



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Διπλωματική Εργασία**

**Προσδιορισμός μέτρου ελαστικότητας FFF δοκιμίων  
προσθετικών κατασκευών**

**Συγγραφέας:**

**Μακρής Ιωάννης**

**Επιβλέποντες Καθηγητές:**

**Σαγιάς Βασίλειος**

**Στεργίου Κωνσταντίνος**

**ΑΘΗΝΑ – ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ – 2023**



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA**  
**SCHOOL OF ENGINEERING**  
**DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

**Diploma Thesis**

**Young's modulus determination of FFF Additive  
Manufacturing specimens**

**AUTHOR:**

**Makris Ioannis**

**Supervisors:**

**Sagias Vasileios**

**Stergiou Konstantinos**

**ATHENS – FEBRUARY – 2023**



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Προσδιορισμός μέτρου ελαστικότητας FFF δοκιμίων προσθετικών κατασκευών.**

**Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή**

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

<b>A/a</b>	<b>ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ</b>	<b>ΒΑΘΜΙΑΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ</b>	<b>ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ</b>
<b>1</b>	Στεργίου Κωνσταντίνος		
<b>2</b>	Χαμηλοθώρης Γεώργιος		
<b>3</b>	Σαγιάς Βασίλειος		

**Copyright** © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Μακρής Ιωάννης, Φεβρουάριος, 2023**

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

**ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Μακρής Ιωάννης του Εμμανουήλ, με αριθμό μητρώου 46147735 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματος μου».

Ο Δηλών

Μακρής Ιωάννης

*Ι.Μαυρής*

## Περίληψη

Η παρούσα διατριβή παρουσιάζει μια ολοκληρωμένη έρευνα για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας Young για λεπτά δοκίμια που κατασκευάζονται με τη χρήση της τεχνολογίας Fused Filament Fabrication. Η μελέτη επικεντρώνεται σε δοκίμια κατασκευασμένα από υλικό PLA, ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο θερμοπλαστικό στον τομέα της προσθετικής κατασκευής. Η πειραματική μεθοδολογία περιλαμβάνει την κατασκευή δοκιμίων PLA μέσω FFF, ακολουθούμενη από μια σειρά δοκιμών εφελκυσμού για την αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς τους υπό αξονική φόρτιση.

Η έρευνα περιλαμβάνει ολόκληρη τη διαδικασία, από τον σχεδιασμό του τρισδιάστατου μοντέλου και την κοπή σε φέτες έως την εκτύπωση και τις δοκιμές, εξασφαλίζοντας μια σχολαστική ανάλυση της απόκρισης του υλικού στη μηχανική καταπόνηση. Χρησιμοποιώντας προηγμένο εξοπλισμό και μεθοδολογίες δοκιμών, καθορίζεται η σχέση τάσης – ανοιγμένης παραμόρφωσης για τα δοκίμια PLA, επιτρέποντας τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας - μια θεμελιώδης παράμετρος που χαρακτηρίζει τη δυσκαμψία ενός υλικού.

Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας Young, όπως η ταχύτητα εκτύπωσης, ο προσανατολισμός εκτύπωσης και η θερμοκρασία εκτύπωσης, διερευνώνται διεξοδικά για να παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την επίδρασή τους στις μηχανικές ιδιότητες του PLA και άλλων υλικών που εκτυπώνεται με FFF. Συγκριτικές αναλύσεις με συμβατικές μεθόδους κατασκευής και καθιερωμένες ιδιότητες υλικού συμβάλλουν στην επικύρωση των πειραματικών αποτελεσμάτων. Η συγκεκριμένη εργασία ερεύνησε τις παραμέτρους raster angle και shells.

Λέξεις-κλειδιά: Προσθετική κατασκευή, μέτρο ελαστικότητας, FFF, PLA, μηχανικές ιδιότητες, εφελκυσμός.

## **Abstract**

This thesis presents a comprehensive investigation into the determination of Young's modulus for thin specimens fabricated using Fused Filament Fabrication (FFF) Additive Manufacturing (AM) technology. The study focuses on specimens made from Poly-Lactic Acid (PLA) material, a widely used thermoplastic in the field of AM. The experimental methodology involves the fabrication of PLA specimens through FFF, followed by a series of tensile tests to evaluate their mechanical behavior under axial loading.

The research encompasses the entire process, from 3D model design and slicing to printing and testing, ensuring a meticulous analysis of the material's response to mechanical stress. Utilizing advanced testing equipment and methodologies, the stress-strain relationship is established for the PLA specimens, enabling accurate determination of Young's modulus—a fundamental parameter that characterizes a material's stiffness.

Key factors affecting the Young's modulus determination, such as print speed, print orientation, and print temperature, are thoroughly investigated to provide insights into their impact on the mechanical properties of FFF-printed PLA. Comparative analyses with conventional manufacturing methods and established material properties contribute to the validation of the experimental results. This paper investigated the raster angle and shells parameters.

**Keywords:** Additive Manufacturing, Fused Filament Fabrication, Young's Modulus, Tensile Test, Poly-Lactic Acid, Mechanical Properties.

## Περιεχόμενα

Εισαγωγή .....	10
Θεωρητική μελέτη.....	12
Ιστορική αναδρομή.....	12
Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής .....	16
Material extrusion.....	16
VAT Photopolymerization .....	18
Powder Bed Fusion.....	20
Material Jetting.....	22
Binder Jetting .....	24
Sheet Lamination.....	26
Directed Energy Deposition .....	28
Μεθοδολογία .....	30
Πειραματικό μέρος.....	31
Πρότυπο .....	31
Υλικό .....	31
Παράμετροι .....	32
CAD μοντέλο .....	34
Slicer.....	34
Εκτυπωτής.....	35
Στατιστική ανάλυση .....	39
Δοκιμή εφελκυσμού .....	42
Αποτελέσματα .....	45
Επεξεργασία μετρήσεων .....	45
Διαγράμματα Τάσης – Ανοιγμένης παραμόρφωσης .....	47
1 <sup>ο</sup> Πείραμα (0° raster angle και 3 shells) .....	47
2 <sup>ο</sup> Πείραμα (0° raster angle και 5 shells) .....	48
3 <sup>ο</sup> Πείραμα (30° raster angle και 3 shells) .....	49
4 <sup>ο</sup> Πείραμα (30° raster angle και 5 shells) .....	50
5 <sup>ο</sup> Πείραμα (45° raster angle και 3 shells) .....	51
6 <sup>ο</sup> Πείραμα (45° raster angle και 5 shells) .....	52
7 <sup>ο</sup> Πείραμα (60° raster angle και 3 shells) .....	53
8 <sup>ο</sup> Πείραμα (60° raster angle και 5 shells) .....	54
9 <sup>ο</sup> Πείραμα (90° raster angle και 3 shells) .....	55
10 <sup>ο</sup> Πείραμα (90° raster angle και 5 shells) .....	56
Συγκριτικά διαγράμματα με βάση τα shells .....	57



Συζήτηση – Προβλήματα – Συμπεράσματα.....	61
Βιβλιογραφία.....	65

## Εισαγωγή

Προσθετική κατασκευή ορίζεται η διαδικασία ένωσης υλικών για τη δημιουργία αντικειμένων, βάση των δεδομένων των τρισδιάστατων μοντέλων τους, ανά στρώσεις (F2792, n.d.). Παρόλο που έχει αναπτυχθεί ένα μεγάλο φάσμα τεχνολογιών AM, όλες μοιράζονται μια κοινή προσέγγιση για την κατασκευή η οποία πραγματοποιείται με τη διαδοχική προσθήκη υλικού σε στρώσεις.

Η κατασκευή ενός αντικειμένου περιλαμβάνει συνήθως μια σειρά βημάτων, ξεκινώντας με τη δημιουργία ενός ψηφιακού τρισδιάστατου μοντέλου με τη χρήση λογισμικού σχεδίασης ή τρισδιάστατου σαρωτή. Στη συνέχεια, το μοντέλο μετατρέπεται σε αρχείο μορφής .stl, επεξεργάζεται μέσω ενός λογισμικού που ονομάζεται slicer και τεμαχίζεται σε λεπτά στρώματα, με κάθε στρώμα να αντιπροσωπεύει μια φυσική διατομή του αντικειμένου. Το τεμαχισμένο μοντέλο αποστέλλεται στη συνέχεια στον τρισδιάστατο εκτυπωτή, ο οποίος διαβάζει τις οδηγίες και αρχίζει να κατασκευάζει το αντικείμενο στρώμα προς στρώμα. Το τελικό βήμα είναι η αφαίρεση του αντικειμένου από το χώρο εκτύπωσης καθώς και η μετεπεξεργασία του.

Μία από τις πιο συναρπαστικές πτυχές της προσθετικής κατασκευής είναι η ευελιξία της. Αντικείμενα μπορούν να παραχθούν σε ένα ευρύ φάσμα σχημάτων, μεγεθών και υλικών, από απλά πλαστικά παιχνίδια έως σύνθετα μεταλλικά εξαρτήματα για βιομηχανικά μηχανήματα. Αυτή η ευελιξία έχει καταστήσει την προσθετική κατασκευή απαραίτητο εργαλείο για ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών, από την αεροδιαστημική και την αυτοκινητοβιομηχανία έως την υγειονομική περίθαλψη και τη μόδα.

Η προσθετική κατασκευή προσφέρει επίσης μια σειρά από βασικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής. Ένα από τα σημαντικότερα είναι η δυνατότητα παραγωγής πολύπλοκων γεωμετριών που θα ήταν αδύνατο ή πολύ δύσκολο να επιτευχθούν με άλλες τεχνικές. Αυτό σημαίνει ότι οι σχεδιαστές και οι μηχανικοί μπορούν να δημιουργήσουν πιο καινοτόμα και αποδοτικά προϊόντα, με λιγότερους περιορισμούς όσον αφορά τη μορφή και τη λειτουργία.

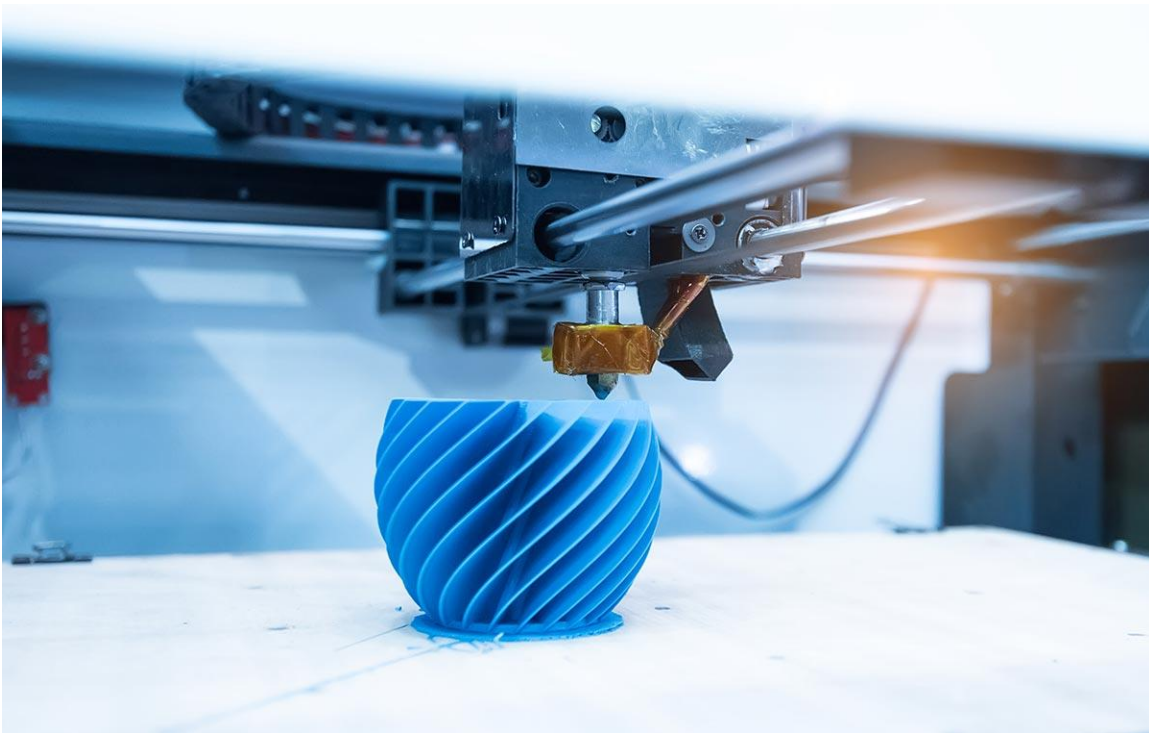
Ένα άλλο πλεονέκτημα της προσθετικής κατασκευής είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την οικονομική παραγωγή μικρών ποσοτήτων εξαρτημάτων. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για εξειδικευμένα ή προσαρμοσμένα προϊόντα, όπου το κόστος των παραδοσιακών μεθόδων κατασκευής μπορεί να είναι απαγορευτικά υψηλό. Η προσθετική κατασκευή επιτρέπει επίσης την ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων, επιτρέποντας στους σχεδιαστές και τους μηχανικούς να δοκιμάζουν και να βελτιώνουν γρήγορα τις ιδέες τους πριν δεσμευτούν για πλήρη παραγωγή.

Εκτός από τα πρακτικά της οφέλη, η προσθετική κατασκευή συμβάλλει επίσης στην προώθηση της καινοτομίας στον τομέα της βιωσιμότητας και της κυκλικής οικονομίας. Η δυνατότητα παραγωγής αντικειμένων κατά παραγγελία και σε μικρές ποσότητες μειώνει την ανάγκη για κατασκευή μεγάλης κλίμακας, η οποία μπορεί να είναι τόσο δαπανηρή όσο και περιβαλλοντικά επιβλαβής. Επιπλέον, η προσθετική κατασκευή διευκολύνει την επαναχρησιμοποίηση και την ανακύκλωση υλικών, μειώνοντας τα απόβλητα και συμβάλλοντας σε ένα πιο βιώσιμο μέλλον. (Niaki, 2018)

Παρά τα πολλά οφέλη της, η προσθετική κατασκευή εξακολουθεί να αντιμετωπίζει ορισμένες προκλήσεις. Μία από τις σημαντικότερες είναι η ανάγκη για εξειδικευμένη τεχνογνωσία και εξοπλισμό. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής, οι οποίες είναι συχνά καθιερωμένες και ευρέως κατανοητές, η προσθετική κατασκευή είναι ακόμη μια σχετικά νέα τεχνολογία και υπάρχει έλλειψη εκπαιδευμένων επαγγελματιών με τις απαραίτητες δεξιότητες και γνώσεις για την αποτελεσματική χρήση της.

Μια άλλη πρόκληση είναι η ανάγκη ανάπτυξης αξιόπιστων και τυποποιημένων διαδικασιών για την προσθετική κατασκευή. Ενώ η τεχνολογία έχει κάνει μεγάλα βήματα προόδου τα τελευταία χρόνια, εξακολουθεί να υπάρχει μεγάλη διακύμανση στην ποιότητα και τη συνέπεια των αντικειμένων που παράγονται με τη χρήση διαφορετικών μηχανημάτων και υλικών. Αυτό δυσκολεύει τις επιχειρήσεις να διασφαλίσουν ότι τα προϊόντα τους πληρούν τα απαιτούμενα πρότυπα και τους κανονισμούς. (Diamandis & Kotler , 2020)

Συνολικά, η προσθετική κατασκευή είναι ένας ταχέως εξελισσόμενος τομέας που μεταμορφώνει τον τρόπο με τον οποίο σκεφτόμαστε την παραγωγή και τον σχεδιασμό. Με τα πολλά οφέλη και τις πιθανές εφαρμογές της, έχει τη δύναμη να φέρει επανάσταση στους κλάδους και να δημιουργήσει νέες ευκαιρίες για καινοτομία και ανάπτυξη. Ωστόσο, όπως συμβαίνει με κάθε νέα τεχνολογία, αντιμετωπίζει επίσης προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν προκειμένου να αξιοποιηθούν πλήρως οι δυνατότητές της.



*Εικόνα 1. Τρισδιάστατη εκτύπωση με χρήση τεχνολογίας FFF.*

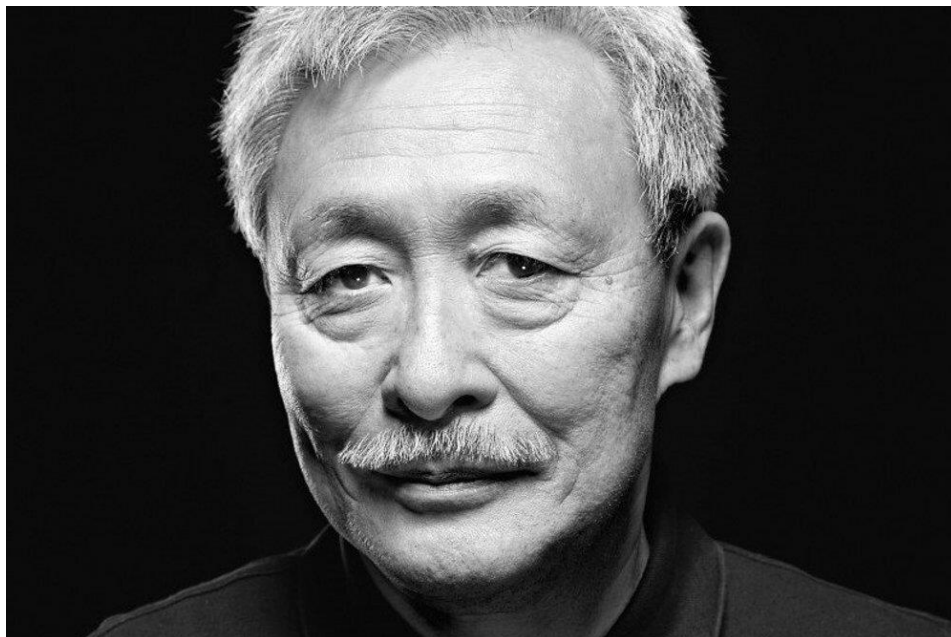
## Θεωρητική μελέτη

### Ιστορική αναδρομή

Η πρώτη απόπειρα τρισδιάστατης εκτύπωσης έγινε από τον Otto John Munz το 1951, όπου του πιστώθηκε μία πατέντα που αφορούσε τη δημιουργία μιας σειράς από δισδιάστατες διαφανείς φωτογραφίες με φωτοευαίσθητο γαλάκτωμα (εμουλσιόν) που θα μπορούσαν να τοποθετηθούν η μία πάνω στην άλλη. Χρησιμοποιώντας μια διαδικασία παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιείται στη σύγχρονη στερεολιθογραφία, τα στρώματα εκτέθηκαν επιλεκτικά για να δημιουργηθεί μια τρισδιάστατη εικόνα ενός αντικειμένου. Ωστόσο, το τελικό αντικείμενο έπρεπε να σκαλιστεί ή να χαραχθεί χειροκίνητα από τον προκύπτοντα διαφανή κύλινδρο. (Wohlens, 2015)

Στις 12 Ιουλίου του 1967 ο Δανός φοιτητής Wyn K. Swainson κατέθεσε μία πατέντα όσον αφορά την δημιουργία ενός τρισδιάστατου αντικειμένου. Η διαδικασία περιλάμβανε δύο διασταυρούμενες ακτίνες laser που συνέπιπταν πάνω σε ένα φωτοευαίσθητο πολυμερές με στόχο τη στερεοποίηση σε εκείνο το σημείο\*. Ο Swainson ίδρυσε αργότερα την Formigraphic Engine Co. με σκοπό να εμπορευματοποιήσει την τεχνολογία του, ωστόσο χωρίς επιτυχία.

Αρκετά χρόνια αργότερα στην Ιαπωνία, ο Hideo Kodama πιστώνεται με την ανάπτυξη της μεθόδου σκλήρυνσης με λέιζερ μίας δέσμης, η οποία περιλαμβάνει τη χρήση υπεριωδών ακτινών και μιας φωτοευαίσθητης ρητίνης για τη δημιουργία τρισδιάστατων πλαστικών μοντέλων με τη στερεοποίηση λεπτών στρωμάτων φωτοπολυμερούς υλικού. Ο Kodama υπέβαλε αίτηση για δίπλωμα ευρεσιτεχνίας στην Ιαπωνία τον Μάιο του 1980, αλλά δεν προχώρησε στο στάδιο της εξέτασης λόγω έλλειψης κεφαλαίων για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη. Τον Οκτώβριο του 1980 και τον Νοέμβριο του 1981, ο Kodama δημοσίευσε έγγραφα που περιγράφουν λεπτομερώς το έργο του και περιγράφουν τρεις τεχνικές που χρησιμοποίησε για τη δημιουργία πλαστικών εξαρτημάτων με τη χρήση της προσθετικής κατασκευής.



Εικόνα 2. Hideo Kodama

Η πρώτη τρισδιάστατη εκτύπωση έγινε από τον Charles W. Hull το 1983. Εκείνη την εποχή εργαζόταν για την UVP Inc. και ένα χρόνο αργότερα υπέβαλε αίτηση για δίπλωμα ευρεσιτεχνίας σχετικά με την κατασκευή ενός τρισδιάστατου αντικειμένου με τη χρήση της στερεολιθογραφίας, το οποίο του χορηγήθηκε το 1986. Η συγκεκριμένη πατέντα περιγράφει μια διαδικασία φωτοσκλήρυνσης μιας σειράς διατομών με τη χρήση μιας ελεγχόμενης από υπολογιστή δέσμης φωτός\*. Το ίδιο έτος, ο Charles Hull και ο Raymond Freed συνίδρυσαν την start-up εταιρεία 3D Systems Inc. και το 1988 εμπορευματοποίησαν τον πρώτο τρισδιάστατο εκτυπωτή τεχνολογίας που βασιζόταν στη στερεολιθογραφία με την ονομασία SLA-1. Αργότερα το 1992, η εταιρία κατασκεύασε τον SLA 250, μια πιο προηγμένη εμπορική έκδοση της τεχνολογίας SLA, η οποία χρησιμοποιούνταν κυρίως για την κατασκευή πρωτοτύπων και την παραγωγή σύνθετων εξαρτημάτων χαμηλού όγκου.



*Εικόνα 3. Η πρώτη μηχανή προσθετικής εκτύπωσης*

Λίγους μήνες αργότερα η 3D Systems και η Ciba-Geigy συνεργάστηκαν για την ανάπτυξη και εμπορική διάθεση ακρυλικών ρητινών για χρήση των εκτυπωτών, ενώ το ίδιο έτος η DuPont και η Loctite ανέπτυξαν επίσης τις δικές τους μηχανές και ρητίνες όσον αφορά την τεχνολογία SLA. Ταυτόχρονα η NTT Data CMET και η D-MEC εισήγαγαν τις δικές τους εκδοχές στερεολιθογραφίας το 1988 και το 1989, αντίστοιχα. Το 1990, η Electro Optical Systems στη Γερμανία και η Quadrax στις Ηνωμένες Πολιτείες κυκλοφόρησαν τα δικά τους συστήματα SLA και το επόμενο έτος, η Imperial Chemical Industries εισήγαγε μια ρητίνη ορατού φωτός για χρήση με το σύστημα της Quadrax, αλλά η εταιρεία σταμάτησε να πωλεί τη ρητίνη ένα χρόνο αργότερα, όταν η Quadrax διαλύθηκε λόγω νομικών ζητημάτων με την 3D Systems.

Όσον αφορά τους εκτυπωτές FDM(Fused Deposition Modelling) το 1989 ο S. Scott Crump, ιδρυτής της εταιρίας Stratasys, Ltd., κατέθεσε μία πατέντα με βάση τη συγκεκριμένη τεχνολογία και το 1992 ανατέθηκε στην εταιρία του\*. Αμέσως ο εκτυπωτής ήταν διαθέσιμος εμπορικά με την ονομασία 3-D modeler με κόστος \$130,000, ενώ το 1996 κυκλοφόρησε ο Dimension SST, ο οποίος χρησιμοποιούσε ABS.



Εικόνα 4. Ο Scott Crump σε παρουσίαση εκτυπωτή της Stratasys.

Το 1986 εφευρέθηκε ο πρώτος SLS (Selective Laser Sintering) εκτυπωτής στο πανεπιστήμιο του Τέξας από τον τότε φοιτητή Carl R. Deckard, ωστόσο χωρίς να έχει τη δυνατότητα παραγωγής περίπλοκων αντικειμένων. Στις 17 Οκτωβρίου του ίδιου έτους κατέθεσε αίτηση για δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το οποίο πιστώθηκε στο πανεπιστήμιο το 1989. Ταυτόχρονα το 1987 ο Deckard ίδρυσε την Desk Top Manufacturing Corp. και το 1992 εμπορευματοποίησε το πρώτο SLS εκτυπωτή, τον SLS-1. Τα επόμενα χρόνια ακολούθησαν πιο εξελιγμένα μοντέλα όπως το Sinterstation 2000 και Sinterstation ProX, ενώ η εταιρία εξαγοράστηκε από την 3D Systems το 2001.

Το 1991 η εταιρία Helisys έκανε διαθέσιμο στην αγορά τον πρώτο τρισδιάστατο εκτυπωτή τεχνολογίας Laminated object manufacturing (LOM) με ονομασία LOM-1. Αργότερα αντικαταστάθηκε από μια πιο εκσυγχρονισμένη έκδοση του, τον LOM-1015. Η Helisys ήταν ένας από τους πρωτοπόρους στον τομέα της τεχνολογίας LOM και οι μηχανές LOM της ήταν δημοφιλείς μεταξύ των προγραμματιστών προϊόντων και των μηχανικών για τον μεγάλο όγκο κατασκευής και τις δυνατότητες υψηλής ανάλυσης. Ωστόσο, η εταιρεία αντιμετώπισε κάποιες οικονομικές δυσκολίες και εξαγοράστηκε από την 3D Systems το 2000, και η παραγωγή των εκτυπωτών LOM σταμάτησε. Το όνομα της εταιρείας άλλαξε σε CubePro, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την εμπορία επαγγελματικών επιτραπέζιων τρισδιάστατων εκτυπωτών FDM.

Το 1992 η 3D Systems ανέπτυξε τον ThermoJet, η πρώτη εμπορικά διαθέσιμη μηχανή

τεχνολογίας Drop On Demand (DOD). Χρησιμοποιούσε υλικό που μοιάζει με κερί και είχε εφαρμογή κυρίως για την RP και την παραγωγή εξαρτημάτων μικρής κλίμακας. Θεωρήθηκε σημαντικό ορόσημο στην ανάπτυξη της τεχνολογίας DOD, ενώ παράλληλα και άλλες εταιρίες ανέπτυσαν εκτυπωτές ίδιας ή παρόμοιας τεχνολογίας, όπως η Stratasys με τον εκτυπωτή PolyJet.

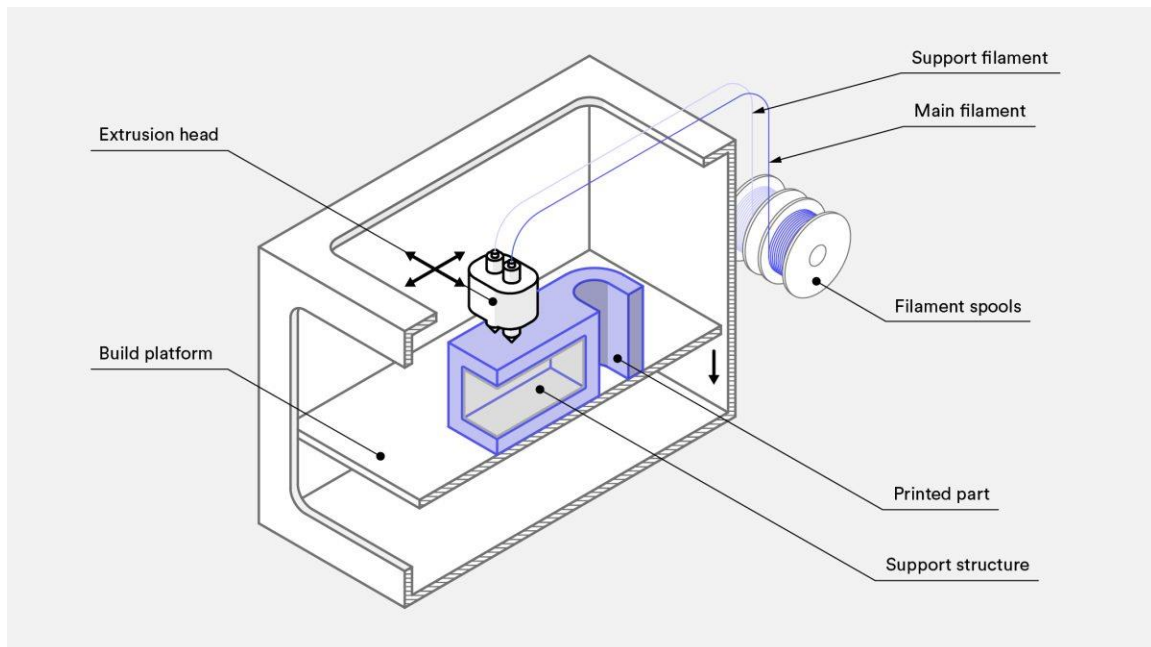
Εκείνη την εποχή ο όρος που επικρατούσε ήταν «Rapid Prototyping» (RP), δηλαδή ταχεία πρωτοτυποποίηση. Η RP είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία για τη γρήγορη δημιουργία ενός φυσικού μοντέλου ενός σχεδίου με τη χρήση τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής. Το πλεονέκτημα της RP είναι ότι επιταχύνει τη δοκιμή διαφορετικών σχεδίων, επομένως μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό προβλημάτων με το προϊόν πρωτού αυτό κατασκευαστεί σε μεγαλύτερη κλίμακα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εξοικονομήσει χρόνου και κεφαλαίων μίας εταιρίας. Με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής, η δημιουργία ενός φυσικού πρωτοτύπου προϊόντος ήταν μία χρονοβόρα και δαπανηρή διαδικασία. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για περίπλοκα σχέδια, τα οποία μπορεί να απαιτούν πολλαπλές επαναλήψεις και τροποποιήσεις.

Στη δεκαετία του 1990, ο τομέας της προσθετικής κατασκευής συνέχισε να εξελίσσεται, με μια σειρά σημαντικών εξελίξεων. Ήταν μια δεκαετία κατά την οποία η τεχνολογία έκανε τα πρώτα της βήματα προς την εμπορευματοποίηση και πολλές εταιρείες όπως η Stratasys και η 3D Systems άρχισαν να πωλούν τρισδιάστατους εκτυπωτές, αλλά εξακολουθούσε να θεωρείται πειραματική, καθώς η τεχνολογία και τα υλικά ήταν ακόμη πολύ περιορισμένα και τα ίδια τα μηχανήματα ήταν αρκετά ακριβά. Παρ' όλα αυτά, τέθηκαν τα θεμέλια για την ευρύτερη υιοθέτηση της προσθετικής κατασκευής, και μέχρι την επόμενη δεκαετία, η τεχνολογία θα άρχιζε να γίνεται πιο διαδεδομένη. Το 1992 η Society of Manufacturing Engineers (SME) δημοσίευσε την πρώτη έκδοση του βιβλίου "Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography", η οποία συνέβαλε στην προώθηση της χρήσης της προσθετικής κατασκευής στη βιομηχανία. Επίσης, το 1996 δημοσιεύθηκε για πρώτη φορά η έκθεση Wohlers, μια ευρέως αναφερόμενη έκθεση της βιομηχανίας για την ταχεία πρωτοτυποποίηση. Σήμερα η τεχνολογία προσθετικών κατασκευών χρησιμοποιείται τόσο για RP όσο και για παραγωγή τελικών προϊόντων και εξαρτημάτων.

## Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής

### Material extrusion

Η Fused Filament Fabrication (FFF) είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη τεχνολογία εξώθησης υλικών (material extrusion), γνωστή επίσης και ως FDM. Σε αυτή τη διαδικασία, ένα καρούλι νήματος φορτώνεται στον εκτυπωτή και τροφοδοτείται μέσω της κεφαλής εξώθησης. Το νήμα λιώνει καθώς ωθείται μέσω του θερμαινόμενου ακροφυσίου από έναν κινητήρα και ο εκτυπωτής μετακινεί στη συνέχεια την κεφαλή εξώθησης για να τοποθετήσει το λιωμένο υλικό σε μια ακριβή θέση, όπου στερεοποιείται καθώς ψύχεται. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται στρώμα προς στρώμα, με την πλατφόρμα κατασκευής να μετακινείται κάθε φορά προς τα κάτω. (Redwood, 2017)



Εικόνα 5. Αναπαράσταση ενός εκτυπωτή FFF

Οι μηχανές FFF διαθέτουν πολλές ρυθμιζόμενες παραμέτρους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη ακριβών εκτυπώσεων. Η ταχύτητα κατασκευής, η ταχύτητα εξώθησης και η θερμοκρασία του ακροφυσίου ρυθμίζονται από τον χειριστή για τον έλεγχο της συνοχής του εξηλασμένου νήματος, ενώ ορισμένες μηχανές διαθέτουν επίσης αυτόματες προεπιλογές με βάση το υλικό που εκτυπώνεται. Η ανάλυση ενός εκτυπωμένου τεμαχίου FFF καθορίζεται από τη διάμετρο του ακροφυσίου και το ύψος στρώματος. Ενώ όλες οι παράμετροι συμβάλλουν στην ακρίβεια των διαστάσεων, η μικρότερη διάμετρος ακροφυσίου και το χαμηλότερο ύψος στρώματος προτιμώνται γενικά για εξαρτήματα που απαιτούν λεία επιφάνεια και υψηλό επίπεδο λεπτομέρειας. Ο διαθέσιμος όγκος κατασκευής πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη κατά την εκτύπωση με χρήση FFF. Κατά μέσο όρο, οι επιτραπέζιοι/οικιακοί εκτυπωτές διαθέτουν θάλαμο δόμησης 200 x 200 x 200 mm, ενώ οι μεγαλύτερες βιομηχανικές μηχανές μπορούν να έχουν θαλάμους δόμησης τόσο μεγάλους όσο 1000 x 1000 x 1000 mm. Για πολύ μεγάλα εξαρτήματα, η διάσπαση του σχεδίου σε μικρότερα εξαρτήματα που μπορούν να συναρμολογηθούν μετά την εκτύπωση είναι συχνά η καλύτερη λύση.

Τα εξαρτήματα FFF μπορεί να απαιτούν δομές υποστήριξης για την επιτυχή εκτύπωση. Η στήριξη



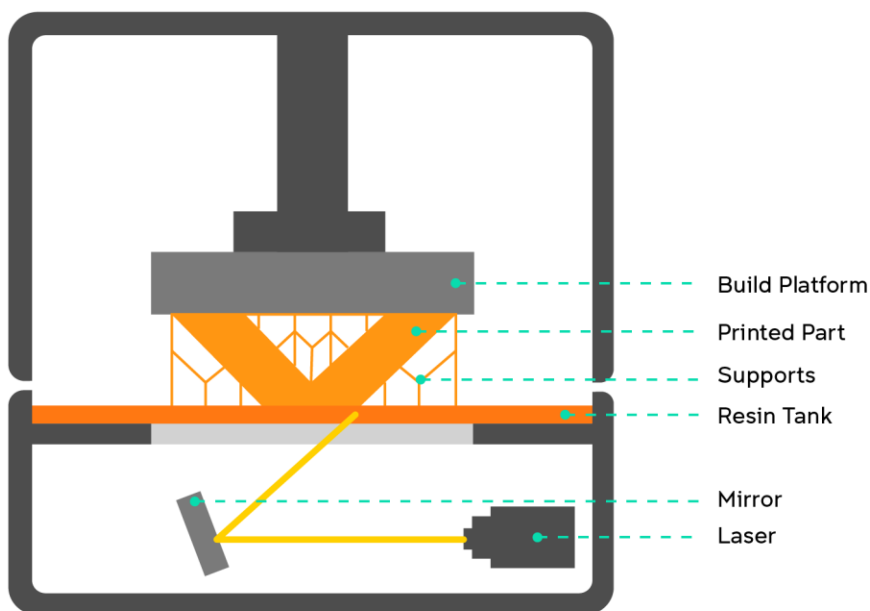
είναι απαραίτητη για οποιαδήποτε προεξέχοντα χαρακτηριστικά που είναι ρηχότερα από 45 μοίρες σε σχέση με το επίπεδο της τράπεζας. Τα νέα στρώματα δεν μπορούν να εναποθεθούν στον αέρα, οπότε απαιτείται υποστηρικτικό υλικό για να χτιστεί πάνω σε αυτό. Όταν δεν υπάρχει κανένα στρώμα από κάτω για εκτύπωση, προστίθεται υποστήριξη, επιτρέποντας την εκτύπωση χαρακτηριστικών που διαφορετικά δεν θα ήταν δυνατή. Το υλικό υποστήριξης είναι μια δομή πλέγματος χαμηλού όγκου που αφαιρείται μετά την εκτύπωση. Αν και είναι δυνατή η εκτύπωση προεξοχών που είναι μικρότερες από 45 μοίρες, λόγω των ιδιοτήτων του λιωμένου νήματος, οι επιφάνειες σε αυτά τα σημεία υποβαθμίζονται ποιοτικά. Εάν απαιτείται μια γρήγορη εκτύπωση για έλεγχο προσαρμογής και μορφής, το όριο προεξοχής μπορεί να επεκταθεί σε γωνίες μικρότερες από 45 μοίρες. Ωστόσο, για ακριβείς εκτυπώσεις συνιστάται η διατήρηση του ορίου των 45 μοιρών. Το μειονέκτημα της στήριξης είναι ότι στην ένωση της με το αντικείμενο μετά την αποκόλληση έχει δημιουργηθεί έντονη τραχιά επιφάνεια. Εφόσον είναι επιθυμητή μια λεία επιφάνεια, τότε απαιτείται μεταγενέστερη επεξεργασία. Πολλοί νέοι εκτυπωτές προσφέρουν πλέον διπλή εξώθηση, πράγμα που σημαίνει ότι διαθέτουν δύο κεφαλές εκτύπωσης και μπορούν να εκτυπώνουν εξαρτήματα από διάφορα υλικά. Για αυτούς τους εκτυπωτές, οι δομές στήριξης μπορούν να εκτυπωθούν σε διαλυτό υλικό. Αυτό επιτρέπει στη στήριξη να διαλυθεί σε νερό αντί να αφαιρεθεί μηχανικά, με αποτέλεσμα καλύτερη ποιότητα επιφανείας στις περιοχές που βρίσκονται σε επαφή με το αντικείμενο. Ωστόσο, η χρήση διαλυτών υλικών αυξάνει γενικά το κόστος της κατασκευής λόγω της τιμής του διαλυτού νήματος και της αύξησης του χρόνου εκτύπωσης. (Sharma, 2022)

Ένα μειονέκτημα της χρήσης συστημάτων εξώθησης υλικών είναι ότι παράγει ανισότροπα αντικείμενα και πιο συγκεκριμένα έχουν ασθενέστερες ιδιότητες στην κατακόρυφη διεύθυνση (Z) σε σύγκριση με την οριζόντια διεύθυνση (X και Y). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο δεσμός μεταξύ των στρωμάτων δεν είναι τόσο ισχυρός όσο το υλικό από το οποίο αποτελούνται τα στρώματα, παρόμοια με το πώς το ξύλο είναι ισχυρότερο όταν εφαρμόζεται δύναμη κάθετα προς τον κόκκο, αλλά ασθενέστερο όταν εφαρμόζεται παράλληλα προς τον κόκκο. Για το λόγο αυτό, η εξώθηση υλικού είναι μια καλή επιλογή για τη δημιουργία εξαρτημάτων που θα βρίσκονται κυρίως υπό συμπίεση, αλλά λιγότερο κατάλληλη για εξαρτήματα που ενδέχεται να υποστούν τάση και θα μπορούσαν να προκαλέσουν τον διαχωρισμό των στρώσεων. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι η τεχνολογία εξώθησης υλικού βελτιώνεται συνεχώς και το ζήτημα αυτό αντιμετωπίζεται καθώς αναπτύσσονται νέες μηχανές. (Tao, 2022)

## VAT Photopolymerization

Η τεχνολογία VAT Photopolymerization χρησιμοποιεί έναν ειδικό τύπο ρητίνης σε δοχείο που στερεοποιείται όταν εκτίθεται στο φως. Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι είναι η Stereolithography (SLA) και η Direct Light Processing (DLP).

Στην πρώτη διαδικασία, μικρά κάτοπτρα (mirror galvanometers), τοποθετημένα οριζόντια και κάθετα, χρησιμοποιούνται για να κατευθύνουν γρήγορα μια δέσμη λέιζερ σε ένα δοχείο ρητίνης με αποτέλεσμα να σκληραίνει και να στερεοποιεί το υλικό. Ένα αντικείμενο χωρίζεται σε πολλές στρώσεις και κάθε στρώση αναλύεται σε μία σειρά από σημεία και γραμμές που δίνονται στα κάτοπτρα ως συντεταγμένες. Αφού έχει εκτυπωθεί μία στρώση, η πλατφόρμα κατασκευής που βρίσκεται μέσα στο δοχείο μετατοπίζεται κατακόρυφα, ώστε να εφαρμοστεί μία νέα στρώση ρητίνης. Η νέα στρώση στερεοποιείται και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί το τελικό τεμάχιο. Αφού έχει περατωθεί η εκτύπωση, το αντικείμενο πρέπει να τοποθετηθεί σε φούρνο υπεριώδους ακτινοβολίας ώστε να στερεοποιηθεί πλήρως. (Kumar, 2019)



Εικόνα 6. Αναπαράσταση ενός εκτυπωτή SLA

Στην δεύτερη μέθοδο, η μόνη διαφορά από την SLA είναι πως κατά την στερεοποίηση του υλικού χρησιμοποιείται ένα προβολέας που εμφανίζει μία ενιαία εικόνα κάθε στρώματος ταυτόχρονα. Επειδή ο προβολέας είναι ψηφιακός, τα στρώματα αποτελούνται από μικρά ορθογώνια τούβλα που ονομάζονται voxels. Ο προβολέας χρησιμοποιεί LED οθόνη ή μία πηγή υπεριώδους φωτός που κατευθύνεται από μία ψηφιακή συσκευή μικροκατόπτρων για να προβάλλουν φως στη ρητίνη και να δημιουργήσει όλο το στρώμα ενιαία.

Συγκρίνοντας τις δύο μεθόδους η χρήση ενός σημειακού λέιζερ στην SLA την καθιστά πιο αργή στην ανίχνευση της διατομής ενός εξαρτήματος σε σύγκριση με τους εκτυπωτές DLP, οι οποίοι μπορούν να εκθέσουν ολόκληρη τη διατομή με μία μόνο προβολή, καθιστώντας την DLP ταχύτερη από την SLA.

Γενικά, τα κύριο προτερήματα της τεχνολογίας VAT Photopolymerization είναι η δυνατότητα εκτύπωσης σε βέλτιστη ποιότητα επιφανείας και η υψηλή ακρίβεια στην παραγωγή λεπτομερών εξαρτημάτων. Επίσης εξαιρετικά ακριβής ως προς τις διαστάσεις, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για τις βιομηχανίες κοσμημάτων και οδοντιατρικής. Ωστόσο, το κύριο μειονέκτημα είναι η εύθραυστη και αδύναμη φύση των φωτοπολυμερών που χρησιμοποιούνται, καθιστώντας την λιγότερο κατάλληλη για λειτουργικά εξαρτήματα. Επιπλέον, τα εξαρτήματα που εκτυπώνονται έχουν περιορισμένη διάρκεια ζωής, καθώς με την πάροδο του χρόνου οι μηχανικές τους ιδιότητες έχουν πτωτική τάση. Τέλος, η ρητίνη αν δεν διαχειριστεί σωστά και έρθει σε επαφή με το ανθρώπινο δέρμα χωρίς να απολυμανθεί άμεσα, μπορεί να προκαλέσει μεγάλο κίνδυνο.

Οι εκτυπωτές τεχνολογίας VAT Photopolymerization ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με τον προσανατολισμό κατασκευής του αντικειμένου, τους bottom-up και τους top-down. Και οι δύο μέθοδοι (SLA, DLP) διαθέτουν αυτές τις διαμορφώσεις.

Σε έναν εκτυπωτή bottom-up, η πηγή φωτός τοποθετείται κάτω από το δοχείο με ρητίνη, το οποίο έχει διαφανή πυθμένα. Η πλατφόρμα κατασκευής τοποθετείται αρχικά κοντά στον πυθμένα του δοχείου, έτσι ώστε να την καλύπτει μόνο ένα λεπτό στρώμα ρητίνης. Στη συνέχεια, η πηγή φωτός σκληραίνει αυτό το στρώμα ρητίνης, ενώ μια ειδική επίστρωση από PDMS ή FEP στον πυθμένα του δοχείου εμποδίζει την προσκόλληση της ρητίνης σε αυτό. Αφού το πρώτο στρώμα σκληρύνει και κολλήσει στην πλατφόρμα κατασκευής, ο εκτυπωτής το διαχωρίζει από τον πυθμένα του δοχείου και μετακινεί την πλατφόρμα κατά ένα πάχος στρώματος προς τα πάνω. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί το εξάρτημα, χρησιμοποιώντας έναν υαλοκαθαριστήρα για την εξάπλωση της ρητίνης και την απομάκρυνση των υπολειμμάτων, εάν χρειάζεται. Είναι σημαντικό να μειωθούν οι δυνάμεις που ασκούνται στα πρόσφατα εκτυπωμένα στρώματα κατά το στάδιο του διαχωρισμού για να αποφευχθεί η αστοχία του αντικειμένου. Κύριο πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι πως χρησιμοποιεί μικρή ποσότητα ρητίνης άρα είναι πιο οικονομική, ενώ ταυτόχρονα είναι και πιο εύκολος ο έλεγχος του πάχους των στρώσεων. Στα μειονεκτήματα, ο διάφανος πυθμένας χρειάζεται συχνή αντικατάσταση ώστε να υπάρχουν βέλτιστες συνθήκες εκτύπωσης. Επειδή η πλατφόρμα κατασκευής δέχεται ως δύναμη το βάρος του αντικειμένου, είναι πιθανό αυτό να αποκολληθεί και να άρα να αστοχήσει. Παράλληλα, τα αντικείμενα πρέπει να εκτυπώνονται με κλίση, επομένως αυξάνεται ο χρόνος εκτύπωσης. (Gouge, 2017)

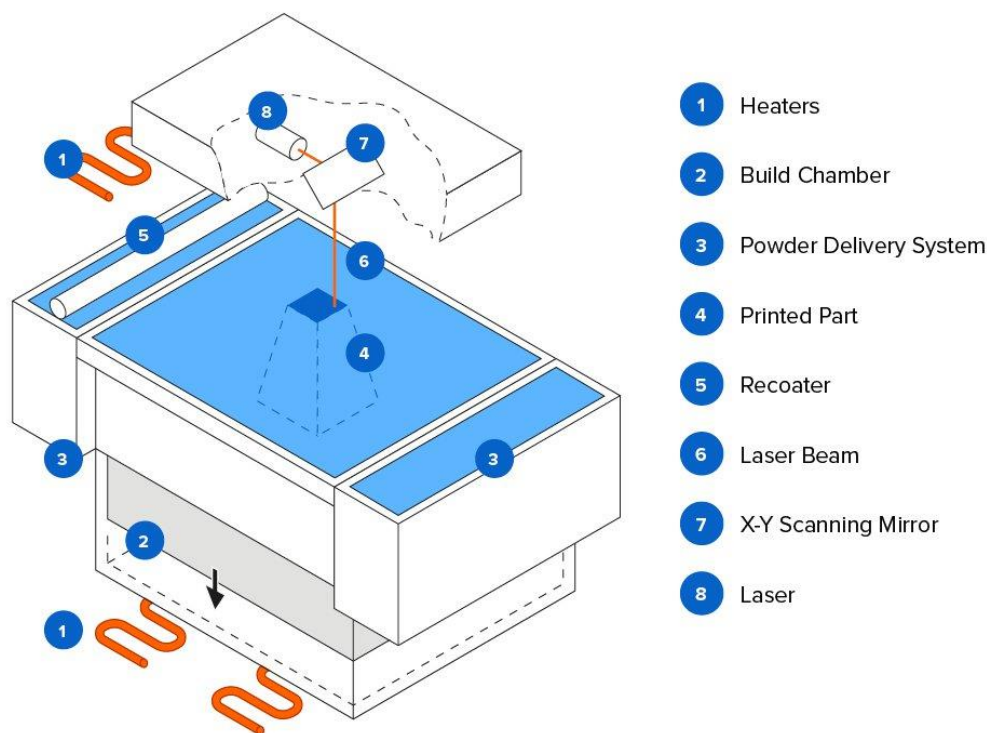
Αντίστοιχα, σε ένα top-down εκτυπωτή η πηγή φωτός είναι τοποθετημένη πάνω από την πλατφόρμα κατασκευής. Αρχικά, η πλατφόρμα κατασκευής ξεκινά από την κορυφή ενός δοχείου γεμάτου με ρητίνη και ένα λεπτό στρώμα της απλώνεται πάνω στην πλατφόρμα και στη συνέχεια η πηγή φωτός σκληραίνει αυτό το στρώμα ρητίνης. Έπειτα, η πλατφόρμα κατασκευής μετακινείται προς τα κάτω κατά ένα πάχος στρώματος και η διαδικασία επαναλαμβάνεται, έως ότου το ολοκληρωμένο εξάρτημα βυθιστεί πλήρως στη ρητίνη. Στη συνέχεια, το εξάρτημα ανασηκώνεται από τη ρητίνη και αφαιρείται από την πλατφόρμα κατασκευής. Όπως και στους εκτυπωτές bottom-up, είναι σημαντικό το πρώτο στρώμα να προσκολλάται καλά στην πλατφόρμα κατασκευής, ώστε να διασφαλιστεί η εκτύπωση επιτυχής. Η πλατφόρμα πρέπει να κινείται αργά μέσα στη ρητίνη για να αποφευχθεί η δημιουργία φυσαλίδων αέρα, οι οποίες μπορεί να επηρεάσουν επίσης την ποιότητα της εκτύπωσης. Οι πλατφόρμες κατασκευής είναι συνήθως διάτρητες για τη μείωση της αντίστασης που δέχονται. Στα θετικά, οι εκτυπώσεις εκτελούνται πιο γρήγορα καθώς το αντικείμενο δεν απομακρύνεται από το δοχείο σε κάθε νέα στρώση. Σε αντίθεση με τους bottom-up, οι δυνάμεις που δέχεται το αντικείμενο είναι μικρότερες και η ρητίνη που χρησιμοποιείται ως υποστηρικτική δομή είναι λιγότερη σε ποσότητα, αφού οι εκτυπώσεις δεν γίνονται υπό κλίση. Στα αρνητικά, για μία εκτύπωση χρησιμοποιείται περισσότερη ρητίνη εξ' αρχής, ώστε το αντικείμενο να μπορεί να βυθιστεί όλο μέσα στο δοχείο με τη ρητίνη. Αυτό έχει ως συνέπεια την κατασκευή μεγαλύτερου όγκου εκτυπωτών.

## Powder Bed Fusion

Η μέθοδος Powder Bed Fusion χρησιμοποιεί μια θερμική πηγή για να προκαλέσει σύντηξης μεταξύ σωματιδίων σκόνης, σε συγκεκριμένη θέση της περιοχής κατασκευής, για την παραγωγή ενός αντικειμένου. Οι τεχνολογίες που αφομοιώνουν αυτή τη μέθοδο ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με τα υλικά που χρησιμοποιούν, πολυμερή ή μέταλλα. Όσον αφορά τα πολυμερή, η πιο διαδεδομένη τεχνολογία είναι η Selective Laser Sintering (SLS), ενώ στην ίδια κατηγορία βρίσκεται και η Selective Heat Sintering (SHS). Αντίστοιχα, οι τεχνολογίες που επικρατούν στη χρήση μεταλλικών υλικών είναι οι Direct metal laser sintering (DMLS), Selective Laser Melting (SLM) και Electron beam melting (EBM).

Η διαδικασία SLS περιλαμβάνει τη θέρμανση ενός δοχείου πολυμερούς, σε μορφή σκόνη, σε θερμοκρασία λίγο κάτω από το σημείο τήξης του, και στη συνέχεια τη χρήση μίας λεπίδας ή ενός κυλίνδρου επικάλυψης για την απόθεση ενός λεπτού στρώματος υλικού στην πλατφόρμα κατασκευής. Μία δέσμη λέιζερ, που κατευθύνεται από κάτοπτρα όπως ακριβώς και στην τεχνολογία SLA, σαρώνει την επιφάνεια, πυροσυσσωματώνοντας τη σκόνη και στερεοποιώντας μία διατομή του τεμαχίου. Στη συνέχεια, η πλατφόρμα κατασκευής μετακινείται κατά ένα πάχος στρώματος και εναποτίθεται άλλο ένα στρώμα σκόνης, και το λέιζερ σαρώνει αυτή τη νέα διατομή, χτίζοντας πάνω στην προηγούμενη. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να κατασκευαστεί ολόκληρο το αντικείμενο. Η μη πυροσυσσωματωμένη σκόνη παραμένει στη θέση της για τη στήριξη του εξαρτήματος, εξαλείφοντας την ανάγκη για δομές στήριξης. Μετά την εκτύπωση, το δοχείο σκόνης και το αντικείμενο ψύχονται και καθαρίζονται, ενώ το 50% της μη συσσωματωμένης σκόνης συλλέγεται και επαναχρησιμοποιείται. Όπως συμβαίνει με όλες τις μεθόδους κατασκευής με βάση τη σκόνη, είναι σημαντικό να χειρίζεται με προσοχή, καθώς το μικρό μέγεθος των σωματιδίων μπορεί να μεταφερθεί στον αέρα και να προκαλέσει αναπνευστικά προβλήματα εάν δεν εφαρμοστεί ο κατάλληλος εξοπλισμός ασφαλείας. Λόγω της διαδικασίας κατασκευής, το τελικό προϊόν έχει μια κοκκώδη υφή και γι' αυτό το λόγω εφαρμόζεται μεταγενέστερη επεξεργασία, συνήθως με αμμοβολή. Η βασική διαφορά με την SHS είναι πως η δεύτερη δεν χρησιμοποιεί λέιζερ αλλά μια θερμική κεφαλή. (Noorani, 2017)

Όσον αφορά τους μεταλλικούς εκτυπωτές τόσο η DMLS όσο και η SLM χρησιμοποιούν παρόμοιες μεθόδους με τις SLS για την παραγωγή εξαρτημάτων. Οι διαφορές των DMLS και SLM είναι πως η πρώτη χρησιμοποιεί λέιζερ για να θερμαίνει την σκόνη λίγο πριν το σημείο τήξης, όπως ακριβώς και η SLS, ενώ η δεύτερη λιώνει πλήρως τη μεταλλική σκόνη για σχηματίσει ένα ομοιογενές εξάρτημα. Αυτός ο διαχωρισμός υπάρχει καθώς η DMLS χρησιμοποιεί αποκλειστικά κράματα μετάλλου, ενώ η SLM χρησιμοποιεί καθαρά μέταλλα. Σε αντίθεση με την SLS, και οι δύο παραπάνω τεχνολογίες απαιτούν δομική υποστήριξη για να αποφευχθεί η αστοχία του αντικειμένου, καθώς η περιβάλλουσα σκόνη δεν παρέχει αρκετή υποστήριξη. Οι τάσεις που παράγονται κατά την εκτύπωση και οι υψηλές θερμοκρασίες επεξεργασίας μπορούν να προκαλέσουν στρέβλωση, οπότε τα εξαρτήματα συνήθως υφίστανται θερμική επεξεργασία μετά την εκτύπωση, ενώ είναι ακόμη συνδεδεμένα με την πλάκα κατασκευής. Το ίδιο εφαρμόζεται και στην τεχνολογία EBM, όπου αντί για μία πηγή λέιζερ, μία ακτίνα ηλεκτρονίων λιώνει την σκόνη προκαλώντας την σύντηξη των μορίων. Σε αυτό που πλεονεκτεί των υπόλοιπων μεταλλικών τεχνολογιών είναι η ταχύτητα, ενώ στα αρνητικά έχει μικρότερη ακρίβεια και πιο φτωχή ποιότητα επιφανείας. (Redwood, 2017)



Εικόνα 7. Αναπαράσταση ενός εκτυπωτή SLS

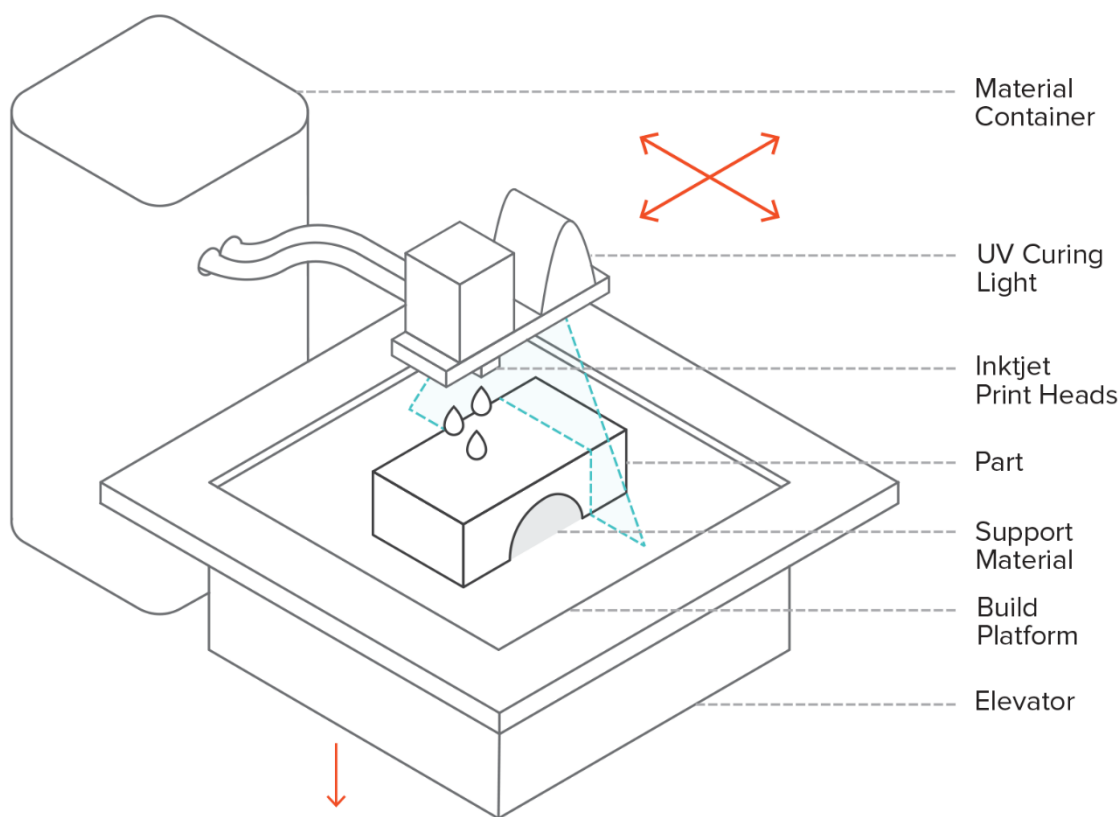
Η SLS τεχνολογία είναι η καταλληλότερη για υλικά με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, επειδή παρουσιάζουν πιο σταθερή συμπεριφορά κατά τη φάση της πυροσυσσωμάτωσης. Χρησιμοποιείται κυρίως έναν τύπο θερμοπλαστικού, που ονομάζεται πολυαμίδιο (PA), όπου τα πιο σύνηθες στη χρήση είναι τα PA 11 και PA 12. Τα εξαρτήματα από πολυαμίδιο έχουν καλή μακροχρόνια σταθερότητα, χημική αντοχή και το πιο κοινό εμπορικό πολυαμίδιο είναι το νάιλον. Για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων, της θερμικής αντοχής ή της εμφάνισης των εξαρτημάτων, το νάιλον μπορεί να αναμιχθεί με άλλα υλικά, όπως αλουμίνιο, γυαλί, άνθρακα και γραφίτη, ώστε να σχηματιστεί μια σύνθετη σκόνη. Αντίστοιχα για τους μεταλλικούς εκτυπωτές, χρησιμοποιείται κυρίως αλουμίνιο, ανοξείδωτος χάλυβας, τιτάνιο, βολφράμιο, χαλκός και κράματα νικελίου. Για την παραγωγή κοσμημάτων χρησιμοποιούνται πολύτιμα μέταλλα όπως ο χρυσός, το ασήμι, η πλατίνα και το παλλάδιο. (Gebhardt, 2011)

Η SLS είναι κατάλληλη για τη δημιουργία ισχυρών και λειτουργικών εξαρτημάτων με πολύπλοκες γεωμετρίες. Η ικανότητα δημιουργίας ισοτροπικών αντικειμένων και το σχετικά υψηλό επίπεδο ακρίβειας, την καθιστούν δημοφιλή επιλογή για την παραγωγή εξαρτημάτων τελικής χρήσης. Ένα ακόμα βασικό πλεονέκτημα της SLS είναι ότι δεν απαιτεί κανένα υλικό υποστήριξης. Το κύριο μειονέκτημα της εκτύπωσης SLS είναι ότι η τεχνολογία προορίζεται για βιομηχανική χρήση με αποτέλεσμα τα μηχανήματα να είναι ιδιαίτερα ακριβά. Επιπλέον, η διαδικασία εκτύπωσης σε συνδυασμό με τα στάδια θέρμανσης και ψύξης πριν και μετά την κατασκευή μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερους χρόνους παράδοσης σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης.

## Material Jetting

Η μέθοδος Material Jetting (MJ) χρησιμοποιεί φωτοπολυμερή ή σταγονίδια κεριού που στερεοποιούνται μέσω μίας πηγής φωτός για τη δημιουργία εξαρτημάτων. Οι πιο γνωστές τεχνολογίες είναι η ομώνυμη Material Jetting (MJ) και η Drop On Demand (DOD).

Η τεχνολογία MJ είναι μια διαδικασία εκτύπωσης που λειτουργεί παρόμοια με έναν τυπικό δυσδιάστατο εκτυπωτή inkjet, αλλά αντί να εκτυπώνει ένα μόνο στρώμα υλικού, πολλά στρώματα συσσωρεύονται για να δημιουργήσουν ένα στερεό αντικείμενο. Η κεφαλή εκτύπωσης απελευθερώνει μικρά σταγονίδια φωτοπολυμερούς υλικού και στη συνέχεια τα στερεοποιεί με υπεριώδες φως. Στη συνέχεια, η πλατφόρμα κατασκευής μετατοπίζεται κατά ένα πάχος στρώματος και η διαδικασία επαναλαμβάνεται για τη δημιουργία του τρισδιάστατου εξαρτήματος. Σε αντίθεση με άλλες τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης η MJ χρησιμοποιεί έναν γραμμικό τρόπο εκτύπωσης, επιτρέποντας την εκτύπωση πολλαπλών εξαρτημάτων σε μία μόνο γραμμή χωρίς καμία επίδραση στην ταχύτητα κατασκευής. Επιπλέον, απαιτεί την ταυτόχρονη εκτύπωση υποστηρικτικού υλικού κατά τη διάρκεια της κατασκευής από ένα διαλυτό υλικό που αφαιρείται αργότερα, ενώ είναι μία από τις λίγες τεχνολογίες που μπορούν να εκτυπώσουν σε πολλαπλά υλικά και χρώματα.



Εικόνα 8. Αναπαράσταση ενός εκτυπωτή MJ

Αντίθετα, οι μηχανές DOD διαθέτουν δύο κεφαλές εκτύπωσης, μία για την εναπόθεση υλικών κατασκευής, συνήθως μια ουσία που μοιάζει με κεριό, και μία άλλη για διαλυτό υλικό υποστήριξης. Αυτοί οι εκτυπωτές δημιουργούν στρώματα ενός εξαρτήματος ακολουθώντας μια καθορισμένη διαδρομή και εκτοξεύοντας υλικό σε ένα μόνο σημείο, σε αντίθεση με τους MJ που εναποθέτουν

υλικό γραμμικά. Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιείται κυρίως για τη δημιουργία προτύπων για χύτευση ή κατασκευή καλουπιών καθώς και για παραγωγή κοσμημάτων.

Η MJ έχει πολλά πλεονεκτήματα συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής. Αρχικά, δημιουργεί ένα ομοιογενές εξαρτήματος καθώς τα στρώματα στερεοποιούνται κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης. Επίσης, παράγει αντικείμενα με λεία επιφάνεια παρόμοια με τα χυτά εξαρτήματα με έγχυση, ενώ ταυτόχρονα είναι και η πιο ακριβής σε διαστάσεις μορφή τρισδιάστατης εκτύπωσης με ελάχιστο πάχος στρώματος τα 16 $\mu\text{m}$ \* (πηγή που να το επιβεβαιώνει). Ωστόσο, χρησιμοποιείται συνήθως για μη λειτουργικά πρωτότυπα, καθώς τα παραγόμενα μέρη έχουν φτωχές μηχανικές ιδιότητες και είναι εύθραυστα. Επιπλέον, είναι μία από τις πιο ακριβές μεθόδους λόγω του υψηλού κόστους του υλικού και της ποσότητας των αποβλήτων που παράγονται από τις στερεές δομές στήριξης. (Kocovic, 2017)

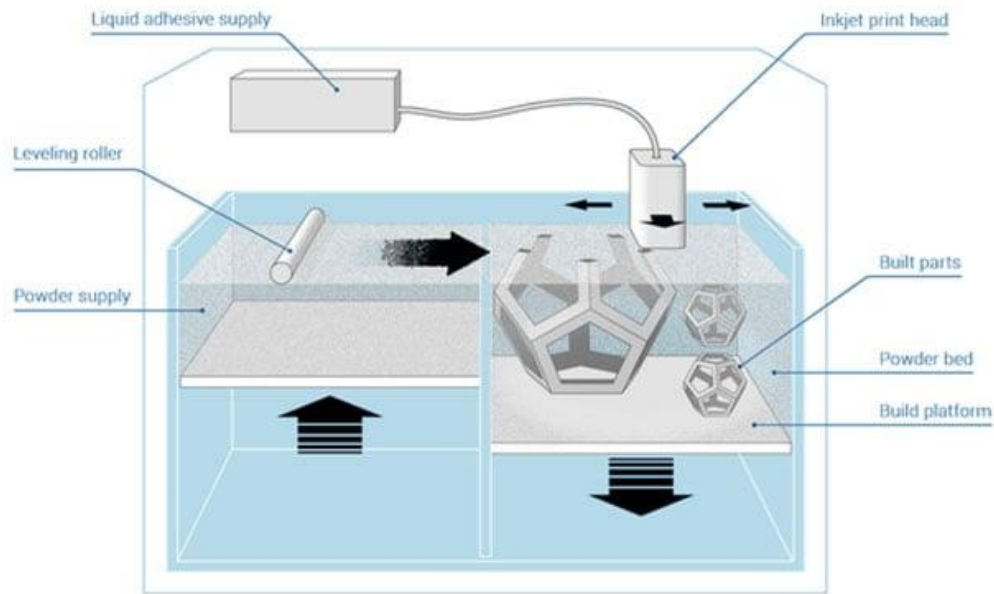
## Binder Jetting

Η μέθοδος Binder Jetting (BJ) είναι μια μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης που μοιάζει με την SLS. Σε αντίθεση με την δεύτερη, η οποία χρησιμοποιεί λέιζερ για τη σύντηξη της σκόνης, η BJ χρησιμοποιεί μια κεφαλή εκτύπωσης που κινείται πάνω από τη σκόνη και εναποθέτει σταγονίδια συνδετικού υλικού για να ενοποιήσει τα σωματίδια της σκόνης και να σχηματιστεί μία στρώση του αντικείμενου. Στη συνέχεια, η κλίνη σκόνης χαμηλώνει και ένα άλλο στρώμα σκόνης απλώνεται πάνω από το πρόσφατα εκτυπωμένο στρώμα, και αυτό επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί το αντικείμενο. Αφού ολοκληρωθεί η εκτύπωση, το αντικείμενο αφήνεται στη σκόνη για να στερεοποιηθεί πλήρως και στη συνέχεια αφαιρείται από την κλίνη σκόνης, ενώ η αχρησιμοποίητη σκόνη αποθηκεύεται για μελλοντική χρήση.

Οι τεχνολογίες BJ κατατάσσονται, ανάλογα με το υλικό κατασκευής, στους εκτυπωτές που χρησιμοποιούν άμμο και μέταλλο. Οι πρώτοι εφαρμόζονται για τη δημιουργία καλουπιών και πυρήνων χύτευσης για την παραγωγή μεταλλικών εξαρτημάτων. Αφού εκτυπωθούν, αφαιρούνται από την περιοχή κατασκευής και καθαρίζονται για να αφαιρεθούν τυχόν υπολείμματα άμμου. Στη συνέχεια, τα καλούπια είναι συνήθως έτοιμα για χύτευση, και μόλις ολοκληρωθεί η χύτευση, το καλούπι διαλύεται και εξάγεται το τελικό μεταλλικό αντικείμενο. Αντίθετα, οι μεταλλικοί εκτυπωτές χρησιμοποιούνται για να παράγουν τελικά εξαρτήματα. Ωστόσο, για να είναι πλήρως λειτουργικά, επιβάλλεται να υποβληθούν και σε δευτερεύουσα διαδικασία ώστε να αυξηθούν οι μηχανικές τους ιδιότητες. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους. Στην πρώτη μέθοδο, τα αντικείμενα τοποθετούνται σε έναν κλίβανο και λόγω της υψηλής θερμοκρασίας, το συνδετικό υλικό καίγεται ενώ ταυτόχρονα το κενό εμποτίζεται με χαλκό μέσω του τριχοειδούς φαινομένου. Στην δεύτερη μέθοδο, τα αντικείμενα επίσης τοποθετούνται σε κλίβανο όπου πυροσυσσωματώνονται με αποτέλεσμα τα σωματίδια της σκόνης να ενοποιούνται και το συνδετικό υλικό να καίγεται. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως κατά την διάρκεια της πυροσυσσωμάτωσης το εξάρτημα μπορεί να υποστεί έως και 20% συρρίκνωση (Anon., n.d.). Τέλος, υπάρχουν και οι εκτυπωτές που χρησιμοποιούν γύψο ή PMMA για την δημιουργία έγχρωμων αντικείμενων, το οποίο επιτυγχάνεται με μία δεύτερη κεφαλή, με εφαρμογή στην ταχεία πρωτοτυποποίηση. Επειδή τα παραγόμενα αντικείμενα είναι ψαθυρά, για να αυξηθούν οι μηχανικές τους ιδιότητες χρησιμοποιείται μία αντίστοιχη μέθοδος με την πρώτη.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του Binder Jetting είναι ότι δεν περιλαμβάνει θερμότητα για την επίτευξη μιας εκτύπωσης, πράγμα που σημαίνει ότι τα εξαρτήματα δεν επηρεάζονται από τις τάσεις που μπορεί να προκύψουν ως αποτέλεσμα της ταχείας θέρμανσης και ψύξης. Επίσης, επειδή η διαδικασία δεν βασίζεται σε πηγή θερμότητας για τη δημιουργία εξαρτημάτων, το λειτουργικό κόστος είναι χαμηλό. Ακόμα ένα θετικό χαρακτηριστικό αυτής της τεχνολογίας είναι ότι τα συνδετικά υλικά που χρησιμοποιούνται για τη δέσμευση της άμμου ή της μεταλλικής σκόνης είναι φθηνά, ενώ το ίδιο ισχύει και για την άμμο που χρησιμοποιείται ως υλικό κατασκευής για πυρήνες άμμου και καλούπια. Ωστόσο, το κόστος της χρήσης μεταλλικών σκονών είναι σημαντικά υψηλότερο. Παρ' όλα αυτά, σε σύγκριση με τη Powder Bed Fusion, η Binder Jetting είναι πολύ πιο οικονομικό και επιτρέπει επίσης την παραγωγή πολύ μεγαλύτερων εξαρτημάτων. (Kamara, 2021)





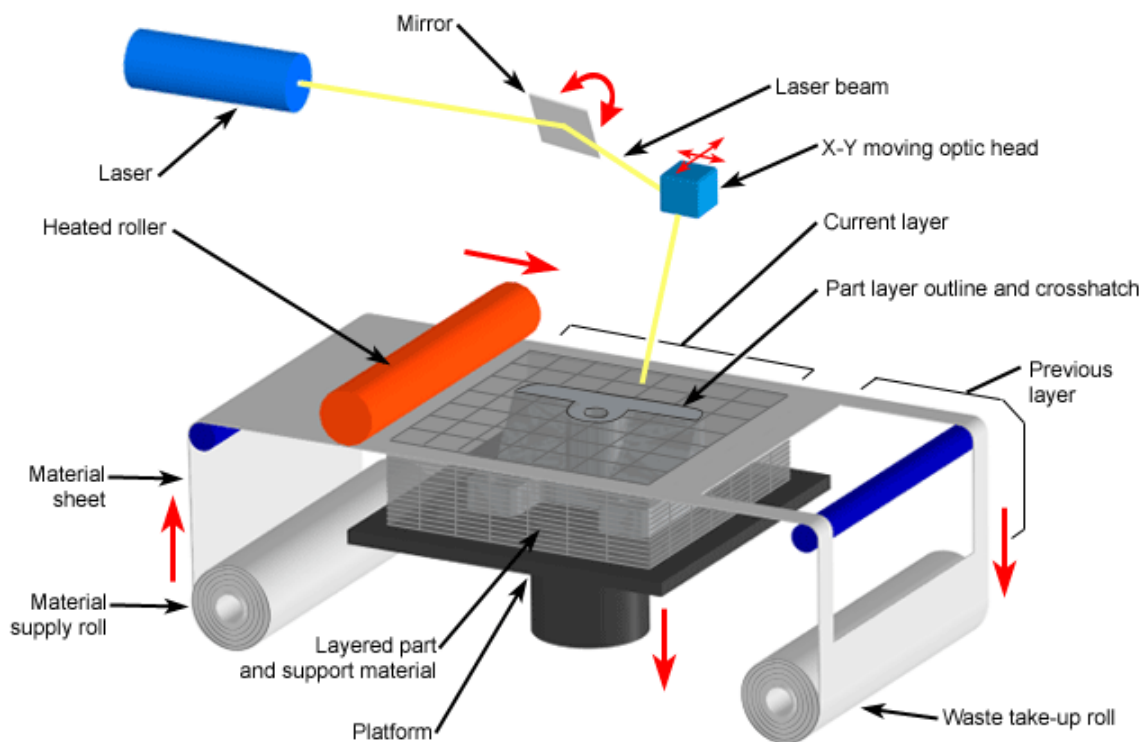
Εικόνα 9. Αναπαράσταση ενός εκτυπωτή BJ

Ο κύριος περιορισμός του Binder Jetting είναι οι μηχανικές ιδιότητες των παραγόμενων εξαρτημάτων. Τα εξαρτήματα που βγαίνουν κατευθείαν από την κλίνη εκτύπωσης είναι πολύ εύθραυστα και απαιτείται πάντα μια δευτερεύουσα διαδικασία εάν είναι επιθυμητό ένα λειτουργικό εξάρτημα. Επιπλέον, η φύση της διαδικασίας έχει ως αποτέλεσμα τα εξαρτήματα να έχουν κοκκώδες επιφάνεια, η οποία μπορεί να βελτιωθεί με την χρήση αμμοβολής.

## Sheet Lamination

Η τεχνολογία Sheet lamination αφαιρεί το περίγραμμα από προκατασκευασμένα φύλλα ομοιόμορφου πάχους ενώ επακολουθεί συγκόλληση με το ακριβώς προηγούμενο στρώμα. Οι πιο διαδεδομένες τεχνολογίες είναι η Laminated Object Manufacturing (LOM) και η Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM).

Οι LOM εκτυπωτές αποτελούνται από μία τράπεζα κατασκευής που μπορεί να κινείται κατακόρυφα και από έναν μηχανισμό που ξετυλίγει το χαρτί, το τοποθετεί στη τράπεζα και τυλίγει το υπόλοιπο χαρτί στην άλλη πλευρά. Για τη δημιουργία ενός εξαρτήματος, το χαρτί τοποθετείται στο τραπέζι κατασκευής και στερεώνεται από έναν θερμαινόμενο κύλινδρο που ενεργοποιεί την κόλλα. Μία συσκευή λέιζερ κόβει το περίγραμμα, με το βάθος κοπής να ρυθμίζεται ανάλογα με το πάχος του χαρτιού. Μια δεύτερη κοπή με λέιζερ, σε σχήμα πλαισίου, ορίζει τα όρια του εξαρτήματος. Αυτό αφήνει δύο λωρίδες χαρτιού σε κάθε πλευρά του τεμαχίου, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την ανύψωση και το τύλιγμα του πλεονάζοντος χαρτιού με τη χρήση του δεύτερου ρολού. Το υλικό μεταξύ του περιγράμματος και του πλαισίου αφήνεται στο εσωτερικό του τεμαχίου για να παρέχει στήριξη. Το υπολειπόμενο χαρτί κόβεται σε τετράγωνα για την εύκολη απομάκρυνση του. Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία κατασκευής, το μπλοκ χαρτιού που περιέχει το τεμάχιο και το υλικό στήριξης αφαιρείται από την πλατφόρμα κατασκευής. Τα τετράγωνα αφαιρούνται, αφήνοντας πίσω το τελικό εξάρτημα, στο οποίο εφαρμόζεται επικάλυψη ειδικού υλικού όπως το βερνίκι για την αποφυγή αποκόλλησης των στρώσεων. (Redwood, 2017)



Copyright © 2008 CustomPartNet

Εικόνα 10. Αναπαράσταση ενός εκτυπωτή LOM

Αντίστοιχα, οι UAM εκτυπωτές χρησιμοποιούν μεταλλικά φύλλα για την κατασκευή αντικειμένων, ενώ η ένωση των στρώσεων γίνεται μέσω συγκόλληση υπερήχων. Σε αυτή την διαδικασία, μηχανικές δονήσεις υψηλής συχνότητας εκπέμπονται προς τα δύο μέρη με αποτέλεσμα την ένωση τους. Όσον αφορά την μεταγενέστερη επεξεργασία, σε αντίθεση με το χαρτί, το μέταλλο δεν μπορεί εύκολα να αφαιρεθεί χειροκίνητα, επομένως το ανεπιθύμητο υλικό πρέπει να αφαιρεθεί με μηχανική κατεργασία, όπως με τη χρήση μιας CNC εργαλειομηχανής.

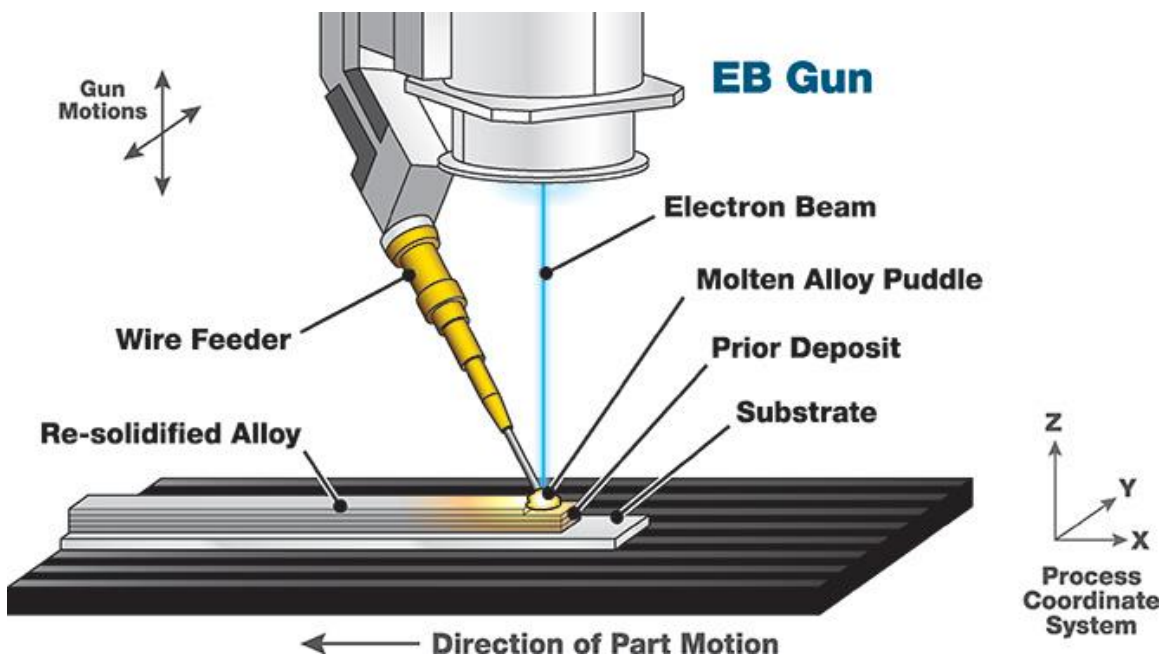
Στα θετικά χαρακτηριστικά αυτών των τεχνολογιών είναι η ταχύτητα εκτύπωσης των αντικειμένων, καθώς και το χαμηλό κόστος κατασκευής τους, αφού η διαδικασία πραγματοποιείται σε χαμηλές θερμοκρασίες. Στα αρνητικά, τα LOM εξαρτήματα έχουν ανίσχυρες μηχανικές ιδιότητες με φτωχή ποιότητα επιφανείας, ενώ γενικά υπάρχει περιορισμός στην χρήση υλικών.

## Directed Energy Deposition

Η Directed Energy Deposition (DED) χρησιμοποιεί μια εστιασμένη πηγή ενέργειας, όπως ένα λέιζερ ή μια δέσμη ηλεκτρονίων, για την εναπόθεση υλικού σε ένα υπόστρωμα ή ένα υπάρχον εξάρτημα. Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται συχνά για την επισκευή ή την κατασκευή σύνθετων εξαρτημάτων με υψηλή ακρίβεια και υψηλό βαθμό ελέγχου του εναποτιθέμενου υλικού. Στην DED, το υλικό τροφοδοτείται σε μια λίμνη τήγματος που δημιουργείται από την πηγή ενέργειας και στερεοποιείται σε ένα στρώμα καθώς η πηγή ενέργειας απομακρύνεται από την επιφάνεια. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για τη δημιουργία πολλαπλών στρωμάτων έως ότου ολοκληρωθεί το τελικό εξάρτημα.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι τεχνολογιών DED, οι οποίοι κατατάσσονται ανάλογα με πηγή ενέργειας που χρησιμοποιούν στις μηχανές με λέιζερ, με δέσμη ηλεκτρονίων και με πλάσμα.

Στην πρώτη τεχνολογία, ένα λέιζερ εστιάζεται στην επιφάνεια του εξαρτήματος, δημιουργώντας μια λίμνη τήγματος. Στη συνέχεια, το υλικό τροφοδοτείται στη λίμνη τήγματος μέσω ενός ομοαξονικού ακροφυσίου, το οποίο κινείται πάνω στην επιφάνεια του εξαρτήματος για να εναποθέσει υλικό στρώμα προς στρώμα. Η δέσμη λέιζερ μπορεί να ελεγχθεί ώστε να μεταβάλλεται το μέγεθος της λίμνης τήξης, επιτρέποντας τον ακριβή έλεγχο της ποσότητας του υλικού που εναποτίθεται. Η DED με λέιζερ είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για την παραγωγή εξαρτημάτων με υψηλή αντοχή. (Diegel, 2019)



Εικόνα 11. Αναπαράσταση ενός εκτυπωτή LOM

Στη δεύτερη τεχνολογία, η δέσμη ηλεκτρονίων παράγεται από μια κάθοδο και εστιάζεται στην επιφάνεια του τεμαχίου μέσω ενός ηλεκτρομαγνητικού φακού. Το υλικό τροφοδοτείται στη λίμνη τήγματος μέσω ενός ακροφυσίου πλευρικής παροχής, ενώ η δέσμη και το ακροφύσιο κινούνται πάνω στην επιφάνεια του εξαρτήματος για να εναποθέσουν υλικό στρώμα προς στρώμα. Η DED με δέσμη ηλεκτρονίων εφαρμόζεται για την παραγωγή εξαρτημάτων με καλές θερμικές ιδιότητες.

Η τρίτη τεχνολογία χρησιμοποιεί ένα τόξο πλάσματος για τη δημιουργία της λίμνης τήξης και την εναπόθεση υλικού. Το τόξο δημιουργείται μεταξύ ενός ηλεκτροδίου και της επιφάνειας του

εξαρτήματος, δημιουργώντας έναν πίδακα πλάσματος που λιώνει το υλικό. Το υλικό τροφοδοτείται στο πίδακα πλάσματος μέσω ενός τροφοδότη σκόνης ή σύρματος, ενώ το τόξο και ο τροφοδότης κινούνται πάνω στην επιφάνεια του εξαρτήματος για να εναποθέσουν υλικό στρώμα προς στρώμα. Η DED με πλάσμα είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για την παραγωγή εξαρτημάτων με καλή ποιότητα επιφάνειας.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της DED είναι η ικανότητά της να επισκευάζει ή να κατασκευάζει εξαρτήματα με πολύπλοκες γεωμετρίες που δεν μπορούν να παραχθούν με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής, ενώ χαρακτηρίζεται από υψηλούς ρυθμούς εναπόθεσης που μπορούν να παράγουν εξαρτήματα γρήγορα.

Ωστόσο, υπάρχουν επίσης αρκετές προκλήσεις που σχετίζονται με την DED. Ένα από τα κύρια μειονεκτήματα είναι ο έλεγχος της ποιότητας του εναποτιθέμενου υλικού, ιδίως όσον αφορά τη μικροδομή. Επίσης, η DED είναι μια σχετικά δαπανηρή διαδικασία, η οποία απαιτεί λείζερ ή γεννήτριες δέσμης ηλεκτρονίων υψηλής ισχύος, καθώς και εξειδικευμένο εξοπλισμό για την τροφοδοσία σκόνης ή σύρματος.

## Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που θα εφαρμοστεί σε αυτή τη διπλωματική εργασία περιλαμβάνει διάφορα βασικά βήματα για να διασφαλιστεί η λήψη αξιόπιστων και ακριβών αποτελεσμάτων. Αρχικά, θα διεξαχθεί έρευνα για τη συγκέντρωση πληροφοριών σχετικά με την προσθετική κατασκευή από βάσεις δεδομένων έγκριτων επιστημονικών περιοδικών και συγγραμμάτων. Συγκεκριμένα, θα γίνει αναζήτηση για τις τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής και κυρίως τη μέθοδο FDM, τα υλικά που χρησιμοποιούνται, τις παραμέτρους εκτύπωσης, τις μηχανικές ιδιότητες εκτυπωμένων αντικειμένων και τα πρότυπα που εφαρμόστηκαν. Στη συνέχεια, θα γίνει επιλογή των μεταβλητών παραμέτρων των εκτυπώσεων, του υλικού κατασκευής καθώς και του προτύπου που θα ακολουθηθεί για το πείραμα εφελκυσμού. Έπειτα, θα δημιουργηθεί ένα τρισδιάστατο μοντέλο CAD βασισμένο στο επιλεγμένο πρότυπο και στη συνέχεια θα χρησιμοποιηθεί ένας slicer για τον καθορισμό των παραμέτρων εκτύπωσης. Ύστερα, θα πραγματοποιηθούν δοκιμαστικές εκτυπώσεις για να διασφαλιστεί το επιθυμητό τελικό αποτέλεσμα. Αφού θα κατασκευαστούν επιτυχώς τα τελικά δοκίμια, θα πραγματοποιηθεί η δοκιμή εφελκυσμού. Τέλος, τα αποτελέσματα θα συγκριθούν και θα συζητηθούν λεπτομερώς, αναδεικνύοντας τη σημασία των ευρημάτων.

## Πειραματικό μέρος

### Πρότυπο

Οι περισσότερες μελέτες που αφορούν μηχανικές ιδιότητες πλαστικών δοκιμών προσθετικής κατασκευής τα οποία έχουν υποστεί έλεγχο σε εφελκυσμό, βασίζονται στα πρότυπα ASTM D638 ή ISO 527-2. Επειδή ο σκοπός της εργασίας είναι η δοκιμή μοντέλων πάχους μικρότερου από 1mm, το πρότυπο στο οποίο βασίστηκαν τα πειράματα είναι το ASTM D882. Το πρότυπο δεν προδιαγράφει συγκεκριμένες διαστάσεις για το δοκίμιο, ωστόσο αναφέρει ορισμένους περιορισμούς. Έτσι, επιλέχθηκε δοκίμιο ορθογώνιου σχήματος με διαστάσεις 0.8\*8\*120mm.

### Υλικό

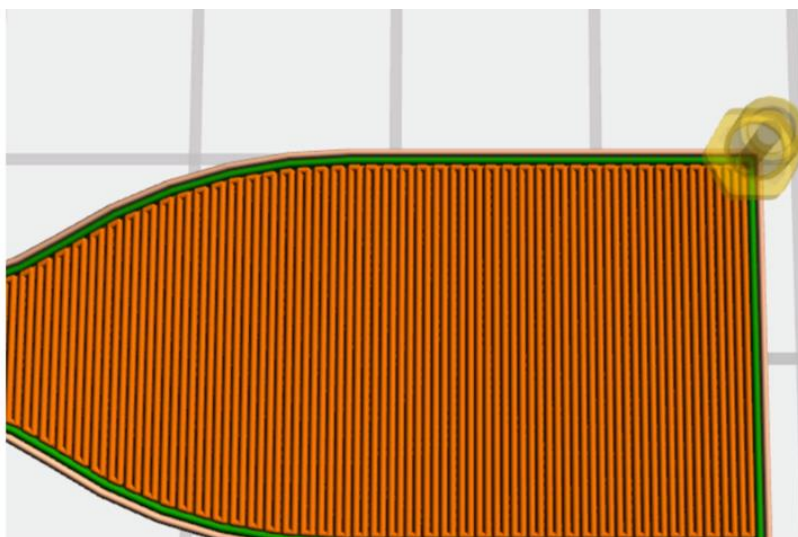
Αφού αποφασίστηκε το πρότυπο κατά το οποίο θα διεξαχθούν τα πειράματα, το υλικό που επιλέχθηκε για τις εκτυπώσεις ήταν το PLA, καθώς αποτελεί ένα διαδεδομένο και εύκολο υλικό για εκτύπωση. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το PLA N.01 της σειράς Everfil™ από την εταιρία 3D Kordo.

TYPICAL PROPERTY VALUES			
Filament	Nominal Value	Unit	Test Method
Filament diameter	1.75, 2.85	mm	-
Diameter tolerance	± 0.03	mm	-
Spool weight	1.0, 3.0	kg netto	-
Physical	Nominal Value	Unit	Test Method
Density / Specific Gravity	1,24	g/cc	ASTMD792
MFR	6	g/10min	ASTMD1238
Relative Viscosity	4,0		ASTMD5225
Clarity	Transparent		
Peak Melt Temperature	145-160	°C	ASTMD3418
Glass Transition Temperature	55-60	°C	ASTMD3418
Mechanical	Nominal Value	Unit	Test Method
Tensile Yield Strength	8700 (60)	psi (MPa)	ASTMD882
Tensile Strength at Break	7700 (53)	psi (MPa)	ASTMD882
Tensile Modulus	524 (3.6)	psi (MPa)	ASTMD882
Tensile Elongation	6	%	ASTMD882
Notched Izod Impact	0.3 (16)	ft-lb/in (J/m)	ASTMD256
Flexural Strength	12 (83)	psi (MPa)	ASTMD790
Flexural Modulus	555 (3.8)	psi (MPa)	ASTMD790
Heat Distortion Temperature	66 psi (0.45 MPa)	°C	ASTME2092
PRINT CONDITIONS			
3D Printers	Typical Value	Unit	
Extruder temperature	180 – 220	°C	
Bed temperature (if needed)	50 – 70	°C	
Cooling (according to design)	30 – 100	%	

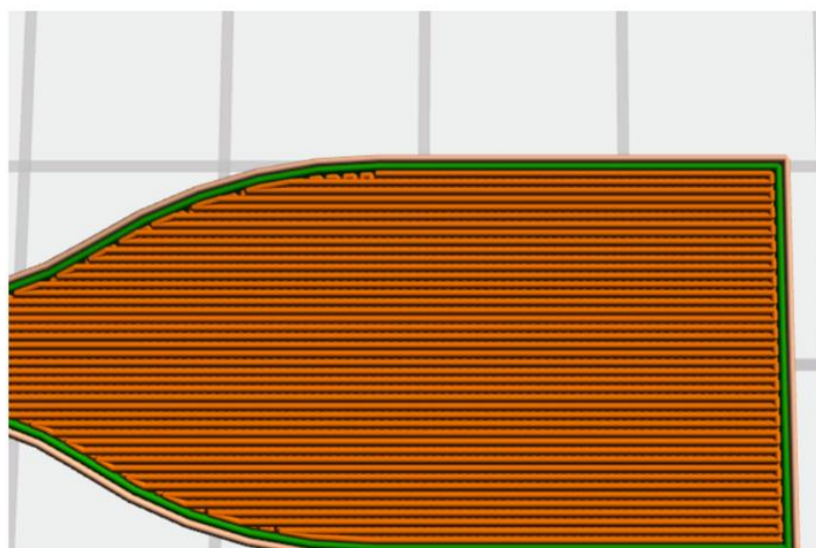
Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά του υλικού PLA του χρησιμοποιήθηκε για τις εκτυπώσεις

## Παράμετροι

Σκοπός της εργασίας είναι η καταμέτρηση και η ποσοτικοποίηση των διακυμάνσεων των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων που είναι κατασκευασμένα από τρισδιάστατο εκτυπωτή. Με βάση τον παραπάνω στόχο, οι παράμετροι που επιλέχθηκαν ήταν οι 1) raster angle (γωνία εκτύπωσης) και 2) shell count (αριθμός κελυφών). Η γωνία εκτύπωσης αναφέρεται στη γωνία υπό την οποία το ακροφύσιο εναποθέτει υλικό σε κάθε στρώμα της εκτύπωσης, ενώ ο αριθμός κελυφών αναφέρεται στον αριθμό των περιμετρικών τοιχωμάτων ή κελυφών που εκτυπώνονται γύρω από το εξωτερικό ενός αντικειμένου. Αυτά τα κελύφη εκτυπώνονται ως ομόκεντροι βρόχοι που δημιουργούν μια συμπαγή εξωτερική επιφάνεια και παρέχουν δομική υποστήριξη για το αντικείμενο.



Εικόνα 12. Στρώση εκτυπωμένη με raster angle 0°



Εικόνα 13. Στρώση εκτυπωμένη με raster angle 90°





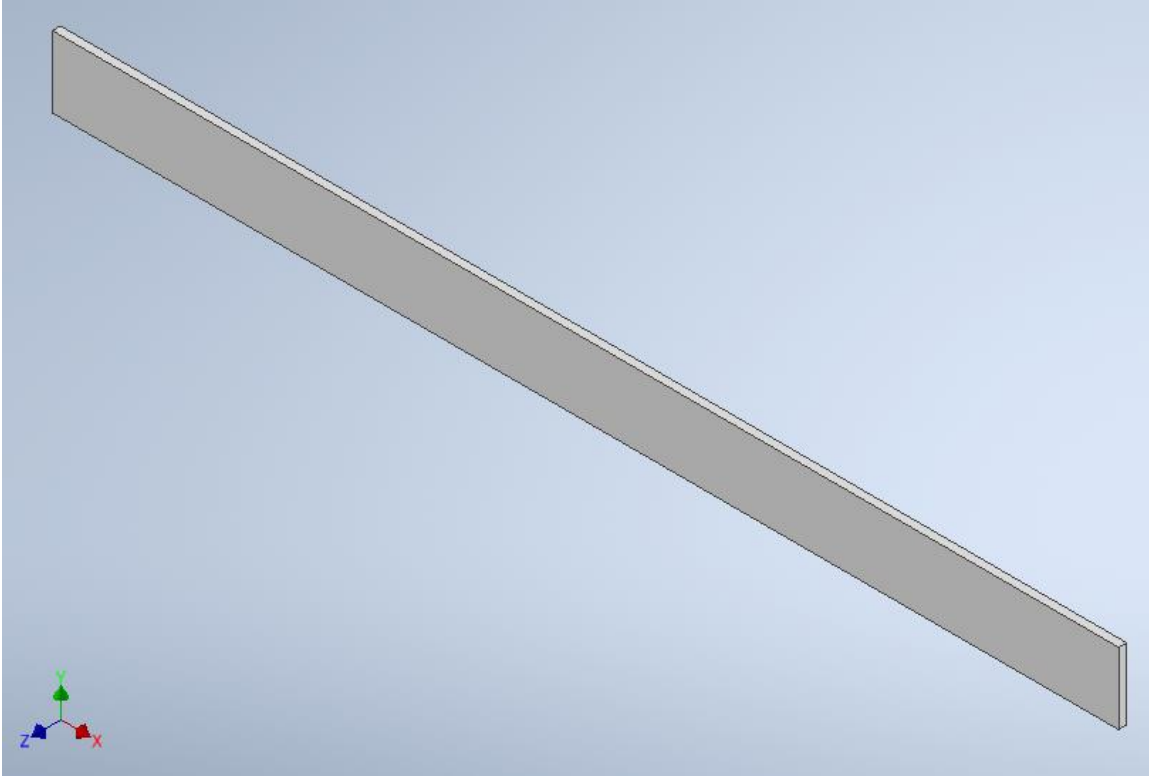
Εικόνα 14. Εκτυπωμένα αντικείμενα με διαφορετικό αριθμό shells το καθένα.

A/A	Ποσότητα δοκιμίων	Raster angle	Αριθμός shell
1	5	0	3
2	5	0	5
3	5	30	3
4	5	30	5
5	5	45	3
6	5	45	5
7	5	60	3
8	5	60	5
9	5	90	3
10	5	90	5

Πίνακας 2. Παράμετροι εκτύπωσης

## CAD μοντέλο

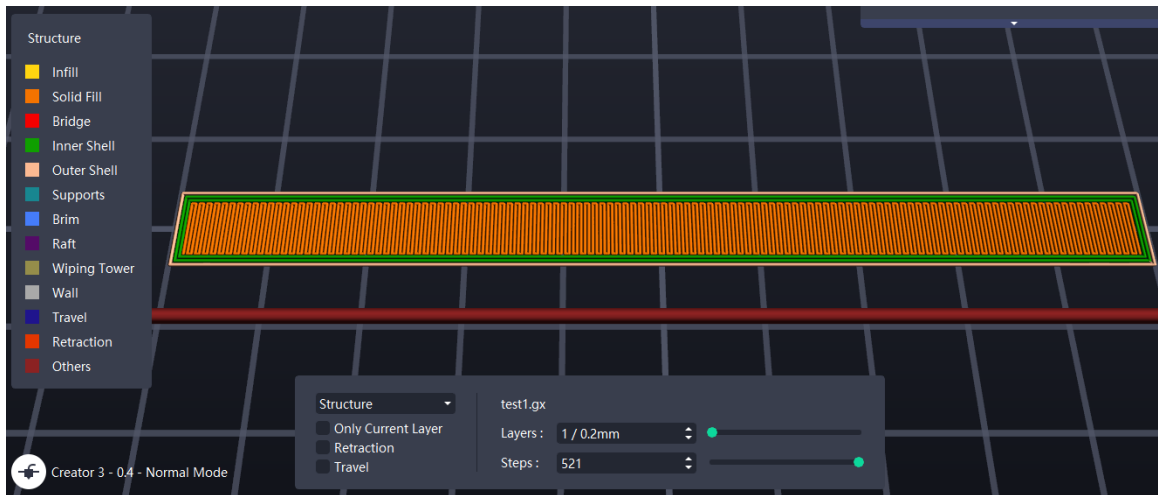
Η μοντελοποίηση του δοκιμίου έγινε μέσω του λογισμικού Inventor Professional της εταιρίας Autodesk.



Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε εξαγωγή του αρχείου σε μορφή STL με σκοπό την μεταγενέστερη επεξεργασία.

## Slicer

Όσον αφορά την επιλογή του slicer, μετά από έρευνα πάνω στα συγκεκριμένα λογισμικά, διακρίθηκαν το Cura της Ultimaker και το Flashprint της Flashforge, όπου εν τέλει αποφασίστηκε να γίνει χρήση του δεύτερου λογισμικού. Αυτό συνέβη διότι πρώτον, έχει άμεση συμβατότητα με τον εκτυπωτή, καθώς είναι της ίδιας εταιρίας, και δεύτερον, το Cura υπερκάλυπτε τις ανάγκες για επεξεργασία του μοντέλου, οπότε ένα πιο απλό πρόγραμμα όπως το Flashprint ικανοποιούσε τις απαιτήσεις.



Εικόνα 15. Προσομοίωση εκτύπωσης για το δοκίμιο με raster angle 0° και 3 shells

## Εκτυπωτής

Αφού έγινε η κατάλληλη επεξεργασία των δοκιμών στον slicer, κάθε σειρά εκτυπώσεων έγινε εξαγωγή σε αρχείο μορφής G code και έπειτα μεταφέρθηκε στον εκτυπωτή. Για την παραγωγή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε ο εκτυπωτής Creator 3 της εταιρίας Flashforge. Ο συγκεκριμένος, είναι ένας ευέλικτος και αξιόπιστος τρισδιάστατος εκτυπωτής που είναι κατάλληλος για εφαρμογές, όπως η δημιουργία πρωτοτύπων αλλά και για παραγωγή μικρής κλίμακας.



Εικόνα 16. Flashforge Creator 3, ο εκτυπωτής στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι εκτυπώσεις

Παρατίθενται κατωτέρω τα τεχνικά χαρακτηριστικά:

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

Πίνακας 3. Χαρακτηριστικά του εκτοπωτή Creator 3

Οι κύριες παράμετροι που επιλέχθηκαν ώστε οι εκτυπώσεις να ολοκληρωθούν χωρίς αστοχίες ήταν οι εξής:

Πάχος στρώσης	0,2mm
Ταχύτητα εκτύπωσης	5mm/s
Θερμοκρασία εκτύπωσης	220°C
Θερμοκρασία τράπεζας	70°C
Πυκνότητα Infill	100%

Πίνακας 4. Παράμετροι εκτυπώσεων



Εικόνα 17. Στιγμιότυπο κατά την διαδικασία μίας δοκιμαστικής εκτύπωσης



Εικόνα 18. Τα αποτελέσματα μιας επιτυχούς εκτύπωσης

## Στατιστική ανάλυση

Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία εκτύπωσης, ακολούθησε ο διαστασιολογικός έλεγχος των δοκιμίων. Το πάχος μετρήθηκε σε 5 περιοχές (a,b,c,d και e), ενώ το μήκος και το πλάτος από μία. Τα σημεία a και e μετράνε το πάχος των shells στα δύο άκρα των δοκιμίων. Αντίστοιχα, τα σημεία b,c και d μετράνε το πάχος του infill στα δύο άκρα καθώς και στην μέση των δοκιμίων.



Εικόνα 19. Σημεία πάνω στο δοκίμιο που πάρθηκαν μετρήσεις

Δοκίμια	t					w	l
	a	b	c	d	e		
raster angle=0° & shells=3							
1.1	0,75	0,9	0,85	0,95	0,75	8,6	120,2
1.2	0,7	0,95	0,95	0,9	0,8	8,45	120,15
1.3	0,75	0,9	0,9	0,9	0,8	8,55	120
1.4	0,7	0,95	0,95	0,95	0,8	8,6	120,25
1.5	0,8	0,95	0,95	0,95	0,7	8,65	120,05
raster angle=0° & shells=5							
2.1	0,8	0,95	0,95	0,95	0,85	8,6	120,15
2.2	0,75	1	0,95	0,9	0,85	8,5	120,2
2.3	0,75	0,95	0,95	0,95	0,8	8,6	120,1
2.4	0,8	1	0,95	0,95	0,75	8,5	120,05
2.5	0,85	0,95	0,95	0,95	0,75	8,55	120,2
raster angle=30° & shells=3							

3.1	0,7	0,95	0,95	1	0,7	8,65	120,2
3.2	0,65	1	1	0,95	0,8	8,6	120,15
3.3	0,7	0,95	0,95	0,95	0,8	8,65	120,3
3.4	0,7	0,95	0,95	1	0,75	8,65	120,05
3.5	0,75	0,95	0,95	0,95	0,75	8,6	120,1
raster angle=30° & shells=5							
4.1	0,8	1	0,95	0,95	0,8	8,5	120,15
4.2	0,8	1	0,95	1	0,85	8,65	120,25
4.3	0,75	0,95	0,95	0,9	0,85	8,55	120,1
4.4	0,75	1	0,95	0,95	0,85	8,55	120,2
4.5	0,75	0,95	1	0,9	0,8	8,7	120,2
raster angle=45° & shells=3							
5.1	0,75	0,95	0,95	0,95	0,75	8,55	120,25
5.2	0,7	1	0,95	0,95	0,8	8,6	120,2
5.3	0,7	0,95	0,95	1	0,8	8,6	120,2
5.4	0,7	0,95	0,95	0,95	0,7	8,7	120,15
5.5	0,7	1	1	0,95	0,75	8,8	120,1
raster angle=45° & shells=5							
6.1	0,85	0,95	1	1	0,75	8,45	120,05
6.2	0,85	0,9	0,9	0,95	0,8	8,45	120,2
6.3	0,8	1	1	0,95	0,8	8,45	120,05
6.4	0,8	0,9	0,95	0,95	0,8	8,55	120,2
6.5	0,75	0,9	0,9	0,9	0,8	8,55	120,15
raster angle=60° & shells=3							
7.1	0,7	0,95	0,95	0,9	0,75	8,55	120
7.2	0,75	0,9	0,9	0,9	0,75	8,55	120,1
7.3	0,7	0,95	0,9	0,9	0,8	8,5	120,15
7.4	0,7	0,95	0,9	0,95	0,75	8,55	120
7.5	0,75	0,9	0,9	0,95	0,8	8,4	119,95
raster angle=60° & shells=5							
8.1	0,75	0,95	0,95	1	0,85	8,45	120,15
8.2	0,75	0,95	1	0,95	0,8	8,5	120,3
8.3	0,75	0,95	0,95	0,95	0,8	8,7	120,2
8.4	0,7	0,95	0,95	0,95	0,8	8,65	120,3
8.5	0,75	1	1	0,95	0,8	8,6	120,2
raster angle=90° & shells=3							
9.1	0,7	0,8	0,85	0,9	0,75	8,5	120,1
9.2	0,7	0,85	0,9	0,9	0,85	8,6	120,15
9.3	0,75	0,85	0,9	0,9	0,85	8,55	120,15
9.4	0,75	0,9	0,9	0,9	0,75	8,5	120,05
9.5	0,85	0,9	0,95	0,95	0,85	8,25	119,85



raster angle=90° & shells=5							
10.1	0,75	0,8	0,85	0,9	0,8	8,55	120,1
10.2	0,7	0,85	0,9	0,9	0,85	8,55	120,2
10.3	0,75	0,8	0,9	0,9	0,85	8,5	120,2
10.4	0,75	0,85	0,9	0,9	0,75	8,55	120,1
10.5	0,8	0,9	0,95	0,9	0,85	8,3	119,95

Πίνακας 5. Μετρήσεις που αφορούν τον διαστασιολογικό έλεγχο του δοκιμίου

	Σειρές	t					w	l
		a	b	c	d	e		
Μέσος όρος	1	0,74	0,93	0,92	0,93	0,77	8,57	120,13
	2	0,79	0,97	0,95	0,94	0,8	8,55	120,14
	3	0,7	0,96	0,96	0,97	0,76	8,63	120,16
	4	0,77	0,98	0,96	0,94	0,83	8,59	120,18
	5	0,71	0,97	0,96	0,96	0,76	8,65	120,18
	6	0,81	0,93	0,95	0,95	0,79	8,49	120,13
	7	0,72	0,93	0,91	0,92	0,77	8,51	120,04
	8	0,74	0,96	0,97	0,96	0,81	8,58	120,23
	9	0,75	0,86	0,9	0,91	0,81	8,48	120,06
	10	0,75	0,84	0,9	0,9	0,82	8,49	120,11
Τυπική απόκλιση	1	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,08	0,10
	2	0,04	0,03	0,00	0,02	0,05	0,05	0,07
	3	0,04	0,02	0,02	0,03	0,04	0,03	0,10
	4	0,03	0,03	0,02	0,04	0,03	0,08	0,06
	5	0,02	0,03	0,02	0,02	0,04	0,10	0,06
	6	0,04	0,04	0,05	0,04	0,02	0,05	0,08
	7	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,07	0,08
	8	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,10	0,07
	9	0,06	0,04	0,04	0,02	0,05	0,14	0,12
	10	0,04	0,04	0,04	0,00	0,04	0,11	0,10
Σφάλμα	1	0,06	0,03	0,05	0,03	0,06	0,01	0,00
	2	0,05	0,03	0,00	0,02	0,06	0,01	0,00
	3	0,05	0,02	0,02	0,03	0,06	0,00	0,00
	4	0,04	0,03	0,02	0,04	0,03	0,01	0,00
	5	0,03	0,03	0,02	0,02	0,06	0,01	0,00
	6	0,05	0,05	0,05	0,04	0,03	0,01	0,00
	7	0,04	0,03	0,02	0,03	0,04	0,01	0,00
	8	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03	0,01	0,00
	9	0,08	0,05	0,04	0,02	0,07	0,02	0,00
	10	0,05	0,05	0,04	0,00	0,05	0,01	0,00

Πίνακας 6. Στατιστική ανάλυση των δοκιμίων

## Δοκιμή εφέλκυσμού

Η αρχή της δοκιμής εφέλκυσμού περιλαμβάνει την υποβολή ενός τυποποιημένου δοκιμίου σε αυξανόμενη δύναμη μέχρι να φτάσει στο σημείο θραύσης. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, το μηχάνημα μετρά την εφαρμοζόμενη δύναμη και την αντίστοιχη επιμήκυνση ή παραμόρφωση του δοκιμίου. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό σημαντικών ιδιοτήτων του υλικού, όπως η αντοχή σε εφέλκυσμό, το όριο διαρροής, το UTS και η επιμήκυνση. Οι δοκιμές εφέλκυσμού πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση της μηχανής INSTRON 4411. Οι μηχανές δοκιμών εφέλκυσμού της Instron είναι γνωστές για την ακρίβεια και την επαναληψιμότητα. Είναι ικανά να δοκιμάζουν ένα ευρύ φάσμα υλικών, όπως μέταλλα, πλαστικά, σύνθετα υλικά, υφάσματα, καουτσούκ και άλλα. Τα μηχανήματα μπορούν να επεξεργαστούν διάφορα σχήματα και μεγέθη δειγμάτων, καθιστώντας τα προσαρμόσιμα σε διαφορετικές απαιτήσεις δοκιμών. Πρόκειται για ένα εξαιρετικά ακριβές και αξιόπιστο μηχάνημα που χρησιμοποιείται σε διάφορες βιομηχανίες, όπως η αεροδιαστημική και αυτοκινητοβιομηχανία.

Capacity:	5 kn (1125 lb)
Load cell:	5 kn
Max speed:	500 mm/min (20 in/min)
Min speed:	0.5 mm/min (.02 in/min)
Return speed:	600 mm/min (24 in/min)
Position measurement accuracy:	+/-0.02mm
Total crosshead travel:	42.5"
Total vertical test space:	46"
Distance between uprights:	9 7/8"
Interfaces	IEEE-488, RS-232 (printer), 10V analog recorder output on load and strain channels
Power 100/120/220/240 Volts, 3 amps	100/120/220/240 Volts, 3 amps
Dimensions	23 x 17 x 60 "
Weight	160 lbs

Πίνακας 7. Χαρακτηριστικά της μηχανής εφέλκυσμού INSTRON 4411



Εικόνα 20. Στιγμιότυπο κατά την διάρκεια εφελκυσμού ενός δοκιμίου



Εικόνα 21. Αριθμημένο το πρώτο δοκίμιο κάθε σειράς



Εικόνα 22. Αποτελέσματα όλων των δοκιμών από το πείραμα εφελκυσμού

Από την παραπάνω φωτογραφία μπορούμε να συμπεράνουμε τα εξής:

- Τα δοκίμια 3.1 έως και 8.1 παρουσιάζουν μία κλίση στην περιοχή αστοχίας. Αυτό συνέβη διότι τα δοκίμια αυτά είχαν raster angle μεταξύ 0 και 90 μοιρών. Επομένως, κατά την διάρκεια του πειράματος αυτό που πραγματοποιήθηκε ήταν ένας συνδυασμός εφελκυσμού και αποκόλλησης των στρώσεων.
- Τα δοκίμια 1.1, 2.1, 9.1 και 10.1 δεν εμφάνισαν κλίση στην περιοχή αστοχίας τους. Συγκεκριμένα τα δοκίμια 1.1 και 2.1 είχαν raster angle 0 μοιρών, άρα το σπάσιμο ήταν παράλληλο στην επίστρωση του infill υλικού. Τα δοκίμια 9.1 και 10.1 επειδή είχαν raster angle 90 μοιρών δέχτηκαν μονοαξονικό εφελκυσμό, το φορτίο εφαρμόστηκε παράλληλα στην επίστρωση του infill υλικού, ενώ το σπάσιμο ήταν κάθετο.
- Τα δοκίμια 3.1 και 5.1 δεν παρουσίασαν ομοιόμορφη αστοχία, όπως διακρίνεται στα άκρα τους. Αυτό δικαιολογείται καθώς σε αυτές τις περιοχές βρίσκονται τα shells, τα οποία έχουν εκτυπωθεί σε raster angle 90 μοιρών και δέχονται μονοαξονικό εφελκυσμό, σε αντίθεση με το infill που υπέστη και αποκόλληση.

Να σημειωθεί πως τα πειράματα έγιναν στο εργαστήριο ποιοτικού ελέγχου και τεχνολογίας υλικών από τον κ. Παπαγεωργίου Δημήτρη.

## Αποτελέσματα

### Επεξεργασία μετρήσεων

Από τις δοκιμές εφελκυσμού προέκυψαν δεδομένα τα οποία επεξεργάστηκαν ώστε να παραχθούν τα διαγραμμάτων Τάσης ( $\sigma$ ) – Ανοιγμένης παραμόρφωσης ( $\varepsilon$ ). Αναλυτικά, τα δεδομένα που εξάχθηκαν από την μηχανή εφελκυσμού ήταν η μετατόπιση των δοκιμίων σε mm και το επιβαλλόμενο φορτίο σε kg. Για την ορθή επεξεργασία των μετρήσεων ακολουθήθηκε η μεθοδολογία του προτύπου ASTM D882. Παρακάτω ακολουθούν οι τύποι που εφαρμόστηκαν:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

$\sigma$ : η ορθή συμβατική μηχανική τάση σε MPa

P: το επιβαλλόμενο αξονικό φορτίο σε N

A: η αρχική διατομή του δοκιμίου σε mm<sup>2</sup>

Για την μετατροπή του φορτίου από kg σε N πολλαπλασιάστηκε με την επιτάχυνση της βαρύτητας (g), ενώ για την διατομή πολλαπλασιάστηκε το πάχος (t) με το πλάτος (w) των δοκιμίων βάση των δεδομένων της στατιστικής ανάλυσης που έγινε παραπάνω.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

$\varepsilon$ : η ανοιγμένη παραμόρφωσης σε ποσοστό %

$\Delta l$ : η μετατόπιση των δοκιμίων σε mm

$l_0$ : το μήκος μέτρησης του δοκιμίου σε mm (gauge length)

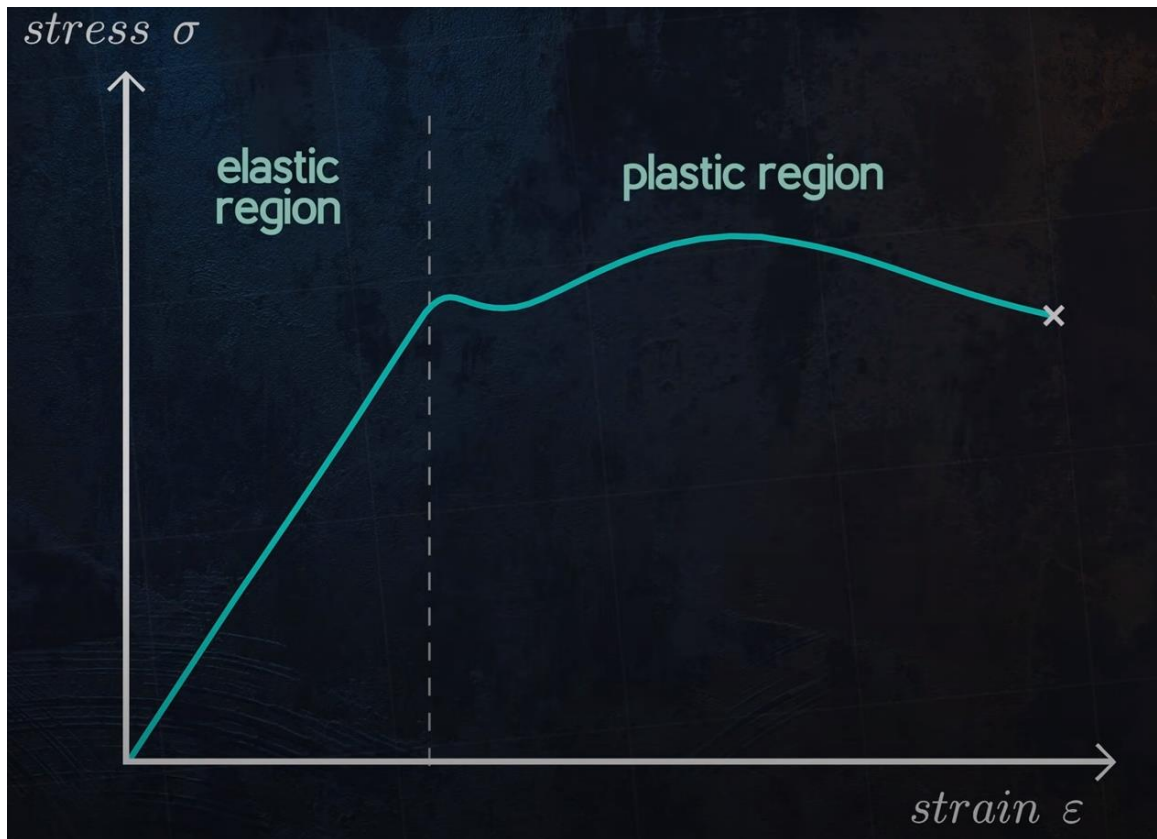
$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon}$$

E: το μέτρο ελαστικότητας σε MPa

$\Delta \sigma$ : η διαφορά Τάσης σε MPa

$\Delta \varepsilon$ : η διαφορά ανοιγμένης παραμόρφωσης σε ποσοστό %

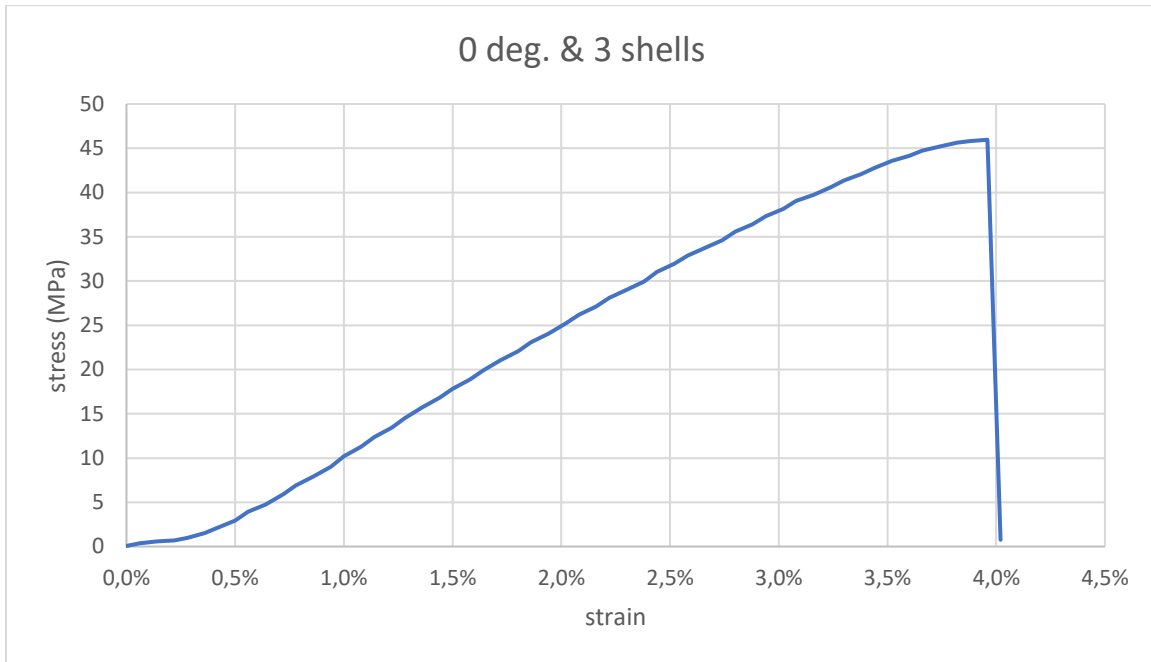
Το μέτρο ελαστικότητας μπορεί να υπολογιστεί μόνο στην ελαστική περιοχή.



Εικόνα 23. Διάγραμμα τάσης – ανοιγμένης παραμόρφωσης όπου διακρίνεται η ελαστική από την πλαστική ζώνη

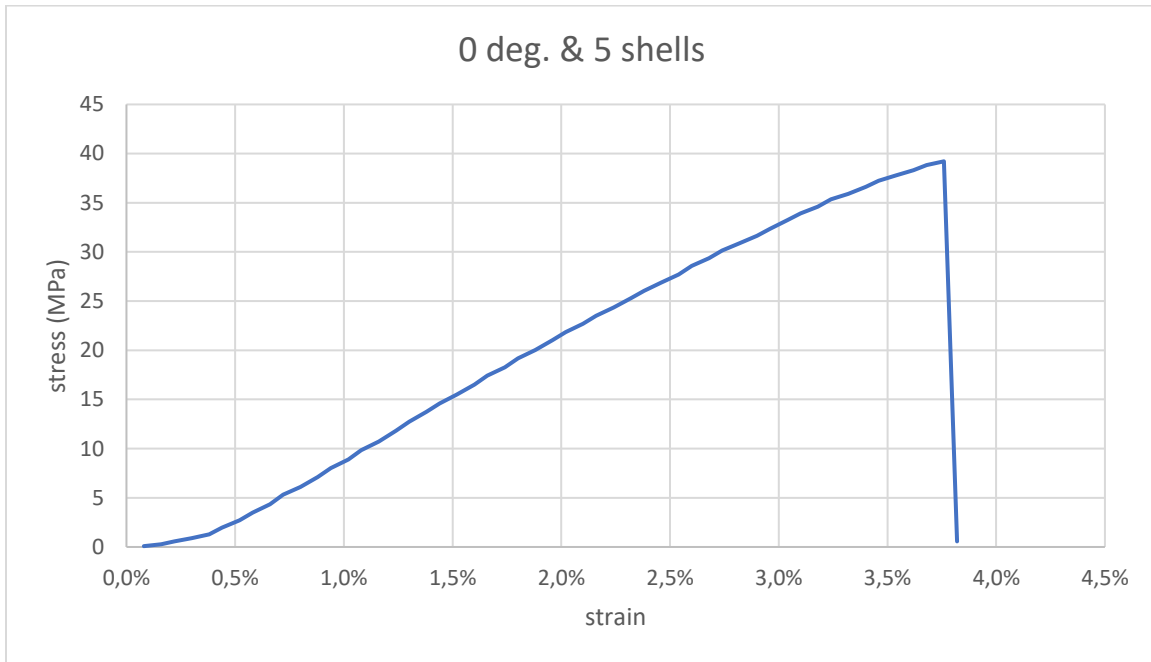
## Διαγράμματα Τάσης – Ανοιγμένης παραμόρφωσης

1<sup>ο</sup> Πείραμα (0<sup>ο</sup> raster angle και 3 shells)



Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η καμπύλη εφελκυσμού για το 1<sup>ο</sup> πείραμα, όπου το δοκίμιο έχει εκτυπωθεί με raster angle 0<sup>ο</sup> & 3 shells. Η πορεία της καμπύλης διακρίνεται τυπική με UTS ίσο με 46MPa, αρκετά υψηλό με βάση τις παραμέτρους, ενώ το δοκίμιο αστόχησε με παραμόρφωση 3,96%.

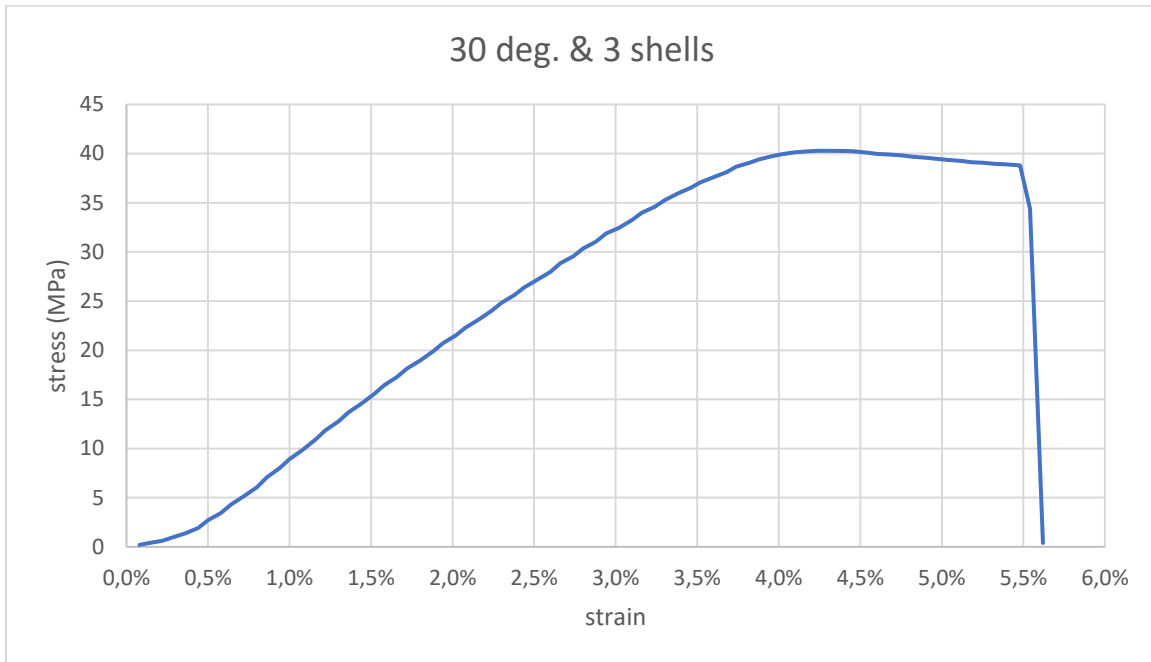
2<sup>ο</sup> Πείραμα (0<sup>ο</sup> raster angle και 5 shells)



Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η καμπύλη εφελκυσμού για το 2<sup>ο</sup> πείραμα, όπου το δοκίμιο έχει εκτυπωθεί με raster angle 0<sup>ο</sup> & 5 shells. Η πορεία της καμπύλης διακρίνεται τυπική με UTS ίσο με 39,2MPa, ενώ το δοκίμιο αστόχησε με παραμόρφωση 3,82%.

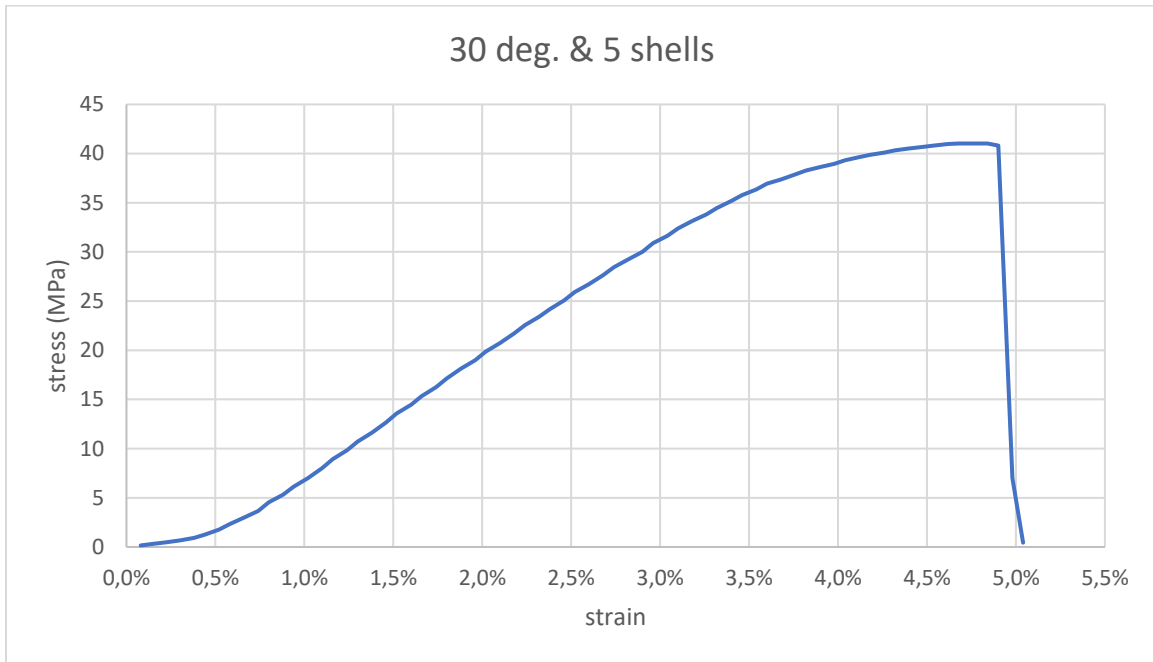


3<sup>ο</sup> Πείραμα (30° raster angle και 3 shells)



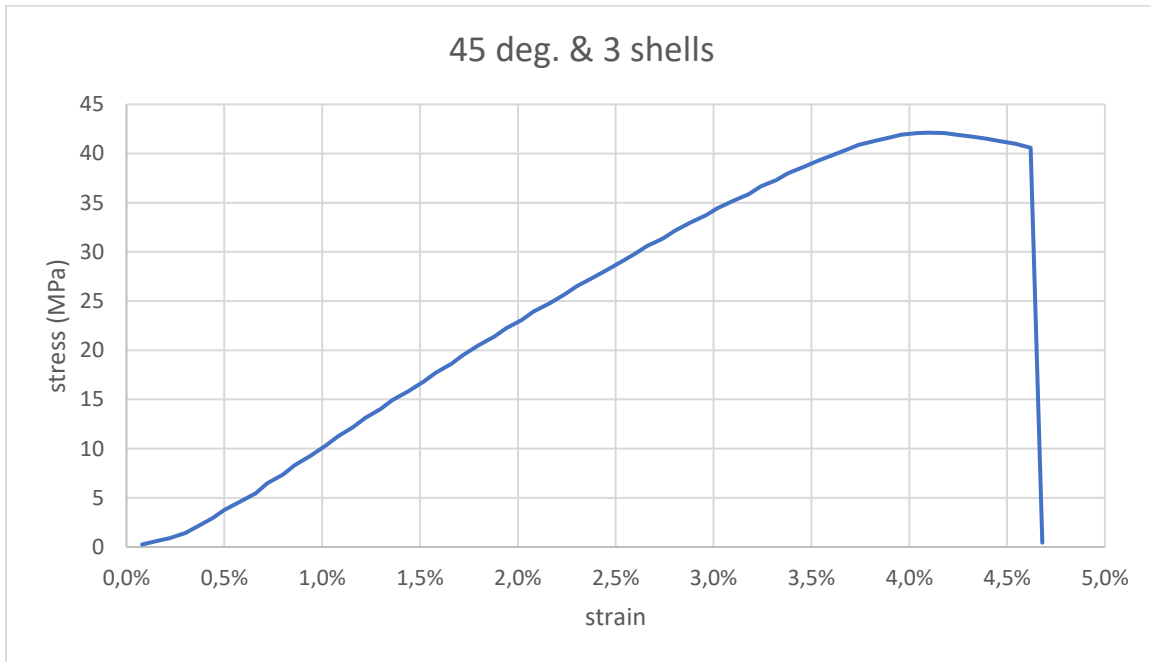
Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η καμπύλη εφελκυσμού για το 3<sup>ο</sup> πείραμα, όπου το δοκίμιο έχει εκτυπωθεί με raster angle 30° & 3 shells. Η πορεία της καμπύλης διακρίνεται τυπική με UTS ίσο με 40,3MPa, ενώ το δοκίμιο αστόχησε με παραμόρφωση 5,62%.

4<sup>ο</sup> Πείραμα (30° raster angle και 5 shells)



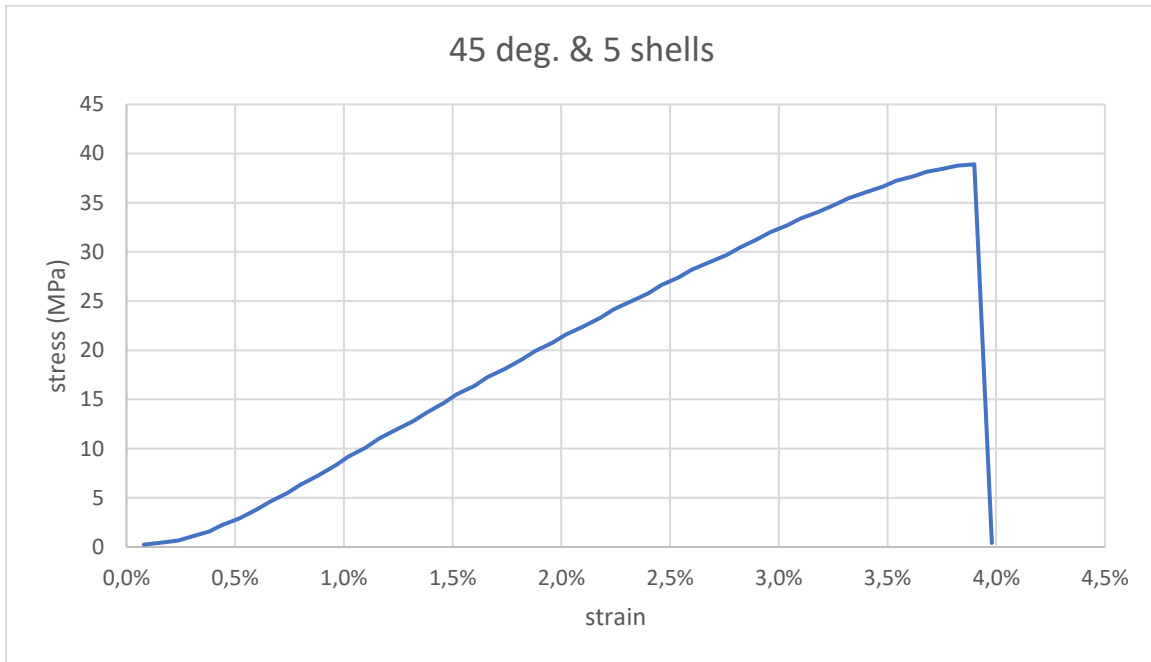
Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η καμπύλη εφελκυσμού για το 4<sup>ο</sup> πείραμα, όπου το δοκίμιο έχει εκτυπωθεί με raster angle 30° & 5 shells. Η πορεία της καμπύλης διακρίνεται τυπική με UTS ίσο με 41MPa, ενώ το δοκίμιο αστόχησε με παραμόρφωση 5,04%.

5<sup>ο</sup> Πείραμα (45<sup>ο</sup> raster angle και 3 shells)



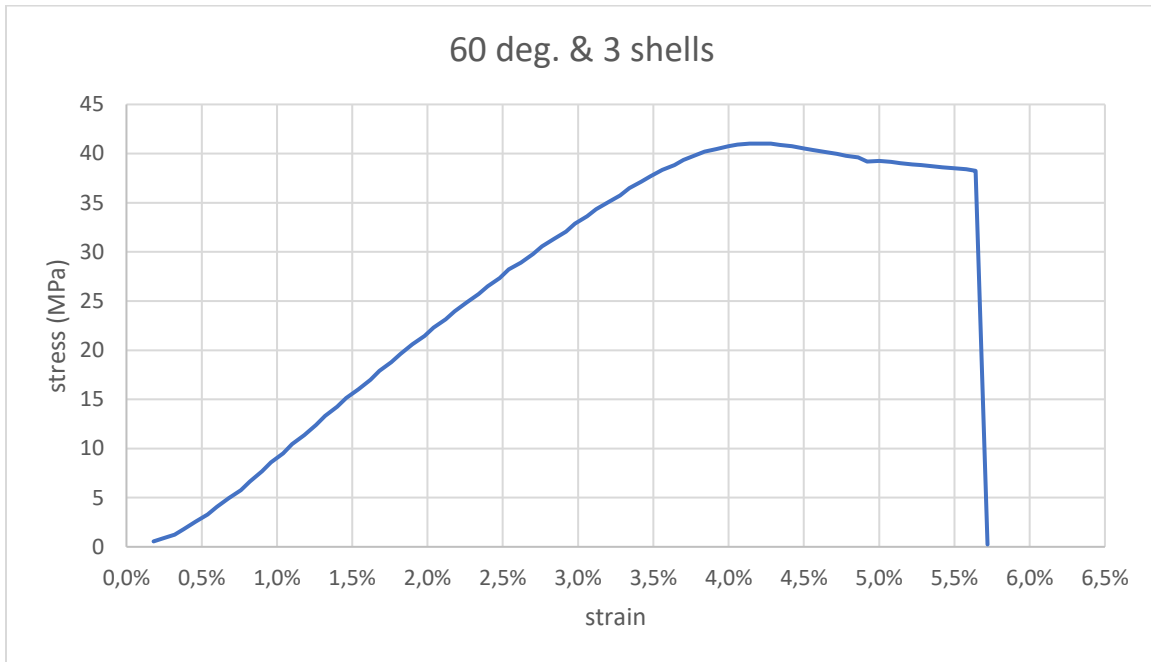
Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η καμπύλη εφελκυσμού για το 5<sup>ο</sup> πείραμα, όπου το δοκίμιο έχει εκτυπωθεί με raster angle 45<sup>ο</sup> & 3 shells. Η πορεία της καμπύλης διακρίνεται τυπική με UTS ίσο με 42,1MPa, ενώ το δοκίμιο αστόχησε με παραμόρφωση 4,68%.

6<sup>ο</sup> Πείραμα (45<sup>ο</sup> raster angle και 5 shells)



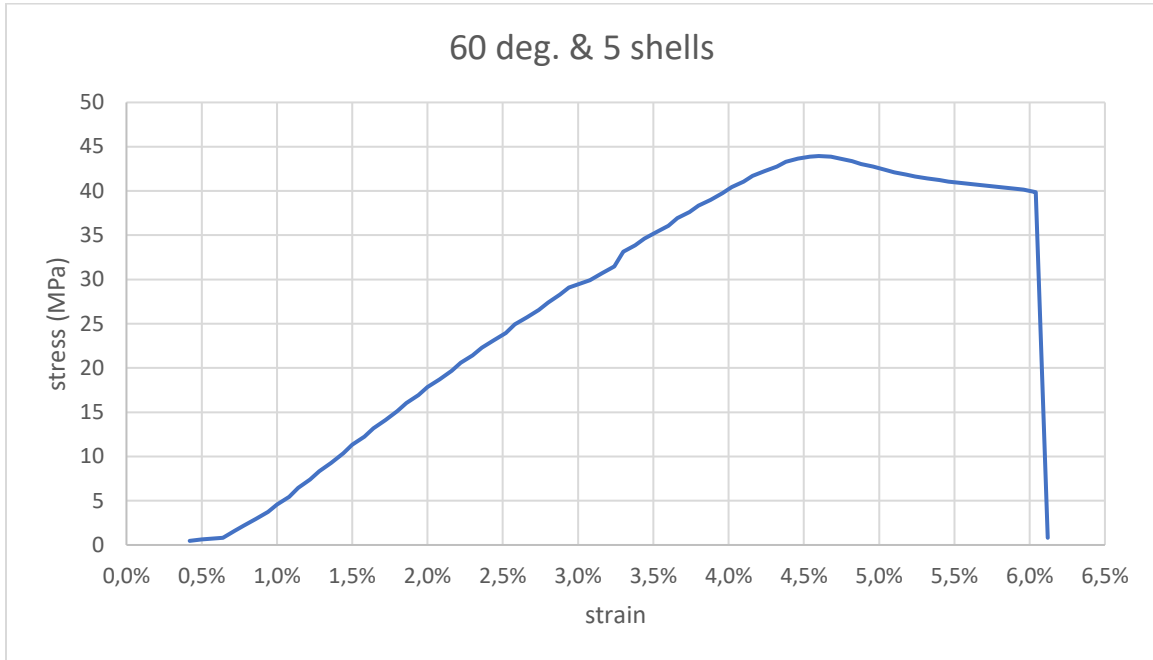
Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η καμπύλη εφελκυσμού για το 6<sup>ο</sup> πείραμα, όπου το δοκίμιο έχει εκτυπωθεί με raster angle 45<sup>ο</sup> & 5 shells. Η πορεία της καμπύλης διακρίνεται τυπική με UTS ίσο με 38,9MPa, ενώ το δοκίμιο αστόχησε με παραμόρφωση 3,98%.

7<sup>ο</sup> Πείραμα (60° raster angle και 3 shells)



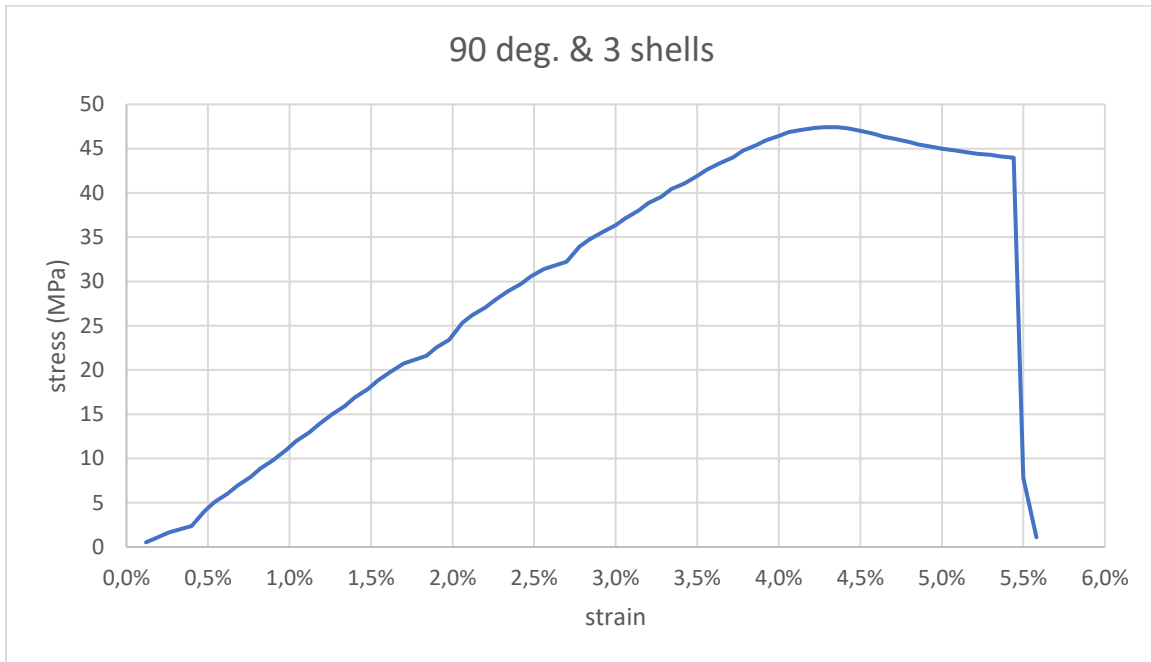
Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η καμπύλη εφελκυσμού για το 7<sup>ο</sup> πείραμα, όπου το δοκίμιο έχει εκτυπωθεί με raster angle 60° & 3 shells. Η πορεία της καμπύλης διακρίνεται τυπική με UTS ίσο με 41MPa, ενώ το δοκίμιο αστόχησε με παραμόρφωση 5,72%.

8<sup>ο</sup> Πείραμα (60<sup>ο</sup> raster angle και 5 shells)



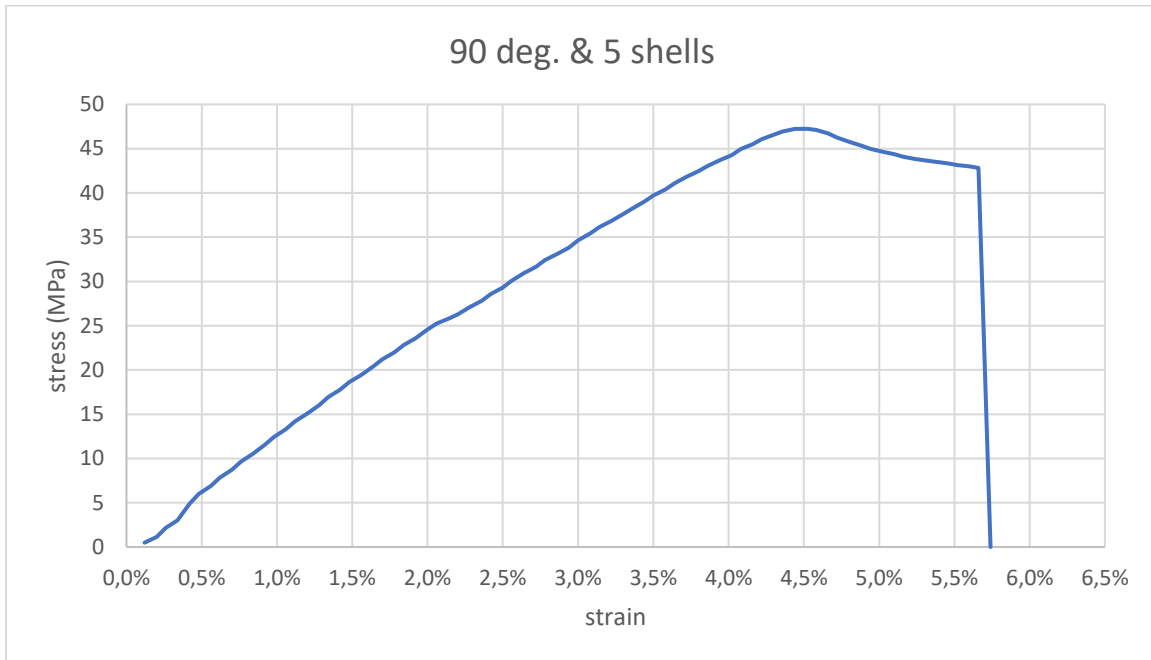
Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η καμπύλη εφελκυσμού για το 8<sup>ο</sup> πείραμα, όπου το δοκίμιο έχει εκτυπωθεί με raster angle 60<sup>ο</sup> & 5 shells. Η πορεία της καμπύλης διακρίνεται τυπική με UTS ίσο με 43,9MPa, ενώ το δοκίμιο αστόχησε με παραμόρφωση 6,12%.

9° Πείραμα (90° raster angle και 3 shells)



Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η καμπύλη εφελκυσμού για το 9° πείραμα, όπου το δοκίμιο έχει εκτυπωθεί με raster angle 90° & 3 shells. Η πορεία της καμπύλης διακρίνεται τυπική με UTS ίσο με 47,4MPa, ενώ το δοκίμιο αστόχησε με παραμόρφωση 5,58%.

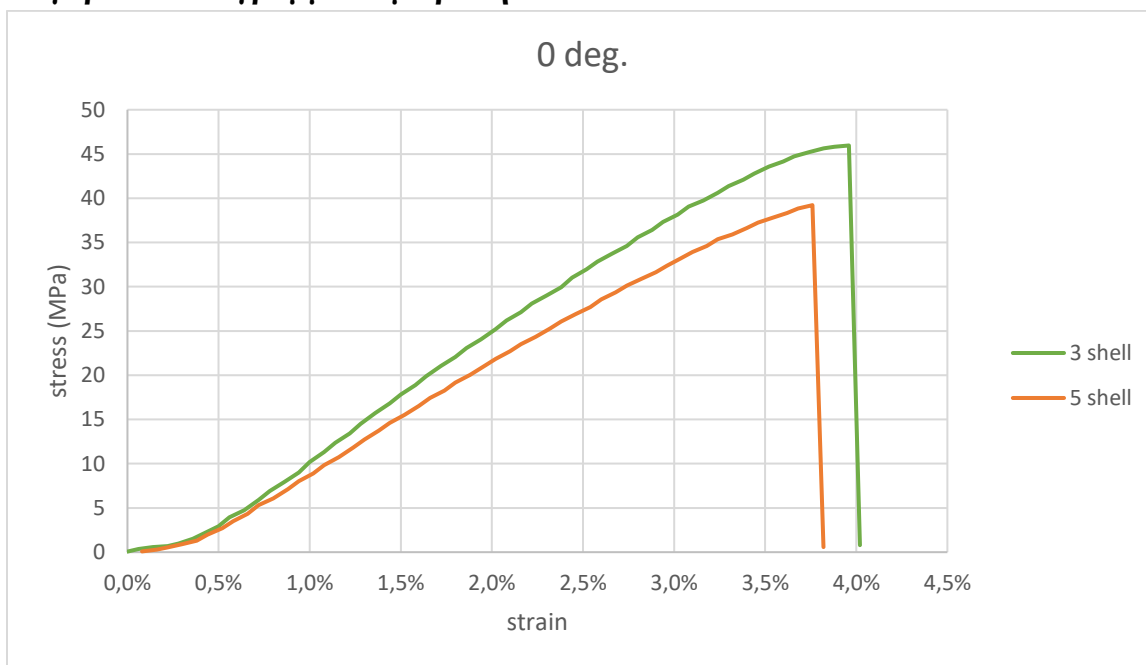
10° Πείραμα (90° raster angle και 5 shells)



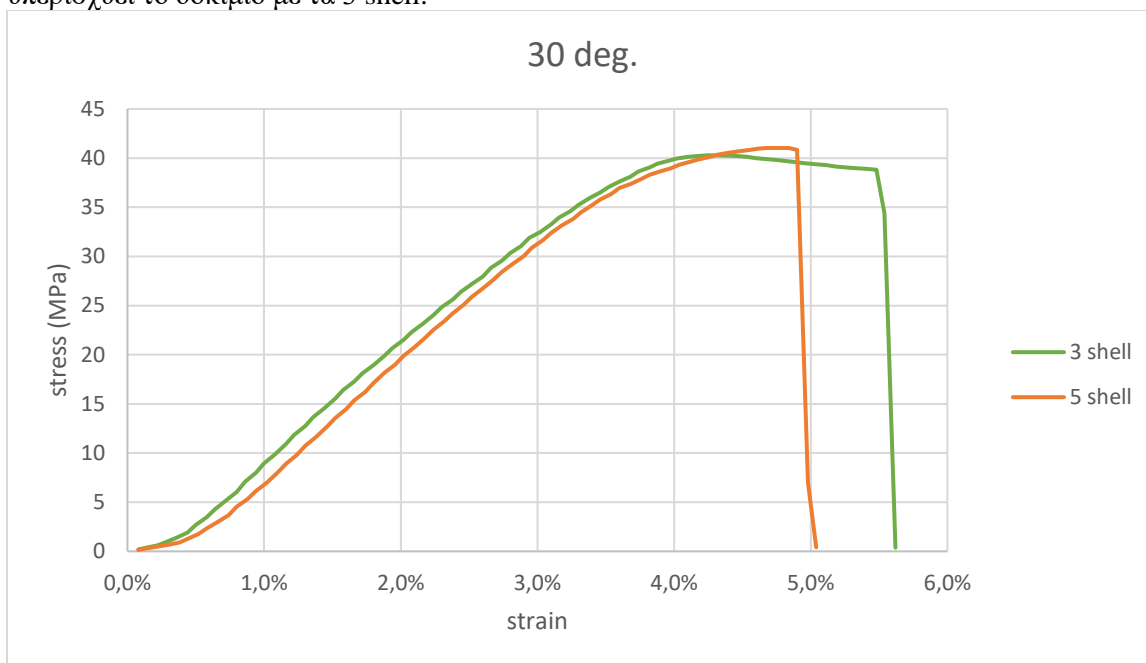
Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η καμπύλη εφελκυσμού για το 10° πείραμα, όπου το δοκίμιο έχει εκτυπωθεί με raster angle 90° & 5 shells. Η πορεία της καμπύλης διακρίνεται τυπική με UTS ίσο με 47,2MPa, ενώ το δοκίμιο αστόχησε με παραμόρφωση 5,74%.



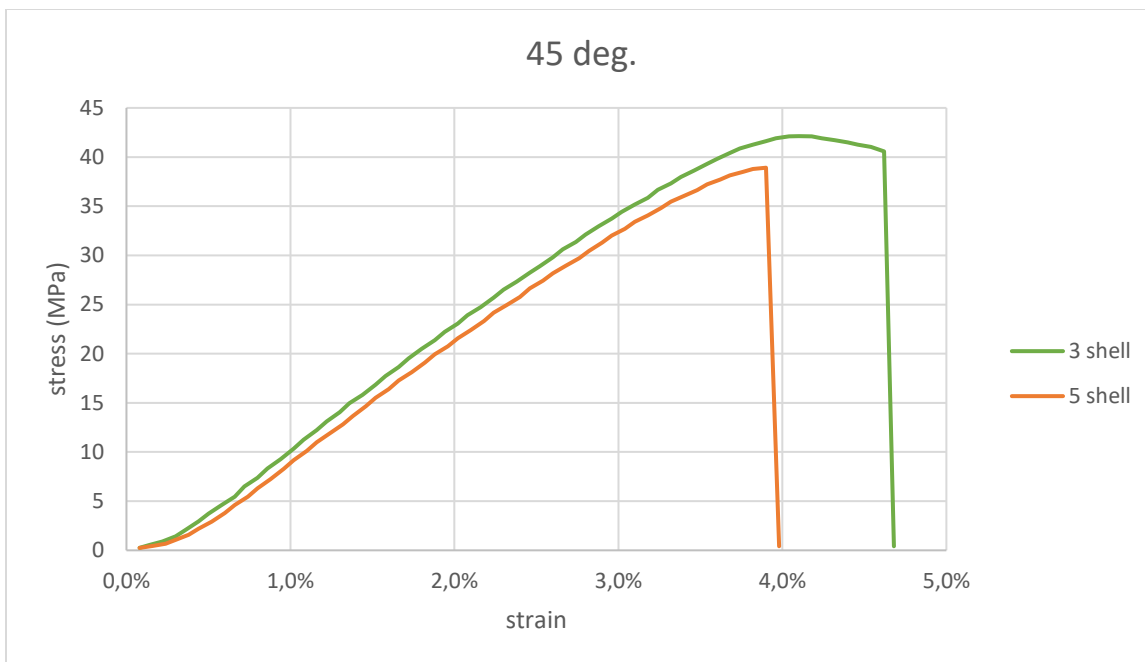
### Συγκριτικά διαγράμματα με βάση τα shells



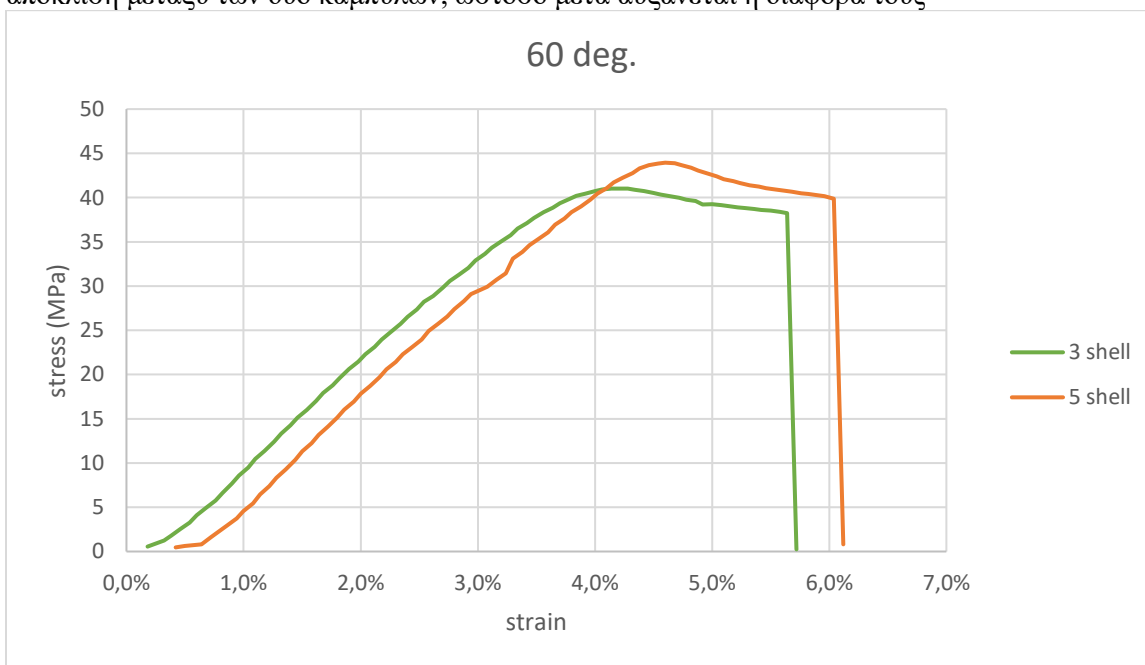
Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η διαφορά μεταξύ των δοκιμών με 3 και 5 shells για 0 μοίρες raster angle. Παρατηρείται σημαντική απόκλιση μεταξύ των δύο καμπυλών όπου υπερσχύει το δοκίμιο με τα 3 shell.



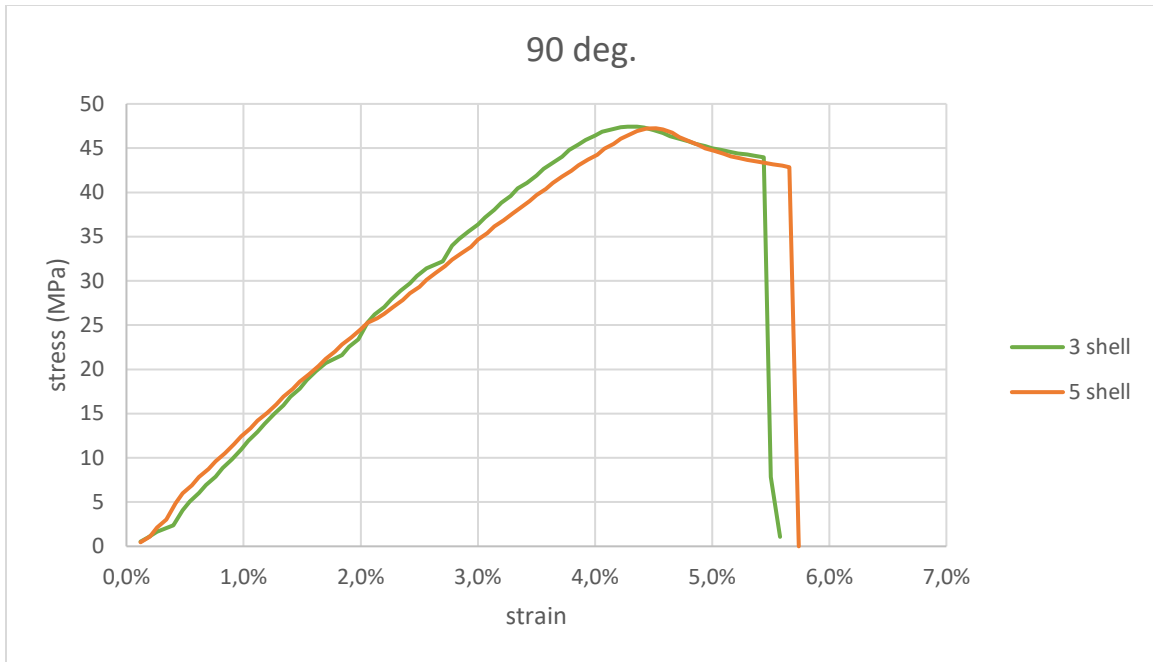
Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η διαφορά μεταξύ των δοκιμών με 3 και 5 shells για 30 μοίρες raster angle. Στην αρχή παρατηρείται μικρή απόκλιση μεταξύ των δύο καμπυλών, ωστόσο μετά το σημείο όπου υπάρχει 4% παραμόρφωση διακρίνεται έντονη η διαφορά μεταξύ τους.



Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η διαφορά μεταξύ των δοκιμών με 3 και 5 shells για 45 μοίρες raster angle. Αντίστοιχα και με το προηγούμενο διάγραμμα, στην αρχή παρατηρείται μικρή απόκλιση μεταξύ των δύο καμπυλών, ωστόσο μετά αυξάνεται η διαφορά τους



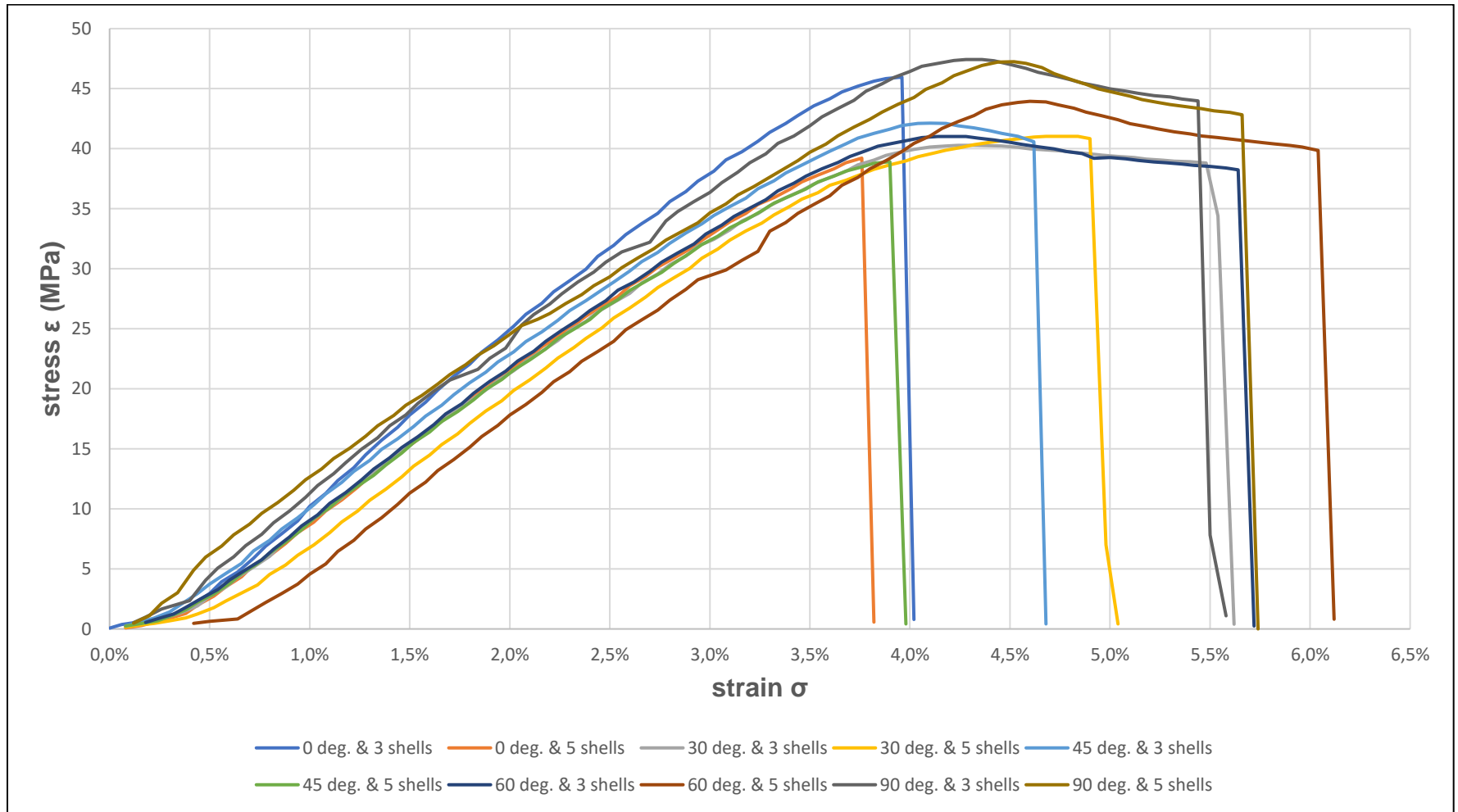
Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η διαφορά μεταξύ των δοκιμών με 3 και 5 shells για 60 μοίρες raster angle. Αντίθετα με τα προηγούμενα διαγράμματα, το δοκίμιο που εν τέλη έχει μεγαλύτερη αντοχή στον εφελκυσμό ήταν αυτό με τα 5 shells.



Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η διαφορά μεταξύ των δοκιμών με 3 και 5 shells για 90 μοίρες raster angle. Σε αυτό το διάγραμμα παρατηρείται πως οι δύο καμπύλες καθ'όλη την διάρκεια της δοκιμής δεν απέκλιναν η μία από την άλλη. Αυτό αιτιολογείται καθώς, η φορά του υλικού των shells ήταν συνευθειακή με αυτή του raster angle στο infill, επομένως τα δύο δοκίμια ήταν σχεδόν πανομοιότυπα.

A/A	Δοκίμια	E (GPa)
1	0 deg. & 3 shells	1,47
2	0 deg. & 5 shells	1,29
3	30 deg. & 3 shells	1,23
4	30 deg. & 5 shells	1,29
5	45 deg. & 3 shells	1,27
6	45 deg. & 5 shells	1,24
7	60 deg. & 3 shells	1,28
8	60 deg. & 5 shells	1,27
9	90 deg. & 3 shells	1,34
10	90 deg. & 5 shells	1,19

Πίνακας 8. Τιμές του μέτρου ελαστικότητας για κάθε δοκίμιο



Στο παραπάνω συγκεντρωτικό διάγραμμα αποτυπώνεται η καμπύλη κάθε δοκιμίου με σκοπό την σύγκριση των δοκιμίων. Ενδεικτικά, παρατηρείται πως όσο αυξάνεται η παράμετρος raster angle τόσο αυξάνεται η τάση και η παραμόρφωση που μπορούν να δεχτούν.

## Συζήτηση – Προβλήματα – Συμπεράσματα

Κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε έρευνα πάνω σε δοκίμια προσθετικής κατασκευής με σκοπό τον έλεγχο της επίδρασης ορισμένων παραμέτρων στις μηχανικές ιδιότητες τους. Αναλυτικά, έγινε βιβλιογραφική ανασκόπηση για τον προσδιορισμό των ερευνητικών κενών της τεχνολογίας FFF και ειδικότερα της εκτύπωσης λεπτών πλαστικών δοκιμίων. Ως επακόλουθο είχε η αναζήτηση του κατάλληλου προτύπου για εκτέλεση της μεθοδολογίας, το οποίο ήταν το ASTM D882. Στην συνέχεια, μετά από βιβλιογραφική έρευνα σχετικά με τα υλικά και τις παραμέτρους εκτύπωσης, επιλέχθηκαν το υλικό PLA και ορίστηκαν οι μεταβλητές raster angle και shells. Αφού τα δοκίμια δημιουργήθηκαν σε τρισδιάστατο μοντελοποιητή, επεξεργάστηκαν σε λογισμικό slicer και έπειτα εκτυπώθηκαν σε τρισδιάστατο εκτυπωτή. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε το πείραμα του εφελκυσμού αφού πρώτα έγινε ο απαραίτητος έγινε διαστασιολογικός έλεγχος. Αφού έγινε η συλλογή των δεδομένων και με βάση του προτύπου που προαναφέρθηκε, υπολογίστηκαν η τάση και η ανοιγμένη παραμόρφωση. Τα δύο αυτά μεγέθη χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία διαγραμμάτων τάσης – ανοιγμένης παραμόρφωσης με σκοπό την παρατήρηση της συμπεριφοράς των δοκιμίων κατά την επιβολή του φορτίου καταπόνησης καθώς και τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας. Τέλος, έγινε σύγκριση και σχολιασμό των αποτελεσμάτων και αναφορά στα προβλήματα κατά την διάρκεια των πειραμάτων.

Τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας ήταν αρκετά, και κυρίως στο στάδιο των εκτυπώσεων. Οι εκτυπώσεις ξεκίνησαν με ταχύτητες των 40, 30, 20mm/s η οποίες γρήγορα απέτυχαν, όπως διακρίνεται παρακάτω.



Εικόνα 24. Αποτυχούσα εκτύπωση λόγω υψηλής ταχύτητας εκτύπωσης

Η εξήγηση σε αυτό το πρόβλημα θα ήταν το γεγονός πως το nozzle του εκτυπωτή ήταν 0.4mm και η επιλογή του πάχους στρώσης ήταν 0.3mm, επομένως το ακροφύσιο κατά την διάρκεια την εκτύπωσης επιτάχυνε ώστε να μειώσει την διάμετρο του εξωθούμενου υλικού.

Στην συνέχεια αφού μειώθηκε εκ νέου η ταχύτητα στα 10mm/s και εξ' αρχής ήταν αποδεκτό, ωστόσο όταν έγινε απόπειρα εκτύπωσης του ίδιου δοκιμίου δεν υπήρχε επαναληψιμότητα καθώς εμφάνιζε τραχιά επιφάνεια. Επόμενη λύση ήταν μείωση του πάχους στρώσης σε 0.2mm η οποία πάλι περιστασιακά ήταν επιτυχής χωρίς επαναληψιμότητα. Μεγάλο πρόβλημα που εμφανιζόταν

σε πολλές εκτυπώσεις ήταν αυτό του warping. Ουσιαστικά, γίνεται αποκόλληση των κάτω στρωμάτων του αντικειμένου λόγω διαφοράς θερμοκρασίας. Αλλαγές που εμφάνισαν καλύτερα αποτελέσματα ήταν η αύξηση της θερμοκρασίας της τράπεζας από 50°C σε 70°C, η αύξηση της θερμοκρασίας εκτύπωσης υλικού από 200°C σε 220°C. (Aranda, 2022)



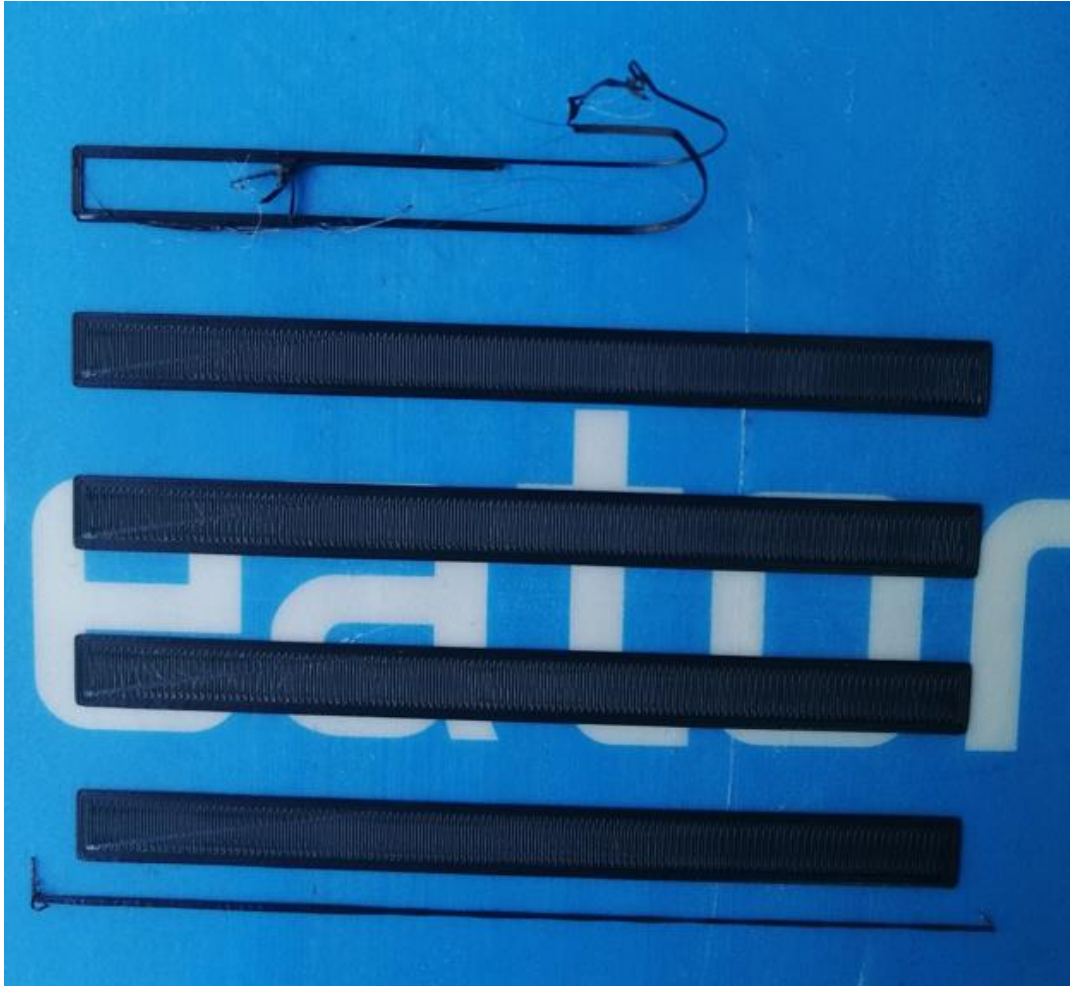
Εικόνα 25. Αποτυχούσα εκτύπωση σε πολλά σημεία λόγω πολλαπλών παραμέτρων

Από τη συνεχή χρήση του εκτυπωτή, έγινε συσσώρευση υλικού εσωτερικά του ακροφυσίου με αποτέλεσμα την ανομοιόμορφη εξώθηση υλικού. Για την επίλυση του προβλήματος έπρεπε εν ώρα λειτουργίας να αποσυνδεθεί η επικοινωνία μεταξύ νήματος και κεφαλής ώστε να λυθεί το ακροφύσιο και να καθαριστεί εσωτερικά.



Εικόνα 26. Αποτυχούσα εκτύπωση λόγω βλάβης του nozzle

Αφού επιλέχθηκαν οι κατάλληλες παράμετροι εκτύπωσης ώστε το δοκίμιο να εκτυπώνεται επιτυχώς και να έχει επαναληψιμότητα, έγινε μετάβαση στην εκτύπωση πέντε δοκιμίων. Εκεί, συναντήθηκαν νέα προβλήματα με το πρώτο να είναι το ακροφύσιο που προσκρούει από το ένα δοκίμιο πάνω στο άλλο με αποτέλεσμα να συσσωρεύεται υλικό πάνω του. Αυτό διορθώθηκε από την ρύθμιση z-hop του λογισμικού, όπου ανυψώνει το nozzle κατά την μεταφορά του από επιφάνεια σε επιφάνεια. Ακόμα, το πρόβλημα με την τραχιά επιφάνεια λύθηκε με την περαιτέρω μείωση την ταχύτητας σε 5mm/s.



Εικόνα 27. Αποτυχούσα εκτύπωση λόγω πρόσκρουσης του nozzle στα δοκίμια κατά την μεταφορά του

Τέλος, παρατηρήθηκε πως η ποιότητα επιφανείας της τράπεζας δεν ήταν ίδια σε όλα τα σημεία. Από την επανειλημμένες εκτυπώσεις στη κεντρική περιοχή της είχε φθαρεί με αποτέλεσμα να αστοχούν οι εκτυπώσεις. Επομένως, επιλέχθηκαν περιοχές προς τα άκρα της τράπεζας όπου η επιφάνεια ήταν κατάλληλη.

Βάση των αποτελεσμάτων προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Όλα τα πειράματα του εφελκυσμού πραγματοποιήθηκαν με επιτυχία, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται από τις μετρήσεις καθώς και από τα διαγράμματα. Επομένως, κάθε αποτέλεσμα θεωρείται αξιόπιστο όσον αφορά τον εφελκυσμό.
- Όσο αυξάνεται ο παράγοντας raster angle, στατιστικά αυξάνεται και η αντοχή των δοκιμίων σε εφελκυσμό. Αυτό είναι σύμφωνο με μελέτες που έχουν γίνει για αντίστοιχα δοκίμια βάση του προτύπου ASTM D638 (Zhao, 2019) (Yao, 2020). Επειδή τα αντικείμενα δημιουργούνται σε στρώσεις κατά την εκτύπωση, όταν ένα δοκίμιο με raster angle  $0^\circ$  εφελκύεται, φορτίζεται κάθετα με τη φορά που έχει εκτυπωθεί το υλικό. Σε συνδυασμό με το γεγονός πως τα δοκίμια αποτελούνται από 5 στρώσεις έχει ως αποτέλεσμα παράλληλα με τον εφελκυσμό να πραγματοποιείται και αποκόλληση μεταξύ των στρώσεων. Αντίθετα, ένα δοκίμιο του εκτυπώνεται με raster angle  $90^\circ$ , κατά τον εφελκυσμό του φορτίζεται παράλληλα με το εκτυπωμένο υλικό, άρα δεν υπάρχει αποκόλληση.

- Όσο αυξάνεται ο παράγοντας shells από 3 σε 5, παρατηρείται μείωση στην αντοχή του δοκιμίου, γεγονός που εκ πρώτης όψεως δεν αρμόζει λογικό, καθώς τα shells ενισχύουν μηχανικά ένα τρισδιάστατα εκτυπωμένο αντικείμενο. Παρόλο που ισχύει το παραπάνω σχόλιο, ταυτόχρονα, όταν αφιερώνεται περισσότερο υλικό για τα shells, εκτυπώνεται λιγότερο υλικό για το infill. Εφόσον λοιπόν υπάρχει λιγότερος όγκος infill, οι επιφάνειες μεταξύ του εκτυπωμένου υλικού είναι μικρότερες, γεγονός που σύμφωνα με τα αποτελέσματα καθιστά τα δοκίμια μηχανικά πιο αδύναμα.
- Το μέτρο ελαστικότητας από δοκίμιο σε δοκίμιο δεν είχε μεγάλες αποκλίσεις. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα το μέτρο ελαστικότητας μπορεί να θεωρηθεί σταθερό και ανεξάρτητο από την επίδραση των παραμέτρων. Συνήθως, οι έρευνες για υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας γίνονται για διαφορετικού μεγέθους και μεγαλύτερης κλίμακας δοκιμίων όπου παρατηρείται να μεταβάλλεται ανάλογα με τις παραμέτρους. Αυτό δεν συμβαίνει στην συγκεκριμένη περίπτωση και αυτό ίσως δικαιολογείται στο μικρό μέγεθος του δοκιμίου. Ωστόσο, δεν μπορεί να επιβεβαιωθεί αυτό καθώς δεν υπάρχουν άλλες έρευνες που να πραγματοποιούνται το ίδιο αντικείμενο με την συγκεκριμένη εργασία.
- Υπήρχαν ορισμένα δοκίμια τα οποία συμπεριφέρθηκαν με μη αναμενόμενο τρόπο ή αντίθετα από όσο είχε εκτιμηθεί, όπως για παράδειγμα το 1<sup>ο</sup> δοκίμιο είχε μεγαλύτερη αντοχή από το 6<sup>ο</sup>. Γενικά, τα αντικείμενα που έχουν παραχθεί με βάση κάποια τεχνολογία προσθετικής κατασκευής, και ιδιαίτερα της FFF, είναι ανισότροπα. Επειδή ακριβώς το αντικείμενο δημιουργείται σε στρώσεις κατά την εκτύπωση, δεν είναι συμπαγές και δεν έχει ομοιογένεια. Επομένως, οι μηχανικές ιδιότητες μεταβάλλονται αναλόγως τις μεταβλητές εκτύπωσης. Επιπροσθέτως, μία εκτύπωση ενός αντικειμένου δεν μπορεί αναπαραχθεί πανομοιότυπη στο 100% λόγω των ειδικών συνθηκών που ισχύουν. Όπως για παράδειγμα το δοκίμιο 6.1 που είχε εμφανίσει μικρό δείγμα warping.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μια μικρή αλλά σημαντική πηγή δεδομένων όσον αφορά τον εφελκυσμό πλαστικών δοκιμίων λεπτού πάχους κατασκευασμένα από προσθετική κατασκευή. Η έλλειψη ανάλογων δεδομένων είναι αιτία για την διεξαγωγή περισσότερων ερευνών επί του θέματος. Η κατασκευή δοκιμίων με χρήση άλλου υλικού, διπλού υλικού ή διαφορετικής τεχνολογίας προσθετικής κατασκευής αποτελούν ενδιαφέροντα θέματα προς μελλοντικές μελέτες. Ακόμα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα είχε η σύγκριση των αποτελεσμάτων με την χρήση της CLT (Classical Laminate Theory) και CAE συστημάτων.



## Βιβλιογραφία

Anon., n.d. [Online]

Available at: [exone.com](http://exone.com)

Aranda, S., 2022. *3D Printing Failures - How to Diagnose and Repair ALL Desktop 3D Printing Issues*. s.l.:s.n.

Diamandis, P. H. & Kotler, S., 2020. *The Future Is Faster Than You Think - How Converging Technologies Are Transforming Business, Industries, and Our Lives*. s.l.:s.n.

Diegel, O., 2019. *A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing*. s.l.:s.n.

F2792, A., n.d. *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*, s.l.: s.n.

Gebhardt, A., 2011. *3D Printing - Understanding Additive Manufacturing*. s.l.:s.n.

Gouge, M., 2017. *Thermo-Mechanical Modeling of Additive Manufacturing*. s.l.:s.n.

Kamara, S., 2021. *Fundamentals of Additive Manufacturing for the Practitioner*. s.l.:s.n.

Kocovic, P., 2017. *3D printing and its impact on the production of fully functional components - emerging research and opportunities*. s.l.:s.n.

Kumar, J., 2019. *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*. s.l.:s.n.

Niaki, M. K., 2018. *The Management of Additive Manufacturing - Enhancing Business Value*. s.l.:s.n.

Noorani, R., 2017. *3D Printing - Technology, Applications, and Selection*. s.l.:s.n.

Redwood, B., 2017. *The 3D Printing Handbook - Technologies, design and applications*. s.l.:s.n.

Sharma, D., 2022. Compressive and flexural properties of the novel lightweight tailored bio-inspired structures.

Tao, Y., 2022. Compression and flexural properties of rigid polyurethane foam composites reinforced with 3D-printed polylactic acid lattice structures.

Wohlers, T., 2015. *Wohlers Report*, s.l.: s.n.

Yao, T., 2020. A novel generalized stress invariant-based strength model for inter-layer failure of FFF 3D printing PLA material.

Zhao, Y., 2019. Novel mechanical models of tensile strength and elastic property of FDM AM PLA materials: Experimental and theoretical analyses.