



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

**Προσθετική κατασκευή δοκιμίων από πολυμερή υλικά και σύγκριση των
μηχανικών ιδιοτήτων**

**Additive manufacturing of specimens of polymer materials and comparison of
their mechanical properties**

Συγγραφέας:

Ψαριανός Δημήτριος – Ραφαήλ

A.M.: 51117065

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Δημητρέλλου Σωτηρία

Αιγάλεω, 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

«Προσθετική κατασκευή δοκιμίων από πολυμερή υλικά και σύγκριση των μηχανικών ιδιοτήτων»

Συγγραφέας

Ψαριανός Δημήτριος – Ραφαήλ. (Α.Μ.: 51117065)

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια

Δημητρέλλου Σωτηρία

Ημερομηνία εξέτασης

26/7/2023

Εξεταστική επιτροπή

Δημητρέλλου Σωτηρία
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια
ΠΑ.Δ.Α.

Ιακωβίδης Ισίδωρος
Λέκτορας ΠΑ.Δ.Α.

Παγώνης Δημήτριος-Νικόλαος
Αναπληρωτής Καθηγητής
ΠΑ.Δ.Α.

Δήλωση Συγγραφέα Διπλωματικής Εργασίας

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Ψαριανός Δημήτριος – Ραφαήλ του Χρήστου, με αριθμό μητρώου 51117065, φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών, του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι :

«Είμαι συγγραφέας αυτής της 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 σύνολο τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επιπλέον, βεβαιώνω πως αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από εμένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου όσο και του ιδρύματος.

Παράβαση των ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



Ψαριανός Δ.

Ψαριανός Δημήτριος – Ραφαήλ

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την καθηγήτρια μου και επιβλέπουσα κυρία Δημητρώλου Σωτηρία, διότι με δίδαξε μέσα από το μάθημά της «Τρισδιάστατος Σχεδιασμός με την βοήθεια Η/Υ» τον κόσμο της τρισδιάστατης εκτύπωσης και στην συνέχεια με εμπιστεύτηκε και μου έδωσε την ευκαιρία να αναπτύξω και να μελετήσω το συγκεκριμένο θέμα της διπλωματικής εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου και επιβλέποντα κύριο Ιακωβίδη Ισίδωρο για την όλη καθοδήγηση και βοήθεια του στις πειραματικές διαδικασίες. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον πατέρα μου για τη στήριξη, την κατανόηση και την καθοδήγησή του στη ζωή μου καθώς και την αδελφή μου για όλη τη στήριξη και αγάπη που έχουμε ο ένας για τον άλλον.

Περίληψη

Η τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί μια τεχνολογία η οποία αναπτύσσεται ραγδαία τα τελευταία χρόνια με συνεχείς βελτιώσεις αναφορικά με την ταχύτητα, την ποιότητα αλλά και την ευκολία εκτύπωσης αντικειμένων. Εξ αιτίας των χαρακτηριστικών αυτών αλλά και των συγχρόνων τρισδιάστατων εκτυπωτών που έχουν τη δυνατότητα εκτύπωσης διαφόρων υλικών όπως μέταλλα, πλαστικά, σύνθετα, πολλές βιομηχανίες και εταιρίες επιθυμούν την ενσωμάτωση της συγκεκριμένης τεχνολογίας στα τωρινά ή στα μελλοντικά βραχυπρόθεσμα επιχειρηματικά τους σχέδια. Η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σχεδόν σε όλες τις βιομηχανίες και παρουσιάζει σημαντικές δυνατότητες ανάπτυξης, μελέτης και έρευνας.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η τρισδιάστατη εκτύπωση δοκιμίων από τα υλικά PLA, PC, και PAHT CF15, και η μελέτη της συμπεριφοράς τους και των μηχανικών ιδιοτήτων τους μέσω πειραματικών δοκιμών.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια ιστορική αναδρομή στην τρισδιάστατη εκτύπωση και στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι διάφορες τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής. Το τρίτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τον τρισδιάστατο σχεδιασμό των δοκιμίων εφελκυσμού, κάμψης, ερπυσμού και κρούσης με το λογισμικό Fusion360, την περιγραφή των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν στην εργασία, και την προσομοίωση της εκτύπωσης μέσω του λογισμικού Cura. Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία της εκτύπωσης για όλα τα δοκίμια, αναφέρονται τα προβλήματα που προέκυψαν και η επίλυσή τους, και υπολογίζεται η διαστασιολογική σταθερότητα των εκτυπωμένων δοκιμίων. Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι πειραματικές δοκιμές εφελκυσμού, κάμψης τριών σημείων, ερπυσμού και κρούσης, ενώ πραγματοποιείται σκληρομέτρηση, μέτρηση πυκνότητας και οπτική μικροσκοπία. Τα αποτελέσματα των δοκιμών καταγράφονται αναλυτικά και συγκρίνονται οι ιδιότητες των υλικών.

Λέξεις κλειδιά: Τρισδιάστατη εκτύπωση, προσθετική κατασκευή, FDM, PLA, PC, PAHT CF15, εφελκυσμός, κάμψη, ερπυσμός, κρούση, σκληρομέτρηση.

Abstract

3D printing is a technology that has evolved rapidly in recent years with continuous improvements in terms of speed, quality, and ease of printing objects. Due to these characteristics and the capabilities of modern 3D printers that print a variety of materials such as metals, plastics, and composites, many industries and companies are considering integrating this technology in their current or future short-term business plans. 3D printing has a wide range of applications in almost all industries and offers a significant potential for development, study, and research.

The purpose of this thesis is the 3D printing of samples from PLA, PC, and PAHT CF15 materials, and the study of their behavior and mechanical properties through experimental tests.

In the first chapter the historical review of 3D printing is presented and in the second chapter the various technologies of prosthetic manufacturing are described. The third chapter includes the 3D design of the tensile, bending, creep and impact samples with the Fusion360 software, the description of the materials used in the work, and the simulation of the printing process through the Cura software. In the fourth chapter, the printing process for all the samples is described in detail, the problems that arose and their solutions are mentioned, and the dimensional stability of the printed samples is calculated. In the fifth chapter, the tensile, three-point bending, creep, and impact experimental tests are presented, as well as hardness measurement, density measurement and optical microscopy are performed. The results of the tests are presented in detail and the properties of the materials are compared.

Key Words: 3D printers, 3D printing, additive manufacturing, FDM, PLA, PC, PAHT CF15, tensile test, bending test, creep test, impact test, hardness.

Πίνακας περιεχομένων

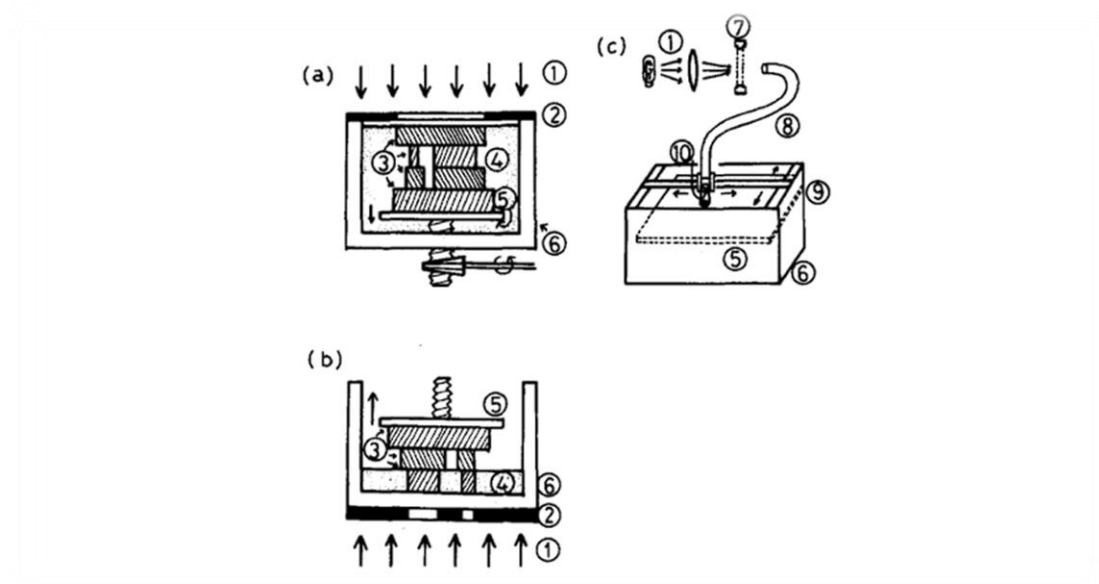
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στη Τρισδιάστατη Εκτύπωση.....	1
1.1 Ιστορική αναδρομή	1
1.2 Εφαρμογές.....	3
Κεφάλαιο 2: Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής	5
2.1 Stereolithography (STL)	5
2.2 Digital light processing (DLP)	8
2.3 Selective laser sintering (SLS)	9
2.4 Direct metal laser sintering (DMLS).....	10
2.5 Selective laser melting (SLM).....	11
2.6 Electronic beam melting (EBM)	12
2.7 Fused deposition modeling (FDM) – Fused filament fabrication (FFF).....	13
Κεφάλαιο 3: Σχεδιασμός για Τρισδιάστατη Εκτύπωση	16
3.1 3D σχεδιασμός δοκιμίων για πειραματικές δοκιμές	16
3.2 Καθορισμός των υλικών εκτύπωσης.....	19
3.2.1 Polylactic acid (PLA).....	19
3.2.2 Polycarbonate (PC)	20
3.2.3 PAHF - CF15	20
3.3 Προσομοίωση εκτύπωσης με το λογισμικό Ultimaker Cura	21
Κεφάλαιο 4: Τρισδιάστατη Εκτύπωση των Δοκιμίων.....	24
4.1 Τρισδιάστατος εκτυπωτής Ultimaker S5	24
4.2 Προετοιμασία εκτυπωτή	24
4.3 Εκτύπωση δοκιμίων PLA.....	26
4.4 Εκτύπωση δοκιμίων PC	31
4.5 Εκτύπωση δοκιμίων PAHT CF15.....	35

4.6	Διαστασιολογική σταθερότητα εκτυπωμένων δοκιμίων.....	42
4.7	Γενικά συμπεράσματα σχετικά με την εκτύπωση των δοκιμίων	44
Κεφάλαιο 5: Μηχανικές Δοκιμές.....		46
5.1	Δοκιμασία εφελκυσμού.....	46
5.2	Δοκιμασία κάμψης τριών σημείων	49
5.3	Δοκιμασία ερπυσμού.....	53
5.4	Δοκιμασία Κρούσης.....	58
5.5	Μέτρηση σκληρότητας	62
5.6	Μέτρηση πυκνότητας.....	65
5.7	Μικροσκοπική εξέταση.....	68
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα		76
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		78

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στη Τρισδιάστατη Εκτύπωση

1.1 Ιστορική αναδρομή

Στην εποχή μας οι εκτυπωτές αποτελούν καθημερινό εργαλείο που χρησιμοποιείται είτε στο χώρο εργασίας είτε στο σπίτι. Η κατασκευή του πρώτου inkjet εκτυπωτή χρονολογείται από το 1976 ως εργαλείο αντιγραφής και εκτύπωσης σελίδων, με κωδική ονομασία «IMB 3800» [1]. Ωστόσο από τη δεκαετία του 80 κιάλας υπήρχαν οι πρώτες ιδέες για τη δημιουργία ενός καινοτόμου και πρωτότυπου εκτυπωτή που θα μπορούσε να εκτυπώνει υλικά. Έτσι στις αρχές του 1980 ο Ιάπωνας Hideo Kodama προσπάθησε να δημιουργήσει τον πρώτο τρισδιάστατο εκτυπωτή. Ο Dr. Kodama ήταν ο πρώτος που αναφέρθηκε στη μέθοδο του Rapid Prototyping (ταχεία κατασκευή πρωτοτυπιών) με τη χρήση φωτοπολυμερών υλικών, δυστυχώς όμως η δημιουργία του εκτυπωτή δεν επιτεύχθηκε [2,3]. Εμπνευσμένοι από αυτή την ιδέα μια ομάδα τριών Γάλλων, Alain Le Mehante, Olivier de Witte και Jean – Cause Andre, προσπάθησαν να την υλοποιήσουν, αλλά χωρίς επιτυχία [4].



Εικόνα 1: Σχηματική απεικόνιση των τρισδιάστατων εκτυπωτών του Hideo Kodama: (α) Το build plate μετακινείται μέσα στη ρευστή ρητίνη, (β) το build plate απομακρύνεται από τη ρευστή ρητίνη, (γ) Μέθοδος raster με οπτική ίνα. 1) Υπεριώδης ακτίνα, 2) Μάσκα, 3) Στερεοποιημένα στρώματα, 4) Υγρό πολυμερές, 5) Κινητή πλάκα, 6) Αποδέκτης, 7) Κλείστρο, 8) Οπτική ίνα, 9).X-Y άξονες κίνησης, 10) Οπτικός φακός. [3]

Μετά από ένα χρόνο, το 1982, ο Charles (Chuck) Hull στην Καλιφόρνια είχε μια παρόμοια ιδέα για τρισδιάστατη εκτύπωση και προσπάθησε με την σειρά του και εκείνος στην υλοποίηση της. Η ιδέα αυτή ήταν η τοποθέτηση χιλιάδων λεπτών στρώσεων πλαστικού υλικού και η χρήση χάραξης, με σκοπό τη δημιουργία ενός νέου αντικειμένου με συγκεκριμένη μορφή την οποία όριζε ο ίδιος. Το 1983 μετά από έρευνες και πειράματα κατάφερε να δημιουργήσει μια συμπυκνωμένη ακτίνα υπεριώδους φωτός, η οποία θα κινούνταν με εντολές που καθόριζε ο χειριστής σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή και θα στόχευε την επιφάνεια ενός δοχείου γεμάτο με φωτοπολυμερές υλικό. Με τη συγκεκριμένη τεχνική ο Hull κατάφερε να δημιουργήσει στερεό πλαστικό αντικείμενο από φωτοπολυμερές ρευστό. Η δημιουργία του πρώτου τρισδιάστατου εκτυπωτή (3D printer) με τεχνολογία στερεολιθογραφίας (stereolithography) από τον Chuck Hull χρονολογείται στις 9 Μαρτίου 1983. Τρία χρόνια αργότερα, το 1986, ύστερα από πολλούς πειραματισμούς και έχοντας καταλήξει στο συμπέρασμα ότι η διαδικασία αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε ποικίλα υλικά δημιούργησε την εταιρεία 3D Systems [5].



Εικόνα 2: Ο πρώτος τρισδιάστατος εκτυπωτής, Πηγή: 3dprint.com

Η στερεολιθογραφία θεωρήθηκε ως μια μέθοδος ταχείας κατασκευής πρωτοτύπων, ικανή να μεταβάλει τη φυσική κατάσταση ενός υλικού και να το στερεοποιήσει, δημιουργώντας αντικείμενα από ψηφιακά δεδομένα. Το πρώτο σύστημα Rapid Prototyping ήταν το SLA-1 [5] το οποίο πουλήθηκε το 1988 με τιμή πάνω από 300.000 \$. Με την πάροδο των χρόνων και τη συνεχή ανάπτυξη της συγκεκριμένης μεθόδου η τιμή των τρισδιάστατων εκτυπωτών μειωνόταν διαρκώς. Το 1992 κατασκευάστηκε από την εταιρεία 3D Systems η πρώτη μηχανή στερεολιθογραφίας που αποτελούνταν από έναν UV Laser με το οποίο γινόταν η στερεοποίηση του φωτοπολυμερούς υλικού, σε πολλαπλές λεπτές διαδοχικές στρώσεις, με στόχο να χρησιμοποιηθεί από το ευρύ κοινό και όχι μόνο από εταιρείες [6].

Το 2007 η εταιρεία 3D Systems για πρώτη φορά διέθεσε στην αγορά τον πρώτο τρισδιάστατο εκτυπωτή με τιμή κάτω των 10.000 \$. Στη συνέχεια στόχευσε στην περαιτέρω ελάττωση της τιμής πώλησης με σκοπό τη διάδοση και τη χρήση από περισσότερους ανθρώπους. Πράγματι μετά από 30 χρόνια από την πρώτη αναφορά πώλησης εκτυπωτή, η τιμή ενός εκτυπωτή κυμαίνεται στα 300 – 500 \$ για απλή χρήση και στα 1.500 - 20.000 \$ για πιο επαγγελματική [7]. Ως επαγγελματική χρήση εννοείται η επίτευξη ακρίβειας και λεπτομέρειας στις διαδοχικές στρώσεις του υλικού αλλά και το μέγεθος του εκτυπωμένου αντικειμένου.

Με την πάροδο του χρόνου αναπτύχθηκαν και άλλες μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης για διαφορά υλικά, οι οποίες θα αναφερθούν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2.

1.2 Εφαρμογές

Εξ αιτίας της εύκολης και γρήγορης δημιουργίας στερεών αντικειμένων από 3D ψηφιακά μοντέλα, η τρισδιάστατη εκτύπωση χρησιμοποιείται στις μέρες μας σε ποικίλους τομείς, όπως στην αεροναυπηγική βιομηχανία, την αυτοκινητοβιομηχανία, την ιατρική, την κατανάλωση υλικών αγαθών, κ.α. Οι κατασκευαστικές δυνατότητες ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή μπορούν να θεωρηθούν ‘άπειρες’ καθώς οποιαδήποτε ιδέα μπορεί να υλοποιηθεί στο λογισμικό σχεδίασης, στη συνέχεια μπορεί να εκτυπωθεί είτε ως ολόκληρο συναρμολογημένο προϊόν είτε ως κομμάτι – κομμάτι. Η δυνατότητα εκτύπωσης πολλών διαφορετικών υλικών, η επίτευξη καλής διαστασιολογικής ακρίβειας και η δημιουργία πολύπλοκων και σύνθετων γεωμετρικών

μορφών, συντέλεσε στη χρήση εκτυπωτών για απλά αντικείμενα όπως σωλήνες, έως ανθρώπινα προσθετικά μέλη.

Στη συνέχεια παρατίθενται χαρακτηριστικές καινοτόμες εφαρμογές [8,9] με χρονολογική σειρά ώστε να γίνει κατανοητή η εξέλιξη της τρισδιάστατης εκτύπωσης στη βιομηχανία.

- Το 2008 έγινε η πρώτη τρισδιάστατη εκτύπωση ενός προσθετικού ποδιού (Εικόνα 3).
- Στις 13 Μαρτίου 2010 εκτυπώθηκε η πρώτη τρισδιάστατη φλέβα ανθρώπου.
- Το 2011 έγινε εφικτή η τρισδιάστατη εκτύπωση κοκάλων.
- Το 2013 μια Κινέζικη εταιρία εκτύπωσε το κεντρικό σκελετό ακτίνας 5 μέτρων του πτερυγίου ενός επιβατηγού αεροσκάφους Cormac C919.
- Τον Μάιο του 2013 στην Αμερική επιτεύχθηκε η πρώτη τρισδιάστατη εκτύπωση ενός όπλου.
- Τον ίδιο μήνα γιατρός από το πανεπιστήμιο του Michigan εκτύπωσε έναν ειδικό νάρθηκα σε μικρές διαστάσεις σώζοντας τη ζωή ενός μωρού.



Εικόνα 3: Το πρώτο προσθετικό πόδι εκτυπωμένο από 3d printer, Πηγή: Joe Micallef, 2015

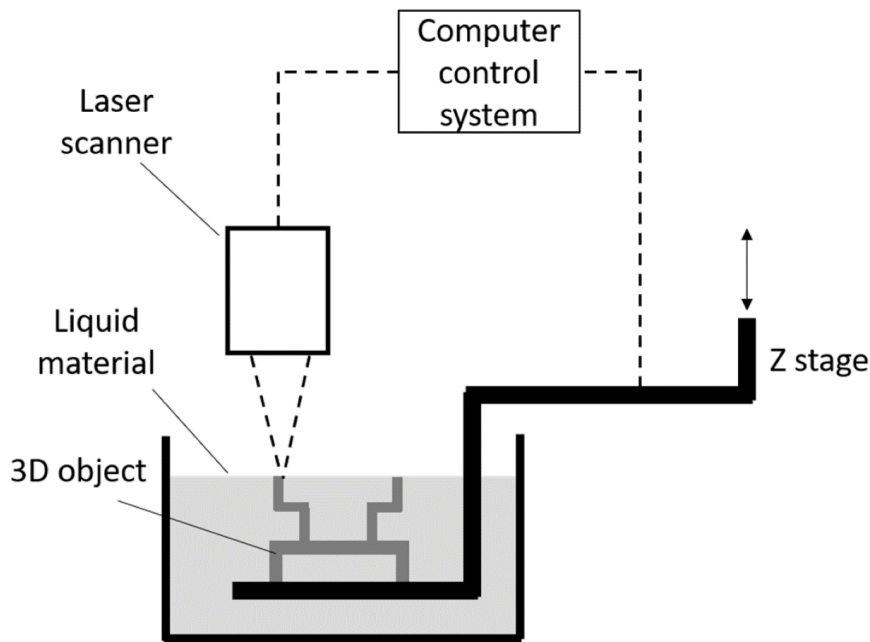
Κεφάλαιο 2: Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής

Η προσθετική κατασκευή (Additive Manufacturing) ή τρισδιάστατη εκτύπωση (3D Printing) όπως είναι ευρύτερα γνωστή, επιτρέπει την κατασκευή τρισδιάστατων αντικειμένων απευθείας από ψηφιακά δεδομένα CAD. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούμε στις διάφορες τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης, στα βασικά χαρακτηριστικά τους καθώς και στον τρόπο λειτουργίας τους.

2.1 Stereolithography (STL)

Αν και πρόκειται για την παλαιότερη μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης, η Stereolithography ή Στερεολιθογραφία αποδίδει πολύ καλή λεπτομέρεια στη γεωμετρική μορφή των εκτυπωμένων αντικειμένων. Αυτό οφείλεται στη συγκεκριμένη τεχνολογία που χρησιμοποιεί μια ακτίνα λέιζερ η οποία κινείται με υψηλή ακρίβεια από δεδομένα που λαμβάνει από έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Η ακτίνα UV ακολουθεί συγκεκριμένη διαδρομή με τη χρήση μοτέρ και κατόπτρων. Με τη βοήθεια των κατόπτρων η δέσμη του λέιζερ κατευθύνεται πάνω στο αναλώσιμο υλικό της εκτύπωσης, τη φωτοπολυμεριζόμενη ρητίνη, και την στερεοποιεί κατά στρώσεις (Εικόνα 4). Ο λόγος στερεοποίησης είναι η ενεργοποίηση μέσω του φωτός των μονομερών αλυσίδων άνθρακα της ρητίνης με αποτέλεσμα τη δημιουργία ισχυρών δεσμών του άνθρακα μεταξύ τους. Το τελικό αποτέλεσμα μετά την εκτύπωση συνήθως απαιτεί μετεπεξεργασία για αύξηση της αντοχής του αντικειμένου, όπως έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία (UV Light) ή σε σημείο με επαρκές ηλιακό φως. Η δεύτερη επιλογή είναι φθηνότερη και απευθύνεται κυρίως στο ευρύ κοινό. Η τοποθέτηση σε υπεριώδη ακτινοβολία προτιμάται όταν το τελικό προϊόν πρέπει να έχει υψηλές θερμικές και μηχανικές ιδιότητες. Επίσης θα πρέπει να αφαιρεθεί το υποστηρικτικό υλικό (support) και να λειανθούν οι επιφάνειες (αμμοβολή, κλπ) για να έχουμε το μέγιστο επιθυμητό αποτέλεσμα. Η ποιότητα του προϊόντος συνήθως είναι πολύ καλή, με λείες επιφάνειες και σύνθετες γεωμετρικές λεπτομέρειες [10].



Εικόνα 4: Διάταξη Στερεολιθογραφίας, Πηγή mdpi.com

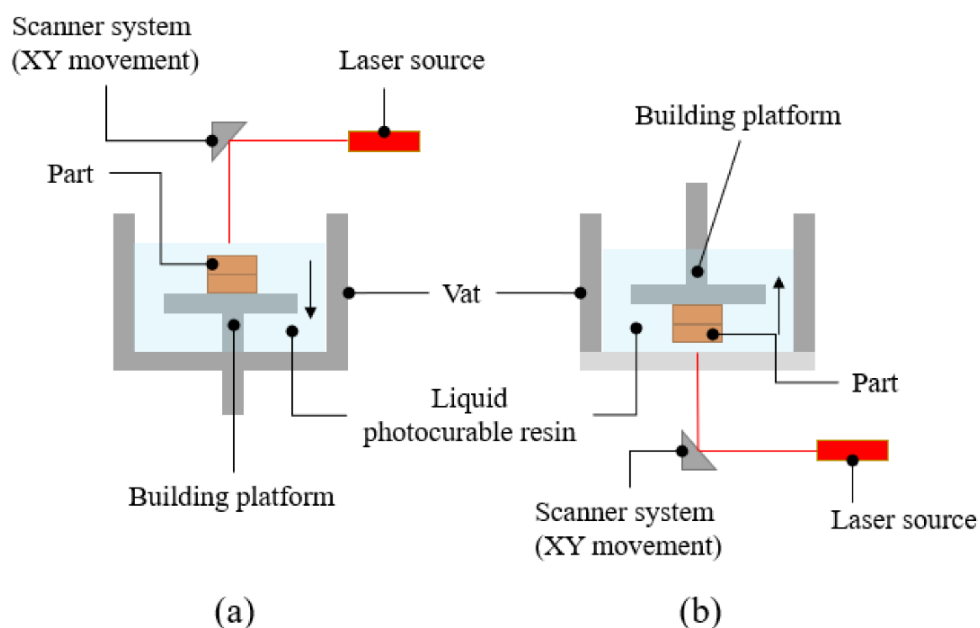
Γενικά υπάρχουν δύο κατηγορίες εκτυπωτών SLA που αφορούν τη μετατόπιση του build plate, οι εκτυπωτές Top-down και οι εκτυπωτές Bottom-up [11,12].

Top-down: Αυτή η κατηγορία εκτύπωσης έχει την πηγή λέιζερ στο πάνω μέρος του εκτυπωτή και στοχεύει την υγρή ρητίνη. Στη συνέχεια αφού στερεοποιηθεί η πρώτη στρώση η πλατφόρμα κατασκευής (build plate) μετακινείται προς τα κάτω και μια νέα στρώση ρητίνης δημιουργείται. Στο τέλος της εκτύπωσης το build plate μετακινείται προς τα πάνω σε σημείο εκτός της ρητίνης και το προϊόν μπορεί να αφαιρεθεί.

Bottom-up: Σε αυτή την κατηγορία εκτύπωσης η πηγή φωτός είναι τοποθετημένη κάτω από την δεξαμενή ρητίνης και προστατεύεται από ένα διαφανή υλικό με επίστρωση σιλικόνης. Με τον τρόπο αυτό το λέιζερ διαπερνάει τον πάτο της δεξαμενής και ταυτόχρονα δεν έρχεται σε επαφή με τη ρητίνη. Αφού στερεοποιηθεί η πρώτη στρώση, το build plate μετακινείται προς τα πάνω ορισμένες στρώσεις (n layers) με σκοπό την αποκόλληση της σκληρής ρητίνης που δημιουργήθηκε στο πάτο της δεξαμενής. Στη συνέχεια το build plate κατεβαίνει n-1 στρώσεις και συνεχίζεται η διαδικασία έως τη δημιουργία του τελικού προϊόντος. Η συγκεκριμένη τεχνική ονομάζεται ‘peeling step’.

Οι εκτυπωτές της πρώτης κατηγορίας Top-down χρησιμοποιούνται συνήθως σε βιομηχανίες και μεγάλα ερευνητικά κέντρα (industrial SLA printers), καθώς έχουν

μεγάλες διαστάσεις και μπορούν να δημιουργήσουν αντικείμενα μεγάλου μεγέθους σε αντίθεση με τους bottom-up εκτυπωτές. Οι εκτυπωτές bottom-up χρησιμοποιούνται συνήθως σε εργαστήρια και σπίτια (desktop SLA printers) και έχουν μικρές διαστάσεις, καθώς το τελικό προϊόν στηρίζεται στην επιφάνεια εκτύπωσης και δεν μπορεί να έχει μεγάλο βάρος μιας και υπάρχει κίνδυνος αποκόλλησης.



Εικόνα 5: Κατηγορίες εκτύπωσης στερεολιθογραφίας (a) top-down (b)bottom-up [11].

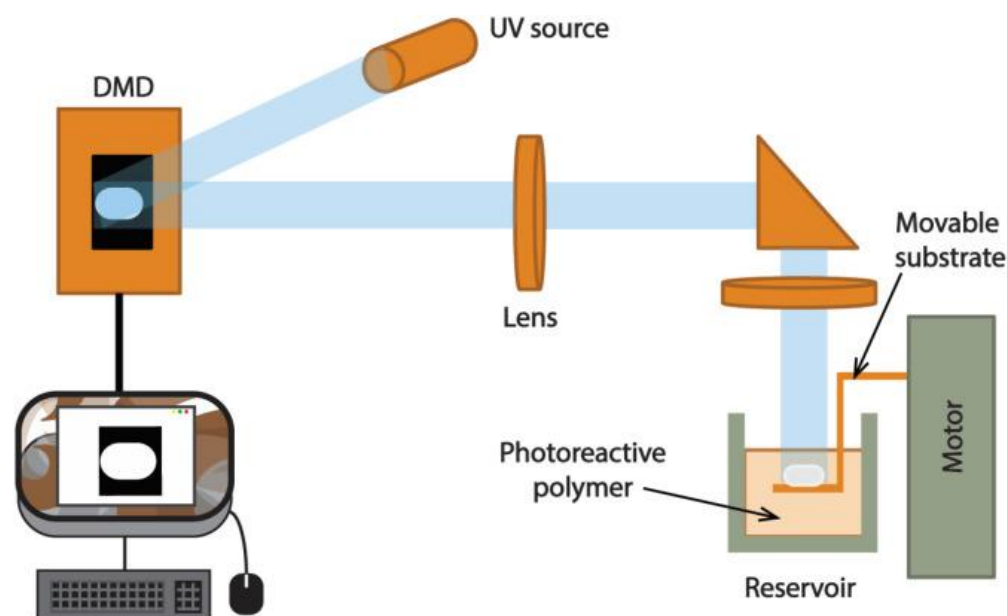
Ειδικά χαρακτηριστικά της διαδικασίας εκτύπωσης με στερεολιθογραφία:

- Κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης είναι απαραίτητο το υποστηρικτικό υλικό.
- Τα κύρια υλικά που χρησιμοποιούνται είναι θερμοσκληραινόμενα πολυμερή (thermoset polymers) και η διαδικασία της σκλήρυνσης επιτυγχάνεται μέσω χημικής αντίδρασης σε καθορισμένη θερμοκρασία. Αντιθέτως υπάρχει κίνδυνος καταστροφής ή και καύσης του προϊόντος μετά την εκτύπωση εάν εκτεθεί σε υψηλή θερμοκρασία.
- Θα πρέπει να δημιουργείται μία οπή τουλάχιστον 4 mm στο τελικό προϊόν αν αυτό είναι συμπαγές και κλειστό, παράδειγμα μια σφαίρα, ένας κλειστός κύλινδρος κ.α.

2.2 Digital light processing (DLP)

Η τεχνολογία DLP είναι η εξέλιξη των εκτυπωτών SLA, η κύρια διαφορά αναμεσα στις δύο αυτές μεθόδους είναι η πηγή φωτός. Ενώ οι εκτυπωτές SLA χρησιμοποιούν ένα λέιζερ που στερεοποιεί ένα στρώμα ρητίνης σύμφωνα με τη κίνηση του λέιζερ, οι εκτυπωτές προβάλλουν όλη την εικόνα της στρώσης σε ένα ψηφιακό προβολέα, με αποτέλεσμα να στερεοποιείται όλο το στρώμα της ρητίνης ταυτόχρονα.

Με αυτό τον τρόπο η κατασκευή των αντικειμένων είναι ταχεία και επίσης ιδανική για σύνθετες γεωμετρίες με λεπτές δομές. Οι εκτυπωτές DLP διατίθενται στην αγορά συνήθως σε μορφή desktop και ακολουθούν την αρχή bottom-up ακριβώς όπως προαναφέρθηκε με τη μόνη διαφορά στον τρόπο στερεοποίησης της ρητίνης. Η μέθοδος DPL χρησιμοποιείται κατά βάση για ταχεία εκτύπωση πρωτοτύπων. Ωστόσο ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι το κόστος του εκτυπωτή. Επειδή ο προβολέας είναι ψηφιακή οθόνη, η εικόνα κάθε στρώματος αποτελείται από τετραγωνικά εικονοστοιχεία (pixel). Έτσι στην περίπτωση που ο χρήστης επιθυμεί υψηλότερη ποιότητα εκτύπωσης θα πρέπει να κάνει χρήση καλύτερης πηγής προβολής, αυξάνοντας το κόστος του εκτυπωτή [13,14].

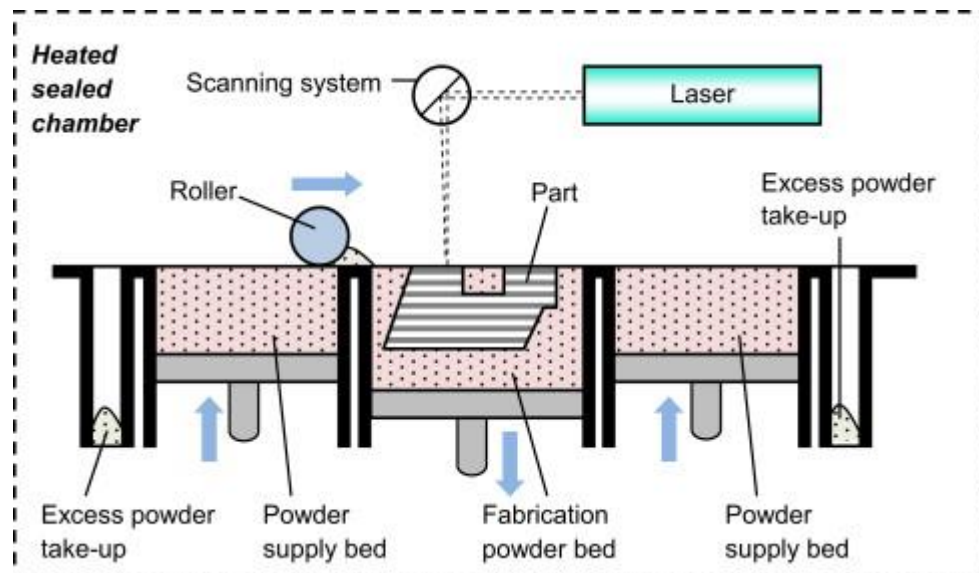


Εικόνα 6: Διάταξη Digital light processing [14]

2.3 Selective laser sintering (SLS)

Η τεχνολογία SLS ονομάζεται Επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ και χρησιμοποιεί σκόνη πολυμερών υλικών ως το αναλώσιμο υλικό για την εκτύπωση. Η SLS ανήκει στην οικογένεια των Powder Bed Fusion (PBF) και το υλικό σε σκόνη στερεοποιείται με τη βοήθεια ενός λέιζερ και το αντικείμενο εκτυπώνεται σε πολλαπλές στρώσεις ακολουθώντας τη μέθοδο bottom-up.

Η SLS χρησιμοποιεί κοκκώδη σκόνη από θερμοπλαστικά πολυμερή η οποία αλλάζει τις ιδιότητες της όταν έρθει σε επαφή με τη δέσμη λέιζερ λόγω της θερμικής ενέργειας που μεταδίδεται σε αυτή. Πιο συγκεκριμένα η σκόνη βρίσκεται στην πλατφόρμα εκτύπωσης (build platform) το οποίο διατηρεί θερμοκρασία λίγο μικρότερη από το σημείο τήξης του υλικού (Εικόνα 7). Το λέιζερ υψηλής ενέργειας προσπίπτει στους κόκκους που βρίσκονται στην πρώτη στρώση και αυξάνει τη θερμοκρασία τους. Οι κόκκοι στη συνέχεια λιώνουν και συσσωματώνονται μεταξύ τους. Όταν ολοκληρωθεί η πρώτη στρώση, η πλατφόρμα εκτύπωσης μετακινείται προς τα κάτω κατά απόσταση ίση με το πάχος της στρώσης. Ταυτόχρονα ένας μηχανισμός με υδραυλικό βραχίονα εναποθέτει μια νέα στρώση σκόνης το οποίο απλώνεται με κατάλληλο μηχανισμό που ονομάζεται Powder delivery ή Power Roller. Η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου δημιουργηθεί το αντικείμενο [15,16].



Εικόνα 7: Διάταξη Selective Laser Sintering [16]

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία εκτύπωσης τοποθετείται ειδικός θόλος πάνω από την πλατφόρμα εκτύπωσης. Στη συνέχεια η πλατφόρμα μετακινείται προς τα πάνω και γεμίζει το θόλο με τη σκόνη μέσα στην οποία υπάρχει το τελικό αντικείμενο. Ο θόλος αφαιρείται, τοποθετείται σε πάγκο εργασίας και καθαρίζεται με πεπιεσμένο αέρα και απλά εργαλεία (πινέλο) για να προκύψει το εκτυπωμένο αντικείμενο. Η σκόνη είναι ανακυκλώσιμη και χρησιμοποιείται ξανά. Εάν η αφαίρεση της σκόνης δεν γίνει σε ειδικό θόλο τότε απαιτείται η χρήση προστατευτικής μάσκας.

Σημαντικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι η μη ανάγκη υποστηρικτικού υλικού καθώς η σκόνη που δεν χρησιμοποιείται σταθεροποιεί το τηγμένο υλικό στην επιθυμητή θέση.

Η εκτύπωση με τεχνολογία SLS είναι αρκετά ευέλικτη και μπορεί να δημιουργήσει προϊόντα με σύνθετες γεωμετρίες και λεπτομέρειες, ενώ το τελικό προϊόν είναι συμπαγές με πολύ καλή επιφάνεια και ακρίβεια. Γενικά η εκτύπωση SSL χρησιμοποιείται για την ταχεία δημιουργία πρωτοτύπων, τη δημιουργία μικρών μαζικών σειρών παραγωγής (ανάλογα το μέγεθος και τις δυνατότητες του εκάστοτε εκτυπωτή), διαφόρων εργαλείων, αεραγωγών κ.α.

Ορισμένα από τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε σκόνη είναι τα εξής: Polyamide 12 (PA12), Polyamide 11 (PA11), Aluminum-filled nylon (Alumide), Glass-filled nylon (PA-GF) και Carbon-Fiber filled nylon (PA-FR).

2.4 Direct metal laser sintering (DMLS)

Η τεχνολογία DMLS ονομάζεται "Άμεση πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ μετάλλων" και έχει παρόμοια λειτουργία με την SLS με τη διαφορά ότι χρησιμοποιεί σκόνη μεταλλικών υλικών. Τα αντικείμενα που δημιουργούνται είναι στιβαρά με πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες. Ορισμένα από τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε σκόνη είναι τα εξής: Aluminum (AlSi10Mg), Stainless Steel (316L), Titanium (Ti6Al4V), Inconel 718, Maraging Steel και Cobalt Chrome.

Δεδομένου ότι η μέθοδος έχει μεγάλη ακρίβεια και εναποθέτει εξαιρετικά λεπτές στρώσεις εκτύπωσης, η σκόνη πρέπει να είναι τέλεια διαμορφωμένη σε μορφή σφαιρών, καθώς κάθε στρώση εκτύπωσης πρέπει να έχει ακριβώς το ίδιο ύψος (με ακρίβεια μm). Και στις δύο τεχνολογίες (SLS και DMLS) απαιτείται μεγάλη προσοχή

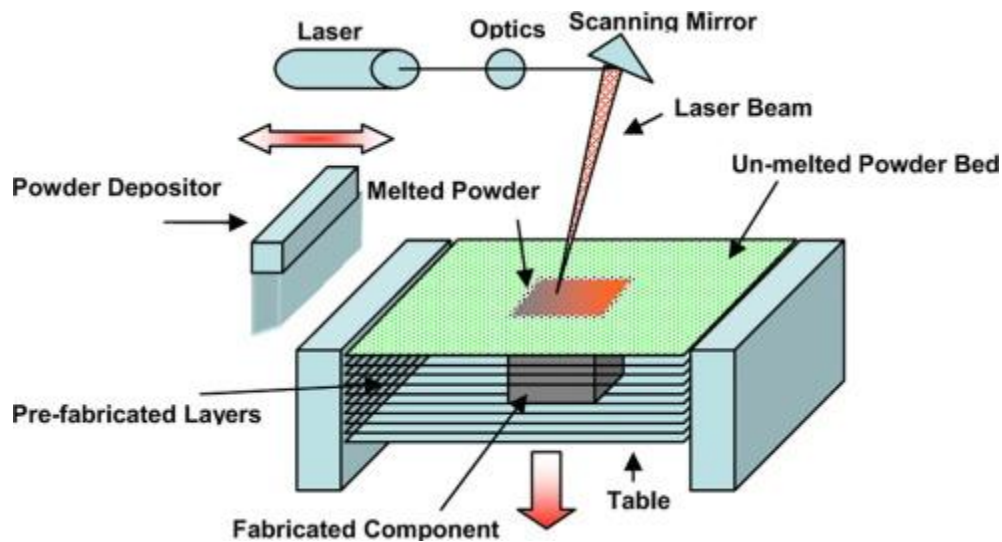
κατά το σχεδιασμό του ψηφιακού CAD μοντέλου ώστε να υπολογιστούν σωστά οι τελικές διαστάσεις λαμβάνοντας υπόψιν τη συρρίκνωση που θα προκληθεί στο τελικό προϊόν λόγω της τήξης - ψύξης του υλικού (το ποσοστό συρρίκνωσης συνήθως αναφέρεται από τον κατασκευαστή).



Εικόνα 8: Διάταξη Direct Metal Laser Sintering, Πηγή:<https://i.materialise.com/blog/direct-metal-laser-sintering-dml>

2.5 Selective laser melting (SLM)

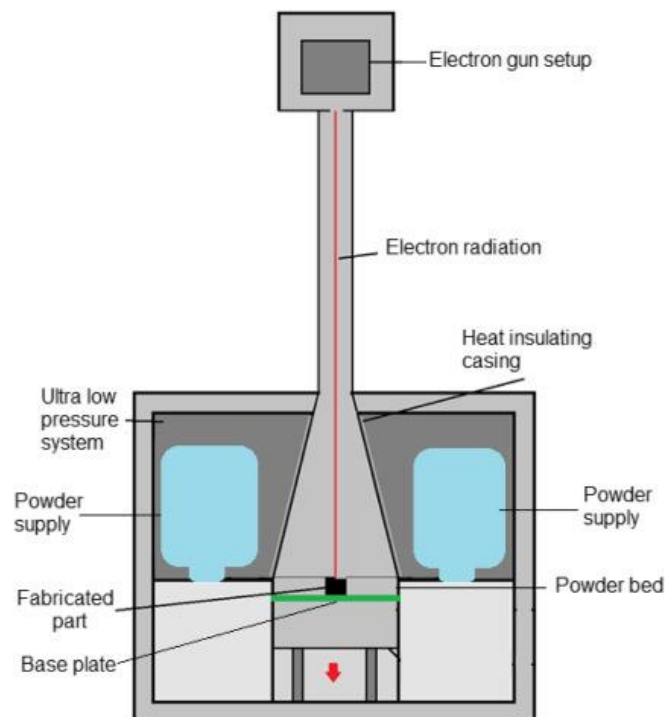
Η τεχνολογία SLM ή "Επιλεκτική τήξη με λέιζερ" αφορά στην εκτύπωση μετάλλων και έχει εμφανιστεί στον τομέα της τρισδιάστατης εκτύπωσης τα τελευταία χρόνια. Είναι σχεδόν παρόμοια με την τεχνολογία DMLS και η κύρια διαφορά είναι ότι στη SLM η σκόνη του μετάλλου πυροσυσσωματώνεται και τήκεται ταυτόχρονα, ενώ στη DMLS μόνο πυροσυσσωματώνεται. Ορισμένα από τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε σκόνη είναι τα εξής: Stainless Steel, Titanium, Aluminum, Cobalt Chrome και Steel. Η SLM χρησιμοποιεί ένα λέιζερ για να λιώσει και να συντήξει επιλεκτικά τη μεταλλική σκόνη σε στερεό αντικείμενο ακολουθώντας ένα συγκεκριμένο 2D προφίλ (Εικόνα 8). Στη συνέχεια η τράπεζα εκτύπωσης μετακινείται προς τα κάτω, ένα νέο λεπτό στρώμα σκόνης τοποθετείται και επαναλαμβάνεται η διαδικασία [19].



Εικόνα 9: Διάταξη Selective Laser Melting [19]

2.6 Electronic beam melting (EBM)

Η τεχνολογία EBM ή "Τήξη δεσμών ηλεκτρονίων" ανήκει στην οικογένεια των τεχνολογιών Powder bed fusion μαζί με την SLM και DMSL και χρησιμοποιεί σκόνη μετάλλων η οποία τήκεται από μια δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας που καθοδηγείται από ένα μαγνητικό πεδίο [20].



Εικόνα 10: Διάταξη Electronic Beam Melting [21]

Η κύρια διαφορά ανάμεσα στις τεχνολογίες EBM και DMSL είναι η ταχύτητα εκτύπωσης και η μετεπεξεργασία του εκτυπωμένου αντικειμένου. Η EBM είναι ταχύτερη και χρησιμοποιείται στην αεροναυπηγική, στην αεροδιαστημική, και στην αυτοκινητοβιομηχανία. Απαιτεί ειδικά εκπαιδευμένο προσωπικό καθώς το τελικό αντικείμενο συνήθως απαιτεί τελικό φινίρισμα με σκοπό να δημιουργηθεί λεία επιφάνεια. Το αποτέλεσμα πριν την τελική επεξεργασία φέρει παρόμοια ποιότητα επιφάνειας με τη μέθοδο της χύτευσης. Επίσης η διαδικασία πραγματοποιείται σε θάλαμο κενού για προστασία του μετάλλου από την οξειδωση.

2.7 Fused deposition modeling (FDM) – Fused filament fabrication (FFF)

Η τεχνολογία FDM/FFF ή "Εναπόθεση συντηγμένου υλικού / Κατασκευή συντηγμένου νήματος" είναι η πιο διαδεδομένη τεχνολογία προσθετικής κατασκευής και είναι επίσης αυτή που θα χρησιμοποιηθεί για την εκτύπωση των δοκιμίων της διπλωματικής εργασίας.

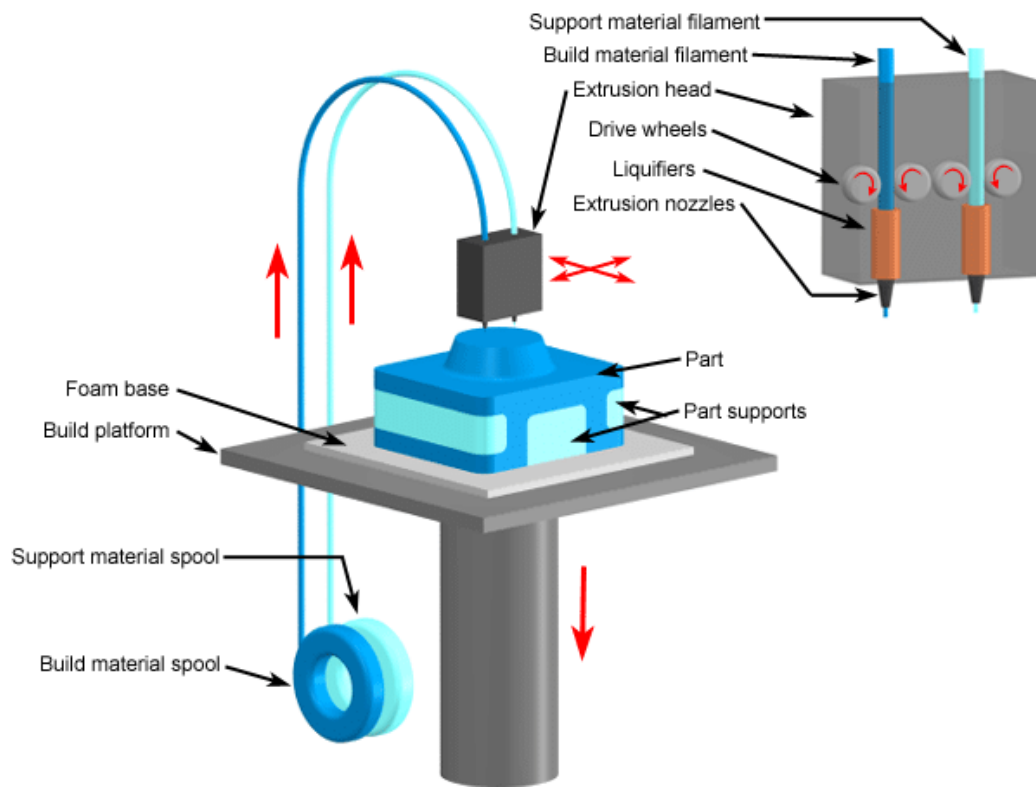
Ο εκτυπωτής FDM διαθέτει μία ή δύο κεφαλές ή ακροφύσια έκχυσης υλικού (nozzles) που θερμαίνουν το υλικό σε συγκεκριμένη θερμοκρασία, και το τοποθετούν σε διαδοχικές στρώσεις πάνω στην επιφάνεια εκτύπωσης (build plate) έως ότου δημιουργηθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα (Εικόνα 10). Τα αναλώσιμα υλικά της εκτύπωσης είναι σε μορφή νήματος και συνήθως πολυμερή υλικά όπως PLA, PC, ABS, Nylon, αλλά και πολυμερή υλικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα ή γυαλιού. Στη δεύτερη κεφαλή τοποθετείται το υποστηρικτικό υλικό το οποίο πρέπει να είναι συμβατό με το κύριο υλικό εκτύπωσης. Οι κεφαλές συνήθως έχουν τη δυνατότητα μετακίνησης στον άξονα X και Y. Ωστόσο υπάρχουν εκτυπωτές όπου η κεφαλή κινείται σε μία επιπλέον κατεύθυνση, στον άξονα Z, κάνοντας χρήση του τριαξονικού συστήματος XYZ.

Οι εντολές για την κίνηση των κεφαλών καθορίζονται στο λογισμικό του εκτυπωτή, στο οποίο ο χρήστης έχει τη δυνατότητα επεξεργασίας σχεδόν κάθε παραμέτρου της εκτύπωσης, από το πάχος στρώσης έως τη θερμοκρασία του ακροφύσιου και του γυαλιού πυρακτώσεως στο build plate. Ακόμα ορισμένα λογισμικά δίνουν τη δυνατότητα στον χρήστη να διαμορφώσει το μέγεθος του αντικειμένου πάνω στο build plate, όπως επίσης να τοποθετήσει/προσανατολίσει όπως επιθυμεί το αντικείμενο που πρόκειται να εκτυπωθεί.

Αξίζει να σημειωθεί πως οι εκτυπωτές FDM έχουν τη δυνατότητα τροποποίησης του εσωτερικού γεμίσματος του αντικειμένου (infill) που πρόκειται να εκτυπωθεί. Οι βασικές ρυθμίσεις είναι η πυκνότητα (σε ποσοστό της εκατό %) και το μοτίβο δηλαδή ο τρόπος εναπόθεσης του υλικού. Γενικά η αύξηση της πυκνότητας έχει ως επακόλουθο την καλύτερη αντοχή του αντικειμένου αλλά μεγαλύτερο χρόνο εκτύπωσης. Για παράδειγμα η επιλογή infill 100% με σκοπό να δημιουργηθεί ένα συμπαγές αντικείμενο απαιτεί διπλάσιο χρόνο εκτύπωσης σε σχέση με την εκτύπωση με infill 50%. Αναφορικά με το εξωτερικό περίβλημα του αντικειμένου το πρόγραμμα έχει ως προεπιλογή την εναπόθεση πολλών στρώσεων ενωμένων μεταξύ τους για τη δημιουργία ενός συμπαγούς τοιχίου (shell) [22,23].

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό της εκτύπωσης FDM είναι η χρήση υποστηρικτικού υλικού (support) κατά την εκτύπωση. Καθώς η συγκεκριμένη μέθοδος δεν μπορεί να εκτυπώσει στον αέρα αλλά μόνο πάνω σε μια υπάρχουσα στρώση, το λογισμικό εναποθέτει υποστηρικτικό υλικό σε επιφάνειες με γωνίες στήριξης μικρότερες των 45 μοιρών [24,25]. Ο χρήστης μπορεί να αλλάξει αυτή την προεπιλογή του λογισμικού αλλά η μη ύπαρξη support μπορεί να επιφέρει καλή ποιότητα επιφάνειας ή ακόμα και αστοχία της εκτύπωσης.

Η εναπόθεση του υλικού σε στρώσεις αποτελεί μια εύκολη και γρήγορη διαδικασία κατασκευής, ωστόσο παρουσιάζει ορισμένα προβλήματα σχετικά με την ένωση των στρώσεων μεταξύ τους κατά τη στερεοποίηση. Όταν το τηγμένο νήμα τοποθετείται πάνω στην προηγούμενη στρώση, η θερμοκρασία και η πίεση που ασκείται τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή αναγκάζει τη προηγούμενη στρώση να τακεί ξανά με αποτέλεσμα να γίνει η προσκόλληση. Αυτή η τεχνική ονομάζεται layer adhesion και ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τις σχετικές παραμέτρους στο λογισμικό. Ωστόσο έχει παρατηρηθεί ότι εάν επιλεγθεί μια medium ή coarse ποιότητα εκτύπωσης, ή εάν δεν επιλεγούν οι κατάλληλες παράμετροι θερμοκρασίας ή ταχύτητας εκτύπωσης, η εξωτερική επιφάνεια του εκτυπωμένου αντικειμένου μπορεί να μην είναι λεία αλλά να φαίνονται οι διάφορες στρώσεις. Για τη βελτίωση της επιφάνειας ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει κάποια μέθοδο μετεπεξεργασίας, όπως περαιτέρω θερμική επεξεργασία της επιφάνειας, τρίψιμο με υαλόχαρτο, αστάρωμα και βάψιμο κ.α.



Εικόνα 10: Διάταξη Fused Deposition Modeling [24]

Κεφάλαιο 3: Σχεδιασμός για Τρισδιάστατη Εκτύπωση

3.1 3D σχεδιασμός δοκιμίων για πειραματικές δοκιμές

Οι πειραματικές δοκιμασίες οι οποίες μελετήθηκαν στη διπλωματική εργασία για τα εκτυπωμένα δοκίμια είναι η δοκιμασία σε εφελκυσμό, η δοκιμασία σε κάμψη τριών σημείων, η δοκιμασία σε κρούση και η δοκιμασία σε ερπυσμό. Επίσης έγινε πειραματικός προσδιορισμός της σκληρότητας και της πυκνότητας των εκτυπωμένων δοκιμίων.

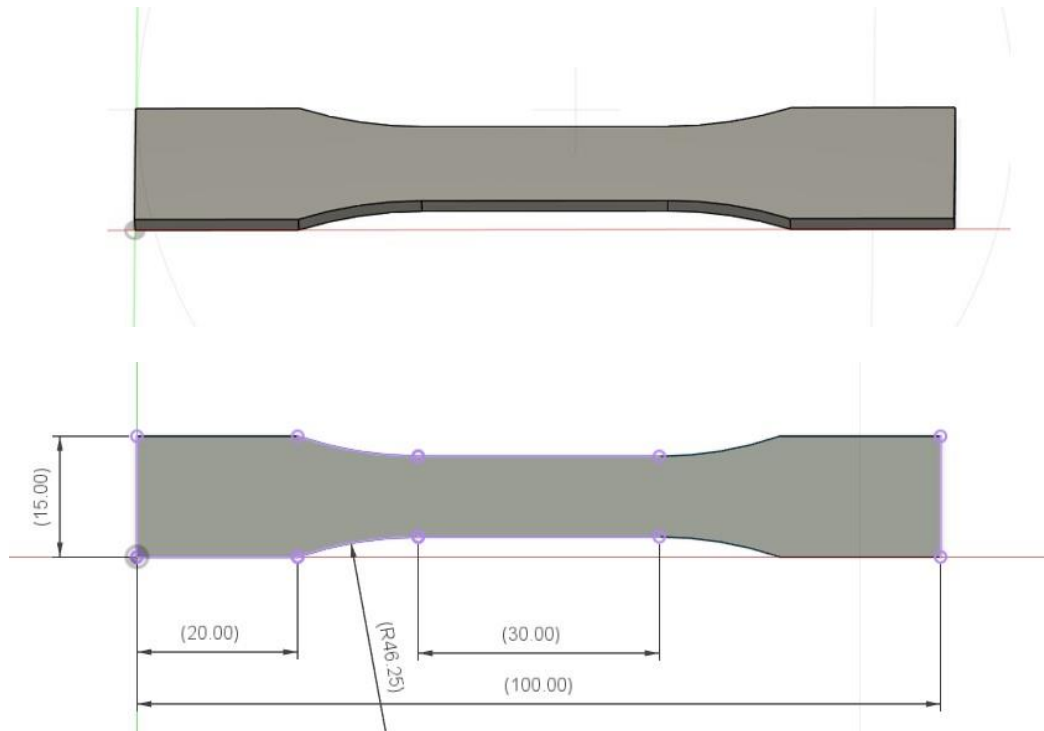
Ο σχεδιασμός των δοκιμίων έγινε με βάση τις απαιτούμενες διαστάσεις για τον πειραματικό προσδιορισμό φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων πολυμερών υλικών σύμφωνα με τα πρότυπα κατά ASTM και ISO: δοκιμασία σε εφελκυσμό - tensile test (ASTM D638), δοκιμασία σε κάμψη τριών σημείων -three point bending test (ASTM D790), δοκιμασία σε κρούση – impact test (ISO 180:2019) και δοκιμασία σε ερπυσμό – creep test.

Ο τρισδιάστατος σχεδιασμός των δοκιμίων έγινε με βάση τις διαστάσεις που αναφέρουν τα πρότυπα για τον πειραματικό προσδιορισμό των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων πολυμερών υλικών μέσω των παραπάνω δοκιμασιών. Για το σχεδιασμό των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε το σχεδιαστικό πρόγραμμα Fusion 360 της Autodesk, λαμβάνοντας υπόψη την αναφορά της Ultimaker [26] ότι συμβατά προγράμματα σχεδίασης είναι τα SolidWorks, Siemens NX, Autodesk Inventor, Autodesk Fusion, κ.α.

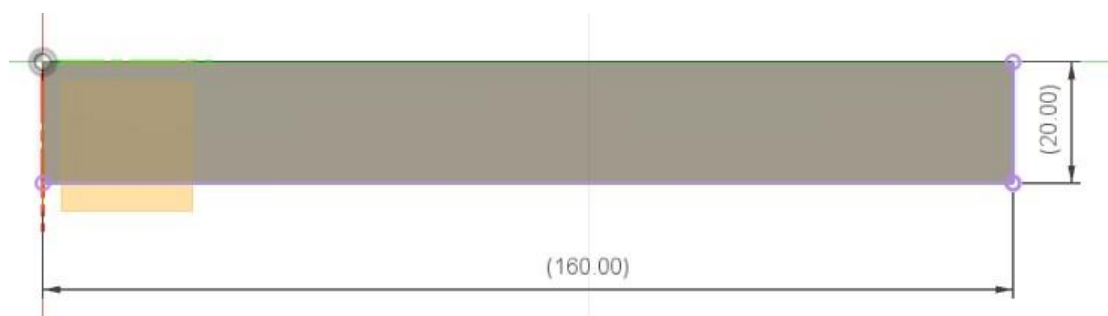
Οι βασικές εντολές για το σχεδιασμό είναι οι εξής:

1. New Sketch: Για το σχεδιασμό του 2D προφίλ του δοκιμίου
2. Line: για τη χάραξη ευθείων γραμμών.
3. Center Diameter Circle: για τη δημιουργία κύκλων / οπών.
4. Tangent Arc: για τη σχεδίαση γωνιών/τόξων.
5. Sketch Dimension: για τη διαστασιολόγηση.
6. Extrude: για την επιμήκυνση του σχεδίου στην τρίτη διάσταση και τη μετατροπή του από 2D σε 3D δίνοντας το πάχος του δοκιμίου.
7. Export σε STL File (*.stl) : για την εξαγωγή του δοκιμίου σε μορφή STL που κατανοεί το λογισμικό Ultimaker Cura του εκτυπωτή.

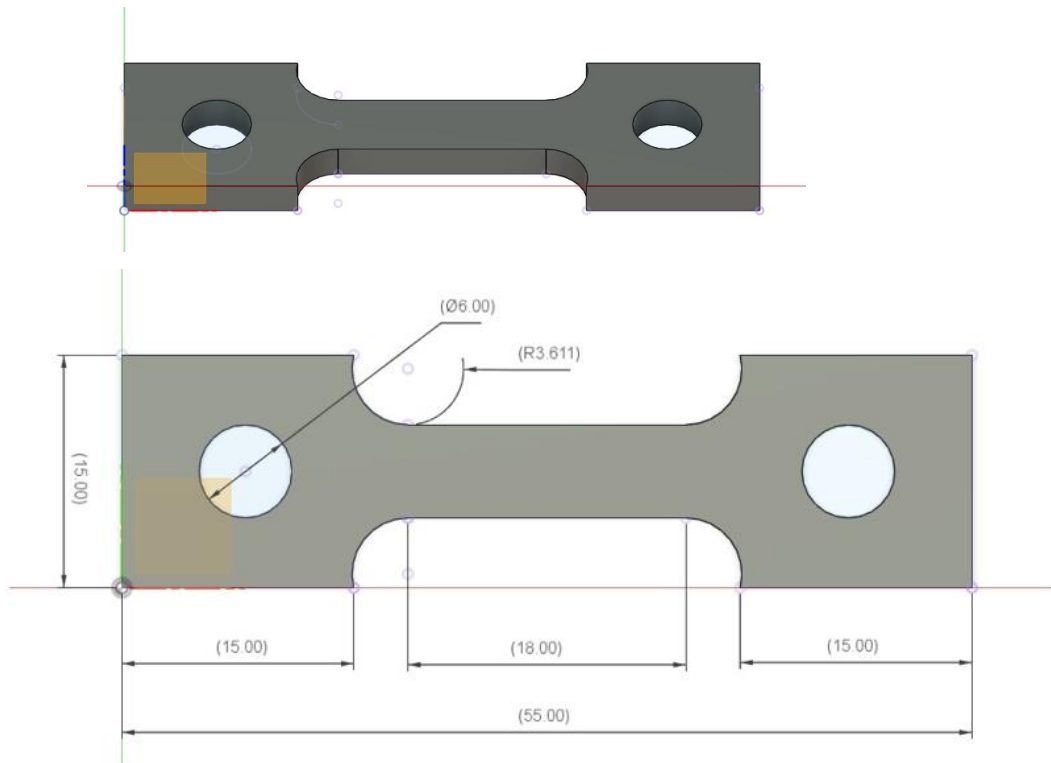
Στις Εικόνες 11-14 απεικονίζονται οι διαστάσεις των δοκιμίων εφελκυσμού, κάμψης, ερπυσμού και κρούσης. Το πάχος εκτύπωσης για όλα τα δοκίμια καθορίστηκε σε 3 mm.



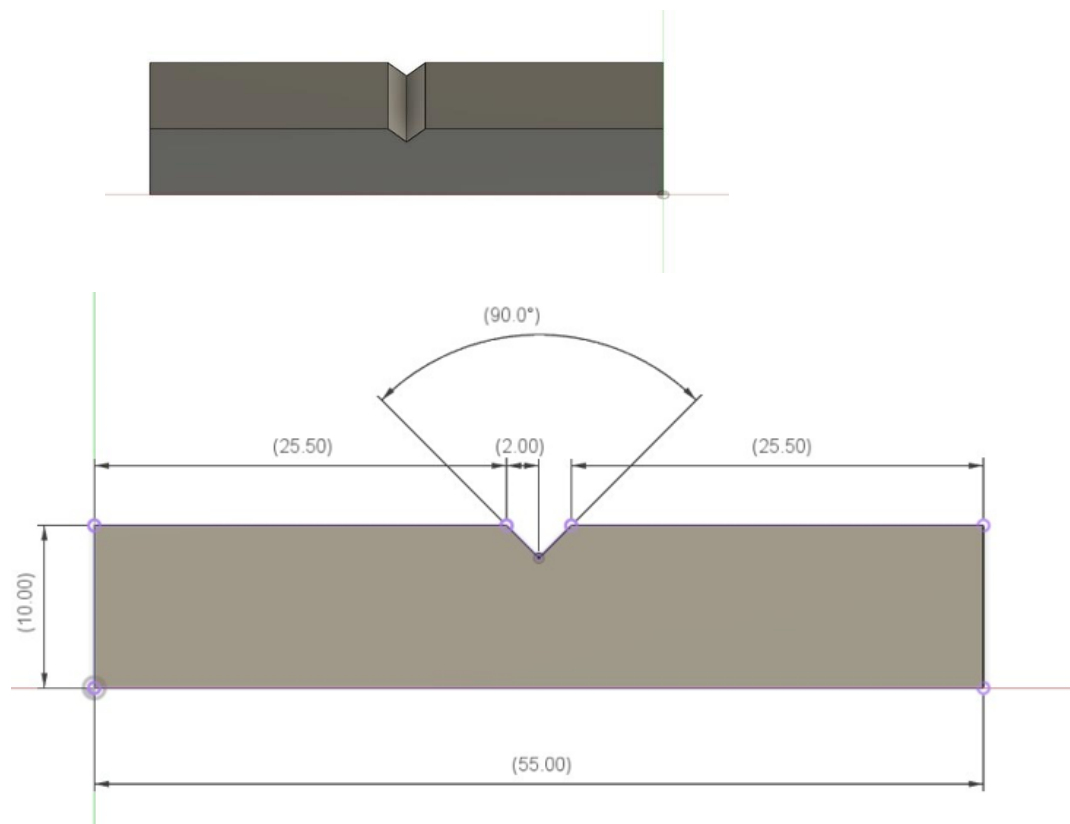
Εικόνα 11: Δοκίμιο εφελκυσμού



Εικόνα 12: Δοκίμιο κάμψης τριών σημείων



Εικόνα 13: Δοκίμο ερπυσμού



Εικόνα 14: Δοκίμο κρούσης

3.2 Καθορισμός των υλικών εκτύπωσης

Τα πολυμερή υλικά αποτελούν μια ομάδα υλικών που αποτελούνται από μόρια επαναλαμβανόμενα μεταξύ τους σε υποομάδες σε μεγάλο αριθμό αλλά και με μεγάλο μέγεθος. Πρόκειται για οργανικές ενώσεις που δεν περιέχουν στοιχεία, όπως το άζωτο, το πυρίτιο και το οξυγόνο [27].

Τα πολυμερή υλικά διακρίνονται σε:

- Πολυμερή προσθήκης
- Πολυμερή συμπύκνωσης
- Βιοπολυμερή
- Συνθετικά και τεχνητά

Όλα τα είδη πολυμερών διακρίνονται σε θερμοστατικά, τα οποία σκληραίνουν με την αύξηση της θερμοκρασίας και δεν επανέρχονται στην προηγούμενη κατάστασή τους όταν ψυχθούν και σε θερμοπλαστικά τα οποία τήκονται με την αύξηση της θερμοκρασίας και μπορούν να μορφοποιηθούν με την κατάλληλη επεξεργασία, π.χ. πίεση.

Στη συνέχεια περιγράφονται τα τρία πολυμερή υλικά PLA, PC και PAHT-CF15, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν ως νήματα για την εκτύπωση των δοκιμών με τη τεχνολογία FFF και τη διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών.

3.2.1 Polylactic acid (PLA)

Το Polylactic Acid (PLA) ή πολυγαλακτικό οξύ είναι ένα μονομερές θερμοπλαστικό υλικό, ιδιαίτερα γνωστό στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Δεν προέρχεται από το πετρέλαιο αλλά από ανανεώσιμες οργανικές πηγές, όπως άμυλο αραβοσίτου (corn starch), ζαχαροκάλαμο (sugar cane), κ.α. [28]. Η παραγωγή του είναι αρκετά εύκολη καθώς ακολουθεί τις γνωστές στο βιομηχανικό τομέα διαδικασίες παραγωγής πετροχημικών πλαστικών. Πρόσφατα έχει επιτευχθεί η παραγωγή νημάτων από PLA ενισχυμένων με μεταλλικά υλικά, όπως μπρούτζο, ορείχαλκο, σίδηρο και χάλυβα, ώστε να ενισχυθούν οι μηχανικές ιδιότητες [29].

Το PLA Filament της Ultimaker που θα χρησιμοποιηθεί για τις εκτυπώσεις των δοκιμών παρουσιάζει τις παρακάτω ιδιότητες [30]:

- Αντοχή σε εφελκυσμό: 45,6 MPa
- Αντοχή σε κρούση: 5,1 kJ/m²
- Σκληρότητα: 83 (Shore D)
- Θερμοκρασία τήξης: >145 °C

Επιπλέον είναι εύκολο και γρήγορο κατά την εκτύπωση και δημιουργεί καλή ποιότητα επιφάνειας με γεωμετρική λεπτομέρεια και χαρακτηρίζεται από υψηλή δυσκαμψία στον εφελκυσμό (Tensile stiffness). Το συγκεκριμένο υλικό είναι συμβατό με το υδατοδιαλυτό υποστηρικτικό υλικό PVA (Polyvinyl alcohol).

3.2.2 Polycarbonate (PC)

Το Polycarbonate (PC) ή πολυκαρβονικό οξύ είναι ένα θερμοπλαστικό υλικό το οποίο χαρακτηρίζεται από υψηλή αντοχή σε κρούση, υψηλή αντοχή σε θερμοκρασία και αντοχή σε φωτιά. Το PC απορροφά υγρασία (hygroscopic) με αποτέλεσμα διογκώνεται σε περιβάλλοντα με υψηλή υγρασία, και η αποθήκευσή του πρέπει να γίνεται σε ξηρό περιβάλλον ή σε αεροστεγές χώρο [31].

Το PC Filament της Ultimaker που θα χρησιμοποιηθεί για τις εκτυπώσεις των δοκιμών παρουσιάζει τις παρακάτω ιδιότητες [32]:

- Αντοχή σε εφελκυσμό: 53,7 MPa
- Αντοχή σε κρούση: 14,8 kJ/m²
- Σκληρότητα: 80 (Shore D)
- Θερμοκρασία τήξης: 250-270°C

3.2.3 PAHF - CF15

Το PAHF-CF15 (High Temperature Polyamide Carbon fiber) είναι πολυαμίδιο (νάυλον) ενισχυμένο με ίνες άνθρακα σε ποσοστό 15% και χαρακτηρίζεται από βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες, αντοχή σε θερμοκρασίες έως 150 °C, καθώς και καλή

σταθερότητα στις διαστάσεις (dimensional stability) κατά την εκτύπωση [33]. Το συγκεκριμένο υλικό είναι συμβατό με το υδατοδιαλυτό συμπολυμερές βουτανολιόλης-βινυλικής αλκοόλης ως υποστηρικτικό υλικό (BVOH, Butenediol vinyl alcohol copolymer).

Το PAHF_CF15 Filament της εταιρίας BASF που θα χρησιμοποιηθεί για τις εκτυπώσεις των δοκιμών παρουσιάζει τις παρακάτω ιδιότητες [34]:

- Αντοχή σε εφελκυσμό: 103,2 MPa
- Μέτρο κάμψης: 8258 MPa
- Αντοχή σε κρούση: 16,4 kJ/m²
- Θερμοκρασία τήξης: 260-280 °C

3.3 Προσομοίωση εκτύπωσης με το λογισμικό Ultimaker Cura

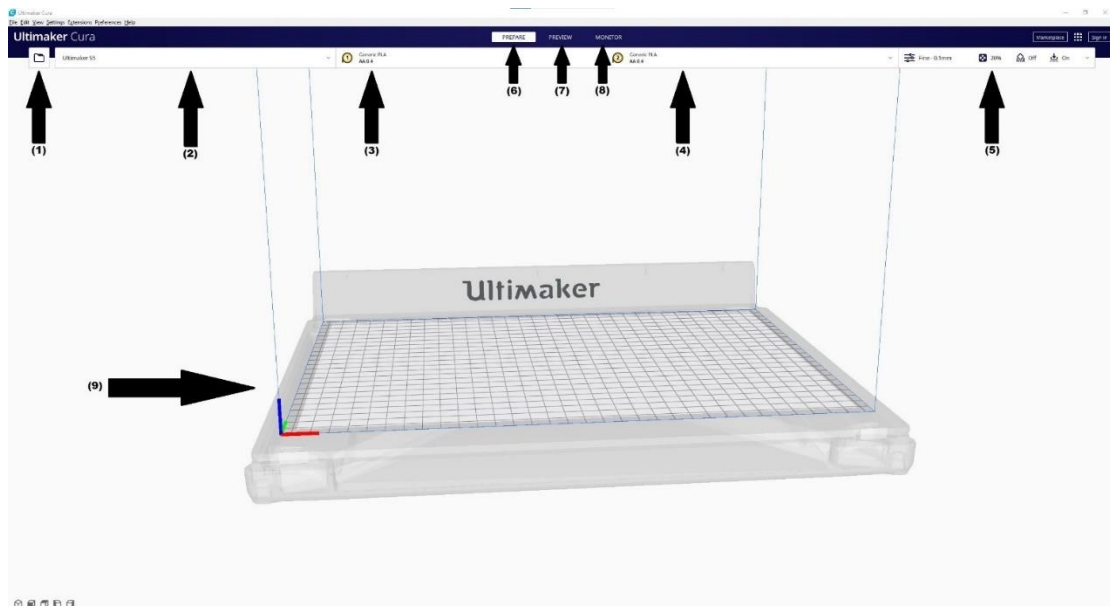
Για την εκτύπωση των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε ο τρισδιάστατος εκτυπωτής Ultimaker S5 του Εργαστηρίου Εργαλειομηχανών του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών. Η εταιρία 'Ultimaker Original' δημιουργήθηκε το 2011 από τον Martijin Elseman, Erik de Bruijin και Siert Wijnia και έκτοτε έχει μεγάλο μερίδιο αγοράς τρισδιάστατων εκτυπωτών και αναλωσίμων υλικών. Το λογισμικό Ultimaker Cura που έχει αναπτύξει η Ultimaker Original είναι διαθέσιμο δωρεάν μέσω της επίσημης ιστοσελίδας της εταιρίας και λειτουργεί σε Windows 64 bit, MacOS 64 bit, Linux 64 bit και Linux-Modern 64bit.

Η χρήση του λογισμικού είναι εύκολη και απλή για τον χρήστη και η εισαγωγή των ψηφιακών μοντέλων που σχεδιάστηκαν στο AutoDesk Fusion 360 μπορεί να γίνει είτε επιλέγοντας το φάκελο αριστερά στο μενού, είτε με Drag-and-Drop του αρχείου στο χώρο εκτύπωσης του λογισμικού. Επισημαίνεται ότι τα αρχεία πρέπει να είναι σε μορφή STL, OBJ, X3D, 3MF, BMP, GIF, JPG, ή PNG.

Στη συνέχεια ο χρήστης τοποθετεί και προσανατολίζει κατάλληλα το αντικείμενο στην τράπεζα εκτύπωσης και καθορίζει τις παραμέτρους της εκτύπωσης (υλικά, ύψος στρώσης, πάχος τοιχώματος, θερμοκρασίες υλικών, κ.λπ.). Η έκδοση που χρησιμοποιήθηκε για την εκτύπωση των δοκιμών είναι η Ultimaker Cura 4.12.1.

Στην Εικόνα 15 απεικονίζονται τα κυριότερα μενού/στοιχεία του λογισμικού:







1. Εικονίδιο Files για την επιλογή και εισαγωγή του/των αρχείου/ων.
2. Επιλογή του μοντέλου του τρισδιάστατου εκτυπωτή.
3. Επιλογή υλικού No.1 και κεφαλής No.1.
4. Επιλογή υλικού No.2 και κεφαλής No.2.
5. Καρτέλα παραμέτρων εκτύπωσης.
6. Καθορισμός παραμέτρων εκτύπωσης.
7. Προεπισκόπηση της διαδικασίας εκτύπωσης (προσομοίωση).
8. Μετάδοση εκτύπωσης μέσω της κάμερας του εκτυπωτή (αν διαθέτει).
9. Τραπέζι εκτύπωσης.



Εικόνα 15: Ultimaker Cura

Η διαδικασία που ακολουθεί ο χρήστης αποτελείται από τα παρακάτω βήματα:

- Βήμα 1. Εισαγωγή του/των αρχείου/ων STL προς εκτύπωση.
- Βήμα 2. Επιλογή ενός εκ των δοκιμίων.
- Βήμα 3. Προετοιμασία του δοκιμίου με τις παρακάτω εντολές:

	(1)	
	(2)	1. Μετακίνηση
	(3)	2. Κλίμακα.
	(4)	3. Περιστροφή.
	(5)	4. Αντικατοπτρισμός.
	(6)	5. Επιπρόσθετες ρυθμίσεις.
		6. Ρυθμίσει υποστηρικτικού υλικού.

- Βήμα 4. Καθορισμός του κύριου υλικού και του υποστηρικτικού (αν υπάρχει)
- Βήμα 5. Καθορισμός ρυθμίσεων εκτύπωσης (custom ή advanced)
- Βήμα 6. Επιλογή Slice για την προσομοίωση και τον αυτόματο υπολογισμό του χρόνου εκτύπωσης και του υλικού που θα χρειαστεί.
- Βήμα 7. Επιλογή Preview.
- Βήμα 8. Προεπισκόπηση της διαδικασίας εκτύπωσης και έλεγχος της κίνησης της κεφαλής σε κάθε στρώση ξεχωριστά.
- Βήμα 9. Επιλογή Save to Disc ή Save to Removable Drive για την αποθήκευση του αρχείου εκτύπωσης σε μορφή κατανοητή από τον εκτυπωτή.
- Βήμα 10. Ονομασία του αρχείου *.ufp και μεταφορά στο USB Stick.

Κεφάλαιο 4: Τρισδιάστατη Εκτύπωση των Δοκιμών

4.1 Τρισδιάστατος εκτυπωτής Ultimaker S5

Ο εκτυπωτής είναι τεχνολογίας FFF και με χώρο εκτύπωσης 330 x 240 x 300 mm και μέγιστη κατανάλωση 500 watt. Γενικά είναι ένας μεγάλος εκτυπωτής βάρους 21 kg και πρέπει να τοποθετείται σε στιβαρό πάγκο. Διαθέτει μια οθόνη αφής 4,7 inch για την εισαγωγή των εντολών, μια θήρα USB για την εισαγωγή του ψηφιακού μοντέλου, καθώς και θήρα ethernet και Wi-Fi στην περίπτωση που ο χρήστης επιθυμεί να λειτουργεί τον εκτυπωτή από απομακρυσμένο και να επιτηρεί τη διαδικασία εκτύπωσης από την εγκατεστημένη κάμερα μέσω του λογισμικού Ultimaker Cura.

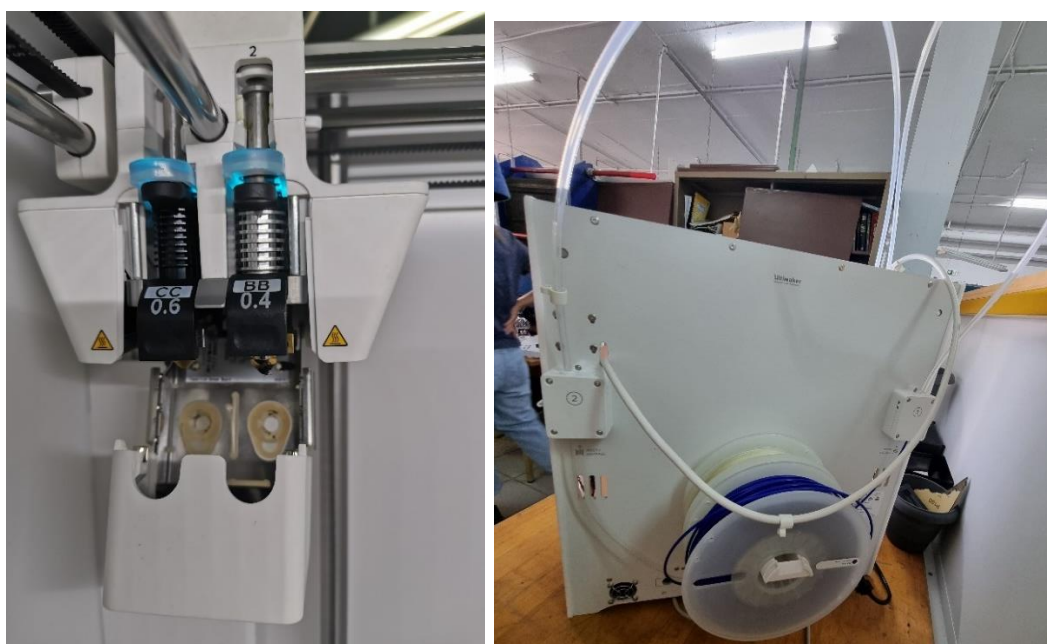
Ο εκτυπωτής διαθέτει υποδοχή δύο κεφαλών για την εναλλαγή της εκτύπωσης του κύριου και ενισχυτικού υλικού. Το γυαλί πυράκτωσης της επιφάνειας εκτύπωσης (build plate) πάνω στο οποίο δημιουργούνται οι διαδοχικές στρώσεις μπορεί να έχει θερμοκρασία 20 - 140°C και πρέπει να δίνεται μεγάλη προσοχή κατά την αφαίρεση του εκτυπωμένου προϊόντος, ώστε να μην ασκείται πίεση ή να γίνεται χρήση αιχμηρών εργαλείων. Ο εκτυπωτής με τη χρήση θερμικών αισθητήρων ειδοποιεί τον χρήστη εάν η επιφάνεια εκτύπωσης είναι έτοιμη ή απαιτείται επιπλέον χρόνος ώστε να φτάσει στην κατάλληλη θερμοκρασία τόσο για την εκκίνηση της εκτύπωσης όσο και για την αφαίρεση του υλικού.

Αξίζει να σημειωθεί πως στη συγκεκριμένη σειρά εκτυπωτών ο χρήστης μπορεί να θέσει σε παύση τη διαδικασία εκτύπωσης μέσω της οθόνης και να τη συνεχίσει από το σημείο που σταμάτησε όταν ξανά δώσει την εντολή. Αυτή η λειτουργία είναι αρκετά χρήσιμη αν επιθυμεί να ελέγξει το αντικείμενο κατά την εκτύπωση.

4.2 Προετοιμασία εκτυπωτή

Πριν την εισαγωγή του ψηφιακού αρχείου στον εκτυπωτή είναι αναγκαία η προετοιμασία του εκτυπωτή. Αρχικά θα πρέπει ο χρήστης να βεβαιωθεί ότι οι τοποθετημένες κεφαλές είναι συμβατές με τα υλικά που θα εκτυπωθούν. Για να το διαπιστώσει αρκεί να κατεβάσει το καπάκι των κεφαλών και να παρατηρήσει τον αναγραφόμενο αριθμό (Εικόνα 16α) ή να το ελέγξει μέσω της οθόνης. Στη συνέχεια θα

πρέπει να τοποθετήσει τα υλικά προς εκτύπωση νήματα - filament στην πίσω μεριά του εκτυπωτή στις δύο υποδοχές. Στην υποδοχή A τοποθετείται το κύριο υλικό και στην B το δευτερεύον υλικό (Εικόνα 16β). Με τη βοήθεια την οθόνης και την εντολή «Load» φορτώνεται το υλικό, αναγνωρίζεται από τον εκτυπωτή, και έλκεται μέχρι την κεφαλή, η οποία στη συνέχεια θερμαίνεται στην κατάλληλη θερμοκρασία και το υλικό εκχύνεται από το ακροφύσιο με τη μορφή μιας λεπτής κλωστής. Σημαντική ενέργεια του χρήστη στη διαδικασία είναι να δώσει μια ελαφριά ώθηση στο νήμα έως τα βοηθητικά γρανάζια ξεκινήσουν την έλξη. Επίσης κατά την πρώτη έκχυση η κλωστή πρέπει να φτάσει περίπου τα 20 cm και μετά να τη σταματήσει, για δύο λόγους: πρώτον για να ελέγξει την ομαλή ροή της έκχυσης και για να αφαιρεθούν πιθανά κομμάτια υλικού που έχουν παραμείνει μέσα στην κεφαλή (σε αυτή την περίπτωση εμφανίζεται συνεχές νήμα ίδιου ή διαφορετικού χρώματος ανάλογα με τι είχε εκτυπωθεί). Σε περίπτωση που ο χρήστης δεν σταματήσει χειροκίνητα την όλη διαδικασία, ο εκτυπωτής είναι ρυθμισμένος να σταματάει αυτόματα μετά από ένα μικρό χρονικό διάστημα.



Εικόνα 16: (α) Κεφαλές CC_0.6 και BB_0.4 (β) τοποθέτηση νημάτων στην πίσω μεριά

Σε αυτό το σημείο είναι σκόπιμο να αναφερθεί και η διαδικασία αφαίρεσης του νήματος μετά την εκτύπωση. Η διαδικασία στον συγκεκριμένο εκτυπωτή είναι πολύ απλή και γίνεται με την εντολή «Unload» η οποία ενεργοποιεί την αυτόματη επιστροφή

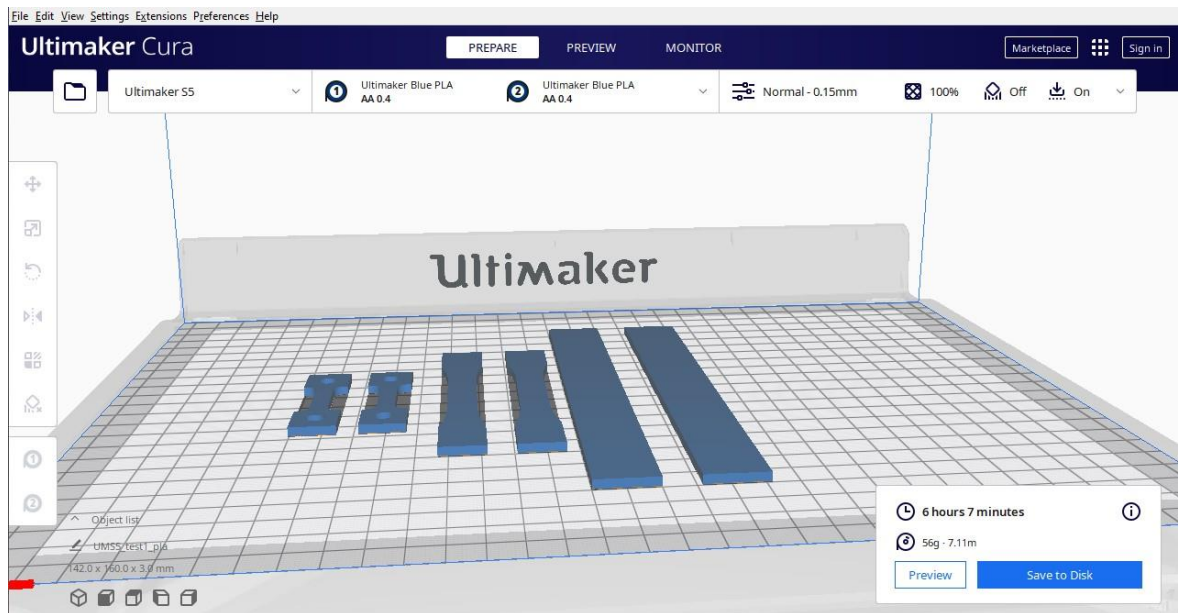
του υλικού από τις κεφαλές στους υποδοχείς A και B. Σε περίπτωση που το υλικό κολλήσει ανασηκώνουμε την πλαϊνή ασφάλεια στα γρανάζια και το αφαιρούμε χειροκίνητα. Τέλος τοποθετούμε το νήμα στη συσκευασία του, ακολουθώντας τις απαραίτητες διαδικασίες αποθήκευσης που ορίζει ο κάθε κατασκευαστής.

Έχοντας προετοιμάσει τον εκτυπωτή, ο χρήστης εισάγει το USB Stick, εντοπίζει το αρχείο εκτύπωσης και επιλέγει την εντολή «Start». Ο εκτυπωτής στην συνέχεια διαβάζει το αρχείο και παρουσιάζεται στην οθόνη πληροφορία σχετική με το χρόνο εκτύπωσης, τα γραμμάρια του υλικού και το ποσοστό ολοκλήρωσης της εκτύπωσης. Ο εκτυπωτής θερμαίνει κατάλληλα το built plate και τις κεφαλές σύμφωνα με τις παραμέτρους εκτύπωσης του αρχείου και εκτελεί τη διαδικασία ελέγχου επιτεδότητας του built plate και την ευθυγράμμιση του με τις δύο κεφαλές.

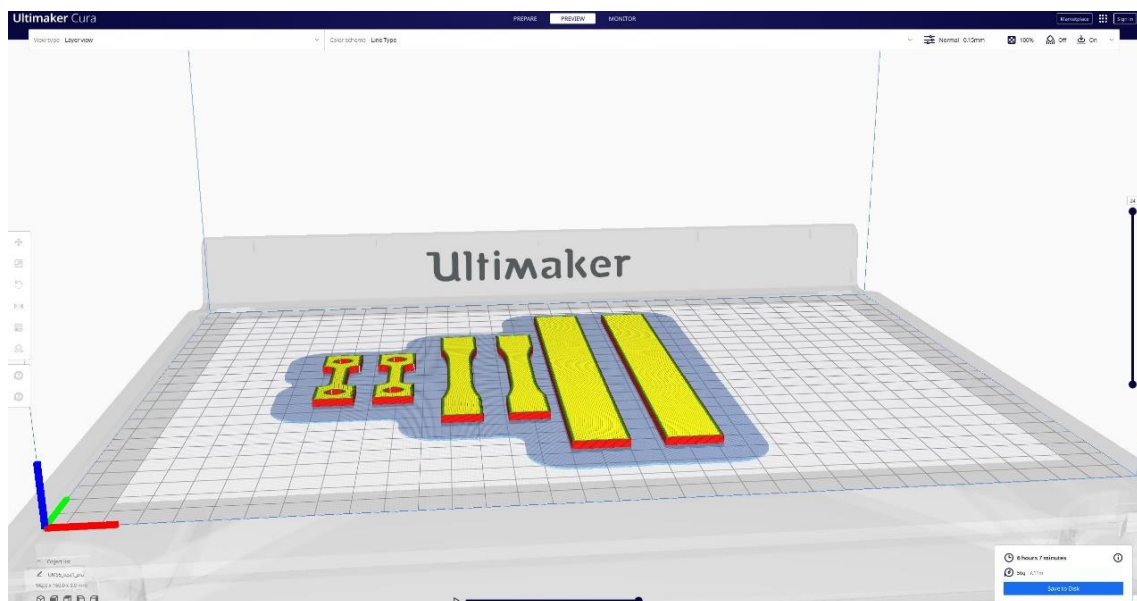
4.3 Εκτύπωση δοκιμών PLA

Μέσω της προσομοίωση στο λογισμικό Cura είχε επιλεγεί ως καταλληλότερος προσανατολισμός των δοκιμών αυτός που παρουσιάζεται στην Εικόνα 17. Ως βέλτιστη τοποθέτηση κρίθηκε αυτή που θα εκτυπώσει σε στρώσεις το πάχος των δοκιμών (3mm). Γενικά ένας από τους κανόνες της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η τοποθέτηση των δοκιμών με τέτοιο τρόπο ώστε η μικρότερη διάσταση να εκτυπωθεί στο ύψος. Στην πρώτη εκτύπωση κρίθηκε σκόπιμο να μην εκτυπωθούν τα δοκίμια κρούσης καθώς διαφέρουν σε ύψος από τα υπόλοιπα με σκοπό την ομαλότερη διαδικασία και την ταυτόχρονη παραλαβή τους.

Επίσης τα δοκίμια τοποθετήθηκαν παράλληλα με αύξουσα σειρά ως προς το μήκος για να μειωθούν οι κινήσεις της κεφαλής του υποστηρικτικού υλικού βάσης (build plate adhesion type - raft) και να μειωθεί ο χρόνος εκτύπωσης (Εικόνα 18). Το υποστηρικτικό βάσης είναι μια συμπαγής στρώση υλικού απαραίτητη για την καλύτερη προσκόλληση αρχικά αλλά και αποκόλληση στο τέλος του αντικειμένου από την επιφάνεια εκτύπωσης. Ως υποστηρικτικό επιλέχθηκε το PLA ώστε να μην υπάρξει εναλλαγή των κεφαλών, και καθώς επιτρέπεται σαν επιλογή από τον κατασκευαστή. Η κεφαλή που χρησιμοποιήθηκε ήταν η AA 0.4.



Εικόνα 17: Τοποθέτηση δοκιμών PLA στο λογισμικό Ultimaker Cura



Εικόνα 18: Προσομοίωση διαδικασίας εκτύπωσης δοκιμών PLA (raft adhesion type και last layer)

Οι παράμετροι εκτύπωσης παρουσιάζονται στην Εικόνα 19. Το ύψος της στρώσης καθορίστηκε σε 0.15mm, η πυκνότητα του εσωτερικού σε 100% με μοτίβο γεμίσματος triangles, και η θερμοκρασία του υλικού σε 200 °C. Η διάρκεια της εκτύπωσης ήταν 6 ώρες και 7 λεπτά, ενώ η ποσότητα του υλικού PLA υπολογίστηκε από το λογισμικό Cura σε 56 g. Αφού ολοκληρώθηκε η εκτύπωση και μειώθηκε η θερμοκρασία του

γυαλιού πυρακτώσεως, έγινε προσεκτική αφαίρεση των δοκιμίων και του υποστηρικτικού raft.

Κατά την πρώτη εκτύπωση παρατηρήθηκε ότι η παράμετρος του υποστηρικτικού βάσης (Build plate adhesion) με επιλογή Raft είχε προεπιλεγμένο μεγάλο αριθμό στρώσεων χωρίς να είναι αναγκαίο για τη συγκεκριμένη εκτύπωση και θα έπρεπε να μειωθεί για εξοικονόμηση χρόνου. Μεγάλος αριθμός στρώσεων raft χρησιμοποιείται συνήθως για αντικείμενα μεγαλύτερου ύψους, άνω των 15mm. Επίσης υπήρξε μια δυσκολία στην αφαίρεση του υποστηρικτικού raft από τα δοκίμια εξ αιτίας της κοντινής τοποθέτησης των δοκιμίων μεταξύ τους που είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ενιαίου raft.

Στην συνέχεια εκτυπώθηκαν τα δοκίμια κρούσης κάνοντας τις απαραίτητες αλλαγές στις παραμέτρους στο λογισμικό Cura (Εικόνα 20). Η τοποθέτηση των δοκιμίων κρούσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 21, με συνολικό χρόνο εκτύπωσης 1 ώρα και 29 λεπτά.

Normal - 0.15mm 100% Off On

Print settings

Profile Normal - 0.15mm

1 2

Search settings

Quality

Layer Height 0.15 mm

Walls

Wall Thickness 1.0 mm

Wall Line Count 3

Horizontal Expansion 0.0 mm

Top/Bottom

Top/Bottom Thickness 1.0 mm

Top Thickness 1.0 mm

Top Layers 3

Bottom Thickness 1.0 mm

Bottom Layers 3

Infill

Infill Density 100.0 %

Infill Pattern Triangles

Material

Printing Temperature 200.0 °C

Build Plate Temperature 60 °C

Speed

Print Speed 70.0 mm/s

Travel

Enable Retraction

Z Hop When Retracted

Cooling

Enable Print Cooling

Fan Speed 100.0 %

Support

Generate Support

Build Plate Adhesion

Enable Prime Blob

Build Plate Adhesion Type Raft

Build Plate Adhesion Extruder Extruder 1

Dual Extrusion

Enable Prime Tower

< Recommended

Print settings

Profile Normal - 0.15mm

1 2

Search settings

Quality

Layer Height 0.15 mm

Walls

Wall Thickness 1.0 mm

Wall Line Count 3

Horizontal Expansion 0.0 mm

Top/Bottom

Top/Bottom Thickness 1.0 mm

Top Thickness 1.0 mm

Top Layers 7

Bottom Thickness 1.0 mm

Bottom Layers 7

Infill

Infill Density 20.0 %

Infill Pattern Triangles

Material

Printing Temperature 200.0 °C

Build Plate Temperature 60 °C

Speed

Print Speed

Travel

Enable Retraction

Z Hop When Retracted

Cooling

Enable Print Cooling

Fan Speed 100.0 %

Support

Generate Support

Build Plate Adhesion

Enable Prime Blob

Build Plate Adhesion Type Raft

Build Plate Adhesion Extruder Extruder 1

Dual Extrusion

Enable Prime Tower

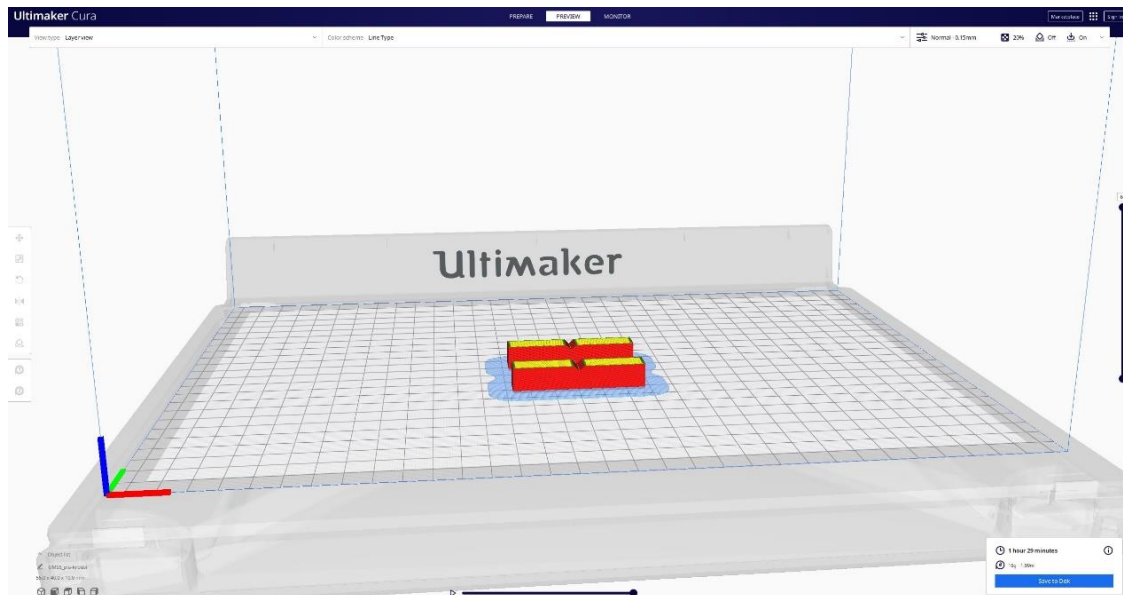
< Recommended

Το support είναι από το ίδιο υλικό αλλά απαιτούνται διαφορετικές παράμετροι εκτύπωσης

Εικόνα 19: Παράμετροι εκτύπωσης κύριου υλικού PLA (1) και υποστηρικτικού υλικού PLA (2)

Build Plate Adhesion			
Enable Prime Blob			<input type="checkbox"/>
Build Plate Adhesion Type	↻	↻	Raft
Build Plate Adhesion Extruder	↻		Extruder 1
Raft Extra Margin	↻	↻	10.0 mm
Raft Smoothing	↻		5.0 mm
Raft Air Gap	↻		0.25 mm
Raft Top Layers	↻	↻	1
Raft Top Layer Thickness	↻		0.15 mm
Raft Top Line Width	↻		0.35 mm
Raft Top Spacing	↻		0.35 mm
Raft Middle Thickness	↻	↻	0.2 mm
Raft Middle Line Width	↻	↻	0.5 mm
Raft Middle Spacing	↻		0.7 mm
Raft Base Thickness	↻		0.24 mm
Raft Base Line Width	↻		0.8 mm
Raft Base Line Spacing	↻		1.6 mm
Raft Print Speed	↻		25.0 mm/s

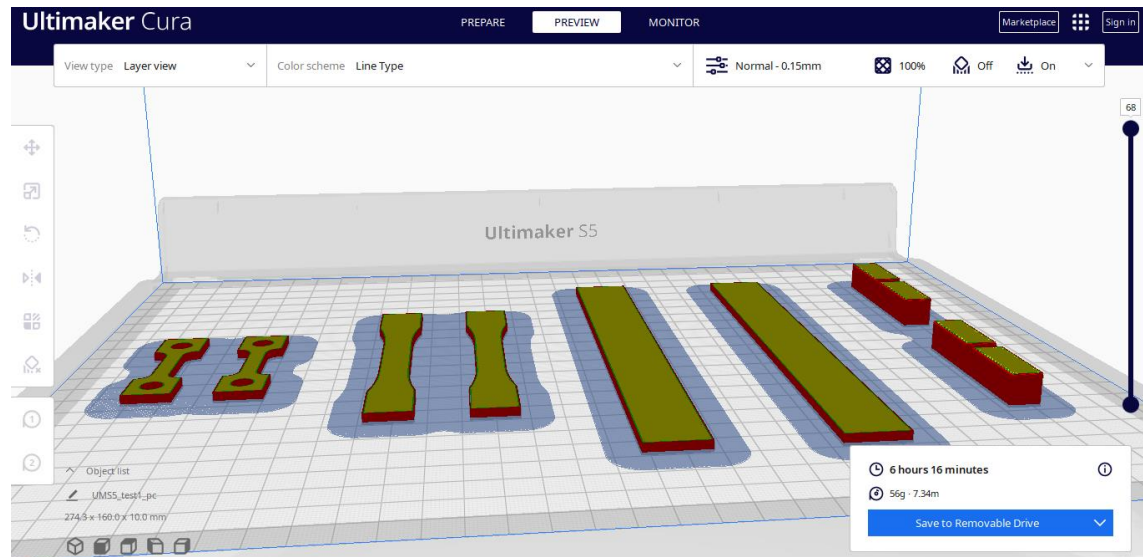
Εικόνα 20: Μείωση αριθμού στρώσεων στην παράμετρο build plate adhesion



Εικόνα 21: Προσομοίωση διαδικασίας εκτύπωσης δοκιμίων PLA (raft adhesion type και last layer)

4.4 Εκτύπωση δοκιμών PC

Στην εκτύπωση των δοκιμών PC τοποθετήθηκαν όλα τα δοκίμια (και τα δοκίμια κρούσης) στο χώρο εκτύπωσης και σε μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ τους με σκοπό την ευκολότερη αποκόλληση του raft (Εικόνα 22).



Εικόνα 22: Προσομοίωση διαδικασίας εκτύπωσης δοκιμών PC (raft adhesion type και last layer)

Η κεφαλή για το υλικό PC παραμένει η ίδια με το PLA, δηλαδή η AA 0.4. Ως παράμετροι για το υλικό PC επιλέγονται σχεδόν οι ίδιες, αλλάζοντας τη θερμοκρασία του υλικού σε 280 °C, μειώνοντας τον αριθμό στρώσεων στο built pate adhesion raft και αυξάνοντας το infill του raft (100% από 20%) για μεγαλύτερη στιβαρότητα (Εικόνα 23).

Normal - 0.15mm 100% Off On

Print settings

Profile Normal - 0.15mm

Search settings

Quality

Layer Height	0.15	mm
Initial Layer Height	0.27	mm
Line Width	0.35	mm
Wall Line Width	0.35	mm
Outer Wall Line Width	0.35	mm
Inner Wall(s) Line Width	0.4	mm
Top/Bottom Line Width	0.35	mm
Infill Line Width	0.4	mm
Initial Layer Line Width	120.0	%

Walls

Wall Extruder	Not overridden	
Outer Wall Extruder	Not overridden	
Inner Wall Extruder	Not overridden	
Wall Thickness	1.2	mm
Wall Line Count	3	
Optimize Wall Printing Order	<input checked="" type="checkbox"/>	
Horizontal Expansion	0.0	mm

Top/Bottom

Top/Bottom Extruder	Not overridden	
Top/Bottom Thickness	1.2	mm
Top Thickness	1.2	mm
Top Layers	3	
Bottom Thickness	1.2	mm
Bottom Layers	3	
Monotonic Top/Bottom Order	<input checked="" type="checkbox"/>	
Enable Ironing	<input type="checkbox"/>	

Infill

Infill Extruder	Not overridden	
Infill Density	100.0	%
Infill Line Distance	1.2	mm
Infill Pattern	Triangles	
Infill Line Multiplier	1	
Infill Overlap Percentage	0.0	%
Infill Layer Thickness	0.15	mm
Gradual Infill Steps	0	

Material

Printing Temperature	280.0	°C
Printing Temperature Initial Layer	280.0	°C
Initial Printing Temperature	275.0	°C
Final Printing Temperature	270.0	°C
Build Plate Temperature	110	°C
Build Plate Temperature Initial Layer	110	°C
Standby Temperature	100.0	°C

Speed

Travel

Cooling

Support

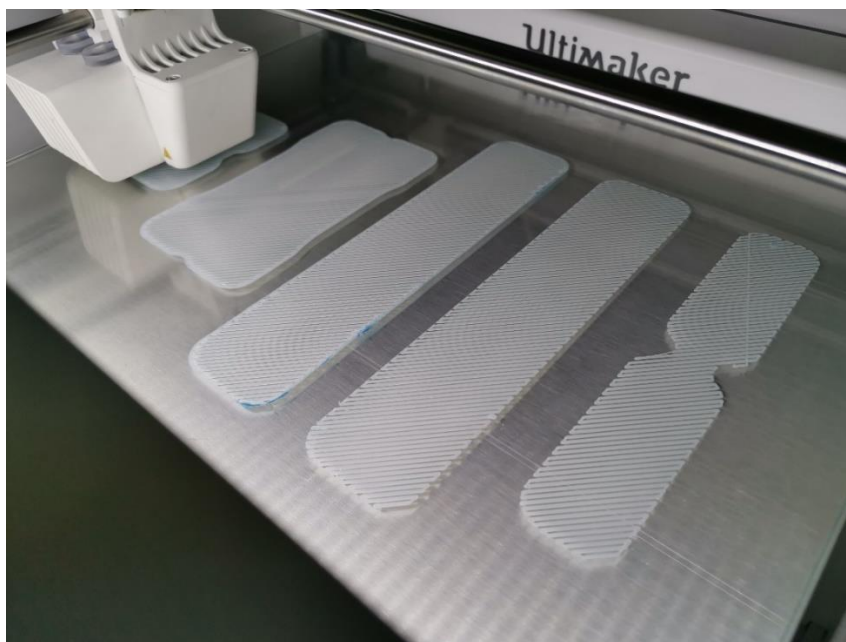
Build Plate Adhesion

Enable Prime Blob	<input type="checkbox"/>	
Build Plate Adhesion Type	Raft	
Build Plate Adhesion Extruder	Extruder 1	
Raft Extra Margin	10.0	mm
Raft Top Layers	1	
Raft Top Layer Thickness	0.15	mm
Raft Top Line Width	0.35	mm
Raft Top Spacing	0.35	mm
Raft Middle Thickness	0.225	mm
Raft Middle Line Width	0.7	mm
Raft Middle Spacing	0.9	mm
Raft Base Thickness	0.2	mm
Raft Base Line Width	0.8	mm
Raft Base Line Spacing	1.6	mm

Εικόνα 23: Παράμετροι εκτύπωσης υλικού PC

Παρατηρήσεις και δεύτερη εκτύπωση

Κατά την εκτύπωση του υποστηρικτικού βάσης raft παρατηρήθηκε πως το υλικό δεν είχε ροή για μερικά δευτερόλεπτα όπως φαίνεται στην Εικόνα 24. Το γεγονός αυτό μπορεί να παρατηρηθεί γενικά στους 3D Printers και οφείλεται στο φαινόμενο πήξης του υλικού στο εσωτερικό της κεφαλής κυρίως εάν απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες. Ο εκτυπωτής αναπτύσσει την καθορισμένη από τον χρήστη θερμοκρασία τόσο στην επιφάνεια εκτύπωσης όσο και στις κεφαλές πριν ξεκινήσει η όλη διαδικασία, η οποία πρέπει να παραμένει σταθερή. Σε περίπτωση που παρατηρηθεί μη ομαλή ροή ή διακοπή της ροής συνιστάται η αύξηση της θερμοκρασίας κεφαλής μιας και υπάρχουν απώλειες λόγω θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Ωστόσο το συγκεκριμένο γεγονός δεν επηρέασε την εκτύπωση των δοκιμίων, καθώς συνέβη στην εκτύπωση του raft και αποτελεί επίσης μια επιβεβαίωση για της αναγκαιότητας του raft στις εκτυπώσεις.

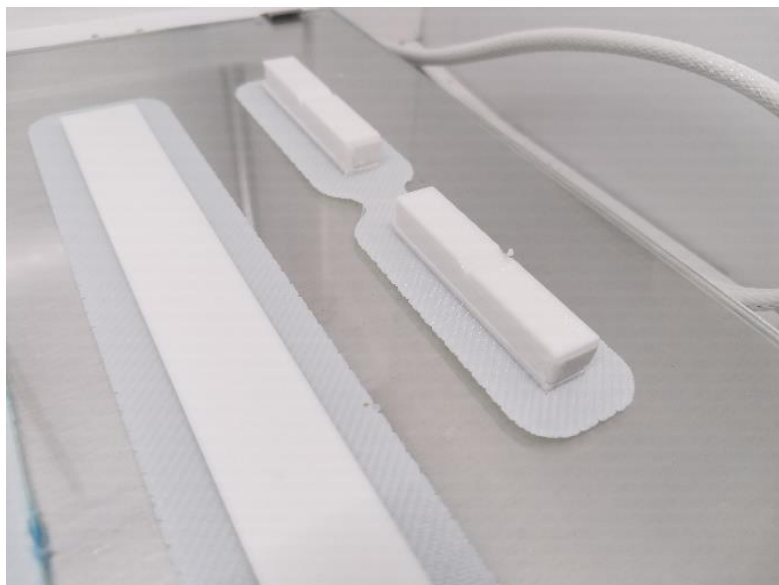


Εικόνα 24: Διακοπή της ροής του υλικού PC για μερικά δευτερόλεπτα κατά την εκτύπωση του raft

Επίσης η εκτύπωση δεν ήταν επιτυχημένη καθώς έγινε μετακίνηση των στρώσεων σε όλα τα δοκίμια (Εικόνα 25). Ένας πιθανός λόγος για τη μετακίνηση εκτιμήθηκε ότι μπορεί να είναι η μετακίνηση του τραπέζιού εκτύπωσης ή η εκτύπωση δοκιμίων με διαφορετικό ύψος.

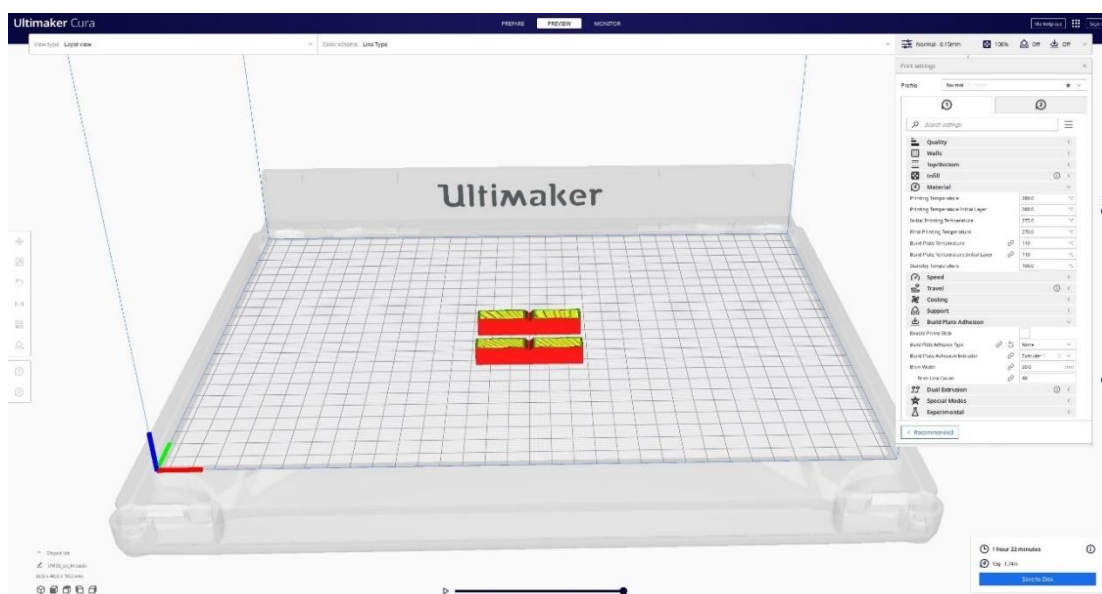
Τέλος η αφαίρεση του υποστηρικτικού raft ήταν ακατόρθωτη, καθώς το υποστηρικτικό PC προσκολλήθηκε με το υλικό PC για τα δοκίμια, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι

πρέπει να χρησιμοποιηθεί άλλο υλικό για υποστηρικτικό raft ή να μην χρησιμοποιηθεί καθόλου raft.



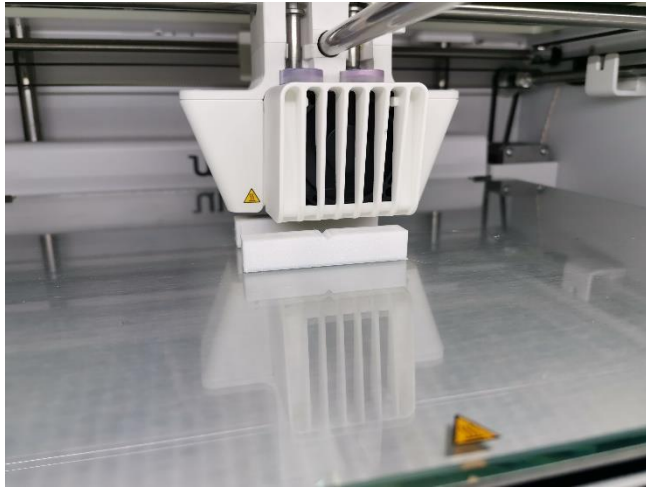
Εικόνα 25: Μετακίνηση στρώσεων κατά την εκτύπωση των δοκιμών PC

Έχοντας γνώση των παραπάνω σφαλμάτων και δυσκολιών εκτύπωσης έγινε μια δεύτερη εκτύπωση μόνο για τα δοκίμια της κρούσης χωρίς το υποστηρικτικό raft (Εικόνα 26). Η διάρκεια εκτύπωσης καθορίστηκε σε 1 ώρα και 22 λεπτά.



Εικόνα 26: Προσομοίωση εκτύπωσης δοκιμών κρούσης PC χωρίς raft

Η εκτύπωση ήταν επιτυχής και η αποκόλληση από το build pate των δοκιμών κρούσης πραγματοποιήθηκε χωρίς δυσκολία (Εικόνα 27). Οι ίδιες παράμετροι εφαρμόστηκαν και για την εκτύπωση των υπολοίπων δοκιμών (Εικόνα 28).



Εικόνα 27: Ολοκλήρωση εκτύπωσης δοκιμίων κρούση PC χωρίς raft

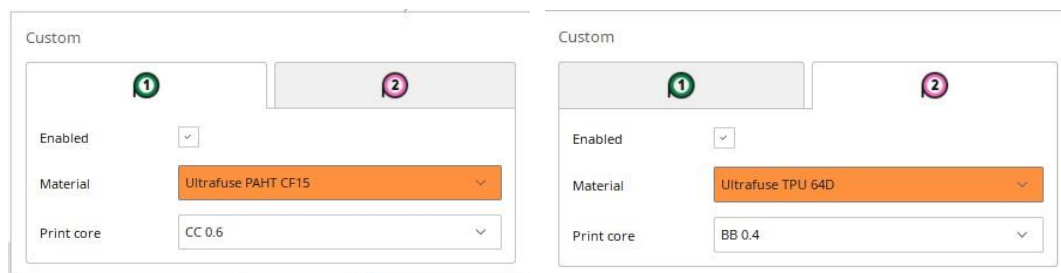


Εικόνα 28: Ολοκλήρωση εκτύπωσης δοκιμίων PC χωρίς raft

4.5 Εκτύπωση δοκιμίων PAHT CF15

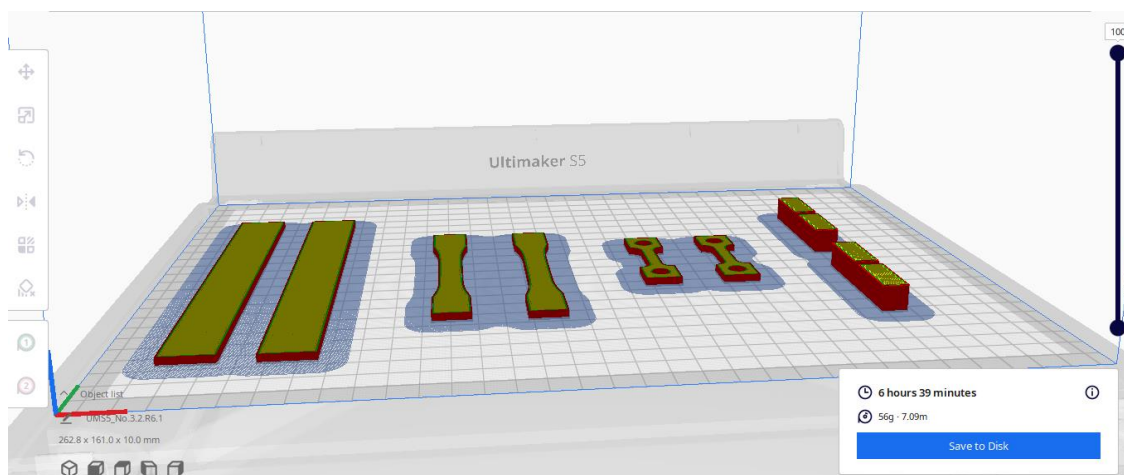
Για την εκτύπωση των δοκιμίων από PAHT CF15 έγινε αρχικά αλλαγή της κεφαλής του κυρίως υλικού από AA 0.4 σε CC 0.6. Η κεφαλή CC 0.6 χρησιμοποιείται για πιο τραχειά υλικά όπως το συγκεκριμένο. Η αλλαγή της κεφαλής έγινε σύμφωνα με τις οδηγίες μέσω της οθόνης αφής που διαθέτει ο εκτυπωτής. Ως υποστηρικτικό υλικό

χρησιμοποιήθηκε το υλικό BVOH και η κεφαλή BB 0.4 για υδατοδιαλυτά νήματα (Εικόνα 39).



Εικόνα 29: Επιλογή των υλικών PAHT CF15 και BVOH και των κατάλληλων κεφαλών

Η τοποθέτηση των δοκιμίων απεικονίζεται στην Εικόνα 30. Η θερμοκρασία για το υλικό PAHT CF15, το υλικό BVOH και το built plate καθορίστηκε στους 260 °C, 200 °C και 100 °C αντίστοιχα. Οι παράμετροι εκτύπωσης που αφορούν το υλικό BVOH τω παρουσιάζονται στην Εικόνα 31.



Εικόνα 30: Προσομοίωση εκτύπωσης δοκιμίων PAHT CF15 με υποστηρικτικό βάσης BVOH

Not supported #...ported - 0.15mm ... Off On

Print settings

Profile: Not supported #2

Search settings

Quality

Layer Height	0.15	mm
Initial Layer Height	0.27	mm
Line Width	0.58	mm
Wall Line Width	0.58	mm
Outer Wall Line Width	0.58	mm
Inner Wall(s) Line Width	0.58	mm
Top/Bottom Line Width	0.58	mm
Infill Line Width	0.58	mm
Initial Layer Line Width	130.0	%

Walls

Wall Extruder	Not overridden	
Outer Wall Extruder	Not overridden	
Inner Wall Extruder	Not overridden	
Wall Thickness	1.74	mm
Wall Line Count	3	
Optimize Wall Printing Order	<input checked="" type="checkbox"/>	
Horizontal Expansion	0.0	mm

Top/Bottom

Top/Bottom Extruder	Not overridden	
Top/Bottom Thickness	0.9	mm
Top Thickness	0.9	mm
Top Layers	3	
Bottom Thickness	0.9	mm
Bottom Layers	3	
Monotonic Top/Bottom Order	<input checked="" type="checkbox"/>	
Enable Ironing	<input type="checkbox"/>	

Infill

Infill Extruder	Not overridden	
Infill Density	100.0	%
Infill Line Distance	1.74	mm
Infill Pattern	Triangles	
Infill Line Multiplier	1	
Infill Overlap Percentage	0.0	%
Infill Layer Thickness	0.15	mm
Gradual Infill Steps	0	

Material

Printing Temperature	200.0	°C
Printing Temperature Initial Layer	210.0	°C
Initial Printing Temperature	200.0	°C
Final Printing Temperature	200.0	°C
Build Plate Temperature	100	°C
Build Plate Temperature Initial Layer	105	°C
Standby Temperature	175.0	°C

Speed

Travel

Cooling

Support

Generate Support

Build Plate Adhesion

Enable Prime Blob

Build Plate Adhesion Type: Raft

Build Plate Adhesion Extruder: Extruder 2

Raft Extra Margin	10.0	mm
Raft Top Layers	1	
Raft Top Layer Thickness	0.15	mm
Raft Top Line Width	0.38	mm
Raft Top Spacing	0.38	mm
Raft Middle Thickness	0.2	mm
Raft Middle Line Width	0.5	mm
Raft Middle Spacing	0.5	mm
Raft Base Thickness	0.3	mm
Raft Base Line Width	0.8	mm
Raft Base Line Spacing	1.6	mm

Dual Extrusion

Special Modes

Experimental

Εικόνα 31: Παράμετροι εκτύπωσης για το υποστηρικτικό υλικό BVOH

Όταν ολοκληρώθηκε η εκτύπωση παρατηρήθηκε πως στις επιφάνειες όλων των δοκιμίων υπήρχε περίσσια υλικού (Εικόνα 32), το οποίο ωστόσο μπορούσε να αφαιρεθεί με ένα κοπίδι και ένα γυαλόχαρτο. Επίσης στα δοκίμια της κρούσης και σε ύψος άνω των 3mm υπήρξε μετακίνηση των στρώσεων και καλή ποιότητα εκτύπωσης (Εικόνες 33,34).



Εικόνα 32: Αποτέλεσμα εκτύπωσης δοκιμίων PAHT CF15



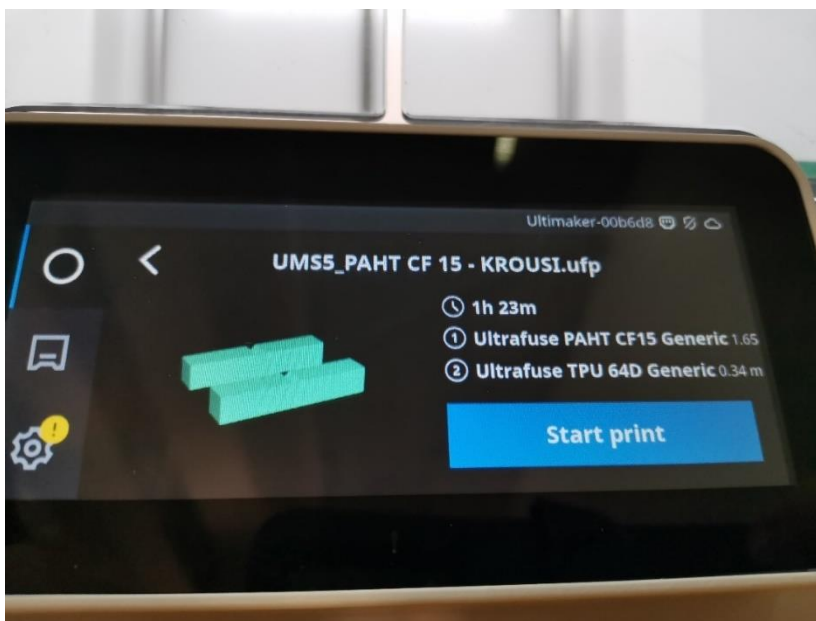
Εικόνα 33: Μετακίνηση στρώσεων κατά την εκτύπωση των δοκιμίων κρούσης PAHT CF15



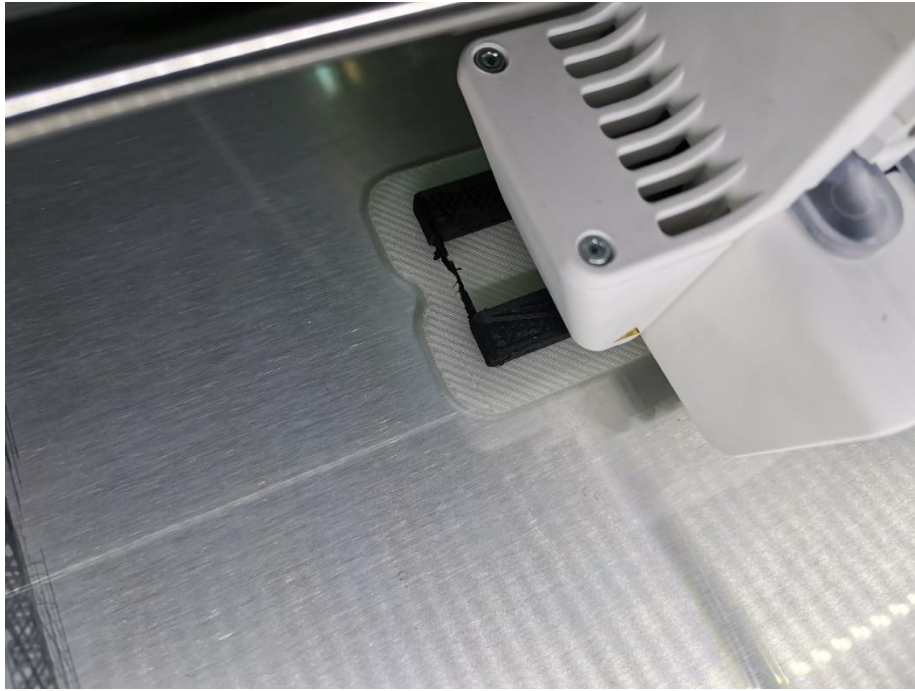
Εικόνα 34: Μετακίνηση στρώσεων κατά την εκτύπωση των δοκιμών κρούσης PAHT CF15

Στη συνέχεια έγινε μια ακόμα εκτύπωση για τα δύο δοκίμια κρούσης PAHT CF15, η οποία ήταν επιτυχημένη χωρίς κάποια αστοχία (Εικόνες 35, 36, 37).

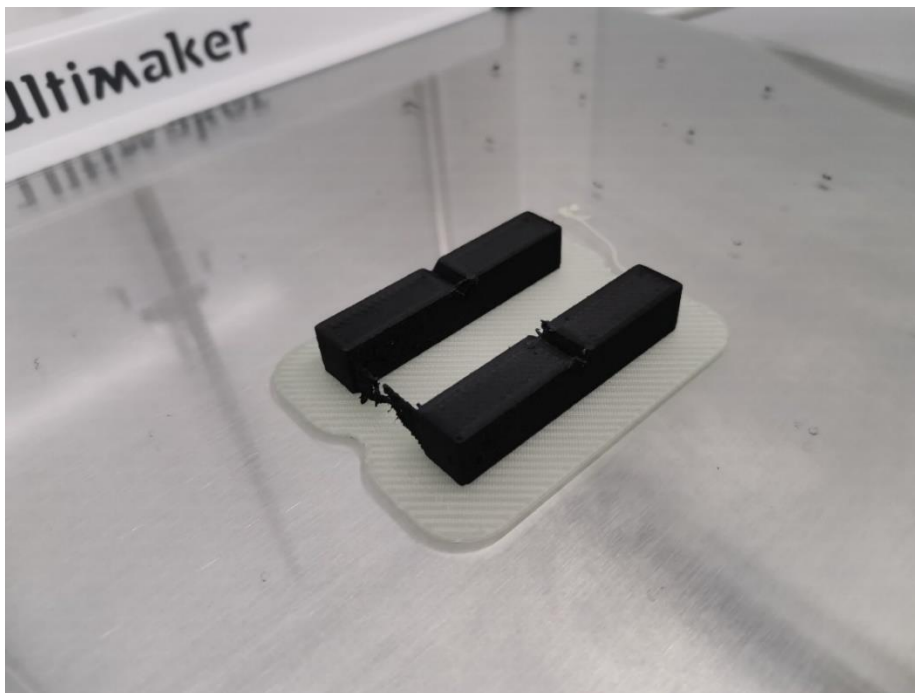
Σε όλες τις εκτυπώσεις των δοκιμών του υλικού PAHT CF15 παρατηρήθηκε «υπερχείλιση» υλικού στις επιφάνειες των δοκιμών. Εκτιμήθηκε ότι αυτό μπορεί να συνέβη είτε λόγω της γρήγορης μετακίνησης της κεφαλής μεταξύ των δοκιμών, είτε εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας υλικού στην κεφαλή, είτε λόγω της μη ενεργοποίησης της παραμέτρου retrack ή οποία τραβάει το υλικό πίσω στην κεφαλή μετά από κάθε στρώση.



Εικόνα 35: Οθόνη αφής εκτυπωτή για τα δοκίμια κρούσης PAHT CF15



Εικόνα 36: Εκτύπωση αρχικών στρώσεων δοκιμών κρούσης PAHT CF15



Εικόνα 37: Αποτέλεσμα εκτύπωσης δοκιμών PAHT CF15

Επίσης, η διαδικασία αποκόλλησης του υποστηρικτικού υλικού βάσης από το built plate ήταν πολύ δύσκολη. Για το λόγο αυτό αφαιρέθηκε το built plate και τοποθετήθηκε ολόκληρο σε νερό (Εικόνα 38,39). Η διάλυση του BVOH διήρκεσε μία ημέρα και τα εκτυπωμένα δοκίμια επεξεργάστηκαν με κοπίδι και γυαλόχαρτο για τη βελτίωση των επιφανειών.



Εικόνα 38: Τοποθέτηση built plate και δοκιμίων σε νερό για τη διάλυση του BVOH



Εικόνα 39: Διαδικασία διάλυσης του BVOH μετά από μισή ώρα

4.6 Διαστασιολογική σταθερότητα εκτυπωμένων δοκιμίων

Η διαστασιολογική σταθερότητα αναφέρεται στην ικανότητα των υλικών εκτύπωσης να διατηρούν το μέγεθός τους ακόμη και κάτω από ποικίλες περιβαλλοντικές συνθήκες. Ένα διαστασιολογικά σταθερό υλικό θα εκτυπωθεί στις διαστάσεις που έχουν καθοριστεί στο ψηφιακό αρχείο stl και είναι αυτές που διαβάζει ο εκτυπωτής και εκτυπώνονται με την ακριβή κίνηση της κεφαλής. Τόσο το γεωμετρικό σχήμα όσο και οι μετρούμενες διαστάσεις των εκτυπωμένων δοκιμίων θα πρέπει συμβαδίζουν με το 3D σχέδιο ώστε να έχουμε μια αποτελεσματική εκτύπωση με διαστασιολογική σταθερότητα [35].

Ωστόσο η διαστασιολογική σταθερότητα στα πολυμερή υλικά δεν είναι συνήθως εφικτή εξ αιτίας της απορρόφησης υγρασίας αλλά και της θερμικής διαστολής. Ο βαθμός απορρόφησης της υγρασίας εξαρτάται από τον τύπο του πλαστικού, τις συνθήκες περιβάλλοντος όπως θερμοκρασία και υγρασία, καθώς και το χρόνο παραμονής σε αυτές. Ο συντελεστής γραμμικής θερμικής διαστολής καθορίζει τη μεταβολή του μήκους ενός υλικού λόγω της αύξησης ή της μείωσης της θερμοκρασίας. Λόγω της χημικής τους δομής, τα πλαστικά γενικά παρουσιάζουν σημαντικά υψηλότερο συντελεστή γραμμικής θερμικής διαστολής από τα μέταλλα. Γι' αυτό το λόγο η ενίσχυση των πλαστικών με ίνες μετάλλων μειώνει το συντελεστή γραμμικής θερμικής διαστολής [36].

Στους Πίνακες 1-4 καταγράφονται οι μετρούμενες τιμές των διαστάσεων των εκτυπωμένων δοκιμίων εφελκυσμού, κάμψης, ερπυσμού και κρούσης. Σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρείται αύξηση του μεγέθους των εκτυπωμένων δοκιμίων και στις τρεις διαστάσεις (μήκος, πλάτος, πάχος). Αναφορικά με το μήκος και το πλάτος (εκτύπωση κατά XY), το PLA φαίνεται να είναι το πιο σταθερό, ενώ τα PC και PAHT CF15 κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα. Αναφορικά με το πάχος (εκτύπωση στρώσεων κατά Z) το PC χαρακτηρίζεται από καλύτερη διαστασιολογική σταθερότητα.

Πίνακας 1: Διαστάσεις εκτυπωμένων δοκιμίων εφελκυσμού (σε mm).

	Μήκος	Πλάτος	Πλάτος στο κέντρο	Πάχος
Σχεδιαστικές Τιμές	100,00	15,00	10,00	3,00
PLA (Δοκίμιο 1)	100,50	15,17	10,20	3,30
PLA (Δοκίμιο 2)	100,50	15,17	10,20	3,30
PC (Δοκίμιο 1)	100,90	16,00	11,24	3,04
PC (Δοκίμιο 2)	100,70	15,50	10,54	3,04
PAHT_CF15 (Δοκίμιο 1)	100,90	15,70	10,70	3,24
PAHT_CF15 (Δοκίμιο 2)	100,86	15,65	10,60	3,24

Πίνακας 2: Διαστάσεις εκτυπωμένων δοκιμίων κάμψης (σε mm).

	Μήκος	Πλάτος	Πάχος
Σχεδιαστικές Τιμές	160,00	20,00	3,00
PLA (Δοκίμιο 1)	160,30	20,20	3,30
PLA (Δοκίμιο 2)	160,30	20,10	3,30
PC (Δοκίμιο 1)	160,50	20,70	3,00
PC (Δοκίμιο 2)	160,50	21,00	3,00
PAHT_CF15 (Δοκίμιο 1)	160,70	20,60	3,24
PAHT_CF15 (Δοκίμιο 2)	160,70	20,60	3,24

Πίνακας 3: Διαστάσεις εκτυπωμένων δοκιμίων ερπυσμού (σε mm).

	Μήκος	Πλάτος	Πλάτος στο κέντρο	Διατομή 1 ^{ης} οπής	Διατομή 2 ^{ης} οπής	Πάχος
Σχεδιαστικές Τιμές	55,00	15,00	6,00	6,00	6,00	3,00
PLA (Δοκίμιο 1)	55,32	15,22	6,24	5,58	5,38	3,40
PLA (Δοκίμιο 2)	55,40	15,30	6,30	5,40	5,60	3,40
PC (Δοκίμιο 1)	55,70	15,85	7,00	4,30	5,02	3,20
PC (Δοκίμιο 2)	55,40	16,03	7,80	4,56	5,10	3,21
PAHT_CF15 (Δοκίμιο 1)	55,88	15,85	6,68	5,18	5,28	3,34
PAHT_CF15 (Δοκίμιο 2)	55,78	15,75	6,70	5,30	5,10	3,34

Πίνακας 4: Διαστάσεις εκτυπωμένων δοκιμίων κρούσης (σε mm).

	Ύψος (α)	Πλάτος (β)	Μήκος (γ)	Εμβαδόν (mm ²) (α) x (β)	Ύψος διατομής κρούσης (δ) = (β) – 2	Εμβαδόν διατομής κρούσης (mm ²) (β) x (δ)
Σχεδιαστικές Τιμές	10,00	10,00	55,00	100,00	8,00	80,00
PLA (Δοκίμιο 1)	10,30	10,30	55,30	106,09	8,30	85,49
PLA (Δοκίμιο 2)	10,30	10,30	55,30	106,09	8,30	85,49
PC (Δοκίμιο 1)	10,20	10,40	55,20	106,08	8,20	85,28
PC (Δοκίμιο 2)	10,20	10,40	55,20	106,08	8,20	85,28
ΡΑΗΤ_Cf15 (Δοκίμιο 1)	10,20	10,80	55,90	110,16	8,20	88,56
ΡΑΗΤ_Cf15 (Δοκίμιο 2)	10,20	10,80	55,90	110,16	8,20	88,56

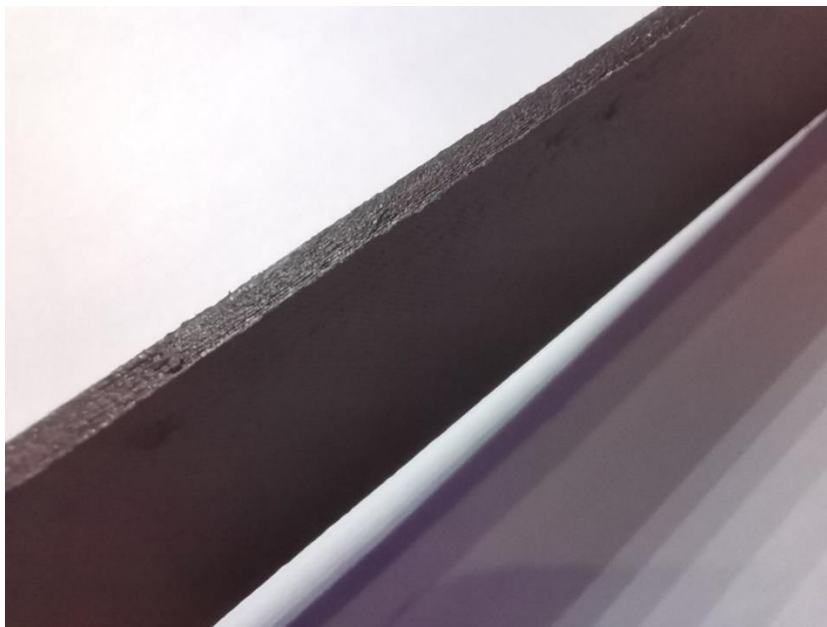
4.7 Γενικά συμπεράσματα σχετικά με την εκτύπωση των δοκιμίων

Λαμβάνοντας υπόψιν τη διαδικασία της εκτύπωσης για τα τρία υλικά καθώς τα προβλήματα και τα σφάλματα που εμφανίστηκαν, προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

1. Καθώς ο συγκεκριμένος εκτυπωτής Ultimaker S5 είναι ανοικτός στο πάνω μέρος και ο χώρος εκτύπωσης δεν είναι αεροστεγής, οι θερμοκρασίες των κεφαλών θα πρέπει να ορίζονται λίγο μεγαλύτερες από τις προτεινόμενες του κατασκευαστή υλικών, ώστε να μην μειώνεται η θερμοκρασία στο ακροφύσιο έκχυσης του υλικού το οποίο έρχεται σε επαφή με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (22 °C).
2. Ο χρήστης θα πρέπει να επιβλέπει τη διαδικασία εκτύπωσης για τις πρώτες στρώσεις του υλικού για να βεβαιωθεί ότι το υλικό ρέει ομαλά. Επίσης πρέπει να επιβλέπει όλη τη διαδικασία εκτύπωσης από κοντά είτε μέσω της κάμερας που διαθέτει ο εκτυπωτής, ώστε να διακόπτει έγκαιρα την εκτύπωση εάν προκύψουν σημαντικά σφάλματα.
3. Το υλικό Polycarbonate (PC) προσκολλάται πολύ εύκολα λόγω της υψηλής θερμοκρασίας τήξης και για αυτό το λόγο δεν πρέπει να χρησιμοποιείται ως

υποστηρικτικό βάσης raft ή υποστηρικτικό γενικά, όταν το κύριο αντικείμενο εκτυπώνεται από υλικό PC. Το υδατοδιαλυτό PVA μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτικό.

4. Καθώς παρατηρήθηκε μετακίνηση των στρώσεων κατά την ταυτόχρονη εκτύπωση πολλών δοκιμών από τα οποία κάποια έχουν μεγαλύτερο ύψος από τα υπόλοιπα, προτείνεται να εκτυπώνονται δοκίμια ίδιου ύψους και αριθμού στρώσεων (για το συγκεκριμένο 3D printer του εργαστηρίου).
5. Η επεξεργασία των εκτυπωμένων δοκιμών είναι απαραίτητη για τη βελτίωση της ποιότητας επιφάνειας καθώς δεν αποκλείεται το ενδεχόμενο η εκτύπωση να έχει ορισμένες ατέλειες (Εικόνα 40).
6. Η διαστασιολογική σταθερότητα του κάθε υλικού εξαρτάται από την απορρόφηση υγρασίας και τη θερμική διαστολή. Για να επιτευχθούν οι ακριβείς διαστάσεις του σχεδιασμού θα πρέπει ο χρήστης να κάνει διάφορες δοκιμαστικές εκτυπώσεις στις συγκεκριμένες συνθήκες περιβάλλοντος, να καταγράψει τις διαφορές στις διαστάσεις των εκτυπωμένων δοκιμών, και στη συνέχεια να καθορίσει τις σωστές διαστάσεις στο ψηφιακό μοντέλο ώστε να εκτυπώσει τα αντικείμενα με όσο το δυνατόν καλύτερη ακρίβεια.



Εικόνα 40: Εμφάνιση ατελειών στην επιφάνεια του δοκιμίου εξ αιτίας της μη ομαλής ροής έκχυσης υλικού

Κεφάλαιο 5: Μηχανικές Δοκιμές

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι να μελετηθούν οι ιδιότητες των υλικών που κατασκευάστηκαν με τρισδιάστατη εκτύπωση και να γίνει η σύγκριση των αποτελεσμάτων σχετικά με τη συμπεριφορά τους σε διάφορες καταστάσεις. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι πειραματικές δοκιμές (δοκιμασίες), τα πρότυπα στα οποία βασίστηκαν, και τα αποτελέσματα των δοκιμών. Οι πειραματικές τιμές για κάθε δοκιμασία συγκρίνονται με τις τιμές που αναγράφονται στις προδιαγραφές των υλικών από τον κατασκευαστή.

Οι πειραματικές δοκιμασίες που πραγματοποιήθηκαν είναι οι εξής:

1. Δοκιμασία εφελκυσμού
2. Δοκιμασία κάμψης
3. Δοκιμασία ερπυσμού
4. Δοκιμασία κρούσης
5. Μέτρηση σκληρότητας
6. Προσδιορισμός πυκνότητας
7. Μικροσκοπική εξέταση

5.1 Δοκιμασία εφελκυσμού

Για τη δοκιμασία εφελκυσμού (tensile test) σε πλαστικά υλικά ακολουθείται το πρότυπο ASTM D638 με τίτλο ‘Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics’.

Τα εκτυπωμένα δοκίμια έχουν μορφή, μέγεθος και διαστάσεις όπως ορίζει το πρότυπο. Για τη δοκιμασία εφελκυσμού χρησιμοποιήθηκαν 2 δοκίμια από κάθε υλικό (PLA, PC και PAHT CF15).

Αρχικά τα δοκίμια τοποθετούνται στη μηχανή μονοαξονικού εφελκυσμού (Εικόνα 41) και συγκρατούνται στις δύο σιαγόνες. Στη διάρκεια της δοκιμασίας καταγράφεται η δύναμη που ασκείται στα άκρα του δοκιμίου με ταχύτητα απομάκρυνσης 2 mm/min μέχρι τη θραύση του δοκιμίου σε δύο κομμάτια. Η δύναμη που εφαρμόζεται στο δοκίμιο μεταβάλλεται σταδιακά μέχρι τη θραύση του δοκιμίου. Επίσης κατά τη

διάρκεια της δοκιμασίας καταγράφεται η επιμήκυνση του δοκιμίου. Οι δοκιμασίες πραγματοποιήθηκαν σε συνθήκες περιβάλλοντος με θερμοκρασία 24 °C.



Εικόνα 41: Διάταξη δοκιμασίας εφελκυσμού που χρησιμοποιήθηκε.

Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται οι μετρήσεις που καταγράφηκαν κατά τη διαδικασία του πειράματος και στον Πίνακα 6 οι τιμές που προκύπτουν για τη μέγιστη τάση σε εφελκυσμό (εφελκυστική τάση) και την % παραμόρφωση (strain). Η επιμήκυνση του δοκιμίου μετριέται στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου που χαρακτηρίζεται ως ωφέλιμο μήκος (gauge length) το οποίο έχει οριστεί κατά το σχεδιασμό σε 30 mm. Στον Πίνακα 2 δίνεται επίσης η τάση σε εφελκυσμό του υλικού όπως αναγράφεται στις προδιαγραφές από τον κατασκευαστή.

Πίνακας 5: Μετρήσεις δοκιμασίας εφελκυσμού

	Ασκούμενη δύναμη F_{max} (N)	Μέγιστη επιμήκυνση l_{max} (mm)	Πλάτος δοκιμίου d (mm)	Πάχος δοκιμίου h (mm)
PLA (Δοκίμιο 1)	1220	1,13	10,20	3,30
PLA (Δοκίμιο 2)	1400	1,08	10,20	3,30
PC (Δοκίμιο 1)	2280	2,09	11,24	3,04
PC (Δοκίμιο 2)	2260	2,26	10,54	3,04
PAHT_CF15 (Δοκίμιο 1)	2780	1,38	10,70	3,24
PAHT_CF15 (Δοκίμιο 2)	2620	1,36	10,60	3,24

Η μέγιστη τάση εφελκυσμού (ultimate tensile stress) υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\sigma_{UTS} = F / (d \cdot h)$$

όπου:

σ_{UTS} : Μέγιστη τάση εφελκυσμού λόγω της ασκούμενης δύναμης (MPa)

F: Ασκούμενη δύναμη (N)

d: Πλάτος δοκιμίου (mm).

h: Πάχος δοκιμίου (mm).

Πίνακας 6: Τάση εφελκυσμού και ειδική επιμήκυνση επί τις %

	σ_{UTS} (MPa) (πειραματική)	Μέσος όρος σ_{UTS} (MPa)	Τυπική απόκλιση (+/-)	σ_{UTS} (MPa) (τιμές κατασκευαστή)	Ειδική επιμήκυνση % ϵ
PLA (Δοκίμιο 1)	36,2	38,9	2,7	45,6	3,77
PLA (Δοκίμιο 2)	41,6				3,60
PC (Δοκίμιο 1)	66,7	68,6	1,9	53,7	6,97
PC (Δοκίμιο 2)	70,5				7,53
PAHT_CF15 (Δοκίμιο 1)	80,2	78,2	2,0	103,2	4,60
PAHT_CF15 (Δοκίμιο 2)	76,3				4,53

Παρατηρήσεις

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα για τα εκτυπωμένα δοκίμια παρατηρείται ότι το PLA παρουσιάζει τη μικρότερη αντοχή σε εφελκυσμό και το PAHT_CF15 τη μεγαλύτερη αντοχή από τα τρία υλικά. Επίσης για τα υλικά PLA και PC τα εκτυπωμένα δοκίμια παρουσιάζουν μικρότερη αντοχή σε εφελκυσμό από αυτή που ορίζεται στις προδιαγραφές των υλικών από τον κατασκευαστή. Αντίθετα τα εκτυπωμένα δοκίμια του PAHT_CF15 παρουσιάζουν καλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό. Η εκτύπωση όλων των δοκιμίων έγινε με τον ίδιο τρόπο (μοτίβο triangle και πυκνότητα γεμίσματος ίση με 100%) συνεπώς οι αποκλίσεις μπορεί να οφείλονται στις παραμέτρους εκτύπωσης, στις θερμοκρασίες εκτύπωσης των υλικών ή και στις συνθήκες του περιβάλλοντος.

Επίσης πρέπει να σημειωθεί πως η τυπική απόκλιση (standard deviation) της πειραματικής τιμής της τάσης για δύο δοκίμια του ίδιου υλικού (κατασκευασμένα με ίδιο ακριβώς τρόπο και χρόνο εκτύπωσης) σε όλες τις περιπτώσεις είναι κοντά στο 2. Παρατηρώντας αυτή την τιμή αλλά και την τιμή της μέγιστης δύναμης που ασκήθηκε μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για την αντοχή του κάθε δοκιμίου στη δοκιμασία.

Καθώς παρατηρείται απόκλιση στις πειραματικές τιμές της τάσης εφελκυσμού τόσο μεταξύ των διαφόρων δοκιμίων για το ίδιο υλικό όσο και μεταξύ των πειραματικών τιμών και των τιμών του κατασκευαστή, είναι σημαντικό αυτές να λαμβάνονται υπόψιν κατά την κατασκευή ενός αντικείμενου με τρισδιάστατη εκτύπωση και να ορίζεται πάντα ένα ποσοστό ασφαλείας βάσει των πειραματικών δοκιμών ή άλλων διαθέσιμων δημοσιευμένων πειραματικών μετρήσεων.

5.2 Δοκιμασία κάμψης τριών σημείων

Η δοκιμασία κάμψης τριών σημείων (three-point bending) είναι ένα από τα βασικότερα πειράματα αντοχής που γίνονται για τη μελέτη της αντοχής σε κάμψη και της παραμόρφωσης σε ένα φορέα ή μια δοκό στην οποία ενεργούν δυνάμεις κάθετες στον άξονά της.

Το πρότυπο της δοκιμασίας που εφαρμόζεται είναι το ASTM D790 με τίτλο «Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and

Electrical Insulating Materials». Τα δοκίμια που εκτυπώθηκαν έχουν μορφή, μέγεθος και διαστάσεις όπως ορίζει το πρότυπο.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί πως οι τιμές που δίνουν οι κατασκευαστές των υλικών για αντοχή σε κάμψη (Flexural Strength) και μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη (Flexural Modulus) ακολουθούν το ISO 178.

- Flexural Strength: Είναι η μέγιστη αντοχή του υλικού κατά τη δοκιμασία της κάμψης. Υπάρχει μόνιμη παραμόρφωση ή αστοχία του υλικού.
- Flexural Modulus: Είναι το μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη, το οποίο προσδιορίζεται από τη μετρούμενη παραμόρφωση στην ελαστική περιοχή.

Η πειραματική δοκιμασία της κάμψης τριών σημείων είναι μια διαδικασία στην οποία χρησιμοποιείται ένας μετρητής απόστασης, μια σταθερή βάση, μεταβλητά βάρη και το δοκίμιο σε μορφή ελάσματος (Εικόνα 42). Μετά την τοποθέτηση του δοκιμίου στην σταθερή βάση στη μηχανή κάμψης, ασκείται δύναμη και μετρείται το βέλος κάμψης σε mm.

Αρχικά καταγράφεται το μήκος, το πλάτος και το πάχος του δοκιμίου και τοποθετείται συμμετρικά στη μηχανή κάμψης. Στη συνέχεια τοποθετείται το μετρητικό όργανο έτσι ώστε η αρχική ένδειξη να είναι υψηλή και καταγράφεται η αρχική τιμή. Στην συνέχεια τοποθετούνται τα βάρη στο κέντρο του κάθε δοκιμίου, σταδιακά με την ίδια σειρά για όλα τα δοκίμια, και καταγράφονται οι τιμές του βέλους κάμψης. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται 3 έως 5 φορές και υπολογίζεται ένας μέσος όρος για κάθε δοκιμή. Οι δοκιμασίες πραγματοποιήθηκαν σε συνθήκες περιβάλλοντος με θερμοκρασία 33 °C.



Εικόνα 42: Δοκιμασία κάμψης τριών σημείων σε δοκίμιο PLA στο εργαστήριο της Σχολής Μηχανικών ΠΑΔΑ

Η μέγιστη τάση κάμψης (flexural stress) υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\sigma = (3 \cdot F \cdot L) / (2 \cdot b \cdot d^2)$$

όπου:

σ : μέγιστη τάση κάμψης λόγω της ασκούμενης δύναμης (MPa)

F: ασκούμενη δύναμη (N). Υπολογίζεται ως το βάρος επί την επιτάχυνση βαρύτητας.

L: μήκος στο συγκεκριμένο σημείο που ασκείται η κάθετη δύναμη, ίσο με 80 mm

b: πλάτος δοκιμίου (PLA = 20,2 mm, PC = 20,7 mm, PAHT_CF15 = 20,2 mm)

d: πάχος δοκιμίου (PLA = 3,3 mm, PC = 3,0 mm, PAHT_CF15 = 3,2 mm)

Στη συνέχεια υπολογίζεται η καμπτική παραμόρφωση (flexural strain) σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$\varepsilon = (6 \cdot D \cdot d) / L^2$$

όπου:

ε : καμπτική παραμόρφωση (αδιάστατο μέγεθος)

D: βέλος κάμψης (maximum deflection of the center of the beam) σε mm

Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας σε κάμψη (tangent modulus of elasticity in bending) χρησιμοποιείται η παρακάτω εξίσωση:

$$E_B = (L^3 \cdot m) / (4 \cdot b \cdot d^3)$$

όπου:

E_B : μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη (MPa)

m: κλίση εφαπτόμενης στο αρχικό ευθύγραμμο τμήμα της καμπύλης φορτίου-παραμόρφωσης (Slope of the tangent to the initial Straight-line portion of the load-deflection curve) σε N/mm.

Οι υπολογισθείσες τιμές του μέτρου ελαστικότητας παρουσιάζονται στον Πίνακα 7. Στον Πίνακα 7 δίνεται επίσης το μέτρο ελαστικότητας όπως αναγράφεται στις προδιαγραφές από τον κατασκευαστή.

Πίνακας 7: Τιμές μέτρου ελαστικότητας στη δοκιμασία κάμψης τριών σημείων

	E_B (MPa) (πειραματική)	E_B (MPa) (τιμές κατασκευαστή)
PLA	1953	3150
PC	2111	2310
PAHT_CF15	4985	8258

Παρατηρήσεις

Συγκρίνοντας τα τρία υλικά, το PLA εμφανίζει παρόμοιο μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη με το PC (2,0 και 2,1 GPa αντίστοιχα), ενώ το PAHT_CF15 έχει μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας.

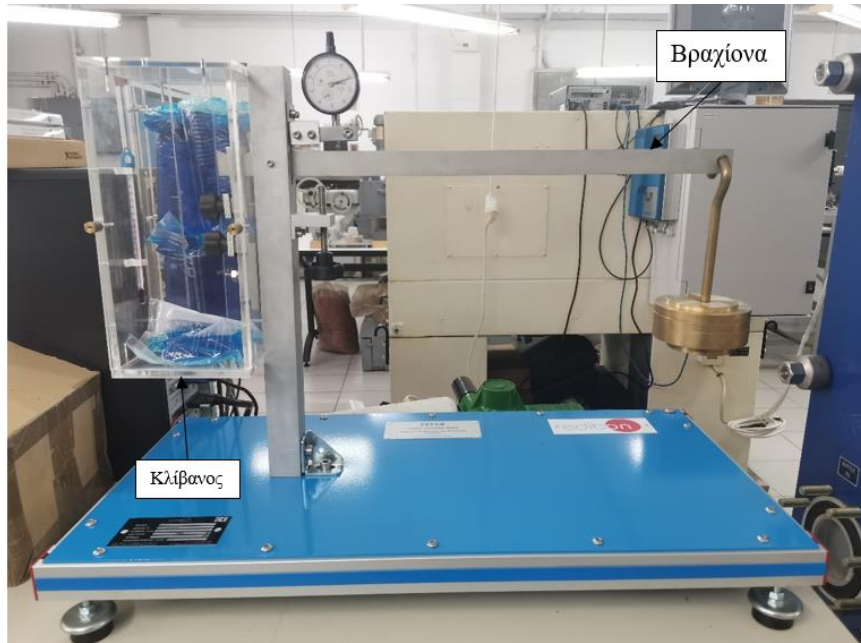
Παρατηρείται επίσης ότι οι τιμές που δίνονται από τον κατασκευαστή (ISO 178) είναι μεγαλύτερες από τις πειραματικά προσδιορισθείσες τιμές, ιδιαίτερα στην περίπτωση του PLA. Η εκτύπωση όλων των δοκιμίων έγινε με τον ίδιο τρόπο (μοτίβο triangle και πυκνότητα γεμίματος ίση με 100%) συνεπώς οι αποκλίσεις μπορεί να οφείλονται στις παραμέτρους εκτύπωσης, στις θερμοκρασίες εκτύπωσης των υλικών ή και στις συνθήκες του περιβάλλοντος (επισημαίνεται ότι η θερμοκρασία του χώρου κατά τη δοκιμασία κάμψης ήταν 33 °C).

5.3 Δοκιμασία ερπυσμού

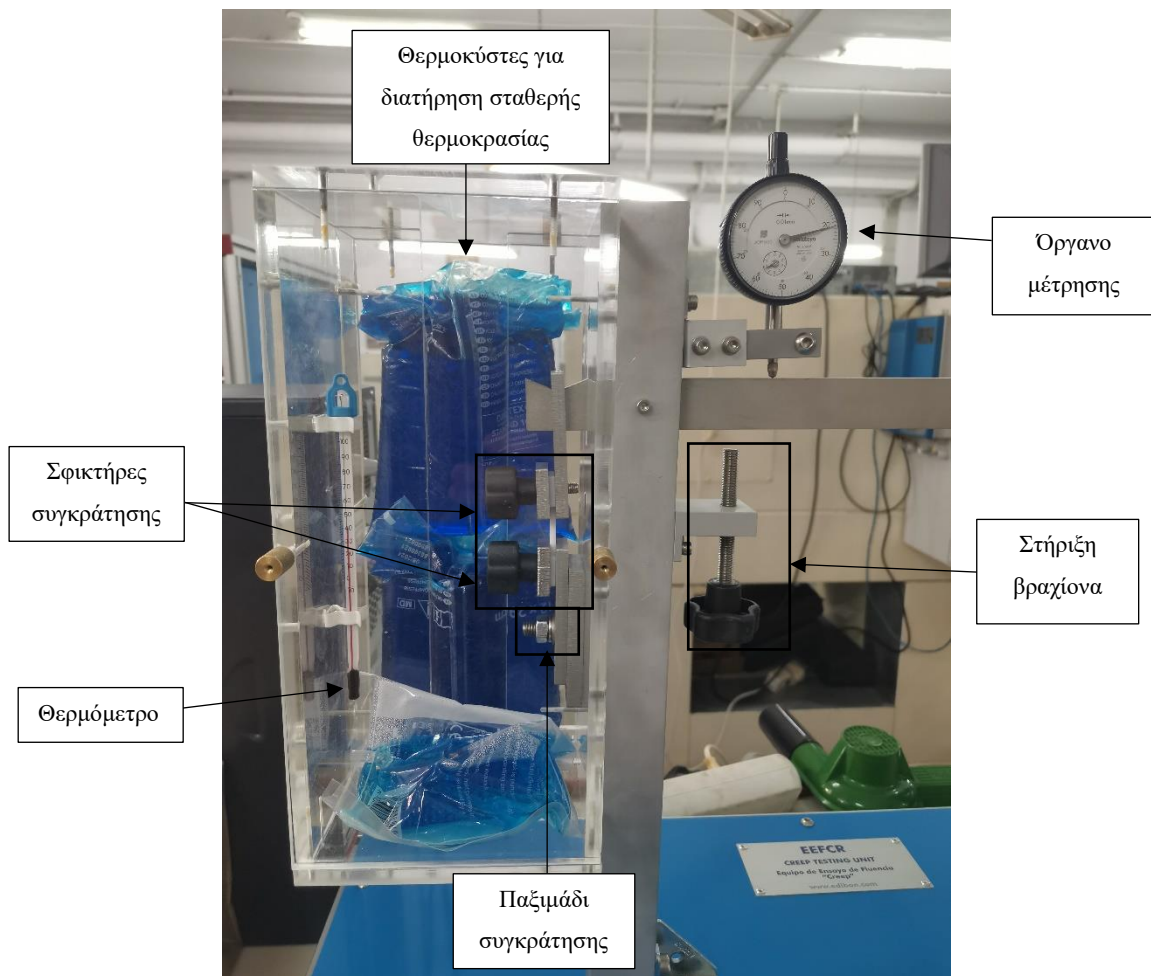
Η δοκιμασία ερπυσμού (creep test) είναι μια πειραματική διαδικασία για τη μελέτη της πλαστικής παραμόρφωσης και της αντοχής ενός υλικού στην πάροδο ενός χρονικού διαστήματος σε καθορισμένη υψηλή θερμοκρασία, με την εφαρμογή ενός σταθερού βάρους φόρτισης. Οι δοκιμές ερπυσμού σε πλαστικά υλικά περιγράφονται στα ακόλουθα πρότυπα: ISO 899-1, ISO 899-2 και ASTM D2990. Για τη συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία θα πρέπει το δοκίμιο να βρίσκεται σε σταθερή και υψηλή θερμοκρασία καθ' όλο το χρονικό διάστημα της δοκιμασίας.

Το δοκίμιο, συγκεκριμένου σχήματος και διαστάσεων, όπως περιγράφεται στα σχετικά πρότυπα, τοποθετείται στη θέση συγκράτησης (Εικόνα 43) και σφίγγεται αρχικά ο άνω σφικτήρας, στη συνέχεια ο κάτω σφικτήρας, ασκώντας κάθετη δύναμη για να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο τεντωμένο το δοκίμιο, και τέλος το παξιμάδι συγκράτησης. Στην συνέχεια γίνεται οπτικός έλεγχος ώστε ο βραχίονας με το σταθερό φορτίο να είναι οριζόντιος όπως φαίνεται στην Εικόνα 44.

Η διαδικασία συνεχίζει με την τοποθέτηση του βάρους στο άκρο του βραχίονα και καταγράφοντας την τιμή της απόκλισης ανά 30 δευτερόλεπτα. Το σταθερό βάρος σε όλες τις περιπτώσεις είναι 2.5 Kg.



Εικόνα 43: Μηχάνη ερπυσμού Edibon στο εργαστήριον του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών ΠΑΔΑ

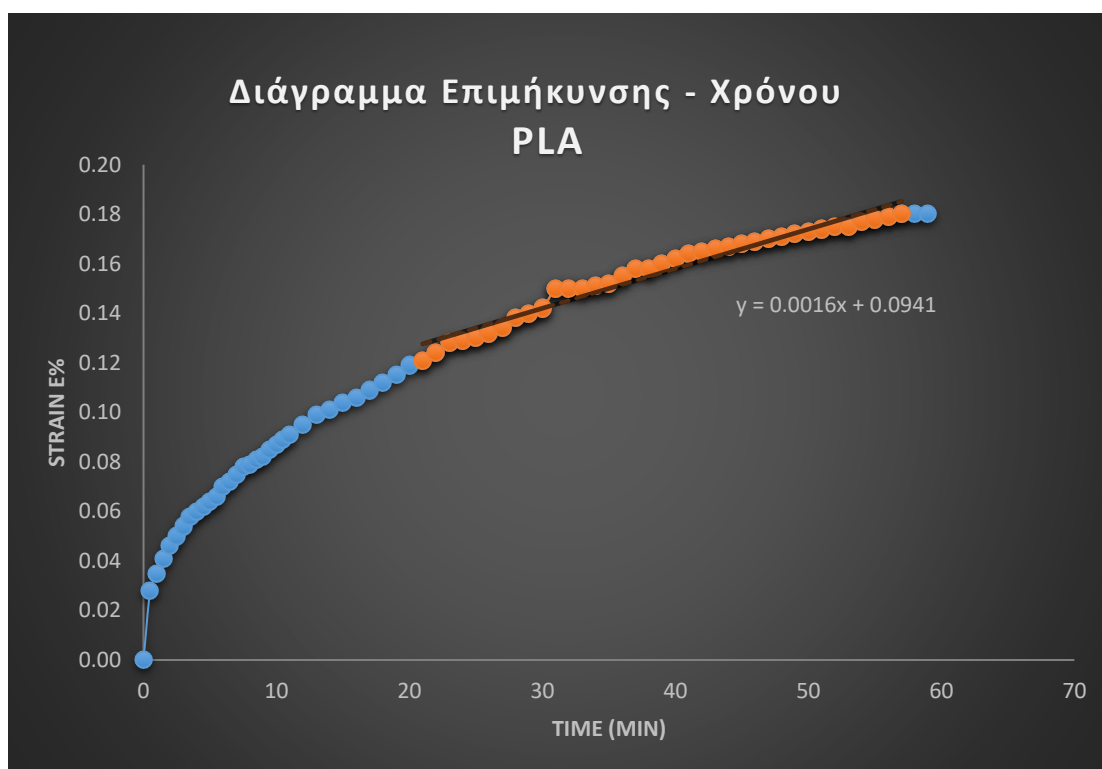


Εικόνα 44: Περιγραφή τμημάτων μηχανής δοκιμασίας ερπυσμού.

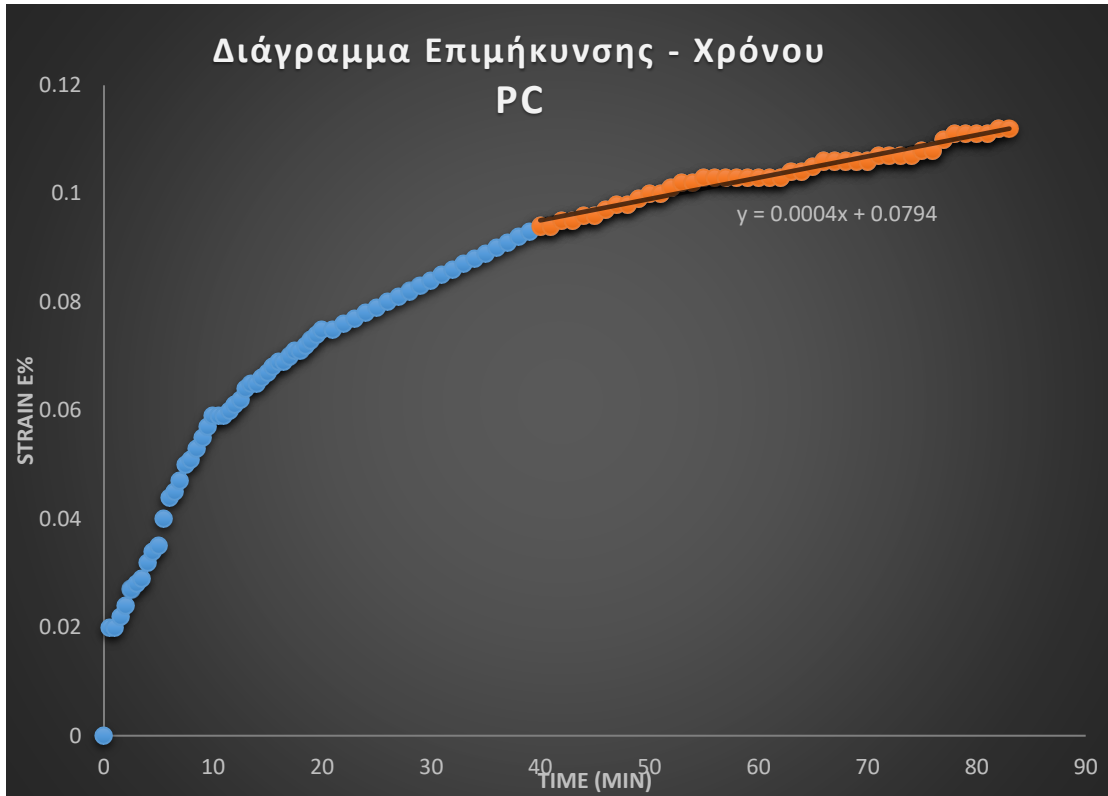
Τα διαγράμματα που απεικονίζουν την ανηγμένη επιμήκυνση με την πάροδο του χρόνου (strain-time) ονομάζονται καμπύλες ερπυσμού και παρουσιάζονται στις Εικόνες 45-48.

Η θερμοκρασία στον κλειστό χώρο της μηχανής ερπυσμού (κλίβανος) που τοποθετούνται τα δοκίμια ήταν $44 (\pm 2) ^\circ\text{C}$ για το PLA, $41 (\pm 3) ^\circ\text{C}$ για το PC, και $45 (\pm 2) ^\circ\text{C}$ για το PAHT CF15.

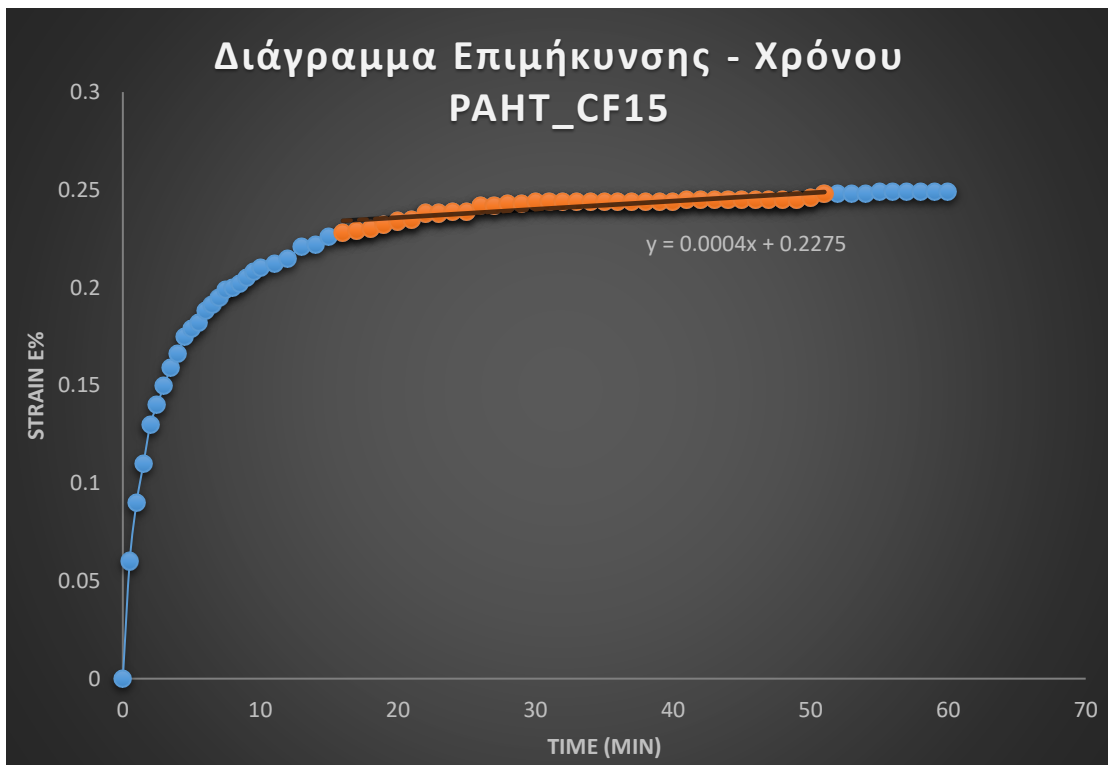
Η χρονική διάρκεια της μέτρησης ήταν 60 min για το PLA και το PAHT CF15, και 90 min για το PC. Στα διαγράμματα της δοκιμασίας διακρίνονται 2 στάδια ερπυσμού (στάδιο I και στάδιο II). Το πρώτο στάδιο (I) στο οποίο η ταχύτητα ερπυσμού μειώνεται με το χρόνο και το δεύτερο στάδιο (II) στο οποίο η ταχύτητα ερπυσμού είναι σταθερή με το χρόνο. Το τρίτο στάδιο (III), στο οποίο παρατηρείται επιτάχυνση της παραμόρφωσης μέχρι τη θραύση του υλικού, δεν καταγράφηκε για κανένα δοκίμιο.



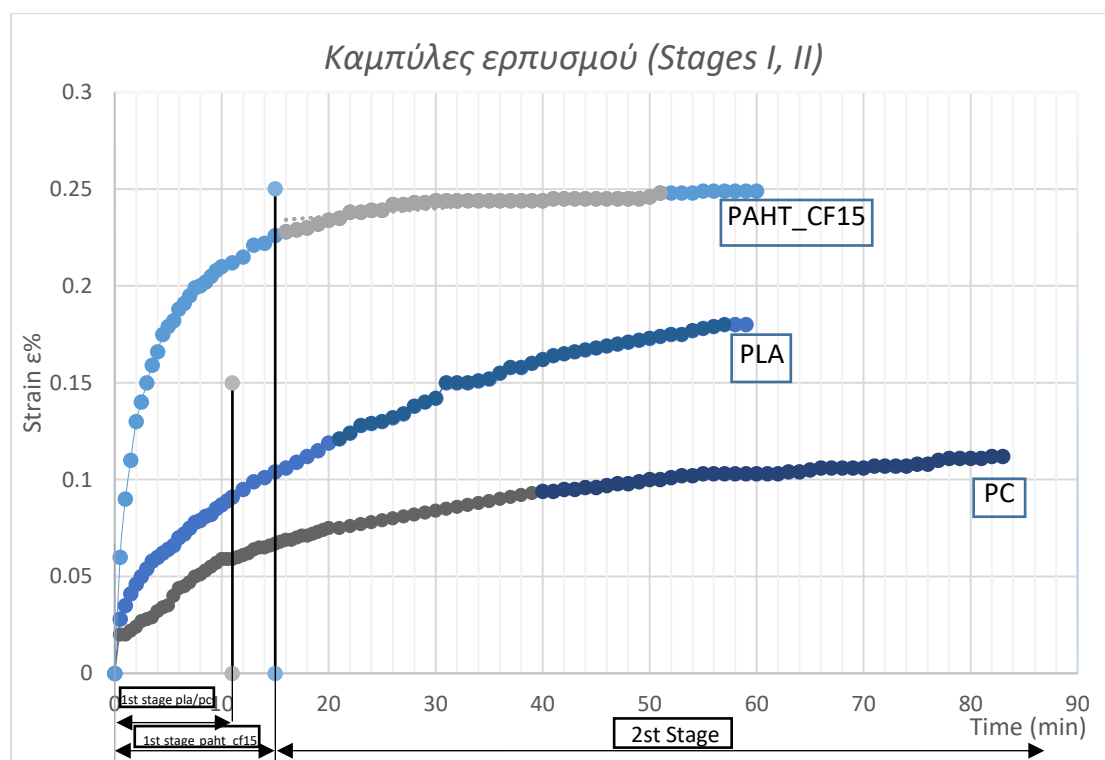
Εικόνα 45: Καμπύλη ερπυσμού για το PLA με ταχύτητα ερπυσμού στο στάδιο (II) ίση με 16×10^{-4} (mm/min) στους $44 \pm 2 ^\circ\text{C}$.



Εικόνα 46: Καμπύλη ερπυσμού για το PC με ταχύτητα ερπυσμού στο στάδιο (II) ίση με 4×10^{-4} (mm/min) στους 41 ± 3 °C.



Εικόνα 47: Καμπύλη ερπυσμού για το PAHT_CF15 με ταχύτητα ερπυσμού στο στάδιο (II) ίση με 4×10^{-4} (mm/min) στους 45 ± 2 °C.



Εικόνα 48: Σύγκριση καμπύλων ερπυσμού και επισήμανση των stage I: γραμμική περιοχή (linear region) και stage II: ζώνη διαρροής (yield zone).

Παρατηρήσεις

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα για τη δοκιμασία ερπυσμού:

1. Το PAHT_CF15 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ταχύτητα ερπυσμού στο πρώτο στάδιο, στη συνέχεια ακολουθεί το PLA και τέλος το PC.
2. Το PAHT_CF15 εμφανίζει σταθερή επιμήκυνση με τη πάροδο του χρόνου κατά το δεύτερο στάδιο, σε σχέση με τα άλλα δύο υλικά.
3. Το PC παρουσιάζει την καλύτερη αντοχή σε ερπυσμό.
4. Κανένα υλικό για σταθερό φορτίο 2,5 kg δεν ξεπέρασε το δεύτερο στάδιο. Δηλαδή όλα τα υλικά παρουσίασαν μόνιμη και σχετικά σταθερή παραμόρφωση, αλλά δεν επιτεύχθηκε η θραύση εντός των χρονικών ορίων της δοκιμασίας.

5.4 Δοκιμασία Κρούσης

Η δοκιμασία κρούσης (impact test) είναι μια πειραματική διαδικασία μέτρησης της δυσθραυστότητας ενός υλικού, μέσω της μέτρησης της απορροφούμενης ενέργειας από ένα σώμα στο οποίο ασκείται μια δύναμη κρούσης.

Το πρότυπο της δοκιμασίας είναι το ISO 180:2019 με τίτλο “Plastics – Determination of Izod Impact properties”. Τα δοκίμια που εκτυπώθηκαν έχουν μορφή, μέγεθος και διαστάσεις όπως ορίζει το πρότυπο. Χρησιμοποιήθηκαν 2 δοκίμια από κάθε υλικό (PLA, PC και PAHT CF15). Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια της δοκιμασίας ήταν 23°C.

Η δοκιμασία έγινε στη μηχανή κρούσης τύπου Avery – Denison (Εικόνα 49). Το δοκίμιο τοποθετείται κάθετα στη θέση συγκράτησης και στηρίζεται στην μια άκρη με την εγκοπή να δείχνει προς τη κατεύθυνση που θα γίνει η κρούση. Στη συνέχεια ελευθερώνεται ο βραχίονας από την υψηλότερη θέση και κατεβαίνει με ταχύτητα 3,46 m/s, ως εκκρεμές, και το δοκίμιο δέχεται ισχυρό κτύπημα από το βάρος της σφύρας. Ο δείκτης δείχνει το έργο που απαιτείται για να γίνει η θραύση του δοκιμίου σε Joules (J) και οι πειραματικές τιμές παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.



Εικόνα 49: Συσσκευή δοκιμασίας κρούσης κατά Izod στο εργαστήριο της Σχολής Μηχανικών ΠΑΔΑ

Πίνακας 8: Τιμές μέτρησης απορροφούμενης ενέργειας κατά τη δοκιμασία κρούσης.

	Ενέργεια (J)
PLA (Δοκίμιο 1)	0,2
PLA (Δοκίμιο 2)	0,2
PC (Δοκίμιο 1)	1,2
PC (Δοκίμιο 2)	1,2
PAHT_CF15 (Δοκίμιο 1)	1,1
PAHT_CF15 (Δοκίμιο 2)	1,15

Για να υπολογιστεί η δυσθραυστότητα του υλικού, δηλαδή η ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας που απαιτείται για τη θραύση του δοκιμίου, θα πρέπει να διαιρέσουμε την ενέργεια που απορροφάται από το δοκίμιο με το εμβαδόν της διατομής του στην εγκοπή (βλέπε Πίνακα 4, Κεφάλαιο 4). Για κάθε εκτυπωμένο δοκίμιο οι πραγματικές διαστάσεις στη διατομή μετρήθηκαν με παχύμετρο. Στον Πίνακα 9 παρουσιάζονται ο πειραματικές τιμές δυσθραυστότητας και οι τιμές όπως αναγράφονται στις προδιαγραφές των υλικών από τον κατασκευαστή.

Πίνακας 9: Υπολογισμός δυσθραυστότητας των δοκιμίων

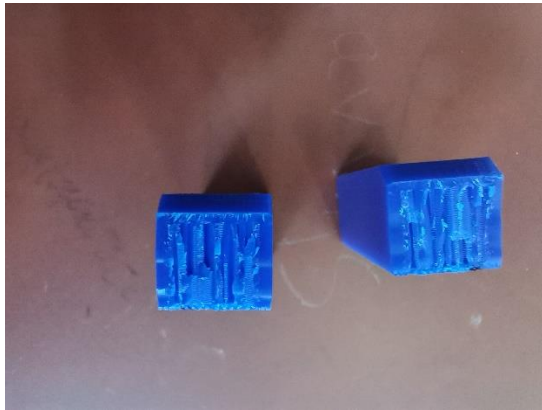
	Εμβαδόν στη διατομή (mm ²)	Δυσθραυστότητα (kJ/m ²) - τιμές πειραματικές	Δυσθραυστότητα (kJ/m ²) - τιμές κατασκευαστή
PLA (Δοκίμιο 1)	85,49	2,34	5,1
PLA (Δοκίμιο 2)	85,49	2,34	
PC (Δοκίμιο 1)	85,28	14,07	14,8
PC (Δοκίμιο 2)	85,28	14,07	
PAHT_CF15 (Δοκίμιο 1)	88,56	12,42	16,4
PAHT_CF15 (Δοκίμιο 2)	88,56	12,99	

Παρατηρήσεις

Παρατηρώντας οπτικά τα δοκίμια μετά τη δοκιμασία κρούσης, μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα σχετικά με δύο σημαντικές ιδιότητες των υλικών, την ολκιμότητα και την ψαθυρότητα. Όταν ένα υλικό είναι ψαθυρό δεν απορροφά μεγάλο ποσοστό ενέργειας πριν τη θραύση ενώ παρουσιάζει μικρή πλαστική παραμόρφωση κατά τη θραύση του. Η επιφάνεια θραύσης συνήθως παρουσιάζει μικρές γεωμετρικές αποκλίσεις. Αντίθετα ένα όλκιμο υλικό παραμορφώνεται σημαντικά στην πλαστική περιοχή πριν τη θραύση και στην επιφάνεια θραύσης εμφανίζονται συνήθως μεγάλες αποκλίσεις και αιχμηρές κορυφές.

Σύμφωνα με τις επιφάνειες θραύσης των δοκιμίων που παρουσιάζονται στις Εικόνες 50-52 διακρίνουμε ότι:

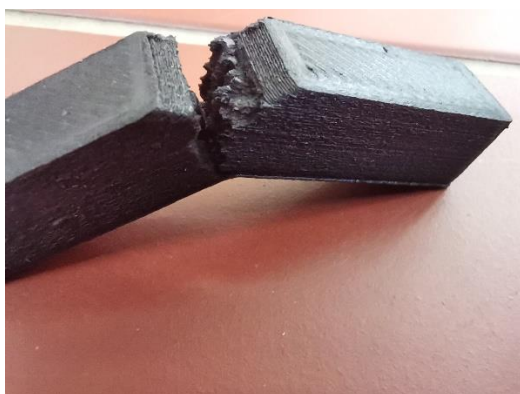
- 1) Το PLA είναι ψαθυρό υλικό.
- 2) Το PC είναι ψαθυρό υλικό αλλά λιγότερο ψαθυρό από το PLA.
- 3) Το PAHT_CF15 είναι ένα αρκετά όλκιμο υλικό και εμφανίζει αποκλίσεις και αιχμηρές κορυφές στη επιφάνεια θραύσης.
- 4) Το PLA απορροφάει τη μικρότερη ενέργεια κατά την κρούση.
- 5) Το PC έχει την καλύτερη συμπεριφορά κατά τη δοκιμασία κρούσης, καθώς παρουσιάζει τη μεγαλύτερη δυσθραυστότητα και αντοχή στη κρούση, είναι ψαθυρό και ταυτόχρονα απορροφάει περισσότερη ενέργεια από τα τρία υλικά.



Εικόνα 50: Δοκίμιο PLA μετά τη δοκιμασία της κρούσης.



Εικόνα 51: Δοκίμιο PC μετά τη δοκιμασία κρούσης.



Εικόνα 52: Δοκίμιο PAHT_CF15 μετά τη δοκιμασία κρούσης με εμφανείς αιχμηρές κορυφές.

Επίσης συγκρίνοντας τις πειραματικές τιμές δυσθραυστότητας με τις τιμές του κατασκευαστή διαπιστώνονται μικρότερη απόκλιση για το PC και μια μεγαλύτερη

απόκλιση για τα υλικά PLA και PAHT_CF15. Η εκτύπωση όλων των δοκιμίων έγινε με τον ίδιο τρόπο (μοτίβο triangle και πυκνότητα γεμίματος ίση με 100%) συνεπώς οι αποκλίσεις μπορεί να οφείλονται στις παραμέτρους εκτύπωσης, στις θερμοκρασίες εκτύπωσης των υλικών ή και στις συνθήκες του περιβάλλοντος (θερμοκρασία και υγρασία χώρου).

5.5 Μέτρηση σκληρότητας

Η σκληρότητα (hardness) ορίζεται ως η αντίσταση ενός υλικού στην μόνιμη διείσδυση ενός άλλου αιχμηρού σώματος μέσα σε αυτό. Το βάθος διείσδυσης εξαρτάται κυρίως από την σκληρότητα του υλικού, τη μορφή του διεισδυτή και το χρόνο εφαρμογής του φορτίου. Γενικά όσο βαθύτερη η διείσδυση τόσο πιο μαλακό το υλικό. Για τη δοκιμασία σκληρομέτρησης ακολουθείται το πρότυπο ISO 868:2003 με τίτλο “Plastics and ebonite – Determination of indentation hardness by means of a durometer (Shore hardness)”. Στο συγκεκριμένο πρότυπο αναφέρονται οι δύο μέθοδοι σκληρομέτρησης, Shore A και Shore D. Η πρώτη μέθοδος αφορά μαλακά πλαστικά ενώ η Shore D χρησιμοποιείται για σκληρότερα πλαστικά. Η κλίμακα της σκληρότητας Shore A κυμαίνεται από 0 έως 100, με τα πιο σκληρά υλικά να πλησιάζουν την τιμή 100.

Η μέτρηση της σκληρότητας έγινε σύμφωνα με τη μέθοδο Shore D σε συσκευή σκληρομέτρησης τύπου Sauter HBD 100-0 (Εικόνα 53).



Εικόνα 53: Συσκευή Sauter HBD 100-0HBD 100-0 στο εργαστήριο της Σχολής Μηχανικών ΠΑΔΑ

Για κάθε δοκίμιο πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σκληρότητας στις παρακάτω επιφάνειες:

- Στην πάνω επιφάνεια του δοκιμίου, η οποία λειάνθηκε με φύλλο λειάνσης «Struers Silicon Carbide 4000 A» στη συσκευή Struers LaboPol-5 (Εικόνα 54).
- Στην επιφάνεια της κάθετης πλευράς του δοκιμίου, δηλαδή αυτή που ορίζεται στην τρισδιάστατη εκτύπωση ως «τοίχωμα / wall».
- Στην κάτω επιφάνεια του δοκιμίου που ήταν σε επαφή με το γυαλί πυράκτωσης του εκτυπωτή ή με το υποστηρικτικό υλικό (support).



Εικόνα 54: Συσκευή λείανσης Struers LaboPol-5 στο εργαστήριο της Σχολής Μηχανικών ΠΑΑΑ

Για να ελεγχθούν και να επιβεβαιωθούν οι πειραματικές τιμές της σκληρότητας έγινε σκληρομέτρηση σε πέντε διαφορετικά σημεία της επιφάνειας που μελετάται και υπολογίστηκε ο μέσος όρος των τιμών. Οι τιμές που προέκυψαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 10, και συγκρίνονται με τιμές που αναγράφονται στις προδιαγραφές των υλικών από τον κατασκευαστή.

Πίνακας 10: Πειραματικές τιμές σκληρότητας με τη μέθοδο Shore D

	Σκληρότητα (τιμές πειραματικές)				Σκληρότητα (τιμές κατασκευαστή)	Απόκλιση %
	Πάνω επιφάνεια (με λείανση)	Πλάγια επιφάνεια	Κάτω επιφάνεια	Μ.Ο. τιμών		
PLA	86	85	82,5	84,5	83	+1,8
PC	83	82	83	82,7	80	+3.2
PAHT_CF15	82	81	76	79,7	-	-

Παρατηρήσεις

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της σκληρομέτρησης με τη μέθοδο Shore D εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

1. Σε όλα τα δοκίμια η πλευρά η οποία δέχτηκε επεξεργασία λείανσης μετά την τρισδιάστατη εκτύπωση των δοκιμίων παρουσιάζει μεγαλύτερη σκληρότητα από τις υπόλοιπες πλευρές που μετρήθηκαν πειραματικά και στις οποίες δεν έγινε λείανση.
2. Το υλικό που παρουσιάζει τη μικρότερη σκληρότητα είναι το PAHT_CF15, ενώ το PLA φαίνεται να είναι το πιο σκληρό υλικό.
3. Η συμπεριφορά σε σκληρότητα των PLA και PC ακολουθεί τον χαρακτηρισμό των υλικών από τον κατασκευαστή.
4. Ωστόσο τα PLA και PC δοκίμια παρουσιάζουν μεγαλύτερη σκληρότητα από αυτή που αναγράφεται στις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Η απόκλιση των πειραματικές τιμών από τις τιμές του κατασκευαστή είναι μικρή για τα PLA και PC (< 4%).

5.6 Μέτρηση πυκνότητας

Για τη διαδικασία της μέτρησης της πυκνότητας (density measurement) των δοκιμίων ακολουθείται το πρότυπο ASTM D792 με τίτλο ‘Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement’.

Για τη συγκεκριμένη διαδικασία Density (Buoyancy method) Archimedes απαιτείται η χρήση του παρακάτω εξοπλισμού:

- Ζυγός ακριβείας τουλάχιστον $\pm 0,001$ g.
- Απιονισμένο νερό (Deionized water).
- Ένα ποτήρι ζέσεως ή παρόμοιο κατάλληλο δοχείο.
- Μια βάση στήριξης του σκεύους που θα συγκρατεί το δοχείο με το απιονισμένο νερό.
- Μία ειδική κατασκευή ανάρτησης όπως φαίνεται στην Εικόνα 55.
- Το δείγμα, το οποίο θα πρέπει να είναι καθαρό.
- Ένα νήμα που θα συγκρατεί το δείγμα.

Η διαδικασία μέτρησης της πυκνότητας αποτελείται από τα παρακάτω βήματα:

- Βήμα 1. Αρχικά ελέγχεται εάν το δείγμα είναι καθαρό ή έχει σκόνες ή άλλα σώματα στις επιφάνειες.
- Βήμα 2. Στη συνέχεια μετράμε τη μάζα του νερού (σε δοχείο γνωστού όγκου) και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος ώστε να υπολογιστεί η πυκνότητα του νερού (συμβολίζεται με d_w στην παρακάτω εξίσωση).
- Βήμα 3. Τοποθετείται στην ειδική συσκευή το νήμα και μετράμε τη μάζα του σε γραμμάρια (m_1).
- Βήμα 4. Τοποθετείται στην ειδική συσκευή το νήμα βυθισμένο στο νερό μετράμε τη μάζα του σε γραμμάρια (m_2).
- Βήμα 5. Τοποθετείται στην ειδική συσκευή το δείγμα που συγκρατείται από το νήμα και μετράμε τη μάζα σε γραμμάρια (m_3).
- Βήμα 6. Τοποθετείται στην ειδική συσκευή το δείγμα που συγκρατείται από το νήμα βυθισμένο στο νερό και μετράμε τη μάζα σε γραμμάρια (m_4).
- Βήμα 7. Γνωρίζοντας όλες τις παραπάνω τιμές υπολογίζουμε την πυκνότητα σε g/cm^3 σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση.

$$d = d_w * (m_3 - m_1) / ((m_3 - m_1) - (m_4 - m_2))$$

- Βήμα 8. Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία 3 – 5 φορές και υπολογίζουμε τον μέσο όρο των τιμών πυκνότητας. Δίνεται σημαντική προσοχή ώστε το νήμα και το δοκίμιο να σκουπίζονται καλά πριν τις νέες μετρήσεις.
- Βήμα 9. Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία για τα υπόλοιπα δείγματα.



Εικόνα 55: Διαδικασία μέτρησης πυκνότητας δοκιμίων με τη μέθοδο της εμβάπτισης σε υγρό.

Στον Πίνακα 11 παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές πυκνότητας για τα 3 υλικά και οι αντίστοιχες τιμές που αναγράφονται στις προδιαγραφές των υλικών από τον κατασκευαστή.

Πίνακας 11: Πειραματικές τιμές μέτρησης πυκνότητας δοκιμίων και τιμές κατασκευαστή

	Πυκνότητα (g/cm³) τιμές πειραματικές	Πυκνότητα (g/cm³) τιμές κατασκευαστή
PLA	1,113	1,24
PC	1,158	1,19 - 1,31
PAHT_CF15	1,087	1,23

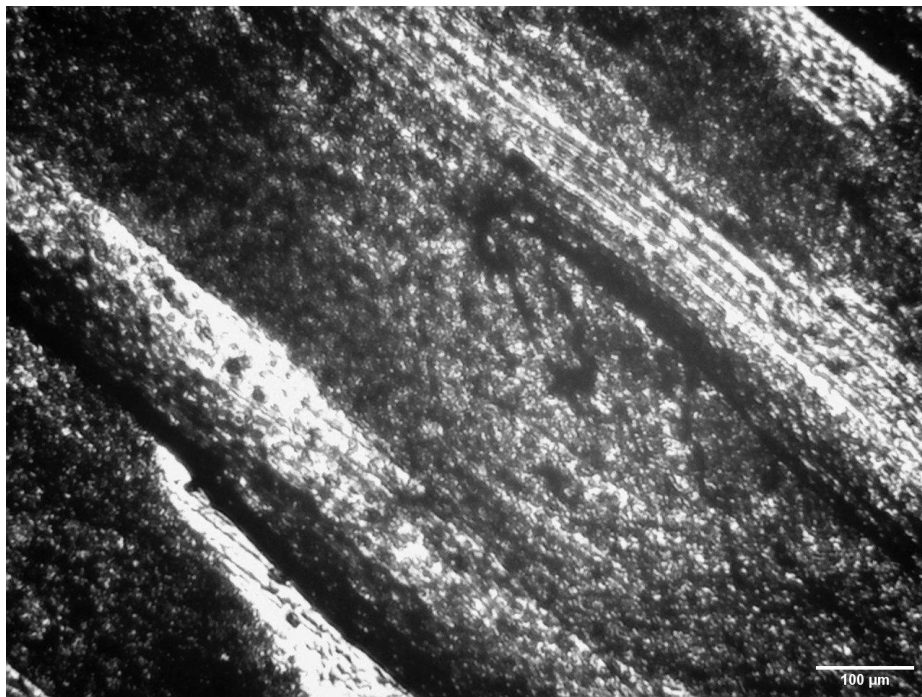
Παρατηρήσεις

Παρατηρείται ότι αν και η τρισδιάστατη εκτύπωση σε όλα τα δοκίμια έγινε με πυκνότητα γεμίματος υλικού 100% δηλαδή χωρίς να υπάρχουν κενά, οι μετρηθείσες τιμές της πυκνότητας προκύπτουν μικρότερες από τις τιμές που δίνει ο κατασκευαστής σε όλες τις περιπτώσεις. Μία πιθανή εξήγηση είναι ότι ο κατασκευαστής έχει υπολογίσει την πυκνότητα του νήματος όπως παράγεται από το εργοστάσιο χωρίς αυτό

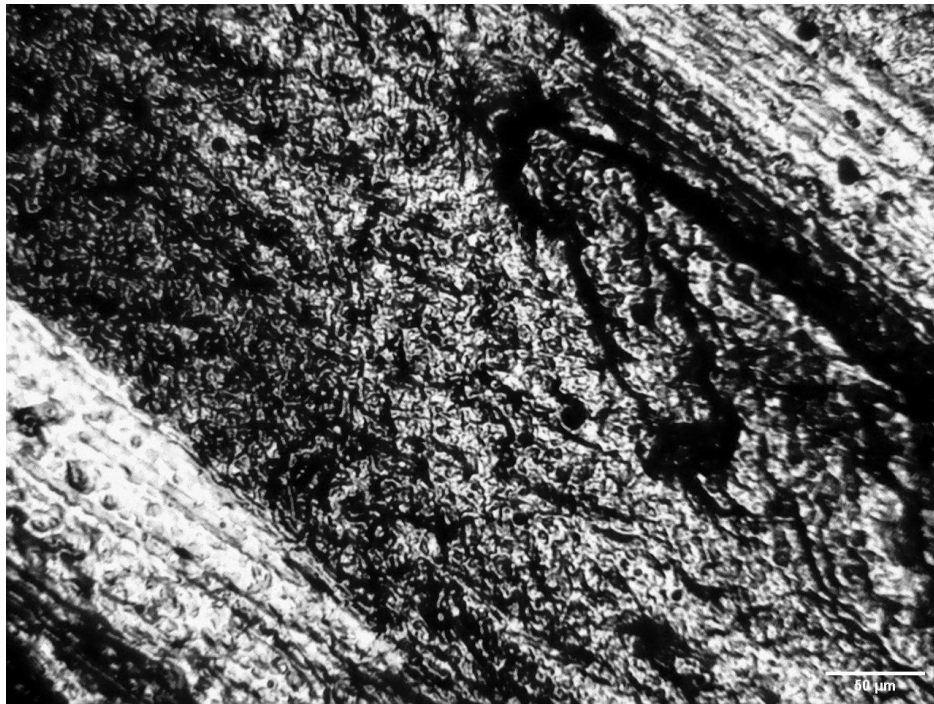
να έχει επεξεργαστεί περαιτέρω, ενώ πειραματικά μετράμε την πυκνότητα ενός υλικού το οποίο τήκεται στους 210-240 °C και στη συνέχεια τοποθετείται σε λεπτές στρώσεις (layers) οι οποίες στερεοποιούνται μεταξύ τους στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αναφέρεται ωστόσο, ότι στην τεχνολογία FDM-FFF υπάρχει περίπτωση μια στρώση εκτύπωσης να μην έχει προσκολληθεί σωστά με την αμέσως προηγούμενη στρώση, και αυτό οφείλεται κυρίως στη χαμηλή θερμοκρασία εκτύπωσης του υλικού ή και στη χαμηλή ταχύτητα εκτύπωσης.

5.7 Μικροσκοπική εξέταση

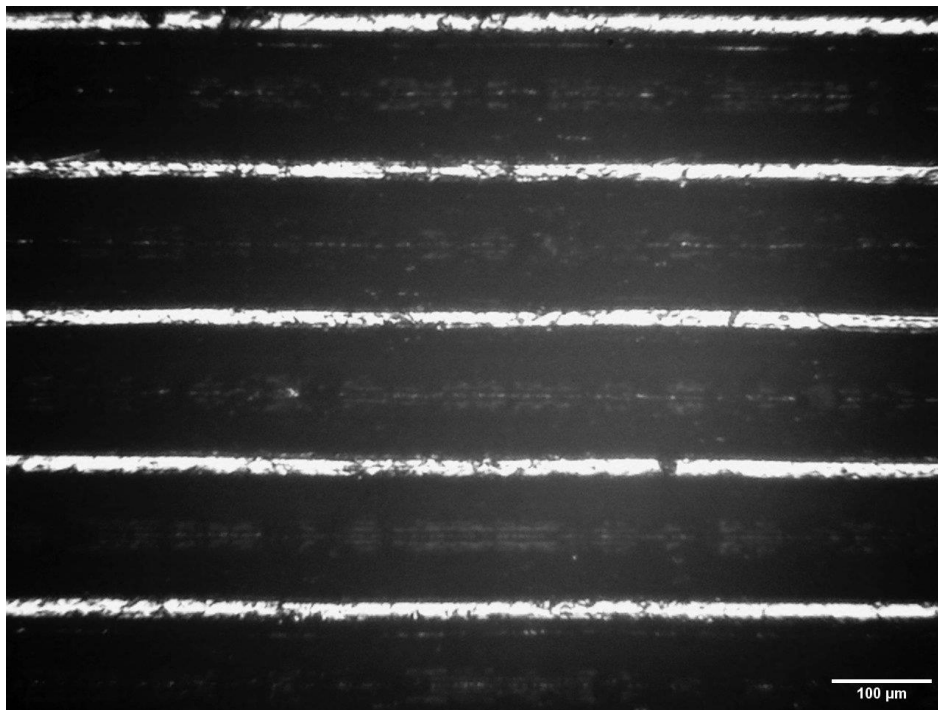
Για τη μικροσκοπική εξέταση και μελέτη της δομής των επιφανειών των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε το οπτικό μικροσκόπιο Labor-Lux MI5. Εξετάστηκαν δύο επιφάνειες στα δοκίμια: η πάνω επιφάνεια η οποία αποτελεί την τελευταία στρώση του υλικού με την κεφαλή του εκτυπωτή να τοποθετεί το υλικό στο XY επίπεδο, και η πλάγια επιφάνεια η οποία έχει εκτυπωθεί κατά τον Z άξονα με την κεφαλή του εκτυπωτή να τοποθετεί το υλικό σε στρώσεις την μια πάνω από την άλλη. Επίσης οι επιφάνειες δεν έχουν υποστεί λείανση με σκοπό να απεικονιστεί με περισσότερη ακρίβεια η δομή τους.



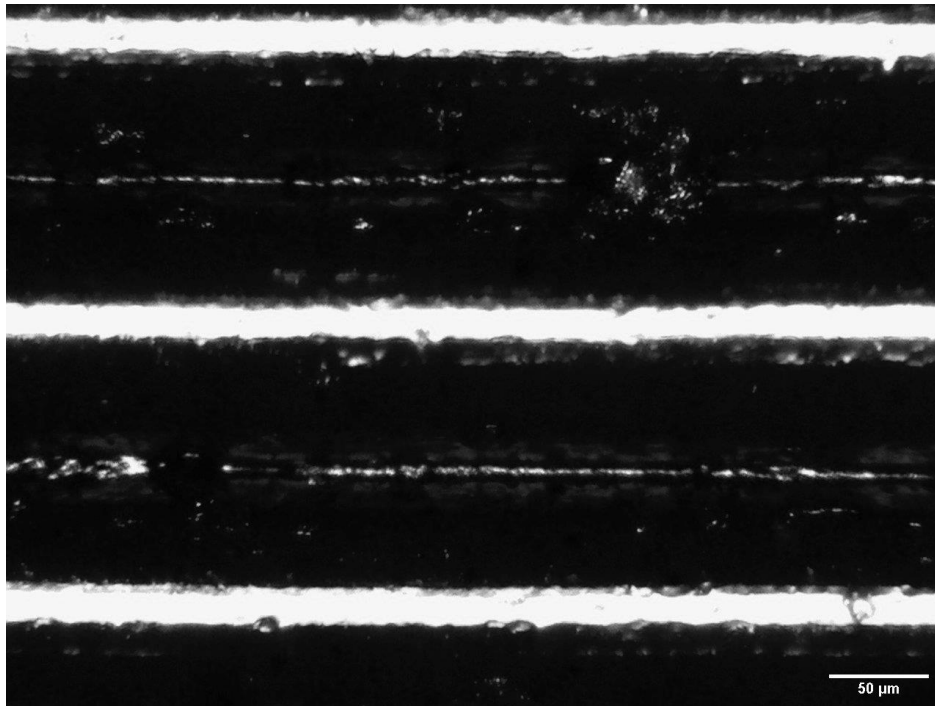
Εικόνα 56: Πάνω επιφάνεια δοκιμίου PLA (X50)



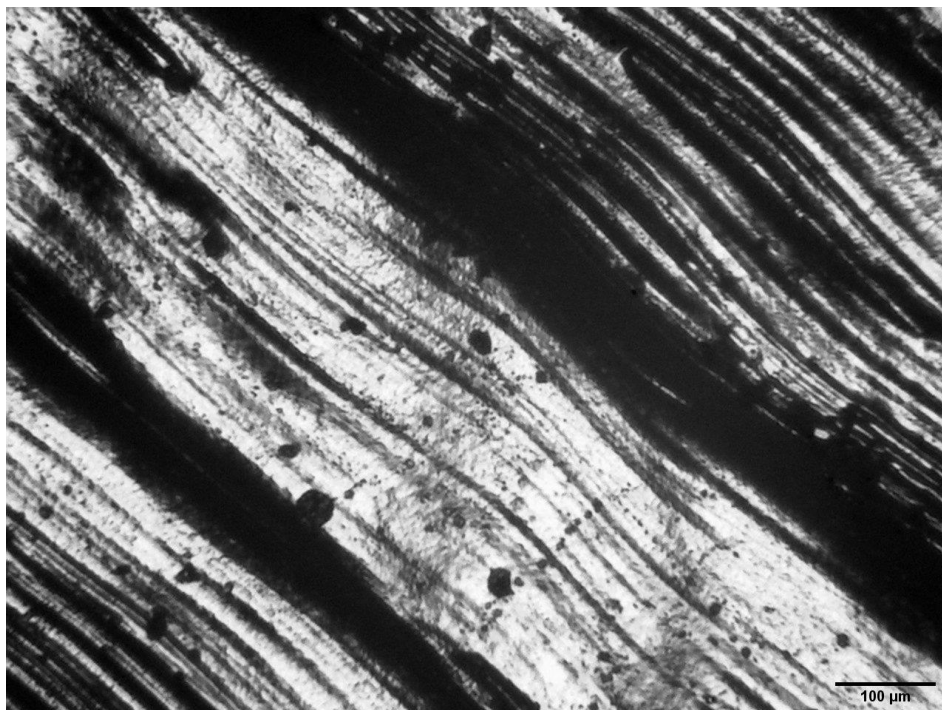
Εικόνα 57: Πάνω επιφάνεια δοκιμίου PLA (X100)



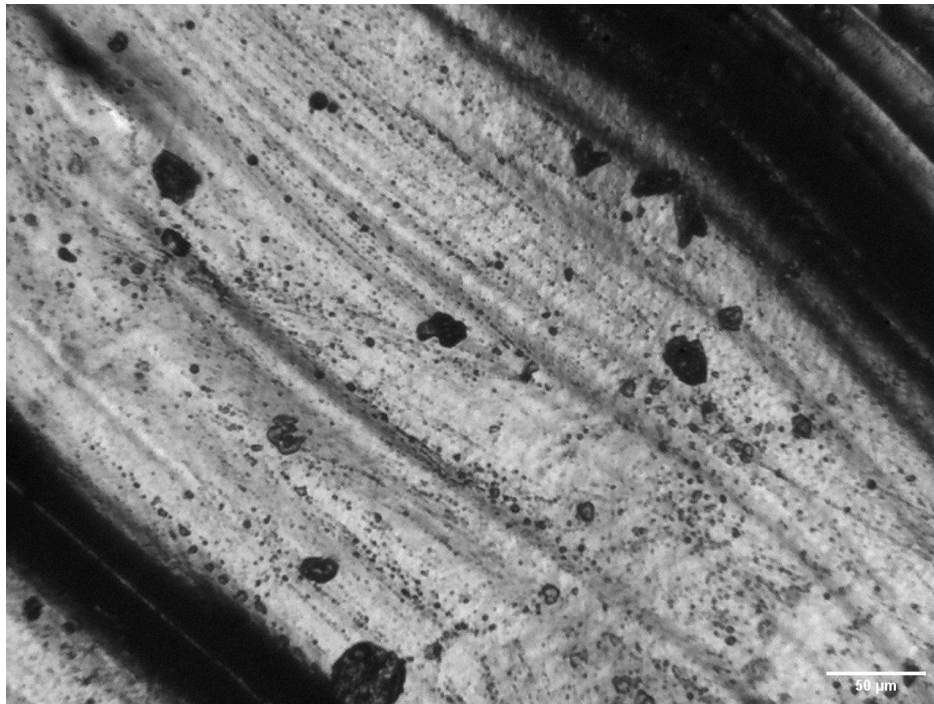
Εικόνα 58: Πλάγια επιφάνεια δοκιμίου PLA (X50)



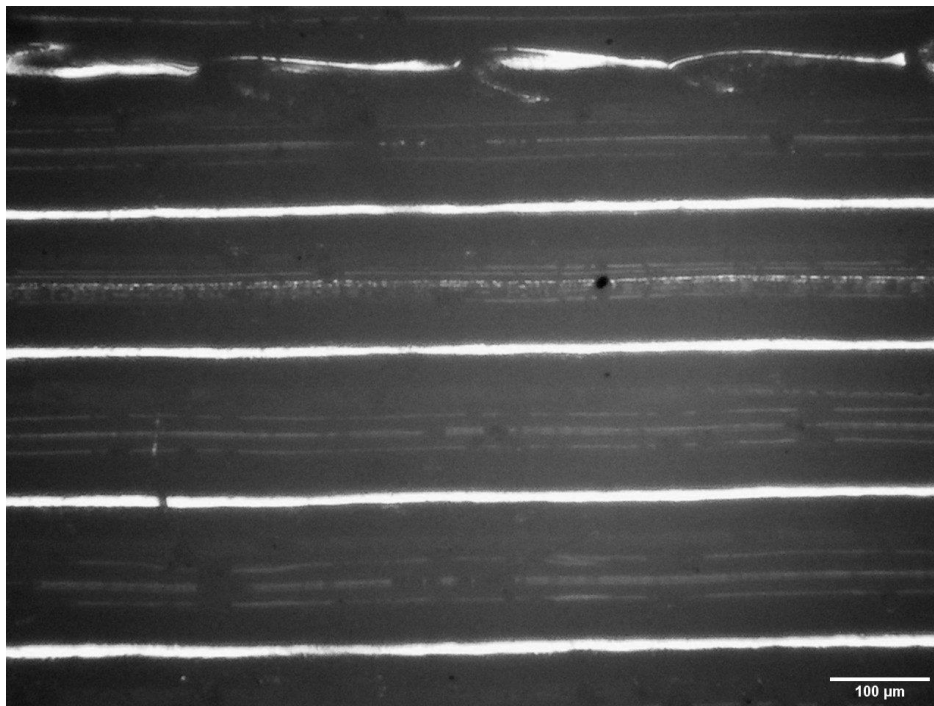
Εικόνα 59: Πλάγια επιφάνεια δοκιμίου PLA (X100)



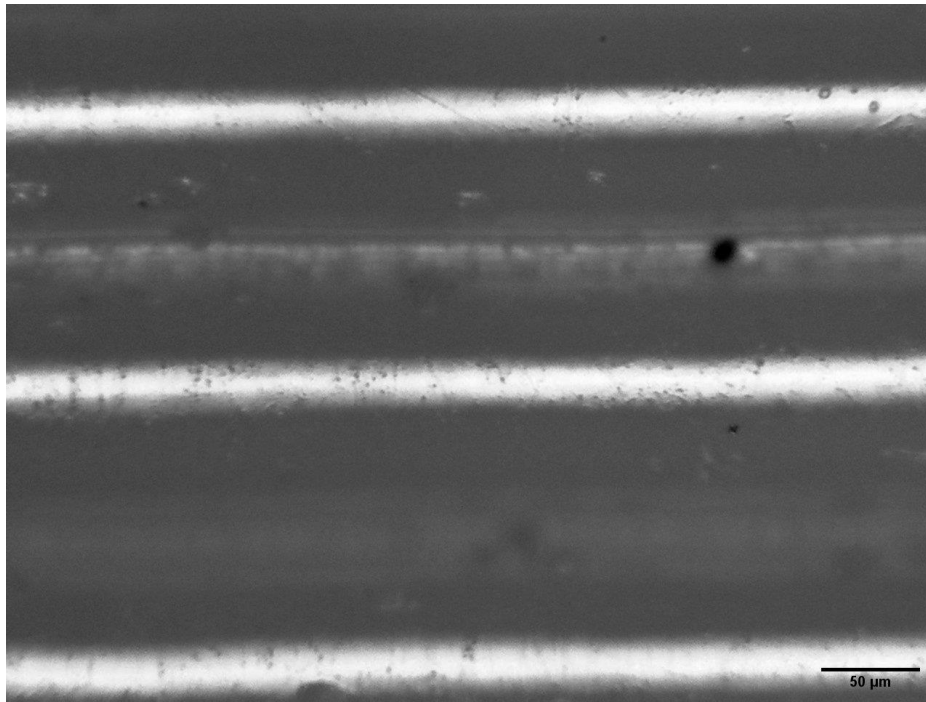
Εικόνα 60: Πάνω επιφάνεια δοκιμίου PC (X50)



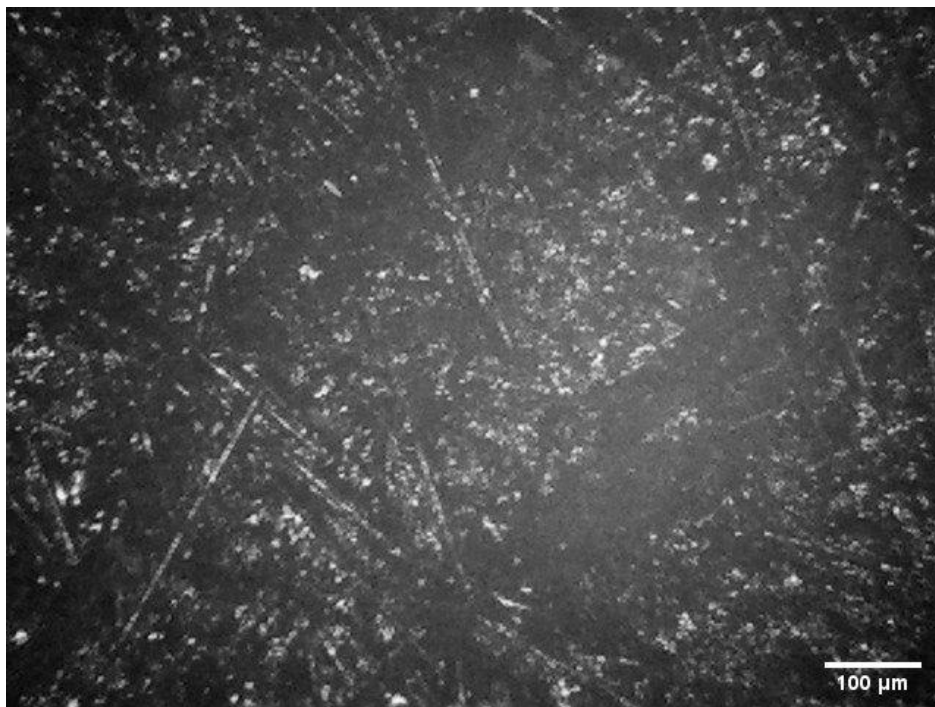
Εικόνα 61: Πάνω επιφάνεια δοκιμίου PC (X100)



Εικόνα 62: Πλάγια επιφάνεια δοκιμίου PC (X50)



Εικόνα 63: Πλάγια επιφάνεια δοκιμίου PC (X100)



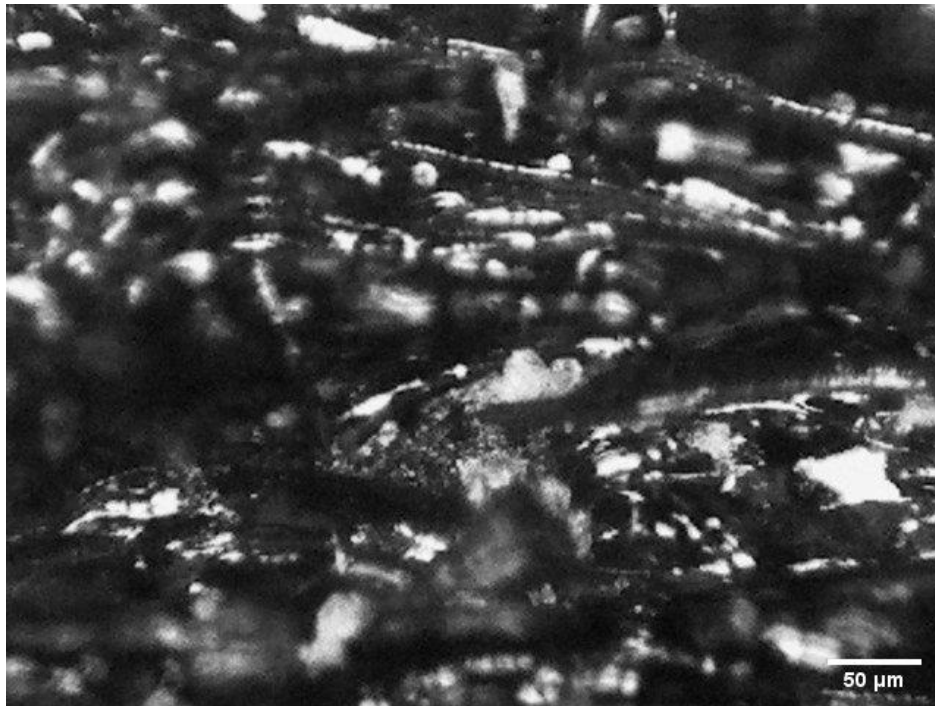
Εικόνα 64: Πάνω επιφάνεια δοκιμίου PAHT CF15 (X50)



Εικόνα 65: Πάνω επιφάνεια δοκιμίου RAHT CF15 (X100)



Εικόνα 66: Πλάγια επιφάνεια δοκιμίου RAHT CF15 (X50)



Εικόνα 67: Πλάγια επιφάνεια δοκιμίου PAHT CF15 (X100)

Παρατηρώντας τις εικόνες σε μεγέθυνση των πάνω επιφανειών των δοκιμίων διακρίνονται σημαντικές διαφορές στην κρυσταλλική δομή των υλικών:

- Στο υλικό PLA διακρίνεται εντονότερη ανομοιομορφία στη δομή και παρουσία κενών διαφόρων μεγεθών και σχημάτων. Η ανομοιόμορφη διάταξη μαζί με τα κενά αντιστοιχεί σε μικρότερη πυκνότητα υλικού για το δοκίμιο.
- Στο υλικό PC παρατηρείται μικρότερη ανομοιομορφία σε σχέση με το PLA και δεν παρατηρούνται πολλά κενά και φυσαλίδες αέρα, εκτιμώντας ότι το δοκίμιο έχει μεγάλη πυκνότητα υλικού. Διακρίνονται επίσης καθαρά με μαύρο χρώμα τα σημεία (γραμμές) που εφάπτονται οι στρώσεις του νήματος στο XY επίπεδο καθώς σε αυτά τα σημεία σχηματίζεται μια αρνητική καμπύλωση, ένας κυματισμός, και υπολείπεται υλικό.
- Στο υλικό PAHT CF15 διακρίνεται καθαρά η ανόργανη ύλη των ινών του άνθρακα που περιέχει το υλικό. Η διάταξη των ινών είναι τυχαία και δεν ακολουθεί κάποιο μοτίβο.

Παρατηρώντας τις εικόνες σε μεγέθυνση των πλάγιων επιφανειών των δοκιμίων διακρίνονται διαφορές στη δομή των υλικών που εξαρτώνται κυρίως από τον τρόπο εναπόθεσης των διαδοχικών στρώσεων υλικού.

- Στο υλικό PLA διακρίνονται με λευκό χρώμα τα σημεία (γραμμές) ένωσης των στρώσεων. Φαίνεται ότι η ποιότητα εκτύπωσης του PLA είναι πολύ καλή, με πολύ καλή ευθυγραμμότητα των εκτυπωμένων στρώσεων χωρίς αποκλίσεις. Επίσης τα κενά που διακρίνονται είναι ελάχιστα.
- Στο υλικό PC παρατηρείται η ίδια σχεδόν δομή με το PLA. Ωστόσο οι λευκές γραμμές δεν είναι απολύτως οριζόντιες και παράλληλες. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι όταν προστίθεται μια νέα στρώση PC, το υλικό της προηγούμενης στρώσης τήκεται λίγο παραπάνω, δηλαδή χάνει τη στερεά μορφή του για λίγο, και συσσωματώνεται με το υλικό της νέας στρώσης. Αυτό εξηγεί και το λόγο που προσκολλήθηκε το βοηθητικό υλικό PC με το κύριο υλικό PC κατά την εκτύπωση των δοκιμίων (βλέπε Κεφάλαιο 5). Επίσης διακρίνονται λίγα κενά σε αντιστοιχία με τα κενά της πάνω επιφάνειας του PC.
- Στο υλικό PAHT CF15 παρατηρείται η ίδια εικόνα με την πάνω επιφάνεια. Η μόνη διαφορά είναι ότι η πλάγια επιφάνεια δεν είναι λεία, αλλά παρουσιάζει κυματισμούς εξ αιτίας της τοποθέτησης των διαδοχικών στρώσεων του υλικού κατά την εκτύπωση. Οι κυματισμοί στην επιφάνεια μπορούν να παρατηρηθούν και οπτικά και με την αφή και αποτελούν συχνό φαινόμενο στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Για την αποφυγή των κυματισμών θα πρέπει είτε να μειωθεί το ύψος της στρώσης είτε να γίνει επεξεργασία των εκτυπωμένων δοκιμίων με τεχνικές λείανση.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων τριών πολυμερή υλικών μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης δοκιμίων και των πειραματικών δοκιμών. Αρχικά σχεδιάστηκαν τα δοκίμια στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Fusion 360, με βάση τις διαστάσεις που αναγράφονται στα πρότυπα των μηχανικών δοκιμασιών για πλαστικά υλικά. Στη συνέχεια έγινε η τρισδιάστατη εκτύπωση με τον εκτυπωτή Ultimaker S5 τεχνολογίας FDM - Εναπόθεσης Συντηγμένου Νήματος, που διαθέτει το εργαστήριο του τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής.

Κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης παρουσιάστηκαν ορισμένα σφάλματα, όπως η μετακίνηση ορισμένων στρώσεων εκτύπωσης, η προσκόλληση του υποστηρικτικού υλικού με το κύριο υλικό στις εκτυπώσεις PC και η έκχυση περίσσιου υλικού στις επιφάνειες των δοκιμίων PAHT CF15. Τα προβλήματα αυτά αντιμετωπίστηκαν με τροποποιήσεις στις παραμέτρους εκτύπωσης.

Σε σχέση με τη διαστασιολογική σταθερότητα, όλες οι διαστάσεις των εκτυπωμένων δοκιμίων ήταν μεγαλύτερες από τις διαστάσεις σχεδιασμού, με πιθανή αιτία την απορρόφηση υγρασία ή/και τη θερμική διαστολή των πολυμερών υλικών. Αναφορικά με το μήκος και το πλάτος των δοκιμίων (εκτύπωση κατά XY), το υλικό PLA φαίνεται να είναι το πιο σταθερό, και αναφορικά με το πάχος (εκτύπωση κατά Z) το υλικό PC χαρακτηρίζεται από καλύτερη διαστασιολογική σταθερότητα.

Στη δοκιμασία εφελκυσμού το υλικό PLA παρουσιάζει τη μικρότερη αντοχή και το υλικό PAHT CF15 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό. Στη δοκιμασία κάμψης σε τρία σημεία το υλικό PLA εμφανίζει το μικρότερο μέτρο ελαστικότητας (δηλαδή δύσκολα μπορεί να γίνει η επαναφορά του στο αρχικό σχήμα), στη συνέχεια ακολουθεί το PC και τέλος το PAHT CF15 έχει το μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας. Στη δοκιμασία ερπυσμού με σταθερό βάρος 2,5 Kg για χρονικό διάστημα μίας ώρας το υλικό PAHT CF15 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ταχύτητα ερπυσμού στο πρώτο στάδιο, ενώ εμφανίζει σταθερή επιμήκυνση με την πάροδο του χρόνου κατά το δεύτερο στάδιο, σε σχέση με τα άλλα δύο υλικά. Το υλικό PC παρουσιάζει την καλύτερη αντοχή σε ερπυσμό.

Στη δοκιμασία κρούσης το PC παρουσιάζει τη μεγαλύτερη δυσθραυστότητα και αντοχή στη κρούση, είναι ψαθυρό και ταυτόχρονα απορροφάει την περισσότερη

ενέργεια από τα τρία υλικά. Το υλικό PAHT CF15 είναι αρκετά όλκιμο και εμφανίζει αιχμηρές κορυφές στη επιφάνεια θραύσης. Στη δοκιμασία της σκληρομέτρησης με τη μέθοδο Shore D μετρήθηκαν τρεις επιφάνειες, από τις οποίες η μια είχε υποστεί λείανση και παρουσίασε τη μεγαλύτερη σκληρότητα από τις υπόλοιπες. Το υλικό που παρουσιάζει τη μικρότερη σκληρότητα είναι το PAHT CF15, ενώ το PLA φαίνεται να είναι το πιο σκληρό υλικό.

Διαπιστώνεται λοιπόν ότι μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης δοκιμίων και των πειραματικών δοκιμών είναι εφικτή η εξαγωγή συμπερασμάτων για τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Προφανώς οι τιμές των ιδιοτήτων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις παραμέτρους εκτύπωσης αλλά και από τις συνθήκες περιβάλλοντος και συνεπώς απαιτείται μεγάλος αριθμός εκτυπώσεων και πειραματικών δοκιμών για την επιβεβαίωση των τιμών αυτών. Ωστόσο η γρήγορη και εύκολη δημιουργία δοκιμίων με τη χρήση των τρισδιάστατων εκτυπωτών αποτελεί σημαντικό εργαλείο για τη μελέτη διαφόρων πλαστικών και σύνθετων υλικών.

Ως μελλοντικές προτάσεις για συνέχιση της έρευνας αναφέρονται οι εξής:

α) η μελέτη και άλλων ευρέως χρησιμοποιούμενων εκτυπώσιμων υλικών όπως είναι το Polypropylene Glass Fiber (PP GF30), το Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), το Thermoplastic polyurethane (TPU) και η σύγκριση των μηχανικών ιδιοτήτων.

β) η τρισδιάστατη εκτύπωση κατάλληλων δοκιμίων βάσει προτύπων και η διεξαγωγή και άλλων πειραματικών δοκιμών όπως η δοκιμασία σε διάτρηση, η δοκιμή σε αντοχή σε υψηλή θερμοκρασία, και η δοκιμασία στρέψης για τον έλεγχο της αντοχής σε περιστροφική κίνηση.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Lindblom, Jan Seaman Kelly Brian S.** *Scientific Examination of Questioned Documents*. s.l. : CRC Press Taylor and Francis group, 2006. 2nd Edition.
2. **Gornet, Terry Wohlers and Tim.** *History Of Additive manufacturing. Wohlers Report*. WOHLERS ASSOCIATES, INC., 2015.
3. **Vipul Gupta, Pavel Nesterenko and Bret Paull.** *3D Printing in Chemical Sciences Application Across Chemistry*. s.l. : Royal Society of Chemistry, 2019. 1st.
4. **Wikipedia.** Wikipedia - 3D printing. *Wikipedia.org*. [Ηλεκτρονικό] 2023. https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing#1980s_note_24.
5. **Adlughmin.** 3D Print. *3dprint.com*. [Ηλεκτρονικό] 10 June 2015. <https://3dprint.com/72171/first-3d-printer-chuck-hull/>.
6. **Kurman, Hod Lipson and Melba.** *Fabricated: The New World of 3D Printing*. s.l. : John Wiley and Sons, Indianapolis, Ind, 2013.
7. **Strikova, Thierry Rayna and Ludmila.** From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation. *Technological Forecasting and Social Change*. ScienceDirect, 2015.
8. **Kyle, Maxey and.** A new infographic bring you up to date with 3D printing's biggest milestones. *engineering.com*. [Ηλεκτρονικό] 03 Sep 2013. <https://www.engineering.com/story/infographic-the-history-of-3d-printing>.
9. **Sculpteo.** Sculpteo. *Sculpteo.com*. [Ηλεκτρονικό] 2023. <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/basics-of-3d-printing/the-history-of-3d-printing/>.
10. **SLA, HUBS.** Hubs A Protolabs Company. *hubs.com*. [Ηλεκτρονικό] 2023. <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sla-3d-printing/#what-are-hubs-top-tips-tricks-for-sla-3d-printing>.
11. **Jingang Huang, Quin Qin and Jie Wng.** A Review of Stereolithography: Processes and Systems. *mdpi.com*. [Ηλεκτρονικό] September 2020. <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/9/1138>. 10.3390/pr8091138.

12. **Michelle du Toit.** Gizmo3dprintingland. *Gizmo3dprintingland.com*. [Ηλεκτρονικό] 28 July 2020. <https://www.gizmo3dprinters.com.au/post/the-differences-between-bottom-up-resin-3d-printers-and-top-down-resin-3d-printers>.
13. **Christian Cavallo.** Thomas Net. *thomasnet.com*. [Ηλεκτρονικό] 2023. <https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/digital-light-processing-dlp-3d-printing/>.
14. **Hossam Kadry, Soham Wadnap, Changxue Xu and Fakhrul Ahsan.** Digital light processing (DLP) 3D-printing technology and photoreactive polymers in fabrication of modified-release tablets. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2019, Volume 135.
15. **SLS, HUBS.** Hubs A Protolabs Company. *hubs.com*. [Ηλεκτρονικό] 2023. <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sls-3d-printing/>.
16. **K.-F. Leong, D. Liu and C.-K. Chua.** Tissue Engineering Applications of Additive Manufacturing. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. 2014, Volume 10.
17. **R. Singh, S. Singh and M.S.J. Hashmi.** Implant Materials and Their Processing Technologies - Direct Laser Metal Sintering. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. 2016.
18. **Xometry.** Xometry Where Big Ideas Are Built. *xometry.com*. [Ηλεκτρονικό] 2023. <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/sls-vs-dmls-3d-printing/>.
19. **J. Gunasekaran, P. Sevel and I. John Solomon.** Metallic materials fabrication by selective laser melting: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2021, Volume 37.
20. **Team Xometry.** Xometry Where Big Ideas Are Built. *xometry.com*. [Ηλεκτρονικό] 2022. <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/dmls-vs-ebm-3d-printing/>.
21. **Prasad, S.Anand Kumar and R.V.S.** Chapter 2 - Basic principles of additive manufacturing: different additive manufacturing technologies. *Additive Manufacturing*. Woodhead Publishing Reviews: Mechanical Engineering Series, 2021.
22. **Wadea Ameen, Syed Hammad Mian and Hisham Alkhalefah.** Design the support structures for fused deposition modeling 3D printing. *Proceedings of the*

International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. 2019.

23. **Jingchao Jiang, Xun Xu and Jonathan Stringer**. Support Structures for Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2018.

24. **HLH Rapid**. HLH Rapid - Design Guide: FDM 3D Printing. *hlhrapid.com*. [Ηλεκτρονικό] 2023. <https://hlhrapid.com/knowledge/design-guide-fdm-3d-printing/>.

25. **Paromita Nath, Joseph D. Olson, Sankaran Mahadevan and Yung-Tsun Tina Lee**. Optimization of fused filament fabrication process parameters under uncertainty to maximize part geometry accuracy. *Additive Manufacturing*. 2020, Τόμ. Volume 35.

26. **Ultimaker Cura**. *ultimaker.com*.

27. **Στέλιος Λιοδάκης, Δημήτρης Γάκης, Δημήτρης Θεοδωρόπουλος, Παναγιώτης Θεοδωρόπουλος και Αναστάσιος Κάλλης**. Χημεία Β' ΛΥΚΕΙΟΥ ΓΕΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ. *ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΕΚΔΟΣΕΩΝ «ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ»*. Κεφ. 5.4.

28. **Tan, K. Jim Jem and Bowen**. The development and challenges of poly (lactic acid) and poly. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2020, Volume 3.

29. **Muammal M. Hanon, József Dobos and László Zsidai**. The influence of 3D printing process parameters on the mechanical. *Procedia Manufacturing*. 2021.

30. **Ultimaker**. Technical data sheet PLA. s.l. : Ultimaker, 2018. Version 4.002.

31. **Anis Bahar, Sofiane Belhabib, Sofiane Guessasma, Ferhat Benmahiddine, Ameer Ei Anime Hamami and Rafik Belardi**. Mechanical and Thermal Properties of 3D. *Mechanical and Thermal Properties of 3D Printed*. MDPI, 2022.

32. **Ultimaker**. Technical Data Sheet PC. s.l. : Ultimaker, 2018. Version 4.002.

33. **Nidhi Dixit, Prashant K. Jain**. 3D printed carbon fiber reinforced thermoplastic composites: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2021, Volume 43.

34. **Basf**. Technical Data Sheet Ultrafuse PAHT CF15. *Technical Data Sheet*. 2023, Version No.: 4.0.

35. **Essam Zaneldin, Waleed Ahmed, Aya Mansour and Amged Ei Hassan**. Dimensional Stability of 3D Printed Objects Made from Plastic Waste Using FDM:

Potential Construction Applications. *mdpi.com*. [Ηλεκτρονικό] 3 November 2021.
<https://www.mdpi.com/2075-5309/11/11/516>. 10.3390/buildings11110516.

36. Esinger. Dimensionally stable plastics. [Ηλεκτρονικό] 2023.
<https://www.ensingerplastics.com/en/plastic-material-selection/dimensionally-stable>.