την κλίση της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης, στο κομμάτι από την αρχή των αξόνων μέχρι το όριο αναλογίας, δηλαδή μέχρι το σημείο στο οποίο η καμπύλη ξεκινάει να αποκλίνει από ευθεία σε καμπύλη γραμμή. Υπολογίζεται διαιρώντας την τάση με την αντίστοιχη παραμόρφωση σε οποιοδήποτε σημείο της καμπύλης πριν το όριο αναλογίας.

Οι παρατηρήσεις που έγιναν για το όριο αντοχής συμφωνούν για τα μοτίβα Grid (0,90) και Lines (0,0), όμως δε συμβαίνει το ίδιο για το μοτίβο Triangles. Πιο συγκεκριμένα, το μέτρο ελαστικότητας μεγιστοποιείται στα 1,34 GPa στο πρώτο δοκίμιο του Run 3° για το μοτίβο Grid (0,90), όπως παρατηρήθηκε και για τη μέγιστη αντοχή. Για το μοτίβο Lines (0,0) μεγιστοποιείται στο πέμπτο δοκίμιο του Run 5° στην τιμή 2 GPa. Στο ίδιο Run παρατηρήθηκε μεγιστοποίηση της μέγιστης αντοχής σε εφελκυσμό, όμως σε διαφορετικό δοκίμιο. Στο μοτίβο Triangles η μεγιστοποίηση του μέτρου ελαστικότητας δε συμβαίνει στο ίδιο Run με τη μεγιστοποίηση της μέγιστης αντοχής σε εφελκυσμό. Η ελαστικότητα μεγιστοποιείται στα 1,57 MPa στο Run 8° όπου η πυκνότητα είναι η ενδιάμεση και το infill line multiplier είναι ελάχιστο.

Μεταξύ των τριών μοτίβων, το δοκίμιο Lines(0,0) ενδιάμεσου επιπέδου πυκνότητας 15% και μέγιστου επιπέδου infill line multiplier ίσο με 3 εμφανίζει το μέγιστο μέτρο ελαστικότητας, ίσο με 2,00 GPa. Αξίζει να τονιστεί ότι μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό εμφανίζεται στο ίδιο Run αλλά σε διαφορετικό δοκίμιο.

Πίνακας 10: Toughness

Run \ Factor	Infill Pattern	Infill Density	Infill Line Multiplier	Toughness				
				kJ/m ³				
Run 1°	Grid (0,90)	5%	1	47	37,6	79,4	65,2	85
Run 2°	Grid (0,90)	15%	2	80,5	69,5	87,1	89,2	107,8
Run 3°	Grid (0,90)	25%	3	155,1	133,9	92,6	136,4	156,5
Run 4°	Lines (0,0)	5%	2	223,9	264,3	118,3	164,2	120,6
Run 5°	Lines (0,0)	15%	3	651,1	208,2	240,3	156,3	568,8
Run 6°	Lines (0,0)	25%	1	39,2	607,5	242,4	64,8	147,6
Run 7°	Triangles	5%	3	75,2	37,2	50,2	77,8	78,8
Run 8°	Triangles	15%	1	8,7	39	72,5	13,7	16,8
Run 9°	Triangles	25%	2	29,4	93,6	83,7	93,2	80,6

Στον Πίνακα 10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τον υπολογισμό της δυσθραυστότητας του κάθε δοκιμίου. Η ιδιότητα αυτή δείχνει το ποσό ενέργειας ανά μονάδα όγκου που απορροφάει το υλικό μέχρι να σπάσει και ισούται με το εμβαδό που περικλείεται μεταξύ της καμπύλης σ-ε και του οριζόντιου άξονα των παραμορφώσεων. Υλικά με υψηλή δυσθραυστότητα συνδυάζουν υψηλή ολκιμότητα και υψηλή αντοχή, ώστε η επιφάνεια της καμπύλης σ-ε να αυξάνεται. Ψαθυρά υλικά, δηλαδή υλικά μικρής ολκιμότητας, όπως τα κεραμικά και ο φαιός χυτοσίδηρος, εμφανίζουν χαμηλή δυσθραυστότητα παρά την υψηλή μέγιστη αντοχή τους σε εφελκυσμό.

Οι παρατηρήσεις που έγιναν για το όριο αντοχής και το μέτρο ελαστικότητας συμφωνούν για τα μοτίβα Grid (0,90) και Lines (0,0), όμως δε συμβαίνει το ίδιο για το μοτίβο των Triangles. Αναλυτικότερα, η δυσθραυστότητα μεγιστοποιείται στα 156,5 kJ/m³ στο πέμπτο δοκίμιο του Run 3° για το μοτίβο Grid (0,90). Στο ίδιο Run, αλλά σε διαφορετικό δοκίμιο παρατηρήθηκε μεγιστοποίηση της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας. Για το μοτίβο Lines (0,0) μεγιστοποιείται στο πρώτο δοκίμιο του Run 5° στην τιμή 651,1 kJ/m³. Στο ίδιο Run και δοκίμιο παρατηρήθηκε μεγιστοποίηση της μέγιστης αντοχής σε εφελκυσμό. Στο μοτίβο Triangles η μεγιστοποίηση της δυσθραυστότητας συμπίπτει με το δοκίμιο της μέγιστης αντοχής σε εφελκυσμό. Η δυσθραυστότητα μεγιστοποιείται στα 93,2 kJ/m³ στο Run 9° όπου η πυκνότητα είναι η μέγιστη και το infill line multiplier είναι το ελάχιστο.

Μεταξύ των τριών μοτίβων, το δοκίμιο Lines(0,0) ενδιάμεσου επιπέδου πυκνότητας 15% και μέγιστου επιπέδου infill line multiplier ίσο με 3 εμφανίζει τη μέγιστη δυσθραυστότητα, ίση με 651,1 kJ/m³. Αξίζει να τονιστεί ότι μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό εμφανίζεται στο ίδιο ακριβώς δοκίμιο, όμως δε συμβαίνει το ίδιο για το μέγιστο μέτρο ελαστικότητας.

Μία πρώτη παρατήρηση που οφείλει να γίνει αφορά το γεγονός της μη ταύτισης των καμπυλών σ-ε και κατ' επέκταση των μετρούμενων μηχανικών ιδιοτήτων, μεταξύ των δοκιμίων πανομοιότυπης γεωμετρίας του ίδιου Run. Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί αν εξεταστούν οι τρεις ανωτέρω πίνακες οριζόντια, δηλαδή για το ίδιο Run, ή τα αντίστοιχα διαγράμματα (Εικόνα 31 έως Εικόνα 39) που ακολουθούν, στα οποία απεικονίζονται οι καμπύλες σ-ε των πέντε δοκιμίων του ίδιου Run, για κάθε ένα από τα εννιά Run.

Επιπλέον, στην Εικόνα 41 παρουσιάζονται η μέση τιμή και οι διακυμάνσεις των τιμών του μέτρου ελαστικότητας για κάθε Run. Παρατηρείται λοιπόν ότι ενώ το μέτρο ελαστικότητας δεν εμφανίζει μεγάλη διακύμανση μεταξύ των πέντε δοκιμών του κάθε Run, δεν ισχύει το ίδιο για την αντοχή σε εφελκυσμό (Εικόνα 42) και τη δυσθραυστότητα (Εικόνα 42). Αυτό εξηγείται εάν σκεφτεί κανείς τη διαδικασία της εκτύπωσης και την ανομοιομορφία-ασυνέχεια που αυτή δημιουργεί στις στρώσεις υλικού των δοκιμών. Το ακροφύσιο εναποθέτει υλικό στην πρώτη στρώση του κάθε δοκιμίου και στη συνέχεια επαναλαμβάνει το ίδιο για τη δεύτερη και κάθε επόμενη στρώση. Μεταξύ λοιπόν της κάθε στρώσης και της επόμενης της μεσολαβεί ένα χρονικό διάστημα στο οποίο η πρώτη έχει μειώσει τη θερμοκρασία της, ενώ η δεύτερη αυξημένης θερμοκρασίας που ακολουθεί εναποτίθεται επάνω σε αυτήν. Είναι αναμενόμενο λοιπόν, οι ιδιότητες να μην είναι ομοιόμορφες κατά την εκτύπωση των δοκιμών ίδιας γεωμετρίας σε κάθε Run.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τη δυσθραυστότητα, εμφανίζει μεγάλη διακύμανση λόγω του ότι εξαρτάται τόσο από την αντοχή σε εφελκυσμό, όσο και από την παραμόρφωση θραύσης ή ολκιμότητα του δοκιμίου. Και οι δύο ανωτέρω μηχανικές ιδιότητες επηρεάζονται από τις ασυνέχειες που δημιουργούνται κατά την εκτύπωση, όπως σχολιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Επιπλέον, η σημειωμένη παραμόρφωση θραύσης εξαρτάται από το πότε τερματίστηκε η μηχανή δοκιμή και επομένως, είναι πιθανό να διαφέρει από δοκίμιο σε δοκίμιο. Για παράδειγμα, ένα δοκίμιο για το οποίο εξάγονται δεδομένα φορτίου-μετατόπισης μέχρι την πλήρη θραύση του αναμένεται να έχει μεγαλύτερη δυσθραυστότητα από ένα πανομοιότυπο δοκίμιο για το οποίο η δοκιμή εφελκυσμού τερματίζεται πριν από την πλήρη θραύση του. Αυτά έχουν ως αποτέλεσμα την μεγάλη διακύμανση που παρατηρείται στη δυσθραυστότητα σε κάθε ένα από τα εννιά πειράματα.

Επιπλέον, παρατηρώντας τις καμπύλες σ-ε διακρίνουμε σε αυτές έναν αριθμό σκαλοπατιών. Το κάθε σκαλοπάτι αντιστοιχεί σε μία κατακόρυφη πτώση της τάσης, η οποία στη συνέχεια είτε αυξάνεται είτε παραμένει σταθερή. Το μοτίβο αυτό, όπου παρατηρείται, επαναλαμβάνεται ορισμένες φορές. Ο αριθμός των επαναλήψεων εξαρτάται κυρίως από τη γεωμετρία του δοκιμίου. Το κάθε σκαλοπάτι αντιστοιχεί σε θραύση ή αποκόλληση μέρους της δομής, με συνέπεια τη στιγμιαία πτώση του φορτίου. Καθώς η θραύση δεν είναι ολική, η υπόλοιπη δομή επαναφορτίζεται άμεσα, με αποτέλεσμα το δοκίμιο να συνεχίζει να φέρει φορτίο.

Η μορφή των σκαλοπατιών εμφανίζεται σχεδόν σε όλα τα διαγράμματα. Συγκεκριμένα, στις δομές με μοτίβο Grid (0,90) και Lines (0,0) η συμπεριφορά της φόρτισης έναντι της επιμήκυνσης είναι αρχικά γραμμική, ενώ με τη θραύση μέρους της δομής η φόρτιση στιγμιαία πέφτει και η συμπεριφορά της φόρτισης συναρτήσει της επιμήκυνσης γίνεται μη γραμμική και ανελαστική. Η μη γραμμική περιοχή εμφανίζει τα σκαλοπάτια σε επαναλαμβανόμενο μοτίβο μέχρι να σπάσουν όλα τα τμήματα της δομής. Στην Εικόνα 29 φαίνονται δύο δοκίμια των Run 1^ο και Run 5^ο, όπου και στις δυο περιπτώσεις η θραύση ξεκίνησε πρώτα στην εξωτερική δομή και τελείωσε στην εσωτερική δομή. Έτσι, η εμφάνιση των σκαλοπατιών δικαιολογείται, καθώς οι σπασμένες δομές χάνουν την ικανότητα μεταφοράς του φορτίου, ενώ η υπόλοιπη δομή συνεχίζει να φέρει φορτίο.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στις δομές με μοτίβο Lines (0,0) ο αριθμός των σκαλοπατιών της καμπύλης σ-ε ισούται το πολύ με τον αριθμό των γραμμών (lines) που δημιουργήθηκαν

κατά την εκτύπωση. Για παράδειγμα, τα δοκίμια του Run 4 διαθέτουν όλα τρεις γραμμές υλικού κατά τη διεύθυνση του εφελκυσμού. Επομένως, στην περίπτωση που αστοχούν διαδοχικά η μία μετά την άλλη, παρατηρούνται τρία διαδοχικά σκαλοπάτια (δοκίμιο 1, 3, 5), ενώ στην περίπτωση που αστοχούν ταυτόχρονα δύο μαζί, παρατηρούνται συνολικά δύο σκαλοπάτια (δοκίμια 2, 4).

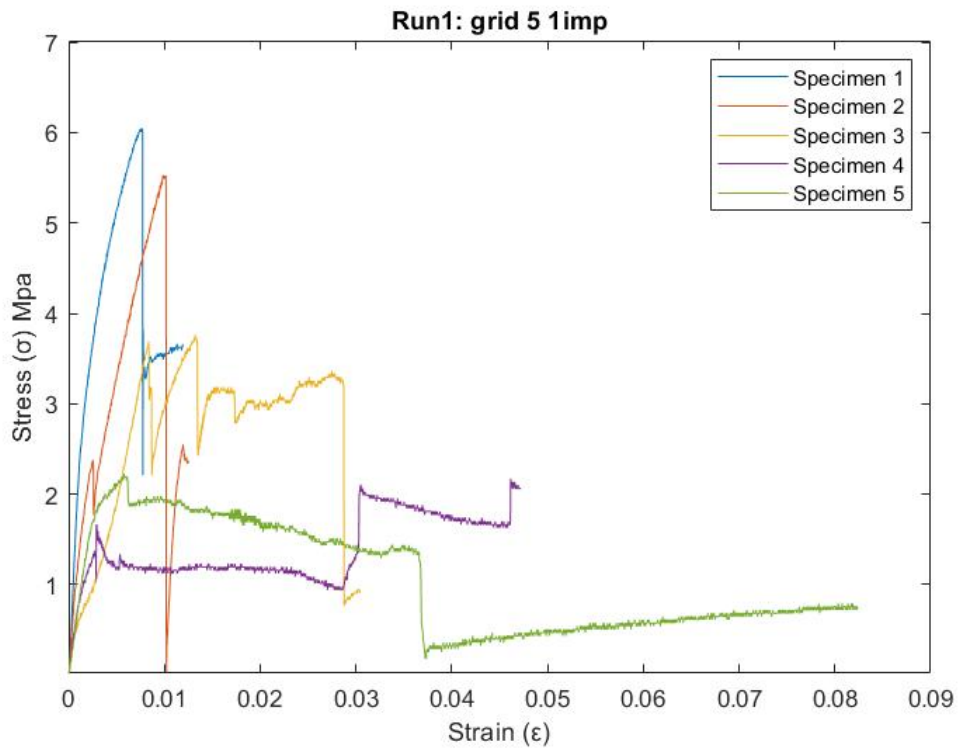
Στις δομές με μοτίβο Triangles από την άλλη, η εμφάνιση των σκαλοπατιών ξεκίνησε με την αποκόλληση των ινών στα σημεία ένωσης των τριγώνων και έπειτα με τη θραύση της εξωτερικής δομής. Στην Εικόνα 30 παρουσιάζεται η αποκόλληση των ινών στο σημείο ένωσης των Triangles, και αφορά περίπτωση σε δοκίμιο του Run 9. Τέλος, στο Run 9^ο της δομής Triangles, αν εξαιρέσουμε το δοκίμιο 1, παρατηρούμε ότι οι καμπύλες εμφανίζουν ένα μόνο σκαλοπάτι μέχρι την πλήρη θραύση του δοκιμίου. Πρακτικά, μετά την αποκόλληση των ινών που παρατηρείται στη δομή Triangles, δεν υπάρχει άλλη δομή του υλικού ικανή να συνεχίσει να παραλαμβάνει το φορτίο, άρα επέρχεται ολική αστοχία μέσω της αποκόλλησης.



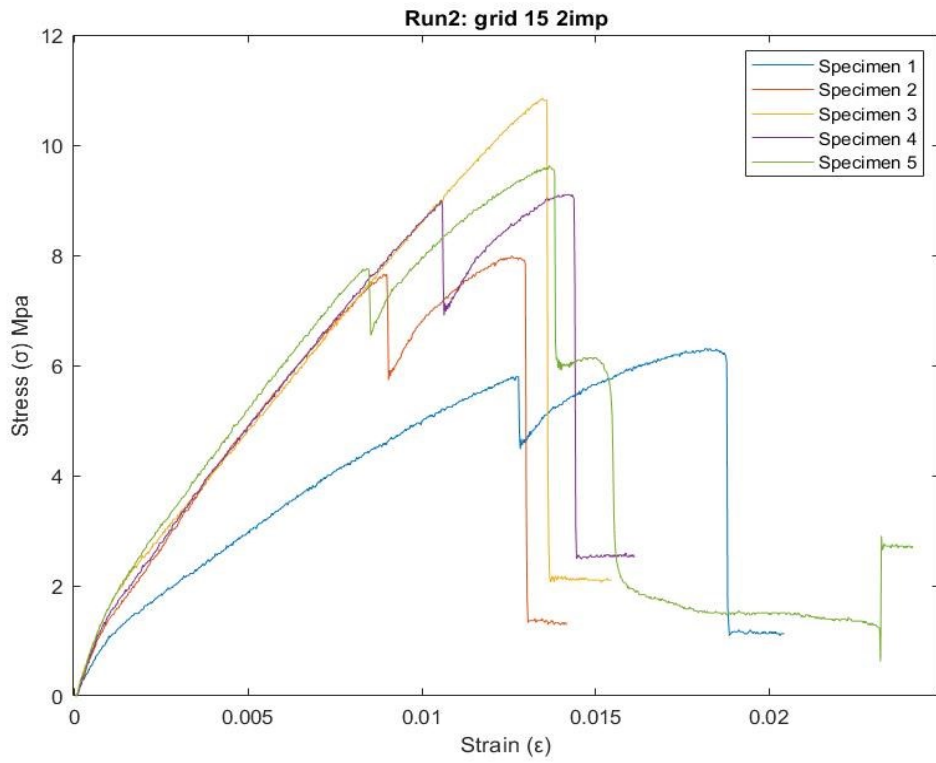
Εικόνα 29: Απεικόνιση θραύσης δοκιμίων



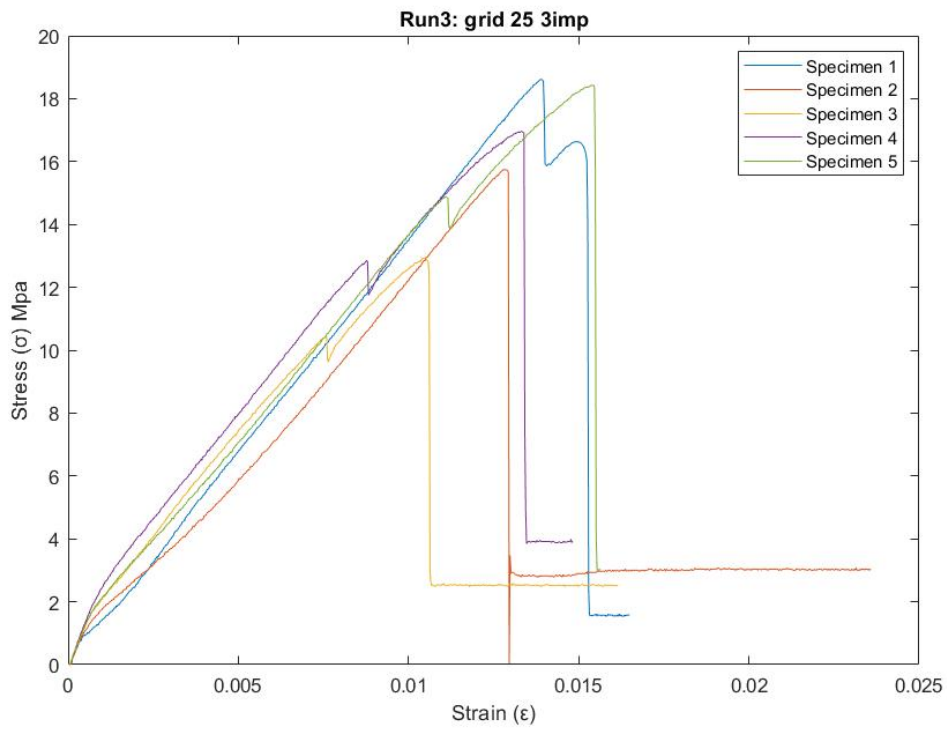
Εικόνα 30: Απεικόνιση αποκόλλησης ινών



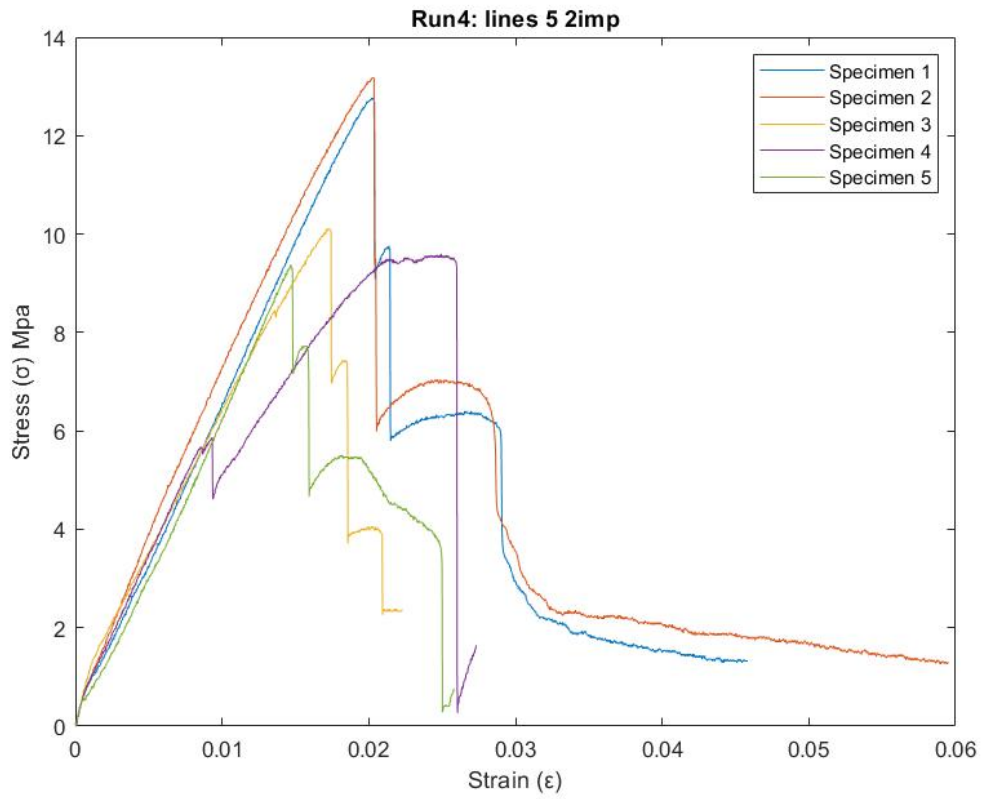
Εικόνα 31: Run 1 Grid 5% 1IMP



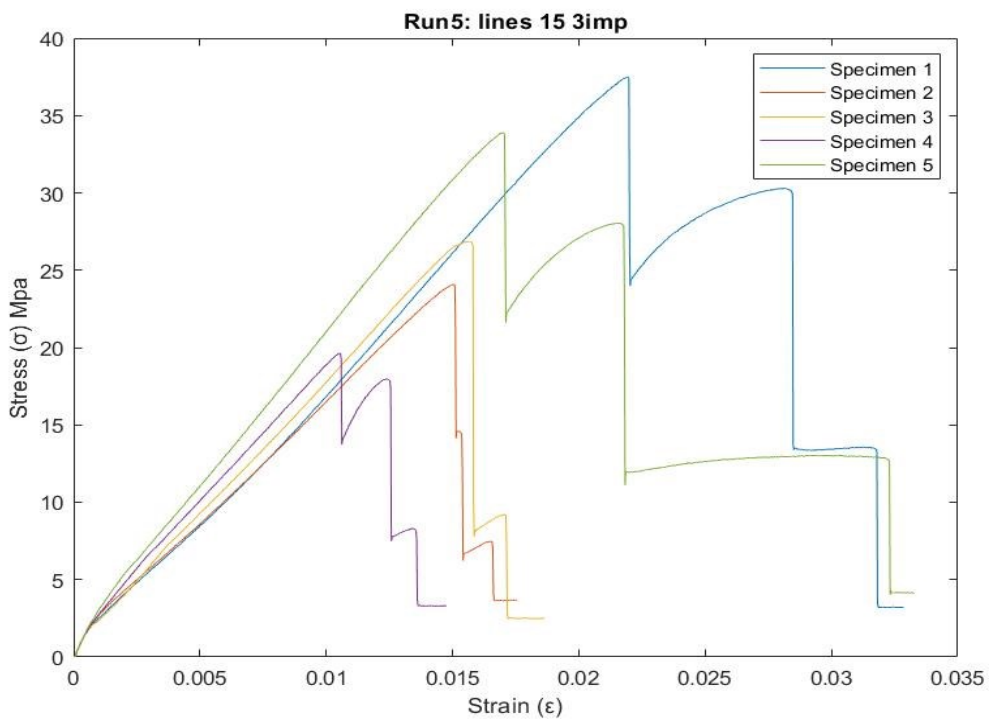
Εικόνα 32: Run 2 Grid 15% 2IMP



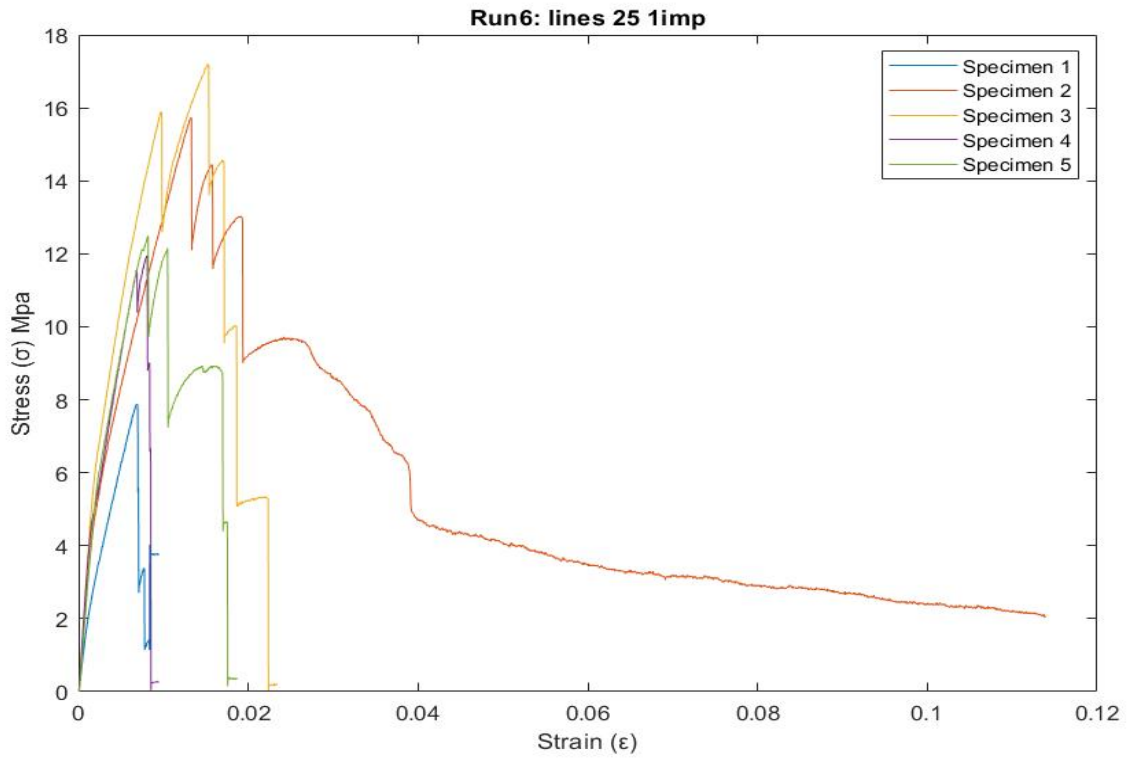
Εικόνα 33: Run3 Grid 25% 3IMP



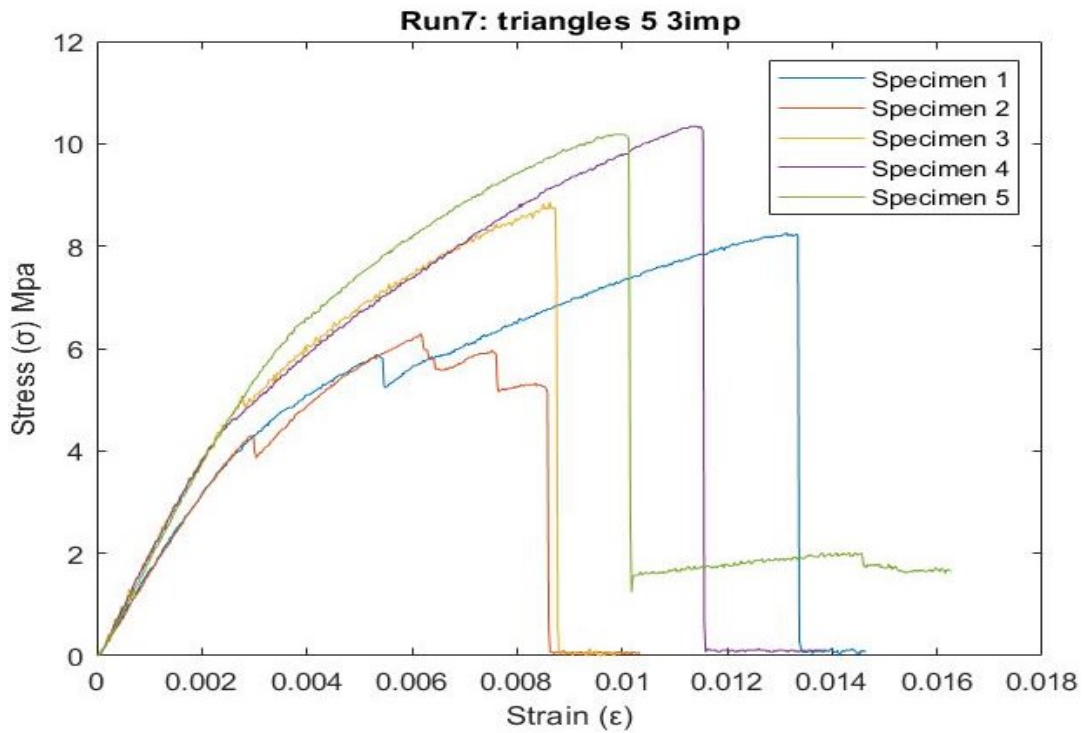
Εικόνα 34: Run 4 Lines 5% 2IMP



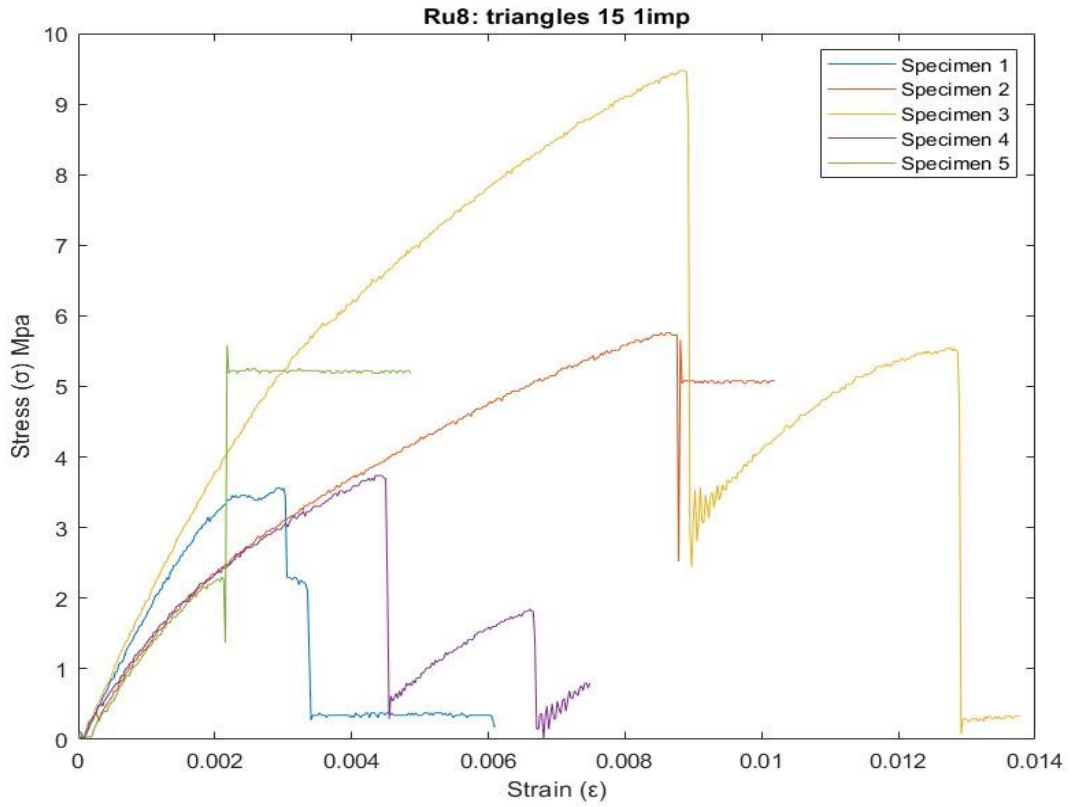
Εικόνα 35: Run 5 Lines 15% 3IMP



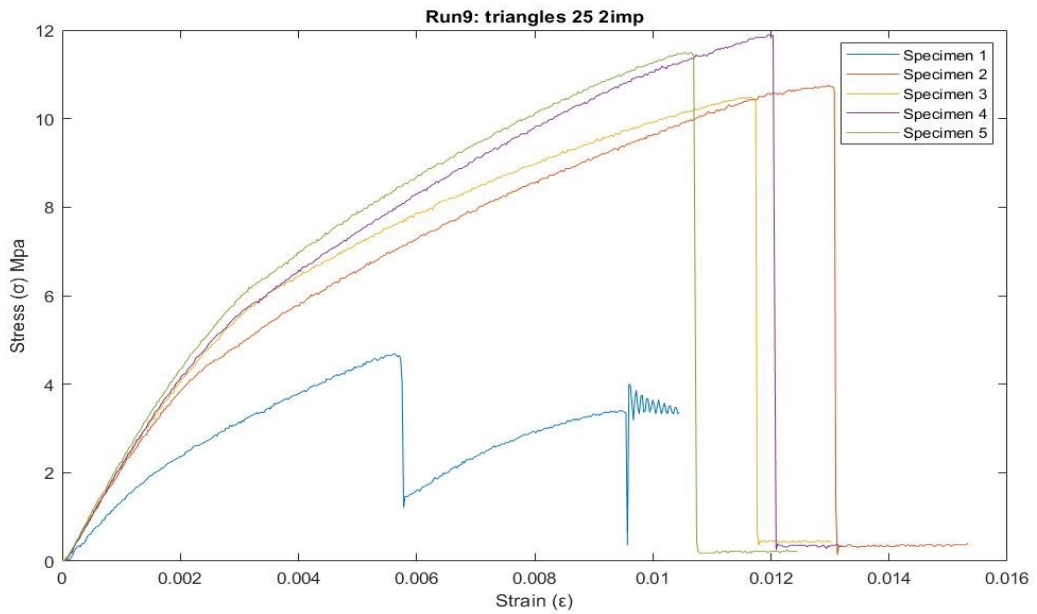
Εικόνα 36: Run 6 Lines 25% 1IMP



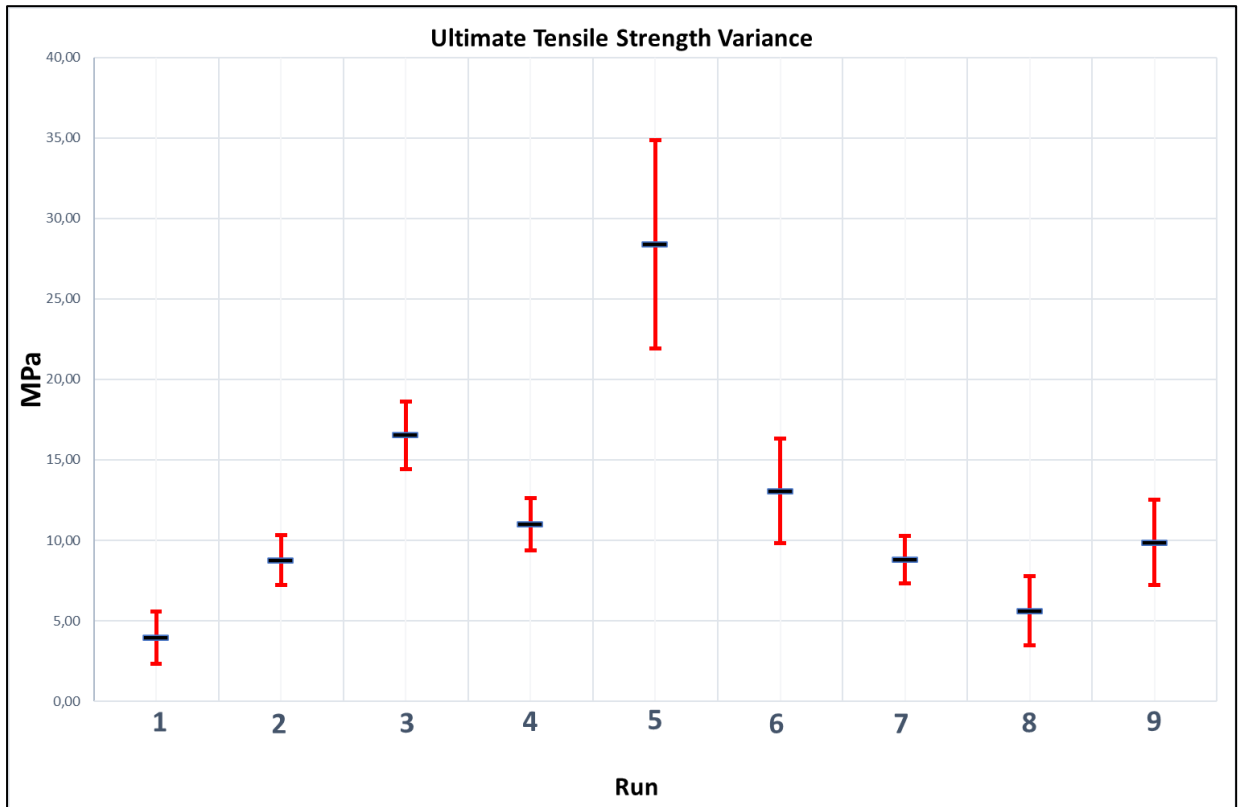
Εικόνα 37: Run 7 Triangles 5% 3IMP



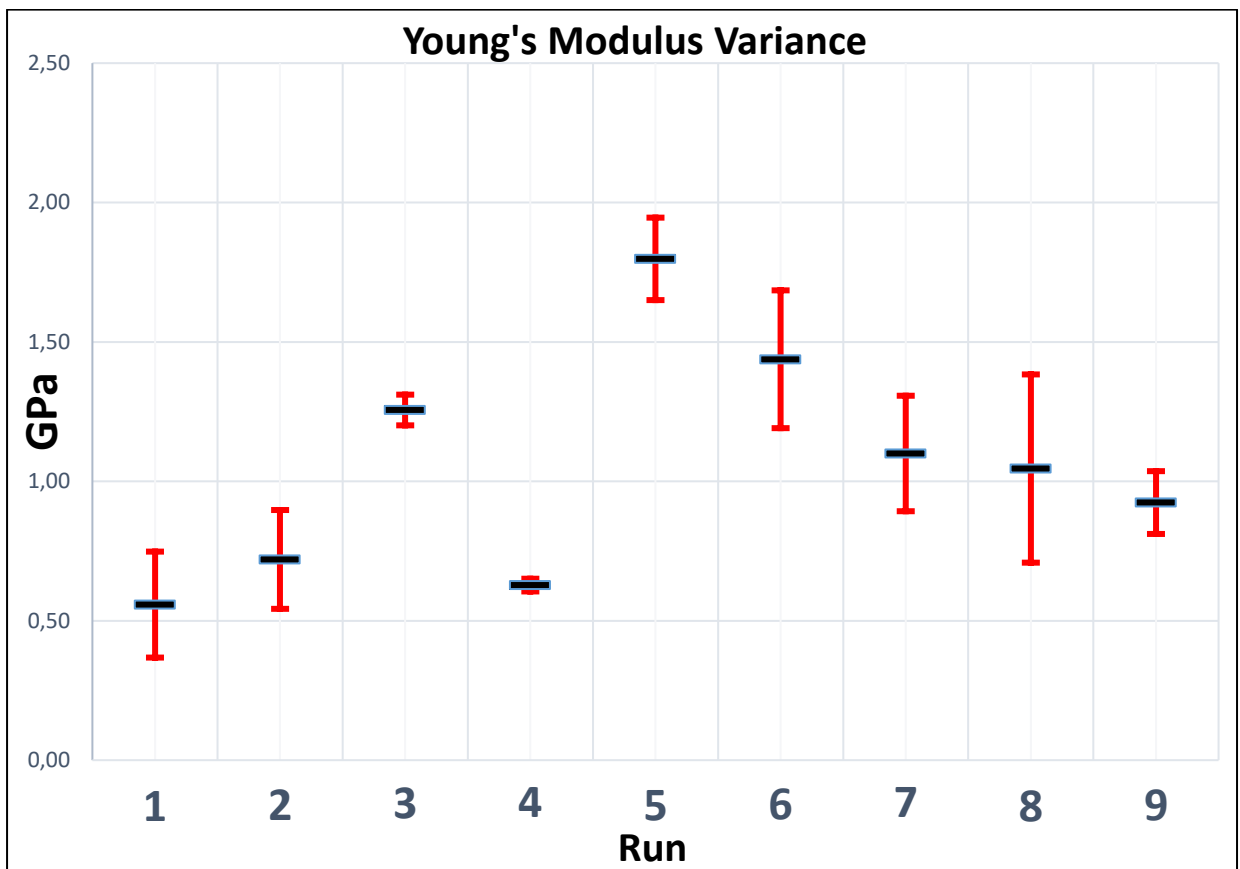
Εικόνα 38: Run8 Triangles 15% 1IMP



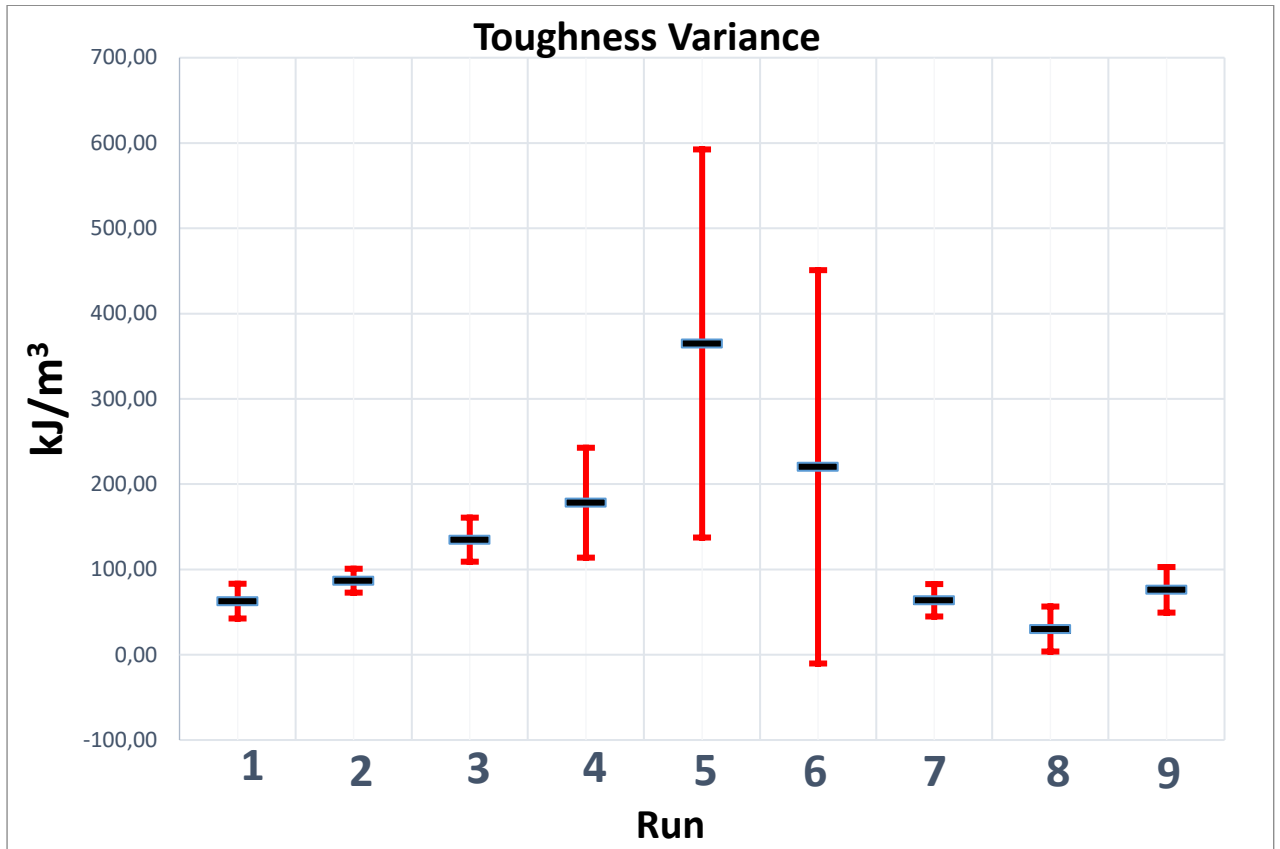
Εικόνα 39: Run9 Triangles 25% 2IMP



Εικόνα 40: Ultimate Tensile Strength Variance



Εικόνα 41: Young's Modulus Variance

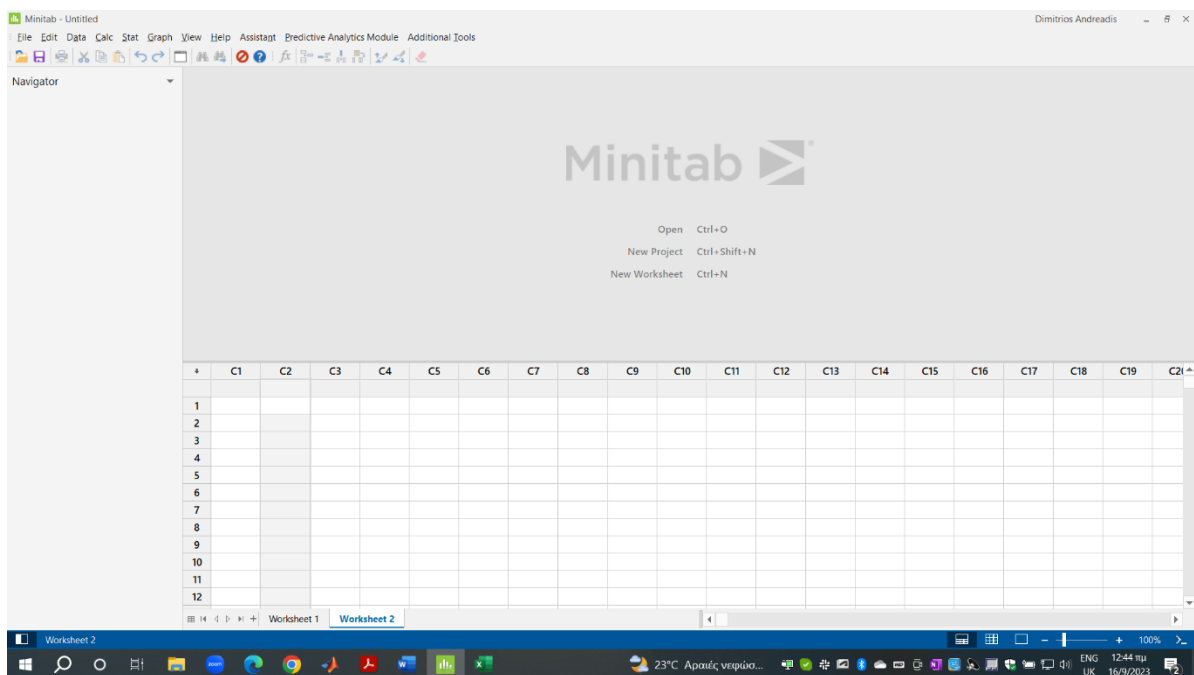


Εικόνα 42: Toughness Variance

6. Ανάλυση αποτελεσμάτων

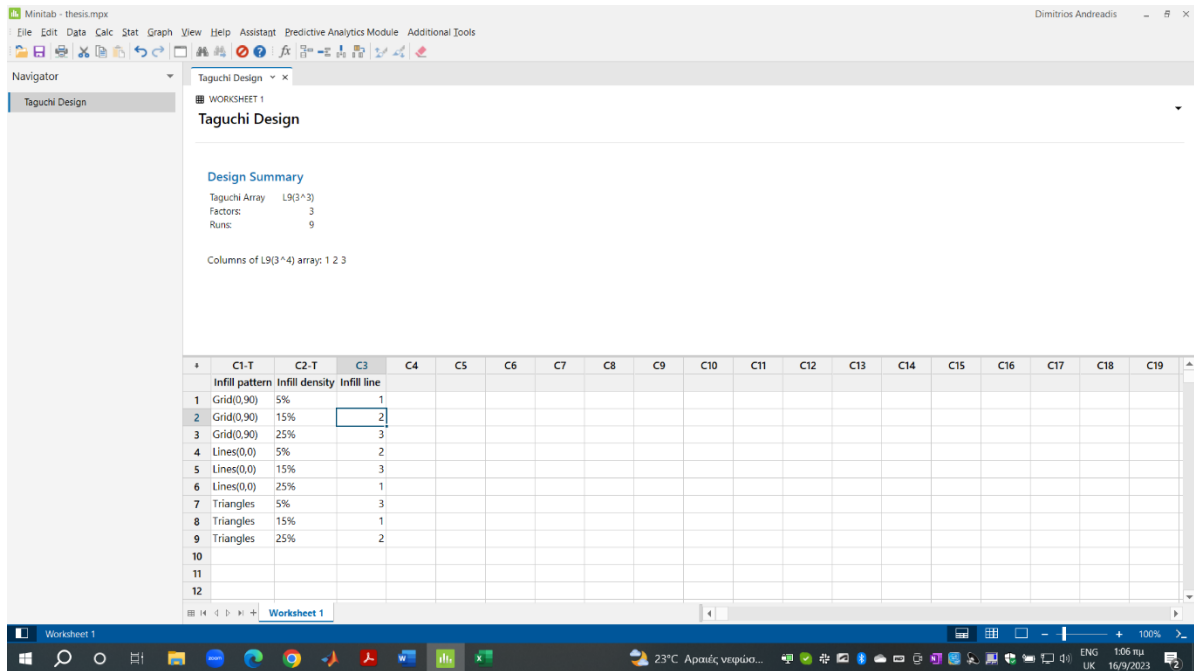
6.1 Εισαγωγή δεδομένων στο Minitab

Η τελευταία φάση μετά την ολοκλήρωση των πειραμάτων εφελκυσμού και της της συλλογής δεδομένων είναι η ανάλυση τους, ώστε να εξαχθούν τα συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση των επιλεχθέντων παραμέτρων ελέγχου στις μηχανικές ιδιότητες εφελκυσμού. Το λογισμικό το οποίο χρησιμοποιείται για τις συγκεκριμένες αναλύσεις είναι το Minitab. Το Minitab αυτοματοποιεί τους υπολογισμούς και τη δημιουργία γραφημάτων, επιτρέποντας στον χρήστη να εστιάσει περισσότερο στην ανάλυση των δεδομένων και στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Το συγκεκριμένο στατιστικό πακέτο επιλέχθηκε διότι ενσωματώνει λειτουργίες όπως σχεδιασμό πειραμάτων (DOE), ανάλυση Taguchi και ANOVA (Analysis of Variance).



Εικόνα 43: Περιβάλλον του Minitab

Για τη δημιουργία του ορθογωνίου πίνακα Taguchi, επιλέγουμε Stat > DOE > Taguchi > Create Taguchi Design. Στο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγουμε “3-Level Design” και στο πεδίο “Number of factors” επιλέγουμε τον αριθμό 3, όσοι είναι δηλαδή και οι παράγοντες του πειράματος που εξετάζουμε. Έπειτα, επιλέγουμε “Designs” και στο παράθυρο που ανοίγει διαλέγουμε τον πίνακα L₉. Στη συνέχεια επιλέγουμε “Factors” και εισάγουμε τους παράγοντες και τις τιμές των επιπέδων, πατώντας ok δημιουργείται ο πίνακας του Taguchi.



Εικόνα 44: Πίνακας Taguchi (Minitab)

Στις στήλες C4 και έπειτα εισάγουμε τις αποκρίσεις, τιμές ως προς τις οποίες θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε. Σύμφωνα με τη θεωρία του Taguchi, κάθε μετρήσιμο χαρακτηριστικό ενός προϊόντος το οποίο αναφέρεται ως χαρακτηριστικό ποιότητας, χρησιμοποιείται για να εκφράσει πόσο καλά το προϊόν επιτελεί μια συγκεκριμένη λειτουργία. Ανεξάρτητα από τον τρόπο με τον οποίο μετράται η ποιότητα ενός προϊόντος - με ένα μόνο κριτήριο ή με συνδυασμό πολλαπλών κριτηρίων, η μέτρηση θα διαθέτει ένα από τα ακόλουθα τρία χαρακτηριστικά υποδεικνύοντας την κατεύθυνση των περισσότερων επιθυμητών αποτελεσμάτων:

- το μεγαλύτερο είναι καλύτερο (larger is better).
- το μικρότερο είναι καλύτερο (smaller is better)
- το ονομαστικό είναι καλύτερο (nominal is best)

Σύμφωνα με το χαρακτηριστικό που θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε, επιλέγουμε ένα από τα τρία κριτήρια ποιότητας. Τα δεδομένα των πειραμάτων μας αυτό που ενδιαφέρει είναι η μελέτη των παραγόντων ως προς τη μέγιστη εφελκυστική τάση, το μέγιστο μέτρο ελαστικότητας και τη μέγιστη δυσθραυστότητας συνεπώς στη συγκεκριμένη ανάλυση γίνεται η χρήση του 'larger is better' χαρακτηριστικού. Θυμίζουμε ότι ο μαθηματικός τύπος που συνδέεται με τη 'larger is better' ανάλυση είναι:

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \left(\sum \frac{1}{y^2} \right)$$

Taguchi Analysis: Max Tensile Strength 1; Max Tensile Strength 2; Max Tensile Strength 3; Max Tensile Strength 4; Max Tensile Strength 5 versus Infill pattern; Infill densit...

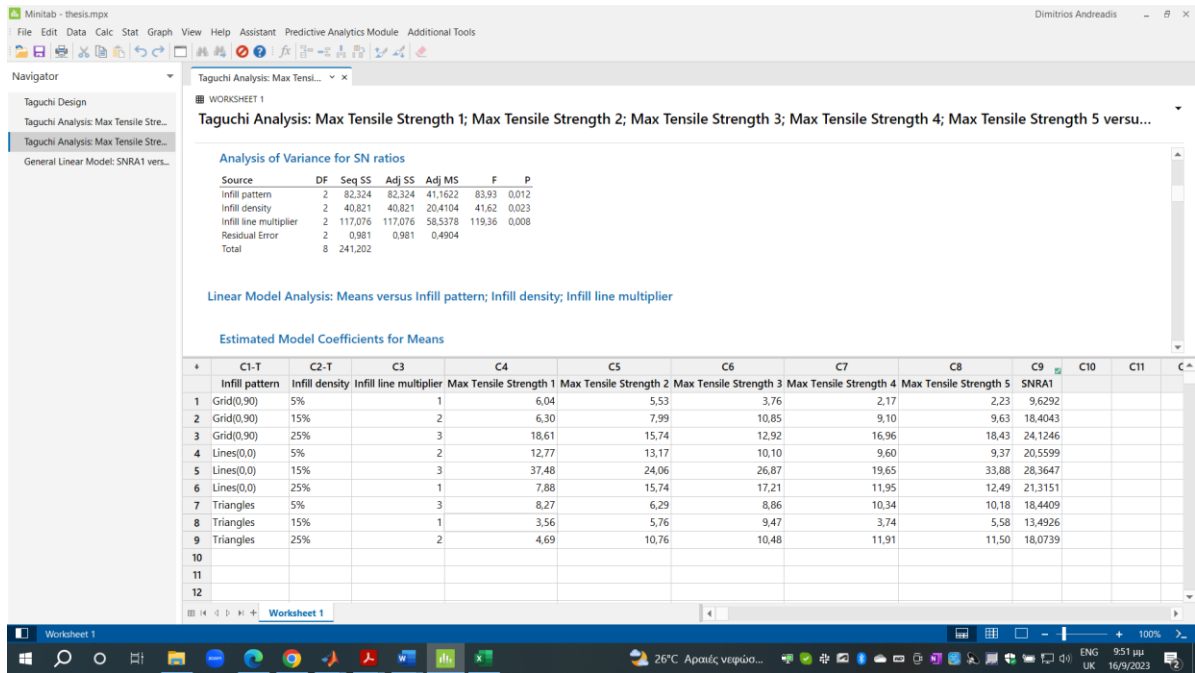
	C1-T	C2-T	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21
	Infill pattern	Infill density	Infill line multiplier	Max Tensile1	Max Tensile2	Max Tensile3	Max Tensile4	Max Tensile5	Young Modulus1	Young Modulus2	Young Modulus3	Young Modulus4	Young Modulus5	Toughness1	Toughness2	Toughness3	Toughness4	Toughness5			
1	Grid(90)	5%	1	6.04	5.53	3.76	2.17	2.23	0.90	0.56	0.41	0.57	0.36	47.0	37.6	29.4	63.2	85.0			
2	Grid(90)	15%	2	6.30	7.99	10.85	9.10	9.63	0.46	0.85	0.83	0.85	0.61	80.5	69.5	87.1	89.2	107.8			
3	Grid(90)	25%	3	18.61	15.74	12.92	16.96	18.43	1.34	1.21	1.24	1.28	1.21	155.1	133.9	92.6	136.4	156.5			
4	Lines(0)	5%	2	12.77	13.17	10.10	9.60	9.27	0.63	0.65	0.59	0.63	0.64	223.9	264.3	118.3	164.2	120.6			
5	Lines(0)	15%	3	37.48	24.06	26.87	19.65	23.88	1.72	1.61	1.79	1.87	2.00	451.1	208.2	240.3	156.3	568.8			
6	Lines(0)	25%	1	7.88	15.74	17.21	11.95	12.49	1.16	1.19	1.65	1.67	1.52	39.2	607.5	242.4	64.8	147.6			
7	Triangles	5%	3	8.27	6.29	8.86	10.34	10.18	1.09	1.43	1.09	0.86	1.03	75.2	37.2	50.2	77.8	78.8			
8	Triangles	15%	1	3.56	5.76	9.47	3.74	5.58	1.57	0.67	1.08	0.85	1.06	8.7	38.0	72.5	13.7	16.8			
9	Triangles	25%	2	4.69	10.76	10.48	11.91	11.50	0.84	0.83	0.87	0.99	1.09	29.4	93.6	83.7	93.2	80.6			

Εικόνα 45: Πλήρως συμπληρωμένο φύλλο εργασίας

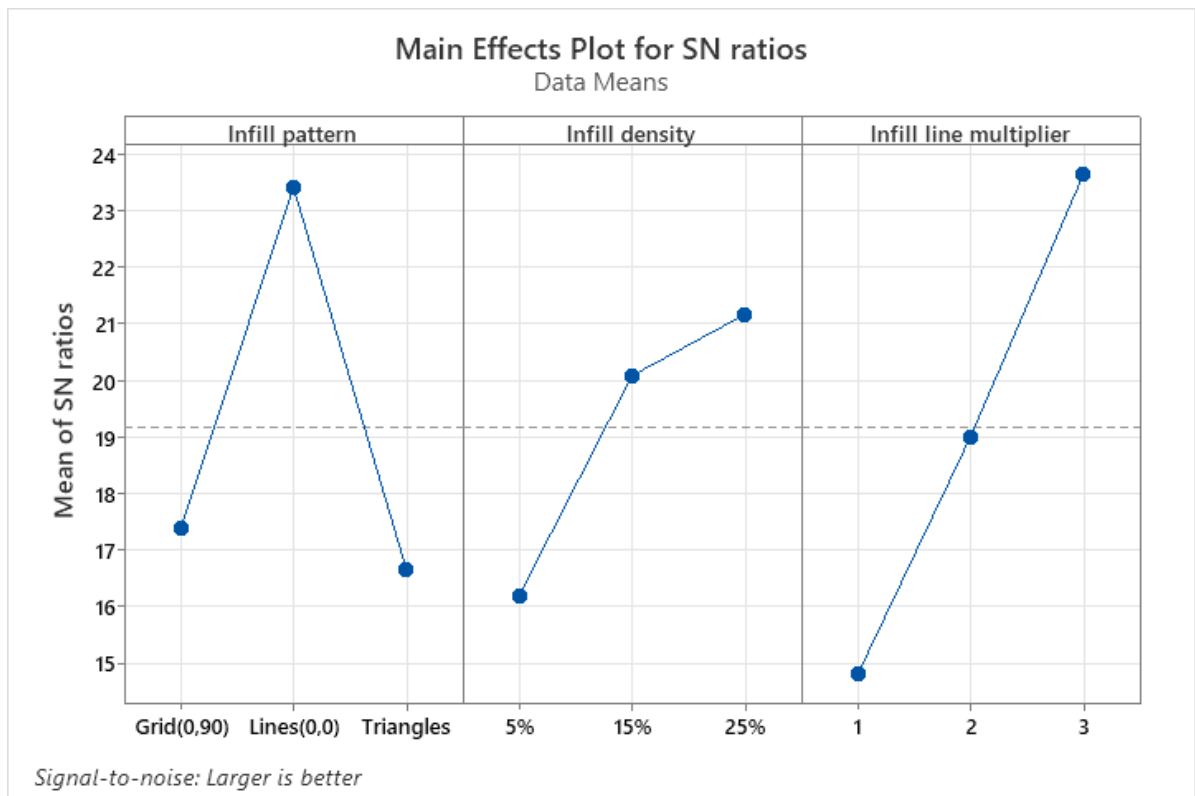
Εφόσον ο πίνακας έχει πλήρως συμπληρωθεί με όλες τις μετρήσεις για όλα τα χαρακτηριστικά ποιότητας που έχουν επιλεγεί για βελτιστοποίηση, το επόμενο βήμα είναι η ανάλυση αυτών των δεδομένων.

6.2 Αποτελέσματα αναλύσεων

Το λογισμικό Minitab εξάγει ευκολά τα αποτελέσματα της ανάλυσης, από το μενού επιλέγουμε Stat > DOE > Taguchi > Analyze Taguchi Design. Στο παράθυρο που εμφανίζεται, από την αριστερή στήλη επιλέγουμε τα δεδομένα ως προς τα οποία θα κάνουμε την ανάλυση μας, στη περίπτωση μας η μέγιστη εφελκυστική τάση των πειραμάτων, ώστε να εμφανιστούν στο διπλανό πλαίσιο “Response data”. Στο παράθυρο που εμφανίζεται πατώντας το “Graphs” επιλέγουμε μόνο το πρώτο πλαίσιο “Signal to Noise ratios”. Αντίστοιχα στο παράθυρο που εμφανίζεται πατώντας “Analysis” επιλέγουμε και στις δύο στήλες το “Signal to Noise ratios” και πατάμε OK. Έπειτα, στο παράθυρο που εμφανίζεται πατώντας “Options” επιλέγουμε την τέταρτη κουκκίδα “larger is better”. Πατώντας διαδοχικά OK εμφανίζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης Taguchi.



Εικόνα 46: Αποτελέσματα ανάλυσης Taguchi



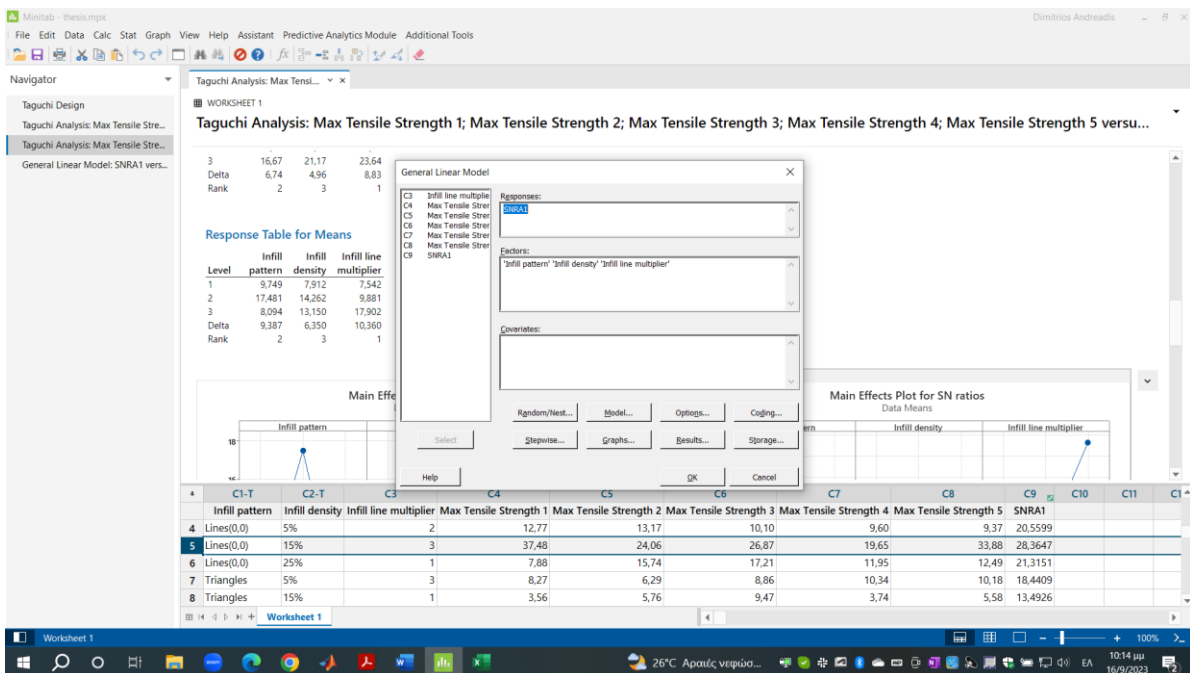
Εικόνα 47: Main Effects Plot for SN ratios (Max Tensile)

Ο λόγος σήματος προς θόρυβο (S/N ratio), μετρά την ευαισθησία του χαρακτηριστικού ποιότητας που διερευνάται με ελεγχόμενο τρόπο στους παράγοντες επηρεασμού (παράγοντες θορύβου) που δεν ελέγχονται. Ο στόχος οποιουδήποτε πειράματος, είναι πάντα να προσδιοριστεί ο υψηλότερος δυνατός λόγος S/N για το αποτέλεσμα. Μια υψηλή τιμή του S/N υποδηλώνει ότι το σήμα είναι πολύ μεγαλύτερο από τις τυχαίες

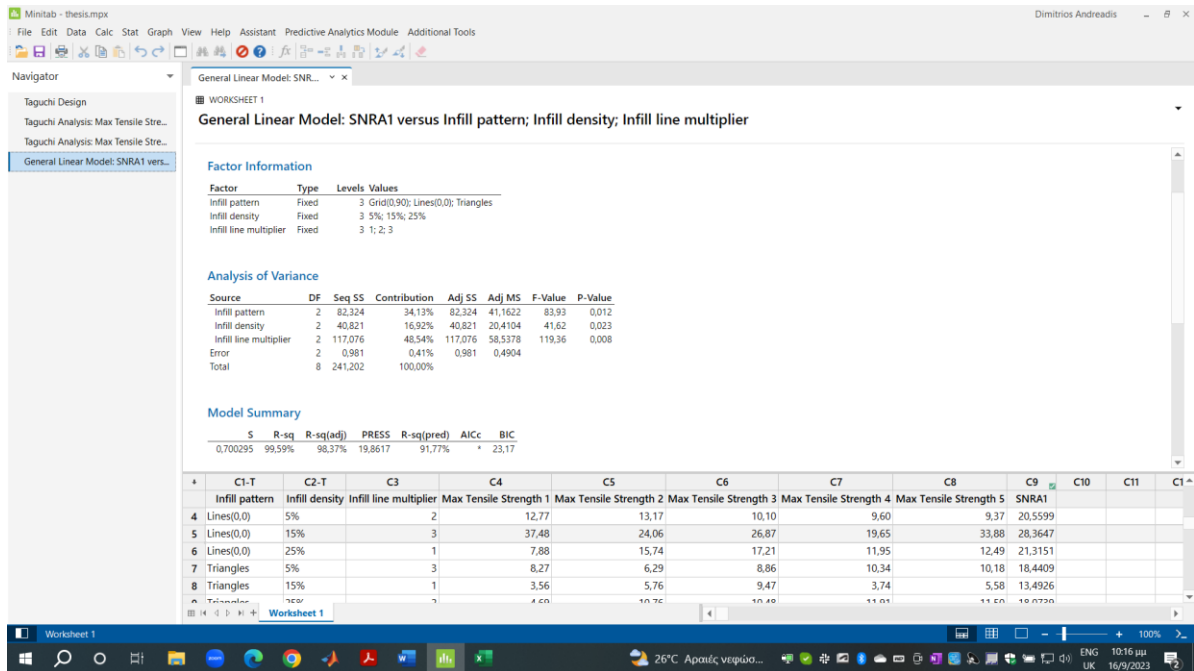
επιδράσεις των παραγόντων θορύβου. Ο σχεδιασμός του προϊόντος ή η διαδικασία επεξεργασίας που είναι σύμφωνη με τον υψηλότερο λόγο S/N αποδίδει πάντα τη βέλτιστη ποιότητα με ελάχιστη διακύμανση. Η ανάλυση S/N έχει σχεδιαστεί για τη μέτρηση ποιοτικών χαρακτηριστικών.

Από την Εικόνα 47 βέλτιστος συνδυασμός παραγόντων είναι αυτός που έχει τις υψηλότερες τιμές SNR, δηλαδή οι κουκκίδες στο διάγραμμα που βρίσκονται υψηλότερα σε σχέση με τις υπόλοιπες σε κάθε παράγοντα. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα ο βέλτιστος συνδυασμός παραγόντων φαίνεται να είναι ο [Lines(0,0),25%,3], ο οποίος δεν υπήρχε στο πείραμά μας. Επίσης από την Εικόνα 46 παρατηρούμε ότι προστέθηκε μια ακόμη στήλη του «SNRA1», όπου η υψηλότερη τιμή SNR είναι 28,3647dB και αντιστοιχεί στο πείραμα 7.

Στη συνέχεια θα προχωρήσουμε στη διεξαγωγή της ανάλυσης διακύμανσης (ANOVA), όπου θα διαπιστώσουμε την επίδραση που έχει ο κάθε παράγοντας στο συνολικό πείραμα. Από το μενού επιλέγουμε Stat > ANOVA > General Linear Model > Fit General Linear Model και στο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγουμε στην αριστερή στήλη “SNRA1” και πατάμε “Select” ώστε να εμφανιστεί στο πλαίσιο “Responses”. Στη συνέχεια, επιλέγουμε όλους τους παράγοντες του πειράματος και αφού ενεργοποιήσουμε το πλαίσιο “Factors” πατάμε “Select” για να εμφανιστούν σε αυτό. Έπειτα, στο παράθυρο που εμφανίζεται πατώντας “Results” στο πλαίσιο “Display of results” επιλέγουμε “Expanded tables” και στη συνέχεια πατάμε διαδοχικά OK, εμφανίζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ANOVA.



Εικόνα 48: Βήματα ανάλυσης ANOVA



Εικόνα 49: Αποτελέσματα ANOVA

Στην Εικόνα 49 φαίνεται ο πίνακας με τα αποτελέσματα της ανάλυσης διακύμανσης (ANOVA) δίνοντας ως “response data” το SNRA1 των μέγιστων εφελκυστικών τάσεων. Στον πίνακα ότι ο κάθε παράγοντας που εξετάστηκε στο πείραμα, αναφέρεται ως “Source”. Τα πιο βασικά στοιχεία για την ερμηνεία του πίνακα είναι η στήλη “Contribution”, “F- value”, “P-value” και από το “Model Summary” το “R-square”.

R² (R- square): Είναι το ποσοστό επί τοις εκατό (%) της απόκλισης στην απόκριση που εξηγείται από το μοντέλο. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή του R², τόσο καλύτερα το μοντέλο ταιριάζει με τα δεδομένα. Το R² κυμαίνεται πάντα μεταξύ 0% και 100%. Στο “Model Summary” η τιμή του R² είναι 99.59%, μια σχετικά υψηλή τιμή η οποία σημαίνει ότι σχεδόν το 99.59% της μεταβλητότητας του μοντέλου εξηγείται από όλους τους παράγοντες. Το υπόλοιπο ποσοστό το οποίο είναι 0.41%, αναφέρεται στο σφάλμα (error) του μοντέλου και είναι η μεταβλητότητα η οποία δεν μπορεί να εξηγηθεί από το δεδομένο μοντέλο. Γενικά το σφάλμα όσο μικρότερο είναι, τόσο το καλύτερο.

Contribution: Εμφανίζει το ποσοστό που κάθε παράγοντας (Source) στον πίνακα ANOVA συνεισφέρει στο συνολικό διαδοχικό άθροισμα τετραγώνων (Seq SS). Υψηλότερα ποσοστά υποδεικνύουν ότι ο παράγοντας συνεισφέρει περισσότερο στην απόκλιση της απόκρισης. Στον πίνακα ANOVA, το ποσοστό συνεισφοράς του παράγοντα “infill pattern” είναι 34.13%, του παράγοντα “infill density” 16.92% και του παράγοντα “infill line multiplier” 48.58% , το ποσοστό συνεισφοράς του σφάλματος “Error” 0.41%.

F-value: Η τιμή F (F-value) είναι ο λόγος του μέσου τετραγώνου λόγω ενός παράγοντα και του μέσου τετραγωνικού σφάλματος. Μια μεγάλη τιμή F σημαίνει ότι η επίδραση αυτού του παράγοντα είναι μεγάλη σε σύγκριση με τη διακύμανση του σφάλματος. Επίσης, όσο μεγαλύτερη η τιμή, τόσο πιο σημαντικός είναι αυτός ο παράγοντας να επηρεάζει την απόκριση της διαδικασίας. Έτσι, οι τιμές F μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ταξινόμηση των παραγόντων. Μια τιμή F μικρότερη από τη

μονάδα σημαίνει ότι η επίδραση του παράγοντα είναι μικρότερη από το σφάλμα του μοντέλου. Μια τιμή F μεγαλύτερη από δύο σημαίνει ότι ο παράγοντας δεν είναι αρκετά μικρός, ενώ μεγαλύτερη από τέσσερα σημαίνει ότι η επίδραση του παράγοντα είναι αρκετά μεγάλη. Στον πίνακα ANOVA οι τιμές F για τους παράγοντες με σειρά κατάταξης της επίδρασης τους από την μεγαλύτερη στην μικρότερη είναι “infill line multiplier” με τιμή F 119,36, “infill pattern” με 83,93 και “infill density” με 41,62 αντίστοιχα.

P-value: Η τιμή P (P-value) είναι μια πιθανότητα που μετράει την ένδειξη κατά της μηδενικής υπόθεσης (null hypothesis). Οι χαμηλότερες πιθανότητες παρέχουν ισχυρότερη ένδειξη κατά της μηδενικής υπόθεσης. Για να προσδιοριστεί εάν η σχέση μεταξύ της απόκρισης και κάθε όρου στο μοντέλο είναι στατιστικά σημαντική, συγκρίνεται η τιμή P του όρου με το επίπεδο σημαντικότητας για την αξιολόγηση της μηδενικής υπόθεσης. Η μηδενική υπόθεση ισχυρίζεται ότι δεν υπάρχει σχέση μεταξύ του όρου και της απόκρισης. Συνήθως, ένα επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0,05$ λειτουργεί καλά. Ένα επίπεδο σημαντικότητας 0,05 υποδεικνύει κίνδυνο 5% για να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι υπάρχει σχέση, ενώ στη πραγματικότητα δεν υφίσταται.

P-value $\leq 0,05$: Η σχέση είναι στατιστικά σημαντική

Εάν η τιμή p είναι μικρότερη ή ίση με το επίπεδο σημαντικότητας, μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι υπάρχει στατιστικά σημαντική σχέση μεταξύ της μεταβλητής απόκρισης και του όρου.

P-value $> 0,05$: Η σχέση δεν είναι στατιστικά σημαντική

Εάν η τιμή p είναι μεγαλύτερη από το επίπεδο σημαντικότητας, δεν μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι υπάρχει στατιστικά σημαντική σχέση μεταξύ της μεταβλητής απόκρισης και του όρου. Μπορεί να γίνει επανατοποθέτηση του μοντέλου χωρίς τον όρο.

Στον πίνακα ANOVA η τιμή P του παράγοντα “infill line multiplier” είναι $0,008 < 0,05$, του παράγοντα “infill pattern” είναι $0,012 < 0,05$ και του παράγοντα “infill density” είναι $0,023 < 0,05$ επομένως συμπεραίνουμε ότι όλοι οι παράγοντες είναι στατιστικά σημαντικοί.

Πίνακας 11: Factor information

Factor Information

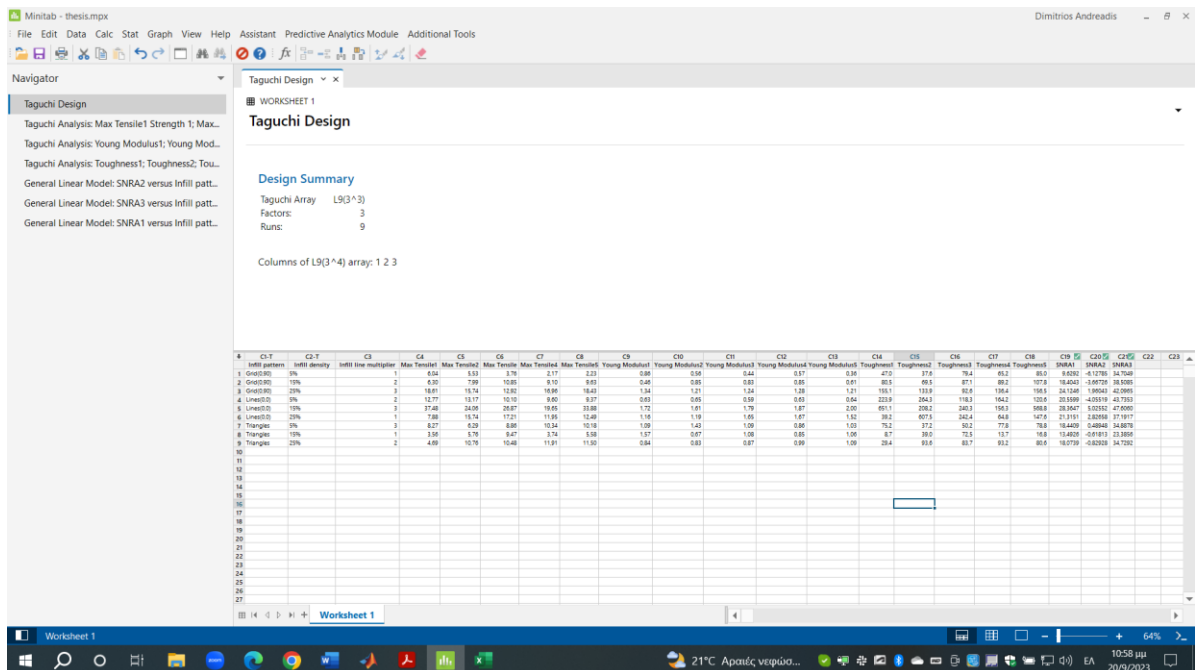
Factor	Type	Levels	Values
Infill pattern	Fixed	3	Grid(0,90); Lines(0,0); Triangles
Infill density	Fixed	3	5%; 15%; 25%
Infill line multiplier	Fixed	3	1; 2; 3

Πίνακας 12: Analysis of Variance (Max Tensile)

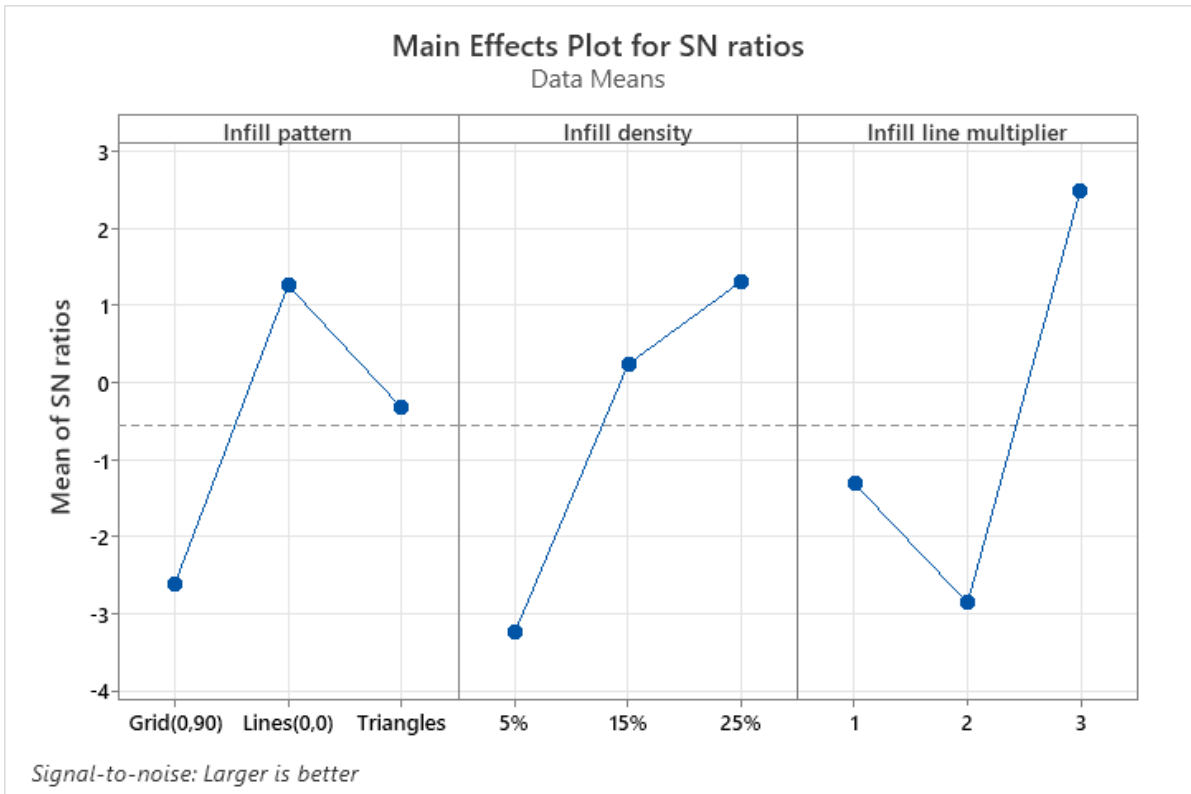
Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Infill pattern	2	82,324	34,13%	82,324	41,1622	83,93	0,012
Infill density	2	40,821	16,92%	40,821	20,4104	41,62	0,023
Infill line multiplier	2	117,076	48,54%	117,076	58,5378	119,36	0,008
Error	2	0,981	0,41%	0,981	0,4904		
Total	8	241,202	100,00%				

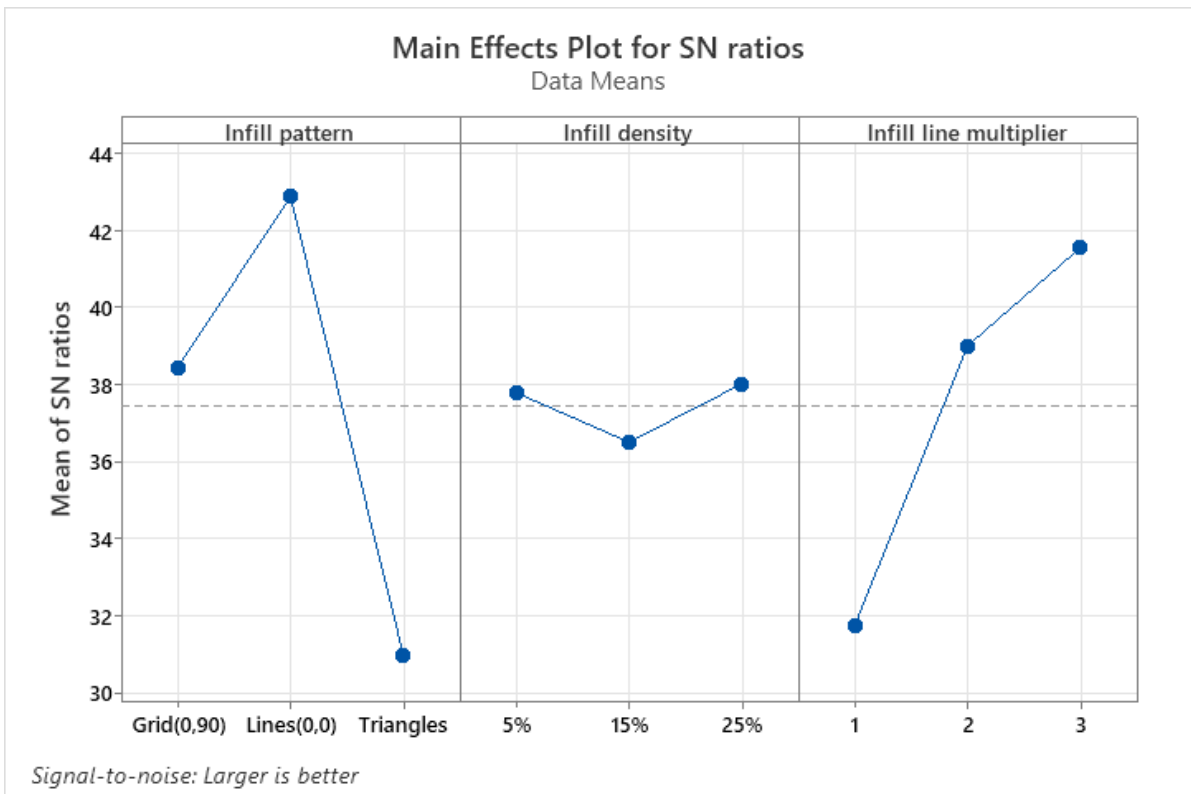
Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τα υπόλοιπα ποιοτικά χαρακτηριστικά. Για λόγους συντομίας όμως, θα παρουσιαστούν μόνο τα αποτελέσματα των αναλύσεων, καθώς τα βήματα επαναλαμβάνονται αυτούσια.



Εικόνα 50: Πλήρης πίνακας αποτελεσμάτων Taguchi



Εικόνα 51: Main Effects Plot for SN ratios (Young Modulus)



Εικόνα 52: Main Effects Plot for SN ratios (Toughness)

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Infill pattern	2	22,799	22,12%	22,7991	11,3995	23,62	0,041
Infill density	2	33,953	32,94%	33,9525	16,9763	35,18	0,028
Infill line multiplier	2	45,352	44,00%	45,3523	22,6761	46,99	0,021
Error	2	0,965	0,94%	0,9651	0,4825		
Total	8	103,069	100,00%				

Εικόνα 53: Analysis of Variance (Young Modulus)

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Infill pattern	2	214,987	55,88%	214,987	107,494	18,48	0,051
Infill density	2	3,948	1,03%	3,948	1,974	0,34	0,747
Infill line multiplier	2	154,164	40,07%	154,164	77,082	13,25	0,070
Error	2	11,634	3,02%	11,634	5,817		
Total	8	384,733	100,00%				

Εικόνα 54: Analysis of Variance (Toughness)

Στην Εικόνα 51 και Εικόνα 52 παρουσιάζονται τα διαγράμματα των επιδράσεων των παραγόντων για τη μεγιστοποίηση του μέτρου ελαστικότητας, και της δυσθραυστότητας αντίστοιχα. Ο βέλτιστος συνδυασμός παραγόντων παραμένει ο [Lines(0,0),25%,3]. Αυτό που σημειώνεται βέβαια είναι η μικρή απόκλιση των λόγων S/N του παράγοντα ποσοστού πλήρωσης (infill density) στη περίπτωση της μέγιστης δυσθραυστότητας, καθώς εναλλαγή των λόγων S/N παράγοντα μοτίβου (infill pattern) μεταξύ Grid(0, 90) και Triangles.

Από τη ανάλυση (ANOVA) παρατηρούμε τα εξής αξιοσημείωτα:

- Για τη μεγιστοποίηση της δυσθραυστότητας, το ποσοστό συνεισφοράς του μοτίβου (Infill pattern) υπερέβη αυτή του πολλαπλασιαστή γραμμών πλήρωσης (Infill line multiplier). Η συνεισφορά του ποσοστού πλήρωσης (Infill density) είναι 1,03%, η τιμή $F=0,34$ είναι μικρότερη του 2 σημαίνει ότι επίδραση του παράγοντα μικρή ενώ με τιμή $P=0,747 > 0,05$ σημαίνει ότι ο παράγοντας δεν είναι στατιστικά σημαντικός.
- Από την άλλη, για τη μεγιστοποίηση του μέτρου ελαστικότητα η συνεισφορά του ποσοστού πλήρωσης (Infill density) έρχεται δεύτερη μετά το παράγοντα του πολλαπλασιαστή γραμμών πλήρωσης, ενώ όλοι οι παράγοντες έχουν μεγάλη επίδραση και είναι στατιστικά σημαντικές.

6.3 Ανάλυση επαναληψιμότητας μετρήσεων

Η επαναληψιμότητα μετρήσεων αναφέρεται στην ικανότητα ενός μέτρου ή μιας μετρολογικής διαδικασίας να παράγει συνεπείς αποτελέσματα κάθε φορά που πραγματοποιείται η μέτρηση. Η επαναληψιμότητα στα πειράματα εφελκυσμού αποτελεί σημαντική έννοια στον τομέα των υλικών, της μηχανικής. Έτσι είναι απαραίτητο να εξεταστεί για τον εκτυπωτή μας ώστε να καταλάβουμε αν κάποια παράμετρο ελέγχου επηρεάζει την επαναληψιμότητα των της διεργασίας. Το Minitab χρησιμοποιώντας την ανάλυση “one way ANOVA and Tuckey test” δίνει τη δυνατότητα να διαπιστώσουμε εάν οι μέσοι όροι από διάφορα σύνολα ή συνθήκες είναι σημαντικά διαφορετικοί μεταξύ τους. Στη περίπτωση μας θα αξιολογήσουμε ποια παράμετρος ελέγχου είναι σημαντικά διαφορετική από την άλλη. Από το μενού επιλέγουμε Stat > ANOVA > One-way ANOVA, στο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγουμε την παράμετρο ελέγχου που επιθυμούμε και την απόκριση την οποία θα εξετάσουμε. Έπειτα από την επιλογή Comparisons επιλέγουμε 2 “Tuckey test” και πατάμε διαδοχικά ok.

Οι αποκρίσεις που θέλουμε να εξετάσουμε αφορούν την μέση τιμή (mean value) της η μέγιστης εφελκυστικής τάσης (Max Tensile), το μέτρο ελαστικότητας (Young Modulus) και η δυσθραυστότητα (Toughness) καθώς και τις τυπικές αποκλίσεις αυτών. Έτσι η ανάλυση αυτή θα μας επιτρέψει την παρατήρηση της σημαντικότητας κάθε παραμέτρου ξεχωριστά. Στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 13 και

Πίνακας 14) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του Tuckey test των παραμέτρων ελέγχου ως προς τη μέση τιμή και τη διακύμανση των αποκρίσεων “μέγιστη εφελκυστική τάση, μέτρο ελαστικότητας και δυσθραυστότητα” των πέντε δοκιμών κάθε Run.

Πίνακας 13: Αποτελέσματα μέσης τιμής αποκρίσεων (Tuckey test)

a) MeanMaxTensile versus Infill pattern

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Infill pattern	N	Mean	Grouping
Lines(0,0)	3	17,48	A
Grid(0,90)	3	9,75	A
Triangles	3	8,09	A

Means that do not share a letter are significantly different.

b) MeanYoungModulus versus Infill pattern

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Infill pattern	N	Mean	Grouping
Lines(0,0)	3	1,288	A
Triangles	3	1,0233	A
Grid(0,90)	3	0,845	A

Means that do not share a letter are significantly different.

c) MeanToughness versus Infill pattern

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

<u>Infill pattern</u>	<u>N</u>	<u>Mean</u>	<u>Grouping</u>
Lines(0,0)	3	254,5	A
Grid(0,90)	3	94,9	B
Triangles	3	56,7	B

Means that do not share a letter are significantly different.

d) MeanMaxTensile versus Infill density

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

<u>Infill density</u>	<u>N</u>	<u>Mean</u>	<u>Grouping</u>
15%	3	14,26	A
25%	3	13,15	A
5%	3	7,91	A

Means that do not share a letter are significantly different.

e) MeanYoungModulus versus Infill density

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

<u>Infill density</u>	<u>N</u>	<u>Mean</u>	<u>Grouping</u>
25%	3	1,206	A
15%	3	1,188	A
5%	3	0,762	A

Means that do not share a letter are significantly different.

f) MeanToughness versus Infill density

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

<u>Infill density</u>	<u>N</u>	<u>Mean</u>	<u>Grouping</u>
15%	3	161	A
25%	3	143,8	A
5%	3	101,6	A

Means that do not share a letter are significantly different.

g) MeanMaxTensile versus Infill line multiplier

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Infill line			
multiplier	N	Mean	Grouping
3	3	17,90	A
2	3	9,881	A
1	3	7,54	A

Means that do not share a letter are significantly different.

h) MeanYoungModulus versus Infill line multiplier

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Infill line			
multiplier	N	Mean	Grouping
3	3	1,385	A
1	3	1,014	A
2	3	0,7573	A

Means that do not share a letter are significantly different.

i) MeanToughness versus Infill line multiplier

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Infill line			
multiplier	N	Mean	Grouping
3	3	187,9	A
2	3	113,7	A
1	3	104,4	A

Means that do not share a letter are significantly different.

Πίνακας 14: Αποτελέσματα διακύμανσης αποκρίσεων (Tukey test)

a) STDmaxTensile versus Infill pattern

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Infill pattern			
	N	Mean	Grouping
Lines(0,0)	3	3,79	A
Triangles	3	2,081	A
Grid(0,90)	3	1,747	A

Means that do not share a letter are significantly different.

b) STDYoungModulus versus Infill pattern

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Infill pattern N Mean Grouping

Triangles	3	0,2191	A
Grid(0,90)	3	0,1408	A
Lines(0,0)	3	0,1393	A

Means that do not share a letter are significantly different.

c) STD Toughness versus Infill pattern

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Infill pattern N Mean Grouping

Lines(0,0)	3	174,2	A
Triangles	3	24,03	B
Grid(0,90)	3	20,07	B

Means that do not share a letter are significantly different.

d) STDmaxTensile versus Infill density

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Infill density N Mean Grouping

15%	3	3,38	A
25%	3	2,660	A
5%	3	1,5719	A

Means that do not share a letter are significantly different.

e) STDYoungModulus versus Infill density

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Infill density N Mean Grouping

15%	3	0,2209	A
5%	3	0,1400	A
25%	3	0,1383	A

Means that do not share a letter are significantly different.

f) **STDToughness versus Infill density**

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Infill

density	N	Mean	Grouping
25%	3	94,4	A
15%	3	89,3	A
5%	3	34,6	A

Means that do not share a letter are significantly different.

g) **STDmaxTensile versus Infill line multiplier**

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Infill line

multiplier	N	Mean	Grouping
3	3	3,35	A
1	3	2,331	A
2	3	1,937	A

Means that do not share a letter are significantly different.

h) **STDYoungModulus versus Infill line multiplier**

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Infill line

multiplier	N	Mean	Grouping
1	3	0,2582	A
3	3	0,1367	A
2	3	0,1042	A

Means that do not share a letter are significantly different.

i) **STDToughness versus Infill line multiplier**

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Infill line

multiplier	N	Mean	Grouping
1	3	92,4	A
3	3	90,8	A
2	3	35,1	A

Means that do not share a letter are significantly different.

Οι πληροφορίες που αντλούνται από τους παραπάνω πίνακες είναι ιδιαίτερα ωφέλιμες. Συγκεκριμένα από το Πίνακας 13 βλέπουμε ότι οι παράμετροι ελέγχου Lines(0,0), infill density (15%) και infill line multiplier (3) αποδίδουν τη μέγιστη μέση τιμή εφελκυστικής τάσης και δυσθραυστότητας. Για τη μέση τιμή του μέτρου ελαστικότητας οι παράμετροι ελέγχου Lines(0,0), infill density (25%) και infill line multiplier (3) εμφάνισαν τη μέγιστη

τιμή. Από το Πίνακα 14 ξεχωρίζουμε τη παράμετρος Lines(0,0) η οποία αποδίδει τη μέγιστη μέση τιμή διακύμανσης ως προς τη δυσθραυστότητα. Όλα τα παραπάνω σχόλια παρατηρήθηκαν και στο προηγούμενο κεφάλαιο κατά την ανάλυση των διαγραμμάτων τάσης-παραμόρφωσης.

Σκοπός όμως της ανάλυσης Tuckey είναι να εμφανίσει ποιοι παράμετροι είναι σημαντικά διαφορετικοί μεταξύ τους. Αυτό παρατηρείται στη περίπτωση της παραμέτρου infill pattern ως προς τη δυσθραυστότητα τόσο για μέση τιμή όσο και για τη μέση τιμή της διακύμανσης. Συγκεκριμένα η παράμετρος Lines(0,0) είναι σημαντικά διαφορετική με τις παραμέτρους Grid και Triangles όσον αφορά τη δυσθραυστότητα. Αυτό επιβεβαιώνει τις παρατηρήσεις που έγιναν στο προηγούμενο κεφάλαιο όσον αφορά την απόδοση των τιμών δυσθραυστότητας. Η δυσθραυστότητα δε μπορεί να αξιολογηθεί αξιόπιστα στα πειράματά μας.

7. Συμπεράσματα και μελλοντικές εργασίες

Αφετηρία της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν ταχεία εξέλιξη των τεχνολογιών Προσθετική Κατασκευής (Additive Manufacturing), οι οποίες πλέον βρίσκουν πολλές εφαρμογές και χρησιμοποιούνται για διάφορους σκοπούς και τομείς. Συγκεκριμένα, η τεχνολογία FDM, η οποία είναι η πλέον ευρέως διαδεδομένη μέσω των ελεύθερων κοινοτήτων Open Source, δίνει κίνητρα για την πραγματοποίηση και την ανάπτυξη ιδεών με σκοπό τη βελτίωση της.

Η τεχνολογία FDM είναι μια σύνθετη κατεργασία που παρουσιάζει μεγάλη δυσκολία στον καθορισμό των βέλτιστων παραμέτρων για την καλύτερη ποιότητα του αντικειμένου (διαστασιολογική ακρίβεια, επιφανειακή τραχύτητα, μηχανική αντοχή). Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν να εξετάσει ορισμένες παραμέτρους κατεργασίας διαμόρφωσης της εσωτερικής δομής ως προς την εφελκυστική αντοχή πρότυπων δοκιμών του συνθέτου υλικού PACF. Οι παράγοντες ελέγχου που επιλέχθηκαν για τη μελέτη ήταν το μοτίβο πλήρωσης (infill pattern), η πυκνότητα πλήρωσης (infill density) και ο πολλαπλασιαστής γραμμής πλήρωσης (infill line multiplier). Για το σκοπό αυτό έγινε σχεδιασμός πειραμάτων και για την αποφυγή του πλήρους παραγοντικού σχεδιασμού επιλέχθηκε ο σχεδιασμός πειραμάτων του Taguchi. Το πείραμα μας φιλοξενήθηκε από έναν L_9 ορθογώνιο πίνακα. Εννιά εκτελέσεις εκτυπώσεων πραγματοποιήθηκαν όπου κάθε εκτέλεση περιείχε πέντε δοκίμια εφελκυσμού. Για κάθε δοκίμιο πραγματοποιήθηκε εφελκυσμός δια της μηχανής Instron 4482 που διαθέτει το εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών. Από τα πειράματα εξήχθησαν οι καμπύλες Τάσης-Παραμόρφωσης, μέσω των οποίων προσδιορίστηκαν η μέγιστη εφελκυστική τάση, το μέτρο ελαστικότητας και η δυσθραυστότητα. Έπειτα, πραγματοποιήθηκε η ανάλυση του Taguchi και η ανάλυση διακύμανσης ANOVA ώστε να αξιολογηθούν οι παράμετροι που επιλέχθηκαν.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των δεδομένων (ANOVA) έδειξαν ότι αξιολογώντας το χαρακτηριστικό της μέγιστης εφελκυστικής αντοχής, ο παράγοντας του πολλαπλασιαστή γραμμών πλήρωσης (infill line multiplier) ήταν αυτός που επηρέασε περισσότερο την κατεργασία με ποσοστό 48,58%, έπειτα το μοτίβο πλήρωσης (infill pattern) με ποσοστό 34,13% και τέλος η πυκνότητα πλήρωσης (infill density) με ποσοστό 16,92%. Όσον αφορά τη μεγιστοποίηση του μέτρου ελαστικότητας ο παράγοντας του πολλαπλασιαστή γραμμών πλήρωσης (infill line multiplier) επηρέασε περισσότερο την κατεργασία με ποσοστό 44%, έπειτα η πυκνότητα πλήρωσης (infill density) με ποσοστό 32,94% και το μοτίβο πλήρωσης (infill pattern) με ποσοστό 22,12%. Τέλος, για τη μεγιστοποίηση του χαρακτηριστικού της δυσθραυστότητας οι κύριοι παράγοντες είναι το μοτίβο πλήρωσης (infill pattern) με ποσοστό 55,88% και ο παράγοντας του πολλαπλασιαστή γραμμών πλήρωσης (infill line multiplier) με ποσοστό 40,07%, ενώ η πυκνότητα πλήρωσης (infill density) δεν δείχνει να έχει σημαντική επιρροή.

Ο βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων ελέγχου που προέκυψε από την ανάλυση Taguchi και για τα τρία ποιοτικά χαρακτηριστικά ήταν για το μοτίβο πλήρωσης (infill pattern) το Lines(0,0), για το ποσοστό πλήρωσης (infill density) το 25% και για την τιμή του πολλαπλασιαστή γραμμών πλήρωσης (infill line multiplier) ίση με 3.

Η μελέτη των αποτελεσμάτων δείχνει τα αναμενόμενα, το μοτίβο πλήρωσης (infill pattern) με Lines(0,0) παράλληλες στη διεύθυνση φόρτισης αποδίδει την καλύτερη εφελκυστική αντοχή, μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας καθώς δυσθραυστότητας. Το ίδιο συμβαίνει με τη παράμετρο του «infill line multiplier» και του «infill density» μεγαλύτερο νούμερο συνεπάγεται καλύτερη ποιότητα σύντηξης μεταξύ των εναποθέσεων άρα και καλύτερη εφελκυστική αντοχή.

Φτάνοντας στο τέλος της παρούσας εργασία είναι άξιο αναφοράς το τόσο αντικρουόμενες μπορούν να γίνουν οι συνθήκες κατεργασίας με την αλληλεπίδραση των παραγόντων κατεργασίας όσον αφορά την τελική ποιότητα των προϊόντων.

Αξιολογώντας γενικότερα τη μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης και ειδικότερα τη τεχνολογία εξώθησης υλικού, προτείνονται τα κάτωθι θεματικά πεδία:

- Μελέτη, ανάλυση και σύγκριση των λογισμικών τεμαχισμού, σχεδιασμού της κατεργασίας και ελέγχου μηχανών, καθώς και προσπάθεια βελτίωση αυτών ή ανάπτυξη νέων σχετικών λογισμικών.
- Εξέταση σημαντικότητας και πρακτική εφαρμογή τεχνικών προεπεξεργασίας κατά το σχεδιασμό της κατεργασίας και τεχνικών μετεπεξεργασίας δια επιφανειακών κατεργασιών των προϊόντων για βελτίωση ποιότητας επιφάνειας, ιδιοτήτων και διαστασιολογικής ακρίβειας.
- Μελέτη και ανάλυση οικονομικού κόστους, ενεργειακής κατανάλωσης και απόδοσης παραγωγής, σύγκριση γενικότερα με άλλες μεθόδους κατεργασίας.
- Μελέτη συνέργειας τρισδιάστατης ψηφιοποίησης και τρισδιάστατης εκτύπωσης για αντιγραφή, επισκευή ή ανακατασκευή υπαρχόντων απτών αντικειμένων.

8. Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Κατηγορίες τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής [3].....	10
Πίνακας 2 Ιδιότητες υλικών κατεργασίας FDM [32].....	34
Πίνακας 3: Οι παράγοντες ελέγχου και τα επίπεδά τους.....	49
Πίνακας 4: Ορθογώνιος πίνακας L_9	50
Πίνακας 5: Ορθογώνιος πίνακας L_9 του πειράματος.....	50
Πίνακας 6: Σταθερές παράμετροι.....	52
Πίνακας 7: Διαστάσεις δοκιμίων.....	55
Πίνακας 8: Ultimate Tensile Strength.....	58
Πίνακας 9: Young’s Modulus.....	59
Πίνακας 10: Toughness.....	60
Πίνακας 11: Factor information.....	76
Πίνακας 12: Analysis of Variance (Max Tensile).....	77
Πίνακας 13: Αποτελέσματα μέσης τιμής αποκρίσεων (Tuckey test).....	80
Πίνακας 14: Αποτελέσματα διακύμανσης αποκρίσεων (Tuckey test).....	82

9. Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Αξιοποίηση μελισσών για τη παραγωγή τρισδιάστατων μορφών	12
Εικόνα 2: Κατασκευή κυψελών και φωλιάς από σφήκες	12
Εικόνα 3: Κουκούλι νύμφης και ιστός αράχνης	13
Εικόνα 4: Αξιοποίηση μεταξοσκωλήκων για τη παραγωγή τρισδιάστατης μορφής	13
Εικόνα 5: Μηχάνημα SLA-1 της 3D Systems	14
Εικόνα 6: Perfactory της EnvisionTec και πλαστικά προϊόντα.....	17
Εικόνα 7: Διαστρωματικής κατασκευή πτερωτής.....	19
Εικόνα 8: Πρώτος τύπος υποστηριγμάτων	20
Εικόνα 9: Δεύτερος τύπος υποστηριγμάτων	20
Εικόνα 10: Προσέγγιση σφαίρας με διαφορετικό αριθμό τριγώνων.....	22
Εικόνα 11: Projet7000 της 3D Systems και προϊόντα	24
Εικόνα 12: Βασική διάταξη εκτόξευσης υλικού	25
Εικόνα 13: Βασική διάταξη εκτόξευση κόλλας	26
Εικόνα 14: Βασική διάταξη συνένωσης σκόνης με δέσμη laser.....	27
Εικόνα 15: Βασική διάταξη συνένωσης σκόνης με δέσμη ηλεκτρονίων.....	27
Εικόνα 16: Προϊόν τεχνολογίας EBFFF της NASA και μετεπεξεργασία αφαίρεσης υλικού	28
Εικόνα 17: Τεχνολογία Ultrasonic Consolidation και μηχάνημα SonicLayer της Fabrisonic	29
Εικόνα 18: Ποσοστά χρήσης μεθόδου για τελική κατασκευή	30
Εικόνα 19: Αρχή λειτουργίας FDM Εκτυπωτή [29]	32
Εικόνα 20: Παράμετροι και Ιδιότητες της Τεχνολογίας FDM	37
Εικόνα 21: Διαδικασία σχεδιασμού Taguchi [81]	45
Εικόνα 22: Πρότυποι ορθογώνιοι πίνακες.....	46
Εικόνα 23: Σχέδιο δοκιμίου βάσει του προτύπου ASTM D638	51
Εικόνα 24: Μηχανολογικό σχέδιο του προτύπου δοκιμίου εφελκυσμού.....	52
Εικόνα 25: Slicing software	53
Εικόνα 26: FlashForge Creator 3	54
Εικόνα 27: Τα εννιά εκτυπωμένα δοκίμια εφελκυσμού.....	55
Εικόνα 28: Μηχανή δοκιμών εφελκυσμού Instron 4482.....	57
Εικόνα 29: Απεικόνιση θραύσης δοκιμίων	62
Εικόνα 30: Απεικόνιση αποκόλλησης ινών	63
Εικόνα 31: Run 1 Grid 5% 1IMP.....	63
Εικόνα 32: Run 2 Grid 15% 2IMP.....	64
Εικόνα 33: Run3 Grid 25% 3IMP.....	64
Εικόνα 34: Run 4 Lines 5% 2IMP	65
Εικόνα 35: Run 5 Lines 15% 3IMP	65
Εικόνα 36: Run 6 Lines 25% 1IMP	66
Εικόνα 37: Run 7 Triangles 5% 3IMP	66
Εικόνα 38: Run8 Triangles 15% 1IMP.....	67
Εικόνα 39: Run9 Triangles 25% 2IMP	67
Εικόνα 40: Ultimate Tensile Strength Variance	68
Εικόνα 41: Young’s Modulus Variance	68
Εικόνα 42: Toughness Variance.....	69
Εικόνα 43: Περιβάλλον του Minitab	70

Εικόνα 44: Πίνακας Taguchi (Minitab)	71
Εικόνα 45: Πλήρως συμπληρωμένο φύλλο εργασίας	72
Εικόνα 46: Αποτελέσματα ανάλυσης Taguchi	73
Εικόνα 47: Main Effects Plot for SN ratios (Max Tensile).....	73
Εικόνα 48: Βήματα ανάλυσης ANOVA	74
Εικόνα 49: Αποτελέσματα ANOVA.....	75
Εικόνα 50: Πλήρης πίνακας αποτελεσμάτων Taguchi	77
Εικόνα 51: Main Effects Plot for SN ratios (Young Modulus).....	78
Εικόνα 52: Main Effects Plot for SN ratios (Toughness).....	78
Εικόνα 53: Analysis of Variance (Young Modulus)	79
Εικόνα 54: Analysis of Variance (Toughness)	79

10. Βιβλιογραφία

- [1] Gibson I., Rosen D. and Stucker B., «Additive Manufacturing Technologies-Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing,» Springer, New York, 2010.
- [2] Standard, ASTM F2792 - 12a, «Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies».
- [3] K. Srinivasulu Reddy, Solomon Dufera, «Additive Manufacturing Technologies,» 2019.
- [4] L.J. Gibson, M.F. Ashby, «Cellular solids: structure and properties,» 2nd Edition, Cambridge University Press ISBN 978-0521499118, 1997.
- [5] P. Fratzl, R.Weinkamer, «Nature’s hierarchical materials,» Progress in Materials Science, Vol. 52, Iss. 8, pp. 1263-1334, 2007.
- [6] P.Y. Chen et al, «Biological materials: Structure and mechanical properties,» Progress in Materials Science, Vol. 53, Iss. 1, pp. 1-206, 2008.
- [7] P.Y. Chen et al, «Structure and mechanical properties of selected biological materials,» Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials Vol. 1, Iss. 3, pp. 208-226, 2008.
- [8] P.Y. Chen et al,, «Biological materials: Functional adaptations and bioinspired designs,» Progressin Materials Science, Vol. 57, Iss. 8, pp. 1492-1704, 2012.
- [9] M.A. Meyers, P.Y. Chen, «Biological Materials Science: Biological Materials, Bioinspired Materials, and Biomaterials,» Cambridge University Press, ISBN 978-1107010451 , 2014.
- [10] N. Oxman et al, «Silk Pavilion: A Case Study in Fiber-based Digital Fabrication,» FABRICATE Conference Proceedings, pp. 248-255, 2014.
- [11] C.W. Hull, «Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography,» US4575330, 1986.
- [12] C.W. Hull, C.W., «Lewis, Computer assisted design and manufacture,» US 4999143, 1991.
- [13] W. Associates, «3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report,» Wohler’s Report, 2014.
- [14] A. Toshiyuki, «Optical Shaping Method,» JPH0615749, 1994.
- [15] W. N. L.D. Mitcham, «Stereolithographic apparatus and method of use,» US 5247180, 1993.

- [16] M. Feygin et al., «Laminated object manufacturing system,» US 5730817, 1998.
- [17] C. Deckard, «Method and apparatus for producing parts by selective sintering,» US 4863538, 1991.
- [18] E.M. Sachs et al, «Three-dimensional printing techniques,» US 5204055, 1993.
- [19] D. Retallick et al, «Method and apparatus for producing a three-dimensional object,» US 5658412, 1997.
- [20] R.C. Sanders et al, «3-D model maker,» US 5506607, 1996.
- [21] L. S. J. Mazumder, «Advances in Direct Metal Deposition,» Proceedings of the 36th International MATADOR Conference, pp. 447-450, 2010.
- [22] White, D., «Object consolidation employing friction joining,» US 6457629, 2002.
- [23] J. Hendrik, «Apparatus for manufacturing a three-dimensional object,» US 7052263, 2006.
- [24] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, «Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing,» 2nd Edition, Springer, ISBN 978-1493921126, 2015.
- [25] 3. Systems, «Stereolithography Interface Specification,» 1988.
- [26] I. Gibson, D. Rosen και B. Stucker, «Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing,» 2nd Edition, Springer ISBN 978-1493921126, 2015.
- [27] C. Anderson, «Makers: The New Industrial Revolution,» Crown Business,, 2012.
- [28] M. K. Thompson et al, «Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints,» CIRP Ann. - Manuf. Technol., vol. 65, no. 2, pp. 737–760, 2016.
- [29] M. B. a. G. Oancea, «Fused deposition modelling process: a literature review,» 2021.
- [30] S. Crump, «Apparatus and method for creating three-dimensional object,» US 5121329, 1992.
- [31] A. Bowyer et al, «RepRap – the replicating rapid prototyper,» Robotica, Vol. 29, pp. 177–191, Cambridge University Press,, 2011.
- [32] Bates-Green, K. Howie, «Materials for 3D Printing by Fused Deposition,» Edmonds Community College, 2017.
- [33] S. G. Solomon, «A review on the various processing parameters in FDM,» 2020.

- [34] A.K. Sood, R. Ohdar, S. Mahapatra, «Improving dimensional accuracy of fused deposition modelling processed part using grey Taguchi method,» *Mater. Des.* 30 (2009) 4243–4252.
- [35] J.W. Zhang, A.H. Peng, «Process-parameter optimization for fused deposition modeling based on Taguchi method,» *Adv. Mater. Res.* 538 (2012) 444–447.
- [36] S. M. A. S. R.K. Sahu, «A study on dimensional accuracy of fused deposition modeling (FDM) processed parts using fuzzy logic,» *J. Manuf. Sci. Prod.* 13 (2013) 183–197.
- [37] M. J. V. L. N. S. A. W. P. a. D. S. Agarwala, «Structural quality of parts processed by fused deposition”,»,» *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 2 No. 4, pp. 4-19., 1996.
- [38] ELIZABETH AZHIKANNICKAL, AARON UHRIN, «Dimensional Stability of 3D Printed Parts: Effects of Process Parameters,» *OHIO J SCI* 119(2):9-16, Muskingum University, New Concord, OH, USA, 2019.
- [39] Oguzhan Emre Akbas, Onur Hira, Sahar Zhiani Hervan, Shahrads Samankan and Atakan Altinkaynak, «Dimensional accuracy of FDM-printed polymer parts,» *Rapid Prototyping Journal*, Turkey, 2019.
- [40] C. B. M. V. M. Vishwas, «Experimental Investigation using Taguchi Method to Optimize Process Parameters of Fused Deposition Modeling for ABS and Nylon Materials,» 2018.
- [41] T. Nancharaiah, D. Ranga Raju, V. Ramachandra Raju, «An experimental investigation on surface quality and dimensional accuracy of FDM components,» *International Journal on Emerging Technologies*: 106-111, India, 2010.
- [42] K. K. K. J. M. N. Moza Z, «Optimizing dimensional accuracy of fused filament fabrication using Taguchi design,» In: 14th international conference on instrumentation, measurements, circuits and systems, 2015.
- [43] K. K. J. D. K. N. M. V. D. E. M. Kyriaki-Evangelia Aslani, «On the application of grey Taguchi method for benchmarking the dimensional accuracy of the PLA fused filament fabrication process,» 2020.
- [44] D Chaida¹, K Kitsakis, J Kechagias and S Maropoulos, «The impact of temperature changing on surface roughness of FFF process,» IOP Publishing Ltd, Kozani, Greece, 2016.
- [45] Valerga AP, Batista M, Salguero J, Girot F, «Influence of PLA filament conditions on characteristics of FDM parts,» *Materials* 11:1322, 2018.
- [46] Dey A, Yodo N, «A systematic survey of FDM process parameter optimization and their influence on part characteristics,» *J Manuf Mater Process* 3:64.

- [47] Sudin MN, Shamsudin SA, Abdullah MA, «Effect of part features on dimensional accuracy of FDM model,» ARPN J Eng Appl Sci 11:8067–8072, 2016.
- [48] Alafaghani A, Qattawi A, Alrawi B, Guzman A, «Experimental optimization of fused deposition modelling processing parameters: a design-for-manufacturing approach,» Procedia Manuf 10:791–803, 2017.
- [49] Alafaghani A, Qattawi A, «Investigating the effect of fused deposition modeling processing parameters using Taguchi design of experiment method,» J Manuf Process 36:164–174.
- [50] G. S. Turner BN, «A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy and surface roughness.,» Rapid Prototyp J 21:250–261, 2015.
- [51] G. S. Sandhu, K. S. Boparai, and K. S. Sandhu, «Effect of slicing parameters on surface roughness of fused deposition modeling prints,» Mater. Today Proc., no. xxxx, 2021.
- [52] S.Dinesh Kumar, V.Nirmal Kannan and G.Sankaranarayanan, «Parameter Optimization of ABS-M30i Parts Produced by Fused Deposition Modeling for Minimum Surface Roughness,» International Journal of Current Engineering and Technology, Special Issue-3, 2014.
- [53] R. Anitha, S. Arunachalam, P. Radhakrishnan, «Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling,» Journal of materials processing technology 118 385-388, 2001.
- [54] K. Thrimurthulu, Pulak M. Pandey, N. Venkata Reddy, «Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling,» International Journal of Machine Tools & Manufacture 44 85–594, 2004.
- [55] D Chaidas, K Kitsakis, J Kechagias, S Maropoulos, «The impact of temperature changing on surface roughness of FFF process,» IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 161 012033, 2016.
- [56] I.T. Christodoulou, V.E. Alexopoulou, N.E. Karkalos, E.L. Papazoglou, A.P. Markopoulos, «ON THE SURFACE ROUGHNESS OF 3D PRINTED PARTS WITH FDM BY A LOW-BUDGET COMMERCIAL PRINTER,» Athens, Greece, 2022.
- [57] Sood, A.K., Ohdar, R.K. and Mahapatra, S.S., «Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts,» Materials & Design, Vol. 31No. 1, pp. 287-295, 2010.
- [58] P.-F. J. G.-G. A. L. J. B. S. R. G. Domingo-Espin M, «Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling polycarbonate parts,» Mater Des 83:670–677, 2015.

- [59] A. R. M. E. C. A. E. F. M. S. S. Jose C. Camargo, «Mechanical properties of PLA-graphene filament for FDM 3D printing,» *Int J Adv Manuf. Technol* 103:2423–2443, 2019.
- [60] S. J. V. K. N. a. S. T. Raut, «Investigation of the effect of built orientation on mechanical properties and total cost of FDM parts,» *Procedia Materials Science*, Vol. 6, pp. 1625-1630, 2014.
- [61] K. G. & H. S. Türkmen, «The Effect of Layer Thickness to the Tensile Stress: Experimental Studies,» 2018.
- [62] M. N. S. a. M. F. B. R. Siti Maryam Md Nor, «Application of Taguchi Method in Investigating The Effect of Layer Thickness and Fill Angle on FDM Parts,» *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 409 012018., 2018.
- [63] M. M. D. O. S. R. P. W. S.H. Ahn, «Rapid Prototyping 8,» 248–257, 2002.
- [64] D. F. M. O. H. B. A. Dr. Tahseen Fadhil Abbas, «Influence of Layer Thickness on Impact Property of 3D-Printed PLA,» *IRJET e-ISSN: 2395-0056*, 2018.
- [65] D. D. A. M. a. O. G. Croccolo, «Experimental characterization and analytical modelling of the mechanical behaviour of fused deposition processed parts made of ABS-M30,» *Computational Materials Science*, Vol. 79, pp. 506-518, 2013.
- [66] M. M. D. O. S. R. P. W. S.H. Ahn, «Rapid Prototyping 8,» 248–257, 2002.
- [67] J. F. R. N. M. M. R. M. a. B. A. P. O. S. Es-Said, «Effect of layer orientation on mechanical properties of rapid prototyped samples,» *Mater. Manuf. Process.*, vol. 15, no. 1, pp. 107–122, 2000.
- [68] A. Lanzotti, E. Pei, M. Grasso, G. Staiano και M. Martorelli, «The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer,» *Rapid Prototyp. J.* 21, 604–617., 2015.
- [69] M. M. D. O. S. R. a. P. K. W. Sung-Hoon Ahn, «Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS,» *Rapid Prototyp. J.* , 2002.
- [70] A. Sood, R. Ohdar και S. Mahapatra, «Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts,» *Mater. Des.* 31, 287–295., 2009.
- [71] G. M. a. H. M. L. Baich, «Study of infill print design on production cost-time of 3D printed ABS parts,» *Int. J. Rapid Manuf.*, vol. 5, no. 3/4, p. 308, 2015.
- [72] I. T. S. J. E. Michael Dawoud, «Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques,» *Journal of Manufacturing Processes* 21, 2016.
- [73] O. I. e. al., «Experimental Investigation of Different Cellular Lattice Structures Manufactured by Fused Deposition Modeling,» *Proceedings of the 24th Annual*


International Solid Freeform Fabrication Symposium pp. 895 - 907, University of Texas at Austin, 2013.

- [74] A. Z. Abhiram Anupindi, «Compression Behavior analysis of a 3D printed Honeycomb infill pattern,» ISSN 2229-5518, June-2020.
- [75] W. C. S. F. a. A. C. Miguel Fernandez-Vicente, «Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing,» 3D PRINTING AND ADDITIVE MANUFACTURING Volume 3, 2016.
- [76] A. Q. B. A. A. G. Ala'aldin Alafaghani, «Experimental Optimization of Fused Deposition Modelling Processing Parameters a Design-for-Manufacturing Approach,» Procedia Manufacturing 10 791 – 803, 2017.
- [77] R. Gottipati and S. Mishra, «Process optimization of adsorption of Cr(VI) on activated carbons prepared from plant precursors by a two-level full factorial design,» Chem. Eng. J., vol. 160, no. 1, pp. 99–107, 2010.
- [78] D. Bingol, N. Tekin, and M. Alkan, «Brilliant Yellow dye adsorption onto sepiolite using a full factorial design,» Appl. Clay Sci., vol. 50, no. 3, pp. 315–321, 2010.
- [79] Π. Φιλιππίδης, «Επιλογή συνθηκών κατεργασίας στην τρισδιάστατη εκτύπωση (FDM) πορωδών τεμαχίων με τη μέθοδο Taguchi,» Μεταπτυχιακή Εργασία, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, ΑΘΗΝΑ, 2018.
- [80] I. Asiltürk and H. Akkuş, «Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method,» Meas. J. Int. Meas. Confed., vol. 44, no. 9, pp. 1697–1704, 2011.
- [81] J. Z. Zhang, J. C. Chen, and E. D. Kirby, «Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method,» J. Mater. Process. Technol., vol. 184, no. 1–3, pp. 233–239, 2007.
- [82] A. D. -. 1. Standard, «Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics».
- [83] M. M. O. D. R. S. W. P. K. Ahn S.H., «Anisotropic material properties of fused deposition modeling abs,» Rapid Pro. 248-257., 2002.
- [84] S. H. M. Gribbins C., «Experimental analysis on an additively manufactured ABS living hinge,» TEXAS: Solid Freeform Symp., 2014.
- [85] L.J. Gibson, M.F. Ashby, «Cellular solids: structure and properties,» 2nd Edition, Cambridge University Press ISBN 978-0521499118, 1997.
- [86] J.M. Benyus, «Biomimicry: Innovation Inspired by Nature,» Harper Perennial ISBN 9780060533229, 2002.
- [87] Y. Bar-Cohen, «Biomimetics: Nature-Based Innovation,» CRC Press ISBN 978-1439834763, 2011.

- [88] J.J. Beaman, J.W. Barlow, D.L. Bourell, R.H. Crawford, «Solid Freeform Fabrication: A New Direction in Manufacturing,» Springer ISBN 978-0792398349, 1997.
- [89] B. Kay, «Apparatus for building structures,» US 1518149, 1924.
- [90] W.E. Urschel, «Molding and depositing machine for solidifiable plastic materials,» US 2314468, 1943.
- [91] W.E. Urschel, «Machine for building walls,» US 2339892, 1944.
- [92] J.L. Ahart, «Apparatus for building concrete walls,» US 2562403, 1951.
- [93] R. Baker, «Method of making decorative articles,» US 1533300, 1925.
- [94] A. Ujiie, «Method of and apparatus for constructing substantially circular cross section vessel by welding,» US 3558846, 1971.
- [95] D. R. B. S. I. Gibson, «Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing,» 2nd Edition, Springer ISBN 978-1493921126, 2015.






Παράρτημα

Flashforge Creator 3 – Data Sheet



Creator 3
Support Carbon Fiber Materials

Παρακολούθηση σε  YouTube

-  Independent Dual Extruder System
-  Support Carbon Fiber
-  Industrial-grade Precision
-  Intelligent Leveling
-  Compatibility With A Wide Range of Materials
-  Heatable Platform For Easy Object Removal

Specification

Print	Device
Extruder Number 2, Independent	Device Measure 627*485*615 mm
Extruder Diameter 0.4 mm	Screen 4.5-inch Touch Screen
Maximum Set Temp. of Extruder 300 °C	Net Weight 40 kg
Maximum Set Temp. of Platform 120 °C	Gross Weight 52 kg
Print Speed 10-150 mm/s	Input 100-240 VAC, 48-63Hz
Support Filament PLA / ABS / PVA / PETG / HIPS / PA PC / WOOD / ASA / PA-CF / PA-GF	Output 24 V, 20.8 A
Print Volume 300*250*200 mm	Power 500 W
Layer Resolution 0.05-0.4 mm	Internal Storage 8 G
Print Resolution ±0.2 mm	Spool 48 mm
	Contain Spool Diameter 53*200d*69h
	Internal Storage 8G
Software/Communication	Others
Data Transmission USB stick, Wi-Fi, Ethernet	Camera 1
FlashCloud	Filter Fan 1
Software FlashPrint	Guider IIs High Temp. Version Nozzle 300
Input 3mf / stl / obj / fpp / bmp / png	Noise 55 dB
jpg / jpeg files	Working Environment 18-30 °C
Output gx/g files	
Output Win 7/8/10, Mac OS, Linux	

Ultrafuse® PAHT CF15 – Data sheet



Ultrafuse® PAHT CF15

High Temperature PA with 15 % Carbon Fiber

Ultrafuse® PAHT CF15 is a high-performance 3D printing filament that opens up new application areas in FFF printing. It works in any FFF printer with a hardened nozzle. Additionally, it is compatible with BVOH, water-soluble support material, and HIPS which enables the printing of complex geometries for the most challenging operating environments.

Ultrafuse® PAHT CF15 combines high temperature and chemical resistance with outstanding mechanical resilience. Due to its excellent dimensional stability your printed component will display low shrinkage during printing, ensuring an easy print experience. The nature of the fibers ensures that the parts remain very strong and highly rigid.

Benefits at a Glance

- Higher chemical resistance than most PA grades
- High temperature resistance up to 150 °C
- Strong, rigid components
- High dimensional stability
- Easy to process
- Low moisture absorption

Example Applications

- Complex geometries in challenging environments
- Automotive

Material Properties (dry)

Tensile Strength (MPa)	18.2 (ZX), 103.2 (XY)
Flexural Modulus (MPa)	2715 (ZX), 7660 (XZ), 8258 (XY)
Elongation at Break	0.5 % (ZX), 1.8 % (XY)
Impact Strength Izod notched (kJ/m²)	5.1 (XZ), 4.9 (XY)
Impact Strength Izod unnotched (kJ/m²)	2.9 (ZX), 18.1 (XZ), 16.4 (XY)
HDT @ 0.45 MPa	145 °C

Printing Guidelines

Print Speed	30-80 mm / sec
Nozzle Temperature	260-280 °C
Nozzle	Hardened/ Ruby ≥ 0.6 mm diameter
Bed Temperature	100-120 °C
Bed Modification	PEI or clean glass
Fan Speed	0 %
Layer Height	0.2-0.4 mm

The product data is provided in good faith and represents typical properties based on our current knowledge and experience; these data are not to be construed as specification limits or minimum values. Product properties may be changed without notice. This document does not create any liability, warranty or guarantee of product performance. It is the buyer's responsibility to determine the suitability of Ultrafuse® products for the intended application.





Technical Data Sheet

Ultrafuse PAHT CF15

Date / Revised: 29.07.2020

Version No.: 3.5

General information

Components

High temperature Polyamide based filament filled with 15% carbon fibers for Fused Filament Fabrication.

Product Description

PAHT CF15 is a high-performance 3D printing filament that opens new application fields in FFF printing. In parallel to its advanced mechanical properties, dimensional stability, and chemical resistance, it has very good processability. It works in any FFF printer with a hardened nozzle. In addition to that, it is compatible with water-soluble support material and HiPS, which allow printing complex geometries that work in challenging environments. PAHT CF15 has high heat resistance up to 130 °C and low moisture absorption.

Delivery form and warehousing

Ultrafuse PAHT CF15 filament should be stored at 15 - 25°C in its originally sealed package in a clean and dry environment. If the recommended storage conditions are observed the products will have a minimum shelf life of 12 months.

Product safety

Recommended: Process materials in a well ventilated room, or use professional extraction systems. For further and more detailed information please consult the corresponding material safety data sheets.

Notice

The data contained in this publication are based on our current knowledge and experience. In view of the many factors that may affect processing and application of our product, these data do not relieve processors from carrying out their own investigations and tests; neither do these data imply any guarantee of certain properties, nor the suitability of the product for a specific purpose. Any descriptions, drawings, photographs, data, proportions, weights etc. given herein may change without prior information and do not constitute the agreed contractual quality of the product. It is the responsibility of the recipient of our products to ensure that any proprietary rights and existing laws and legislation are observed.

BASF 3D Printing Solutions BV

sales@basf-3dps.com

www.basf-3dps.com

Technical Data Sheet for Ultrafuse PAHT CF15

Version No. 3.5

Recommended 3D-Print processing parameters

Nozzle Temperature	260 – 280 °C / 500 – 538 °F
Build Chamber Temperature	-
Bed Temperature	100 – 120 °C / 212 – 248 °F
Bed Material	PEI or Glass
Nozzle Diameter	≥ 0.6 mm, Ruby or Hardened
Print Speed	30 - 80 mm/s

Drying Recommendations

Drying recommendations to ensure printability	70 °C in a hot air dryer for 4 to 16 hours
Optimum drying recommendations for best mechanical part properties	80 °C in a vacuum oven for at least 40 hours

Please note: To ensure constant material properties the material should always be kept dry.

General Properties

		Standard
Printed Part Density (dry)	1232 kg/m ³ / 76.9 lb/ft ³	ISO 1183-1
Printed Part Density (conditioned)	1234 kg/m ³ / 77.0 lb/ft ³	ISO 1183-1

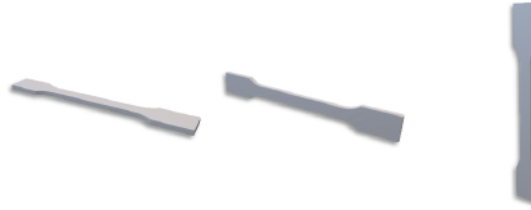
Thermal Properties

		Standard
HDT at 1.8 MPa (dry)	92 °C / 198 °F	ISO 75-2
HDT at 0.45 MPa (dry)	145 °C / 293 °F	ISO 75-2
HDT at 1.8 MPa (conditioned)	91 °C / 198 °F	ISO 75-2
HDT at 0.45 MPa (conditioned)	128 °C / 262 °F	ISO 75-2
Glass Transition Temperature	70 °C / 158 °F	ISO 11357-2
Crystallization Temperature	180 °C / 356 °F	ISO 11357-3
Melting Temperature	234 °C / 453 °F	ISO 11357-3
Melt Volume Flow Rate	42.2 cm ³ /10min / 2.6 in ³ /10min (275°C/5kg)	ISO 1133

Technical Data Sheet for Ultrafuse PAHT CF15

Version No. 3.5

Mechanical Properties | Dried Specimen



Print direction	Standard	XY	XZ	ZX
		Flat	On its edge	Upright
Tensile strength	ISO 527	103.2 MPa / 15.0 ksi	-	18.2 MPa / 2.6 ksi
Elongation at Break	ISO 527	1.8 %	-	0.5 %
Young's Modulus	ISO 527	8388 MPa / 1216 ksi	-	3532 MPa / 512 ksi
Flexural Strength	ISO 178	160.7 MPa / 23.3 ksi	171.8 MPa / 24.9 ksi	50.8 MPa / 7.4 ksi
Flexural Modulus	ISO 178	8258 MPa / 1198 ksi	7869 MPa / 1112 ksi	2715 MPa / 394 ksi
Flexural Strain at Break	ISO 178	2.4 %	2.8 %	1.8 %
Impact Strength Charpy (notched)	ISO 179-2	4.8 kJ/m ²	3.9 kJ/m ²	1.3 kJ/m ²
Impact Strength Charpy (unnotched)	ISO 179-2	20.6 kJ/m ²	19.3 kJ/m ²	2.9 kJ/m ²
Impact Strength Izod (notched)	ISO 180	4.9 kJ/m ²	5.1 kJ/m ²	-
Impact Strength Izod (unnotched)	ISO 180	16.4 kJ/m ²	18.1 kJ/m ²	2.9 kJ/m ²

Electrical Properties

Volume resistivity	IEC 62631-3-1	3.2E+07 Ωcm	-	1.6E+05 Ωcm
Surface resistivity	IEC 62631-3-2	9.7E+05 Ω	-	1.8E+06 Ω

BASF 3D Printing Solutions BV

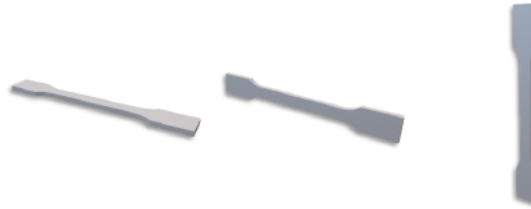
sales@basf-3dps.com

www.basf-3dps.com

Technical Data Sheet for Ultrafuse PAHT CF15

Version No. 3.5

Mechanical Properties | Conditioned Specimen



Print direction	Standard	XY	XZ	ZX
		Flat	On its edge	Upright
Tensile strength	ISO 527	62.9 MPa / 9.1 ksi	-	19.1 MPa / 2.8 ksi
Elongation at Break	ISO 527	2.9 %	-	0.8 %
Young's Modulus	ISO 527	6052 MPa / 733 ksi	-	2455 MPa / 356 ksi
Flexural Strength	ISO 178	125.1 MPa / 18.1 ksi	121.9 MPa / 17.7 ksi	58.0 MPa / 8.1 ksi
Flexural Modulus	ISO 178	8063 MPa / 879 ksi	6260 MPa / 908 ksi	2190 MPa / 318 ksi
Flexural Strain at Break	ISO 178	No break	3.6 %	4.0 %
Impact Strength Charpy (notched)	ISO 179-2	5.1 kJ/m ²	5.3 kJ/m ²	1.6 kJ/m ²
Impact Strength Charpy (unnotched)	ISO 179-2	21.9 kJ/m ²	20.4 kJ/m ²	2.8 kJ/m ²
Impact Strength Izod (notched)	ISO 180	6.5 kJ/m ²	5.8 kJ/m ²	-
Impact Strength Izod (unnotched)	ISO 180	16.3 kJ/m ²	15.1 kJ/m ²	4.1 kJ/m ²

BASF 3D Printing Solutions BV

sales@basf-3dps.com

www.basf-3dps.com

Διαγράμματα Τάσης - Παραμόρφωσης

