

ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ-ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

**ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ
ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ
ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ**

Κυπραίος Ευστάθιος του Θεμιστοκλή
Μάλλιος Χριστόφορος του Θεοδώρου

Πειραιάς, Έτος 2018

ΔΕΛΤΙΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ			
		Ακαδ. έτος	2017-2018
Τίτλος Εργασίας	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ		
Φοιτητ-ές / -ριες	Κυπραίος Ευστάθιος του Θεμιστοκλή, Μάλλιος Χριστόφορος του Θεοδώρου.		
Τμήμα	Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε.		
Επιβλ. Καθ.	Γιαννακόπουλος Κωνσταντίνος, Τσολάκης Αντώνιος.		
Ημερομηνία	14-12-2018		
Λέξεις κλειδιά	Πολυμερή δοκίμια, τρισδιάστατη εκτύπωση, εναπόθεση υλικού, κάμψη.		
<p>Περίληψη : Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο τη μελέτη και τη σύγκριση των μηχανικών ιδιοτήτων τεσσάρων πολυμερών υλικών και την επίδραση της ταχύτητας του εφαρμοζόμενου φορτίου στην αντοχή τους.</p> <p>Επιλέχθηκαν υλικά, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως στον τομέα της παραγωγής με τρισδιάστατη εκτύπωση, με τη μέθοδο της μοντελοποίησης με εναπόθεση υλικού.</p> <p>Πρόκειται για τα υλικά <i>abs</i>, <i>pla</i>, <i>pla eno</i> και <i>petg</i>. Τα δύο πρώτα είναι τα πιο κοινότυπα και οικονομικά, το <i>pla eno</i> αποτελεί βελτιωμένη εκδοχή του <i>pla</i>, καθώς έχει ως και εννιά φορές μεγαλύτερη αντοχή κρούσης -θυσιάζοντας ωστόσο την υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό που παρουσιάζει το απλό <i>pla</i>, ενώ το <i>petg</i>, έχει πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες με υψηλή χημική αντίσταση και επιλέγεται αντί του <i>abs</i> όταν θέλουμε υψηλότερης ποιότητας γεωμετρίες.</p> <p>Για να γίνει ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων των παραπάνω υλικών σε κάμψη, πραγματοποιήθηκε πείραμα κάμψης 3 σημείων για κάθε δοκίμιο, κατά το διεθνές πρότυπο <i>ISO 178:2010 (Plastics- Determination of flexural properties)</i> λαμβάνοντας υπόψιν και την έκδοση τροποποίησής του, που εκδόθηκε το 2013 (<i>Amd 1:2013</i>).</p> <p>Για το λόγο αυτό κατασκευάστηκαν δοκίμια από τα τέσσερα αυτά υλικά, με τη μέθοδο της εναπόθεσης υλικού (<i>FDM</i>), συγκεκριμένα 6 για το κάθε υλικό. Η δοκιμή για κάθε υλικό πραγματοποιήθηκε για δύο διαφορετικές ταχύτητες επιβολής του φορτίου, για να διερευνηθεί και η επίδραση της παραμέτρου αυτής στην αντοχή των παραπάνω υλικών.</p>			

PROJECT INFORMATION SHEET			
		<i>Academic year</i>	2017-2018
<i>Title</i>	DESIGN, MANUFACTURE AND BENDING TEST OF 3D PRINTED POLYMERIC SPECIMENS		
<i>Students</i>	Kypreos Stathis, Mallios Christoforos		
<i>Department</i>	Mechanical Engineering		
<i>Advisor</i>	Giannakopoulos Konstantinos, Tsolakis Antonios		
<i>Date</i>	14-12-2018		
<i>Keywords</i>	Polymers, 3D printing, flexural stress, FDM		
<p>Abstract: <i>The subject of this project is the study and comparison of the mechanical properties of four common polymer materials and the effect of the speed of the applied load on their strength.</i></p> <p><i>The materials chosen are widely used in 3d printing processes, with the method of Fused Deposition Modeling we used,</i></p> <p><i>These are the following: abs, pla, pla evo and petg. The first two are more common and economic, advanced pla constitutes an advanced version of pla, as it has nine times greater impact strength -sacrificing however the high tensile strength that the simple pla has while petg has very good mechanical properties with high chemical resistance and is preferred instead of abs when there is need for higher quality geometries.</i></p> <p><i>For the determination of the mechanical properties of these four materials, a three- point bending test was conducted for each specimen, according to ISO 178:2010 (Plastics - Determination of flexural properties), taking also into account its amendment, which was issued in 2013.</i></p> <p><i>For this reason, specimens from these four materials were created, with Fused Deposition Modelling technology; more specifically, 6 specimens for each material were created. The test process for each material was conducted for two different speeds of the applied load, in order to investigate the effect of this parameter on the strength of the above materials.</i></p>			

Δήλωση ακαδημαϊκής ακεραιότητας

(Declaration of academic integrity)

Οι υπογράφοντες υπεύθυνα δηλώνουν ότι η παρούσα εργασία με τίτλο «ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ» είναι προϊόν δικής μας δουλειάς και ότι όλες οι πηγές που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη σύνταξη της αναφέρονται πλήρως.

Κυπραίος Ευστάθιος _____

Μάλλιος Χριστόφορος _____

Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τους υπεύθυνους καθηγητές, κο Γιαννακόπουλο και κο Τσολάκη, για την υποστήριξη και την καθοδήγηση που μας παρείχαν σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής εργασίας. Επίσης θέλουμε να εκφράσουμε τις ευχαριστίες μας στους δικούς μας ανθρώπους για την υποστήριξή τους καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μας και ιδιαίτερα τον Βασίλη Σέργη για την εκτύπωση των δοκιμίων και για τις γνώσεις που μας μετέδωσε στο συγκεκριμένο αντικείμενο καθώς και την Ανθή Βασιλακοπούλου για την επιμέλεια των αγγλικών κειμένων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ Δοκιμή σε κάμψη πολυμερών ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ	1
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ (INTRODUCTION)	1
2 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ (AIM AND OBJECTIVES)	2
3 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ (3D PRINTING).....	3
3.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ (HISTORICAL RETROSPECTION)	3
3.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ (PROCESS FOR CREATING PARTS WITH 3D PRINTING)	4
3.2.1 Σχεδιασμός του αντικειμένου (Design).	4
3.2.2 Παραμετροποίηση (Parameterization).	4
3.2.3 Κατασκευή (Creation)	5
3.2.4 Το φινίρισμα (Finish)	6
3.3 ΟΙ ΚΥΡΙΟΤΕΡΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ (MAINLY USED 3D PRINTING TECHNIQUES).	7
3.3.1 Στερεολιθογραφία (SLA)	7
3.3.2 Συγκόλληση Επάλληλων Φύλλων (Laminated Object Manufacturity (LOM))	8
3.3.3 Επιλεκτική Συσσωμάτωση με Λείζερ (Selective Laser Sintering (SLS)).	9
3.3.4 Επιλεκτικός Ψεκασμός Συγκολλητικής Ουσίας (Binder Jetting)	10
3.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΥΛΙΚΟΥ (FUSED DEPOSITION MODELING (FDM))	11
3.5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ (BUILDING PARAMETERS AND THEIR AFFECT TO THE MECHANICAL PROPERTIES)	12
4 ΠΟΛΥΜΕΡΗ (POLYMERS)	16
4.1 ΤΡΟΠΟΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ (CREATION)	16
4.2 ΔΟΜΗ (STRUCTURE)	17
4.3 ΧΡΗΣΗ (APPLICATION)	17
4.4 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΒΑΣΕΙ ΜΗΧΑΝΟΘΕΡΜΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ (CLASSIFICATION BASED ON MECHANOTHERMIC PROPERTIES)	18
4.4.1 Θερμοπλαστικά (thermoplastics)	18
4.4.2 Θερμοσκληρυνόμενα (thermosettings)	18

4.4.3	Ελαστομερή (elastomers)	18
4.5	ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΠΟΥ ΕΠΙΛΕΧΘΗΚΑΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ (SELECTED POLYMERS FOR THE EXPERIMENTAL STUDY CASE)	19
4.5.1	Πολυγαλακτικό οξύ (Polylactic acid)	19
4.5.2	Ακρυλονιτρίλιο Βουταδιένιο Στυρένιο (Acrylonitrile butadiene styrene)	20
4.5.3	Συμπολυμερές τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο με γλυκόλη (Petg)	22
4.5.4	PLA EVO	22
5	ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΤΗΣ ΚΑΜΨΗΣ(BENDING TEST)	23
5.1	ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ (MECHANICAL PROPERTIES)	23
5.2	ΟΡΙΣΜΟΣ της ΚΑΜΨΗΣ (BENDING DEFINITION)	23
5.3	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ (FLEXURAL STRESS)	24
5.4	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ (DEFORMATIONS)	26
6	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ (TEST PROCESS)	27
6.1	ΠΡΟΤΥΠΟ (STANDARD)	27
6.2	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ (TEST MACHINE)	27
6.3	ΔΟΚΙΜΙΑ (SPECIMENS)	29
6.3.1	Εκτύπωση Δοκιμίων (Printing of the specimens).	29
6.3.1.1	Υλικά (Materials).	30
6.3.1.2	Παράμετροι εκτύπωσης (Printing parameters).	30
6.3.2	Διαστασιολογικός Έλεγχος (Dimensions check).	32
6.4	ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ (THE EXPERIMENTAL PROCESS)	33
6.5	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ (MEASUREMENTS)	35
6.6	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (MEASUREMENTS ELABORATION)	36
6.6.1	Υπολογισμός καμπτικών ροπών (Bending moments)	36
6.6.2	Τάσεις (Stresses)	39
6.6.3	Υπολογιστικό μέτρο ελαστικότητας (Calculated elastic modulus)	39
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ (CONCLUSIONS)	43
8	ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΟΡΩΝ (INDEX OF TERMS)	44
9	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ (REFERENCES)	45

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ (INTRODUCTION)

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιείται μελέτη της αντοχής σε κάμψη πολυμερών δοκιμίων τεσσάρων διαφορετικών υλικών, τα οποία έχουν κατασκευαστεί με τη μέθοδο της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται τα εξής υλικά: πολυγαλακτικό οξύ (pla), ακρυλονιτρίλιο βουταδιενίου-στυρολίου (abs), advanced pla και συμπολυμερές τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο με γλυκόλη (PET-G).

Και για τα τέσσερα υλικά χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος μοντελοποίησης με εναπόθεση υλικού (FDM) και η εκτύπωση έγινε στον επιτραπέζιο εκτυπωτή Wanhao. Οι κύριες παράμετροι εκτύπωσης σε όλα τα υλικά ήταν παρόμοιες και επιλέχθηκαν βάσει προηγούμενων σχετικών μελετών που αναφέρονται σε επόμενο κεφάλαιο. Η δοκιμή αντοχής αφορά τεστ κάμψεως τριών σημείων σύμφωνα με τις απαιτήσεις του προτύπου ISO 178 ‘‘ Πλαστικά - Προσδιορισμός ιδιοτήτων κάμψης’’.

Οι μετρήσεις που ελήφθησαν κατά την πειραματική διαδικασία (φορτίο σε N και βέλος κάμψης σε mm), χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία των διαγραμμάτων φορτίου- βέλους κάμψης, τον υπολογισμό των ορθών τάσεων καθώς και τον υπολογισμό των μέτρων ελαστικότητας των υλικών.

2 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ (AIM AND OBJECTIVES)

Σκοπός της εργασίας είναι ο προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων, δοκιμίων από πολυμερή υλικά, τα οποία κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος κατασκευής με εναπόθεση υλικού και χρησιμοποιήθηκαν οι βέλτιστες παράμετροι εκτύπωσης, βάσει βιβλιογραφίας. Εξετάστηκαν τέσσερα πολυμερή: abs, pla, petg και pla eno.

Επίσης εξετάστηκε πώς η ταχύτητα επιβολής του εφαρμοζόμενου φορτίου επηρεάζει την αντοχή των υλικών αυτών. Για το λόγο αυτό το πείραμα εκτελέστηκε με δύο διαφορετικές ταχύτητες επιβολής φορτίου.

Τέλος, ελέγχθηκε κατά πόσο οι υπολογιστικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας των παραπάνω υλικών αποκλίνουν από αυτές που αναφέρει ο κατασκευαστής για τα υλικά αυτά.

3 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ (3D PRINTING)

Η φιλοσοφία της τεχνολογίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης, βασίζεται στην δημιουργία πολλών στρώσεων υλικού, οι οποίες προσκολλώνται η μία επάνω στην άλλη ώστε σαν τελικό αποτέλεσμα να συνθέτουν ένα συμπαγές στερεό αντικείμενο.

Τα αντικείμενα μπορεί να είναι διαφόρων σχημάτων ή γεωμετριών, από μια μεγάλη ποικιλία υλικών, όπως μέταλλο, πλαστικό, ξύλο, χαρτί, βιολογικό υλικό, φαγητό και διάφορα άλλα. Η χρήση των αντικειμένων αυτών ποικίλει αντίστοιχα, ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία και το υλικό.

3.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ (HISTORICAL RETROSPECTION)

Η εμφάνιση 3d printing τεχνολογιών στη βιομηχανία άρχισε προς τα τέλη της δεκαετίας του ογδόντα και ήταν γνωστή ως **Rapid Prototyping (RP)**, αφού στόχος ήταν η γρήγορη, εύκολη και συνεπώς οικονομική Παρασκευή πρωτοτύπων για την ανάπτυξη βιομηχανικών προϊόντων.

Η πρώτη προσπάθεια κατοχύρωσης της πατέντας για την τεχνολογία RP έγινε από τον Dr. Kadama, το Μάιο του 1980 στην Ιαπωνία, ο οποίος ωστόσο δεν κατάφερε να την κατοχυρώσει εξαιτίας μιας παράλειψής του. Έτσι, τυπικά οι ρίζες του 3d printing μπορούν να εντοπισθούν το 1986 όπου και εκδόθηκε η πρώτη πατέντα για συσκευή στερεολιθογραφίας από τον Charles Hull, ο οποίος εφηύρε το μηχάνημά του το 1983 και ίδρυσε την 3D Systems Corporation στην Καλιφόρνια, έναν από τους μεγαλύτερους και παραγωγικότερους οργανισμούς στον τομέα του 3D printing σήμερα.

Αν και η SLA διεργασία ουσιαστικά αποτέλεσε την αρχή του 3D printing, το ίδιο διάστημα, το 1987, βρισκόταν υπό ανάπτυξη από τον Carl Deckard η μέθοδος της Επιλεκτικής συσσωμάτωσης με Λείζερ (SLS), η οποία κατοχυρώθηκε το 1989. Την ίδια χρονιά ο Scott Cramp αιτήθηκε πατέντα για την μέθοδο κατασκευής με εναπόθεση υλικού (FDM) η οποία έγινε για λογαριασμό της εταιρίας του Stratasys Inc.

Στην Ευρώπη, ιδρύθηκε το 1989 στη Γερμανία από τον Hans Langer, η EOS GmbH, η οποία μετά από ένα διάστημα όχι και τόσο επιτυχημένης ενασχόλησης με τις SL διεργασίες, έστρεψε την προσοχή της στις LS διεργασίες. Σήμερα τα συστήματά της έχουν διεθνή αναγνώριση για την ποιότητά τους στην βιομηχανική παραγωγή.

Στα τέλη του '90 με αρχές του '00 είχαμε την εμφάνιση νέων τεχνολογιών που αφορούσαν κυρίως στην παραγωγή καλουπιών και μητρών για περιορισμένη παραγωγή γνωστή και ως Ταχεία Κατασκευή Εργαλείων (Rapid Tooling).

3.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ (PROCESS FOR CREATING PARTS WITH 3D PRINTING)

Τα στάδια κατασκευής ενός αντικειμένου με τη μέθοδο της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι τέσσερα :

- 1)Ο σχεδιασμός του αντικειμένου
- 2)Η παραμετροποίηση
- 3)Η κατασκευή του και
- 4)Το φινίρισμα

3.2.1 Σχεδιασμός του αντικειμένου (Design).

Αρχικά, στο πρώτο στάδιο κατασκευής ενός αντικειμένου, όπως σε κάθε περίπτωση, έτσι και στην περίπτωση της τρισδιάστατης εκτύπωσης πρέπει να γίνει ο σχεδιασμός, ώστε από μία απλή σκέψη, να αποτυπωθεί σαν εικόνα με πλήρη χαρακτηριστικά, ώστε να είναι δυνατόν να προχωρήσουμε στην κατασκευή του, ιδίως εάν πρόκειται για πρωτότυπο μοντέλο. Ο σχεδιασμός μπορεί να γίνει με κάποιο από τα διάφορα σχεδιαστικά CAD προγράμματα που κυκλοφορούν στην αγορά. Το 3D CAD μοντέλο πρέπει να είναι στερεό μοντέλο, δηλαδή να ορίζεται επακριβώς ο όγκος του. Δεν μπορεί να περιλαμβάνει δηλαδή ακμές που να ανήκουν σε μια μόνο επιφάνεια. Επίσης είναι δυνατό να σαρώσουμε ένα ήδη υπάρχον αντικείμενο μέσω τρισδιάστατου σαρωτή και να προχωρήσουμε στην αναπαραγωγή του.

3.2.2 Παραμετροποίηση (Parameterization).

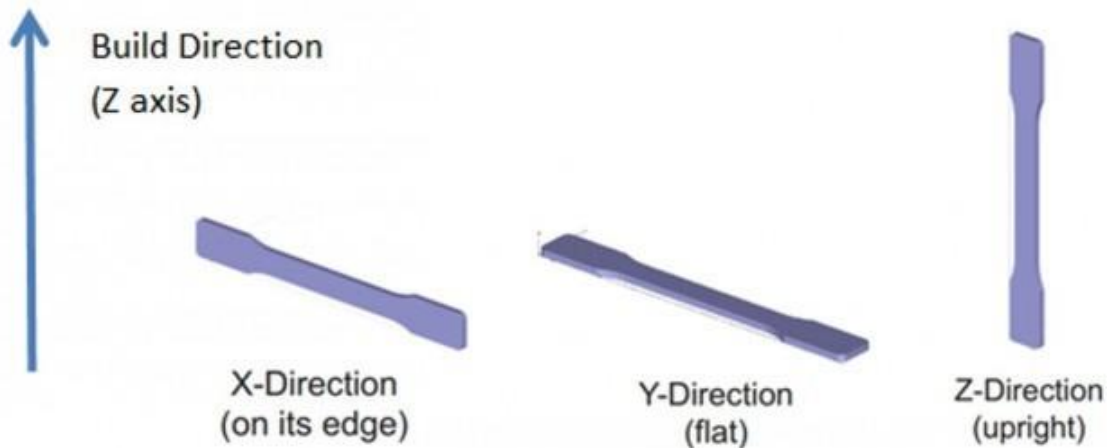
Στο δεύτερο στάδιο γίνεται ο προγραμματισμός των παραμέτρων της κατασκευής του μοντέλου ,η μεταφορά των γεωμετρικών δεδομένων σε κώδικα που θα διαβάζει η μηχανή, ο τεμαχισμός του μοντέλου στις επιφάνειες που θα εκτυπωθούν.

Για τη μεταφορά των γεωμετρικών πληροφοριών γίνεται ο διαχωρισμός και η προσέγγιση μέσω τριγώνων, δημιουργείται ουσιαστικά μια ψηφιδωτή αναπαράσταση χωρίς να προστίθενται επιπλέον πληροφορίες για τις ιδιότητες του αντικειμένου.

Η κωδικοποίηση αυτή του μοντέλου λέγεται STL, από το αντίστοιχο πρότυπο που καθιερώθηκε από την 3D Systems.

Αφού γίνει η μεταφορά των πληροφοριών γεωμετρίας, πρέπει να ορισθούν οι παράμετροι διεργασίας οι οποίοι παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στις ιδιότητες που θα προσδώσουμε στο εξάρτημα που θα κατασκευάσουμε. Πρώτος παράγοντας είναι η ανάλυση, η οποία αφορά στις τρεις διαστάσεις της κατασκευής. Συγκεκριμένα, έχουμε να κάνουμε με την κίνηση της κεφαλής στο επίπεδο x- y για τη δημιουργία της μιας στρώσης και την κίνηση ως προς τον άξονα z για τη συνέχιση της επόμενης

κλπ. Συνεπώς όταν μιλάμε για την ανάλυση στην τρισδιάστατη εκτύπωση, μιλάμε για δύο διαφορετικές αναλύσεις, όπου ανάλυση ως προς τον άξονα z εννοούμε το πάχος στρώσης ενώ ως προς το επίπεδο x- y, αναφερόμαστε στο πλάτος της γραμμής κατά την εναπόθεση υλικού ή περάσματος δέσμης laser στον πολυμερισμό (π.χ. στην sla), στο κενό μεταξύ δύο διαδοχικών ραφών(infill), ενώ και άλλοι σημαντικοί παράγοντες που παίζουν ρόλο είναι ο προσανατολισμός και ο αριθμός περιγραμμάτων.



Εικόνα 1: Διαφορετικοί προσανατολισμοί εκτύπωσης για δοκίμια για πείραμα εφελκυσμού (Phil Lambert, 2014).

Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικότερα αυτοί οι παράμετροι καθώς και οι επιδράσεις τους στις μηχανικές ιδιότητες του αντικειμένου, για κατασκευή με τη μέθοδο μοντελοποίησης με εναπόθεση υλικού(fdm), που είναι και η μέθοδος που χρησιμοποιήσαμε για το πείραμα.

Στο τέλος έχουμε τη δημιουργία της υποστηρικτικής δομής για τη διασφάλιση της σταθερότητας της κατασκευής κατά τη διεργασία. Η επιλογή των σημείων που χρειάζονται υποστηρικτική δομή γίνεται αυτόματα.

3.2.3 Κατασκευή (Creation)

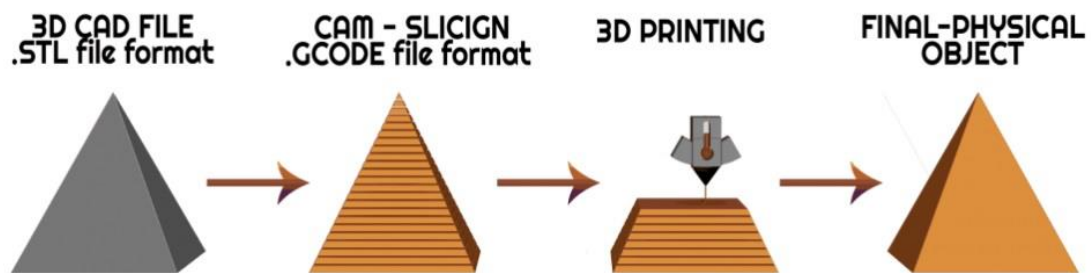
Στο τρίτο στάδιο εκτελούνται οι εντολές που έχουμε δώσει στη μηχανή και δημιουργείται το στερεό αντικείμενο καθώς και η δομή υποστήριξης όπου αυτή απαιτείται. Έπειτα ορίζονται οι υπόλοιπες παράμετροι που εξαρτώνται από το υλικό, τη χρησιμοποιούμενη τεχνική, τις επιθυμητές ιδιότητες του τελικού αντικειμένου την ποιότητα των επιφανειών κλπ. Τελευταία διαδικασία αυτού του σταδίου αποτελεί ο τεμαχισμός του αντικειμένου σε διαδοχικά επίπεδα τα οποία θα χτιστούν το ένα πάνω στο άλλο για να δώσουν το τελικό αποτέλεσμα και γίνεται και η επιλογή του πάχους στρώματος η οποία περιγράφεται ως βήμα τεμαχισμού και από αυτόν επηρεάζεται σε

μεγάλο βαθμό η ακρίβεια του τελικού αντικειμένου. Από αυτή τη διαδικασία παίρνουμε το αρχείο διατομών (sliced file).

3.2.4 Το φινίρισμα (Finish)

Στο τελικό στάδιο γίνεται η απομάκρυνση του υλικού από τη μηχανή, η αφαίρεση τυχόν δομών υποστήριξης και υπολειμμάτων πρώτης ύλης.

Ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη τεχνική κατασκευής, μπορεί να χρειαστούν περεταίρω εργασίες όπως βάψιμο, λείανση κλπ.

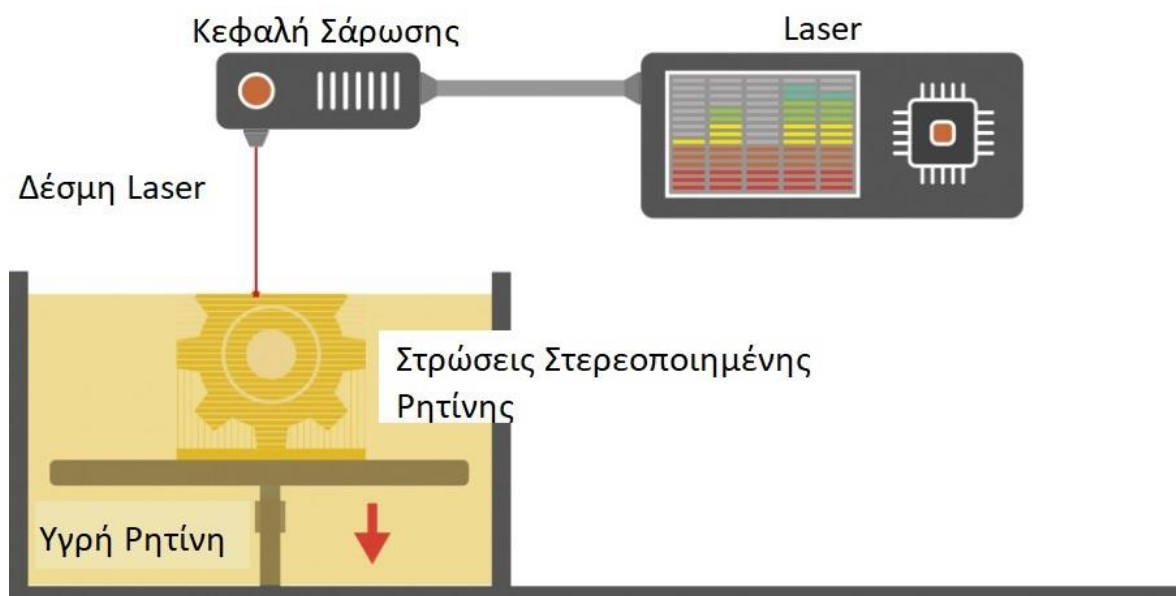


Εικόνα 2: Διαδικασία 3D εκτύπωσης σε 4 στάδια(my3dconcepts, 2017).

3.3 ΟΙ ΚΥΡΙΟΤΕΡΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ (MAINLY USED 3D PRINTING TECHNIQUES).

3.3.1 Στερεολιθογραφία (SLA)

Η στερεολιθογραφία αποτελεί μια μέθοδο κατασκευής στερεών αντικειμένων για την οποία χρησιμοποιείται υπεριώδης ακτινοβολία για την στερεοποίηση φωτοπολυμερούς ρητίνης. Η ακτινοβολία αυτή προσπίπτει με τη μορφή εστιασμένης ακτίνας λέιζερ, σαρώνοντας την επιφάνεια ενός κάδου υγρής ρητίνης και στερεοποιεί τις διαδοχικές διατομές.



Εικόνα 3: Διαδικασία 3D εκτύπωσης με τη μέθοδο της Στερεολιθογραφίας (http://brain.ee.auth.gr/dokuwiki/doku.php?id=3d_printer:3d_printer).

Στη στερεολιθογραφία για τη στήριξη του υπό κατασκευή αντικειμένου απαιτείται η χρήση υποστηρικτικού μέσου για την αποτροπή στρεβλώσεων κατά τη δημιουργία του ή για να μη καταστραφεί από τα κινούμενα μέρη της μηχανής. Το προστατευτικό μέσο δημιουργείται αυτόματα στο CAD κώδικα στη διάρκεια της προετοιμασίας του μοντέλου και πρέπει να αφαιρεθεί από το ολοκληρωμένο προϊόν.

Οι εκτυπωτές SLA μπορούν να είναι πολύ ακριβείς και γρήγοροι. Το μειονέκτημα τους είναι ότι οι ρητίνες είναι πολύ ακριβές και χρειάζονται αποθήκευση σε ειδικούς χώρους επειδή πολυμερίζονται στο φως.

Επίσης λόγω της ευθραυστότητας τους δεν μπορούν να αντέξουν πολύ δύναμη, με συνέπεια να χρησιμοποιούνται κυρίως για την κατασκευή πρωτοτύπων και όχι στην παραγωγή.

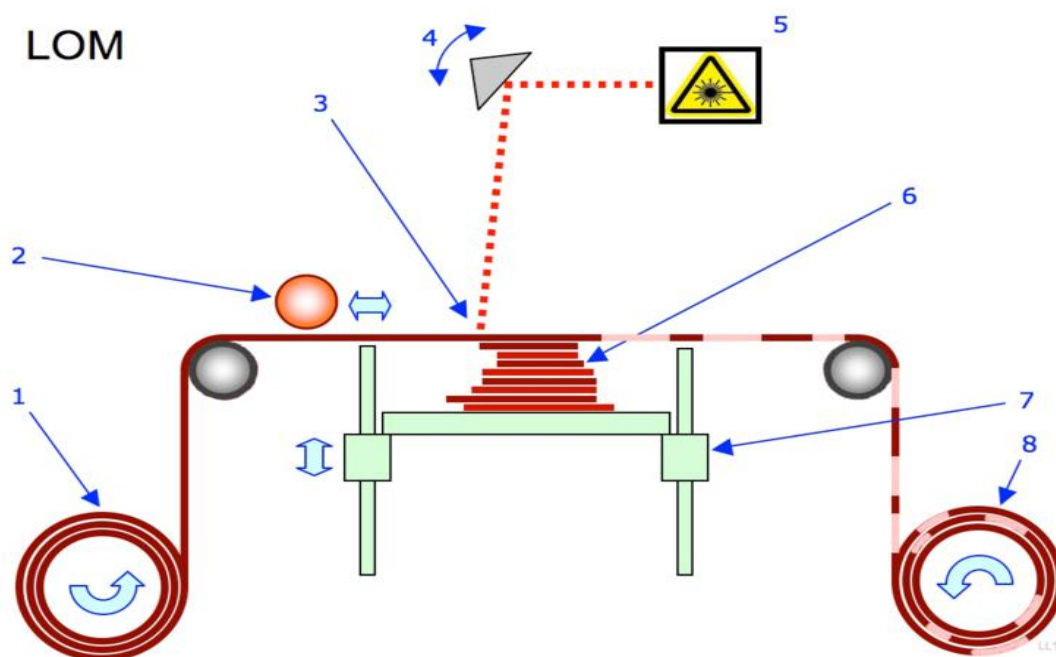
3.3.2 Συγκόλληση Επάλληλων Φύλλων (Laminated Object Manufacturing (LOM))

Στην τεχνική αυτή χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη φύλλα κυρίως χαρτιού, πλαστικού ή μετάλλου.

Μία δέσμη λέιζερ ή λεπίδα χρησιμοποιείται για να τεμαχίσει φύλλα, σχηματίζοντας την κάθε στρώση ξεχωριστά. Κάθε κομμένο φύλλο επικαλύπτεται με θερμική κόλλα και συγκολλάται με την επόμενη στρώση.

Η τροφοδοσία των φύλλων γίνεται μέσω ενός ρολού στη μία πλευρά της μηχανής, ενώ το υπόλειμμα παραλαμβάνεται από την άλλη. Η δέσμη λέιζερ διατρέχει μόνο το εξωτερικό περίγραμμα κάθε διατομής, ενώ οι εξωτερικές περιοχές διαγραμμίζονται σε μικρά ορθογώνια τμήματα για την εύκολη αφαίρεση τους στο τέλος της κατεργασίας.

Ένας θερμαινόμενος κύλινδρος πιέζει την επιφάνεια κάθε νέου στρώματος και προκαλεί τη συγκόλληση του στα προηγούμενα.



Εικόνα 4: Διαδικασία 3D εκτύπωσης με LOM: 1)Ρολό τροφοδοσίας, 2) Θερμαινόμενος κύλινδρος , 3)Δέσμη laser, 4) Πρίσμα σάρωσης , 5) Μονάδα laser, 6)Στρώσεις, 7)Κινούμενη πλατφόρμα, 8) Απορρίμματα
(https://en.wikipedia.org/wiki/Laminated_object_manufacturing#/media/File:Laminated_object_manufacturing.png).

Δε χρειάζεται δημιουργία πλέγματος στήριξης αφού κατά την κατασκευή του αντικειμένου το υλικό υποστήριξης δημιουργείται γύρω από το κομμάτι. Αυτό από την άλλη καθιστά επίπονη τη διαδικασία αφαίρεσης του, η οποία γίνεται χειροκίνητα και απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή.

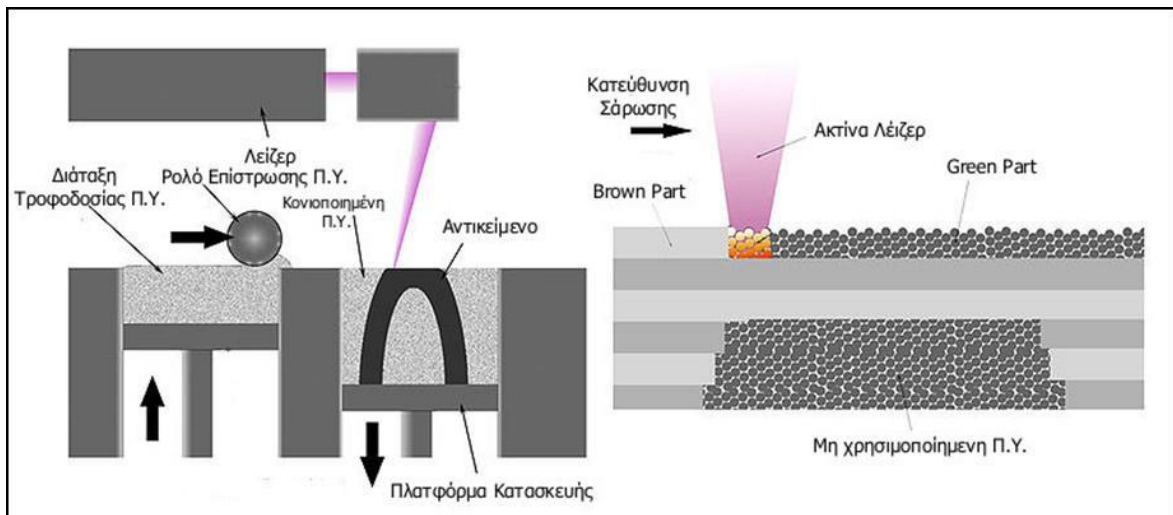
Με τη μέθοδο αυτή μπορούν να κατασκευαστούν εύκαμπτα και δυνατά προϊόντα τα οποία όμως είναι πιο επιρρεπή στη φθορά. Επίσης, ενώ το κόστος παραγωγής είναι χαμηλό, η φθορά του υλικού είναι μεγαλύτερη και σε υλικά ακριβότερα από το χαρτί, δημιουργεί υψηλό κόστος λόγω του σπαταλημένου υλικού.

Τέλος, αντικείμενα που περιέχουν κοίλα μορφολογικά χαρακτηριστικά με κλειστούς όγκους, πρέπει να κατασκευαστούν σε δύο ή περισσότερα τμήματα και ύστερα να κολληθούν μεταξύ τους, αφού σε αυτή την περίπτωση η αφαίρεση του ανεπιθύμητου υλικού είναι αδύνατη από το εσωτερικό των κοιλοτήτων.

3.3.3 Επιλεκτική Συσσωμάτωση με Λείζερ (Selective Laser Sintering (SLS)).

Η επιλεκτική συσσωμάτωση με λέιζερ μπορεί να θεωρηθεί και σαν εναλλακτική μέθοδος της στερεολιθογραφίας, αφού και εδώ χρησιμοποιείται δέσμη λέιζερ για τη στερεοποίηση υλικού, με την κύρια διαφορά όμως ότι εδώ αντί για ρητίνη η πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται είναι κονιοποιημένη.

Μεγάλο πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι η ποικιλία υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Η κατασκευή του αντικειμένου γίνεται μέσω επαναληπτικής απόθεσης στρώσεων κόκκων και της επιλεκτικής θέρμανσής τους με δέσμη λέιζερ ώστε να γίνει η συσσωμάτωση μεταξύ των στρώσεων των σωματιδίων.



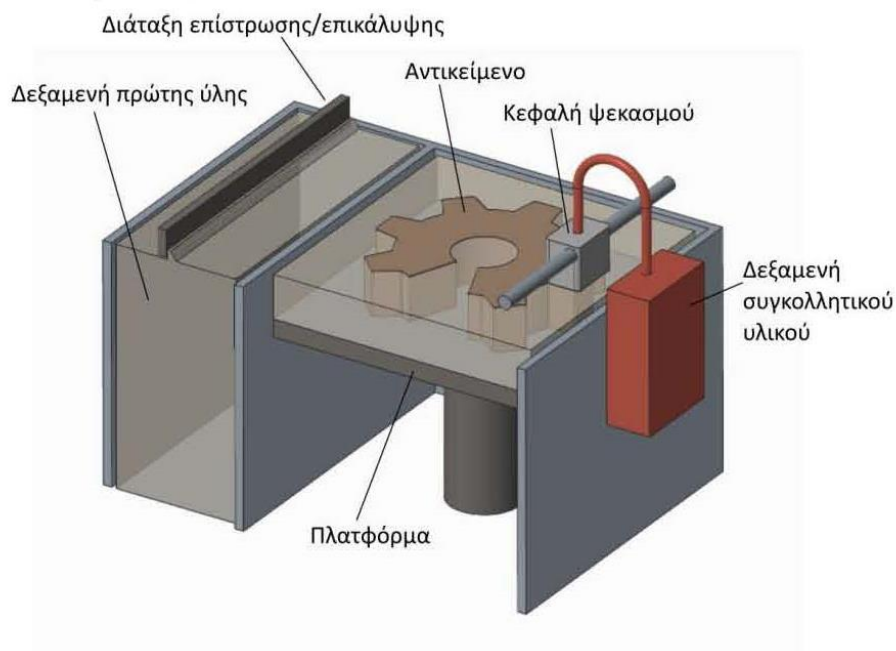
Εικόνα 5: Διαδικασία κατασκευής με επιλεκτική συσσωμάτωση με λέιζερ (Γιαννάτσης κα, προσαρμογή του "Selective laser sintering process" by Materialgeez - Own work. Licensed under CC BY-SA 3.0 via Commons, 2015)

Επειδή το προς κατασκευή αντικείμενο είναι βυθισμένο σε σκόνη, δεν απαιτείται δομή υποστήριξης για κάθε νέα στρώση (η στήριξη παρέχεται από τα προηγούμενα στρώματα των ανεπεξέργαστων κόκκων).

Ενώ η τεχνική αυτή προσφέρει καλή μηχανική αντοχή, μειονέκτημα της είναι η μεγάλη τραχύτητα που έχουν οι επιφάνειες του τελικού αντικειμένου ,η πορώδης υφή και η χαμηλή ακρίβεια.

3.3.4 Επιλεκτικός Ψεκασμός Συγκολλητικής Ουσίας (Binder Jetting)

Η μέθοδος αυτή μοιάζει με την εκτύπωση ψεκασμού, μόνο που εδώ αντί για μελάνι, γίνεται εναπόθεση συγκολλητικής ουσίας, όπου γίνεται επιλεκτικά σε προσδιορισμένα σημεία, όπου έχει γίνει εναπόθεση κεραμικής πούδρας, οδηγώντας σε συγκόλληση των κόκκων της, συνθέτοντας έτσι τις στρώσεις οι οποίες με τη σειρά τους συνθέτουν το τελικό αντικείμενο.



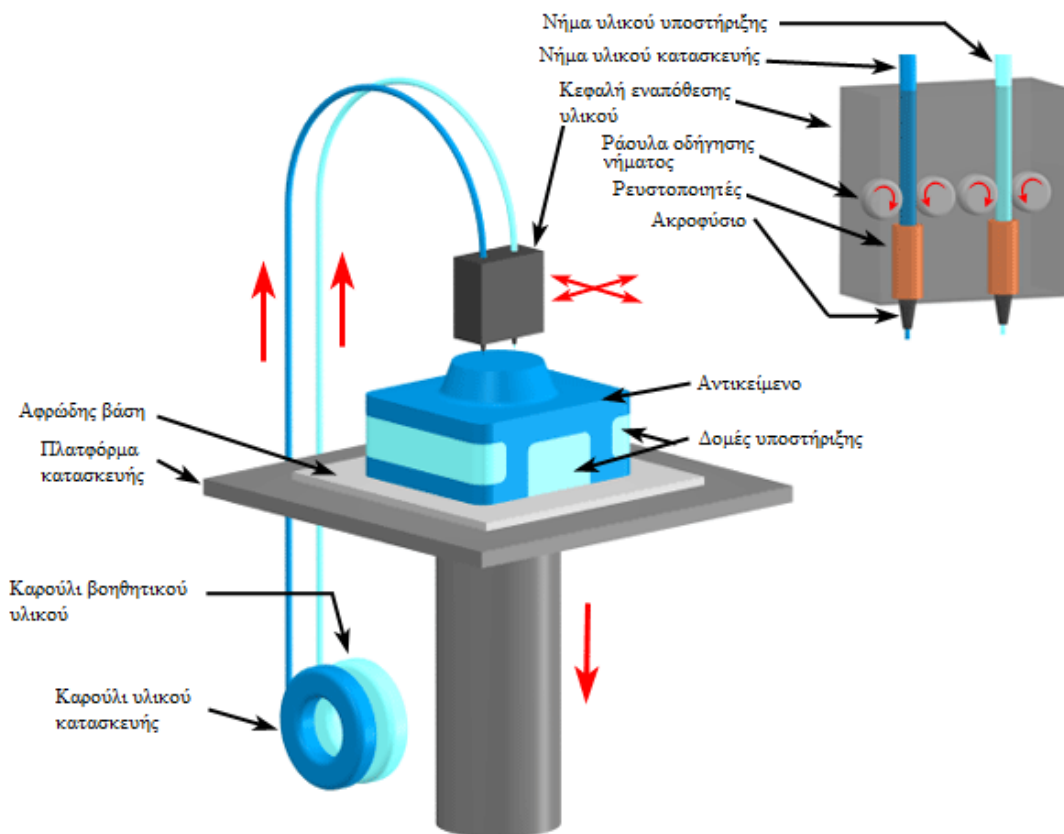
Εικόνα 6: Διαδικασία κατασκευής με επιλεκτικό ψεκασμό συγκολλητικής ουσίας(Γιαννάτσης κα, 2015).

Σαν πρώτη ύλη χρησιμοποιείται κυρίως γύψος ή πούδρα η οποία έχει ως βάση το άμυλο και διάλυμα που έχει ως βάση το νερό. Το τελικό αντικείμενο είναι αρκετά πορώδες και για να ενισχυθεί η αντοχή του, εμποτίζεται σε διάλυμα ενισχυτικού υλικού, ώστε να καλυφθούν τα κενά μεταξύ των πόρων, καθώς επίσης μπορεί να υπάρξει και κάποια περεταίρω θερμική κατεργασία.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για τη δημιουργία καλουπιών και πυρήνων, χωρίς ωστόσο μέχρι στιγμής να υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής υψηλής ποιότητας επιφανειών. Είναι ιδανική για τη δημιουργία πολύχρωμων αντικειμένων.

3.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΥΛΙΚΟΥ (FUSED DEPOSITION MODELING (FDM))

Η συγκεκριμένη τεχνολογία κάνει χρήση θερμοπλαστικών πολυμερών, όπως το ABS, το PLA κ.α. Η δημιουργία του μοντέλου γίνεται κατά τον εξής τρόπο: από μια κεφαλή εξέρχονται ίνες θερμαινόμενου πλαστικού, η κεφαλή κινείται κατά μήκος του x και y άξονα της πλατφόρμας κατασκευής εναποθέτοντας το υλικό, το οποίο είναι σε μορφή νήματος, στα επιθυμητά σημεία δημιουργώντας έτσι την πρώτη στρώση. Κατόπιν η πλατφόρμα κατασκευής κατέρχεται ή η κεφαλή ανεβαίνει, ανάλογα τον τύπο της μηχανής, και η κεφαλή συνεχίζει εναποθέτοντας το δεύτερο στρώμα πάνω στο πρώτο. Το νήμα τροφοδοτείται μέσω ράουλων στην κεφαλή, όπου και θερμαίνεται ως το σημείο τήξης του στους υγροποιητές και κατόπιν εξέρχεται μέσω του ακροφύσιου της κεφαλής. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται ώσπου να ολοκληρωθεί το αντικείμενο.



Εικόνα 7: Διαδικασία κατασκευής με FDM (CustomPartNet©, 2008).

Η τεχνολογία αυτή αναπτύχθηκε σε επίπεδο παραγωγής το 1990 από την Stratasys και είναι διαδεδομένη σε εφαρμογές όπου στο προς κατασκευή αντικείμενο παίζουν κρίσιμο ρόλο οι μηχανικές αντοχές, αφού τα περισσότερα θερμοπλαστικά πολυμερή που χρησιμοποιούνται διακρίνονται για την ανθεκτικότητά τους.

Για την ομαλή εναπόθεση του υλικού στα ήδη υπάρχοντα στρώματα και για την εξάλειψη παραμορφώσεων λόγω ανομοιόμορφης ψύξης μεταξύ των κάτω στρώσεων

και των σημείων που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση με την κεφαλή κατά τη διαδικασία της εναπόθεσης του θερμού υλικού, καθώς επίσης και για την αποφυγή απότομης ψύξης, όλη η διάταξη λειτουργεί μέσα σε θάλαμο ο οποίος βρίσκεται σε συγκεκριμένη θερμοκρασία. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται και η θερμική ενέργεια που απαιτείται για την τήξη της πρώτης ύλης, καθιστώντας την όλη διαδικασία αποδοτικότερη και καλύτερα ελεγχόμενη.

Η υποστηρικτική δομή, η οποία απαιτείται για την στήριξη των αντικειμένων, κατασκευάζεται από διαφορετικό υλικό που εξέρχεται μέσω άλλης κεφαλής και συνήθως είναι νάιλον, άλλα πολυμερή ή κεριά. Η απομάκρυνσή της υποστηρικτικής δομής στη συγκεκριμένη μέθοδο γίνεται με μεγάλη ευκολία.

Χάρης στην ποικιλία των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τη συγκεκριμένη τεχνολογία (πολυμερή, πολυκαρβονικά, κεραμικά, μέταλλα χαμηλής τήξης κ.α.), γίνεται εφικτή η κατασκευή αντικειμένων που απαιτούν μεγαλύτερη ακρίβεια και υψηλότερη αντοχή. Για το λόγο αυτό καθώς και λόγω της απλούστερης και οικονομικότερης κατασκευής των μηχανημάτων και της ευκολίας στη χρήση τους, η τεχνολογία μοντελοποίησης με εναπόθεση υλικού είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος προσθετικής κατασκευής.

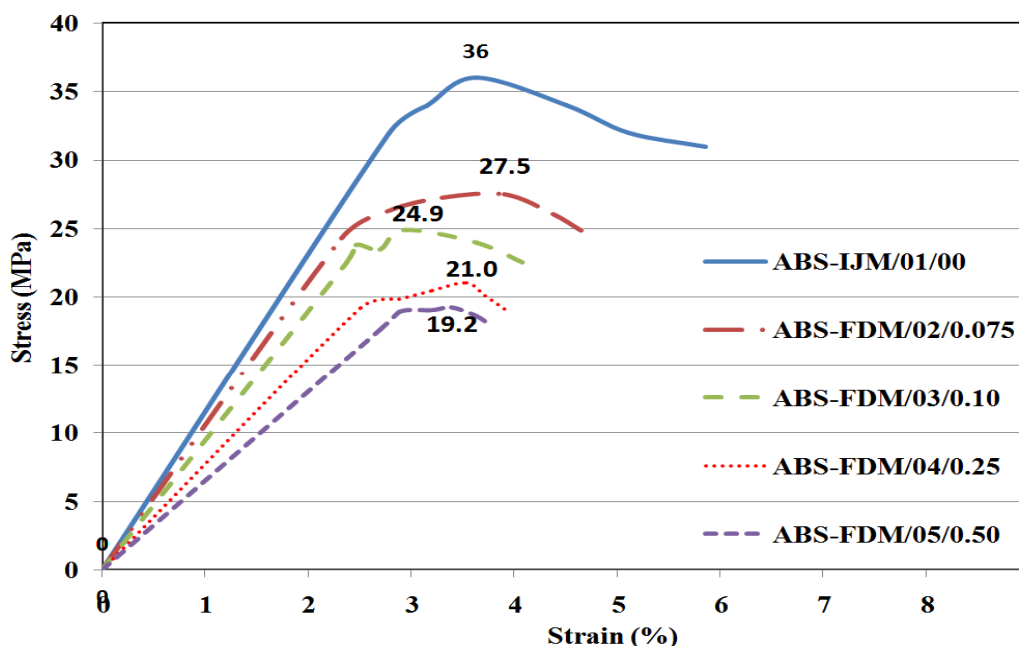
3.5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ (BUILDING PARAMETERS AND THEIR AFFECT TO THE MECHANICAL PROPERTIES)

Όπως αναφέραμε νωρίτερα, στην προσθετική κατασκευή αντικειμένων, οι παράμετροι διεργασίας στην προσθετική κατασκευή, επηρεάζουν σημαντικά το αντικείμενο τόσο ως προς τις μηχανικές του ιδιότητες, όσο και ως προς το αισθητικό αποτέλεσμα.

Οι σημαντικότερες παράμετροι που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες ενός αντικειμένου που έχει κατασκευασθεί με τη μέθοδο FDM, όπως επισημαίνουν οι Swayam και Siba (2014), είναι ο αριθμός των περιγραμμάτων, το πάχος στρώσης, το πλάτος της ραφής που χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει τη στρώση, η γωνία ραφής και η γωνία Δέλτα, όπου γωνία ραφής νοείται η γωνία εναπόθεσης ως προς τον άξονα x της πλατφόρμας κατασκευής και γωνία Δέλτα είναι η γωνία μεταξύ της εκάστοτε στρώσης (μόλις ολοκληρωθεί μια στρώση, η επόμενη γίνεται αντίστροφα, με τη γωνία που έχει οριστεί) και τελευταία παράμετρος είναι η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών διαδρομών που ορίζει την πυκνότητα του στρώματος (infill). Οι παραπάνω κατέληξαν στο συμπέρασμα, ότι αλλάζοντας τη γωνία επικάλυψης και των αριθμό των περιγραμμάτων μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό. Αλλάζοντας τη γωνία εναπόθεσης από στρώση σε στρώση, το εξάρτημα που κατασκευάζουμε αποκτά πιο ιστροπική συμπεριφορά.

Μια άλλη πειραματική μελέτη (Pritish κ.α., 2016), χωρίς προσομοίωση αυτή τη φορά, έδειξε ότι το πάχος στρώσης επηρεάζει άμεσα και σε μεγάλο βαθμό, τόσο την αντοχή σε εφελκυσμό του υλικού, στην προκειμένη περίπτωση abs, όσο τη σκληρότητά του και την αντοχή σε κρούση. Μάλιστα η σύγκριση έγινε ανάμεσα σε δοκίμια που κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο FDM χρησιμοποιώντας τέσσερα διαφορετικά πάχη στρώσης(0,075mm, 0,10mm, 0,25mm και 0,50mm) και δοκίμια που κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο της χύτευσης με έγχυση.

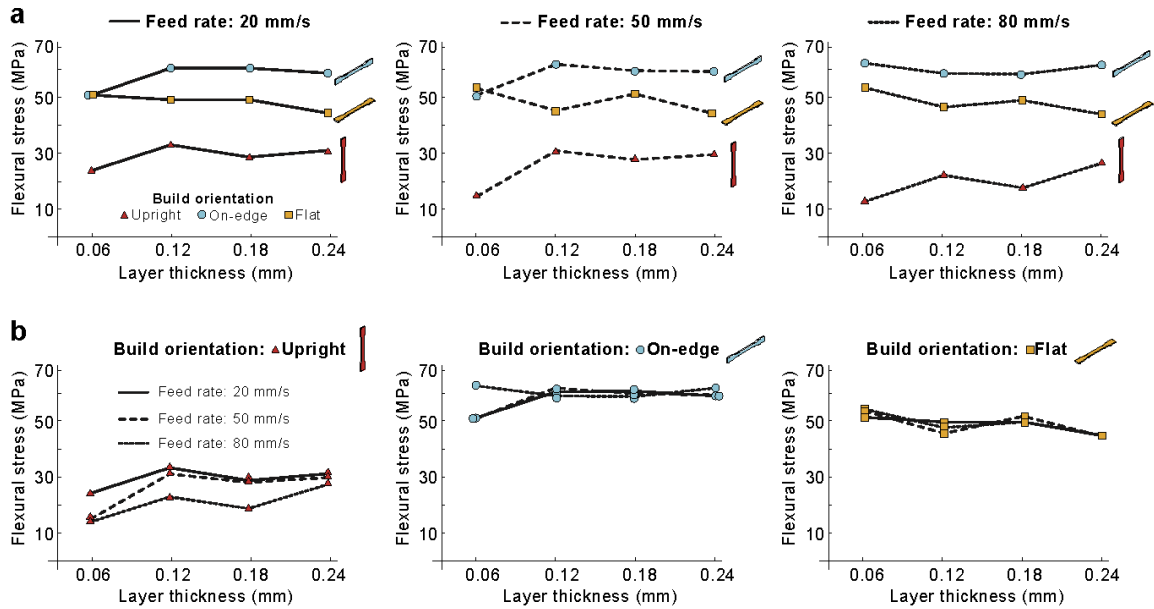
Η δοκιμή αυτή έδειξε ότι τα δοκίμια με το μικρότερο πάχος στρώσης παρουσίασαν τη μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό(27,5MPa) ενώ όσο αυξανόταν το πάχος στρώσης, η αντοχή μειωνόταν φτάνοντας σε ένα ποσοστό 46% κάτω για τα δοκίμια με το μεγαλύτερο πάχος στρώσης.



Εικόνα 8: Καμπύλη τάσεων- παραμορφώσεων από πείραμα εφελκυσμού σε δοκίμια από ABS για πάχη στρώσεων 0,075, 0,1, 0,25 και 0,50mm και δοκιμίων μέσω χύτευσης. (Pritish κ.α., 2016).

Το ίδιο ίσχυσε και για την αντοχή σε κρούση, εδώ η διαφορά ήταν 54,5%, ενώ για τη σκληρότητα υπήρχε πάλι αντίστοιχη μείωση της τιμής της από την περίπτωση του πολύ λεπτού πάχους στρώσης μέχρι 0,25mm πάχος στρώσης, αφού στα 0,5mm παρουσιάστηκε αύξηση της σκληρότητας. Ωστόσο μία άλλη μελέτη (J.M. Chacón κ.α, 2017), με δοκίμια από PLA, έδειξε ότι τα αποτελέσματα αυτά εξαρτώνται από την ταχύτητα εναπόθεσης υλικού. Για παράδειγμα από δοκιμή σε εφελκυσμό και κάμψη φάνηκε ότι για ταχύτητα εναπόθεσης υλικού $F_R=20\text{mm/min}$, οι διαφοροποιήσεις ανάμεσα στα δοκίμια με διαφορετικά πάχη στρώσης ήταν πολύ μικρές, ενώ για $F_R=50\text{mm/min}$ και $F_R=80\text{mm/min}$, οι διαφορές στην αντοχή ήταν

περισσότερο αισθητές, στην αντοχή σε εφελκυσμό κυρίως, με τα δοκίμια με μικρότερα πάχη στρώσης να παρουσιάζουν πάλι τη μέγιστη αντοχή. Επίσης οι μεγάλες διαφοροποιήσεις στις μετρούμενες τιμές ανάμεσα στα δοκίμια με διαφορετικό προσανατολισμό εκτύπωσης, τονίζουν την ανισοτροπία του αντικειμένου.



Εικόνα 9: Επίδραση (a) του ρυθμού εναπόθεσης και (b) του προσανατολισμού εκτύπωσης στην αντοχή σε κάμψη . (J.M. Chacón κα, 2017).

Ο Shabat D κ.α. στην έρευνα που πραγματοποίησαν το 2017, η οποία περιλάμβανε πείραμα κάμψης τριών σημείων για το υλικό abs plus, έδειξε την επίδραση που έχει στην αντοχή του εξαρτήματος, ο προσανατολισμός και η γωνία εναπόθεσης. Συγκεκριμένα εξετάστηκαν δύο τύποι προσανατολισμών: κατασκευή προς την κατεύθυνση του άξονα x και ως προς τον άξονα z, όπου τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στην 1^η περίπτωση είχαμε πολύ μεγαλύτερη αντοχή και δυσθραυστότητα σε σχέση με τη 2^η. Ως προς τη γωνία εναπόθεσης εξετάστηκαν τέσσερις περιπτώσεις 15°, 30°, 60° και 75°. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Measured force and displacements (second printing tray)	Printing angles degrees			
	15°	30°	60°	75°
F max [N], specimen 1	241.0	212.0	143.0	118.0
F max [N], specimen 2	247.0	223.0	147.0	128.0
F max [N], specimen 3	253.0	233.0	155.0	134.0
F max [N], avg. value	247.0	222.7	148.3	126.7
σ [MPa], specimen 1	56.0	49.3	33.2	27.4
σ [MPa], specimen 2	57.4	51.8	34.2	29.8
σ [MPa], specimen 3	58.8	54.2	36.0	31.2
σ [MPa], avg. value	57.4	51.8	34.5	29.5
δ max [mm], specimen 1	4.5	3.0	1.7	1.4
δ max [mm], specimen 2	4.0	3.6	1.7	1.4
δ max [mm], specimen 3	5.0	3.5	2.0	1.5
δ max [mm], avg. value	4.5	3.4	1.8	1.4

Πίνακας 1: Αποτελέσματα μετρήσεων από πείραμα κάμψης 3 σημείων για δοκίμια που κατασκευάστηκαν υπό διαφορετικές γωνίες εναπόθεσης, όπου δ η ολική παραμόρφωση λόγω κάμψης (Shabat D κ.α., 2017).

4 ΠΟΛΥΜΕΡΗ (POLYMERS)

Τα πολυμερή είναι χημικές ενώσεις με μακρομόρια, τα οποία σχηματίζονται από το συνδυασμό μικρών μορίων ομοίων μεταξύ τους. Τα μικρά αυτά μόρια καλούνται μονομερή και είναι απλές χημικές ενώσεις.

4.1 ΤΡΟΠΟΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ (CREATION)

Η διαδικασία κατά την οποία τα μονομερή πραγματοποιούν αυτές τις ενώσεις, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία των μεγαλομορίων που αυτά με τη σειρά τους συνθέτουν τα πολυμερή, καλείται **πολυμερισμός**.

Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται τα πολυμερή προσθήκης, ενώ υπάρχει και η περίπτωση των πολυμερών που προκύπτουν μέσω διαμοριακής απόσπασης μικρών μορίων όπως το H_2O . Τα πολυμερή αυτά είναι γνωστά ως μονομερή συμπύκνωσης.

Τα πολυμερή λοιπόν, διακρίνονται ως προς τον τρόπο παρασκευής τους σε πολυμερή **προσθήκης** και πολυμερή **συμπύκνωσης**.

Κατά την αντίδραση του πολυμερισμού, έχουμε διάσπαση των διπλών και τριπλών δεσμών μεταξύ των μορίων και έτσι συνδέονται μεταξύ τους πολλά μονομερή μόρια και σχηματίζονται τα μακρομόρια. Χαρακτηριστικό αυτών των ενώσεων είναι ότι το παραγόμενο υλικό, έχει χημική σύσταση ίδια με την πρώτη ύλη και το πολλαπλάσιο μοριακό βάρος.

Ένας άλλος διαχωρισμός που μπορεί να γίνει είναι ως προς το πλήθος των χημικών ουσιών που συντελούν στο σχηματισμό ενός πολυμερούς. Έτσι έχουμε τα **ισοπολυμερή**, τα οποία αποτελούνται από την ίδια χημική ουσία, τα ίδια μονομερή δηλαδή και τα **συμπολυμερή** που αποτελούνται από περισσότερες.

Κατά τη διάρκεια της αντίδρασης της **πολυσυμπύκνωσης**, δημιουργούνται ελεύθερες ρίζες από την αποβολή ορισμένων μορίων των μονομερών, επιτρέποντας έτσι τη σύνδεση μεταξύ των μονομερών. Για την αύξηση του μοριακού βάρους σε αυτή την αντίδραση απαιτείται πολύς χρόνος και η διεργασία γίνεται σταδιακά. Προϊόντα της μεθόδου της πολυσυμπύκνωσης είναι το Nylon, οι πολυεστέρες και τα πολυμερή φορμαλδεΐδης με φαινόλη.

Μια άλλη αντίδραση, παρόμοια με τη μέθοδο του πολυμερισμού είναι αυτή της **πολυπροσθήκης**. Κι εδώ έχουμε τη σύνθεση δύο μονομερών, διαφορετικών μεταξύ τους, χωρίς να γίνεται αποβολή προϊόντων αντίδρασης.

4.2 ΔΟΜΗ (STRUCTURE)

Η δομή ενός πολυμερούς καθορίζεται από τη χημική δομή του, η οποία αποτελείται από τη σύσταση (constitution) και τη στερεοταξική διευθέτηση (configuration) και δεύτερον από τη φυσική δομή η οποία αποτελείται από τον προσανατολισμό (orientation) και την κρυσταλλικότητα (crystallinity).

Τρίτο στοιχείο της δομής του πολυμερούς και συνδετικό κρίκο μεταξύ των άλλων δύο, αποτελεί ο σχηματισμός/διαμόρφωση (conformation). Από αυτόν καθορίζεται ο προσανατολισμός και η κρυσταλλικότητα της ένωσης και παράμετροι του είναι η σύσταση και η στερεοταξική διευθέτηση.

Συνήθως τα πολυμερή είναι πλήρως άμορφα ή μερικώς κρυσταλλικά σε στερεά κατάσταση ενώ σπανίως μπορεί να είναι σχεδόν τέλεια κρυσταλλικά.

Κατά την κρυστάλλωση του πολυμερούς από το τήγμα του, οι κρύσταλλοι αναπτύσσονται από το κέντρο προς τα έξω, ακτινωτά, μέχρι να συναντηθούν με γειτονικού διαφορετικού μεγέθους και να απλωθούν σε όλο τον όγκο του κρυσταλλικού υλικού. Οι δομές αυτές είναι γνωστές ως σφαιρουλίτες και ο ρόλος τους είναι ανάλογος των κρυσταλλικών κόκκων στα πολυκρυσταλλικά μέταλλα.

Μέθοδοι προσδιορισμού του βαθμού κρυσταλλικότητας είναι οι εξής :

- Περίθλαση ακτίνων X
- Ηλεκτρονική μικροσκοπία
- Μέτρηση ειδικού όγκου
- Μέθοδος NMR
- Μέτρηση της Ενθαλπίας Τήξης

Τα πολυμερή μπορούν να παραχθούν από χημικό μετασχηματισμό φυσικών προϊόντων (ημισυνθετική), είτε λαμβάνονται απευθείας από τη φύση (φυσικά) είτε μπορεί να είναι σύνθεση η οποία δεν υπάρχει στη φύση (συνθετικά).

4.3 ΧΡΗΣΗ (APPLICATION)

Η **χρήση** τους ποικίλει και γι' αυτό το λόγο υπάρχουν πολυμερή τα οποία παράγονται σε μεγάλες ποσότητες, είναι οικονομικά και χρησιμοποιούνται για να καλύπτουν καθημερινές ανάγκες, υπάρχουν πιο εξειδικευμένα πολυμερή με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες (πολυαμίδια- nylon, εποξειδικές ρητίνες κ.α.) και υπάρχουν και τα προηγμένα (high performance) με πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες, αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, παράγονται σε μικρές ποσότητες και χρησιμοποιούνται σε ειδικές εφαρμογές. Τέτοια υλικά είναι το PMMA, PTEE, αιθεροκετόνη κ.α.

4.4 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΒΑΣΕΙ ΜΗΧΑΝΟΘΕΡΜΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ (CLASSIFICATION BASED ON MECHANOTHERMIC PROPERTIES)

Οι **μηχανοθερμικές ιδιότητες** των πολυμερών καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό τη χρήση τους και τα διαχωρίζουν στις παρακάτω τρεις κατηγορίες :

4.4.1 Θερμοπλαστικά (thermoplastics)

Τα μόρια στα **θερμοπλαστικά** συνδέονται σε γραμμική μορφή, με γραμμικές αλυσίδες που παραμένουν ανεξάρτητες από τις γειτονικές. Κατά τη θέρμανση τους τα μακρομόρια τους χάνουν τη συνοχή τους και μπορούν να ολισθαίνουν μεταξύ τους, πράγμα που δίνει τη δυνατότητα στο πολυμερές να γίνεται εύπλαστο. Μπορούν να διατηρηθούν σε αυτή την κατάσταση για όσο επιδρά η θερμότητα.

Η απόψυξη που ακολουθεί δίνει στερεό υλικό ενώ η διεργασία είναι εξ' ολοκλήρου αντιστρεπτή.

Αναλόγως τη χημική τους σύσταση, τα θερμοπλαστικά πολυμερή μπορεί να είναι στερεά ή ρευστά. Επίσης είναι ευαίσθητα στους διαλύτες και στη θερμοκρασία.

Είναι προϊόντα αντίδρασης με προσθήκη ή συμπύκνωσης. Τα φθοροπολυμερή, τα πολυαμίδια και το πολυστυρένιο είναι μερικά παραδείγματα θερμοπλαστικού.

4.4.2 Θερμοσκληρυνόμενα (thermosettings)

Σε αντίθεση με τα θερμοπλαστικά, τα **Θερμοσκληρυνόμενα** αποτελούνται από μη γραμμικούς δεσμούς μικρών ,σχετικά, μακρομορίων. Τα **Θερμοσκληρυνόμενα** πολυμερή με θέρμανση μπορούν να μορφοποιηθούν υπό πίεση.

Η **θερμοσκλήρυνση** όμως δεν είναι επαναληπτική, δεν ισχύει αυτό που ισχύει στα θερμοπλαστικά. Περαιτέρω κατεργασία εδώ, οδηγεί σε πυκνή δικτυωτή δομή και σε προϊόντα που είναι ανθεκτικά στη θερμότητα και δεν επιδέχονται διαμόρφωση με επιπλέον θέρμανση ή πίεση. Μερικά τέτοια υλικά είναι οι πολυεστέρες ,τα φαινολικά πολυμερή, οι εποξειδικές ρητίνες κλπ.

4.4.3 Ελαστομερή (elastomers)

Τέλος, τα **ελαστομερή** χαρακτηρίζονται από την ιδιότητα τους να επιδέχονται κατά τον εφελκυσμό πολύ μεγάλη επιμήκυνση και ταχύτατη πλήρη επαναφορά όταν αποφορτίζονται, είναι δηλαδή υπερελαστικά.

Τέτοια υλικά είναι το καουτσούκ, οι σιλικόνες κλπ.

Όπως γίνεται αντιληπτό, τα πολυμερή παίζουν κομβικό ρόλο στην εξέλιξη προϊόντων που καλύπτουν καθημερινές αλλά και πιο εξειδικευμένες ανάγκες. Αυτό οφείλεται στο ότι μπορούμε μέσω των προαναφερθέντων μεθόδων και συνδυασμών

να δημιουργήσουμε προϊόντα με σαφή έλεγχο των ιδιοτήτων τους, χωρίς να απαιτείται υψηλό κόστος.

4.5 ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΠΟΥ ΕΠΙΛΕΧΘΗΚΑΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ (SELECTED POLYMERS FOR THE EXPERIMENTAL STUDY CASE)

4.5.1 Πολυγαλακτικό οξύ (Polylactic acid)

Το πολυγαλακτικό οξύ, όπως είναι η επιστημονική ονομασία του πολυγαλακτικού οξέος (PLA), είναι ένα βιοδιασπώμενο προϊόν, το οποίο παράγεται από τη χημική σύνθεση μονομερών τα οποία έχουν βιολογική προέλευση. Τα δύο κύρια μονομερή που συνθέτουν το πολυγαλακτικό οξύ είναι 1) το γαλακτικό οξύ και 2) κυκλικός δι-εστέρας, λακτίδιο.

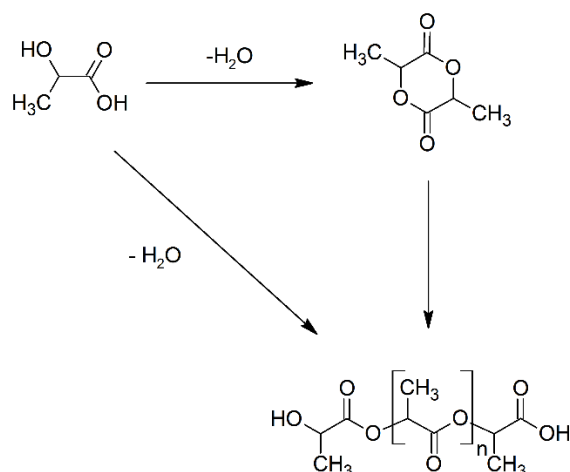
Ο χημικός τύπος του είναι $C_3H_5O_2$, η πυκνότητά του $1,24 \text{ g/cm}^3$ και το σημείο τήξης 160°C (UL Prospector).

Ο πολυμερισμός, ο οποίος χρησιμοποιεί για το άνοιγμα του δακτυλίου του λακτιδίου διάφορους μεταλλικούς καταλύτες, είναι η συνηθέστερη μέθοδος για τη δημιουργία του πολυγαλακτικού οξέος. Η διαδικασία αυτή γίνεται σε διάλυμα ή σε τήγμα.

Μια άλλη εναλλακτική διαδικασία είναι αυτή της άμεσης συμπύκνωσης μονομερών του γαλακτικού οξέος. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των 200°C για να αποφευχθεί η δημιουργία μονομερούς λακτιδίου κατά την οποία παράγεται σε κάθε βήμα συμπύκνωσης ένα ισοδύναμο νερού, το οποίο μπορεί να προκαλέσει τη μεταφορά της αλυσίδας σε υλικό με χαμηλό μοριακό βάρος.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η άμεση συμπύκνωση πρέπει να εκτελεσθεί σταδιακά με ολιγομερισμό του γαλακτικού οξέος σε ολιγομερή PLA. Κατόπιν ακολουθεί η πολυσυμπύκνωση σε τήγμα ή σε διάλυμα, όπου οι ολιγομερείς μονάδες συνθέτουν ένα πολυμερές σκέλος υψηλού μοριακού βάρους. Το νερό αφαιρείται είτε με εφαρμογή κενού είτε με αζεοτροπική απόσταξη. Αν η κρυστάλλωση του πρωτογενούς πολυμερούς γίνει με προσοχή, είναι δυνατή η επίτευξη ακόμα υψηλότερων μοριακών βαρών. Έτσι γίνεται, στην άμορφη περιοχή του στερεού πολυμερούς, η τελική συμπύκνωση των ομάδων καρβοξυλικού οξέος και αλκοόλης και καθίσταται εφικτή η αντίδρασή τους.

Με χρήση στερεοειδικών καταλυτών μπορεί να δημιουργηθεί PLA που παρουσιάζει κρυσταλλικότητα. Ο βαθμός της κρυσταλλικότητας του ετεροτακτικού αυτού τύπου PLA επηρεάζει πολλές σημαντικές ιδιότητες του.



Εικόνα 10: Σύνθεση του PLA από το γαλακτικό οξύ και το λακτίδιο.

Στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής πρώτη ύλη παραγωγής είναι το άμυλο καλαμποκιού, στην Ασία ένα φυτό με την επιστημονική ονομασία Μανιώτη ή Εδώδιμος (κοινώς Κασάβα), ενώ στον υπόλοιπο κόσμο η παραγωγή του γίνεται από ζαχαρότευτλα.

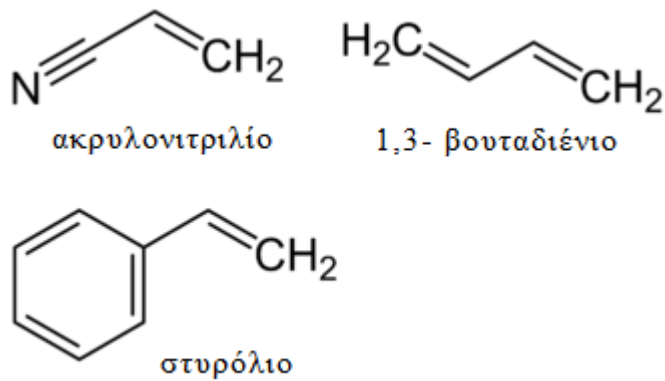
Το PLA ανήκει σε μια ομάδα πλαστικών τα οποία είναι γνωστά ως βιοπλαστικά, τα οποία δεν χρησιμοποιούν σα βάση προϊόντα του πετρελαίου για την παραγωγή τους. Μπορεί ωστόσο να παραχθεί από ήδη υπάρχων βιομηχανικό εξοπλισμό, ο οποίος χρησιμοποιείται και για την παραγωγή πετροχημικών βιομηχανικών πλαστικών.

Στην τρισδιάστατη εκτύπωση, το PLA είναι από τα πιο διαδεδομένα υλικά που χρησιμοποιούνται με τη μέθοδο κατασκευής με εναπόθεση υλικού (FDM).

Το PLA ως φυσικά βιοδιασπώμενο μη τοξικό προϊόν, έχει ευρεία χρήση σε ιατρικές εφαρμογές όπως στεντ και ράμματα αλλά και σε συσκευασίες τροφίμων. Επίσης είναι ιδανικό για την χαμηλού κόστους κατασκευή πρωτοτύπων, κατασκευή μηχανικών μερών, παιχνιδιών και υπό κλίμακα μοντέλων. Ωστόσο δεν ενδείκνυται για την κατασκευή αντικειμένων τα οποία απαιτούν πολύπλοκα σχέδια.

4.5.2 Ακρυλονιτρίλιο Βουταδιένιο Στυρένιο (Acrylonitrile butadiene styrene)

Το ABS, του οποίου η επιστημονική ονομασία είναι ακρυλονιτρίλιο - βουταδιενίου - στυρενίου, είναι άμορφο πολυμερές, το οποίο είναι προϊόν πολυμερισμού ακρυλονιτρίλιου και στυρολίου (γαλακτώματος ή μάζας) παρουσία πολυβουταδιενίου. Οι αναλογίες των μονομερών μπορούν να ποικίλουν ως εξής: ακρυλονιτρίλιο από 15-30%, βουταδιένιο 5-30% και στυρόλιο 40-60%.



Εικόνα 11: Τα μονομερή που συνθέτουν το ABS.

Σε αντίθεση με το PLA ,το ABS ανήκει στην κατηγορία των πλαστικών που αποτελούν προϊόντα πετρελαίου. Συνήθως κατά την εκτύπωση του εκλύονται σε μικρό βαθμό αναθυμιάσεις. Η εκτύπωση του ABS γίνεται με θερμοκρασία ακροφυσίου στους 220-235°C.

Η ανακάλυψη του ακρυλονιτριλίου βουταδιενίου στυρενίου, έγινε κατά τη διάρκεια του β΄ παγκοσμίου πολέμου και αποτελούσε εναλλακτική μέθοδο παραγωγής καουτσούκ. Η διάθεσή του εμπορικά έγινε τη δεκαετία του '50 για πρώτη φορά.

Στις μέρες μας, το ABS έχει πολλές εφαρμογές, όπως σε παιχνίδια, κράνη ασφαλείας, τηλέφωνα, περιβλήματα οικιακών συσκευών, πινάκων ελέγχου, τελειώματα επίπλων, εσωτερικά πάνελ θυρών αυτοκινήτου, πίνακες οργάνων αυτοκινήτου, γρίλιες, επένδυση ψυγείων, αποσκευές κ.α.

Γενικά έχει καλή επεξεργασιμότητα, αντοχή σε κρούση, σε θερμότητα καθώς και χημική αντίσταση, ωστόσο δεν ενδείκνυται για εφαρμογές εξωτερικού, καθώς δεν έχει αντοχή στις καιρικές συνθήκες ενώ έχει επίσης χαμηλή αντοχή στην τριβή.

Η διαδικασία που ακολουθούταν ήταν αυτή του γαλακτώματος κατά παρτίδες κατά την οποία έχουμε αντιδράσεις που οδηγούν σε πολυμερισμό ελεύθερων ριζών. Συγκεκριμένα δημιουργούνται κολλοειδή πολυμερή, κατά κύριο λόγο σφαιρικά, διασκορπισμένα σε συνεχές μέσο (συνήθως νερό). Η κινητική σταθερότητα του συστήματος επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας γαλακτωμοποιητές και ενσωματώνοντας υδρόφιλα μόρια.

Η μέθοδος αυτή άρχισε να παρακμάζει επειδή δεν μπορούσε να εξελίξει επιπλέον τα υλικά που παρήγαγε, με συνέπεια πλέον να υπερισχύει η παραγωγή με τη μέθοδο του συνεχούς όγκου πολυμερισμού, όπου κομμάτια καουτσούκ συνθλίβονται σε πολύ μικρά μέρη και καταλήγουν σε δοχείο στο οποίο περιέχονται μικρή ποσότητα διαλύτη, ακρυλονιτρίλιο, στυρόλιο και ανακυκλωμένο μονομερές.

Στο δοχείο αυτό γίνεται διάλυση του καουτσούκ και ανάμιξη του με τα υπόλοιπα υλικά. Ο πολυμερισμός γίνεται κατόπιν σε αντιδραστήρες συνεχούς ροής ,όπου ειδικός εκκινητής ξεκινάει τη διαδικασία .Σειρά έχει ο διαχωρισμός των πτητικών συστατικών από το διάλυμα πολυμερούς, ο οποίος γίνεται με εξάτμιση υπό κενό

στον αποπτηκοποιητήρα .Στο τελικό στάδιο, το πολυμερές στέλνεται με τη βοήθεια αντλίας στον τομέα σφαιροποίησης και γίνεται ανάκτηση των πτητικών υλών ως ανακυκλωμένα μονομερή.

Η διαδικασία αυτή παρέχει ακρίβεια, έλεγχο καθ' όλη τη διάρκεια της παραγωγής και ευελιξία.

4.5.3 Συμπολυμερές τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο με γλυκόλη (Petg)

Το Συμπολυμερές τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο με γλυκόλη έχει κατά βάση την ίδια χημική σύσταση με το τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET), με τη διαφορά της προσθήκης γλυκόλης. Το αποτέλεσμα αυτής της προσθήκης είναι η δημιουργία ενός νέου πλαστικού με υψηλή μηχανική αντοχή και ελαστικότητα, αντοχή σε κρούση και ελάχιστη απορρόφηση υγρασίας, του petg.

Το τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET), που αποτελεί τη βάση του petg, είναι συμπολυμερές που προκύπτει με πολυσυμπύκνωση τερεφθαλικού οξέος με 1,2-αιθανοδιόλη (άκυκλη, κορεσμένη, δισθενής αλκοόλη), έχει μοριακό τύπο: $H-[C_{10}H_8O_4]-n=60-120 OH$, και ανήκει στην κατηγορία των πολυεστέρων. Η σπουδαιότητα των πολυεστέρων οφείλεται στις εξαιρετικές μηχανικές και χημικές τους ιδιότητες, στην απλότητα της χημικής διεργασίας της σύνθεσής τους, στην δυνατότητα παραγωγής σε κλειστό βρόγχο(χαμηλές εκπομπές ρύπων στο περιβάλλον), η ανακυκλωσιμότητά του, το χαμηλό επίπεδο τοξικότητας των πρώτων υλών αλλά και των παραπροϊόντων κατά τη διάρκεια της παρασκευής του πολυεστέρα και η ευρεία χρήση του σε πολλές εφαρμογές.

4.5.4 PLA EVO

Αποτελεί βελτιωμένη εκδοχή του απλού pla με την ίδια κατά βάση χημική σύσταση με το απλό pla, με αρκετές τροποποιήσεις ωστόσο για να ενισχυθεί η αντοχή του σε κρούση. Αποτέλεσμα είναι να παρουσιάζει πολλαπλάσια αντοχή σε κρούση που ξεπερνάει αυτή του απλού abs, θυσιάζοντας ωστόσο σε σημαντικό βαθμό την αντοχή του σε εφελκυσμό σε σχέση με το απλό pla. Σαν υλικό προσφέρει μια ισορροπημένη επιλογή όσον αφορά στο συνδυασμό αντοχής σε κρούση και σε εφελκυσμό και κατατάσσεται στην κατηγορία των ισχυρών υλικών.

5 ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΤΗΣ ΚΑΜΨΗΣ(BENDING TEST)

5.1 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ (MECHANICAL PROPERTIES)

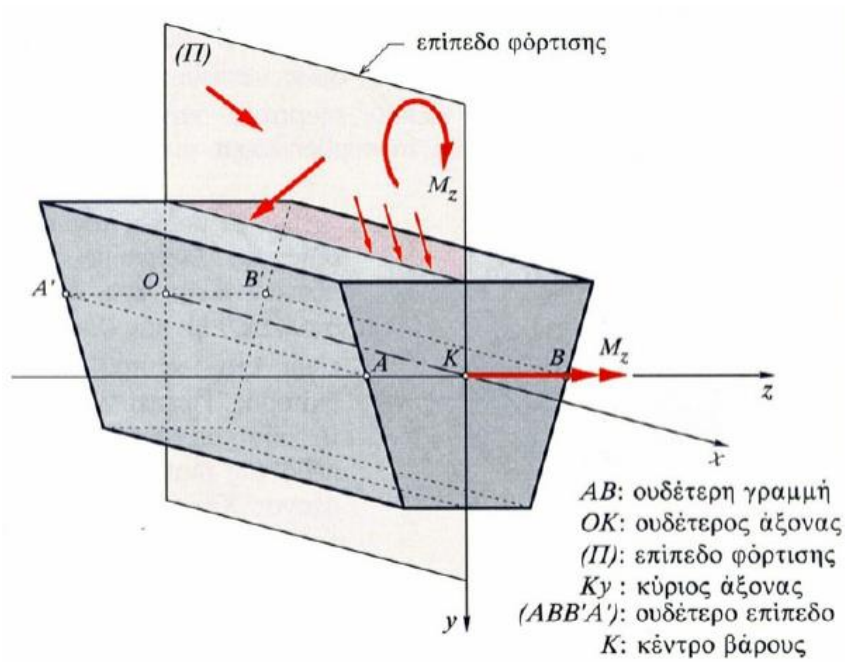
Με τον όρο μηχανικές ιδιότητες, εννοούμε τις ιδιότητες εκείνες ενός υλικού, που εκφράζουν με αριθμητικά μεγέθη την αντίστασή του στη δράση εξωτερικών φορτίων που τείνουν να του προκαλέσουν παραμορφώσεις στις διαστάσεις και στο σχήμα του, μόνιμες ή παροδικές. Τα επιμέρους μηχανολογικά εξαρτήματα μιας μηχανής ή κατασκευής δέχονται καταπονήσεις, στατικές ή δυναμικές, οι οποίες αν ξεπεράσουν κάποιο συγκεκριμένο φορτίο, οδηγούν στην καταστροφή του εξαρτήματος. Για το λόγο αυτό είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε την αντοχή του αντικειμένου, ώστε να εξασφαλιστεί ότι θα αντέξει την επίδραση των εξωτερικών φορτίων χωρίς να αχρηστευθεί.

Όταν σε κάποιο υλικό επιδρούν εξωτερικά φορτία, αναπτύσσονται από το υλικό ίσου μεγέθους και αντίθετης φοράς δυνάμεις ή ροπές ώστε να διατηρείται η ισορροπία. Η ένταση των δυνάμεων αυτών που αναπτύσσει το υλικό, σε μονάδα επιφάνειας, καλείται καταπόνηση. Τα είδη των καταπονήσεων είναι: α) ο εφελκυσμός, β) η κάμψη, γ) η διάτμηση, δ) η θλίψη, ε) η στρέψη και στ) ο λυγισμός.

5.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΚΑΜΨΗΣ (BENDING DEFINITION)

Κάμψη ονομάζεται η εντατική κατάσταση κατά την οποία, σε ένα σώμα εμφανίζεται, λόγω της επίδρασης εγκάρσιας δύναμης ή καμπτικής ροπής ή και των δύο μαζί, ροπή κάμψης.

Η καμπτική εντατική κατάσταση, είναι μια σύνθετη καταπόνηση κατά την οποία εμφανίζονται και ορθές τάσεις στην διατομή του υλικού. Ειδικότερα, έχουμε την εμφάνιση εφελκυστικών τάσεων, τις οποίες θεωρούμε θετικές και οι οποίες μειώνονται σταδιακά μέχρι ενός ορίου, το οποίο καλείται ουδέτερη γραμμή. Στο σημείο αυτό οι τάσεις αυτές μηδενίζονται και από εκεί και ύστερα εμφανίζονται θλιπτικές τάσεις, η ένταση των οποίων αυξάνεται σταδιακά όσο αυξάνει η απόσταση από την ουδέτερη γραμμή, όπως ακριβώς συμβαίνει με τις εφελκυστικές έναντι της ουδέτερης γραμμής. Με λίγα λόγια η ουδέτερη γραμμή χωρίζει τη διατομή του υποβαλλόμενου σε κάμψη υλικού, στην εφελκυσόμενη και στην θλιπτική ζώνη.



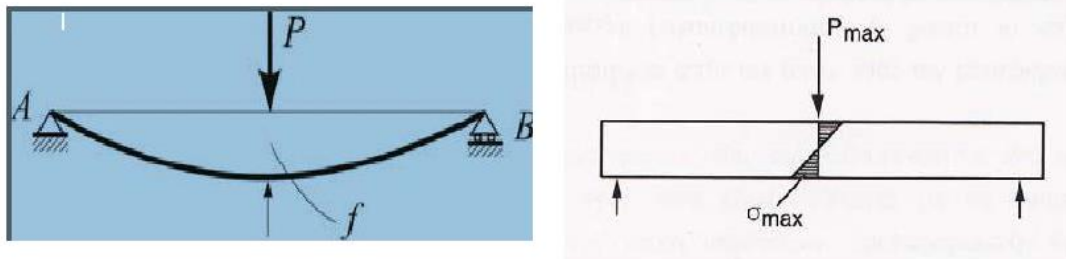
Εικόνα 12: Ανάλυση της κάμψης σε δοκό ορθογωνικής διατομής (Γ.Μάλιαρης, 2017)

5.3 ANTOXH SE KAMPSH (FLEXURAL STRESS)

Μία από τις βασικότερες μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων τόσο σε μεταλλικά, όσο και σε μη μεταλλικά υλικά, είναι η δοκιμή της καθαρής κάμψης. Με τον όρο καθαρή νοείται ότι για την ανάπτυξη των ορθών μηχανικών τάσεων μιας δοκού που υπόκειται σε κάμψη, οφείλονται αποκλειστικά και μόνο καμπτικές ροπές και όχι αξονικά φορτία. Γι' αυτό το λόγο, οι ορθές τάσεις σε αυτή την περίπτωση καλούνται και καμπτικές ή ορθές τάσεις λόγω κάμψης. Οι έξι βασικές παραδοχές για την ύπαρξη καθαρής κάμψης είναι:

- 1) $h < A/2$, όπου h = ύψος της διατομής δοκού και A = άνοιγμα της διατομής.
- 2) Η ύπαρξη ενός άξονα συμμετρίας τουλάχιστον.
- 3) Ο διαμήκης άξονας της δοκού, που διέρχεται από τα κέντρα βάρους των διατομών, είναι ευθύγραμμος για αφόρτιστη δοκό.
- 4) Κάθετη στον άξονα φόρτισης της δοκού εφαρμογή των εξωτερικών φορτίων, τα οποία βρίσκονται στο επίπεδο φόρτισης, το οποίο συμπίπτει με το επίπεδο συμμετρίας.
- 5) Το υλικό της δοκού έχει ίδιο μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό και θλίψη.
- 6) Οι επίπεδες και κάθετες στον ουδέτερο άξονα διατομές, παραμένουν επίπεδες και κάθετες στον ουδέτερο άξονα και μετά τη φόρτιση (Bernoulli- Navier).

Ορίζεται ως αντοχή σε κάμψη, η μέγιστη εφελκυστική τάση η οποία υπολογίζεται σε δοκίμιο που βρίσκεται υπό κάμψη, θεωρώντας γραμμική την κατανομή των τάσεων κατά το ύψος της διατομής, τη στιγμή που το δοκίμιο θραύεται.



Εικόνα 13: Αντοχή σε κάμψη.

Οι ορθές τάσεις δίνονται από τη σχέση: $\sigma = \frac{M(x) \cdot z}{I_z}$, όπου $M(x)$ = η ροπή κάμψης στο σημείο x , I_z = η ροπή αδράνειας ως προς τον κεντροβαρικό άξονα που είναι παράλληλος στον άξονα της κάμψης και z = η απόσταση του σημείου με τάση σ από τον παραπάνω άξονα.

Απουσία αξονικών δυνάμεων ο άξονας της ροπής αδράνειας ταυτίζεται με τον ουδέτερο άξονα της διατομής.

Για τη μέγιστη ορθή τάση είναι: $\sigma_{max} = \frac{M_{max} \cdot z_{max}}{I_z}$. Η σ_{max} δεν μπορεί να ξεπερνά μια τιμή που είναι χαρακτηριστική για το υλικό. Στα ψαθυρά υλικά μιλάμε για τη θλιπτική ή εφελκυστική αντοχή του ενώ στα όλκιμα υλικά για το όριο διαρροής. Από αυτόν τον περιορισμό προκύπτει η μέγιστη ελαστική ροπή στο στοιχείο.

Ροπή μεγαλύτερη από τη μέγιστη ελαστική προκαλεί θραύση στα ψαθυρά υλικά. Στα όλκιμα όμως το όριο διαρροής δεν ταυτίζεται με το όριο θραύσης. Σε μεγαλύτερη φόρτιση τα πιο απομακρυσμένα τμήματα της διατομής εμφανίζουν πλαστικές παραμορφώσεις, ενώ το κέντρο της διατομής παραμένει στην ελαστική περιοχή.

Η δοκιμή της κάμψης είναι ευρύτατα διαδεδομένη και προτιμάται ως μηχανική δοκιμή σε πολλές περιπτώσεις λόγω της απλής γεωμετρίας των δοκιμίων και της ευκολίας στην υλοποίηση της διάταξης, ειδικά στην περίπτωση της κάμψης τριών σημείων.

5.4 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ (DEFORMATIONS)

Η ακτίνα καμπυλότητας βρίσκεται από τη σχέση: $\frac{1}{R} = \frac{M_z}{E \cdot I_z}$ (5.1) και η ολική γωνία

στροφής από τη σχέση: $\varphi = \frac{M_z}{E \cdot I_z} \cdot l$ (5.2).

Στην καθαρή κάμψη ($M_z = \text{σταθ.}$), από την (5.1) προκύπτει ότι $\frac{1}{R} = \text{σταθερά}$, που σημαίνει ότι η ελαστική γραμμή αντιστοιχεί σε τόξο κύκλου. Η διαφορική εξίσωση της ελαστικής γραμμής που προκύπτει σε περίπτωση γενικής κάμψης είναι:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M_z(x)}{E \cdot I_z} = \frac{d^2f}{dx^2}, \text{ όπου } y \equiv f \text{ (βέλος κάμψης).}$$

Για να έχει ισχύ η διαφορική εξίσωση της ελαστικής γραμμής, πρέπει στις προϋποθέσεις που έχουν τεθεί παραπάνω, για την ύπαρξη καθαρής κάμψης, να προστεθούν και οι εξής:

α) η καμπυλότητα σε κάθε σημείο είναι εξαρτώμενη μόνο της καμπτικής ροπής M_b

β) το μήκος l της δοκού είναι πολύ μεγαλύτερο συγκρινόμενο με το μέγιστο βέλος κάμψης

γ) η σχέση μήκους (l) της δοκού και του ύψους (h) της διατομής της δοκού, είναι:

$$10 \cdot h \leq l \leq 20 \cdot h$$

δ) η σχέση πλάτους (b) και ύψους (h) της διατομής της δοκού είναι: $h \leq 4 \cdot b$

6 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ (TEST PROCESS)

6.1 ΠΡΟΤΥΠΟ (STANDARD)

Ο τρόπος με τον οποίο εκτελέστηκε το πείραμα, η κατασκευή των δοκιμίων, ο διαστασιολογικός τους έλεγχος και ο έλεγχος της μηχανής καθώς και η επεξεργασία των μετρήσεων για τη διεξαγωγή των συμπερασμάτων έγινε βάση του διεθνούς προτύπου ISO 178:2010 Plastics - Determination of flexural properties (πλαστικά - προσδιορισμός ιδιοτήτων κάμψης).

6.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ (TEST MACHINE)

Το πείραμα της κάμψης τριών σημείων πραγματοποιήθηκε στη μηχανή κάμψης του εργαστηρίου μηχανικής του ΤΕΙ Πειραιά. Η πειραματική διάταξη του εργαστηρίου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



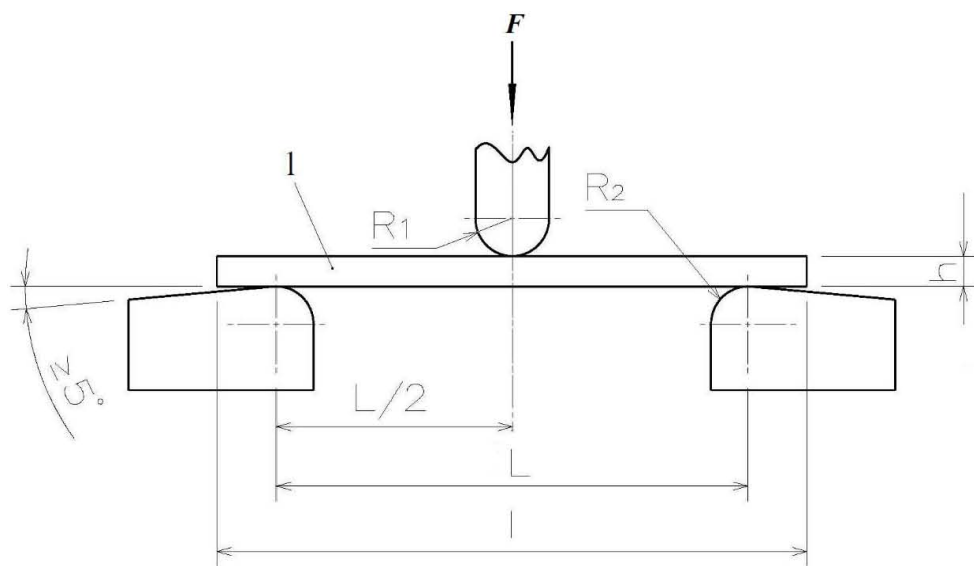
Εικόνα 14: Πειραματική διάταξη για αντοχή σε κάμψη του εργαστηρίου μηχανικής.

Τα άκρα στήριξης, ορίζουν το ενεργό μήκος L , το οποίο λαμβάνεται υπόψιν στους υπολογισμούς της παραμόρφωσης. Η απόσταση μεταξύ των άκρων στήριξης είναι

ρυθμιζόμενη, ώστε να ορίζεται το L σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε πειραματικής διαδικασίας. Η σχέση που ορίζει το ενεργό μήκος L είναι:

$L = (16 \pm 1) h$ (όπως ορίζεται από την τροποποίηση 1, στις 1/4/2013 του προτύπου ISO178), όπου h το πάχος του δοκιμίου, επομένως για πάχος $h = 4\text{mm}$, που είναι το πάχος του προτεινόμενου δοκιμίου, όπως περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω, προκύπτει ότι $L = 64 \pm 4\text{mm}$.

Το δοκίμιο στηρίζεται ελεύθερα στα άκρα της βάσης στήριξης, τα οποία έχουν καμπυλότητα $R_2 = 5,0\text{mm} \pm 0,2\text{mm}$ ώστε να μπορεί να κάμπτεται ομαλά το δοκίμιο χωρίς να μετακινείται από τη θέση του. Σε απόσταση $L/2$, το έμβολο ασκεί δύναμη F στο δοκίμιο, αυξανόμενη μέχρι να επέλθει θραύση του. Το έμβολο έχει και αυτό καμπυλότητα $R_1 = 5,0\text{mm} \pm 0,2\text{mm}$.



1 Δοκίμιο	h Πάχος του δοκιμίου
F Φορτίο	l Μήκος του δοκιμίου
R_1 Ακτίνα καμπυλότητας εμβόλου	L Μήκος μεταξύ των άκρων στήριξης
R_2 Ακτίνα καμπυλότητας άκρων στήριξης	

Εικόνα 15: Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης για κάμψη τριών σημείων(ISO 178, 2010).

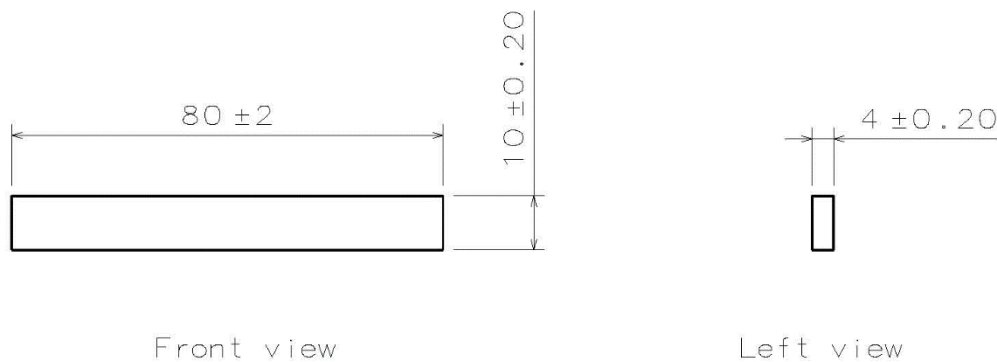
Το σύστημα μέτρησης της ασκούμενης δύναμης συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις της «κατηγορίας 1», που ορίζεται στο πρότυπο ISO 7500-1 Metallic materials- Verification of static uniaxial testing machines- Part 1:Tensions/ compression testing machines- Verification and calibration of the force- measuring system.

Το σύστημα μέτρησης της παραμόρφωσης συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις που ορίζει το πρότυπο ISO 9513.

Για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας, το σύστημα μέτρησης της παραμόρφωσης πρέπει να μπορεί να μετρήσει την αλλαγή λόγω παραμόρφωσης της τάξεως του ένα τοις εκατό της σχετικής αξίας, που ανταποκρίνεται σε $\pm 3,4 \mu\text{m}$ για $L = 64\text{mm}$ που ισχύει στην περίπτωση μας.

6.3 ΔΟΚΙΜΙΑ (SPECIMENS)

Το δοκίμιο είναι ορθογωνικής διατομής και οι διαστάσεις του, κατά ISO 178 είναι: πλάτος $b = 10 \pm 0,2\text{mm}$, πάχος $h = 4 \pm 0,2\text{mm}$ και μήκος $l = 80 \pm 2\text{mm}$.



Εικόνα 16: Διαστάσεις δοκιμίου για το πείραμα της κάμψης.

Οι δοκιμές έγιναν για 4 διαφορετικά υλικά, με δύο διαφορετικούς ρυθμούς επιβολής του φορτίου. Για κάθε περίπτωση εκτυπώθηκαν 3 δοκίμια, συνεπώς η πειραματική διαδικασία επαναλήφθηκε 24 φορές.

6.3.1 Εκτύπωση Δοκιμίων (Printing of the specimens).

Για την κατασκευή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε ο 3D εκτυπωτής Duplicator i3 της Wanhao και το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την παραμετροποίηση του .stl αρχείου και τη δημιουργία G-code για την εκτύπωση των δοκιμίων είναι το cura της Ultimaker.

6.3.1.1 Υλικά (Materials).

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τα δοκίμια είναι της NEEMA3D και είναι τα εξής: Athena PLA, Athena ABS, PLA: EVO HP, PET G: EVO. Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται οι μηχανικές και θερμικές ιδιότητες τους.

Athena PLA		
Μηχανικές ιδιότητες		
Περιγραφή	Πρότυπο	Τιμή
Ειδικό Βάρος	ASTM D1505	1,24 g/cc
Δείκτης ροής τήγματος	-	6,0 g/10 min
Αντοχή σε εφελκυσμό	ASTM D882	106 MPa (MD)n140 MPa (TD)
Επιμήκυνση κατά τη θραύση	ASTM D882	160% (MD)n100% (TD)
Μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό	ASTM D882	3220 MPa (MD)n3860 MPa (TD)
Αντοχή σε κρούση	-	7,5 KJ/m2
Θερμικές ιδιότητες		
Θερμοκρασία εκτύπωσης		180-210°C
Θερμοκρασία τήξης		210°C ± 10°C
Θερμοκρασία μαλακώματος Vicat	ISO 306	± 60°C

Athena ABS		
Μηχανικές ιδιότητες		
Περιγραφή	Πρότυπο	Τιμή
Ειδικό Βάρος	ASTM D792	1,03 g/cc
Δείκτης ροής τήγματος	ASTM D1238	8,0 g/10 min
Αντοχή σε εφελκυσμό	ISO 527	44 Mpa
Επιμήκυνση κατά τη θραύση	ISO 527	9%
Μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό	ASTM D638	2000 Mpa
Αντοχή σε κρούση	ISO 180/A	36 KJ/mu00b2
Θερμικές ιδιότητες		
Θερμοκρασία εκτύπωσης	-	220-270°C
Θερμοκρασία τήξης	ISO 294	245°C ± 10°C
Θερμοκρασία μαλακώματος Vicat	ISO 306	± 103°C

PET G: EVO		
Μηχανικές ιδιότητες		
Περιγραφή	Πρότυπο	Τιμή
Ειδικό Βάρος	ASTM D792	1,27 g/cc
Δείκτης ροής τήγματος	-	6,0 g/10 min
Αντοχή σε εφελκυσμό	ASTM D638	50 Mpa
Επιμήκυνση κατά τη θραύση	ASTM D638	120%
Μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη	ASTM D790	2150 Mpa
Αντοχή σε κρούση	ISO 179	8.1KJ/m2
Σκληρότητα (Rockwell)	ASTM D785	105
Απορρόφηση υγρασίας	ASTM D570	0,13%
Συρρίκνωση καλουπιού	ASTM D955	0,2-0,5%
Θερμικές ιδιότητες		
Θερμοκρασία εκτύπωσης		195-220°C
Θερμική παραμόρφωση	ASTM D648	70c
Διαπερατότητα φωτός	ASTM D1003	90%

PLA: EVO HP		
Μηχανικές ιδιότητες		
Περιγραφή	Πρότυπο	Τιμή
Ειδικό Βάρος	ISO 1183	1,26 g/cc
Δείκτης ροής τήγματος	ISO 1183	6-12 g/10 min
Αντοχή σε εφελκυσμό	ISO 527	40 MPa
Επιμήκυνση κατά τη θραύση	ISO 527	60%
Μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό	ISO 527	3900MPa
Αντοχή σε κρούση	ISO 179	23 KJ/m2
Θερμικές ιδιότητες		
Θερμοκρασία εκτύπωσης	-	230-250°C
Θερμοκρασία τήξης	ISO 294	190-220°C
Εκτροπή θερμοκρασίας μετά από ανόπτηση	ISO 75	± 96°C

Πίνακας 2: Μηχανικές και θερμικές ιδιότητες των εξεταζόμενων υλικών.

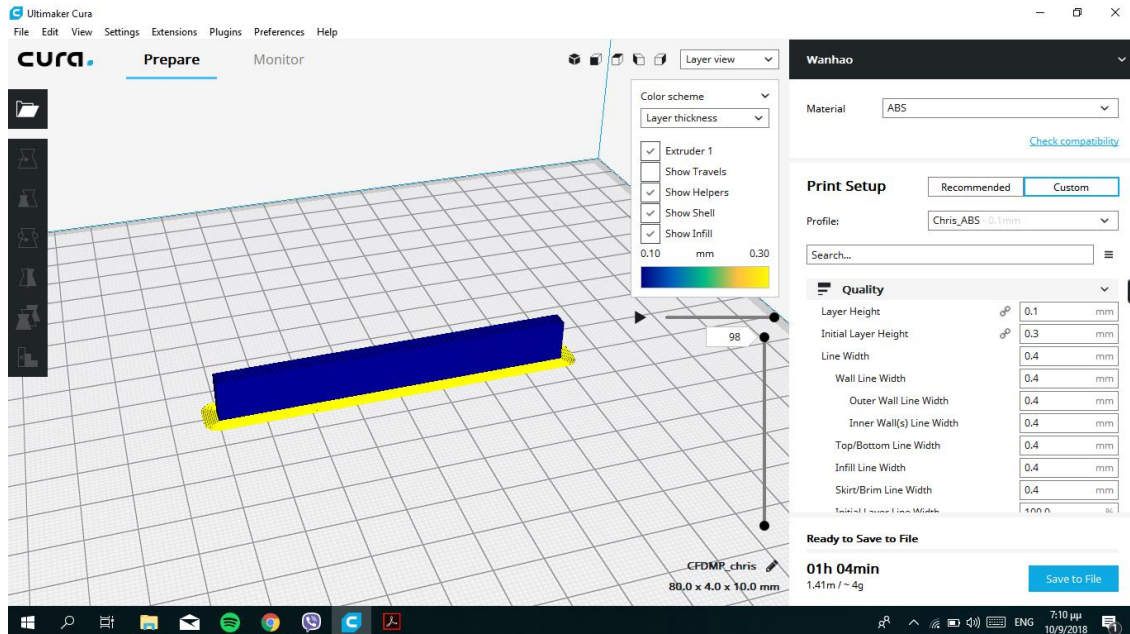
6.3.1.2 Παράμετροι εκτύπωσης (Printing parameters).

Οι κύριες παράμετροι ήταν ίδιες σε όλα τα δοκίμια αφού στόχος της εργασίας είναι η σύγκριση μεταξύ των 4 υλικών που προαναφέραμε. Οι παράμετροι αυτοί επιλέχθηκαν ως οι ιδανικές για την επίτευξη καλών μηχανικών ιδιοτήτων, βάσει σχετικών μελετών που αναφέρθηκαν προηγουμένως στην παράγραφο 3.4.1.

Το γέμισμα (infill) ρυθμίστηκε στο 100%, ώστε το δοκίμιο να είναι συμπαγές και να μην υπάρχουν κενά μεταξύ των ραφών. Εναλλακτικός τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι να ρυθμιστεί το πάχος της ραφής ώστε να είναι λίγο μεγαλύτερο από την απόσταση μεταξύ των ραφών σε κάθε στρώση, έτσι ώστε να «γεμίζει» πλήρως το προφίλ.

Το πάχος στρώσης ορίστηκε ίσο με 0,1mm για βέλτιστη αντοχή αλλά και εξοικονόμηση χρόνου, καθώς περεταίρω μείωση του πάχους στρώσης θα αύξανε κατά πολύ το χρόνο κατεργασίας, συνεπώς και το κόστος, χωρίς να βελτιώνει σε ικανοποιητικό βαθμό την αντοχή του δοκιμίου. Συνεπώς για την ολοκλήρωση του δοκιμίου χρειάστηκαν 100 στρώσεις.

Ο προσανατολισμός εκτύπωσης που επιλέχθηκε είναι: το μήκος L του δοκιμίου κατά την κατεύθυνση του άξονα x(0°), το πάχος του κατά τον άξονα y και το πλάτος κατά τον άξονα z, προσανατολισμός που εν συντομία μπορεί να χαρακτηριστεί ως οριζόντιος επί των ακμών του αντικειμένου.



Εικόνα 17: Εικονική αναπαράσταση της θέσης του δοκιμίου στο τραπέζι εκτύπωσης μέσω του λογισμικού cura, κατά την παραμετροποίηση.

Η γωνία ραφής επίσης παίζει σημαντικό ρόλο και για την βέλτιστη αντοχή σε κάμψη η βέλτιστη ρύθμιση είναι 0/90, δηλαδή αρχίζοντας η ραφή παράλληλα προς τον άξονα x και κατόπιν το γέμισμα της επόμενης στρώσης σε γωνία 90° ως προς την πρώτη και το ίδιο μοτίβο να επαναλαμβάνεται μέχρι την ολοκλήρωση και των 100 στρώσεων.

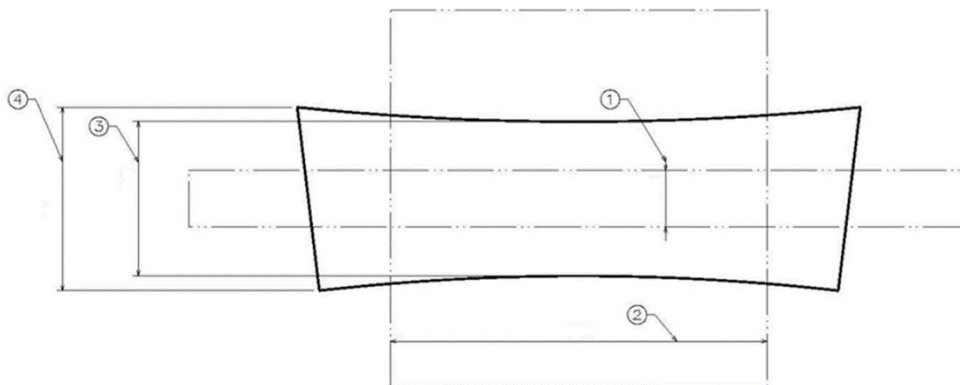
Επίσης αρκετά σημαντικό ρόλο στην αντοχή του τελικού προϊόντος παίζει και η ταχύτητα εναπόθεσης του υλικού, η ταχύτητα δηλαδή με την οποία κινείται η κεφαλή η οποία εξωθεί το ημι-τηγμένο νήμα. Η ταχύτητα εναπόθεσης επηρεάζει σημαντικά τον χρόνο κατεργασίας, συνεπώς και το συνολικό κόστος μιας κατασκευής. Η ταχύτητα εναπόθεσης επιλέχθηκε ίση με $v = 30mm/min$ για όλα τα δοκίμια. Αρχικός στόχος ήταν η επιλογή μιας ταχύτητας $v = 50mm/min$, για να επιτευχθεί μείωση του χρόνου κατεργασίας, ωστόσο κατά την εκτύπωση των πρώτων δοκιμίων παρουσιάστηκαν αστοχίες, λόγω ασυνέχειας σε κάποια σημεία της ραφής και αποκόλληση του δοκιμίου από το τραπέζι εκτύπωσης του τρισδιάστατου εκτυπωτή.

6.3.2 Διαστασιολογικός Έλεγχος (Dimensions check).

Για την μέτρηση του πάχους και του πλάτους των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε μικρόμετρο ακρίβειας $\pm 0,01$ mm με πέλμα επίπεδο, κυκλικής διατομής, διαμέτρου 4mm. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά ISO 16012 σε θερμοκρασία δωματίου. Για κάθε δοκίμιο πήραμε πέντε μετρήσεις για το πάχος και πλάτος του και υπολογίσαμε τους αντίστοιχους μέσους όρους.

Η μέτρηση του πάχους των δοκιμίων πραγματοποιείται σε σημεία που βρίσκονται σε απόσταση $\pm 3,25$ mm από το κέντρο τους. Δοκίμια που το πάχος τους υπερβαίνει τις ανοχές κατά $\pm 2\%$ της μέσης τιμής, απορρίπτονται. Διαφορά πάχους (Δh) λόγω βυθίσεων, είναι αποδεκτή μέχρι 0,1mm. Αυτό αφορά κυρίως δοκίμια που έχουν φτιαχτεί μέσω χύτευσης με έγχυση, όπου η διατομή τους δεν είναι ποτέ ακριβώς παραλληλεπίπεδη, με την μικρότερη τιμή πάχους να είναι στο κέντρο και την μέγιστη στα άκρα, όπως φαίνεται στο σχήμα 19. Οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρούμενων τιμών του πάχους του δοκιμίου πρέπει να είναι μέχρι 0,1 mm.

Για τη μέτρηση του πλάτους των δοκιμίων ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία όπως και στη μέτρηση του πάχους, σε εύρος $\pm 0,5$ mm από το κέντρο τους.



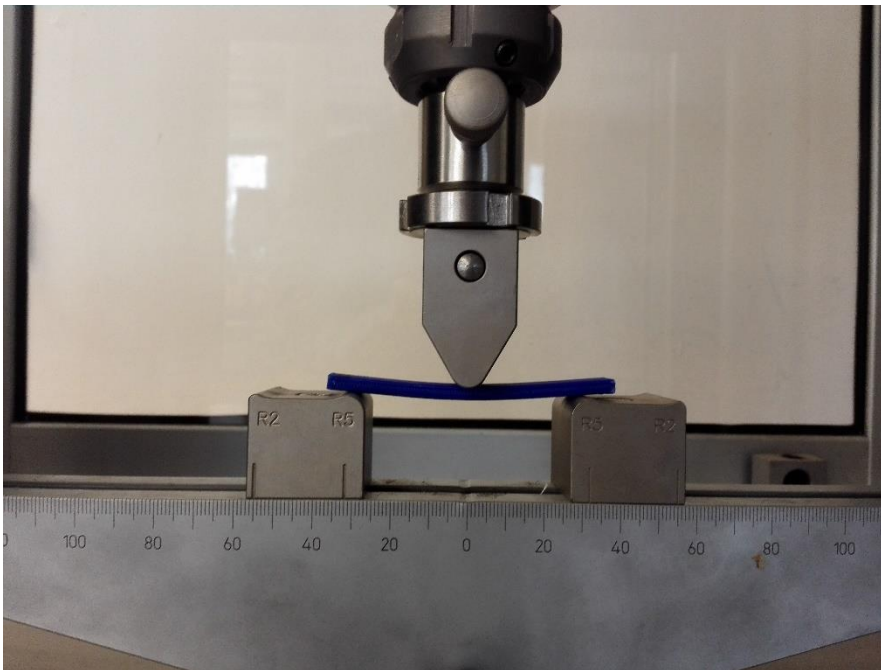
- 1 Εύρος μέτρησης για τον προσδιορισμό του πλάτους(b) $\pm 0,5$ mm
- 2 Εύρος μέτρησης για τον προσδιορισμό του πάχους (h) $\pm 3,25$ mm
- 3 Ελάχιστο πάχος h_{\min}
- 4 Μέγιστο πάχος h_{\max}

Εικόνα 18: Όρια περιοχών για τη μέτρηση του πάχους (h) και του πλάτους (b) των δοκιμίων (ISO 178:2010/ Amd.1:2013(E))

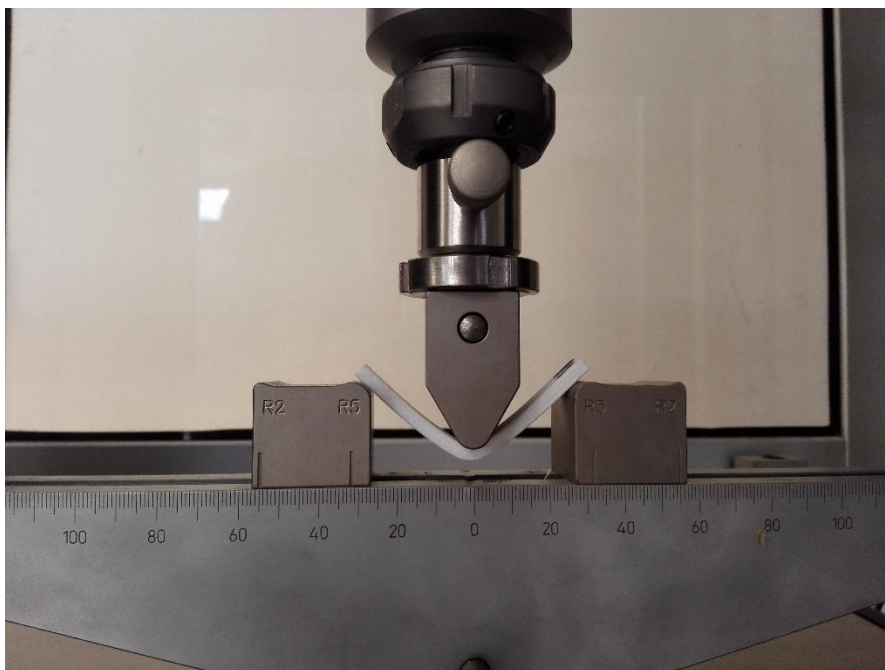
6.4 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ (THE EXPERIMENTAL PROCESS)

Για να εκτελέσουμε το πείραμα της κάμψης τριών σημείων για δοκίμια πάχους 4mm, πρέπει να ρυθμίσουμε τα άκρα στήριξης του δοκιμίου έτσι ώστε να προκύπτει $L=64\text{mm}$, όπως προκύπτει από τη σχέση που ορίζει το πρότυπο(παράγραφος 6.2).

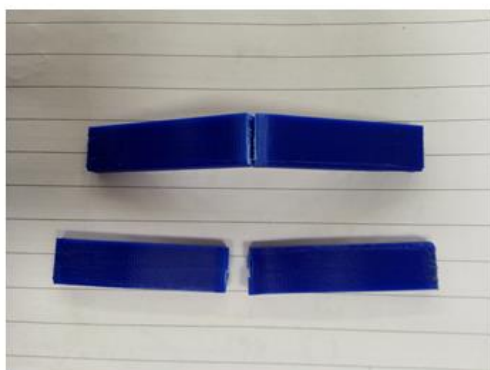
Αφού βεβαιωθούμε ότι η ρύθμιση έγινε σωστά, τοποθετούμε το δοκίμιο συμμετρικά στα δύο στηρίγματα σχηματίζοντας ορθές γωνίες με τα στηρίγματα και το έμβολο που θα ασκήσει το φορτίο. Φέρνουμε το έμβολο σε επαφή με το δοκίμιο και μηδενίζουμε τις ενδείξεις φορτίου και διαδρομής εμβόλου (βέλος κάμψης). Ρυθμίζουμε την ταχύτητα για τα 3 πρώτα δοκίμια από κάθε υλικό σε 2mm/min και για τα υπόλοιπα 3 σε 4mm/min. Καταχωρούμε το μήκος ανάμεσα στα άκρα στήριξης (64mm) και δίνουμε εντολή στο πρόγραμμα της μηχανής για την έναρξη της διαδικασίας.



Εικόνα 19: Δοκίμιο pla υπό κάμψη. Τα άκρα στήριξης έχουν ρυθμιστεί σε απόσταση 64mm μεταξύ τους.



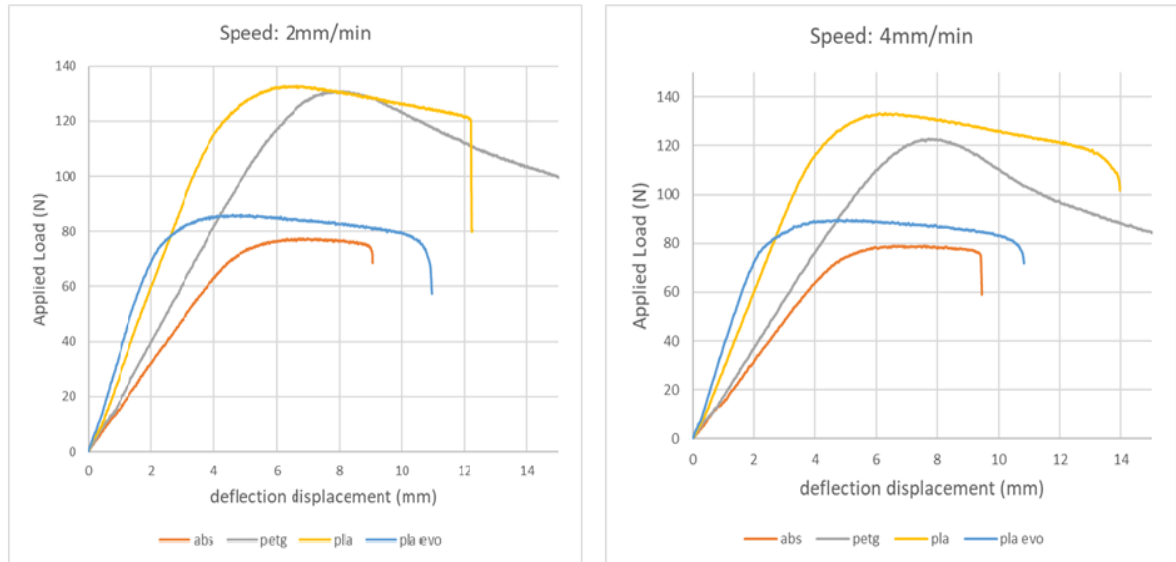
Εικόνα 20: Δοκίμιο petg υπό κάμψη. Τα δοκίμια από petg υλικό παρουσίασαν υψηλή αντοχή και μεγάλη δυσθραυστότητα και στις δύο περιπτώσεις (για $v=2\text{mm/min}$ και $v=4\text{mm/min}$).



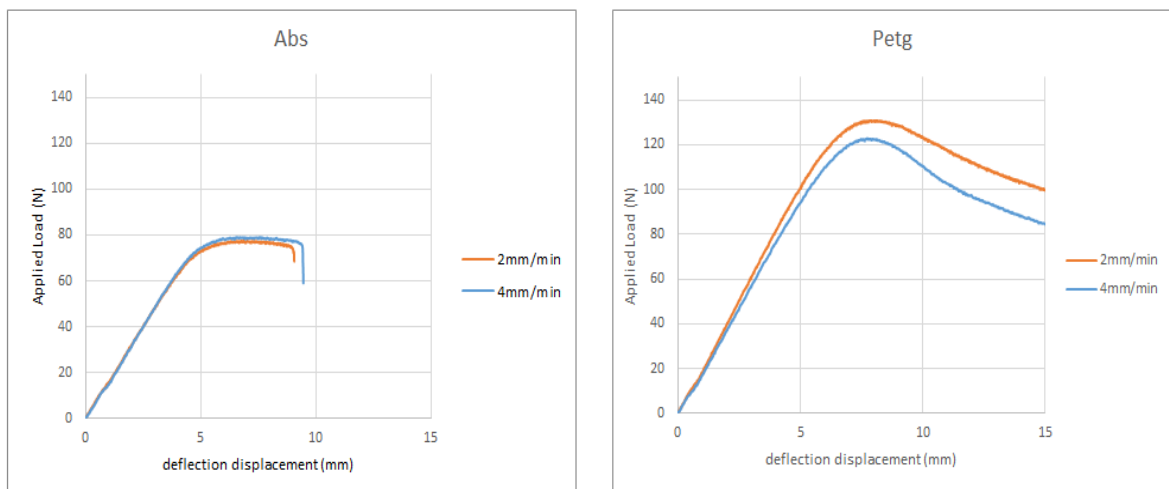
Εικόνα 21: Δοκίμια pla. Σχεδόν όλα τα δοκίμια από pla κόπηκαν στα 2 κατά την αστοχία τους.

6.5 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ (MEASUREMENTS)

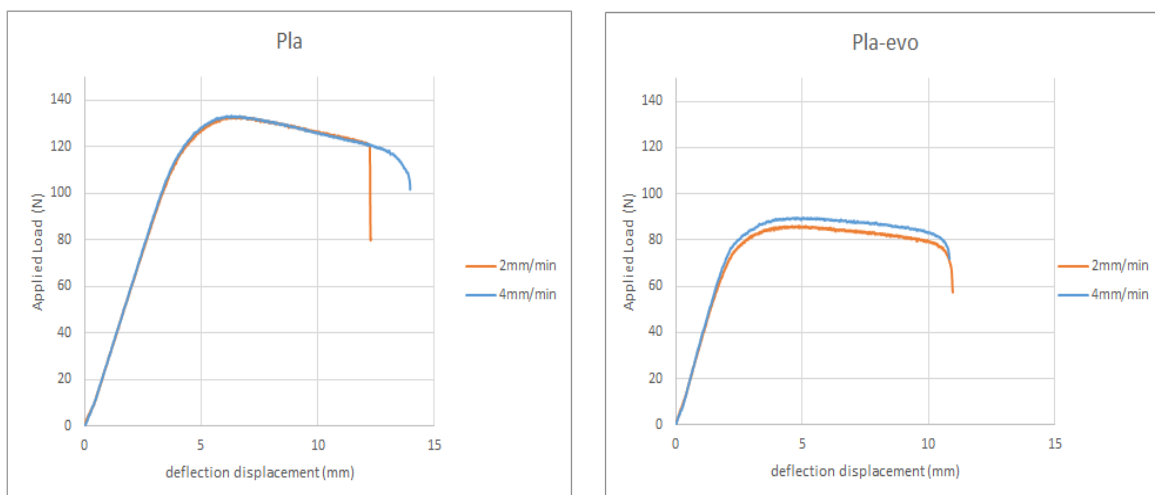
Από τις μετρήσεις εφαρμοζόμενου φορτίου- βέλους κάμψης προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα:



Εικόνα 22: Τα υλικά με την μεγαλύτερη αντοχή σε κάμψη, με τιμές παραπλήσιες, φαίνεται ότι είναι τα petg και το pla, με το πρώτο να παρουσιάζει μεγαλύτερη παραμόρφωση για αντίστοιχες τιμές φορτίου. Από την άλλη το abs παρουσιάζει την μικρότερη αντοχή σε κάμψη και το pla evo παρουσιάζει λίγο πιο αυξημένη αντοχή σε κάμψη από το abs, πολύ μικρότερη όμως σε σχέση με το petg και το απλό pla. Το ίδιο ισχύει και στα δύο διαγράμματα, με τη διαφορά ότι στο δεξιά διάγραμμα (speed=4mm/min) είναι αισθητή μια διαφορά στην αντοχή του petg.



Εικόνα 23: Η αντοχή του abs δεν επηρεάζεται από την ταχύτητα του εμβόλου που ασκούσε το φορτίο στο δοκίμιο, ενώ το petg φαίνεται να είναι το μοναδικό υλικό που επηρεάστηκε αισθητά από την αλλαγή αυτή.



Εικόνα 24: Από τα διαγράμματα για το pla και pla evo, φαίνεται ότι η διαφορά στην ταχύτητα εκτέλεσης της δοκιμής δεν επηρέασε την αντοχή του pla, ενώ υπάρχει ελάχιστη επιρροή στην αντοχή του pla-evo, και αυτή παρατηρείται έξω από την ελαστική περιοχή του υλικού.

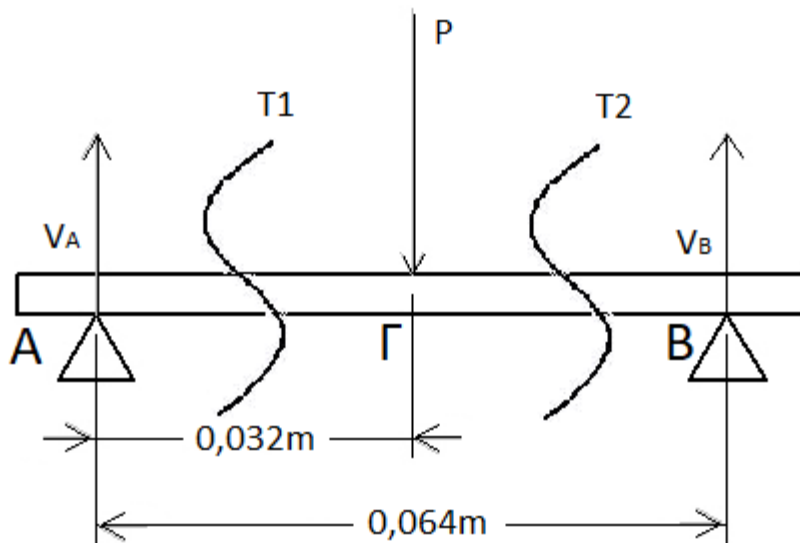
	2mm/min		4mm/min	
	Maximum applied load (N)	f(mm)	Maximum applied load (N)	f(mm)
abs	77,5	6,8	79	6,6
petg	130,8	7,8	122,8	7,7
pla	132,8	6,2	133,3	6,3
pla evo	86	4,6	89,6	4,8

Πίνακας 3: Τιμές μέγιστου εφαρμοσμένου φορτίου και του αντίστοιχου βέλους κάμψης για κάθε υλικό και για τις δύο ταχύτητες, όπως προέκυψε από το μέσο όρο των τριών δοκιμών για την κάθε περίπτωση.

6.6 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (MEASUREMENTS ELABORATION)

6.6.1 Υπολογισμός καμπτικών ροπών (Bending moments)

Αρχικά υπολογίζονται οι δυνάμεις στα άκρα στήριξης του δοκιμίου, κάνοντας χρήση των εξισώσεων στατικής ισορροπίας της δοκού.



Εικόνα 25: Φορτίο και αντιδράσεις στα σημεία στήριξης του δοκιμίου.

Οι εξισώσεις στατικής ισορροπίας είναι:

$$\alpha) \Sigma \vec{F}_x = 0$$

$$\beta) \Sigma \vec{F}_y = 0 \Rightarrow V_A + V_B - P \Rightarrow V_A + V_B = P \quad (1) \text{ και}$$

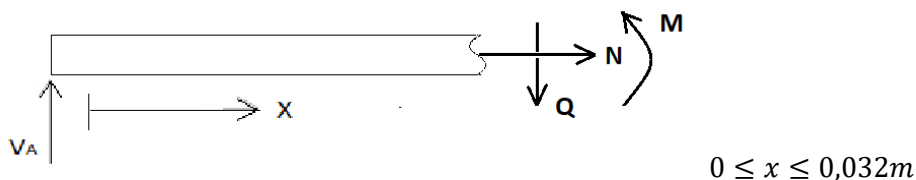
$$\gamma) \Sigma M_A = 0 \Rightarrow 0,032m \cdot P - 0,064m \cdot V_B = 0 \Rightarrow V_B = 0,5 \cdot P \quad (2)$$

Από τις (1) και (2) προκύπτει και η V_A .

Για παράδειγμα, για το υλικό abs και για ταχύτητα 2mm/min, το μέγιστο φορτίο που άντεξε το δοκίμιο είναι $P_{max}=77,5N$, συνεπώς από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι $V_A = V_B = 38,75N$.

Εφαρμόζουμε τις εξισώσεις στατικής ισορροπίας σε κάθε τομή ξεχωριστά και βρίσκουμε τα φορτία Q και τις ροπές M. Έτσι, έχουμε:

Τομή 1

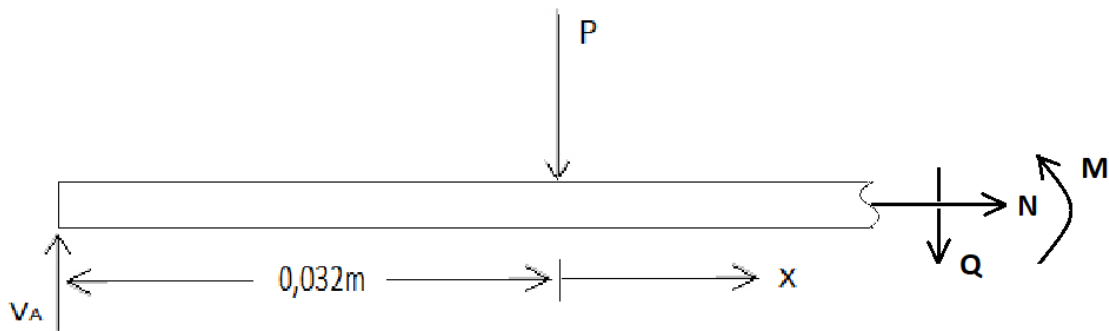


$$\Sigma \vec{F}_y = 0 \Rightarrow V_A - Q = 0 \Rightarrow Q = V_A$$

$$\Sigma M_A = 0 \Rightarrow Q \cdot x - M = 0 \Rightarrow M = Q \cdot x$$

Π.χ. για $V_A = 38,75N$, που υπολογίστηκε στο προηγούμενο παράδειγμα για το abs, προκύπτει ότι $Q = 38,75N$, $M(0) = 0Nm$ και $M(0,032) = 1,24Nm$.

Τομή 2



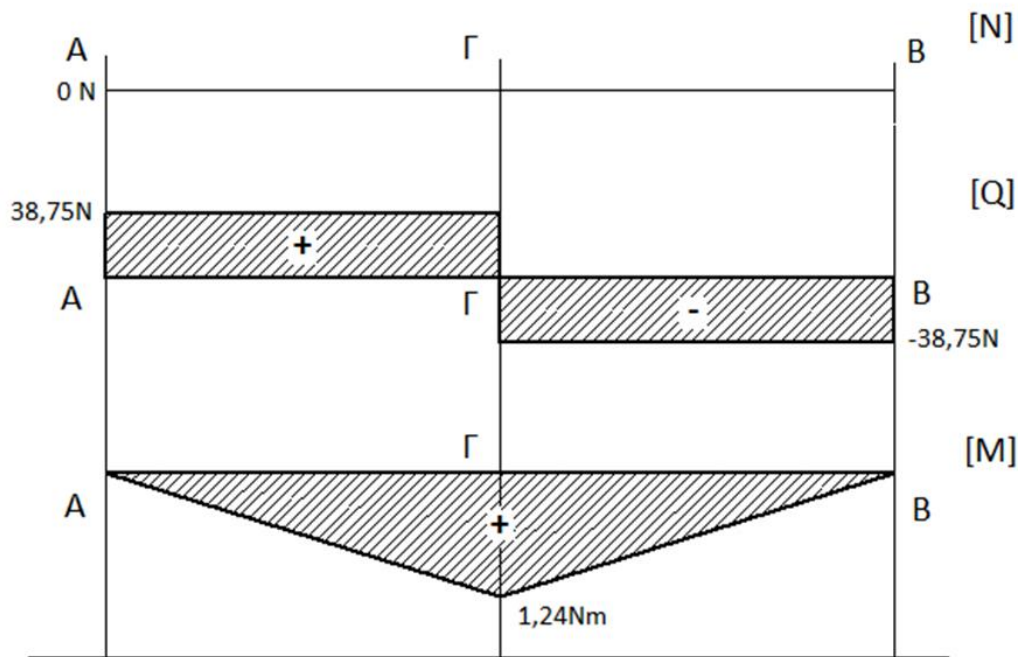
$$0 \leq x \leq 0,032m$$

$$\sum \vec{F}_y = 0 \Rightarrow V_A - P - Q = 0 \Rightarrow Q = V_A - P$$

$$\sum M_B = 0 \Rightarrow -M + V_A \cdot (0,032m + x) - P \cdot x = 0 \Rightarrow M = V_A \cdot (0,032m + x) - P \cdot x$$

Π.χ. για $V_A = 38,75N$ και $P = 77,5N$, σε συνέχεια του προηγούμενου παραδείγματος για το abs, προκύπτει: $Q = -38,75N$, $M(0) = 1,24Nm$ και $M(0,032) = 0Nm$.

Αφού υπολογίσουμε τις ροπές από τις παραπάνω εξισώσεις για τις ακραίες τιμές του x , κάνουμε το διάγραμμα καμπτικών ροπών και βρίσκουμε τη μέγιστη τιμή της καμπτικής ροπής που εφαρμόζεται στο δοκίμιο.



Εικόνα 26: Διάγραμμα τάσεων και καμπτικών ροπών για το abs υλικό με ταχύτητα 2mm/min.

6.6.2 Τάσεις (Stresses)

Για να βρούμε τη μέγιστη τάση χρησιμοποιούμε τη σχέση που αναφέραμε στην παράγραφο 5.3: $\sigma_{max} = \frac{M_{max} \cdot z_{max}}{I_z}$, όπου $z_{max} = y_{max} = \frac{h}{2}$ (συμμετρική διατομή), είναι η απόσταση από την ουδέτερη γραμμή και είναι ίση με 0,002m και

$I_z = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3$, όπου $b = 10\text{mm}$ (πλάτος δοκιμίου) και $h = 4\text{mm}$ (πάχος δοκιμίου), οπότε $I_z = \frac{1}{12} \cdot 0,010\text{m} \cdot 0,004\text{m}^3 = 5,3 \cdot 10^{-11}\text{m}^4$.

Π.χ. για $y_{max} = 0,002\text{m}$ και $M_{max} = 1,24\text{Nm}$, που υπολογίσαμε προηγουμένως για το abs (ταχύτητα 2mm/min), έχουμε: $\sigma_{max} = \frac{1,24\text{Nm} \cdot 0,002\text{m}}{5,3 \cdot 10^{-11}\text{m}^4} = 46,8 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 46,8\text{MPa}$.

Εφαρμόζοντας την προηγούμενη διαδικασία, πήραμε τα παρακάτω αποτελέσματα για τις μέγιστες καμπτικές ροπές και τις μέγιστες ορθές τάσεις:

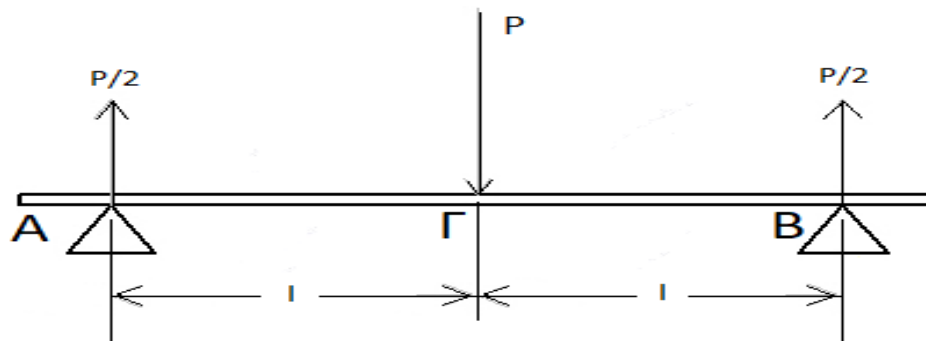
	2mm/min		4mm/min	
	Mmax (Nm)	σ_{max} (MPa)	Mmax (Nm)	σ_{max} (MPa)
abs	1,24	46,8	1,26	47,70
petg	2,09	79,0	1,96	74,14
pla	2,12	80,2	2,13	80,48
pla evo	1,38	51,9	1,43	54,10

Πίνακας 4: Μέγιστες καμπτικές ροπές και ορθές τάσεις.

6.6.3 Υπολογιστικό μέτρο ελαστικότητας (Calculated elastic modulus)

Το υπολογιστικό μέτρο ελαστικότητας προκύπτει από την διαφορική εξίσωση της ελαστικής γραμμής, λύνοντας ως προς E, για μέγιστο βέλος κάμψης.

Με τη βοήθεια του παρακάτω σχήματος γράφουμε τις εκφράσεις των καμπτικών ροπών των τμημάτων ΑΓ και ΓΒ, λαμβάνοντας υπόψιν από την προηγούμενη επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας ότι $V_A = V_B = \frac{P}{2}$



$$\text{ΑΓ: } M(x) = \frac{P}{2} \cdot x, \quad 0 \leq x \leq l$$

$$\Gamma\text{B: } M(x) = \frac{P}{2} \cdot x - P \cdot (x - l), \quad l \leq x \leq 2l$$

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω σχέσεις, η έκφραση της $M(x)$ για το διάστημα ΑΓ εμπεριέχεται πλήρως στην έκφραση της $M(x)$ για το διάστημα ΓΒ.

Επομένως γίνεται: $M(x) = \frac{P}{2} \cdot x|_1 - P \cdot (x - l)|_2$, όπου η έκφραση της ροπής για το τμήμα ΑΓ είναι μέχρι την πρώτη κάθετη γραμμή, ενώ για το τμήμα ΓΒ είναι από την αρχή του δεύτερου μέλους της εξίσωσης μέχρι την δεύτερη κάθετη. Για την διπλή ολοκλήρωση της διαφορικής εξίσωσης, ολοκληρώνουμε το δεύτερο σκέλος της εξίσωσης μέχρι την πρώτη κάθετη ως προς dx και από την πρώτη ως τη δεύτερη κάθετη ως προς $d(x-l)$. Οπότε η διαφορική εξίσωση της ελαστικής γραμμής γράφεται: $E \cdot I \cdot y''(x) = -\frac{P}{2} \cdot x|_1 + P \cdot (x - l)|_2 \Rightarrow$

$$E \cdot I \cdot y'(x) = -\frac{P}{2} \cdot \int x dx|_1 + P \cdot \int (x - l) d(x - l)|_2 = C_1 - \frac{P}{2} \cdot \frac{x^2}{2}|_1 + P \cdot \frac{(x-l)^2}{2}|_2 \quad (1)$$

$$E \cdot I \cdot y(x) = \int C_1 dx - \frac{P}{2} \cdot \int \frac{x^2}{2} dx|_1 + P \cdot \int \frac{(x-l)^2}{2} d(x - l)|_2 = C_2 + C_1 \cdot x - \frac{P}{2} \cdot \frac{x^3}{6}|_1 + P \cdot \frac{(x-l)^3}{6}|_2 \quad (2)$$

$$\text{Έτσι, για το τμήμα ΑΓ ισχύει: } y_1(x) = \frac{C_2 + C_1 \cdot x - \frac{Px^3}{12}}{E \cdot I} \quad (3) \text{ και } y_1'(x) = \frac{C_1 - \frac{Px^2}{4}}{E \cdot I} \quad (4)$$

$$\text{και για το τμήμα ΓΒ: } y_2(x) = \frac{C_2 + C_1 \cdot x - \frac{Px^3}{12} + \frac{P \cdot (x-l)^3}{6}}{E \cdot I} \quad (5) \text{ και } y_2'(x) = \frac{C_1 - \frac{Px^2}{4} + \frac{P \cdot (x-l)^2}{2}}{E \cdot I} \quad (6)$$

$$\text{Από τις οριακές συνθήκες έχουμε: } y_1(0) = 0 \Rightarrow \frac{C_2 + C_1 \cdot 0 - \frac{P \cdot 0^3}{12}}{E \cdot I} = 0 \Rightarrow \frac{C_2}{E \cdot I} = 0 \Rightarrow C_2 = 0 \quad (7)$$

$$y_2'(l) = 0 \Rightarrow \frac{C_1 - \frac{P \cdot l^2}{4} + \frac{P \cdot (l-l)^2}{2}}{E \cdot I} = 0 \Rightarrow \frac{C_1 - \frac{P \cdot l^2}{4}}{E \cdot I} = 0 \Rightarrow C_1 = \frac{P \cdot l^2}{4} \quad (8)$$

$$\text{Από (2), (7), (8) προκύπτει: } E = \frac{P \cdot (3 \cdot l^2 \cdot x - x^3 + 2 \cdot (x-l)^3)}{12 \cdot I \cdot y(x)} \quad (9), \text{ όπου } y(x) = y_{max} \text{ είναι}$$

το βέλος κάμψης που λαμβάνει χώρα στη θέση $x = l = 0,032m$ και είναι αποτέλεσμα του αντίστοιχου φορτίου (P) που μετρήθηκε, $I = I_z = 5,3 \cdot 10^{-11} m^4$.

Επομένως η (9) γίνεται: $E = \frac{P \cdot (3 \cdot l^3 - l^3 + 2 \cdot (l-l)^3)}{12 \cdot 5,3 \cdot 10^{-11} m^4 \cdot y_{max}}$, που απλοποιείται σε:

$$E = \frac{0,103 \cdot P}{y_{max}} \cdot 10^6 \frac{N}{m^2} = \frac{0,103 \cdot P}{y_{max}} MPa \quad (10)$$

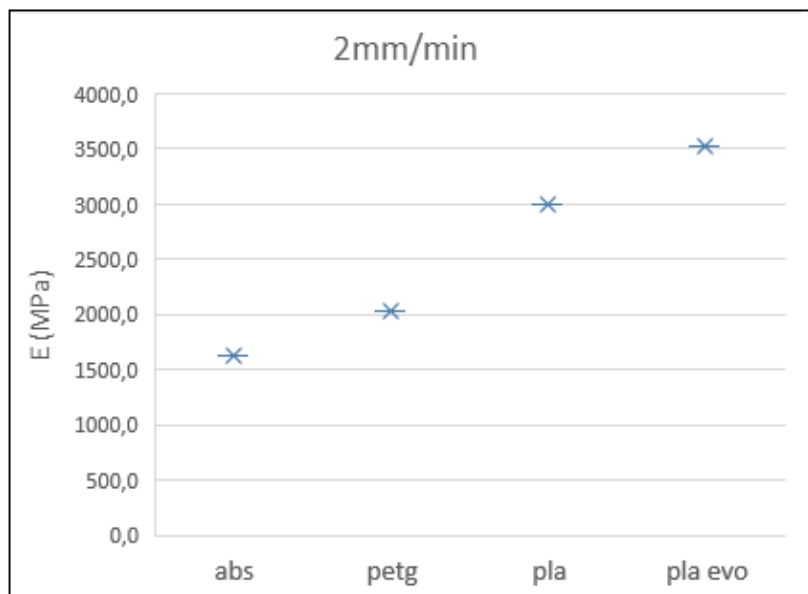
Αντικαθιστώντας τα P και y_{max} στην (10) με τις μετρήσεις για το κάθε δοκίμιο προκύπτει το αντίστοιχο μέτρο ελαστικότητας.

Π.χ. για το υλικό abs, για $v = 2mm/min$ που χρησιμοποιήθηκε και στα προηγούμενα παραδείγματα, για $P = 62,5N$ και $y_{max} = 3,95mm$, $E_{abs} = \frac{0,103 \cdot 62,5}{0,00395m} = 1631,3 MPa$.

Ομοίως υπολογίστηκαν και τα υπόλοιπα μέτρα ελαστικότητας, τα οποία φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

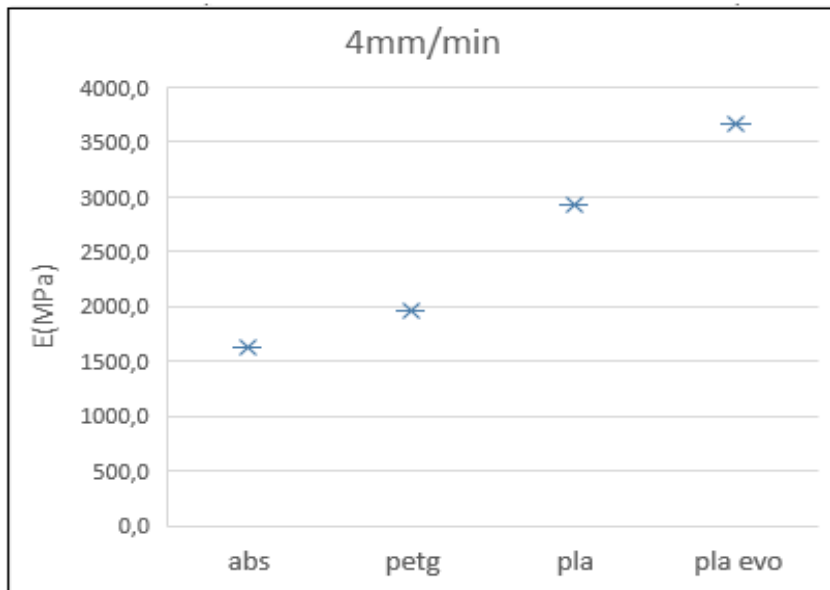
	v=2mm/min	v=4mm/min
	E (Mpa)	E (Mpa)
abs	1631,3	1630,2
petg	2034,3	1964,2
pla	2996,2	2934,0
pla evo	3515,3	3664,4

Πίνακας 5: Υπολογιστικά μέτρα ελαστικότητας.



(α)

Εικόνα 27α: Υπολογιστικά μέτρα ελαστικότητας για $v = 2mm/min$



(β)

Εικόνα 27β: Υπολογιστικά μέτρα ελαστικότητας για $v = 4mm/min$

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ (CONCLUSIONS)

Είναι πολύ δύσκολο οι συνθήκες περιβάλλοντος, κατά τις οποίες γίνεται η εναπόθεση του ημι-τηγμένου υλικού, να ελεγχθούν πλήρως. Επίσης κάποιες παράμετροι πρέπει να ρυθμιστούν διαφορετικά από μηχάνημα σε μηχάνημα, ανάλογα το σχεδιασμό και την τεχνολογία του, όπως για παράδειγμα την θερμοκρασία του τραπεζιού, τη λειτουργία των ψηκτρών της κεφαλής, την ταχύτητα εκτύπωσης κ.α. Συνεπώς είναι λογικό να υπάρχουν κάποιες αποκλίσεις στις ιδιότητες του τελικού προϊόντος σε κάθε περίπτωση.

Στο συγκεκριμένο τρισδιάστατο εκτυπωτή που χρησιμοποιήθηκε για την εκτύπωση των δοκιμών του πειράματος, η πλατφόρμα εκτύπωσης δεν βρίσκεται εντός κάποιου θαλάμου, έτσι η υγρασία, η θερμοκρασία περιβάλλοντος, ο αέρας κλπ. επηρεάζουν άμεσα τη διαδικασία της εναπόθεσης του υλικού.

Επίσης από τις δοκιμές παρατηρήθηκε ότι η μεταβολή της ταχύτητας εφαρμογής του φορτίου επηρέασε ελάχιστα την αντοχή των εξεταζόμενων πολυμερών υλικών, εκτός από την περίπτωση του pla eno, όπου υπήρξε εμφανής διαφοροποίηση των υπολογιστικών μέτρων ελαστικότητας, της τάξης των 150MPa.

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων σε κάμψη, ισχύουν για την περιοχή όπου οι σχέση τάσεων/ παραμορφώσεων είναι γραμμική, πράγμα που σημαίνει ότι για τα περισσότερα πλαστικά μπορούν να παρέχουν ακρίβεια για μικρές μόνο παραμορφώσεις. Τα αποτελέσματα ωστόσο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για λόγους σύγκρισης.

Τα μέτρα ελαστικότητας των τεσσάρων εξεταζόμενων πολυμερών, που προέκυψαν υπολογιστικά από τα δεδομένα που συλλέχθηκαν κατά την δοκιμή σε κάμψη, παρουσιάζουν αποκλίσεις από αυτά που αναφέρουν τα τεχνικά τους φύλλα, κυρίως το abs, που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη απόκλιση. Από τον πίνακα 2, φαίνεται ότι τα μέτρα ελαστικότητας των abs, pla, pla eno έχουν υπολογιστεί μέσω εφελκυσμού, ενώ στην περίπτωση του petg, το μέτρο ελαστικότητας έχει προκύψει από δοκιμή κάμψης. Γνωρίζουμε ότι ιδεατά τα μέτρα ελαστικότητας σε κάμψη και σε εφελκυσμό ταυτίζονται, ωστόσο στην πραγματικότητα μπορεί να υπάρξουν διαφορές στις τιμές αυτών των δύο, κάτι που μπορεί να συμβεί ιδιαίτερα στα πολυμερή. Αυτός είναι ένας από τους λόγους που η τιμή των μέτρων ελαστικότητας που υπολογίστηκαν στην παρούσα εργασία διαφέρει σε ένα βαθμό από τα δοσμένα μέτρα ελαστικότητας των παραπάνω υλικών.

8 ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΟΡΩΝ (INDEX OF TERMS)

Άκαμπτο πλαστικό: πλαστικό που το μέτρο ελαστικότητάς του είναι μεγαλύτερο από 700 MPa.

Αντοχή σε κάμψη (σ_{fM}): η μέγιστη καμπτική τάση που μπορεί να αντέξει το δοκίμιο.

Καμπτική παραμόρφωση (ϵ_f): είναι η ονομαστική κλασματική μεταβολή του μήκους ενός στοιχείου της επιφάνειας του δοκιμίου στο μέσον του.

Καμπτική τάση (σ_f): η ονομαστική τάση στην εξωτερική επιφάνεια του δοκιμίου, στο μέσον του μήκους του.

Καμπτική τάση σε συμβατική παραμόρφωση (σ_{fC}): η καμπτική τάση που υπολογίζεται για συμβατική παραμόρφωση s_C (βλέπε «συμβατική παραμόρφωση»

Μήκος μεταξύ των άκρων στήριξης για το δοκίμιο (L): απόσταση μεταξύ των σημείων επαφής του δοκιμίου με τα άκρα στήριξης της μηχανής.

Παραμόρφωση/ βέλος κάμψης (s): είναι η απόσταση κατά την οποία η πάνω ή η κάτω επιφάνεια, στο μέσο του δοκιμίου παρεκκλίνει από την αρχική της θέση λόγω κάμψης.

Παραμόρφωση κατά την θραύση (ϵ_{fB}): είναι η ονομαστική κλασματική μεταβολή του μήκους ενός στοιχείου της επιφάνειας του δοκιμίου στο μέσον του κατά την οποία το δοκίμιο θραύεται.

Παραμόρφωση μέγιστης τάσης (ϵ_{fM}): είναι η ονομαστική κλασματική μεταβολή του μήκους ενός στοιχείου της επιφάνειας του δοκιμίου στο μέσον του, που αντιστοιχεί στη μέγιστη καμπτική τάση που μπορεί να αντέξει το δοκίμιο.

Ρυθμός καμπτικής παραμόρφωσης (r): ο ρυθμός με τον οποίο αυξάνεται η καμπτική παραμόρφωση κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

Συμβατική παραμόρφωση (s_C): λαμβάνεται ως το βέλος κάμψης στο μέσο του δοκιμίου, που ισοδυναμεί με 1,5 φορές το πάχος του δοκιμίου.

Τάση θραύσης (σ_{fB}): η τάση τη στιγμή που το δοκίμιο θραύεται.

Ταχύτητα δοκιμής (v): η σχετική ταχύτητα μεταξύ της βάσης στήριξης του δοκιμίου και του εμβόλου μέσω του οποίου επιβάλλεται το φορτίο.

9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ (REFERENCES)

Ξενογλώσση

Agnes Bagsik, Volker Schöppner, 2011. “MECHANICAL PROPERTIES OF FUSED DEPOSITION MODELING PARTS MANUFACTURED WITH ULTEM*9085”. Available at: <http://www.stratasys.co.kr/~media/Main/Files/FDM%20Test%20Reports/Mechanical%20Properties%20of%20UItem%20FDM%20Parts.pdf>

Alva Tontowi, L Ramdani, Dawi Karomati Baroroh, 2017. “Optimization of 3D-Printer Process Parameters for Improving Quality of Polylactic Acid Printed Part”. International Journal of Engineering and Technology, Vol 9, No. 2, pp. 589- 600, Doi: 10.21817/ijet/2017/v9i2/170902044. Available at: https://www.researchgate.net/publication/317079668_Optimization_of_3D-Printer_Process_Parameters_for_Improving_Quality_of_Polylactic_Acid_Printed_Part

Angel R. Torrado Perez, David A. Roberson, Ryan B. Wicke, 2014. “Fracture Surface Analysis of 3D-Printed Tensile Specimens of Novel ABS-Based Materials”. Material Science, University of Texas at El Paso, doi: 10.1007/s11668-014-9803-9. Available at: https://www.researchgate.net/publication/262571946_Fracture_Surface_Analysis_of_3D-Printed_Tensile_Specimens_of_Novel_ABS-Based_Materials

Asif Muhammad, Ramezani Maziar, Sun Xiting, Wang Liang, Xu Xun, Giffney Tim, Travas-Sejdic Jadranka, Aw Kean, 2017. “A New 3D Printing Technique Using Extrusion of Photopolymer”, Twenty fifth International Conference on Process and Fabrication of Advanced Materials, At University of Auckland, New Zealand. Available at: https://www.researchgate.net/publication/317577575_A_New_3D_Printing_Technique_Using_Extrusion_of_Photopolymer

Behzad Rankouhi, Sina Javadpour, Fereidoon Delfanian, Todd Letcher, 2016. “Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D Printed ABS With Respect to Layer Thickness and Orientation”. Journal of Failure Analysis and Prevention, Volume 16, Issue 3, pp. 467–481. Available at: <https://link-springer-com.ezproxy.kingston.ac.uk/article/10.1007/s11668-016-0113-2>

Heechang Kim, Eunju Park, Suhyun Kim, Bumsoo Park, Namhun Kim, Seungchul Lee, 2017. “Experimental Study on Mechanical Properties of Single- and Dual-Material 3D Printed Products”. *Procedia Manufacturing*, Volume 10, pp. 887-897. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978917302585>

J.M. Chacón, M.A. Caminero, E. García-Plaza, P.J. Núñez, 2017. “Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection”. *Materials & Design*, Volume 124, pp. 143-157. Available at: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.kingston.ac.uk/science/article/pii/S0264127517303143>

Ksawery Szykiedans, Wojciech Credo, Dymitr Osiński, 2017. “Selected mechanical properties of PETG 3-D prints”. *Procedia Engineering*, Volume 177, pp. 455-461. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817307531>

Mishra Swayam Bikash, Mahapatra Siba Sankar. 2014. “Improvement in Tensile Strength of FDM Built Parts by Parametric Control”. *Applied Mechanics and Materials*, Volume 592-594, pp. 1075-1079. Available at: <https://search-proquest-com.ezproxy.kingston.ac.uk/docview/1825988661/fulltextPDF/4956EDB963B14E64PQ/1?accountid=14557>

My3dmatter.com, 2015. “Marketed as “premium”, “pro” or “smart”, are improved PLA and ABS filaments truly better?” Available at: <http://my3dmatter.com/are-improved-pla-and-abs-filaments-truly-better/> (as of Sep. 16, 2017, 10:30 GMT).

My3dmatter.com, 2015. “What is the influence of infill %, layer height and infill pattern on my 3D prints?” Available at: <http://my3dmatter.com/influence-infill-layer-height-pattern/>

Phil Lambert, 2014. “Tensile properties of materials: FDM printer & SLS printer”. Available at: <https://www.sculpteo.com/blog/2014/05/14/material-considerations-choose-right-plastic-production-method-part-2/>

Rafael Thiago Luiz Ferreira, Igor Cardoso Amatte, Thiago Assis Dutra, Daniel Bürger, 2017. “Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers”. *Composites Part B: Engineering*, Volume 124, pp. 88-100. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135983681633195X>

See Wikipedia, Acrylonitrile butadiene styrene, https://en.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile_butadiene_styrene (as of Sep. 10, 2017, 14:30 GMT).

See Wikipedia, Laminated Object Manufacturing, https://en.wikipedia.org/wiki/Laminated_object_manufacturing (as of Sep. 13, 2017, 12:30 GMT).

See Wikipedia, Polyethylene terephthalate, https://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene_terephthalate (as of Sep. 14, 2017, 10:00 GMT).

See Wikipedia, Polylactic acid, https://en.wikipedia.org/wiki/Polylactic_acid (as of Sep. 13, 2017, 11:00 GMT).

Shabat D., Rosenthal Y., Ashkenazi D., Stern A., 2017. “MECHANICAL AND STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF FUSED DEPOSITION MODELING ABS MATERIAL”. *The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle XII : Welding Equipment and Technology; Galati, Volume 28, pp.16-24.* Available at: <https://search-proquest-com.ezproxy.kingston.ac.uk/docview/1987358395/fulltextPDF/39C91B9B9742409DPQ/1?accountid=14557>

Shubham Pritish, Sikidar Arnab, Chand Teg, 2016. “The Influence of Layer Thickness on Mechanical Properties of the 3D Printed ABS Polymer by Fused Deposition Modeling”. *Key Engineering Materials*, Volume 706, pp. 63-67. Available at: <https://search-proquest-com.ezproxy.kingston.ac.uk/docview/1812542785/fulltextPDF/56F12D1FE2EE4421PQ/1?accountid=14557>

Tahseen Fadhil Alani, Dr.Farhad Mohammad Othman, Hind Basil Al-Attraqchi, 2017. "Effect of infill Parameter on compression property in FDM Process". International Journal of Engineering Research and Application, Volume 7, Issue 10, (Part -I), pp.16-19. Available at: https://www.researchgate.net/publication/320335445_Effect_of_infill_Parameter_on_compression_property_in_FDM_Process

Todd Letcher, Megan Waytashek, 2014, Conference: ASME IMECE, At Montreal, CA. "Material Property Testing of 3D-Printed Specimen in PLA on an Entry-Level 3D Printer". DOI: 10.1115/IMECE2014-39379. Available at: https://www.researchgate.net/publication/272623242_Material_Property_Testing_of_3D-Printed_Specimen_in_PLA_on_an_Entry-Level_3D_Printer

Ελληνόγλωσσα

Γιαννακόπουλος Ι. Κωνσταντίνος, 2013. «Σημειώσεις πειραματικής αντοχής των υλικών [Εργαστηριακός οδηγός]».

Γιαννάτσης Ι., Δεδούσης Β., Κανελλίδης Β., 2015. «Σύγχρονες τεχνολογίες κατασκευής με τη βοήθεια Η/ Υ».

Χαρώνης Παναγιώτης Γ. , 2002. « Αντοχή των υλικών».

