



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**Βελτιστοποίηση μηχανικών ιδιοτήτων FFF δοκιμίων
προσθετικών κατασκευών διπλού υλικού. Έλεγχος σε κάμψη.**

Συγγραφέας:

ΛΕΝΤΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Επιβλέποντες Καθηγητές:

Σαγιάς Βασίλειος

Στεργίου Κωνσταντίνος

ΑΘΗΝΑ – ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ – 2022



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

Diploma Thesis

**Mechanical properties optimization of FFF Additive
Manufacturing dual material specimens. Bending testing.**

AUTHOR:

LENTAS NIKOLAOS

Supervisors:

Sagias Vasileios

Stergiou Konstantinos

ATHENS - SEPTEMBER - 2022

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή
Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
Στεργίου Κωνσταντίνος	
Ρώσσης Κυριάκος	
Σαγιάς Βασίλειος	

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Λέντας Νικόλαος, Σεπτέμβριος, 2022

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Λέντας Νικόλαος του Ιωάννη, με αριθμό μητρώου 272017095 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

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 σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου

Ο Δηλών

ΛΕΝΤΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ



Αφιέρωση

Στην οικογένεια μου που ξεπέρασε κάθε δυσκολία για να καταφέρω να σπουδάσω.

Πίνακας εικόνων

Εικόνα 1: Διαδικασία 3D printing (S. Deepak Kumar, 2022).....	12
Εικόνα 2: Διάταξη εκτύπωσης FDM	12
Εικόνα 3: Χρονοδιάγραμμα της ιστορίας του 3D printing (Faisal Aqlan, 2020).....	13
Εικόνα 4: Το πρώτο σύστημα 3D printing (αριστερά), το πρώτο εκτυπωμένο τεμάχιο (δεξιά).	13
Εικόνα 5: Μέθοδος λειτουργίας FDM	14
Εικόνα 6: Υλικά εκτύπωσης της μεθόδου FDM (Anketa Jandyal, 2022)	14
Εικόνα 7: Μέθοδος λειτουργίας SLA	15
Εικόνα 8: Μέθοδος λειτουργίας PBF.....	16
Εικόνα 9: Μέθοδος λειτουργίας PBF.....	17
Εικόνα 10: Μέθοδος λειτουργίας Contour Crafting	17
Εικόνα 11: Μέθοδος λειτουργίας DED	18
Εικόνα 12: Μέθοδος λειτουργίας LOM	19
Εικόνα 13: Εφαρμογές προσθετικών κατεργασιών	20
Εικόνα 14: Το λεωφορείο OLLI	21
Εικόνα 15: Πρωτότυπο μοντέλο κινητήρα	21
Εικόνα 16: 3D printed εξαρτήματα αεροδιαστημικών εφαρμογών	22
Εικόνα 17: Πιθανές χρήσεις προσθετικών κατασκευών στο ανθρώπινο σώμα	22
Εικόνα 18: Εκτύπωση με raster angle 0°	24
Εικόνα 19: Εκτύπωση με raster angle 90°	24
Εικόνα 20: Πίνακας μεταβλητών	25
Εικόνα 21: Πίνακας Taguchi	25
Εικόνα 22: Γεωμετρία δοκιμίου	26
Εικόνα 23: Νήμα εκτύπωσης.....	26
Εικόνα 24: 3D Printer	27
Εικόνα 25: Μηχανή δοκιμών GALDABINI Quasar 100.....	27
Εικόνα 26: Πίνακας μεταβλητών – παραμέτρων εκτύπωσης	28
Εικόνα 27: Πίνακας Taguchi 3 X 2 των παραμέτρων και των επιπέδων ανά παράμετρο	28
Εικόνα 28: Πίνακας σχεδιασμού πειραμάτων	28
Εικόνα 29: Περιγραφή παραμέτρων εκτύπωσης πρώτου πειράματος	29
Εικόνα 30: Περιγραφή παραμέτρων εκτύπωσης δεύτερου πειράματος	30
Εικόνα 31: Περιγραφή παραμέτρων εκτύπωσης τρίτου πειράματος	31
Εικόνα 32: Περιγραφή παραμέτρων εκτύπωσης τέταρτου πειράματος	32
Εικόνα 33.....	33
Εικόνα 34: Τομή A – A' για raster angle 0°, 90° και 45°	33
Εικόνα 35: Τομή B – B' για εκτύπωση BY LAYER και BY BLOCK	34
Εικόνα 36: 40% - Raster angle 0°	Εικόνα 37: 60% - Raster angle 0° ..
Εικόνα 38: 40% - Raster angle 90°	Εικόνα 39: 60% - Raster angle 90°
.....	35
Εικόνα 40: 40% - Raster angle 45°	Εικόνα 41: 60% - Raster angle 45°.
Εικόνα 42: Πείραμα 1 40%	36
Εικόνα 43: Πείραμα 1 60%	36
Εικόνα 44: Πείραμα 2 40%	37
Εικόνα 45: Πείραμα 2 60%	37

Εικόνα 46: Πείραμα 3 40%	38
Εικόνα 47: Πείραμα 3 60%	38
Εικόνα 48: Πείραμα 4 40%	39
Εικόνα 49: Πείραμα 4 60%	39
Εικόνα 50: Πείραμα 1	40
Εικόνα 51: Πείραμα 2	40
Εικόνα 52: Πείραμα 3	40
Εικόνα 53: Πείραμα 4	40
Εικόνα 54: Δοκίμια στο περιβάλλον του CURA 5 πριν το "Slicing"	41
Εικόνα 55: Διάταξη δοκιμών πάνω στην τράπεζα	42
Εικόνα 56: Αρίθμηση δοκιμών από αριστερά προς τα δεξιά 1,2,3,4 και 5	42
Εικόνα 57: Διαδικασία εκτύπωσης.....	43
Εικόνα 58: Εκτυπωμένα δοκίμια (Πείραμα 1).....	44
Εικόνα 59: Σημεία μετρήσεων.....	44
Εικόνα 60 : Διαστασιολογικός πίνακας δοκιμών	45
Εικόνα 61: Πίνακας στατιστικής ανάλυσης.....	45
Εικόνα 62: Δοκιμή κάμψης (α)	46
Εικόνα 63: Δοκιμή κάμψης (β)	46
Εικόνα 64: Δοκίμια 1 ^{ου} πειράματος μετά την δοκιμή κάμψης	47
Εικόνα 65: Δοκίμια 2 ^{ου} πειράματος μετά την δοκιμή κάμψης	48
Εικόνα 66: Δοκίμια 3 ^{ου} πειράματος μετά την δοκιμή κάμψης	49
Εικόνα 67: Δοκίμια 4 ^{ου} πειράματος μετά την δοκιμή κάμψης	50
Εικόνα 68: Διάγραμμα Τάσης – Ανοιγμένης παραμόρφωσης του 1 ^{ου} πειράματος.....	52
Εικόνα 69: Πίνακας μηχανικών ιδιοτήτων δοκιμών 1 ^{ου} πειράματος.....	53
Εικόνα 70: Διάγραμμα Τάσης – Ανοιγμένης παραμόρφωσης του 2 ^{ου} πειράματος.....	54
Εικόνα 71: Πίνακας μηχανικών ιδιοτήτων δοκιμών 2 ^{ου} πειράματος.....	55
Εικόνα 72: Διάγραμμα Τάσης – Ανοιγμένης παραμόρφωσης του 3 ^{ου} πειράματος.....	56
Εικόνα 73: Πίνακας μηχανικών ιδιοτήτων δοκιμών 3 ^{ου} πειράματος.....	57
Εικόνα 74: Διάγραμμα Τάσης – Ανοιγμένης παραμόρφωσης του 4 ^{ου} πειράματος.....	58
Εικόνα 75: Πίνακας μηχανικών ιδιοτήτων δοκιμών 4 ^{ου} πειράματος.....	59
Εικόνα 76: Συγκριτικό διάγραμμα μέσων καμπυλών τάσης – ανοιγμένης παραμόρφωσης. 60	
Εικόνα 77: Πίνακας μέσων UTS και μέσης ανοιγμένης παραμόρφωσης ανά πείραμα	61
Εικόνα 78: Διάγραμμα επιρροής της κάθε μεταβλητής ως προς το UTS των δοκιμών.....	62
Εικόνα 79: Διάγραμμα επιρροής της κάθε μεταβλητής ως προς την ανοιγμένη παραμόρφωση (ε) των δοκιμών.....	62
Εικόνα 80: Εκτυπωμένα δοκίμια βέλτιστου συνδυασμού μεταβλητών ως προς το UTS.....	63
Εικόνα 81: Αποτελέσματα δοκιμαστικών εκτυπώσεων.....	65

Περιεχόμενα

1. Περίληψη.....	10
2. Εισαγωγή	11
3. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	12
3.1 Ορισμός προσθετικών κατεργασιών.....	12
3.2 Ιστορική αναδρομή	13
3.3 Τεχνολογίες προσθετικών κατεργασιών	14
3.3.1 Fused deposition modeling	14
3.3.2 Stereolithography	15
3.3.3 Power Bed Fusion	16
3.3.4 Inkjet Printing and Contour Crafting	16
3.3.5 Direct Energy Deposition.....	18
3.3.6 Laminated Object Manufacturing	19
3.4 Εφαρμογές των μεθόδων προσθετικών κατεργασιών	20
4. Μεθοδολογία	23
5. Πειραματικό μέρος.....	23
5.1 Εξοπλισμός	26
5.2 Σχεδιασμός πειραμάτων	28
5.3 Μοντελοποίηση.....	33
5.4 Παραγωγή δοκιμίων.....	43
5.5 Διαστασιολογικός έλεγχος	44
5.6 Δοκιμή κάμψης.....	46
6. Αποτελέσματα	51
6.1 Επεξεργασία μετρήσεων	51
6.2 Διαγράμματα.....	52
6.3 Σύγκριση πειραμάτων	60
7. Προβλήματα	64
8. Συμπεράσματα – Συζήτηση	66
9. Βιβλιογραφία.....	68

1. Περίληψη

Από της πιο διαδεδομένες μεθόδους προσθετικών κατεργασιών είναι η Fused Deposition Modeling. Σημαντική παραλλαγή της είναι η εκτύπωση διπλού υλικού η οποία παρουσιάζει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον, όπως και οι μηχανικές ιδιότητες των προϊόντων της. Αρχικά πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική έρευνα σχετικά με τα υλικά και τις παραμέτρους εκτύπωσης με το μεγαλύτερο επιστημονικό ενδιαφέρον και επιλέχθηκαν πρότυπα για την μηχανική δοκιμή και τους υπολογισμούς των αποτελεσμάτων. Ακολούθως έγινε σχεδιασμός πειραμάτων με χρήση μεθοδολογίας Taguchi. Τα δοκίμια μοντελοποιήθηκαν σε πρόγραμμα CAD με σκοπό την παραγωγή τους. Τέλος, πραγματοποιήθηκε δοκιμή κάμψης και έγινε σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων.

Λέξεις κλειδιά: 3D printing, Μηχανικές ιδιότητες, Δοκιμή κάμψης, Θερμοπλαστικά, Βελτιστοποίηση

2. Εισαγωγή

Οι προσθετικές κατεργασίες (Additive Manufacturing, AM) αποτελούν πλέον έναν από τους βασικούς πυλώνες της επιστήμης των κατασκευών όπως οι αφαιρετικές μέθοδοι παραγωγής (Subtractive Manufacturing), η χύτευση (Formative Manufacturing) και η μορφοποίηση (Shaping Manufacturing). Πρόκειται για μια νέα τεχνολογία αφού για πρώτη φορά εφαρμόστηκε σχεδόν τέσσερις δεκαετίες πριν και γνωρίζει μεγάλη εξέλιξη τα τελευταία χρόνια προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα συγκριτικά με της συμβατικές μεθόδους κατασκευών (Wohlers, 2016). Το γεγονός αυτό εντείνει την ζήτηση για γνώση γύρω από την τρισδιάστατη εκτύπωση (3D Printing).

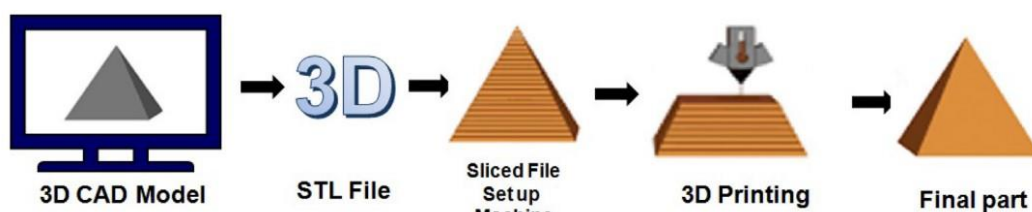
Εξ ορισμού πρόκειται για την διαδικασία κατασκευής ενός αντικειμένου μέσω εναπόθεσης υλικού επίπεδο το επίπεδο, διαμορφώνοντας έτσι το τελικό αποτέλεσμα. Οι προσθετικές κατεργασίες προσφέρουν δυνατότητες όπως η κατασκευή πολύπλοκων γεωμετριών, χρήση μεγάλης ποικιλίας πρώτων υλών και η ταχύτατη εκτύπωση πρωτοτύπων. Ακόμα, το μεγάλο πλήθος διαφορετικών μεθόδων εκτύπωσης συμβάλει στην ικανοποίηση των αναγκών πληθώρας εφαρμογών (Wohlers, 2016) (Aniket Jadhav, 2022) (Anketa Jandyal, 2022). Έτσι αυξάνεται η παραγωγικότητα της βιομηχανίας καθώς και η ποιότητα των προϊόντων.

Είναι γεγονός ότι τα αποτελέσματα μιας 3D εκτύπωσης επηρεάζονται σημαντικά από τις παραμέτρους εκτύπωσης (Lokesh N., 2022) (Anoop Kumar Sood, 2010) (Vaibhav Bhosale, 2022) (Aboma Wagari Gebisa, 2019) (Manav Doshi, 2022). Για τον λόγο αυτό στην παρούσα διπλωματική εργασία θα πραγματοποιηθεί μοντελοποίηση δοκιμών διπλού υλικού θέτοντας ως βασικές παραμέτρους την εναλλαγή των επιπέδων, των γωνιών εκτύπωσης και την κατ' όγκο περιεκτικότητα του κάθε υλικού. Στη συνέχεια τα δοκίμια θα εκτυπωθούν και θα υποβληθούν σε δοκιμή κάμψης τριών σημείων. Τέλος τα αποτελέσματα της δοκιμής θα εξετασθούν και θα γίνει σύγκριση μεταξύ των πειραμάτων.

3. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

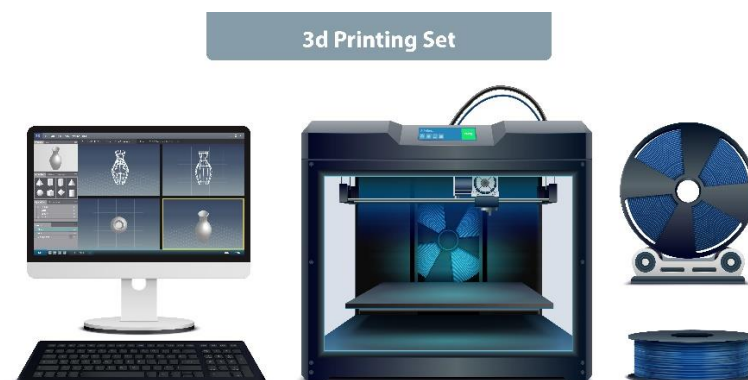
3.1 Ορισμός προσθετικών κατεργασιών

Οι τρισδιάστατες προσθετικές κατεργασίες είναι μια τεχνολογία κατασκευής που βασίζεται στην εναπόθεση υλικού. Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιείται μοντελοποίηση του προϊόντος σε κάποιο πρόγραμμα τρισδιάστατης σχεδίασης CAD με σκοπό την εξαγωγή αρχείου τύπου STL. Στο δεύτερο στάδιο το αρχείο STL εισάγεται σε λογισμικό παραγωγής G κώδικα ή αλλιώς Slicer. Στο τρίτο και τελευταίο στάδιο ο G κώδικας μεταφέρεται στον εκτυπωτή και αρχίζει η διαδικασία της εκτύπωσης όπου επίπεδο το επίπεδο δημιουργείται το προϊόν (Tuan D. Ngo, 2018) (Prairit Sharma, 2022).



Εικόνα 1: Διαδικασία 3D printing (S. Deepak Kumar, 2022)

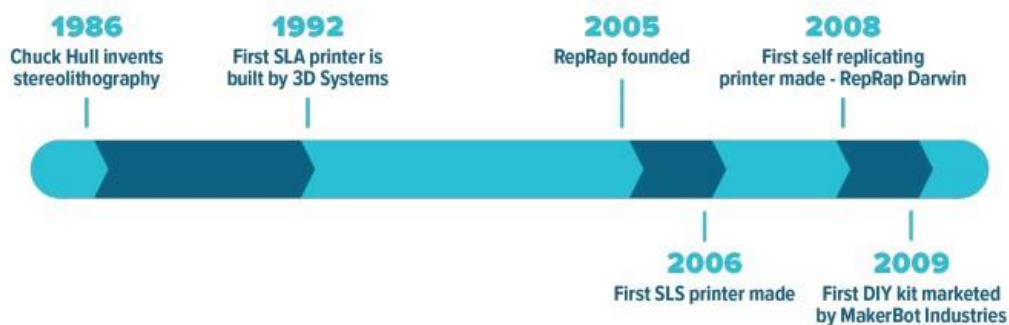
Ο απαραίτητος εξοπλισμός για την διαδικασία του 3D printing απαρτίζεται από έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή στον οποίο είναι εγκατεστημένα τα προγράμματα CAD και Slicer, από τον εκτυπωτή και την πρώτη ύλη εκτύπωσης (Aniket Jadhav, 2022).



Εικόνα 2: Διάταξη εκτύπωσης FDM

3.2 Ιστορική αναδρομή

Αρχικά, στα τέλη της δεκαετίας του 1960 πραγματοποιήθηκε η πρώτη απόπειρα κατασκευής κάποιου τρισδιάστατου αντικειμένου με την χρήση πολυμερικής ρητίνης και ακτίνας laser. Η πολυμερική ρητίνη εφευρέθηκε την δεκαετία του 1950. Τα πρώτα βήματα εδραίωσης του 3D printing έγιναν την δεκαετία του 1980 με το ενδιαφέρον να συσσωρευέτε στην μέθοδο stereolithography. Πρωταγωνιστής αυτού του εγχειρήματος είναι ο Hideo Kodama, ο οποίος ανέπτυξε σημαντικά την μέθοδο κατά τις αρχές του 1980. Την σκυτάλη λίγα χρόνια μετά πείρε ο Charles Hull βελτιώνοντας με την σειρά του την συγκεκριμένη τεχνολογία και κάνοντας το επόμενο βήμα, την πρώτη στην ιστορία εμπορική εγκατάσταση 3D printing συστημάτων τον Απρίλιο του 1988. Μετά το 1991 εμφανίζονται και άλλες μέθοδοι προσθετικών κατεργασιών όπως οι fused deposition modeling, solid ground curing, laminated object manufacturing, selective laser sintering, direct shell production casting, epoxy resin, QuickCast, ModelMaker, binder jetting, electrochemical additive manufacturing και άλλες. Στα τέλη της δεκαετία του 2000 άρχισε το κόστος ενός 3D printer να είναι προσιτό σε ερασιτέχνες (Wohlers, 2016) (Faisal Aqlan, 2020). Τέλος, οι προσθετικές κατεργασίες αναπτύσσονται μέχρι σήμερα καθώς η επιστημονική κοινότητα παράγει γνώση γύρω από νέες τεχνολογίες και υλικά σε καθημερινή βάση.



Εικόνα 3: Χρονοδιάγραμμα της ιστορίας του 3D printing (Faisal Aqlan, 2020)



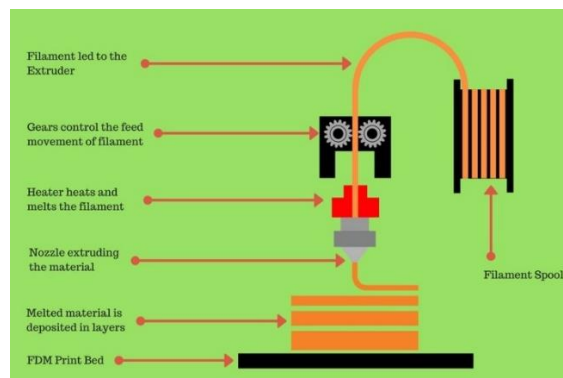
Εικόνα 4: Το πρώτο σύστημα 3D printing (αριστερά), το πρώτο εκτυπωμένο τεμάχιο (δεξιά).

3.3 Τεχνολογίες προσθετικών κατεργασιών

Οι ειδικές απαιτήσεις κάθε κατασκευαστικής εφαρμογής οδηγούν στην ανάπτυξη πλήθους μεθόδων και παραλλαγών 3D printing προκειμένου να καλυφθούν όλες οι προδιαγραφές στο βέλτιστο δυνατό. Τα βασικότερα χαρακτηριστικά που διαχωρίζουν τις μεθόδους είναι το είδος της πρώτης ύλης και ο τρόπος δημιουργίας του τεμαχίου.

3.3.1 Fused deposition modeling

Η Fused Deposition Modeling (FDM) ή Fused Filament Fabrication (FFF) είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος 3D printing σήμερα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι είναι μια τεχνολογικά απλή μέθοδος με αποτέλεσμα να είναι οικονομικά και γνωστικά προσιτή στο μεγαλύτερο μέρος του κοινού. Η πρώτη ύλη, σε μορφή νήματος θερμοπλαστικού ή σύνθετου υλικού, εισάγεται μέσω μηχανισμού στον υγροποιητή και στην συνέχεια εξάγεται ρευστοποιημένη από ένα η περισσότερα ακροφύσια πάνω σε μια τράπεζα επίπεδο το επίπεδο. Μετά την εξαγωγή το υλικό στερεοποιείται γρήγορα σχηματίζοντας το τεμάχιο. (Ravikumar Patel, 2022) (Ankit Sharma, 2022) (Prairit Sharma, 2022)



Εικόνα 5: Μέθοδος λειτουργίας FDM

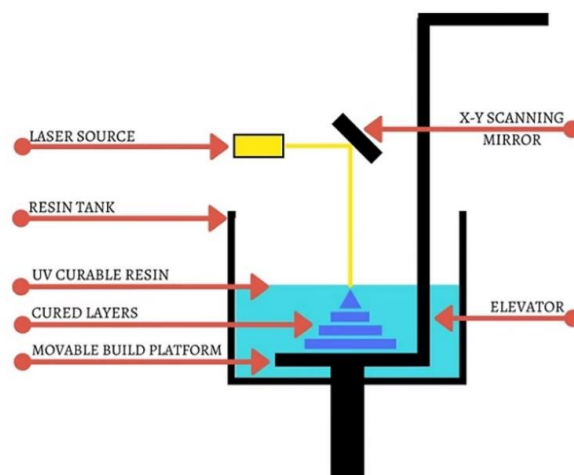
Thermoplastic Polymer	Polyactic acid (PLA), Acrylonitrile butadiene styrene (ABS), ABSi, High Density Polyethylene (HDPE), Polyphenylsulfone (PPSF), Polycarbonates (PC), Polyethylene terephthalate glycol-modified (PETG), Ultem 9085, Polytetrafluoroethylene (PTFE), Polyether Ether Ketone (PEEK), Recycled Plastics, Acrylonitrile Styrene Acrylate (ASA), Nylon 12, etc.
Polymer Matrix Composites	Glass Fiber Reinforced plastic (GFRP), Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP).
Ceramic Slurries and Clay	Alumina, Zirconia, Kaolin.
Green Ceramic/ Binder Mixture	Zirconia, Calcium phosphate.
Green Metal/ Binder Mixture	Stainless steel, Titanium, Inconel.
Food pastes	Sugars and Chocolates
Biological Materials	Bioink

Εικόνα 6: Υλικά εκτύπωσης της μεθόδου FDM (Anketa Jandya, 2022)

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται από την μέθοδο FDM ποικίλουν. Από θερμοπλαστικά, όπως τα πιο συνηθισμένα PLA και ABS, μέχρι συνθετικά μέταλλα, κεραμικά ακόμα και βρώσιμα υλικά βρίσκοντας έτσι εφαρμογή σε πολλά επιστημονικά πεδία (Anketa Jandyal, 2022). Η δυνατότητα συνδυασμού των υλικών ενισχύει περαιτέρω το τελικό αποτέλεσμα.

3.3.2 Stereolithography

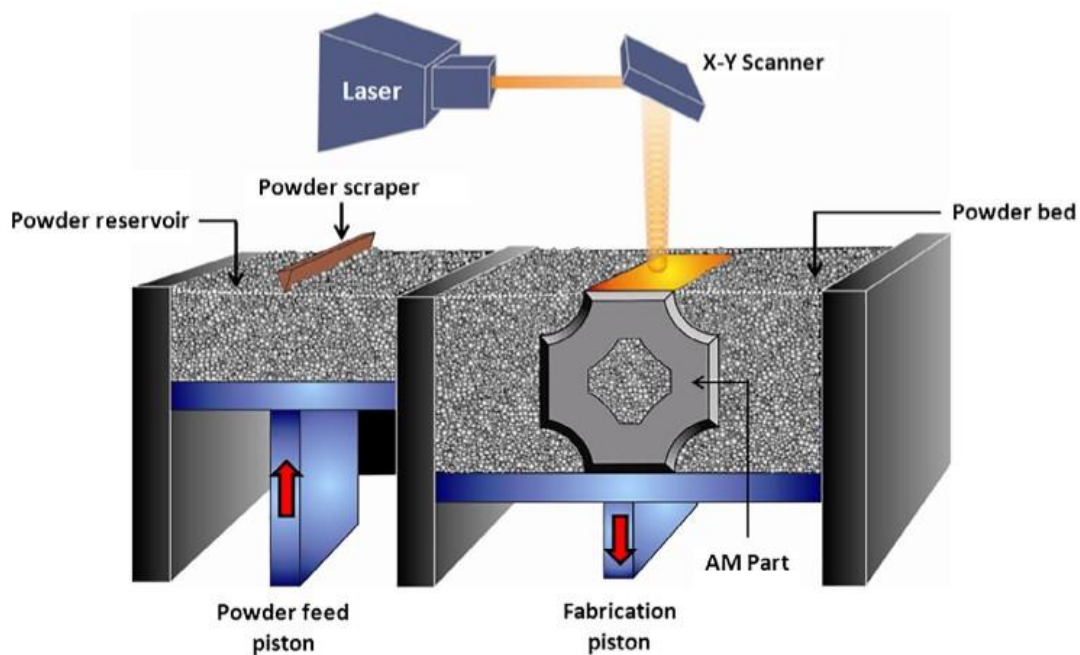
Η μέθοδος Stereolithography (SLA) είναι η πρώτη τεχνολογία 3D printing που αναπτύχθηκε ποτέ. Η λειτουργία της είναι βασισμένη σε μια υπεριώδεις ακτίνα λέιζερ η οποία ακολουθώντας μια προκαθορισμένη διαδρομή σαρώνει ένα επίπεδο από φωτοσκληρυνόμενη ρητίνη. Στην συνέχεια η ρητίνη πολυμερίζεται, έτσι σχηματίζεται ένα δυσδιάστατο επίπεδο του τεμαχίου. Κάτω από την επιφάνεια της ρητίνης βρίσκεται μια βάση η οποία υποχωρεί μετά την σκλήρυνση του κορυφαίου επιπέδου, με αυτόν τον τρόπο η κορυφαία επιφάνεια της ρητίνης παραμένει ρευστή. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου τελειοποιηθεί το τεμάχιο. Πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ότι παράγει τεμάχια υψηλής ακρίβειας και ότι δεν υπάρχει ακροφύσιο η κάποιο άλλο εξάρτημα που μπορεί να εμποδίσει την διαδικασία λόγω φραγής υλικού. Αντ' αυτού το υψηλό κόστος των διατάξεων και η πιθανή κυτταροτοξικότητα των καταλοίπων του φωτοεκινητή και της μη σκληρυμένης ρητίνης παρουσιάζουν ανησυχία. Για την μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται ακρλικές και εποξεικές ρητίνες. (Aniket Jadhav, 2022) (Tuan D. Ngo, 2018) (Tarunpreet Singh, 2020) (Anketa Jandyal, 2022)



Εικόνα 7: Μέθοδος λειτουργίας SLA

3.3.3 Power Bed Fusion

Η κύρια διαφορά της τεχνικής Power Bed Fusion (PBF) από τις άλλες μεθόδους είναι η χρήση στρωμάτων πούδρας πάνω σε επιφάνεια εμβόλου για τον σχηματισμό του τεμαχίου. Αναλυτικότερα ένας μηχανισμός απλώνει πούδρα υλικού πάνω σε επίπεδη πλατφόρμα, στη συνέχεια μια ακτίνα laser που την τήκει ή ψεκαστήρας υγρού συνθετικού ακολουθεί μια συγκεκριμένη διαδρομή στερεοποιώντας την πούδρα σχηματίζοντας ένα 2D επίπεδο του τεμαχίου. Ακολούθως η πλατφόρμα υποχωρεί και ο μηχανισμός απλώνει νέα στρώση πούδρας πάνω από την προηγούμενη, η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την ολοκλήρωση του προϊόντος. Η μέθοδος εφαρμόζεται με διάφορες παραλλαγές, οι πιο σημαντικές είναι η Selective Laser Sintering (SLS) όπου η πούδρα θερμαίνεται τοπικά στα όρια των κόκκων προκαλώντας ένωση αυτών και η Selective Laser Melting (SLM) όπου οι κόκκοι τήκονται εντελώς. Άλλες παραλλαγές είναι η Electron Beam Melting (EBM), η Direct Metal Laser Melting (DMLM) και η Direct Metal Laser Sintering (DMLS). Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι διάφορα πολυμερή, μέταλλα και κράματα. Πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η υψηλή ακρίβεια των προϊόντων και η εύκολη απομάκρυνση των υποστηρικτικών μερών. Κατά συνέπεια είναι μια ακριβή τεχνολογία. (Aniket Jadhav, 2022) (Tuan D. Ngo, 2018) (Tarunpreet Singh, 2020) (Anketa Jandyal, 2022)

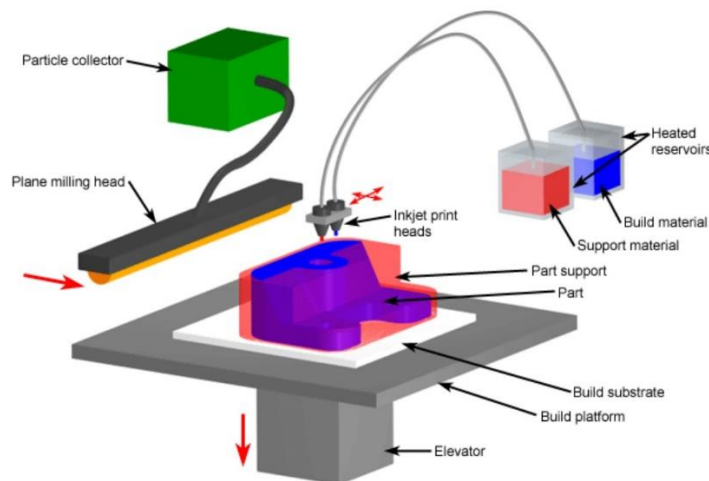


Εικόνα 8: Μέθοδος λειτουργίας PBF

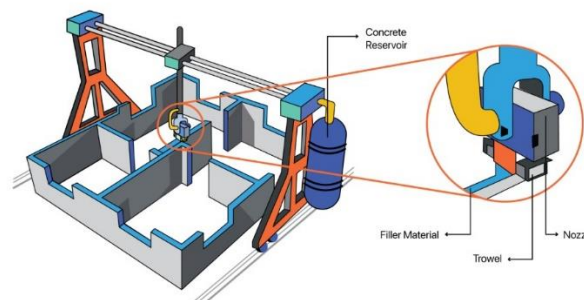
3.3.4 Inkjet Printing and Contour Crafting

Το Inkjet Printing είναι μια μέθοδος που αφορά αποκλειστικά τα κεραμικά υλικά. Πιο συγκεκριμένα σε αυτή την τεχνική ένα σταθερό κεραμικό εναιώρημα εκχύνεται σε μορφή σταγόνων μέσω ακροφύσιου σε βάση όπου αυτές παίρνουν συνεχή μορφή και στερεοποιούνται προκειμένου να στηρίζουν τα επόμενα επίπεδα. Τα βασικά υλικά που χρησιμοποιούνται είναι υγρά εναιωρήματα και μελάνια με βάση το κερί. Κατά την εκτύπωση τα μελάνια υγροποιούνται και μετά στερεοποιούνται πάνω σε κρύα βάση ενώ τα εναιωρήματα στερεοποιούνται μέσω εξάτμισης των υγρών. Η διατήρηση της κατεργασιμότητας η έλλειψη τριβής μεταξύ των στρωμάτων και η τραχεία τελική επιφάνεια είναι τα βασικά προβλήματα που αντιμετωπίζει αυτή η μέθοδος. (Aniket Jadhav, 2022)

Παρόμοια τεχνολογία είναι το Contour Crafting που βρίσκει χρήση στην οικοδόμηση κτηρίων και ουσιαστικά είναι η εξώθηση υγρών οικοδομικών υλικών από ένα ακροφύσιο που ακολουθεί μία προκαθορισμένη διαδρομή. Μετά την εξαγωγή από το ακροφύσιο το υλικό στερεοποιείται και ενώνεται με το προηγούμενο επίπεδο του κτηρίου σχηματίζοντας βήμα βήμα το επιθυμητό οικοδόμημα. (Aniket Jadhav, 2022)



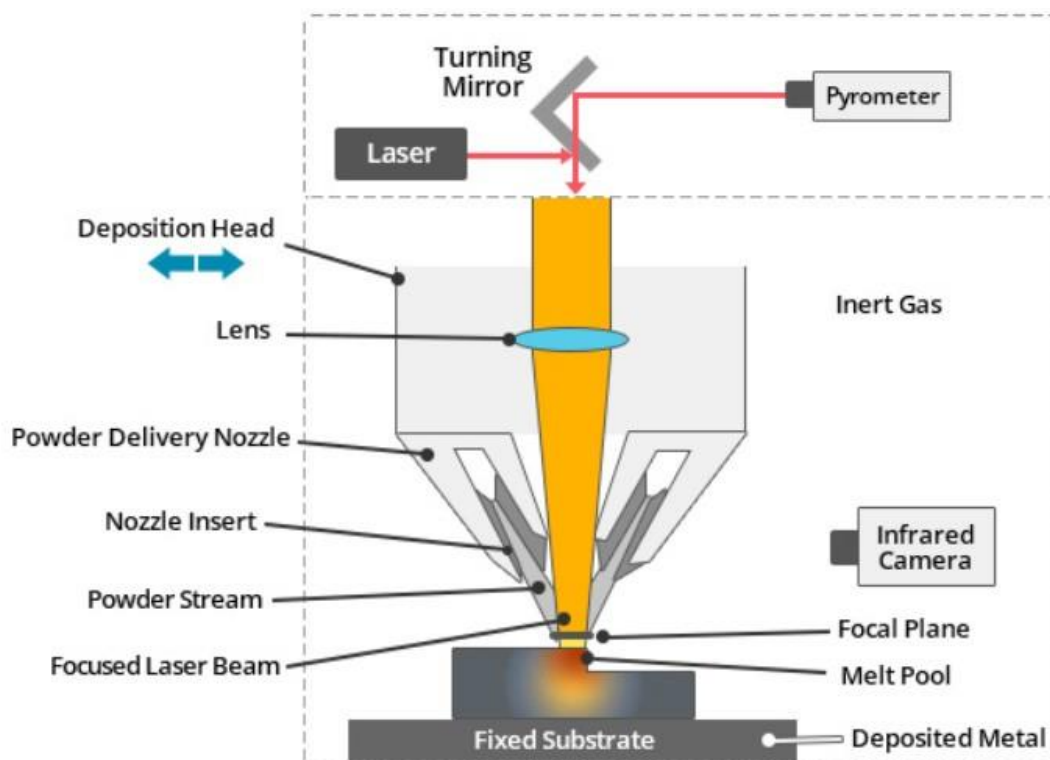
Εικόνα 9: Μέθοδος λειτουργίας PBF



Εικόνα 10: Μέθοδος λειτουργίας Contour Crafting

3.3.5 Direct Energy Deposition

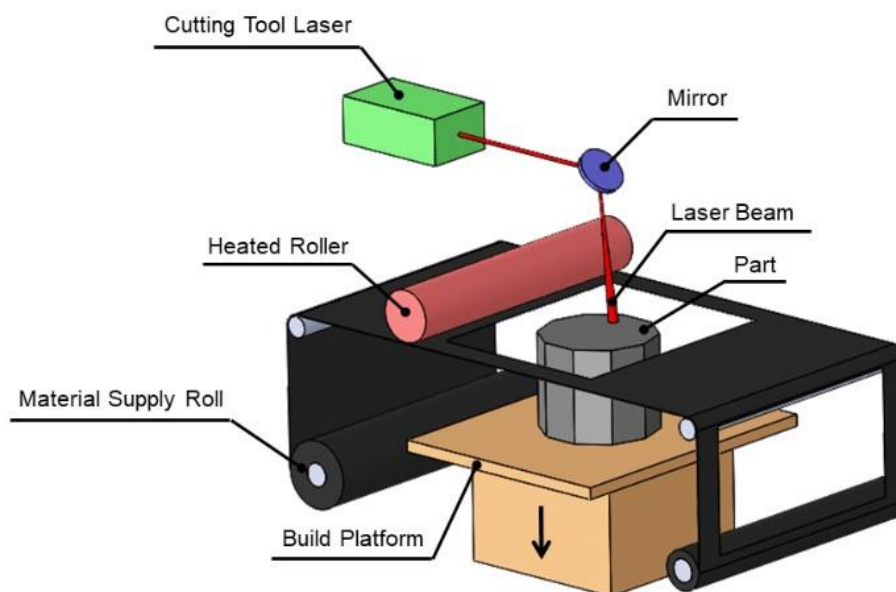
Η τεχνική Direct Energy Deposition (DED) εφαρμόζεται στην κατασκευή υπέρ-κραμάτων υψηλής ποιότητας και ως κύριος ρόλος της είναι η επισκευή διάφορων ασοχιών, όπως ρωγμές, παρά η δημιουργία τεμαχίων εξαρχής. Αναλυτικότερα, απαιτεί την ύπαρξη μιας κεφαλής εναπόθεσης στον πυρήνα της οποίας υπάρχει δέσμη laser ή ηλεκτρονίων και περιμετρικά γίνεται είσοδος του υλικού εκτύπωσης από δύο αγωγούς σε μορφή πούδρας ή λεπτού σύρματος. Μόλις το υλικό φτάνει στο κέντρο της κεφαλής τήκεται και πέφτει σε υγρή μορφή πάνω σε βάση. Ταυτόχρονα η δέσμη τήκει και το υλικό της βάσης η οποία μπορεί να είναι κάποιο ήδη υπάρχων εξάρτημα ή το προηγούμενο επίπεδο κάποιου τεμαχίου που εκτυπώνεται εξαρχής. Η βάση και το υλικό εκτύπωσης ενώνονται και στερεοποιούνται μόλις η δέσμη απομακρυνθεί από το σημείο. Για την εκτύπωση χρησιμοποιούνται μέταλλα. Η ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος και της επιφάνειας δεν είναι καλή και δεν μπορούν να κατασκευαστούν περίπλοκα εξαρτήματα ωστόσο η μέθοδος αυτή είναι ιδανική για επισκευές και διορθώσεις μεγάλων κατασκευών μειώνοντας έτσι το κόστος τους. Επίσης ενδείκνυται για τις άψογες μηχανικές ιδιότητες και την εκλεξιμότητα της σύνθεσης του υλικού που προκύπτει. (Shahrubudin, 2019) (Tuan D. Ngo, 2018) (Tarunpreet Singh, 2020) (Anketa Jandyal, 2022)



Εικόνα 11: Μέθοδος λειτουργίας DED

3.3.6 Laminated Object Manufacturing

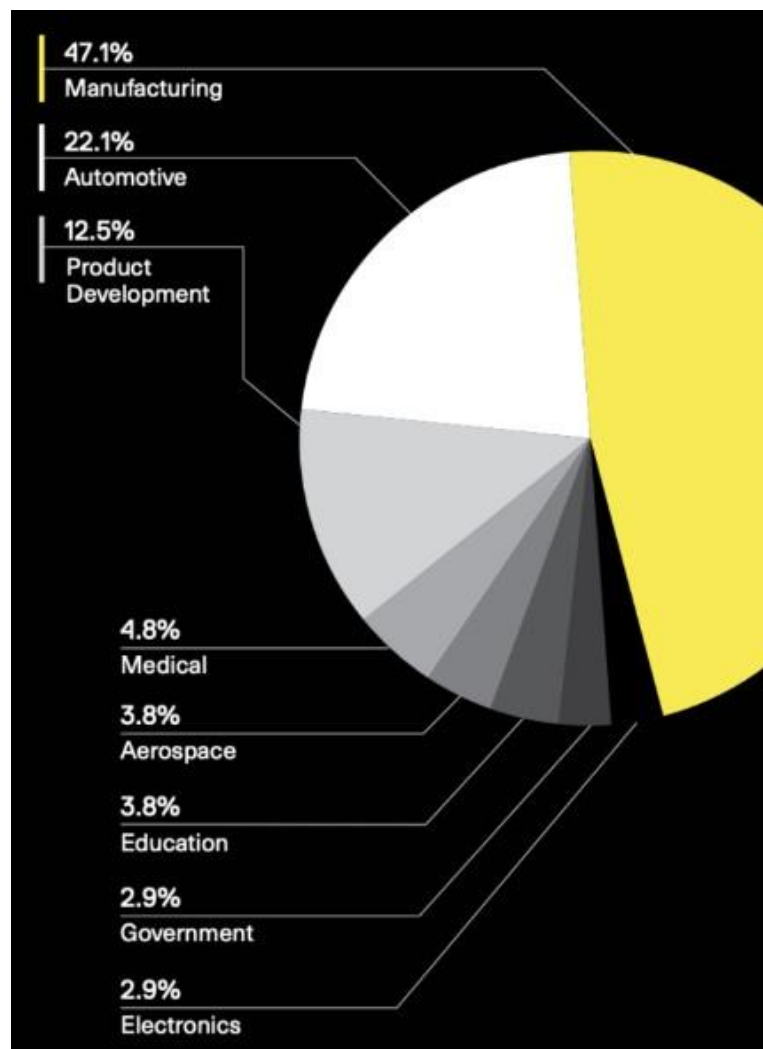
Η Laminated Object Manufacturing είναι από τις πρώτες μεθόδους προσθετικών κατεργασιών που γνώρισαν εμπορικές εφαρμογές. Πρόκειται για τεχνική γρήγορης κατασκευής πρωτοτύπων, η αρχή λειτουργίας είναι η στρωμάτωση φύλλων ή ρολών υλικού. Για την ακρίβεια ένα φύλλο υλικού τοποθετείται πάνω σε μια πλατφόρμα, στη συνέχεια δέσμη laser ή μηχανικό κοπτικό ακολουθεί προκαθορισμένη διαδρομή με σκοπό να κόψει το φύλλο υλικού στην επιθυμητή δυσδιάστατη γεωμετρία. Αμέσως μετά ένας θερμαινόμενος κύλινδρος σαρώνει την επιφάνεια του φύλλου έτσι ώστε να κολλήσει στην βάση, αυτό γίνεται με την βοήθεια εποξικής ρητίνης που υπάρχει ανάμεσα στα φύλλα. Η παραπάνω διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί και αντίστροφα με την κόλληση να προηγείται της κοπής. Μετά την κοπή και την κόλληση η πλατφόρμα υποχωρεί και ένα νέο ακατέργαστο φύλλο παίρνει θέση επεξεργασίας, ταυτόχρονα η πλατφόρμα επανέρχεται στην αρχική της θέση για να συνεχιστεί η διαδικασία σύμφωνα με τα παραπάνω. Τα κομμάτια φύλλου που δεν αποτελούν μέρος του εξαρτήματος παραμένουν στην θέση τους κομμένα σε κύβους μέχρι το τέλος έχοντας χαρακτήρα υποστήριξης. Τα περίσσεια υλικά μπορούν μετά το πέρας της κατεργασίας να ανακυκλωθούν. Μια παραλλαγή της μεθόδου LOM είναι η Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM) κατά την οποία τα μεταλλικά φύλλα κολλούνται με μεταλλική ραφή συγκόλλησης υπερήχων και ακολουθεί φρεζάρισμα από μηχάνημα CNC. Η LOM μπορεί να ελαχιστοποιήσει το κόστος των εργαλείων και το χρόνο κατεργασίας και είναι ιδανική για μεγάλες κατασκευές, από την άλλη η ποιότητα της επιφάνειας και η διαστασιολογική ακρίβεια συγκριτικά με τις PBF μεθόδους είναι κατώτερη. Ακόμα, η απομάκρυνση των περισσειών υλικών είναι χρονοβόρα ενώ η μέθοδος δεν ενδείκνυται για περίπλοκες γεωμετρίες. Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται είναι το χαρτί, τα πολυμερή, τα συνθετικά, τα κεραμικά και τα μεταλλικά υλικά. (Anketa Jandyal, 2022) (Tarunpreet Singh, 2020) (Tuan D. Ngo, 2018) (Aniket Jadhav, 2022) (Shahrubudin, 2019)



Εικόνα 12: Μέθοδος λειτουργίας LOM

3.4 Εφαρμογές των μεθόδων προσθετικών κατεργασιών

Η προσθετικές κατεργασίες έχουν εξελιχθεί ταχύτατα τις τελευταίες τρεις δεκαετίες και συγκριτικά με τις συμβατικές μεθόδους κατεργασίας, σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, κατάφεραν να δώσουν λύσεις σε πληθώρα εφαρμογών. Είναι γεγονός ότι το πλήθος διαφορετικών τεχνικών και υλικών που προσφέρονται από της τεχνολογίες AM καθώς και η ευελιξία που τις χαρακτηρίζει, αυξάνει τις πιθανότητες ικανοποίησης όλο και περισσότερων κατασκευαστικών τομέων. Μέχρι σήμερα η εφαρμογή τους κατευθύνεται κυρίως σε εξατομικευμένες κατασκευές, ενώ η παρουσία τους στην βιομηχανία μαζικής παραγωγής είναι περιορισμένη αφού στον συγκεκριμένο κλάδο κυριαρχούν ακόμα οι συμβατικές κατεργασίες (Simon Bock, 2022) (Tuan D. Ngo, 2018) (Anketa Jandyal, 2022). Κάποιες από τις πιο διαδεδομένες εφαρμογές είναι οι παρακάτω:



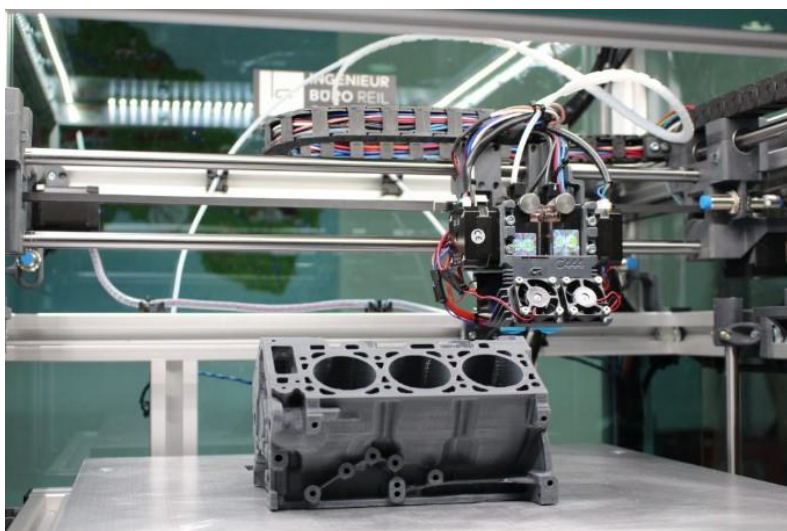
Εικόνα 13: Εφαρμογές προσθετικών κατεργασιών

➤ Αυτοκινητοβιομηχανία

Οι 3D printing τεχνολογίες αλλάζουν την αυτοκινητοβιομηχανία με γρήγορους ρυθμούς. Για την ακρίβεια η δυνατότητα κατασκευής πιο σύνθετων και ελαφρότερων προϊόντων σε συνδυασμό με την ελαχιστοποίηση του χρόνου παραγωγής οδηγεί σε ανταγωνιστικά αποτελέσματα συγκριτικά με την ήδη υπάρχουσα τεχνολογία. Η εταιρία Local Motor το 2014 κατασκεύασε το πρώτο εξ ολοκλήρου εκτυπωμένο αυτοκίνητο, ωστόσο η ίδια προχώρησε και στην παραγωγή ενός σύγχρονου λεωφορείου χωρίς οδηγό το OLLI. Επιπρόσθετα, η Ford πρωτοστατεί στην παραγωγή 3D printed πρωτοτύπων και εξαρτημάτων με τις εταιρίες AUDI και BMW να ακολουθούν. (Antonio Bacciaglia, 2022) (Nichols, 2019)



Εικόνα 14: Το λεωφορείο OLLI



Εικόνα 15: Πρωτότυπο μοντέλο κινητήρα

➤ Αεροδιαστημική

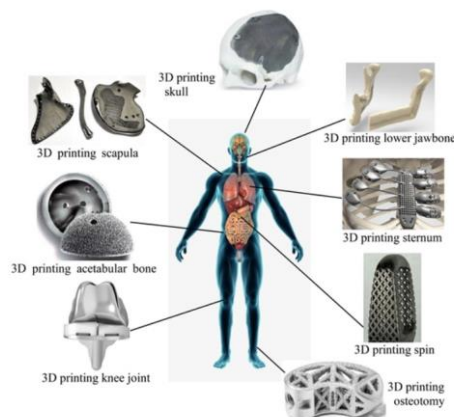
Στην αεροδιαστημική βιομηχανία η προσθετικές κατεργασίες έχουν την δυνατότητα παραγωγής ελαφρών εξαρτημάτων με περίπλοκες γεωμετρίες, έτσι περιορίζεται η απαίτηση ενέργειας και υλικών. Ακόμα υπάρχει η δυνατότητα μείωσης της μάζας των εξαρτημάτων και κατά συνέπεια την εξοικονόμηση καυσίμων. Επίσης, οι τεχνολογίες αυτές εφαρμόζονται εκτεταμένα στην κατασκευή αναλώσιμων εξαρτημάτων όπως τα μέρη του κινητήρα τα οποία χρειάζονται συχνά αντικατάσταση. (Antonio Bacciaglia, 2022) (Shahrubudin, 2019)



Εικόνα 16: 3D printed εξαρτήματα αεροδιαστημικών εφαρμογών

➤ Ιατρική

Στον τομέα της ιατρικής μπορεί να γίνει παραγωγή βιο-συμβατών προσθετικών μελών σύμφωνα με τις ανάγκες του κάθε ασθενή. Η αποτελεσματικότητα μιας χειρουργικής επέμβασης μπορεί να αυξηθεί λόγω της δυνατότητας εκτύπωσης περίπλοκων γεωμετριών. Ταυτόχρονα είναι εφικτή η εκτύπωση αναπαραστάσεων των ανθρώπινων οργάνων με σκοπό την εξοικείωση των νέων ιατρών με την ανθρώπινη ανατομία. (Tuan D. Ngo, 2018) (Aniket Jadhav, 2022) (Shahrubudin, 2019)



Εικόνα 17: Πιθανές χρήσεις προσθετικών κατασκευών στο ανθρώπινο σώμα

4. Μεθοδολογία

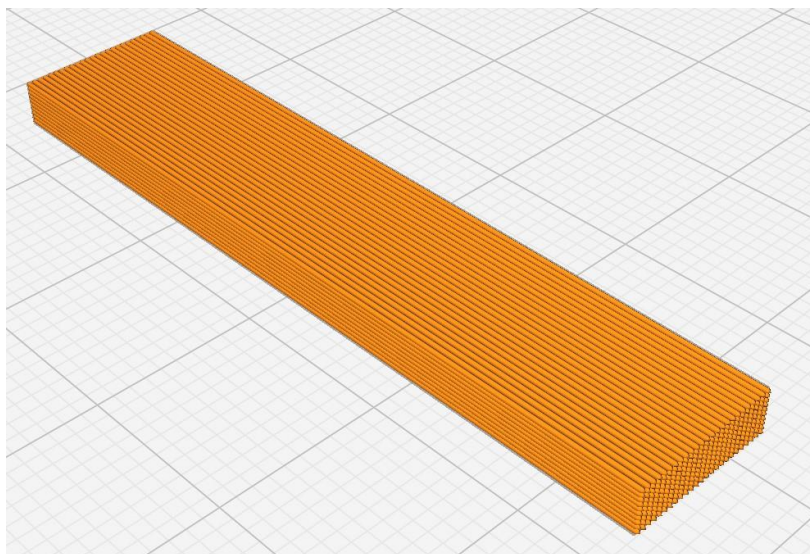
Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε αρχικά βιβλιογραφική έρευνα προκειμένου να εντοπιστούν τα τρέχοντα ερευνητικά κενά της επιστήμης των προσθετικών κατεργασιών και ειδικότερα της τεχνολογίας FDM. Αυτό έγινε με την χρήση κατάλληλων λέξεων κλειδιών όπως για παράδειγμα, 3D printing mechanical properties, AM products Testing, AM mechanical behavior και AM structural problems για τις μηχανικές ιδιότητες, multimaterial, materials, thermoplastics και dual material AM για τα υλικά εκτύπωσης και 3D printing parameters, surface texture AM, raster angle, layer thickness και printing velocity για τις παραμέτρους εκτύπωσης. Από την έρευνα προέκυψε ότι εμφανίζεται έλλειψη σε γνώση γύρω από τις μηχανικές ιδιότητες 3D printed προϊόντων διπλού υλικού, οι οποίες επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τις παραμέτρους εκτύπωσης. Κατά συνέπεια αποφασίστηκε να γίνει μελέτη του συγκεκριμένου αντικειμένου.

Για τον σκοπό αυτό θα γίνει βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τα υλικά, και τις παραμέτρους εκτύπωσης που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο επιστημονικό ενδιαφέρον. Στη συνέχεια, θα επιλεγεί το ζεύγος υλικών, οι μεταβλητές των παραμέτρων εκτύπωσης και τα επίπεδά τους. Ύστερα, για την επίτευξη του βέλτιστου γνωστικού αποτελέσματος με τα ελάχιστα αναγκαία πειράματα, θα πραγματοποιηθεί σχεδιασμός πειραμάτων έτσι ώστε να προσδιοριστούν οι απαραίτητοι πειραματικοί συνδυασμοί. Μετά, θα οριστούν τα πρότυπα κατά τα οποία θα πραγματοποιηθούν η δοκιμή κάμψης, η επεξεργασία των αποτελεσμάτων και η γεωμετρία των δοκιμίων. Θα ακολουθήσει μοντελοποίηση των δοκιμίων σε πρόγραμμα CAD και αμέσως μετά παραγωγή G κώδικα από πρόγραμμα Slicer. Ο κώδικας θα εισαχθεί σε εκτυπωτή τύπου FDM διπλού υλικού για την εκτύπωση των δοκιμίων. Αφού τελειώσει η εκτύπωση θα γίνει διαστασιολογικός έλεγχος και τα τεμάχια θα υποστούν δοκιμή κάμψης τριών σημείων. Ακολούθως θα παραχθούν διαγράμματα τάσης – ανοιγμένης παραμόρφωσης προκειμένου να προσδιοριστεί η μέγιστη τάση (UTS) και η παραμόρφωση στο σημείο αυτό. Τέλος, θα ακολουθήσει σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

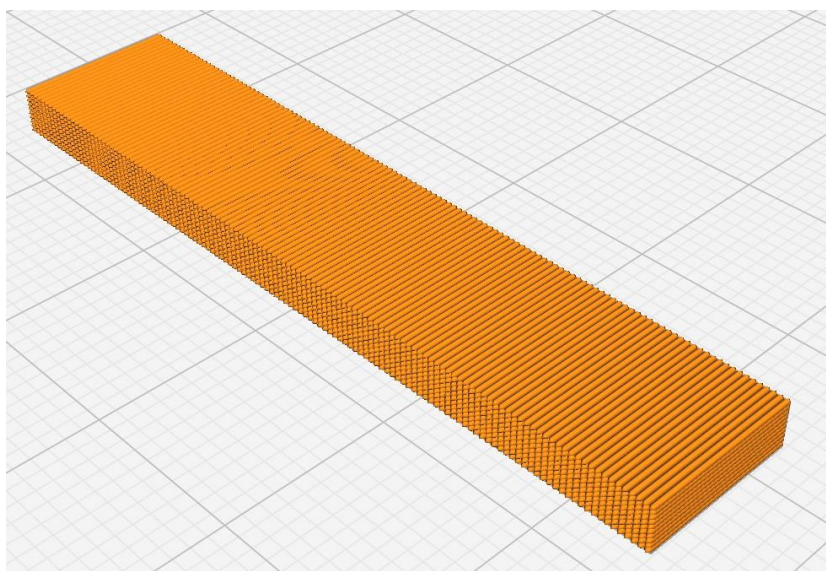
5. Πειραματικό μέρος

Το πειραματικό μέρος ξεκινά με την επιλογή των υλικών κατασκευής των δοκιμίων. Με βάση την τρέχουσα εξέλιξη της μεθόδου FDM επιλέχθηκαν τα υλικά με την πιο εκτεταμένη χρήση το Poly-lactic Acid (PLA) και Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS). Τα δύο αυτά υλικά παρουσιάζουν μεγάλη χημική συμβατότητα και κατά την εκτύπωση δημιουργούν ισχυρούς δεσμούς καθιστώντας τα αποδοτικό συνδυασμό. Άλλοι συνδυασμοί όπως PLA και Νυλον απορρίφθηκαν λόγω της κακής μεταξύ τους συμβατότητας.

Η πρώτη μεταβλητή που επιλέχθηκε είναι η γωνία εκτύπωσης ή αλλιώς raster angle του κάθε επιπέδου. Πρόκειται για την γωνία μεταξύ της Χ διεύθυνσης και της διαδρομής του ακροφύσιου εξώθησης υλικού (nozzle). Στην εικόνα 18 φαίνεται δοκίμιο με raster angle 0° ενώ στην 19 με raster angle 90°.



Εικόνα 18: Εκτύπωση με raster angle 0°



Εικόνα 19: Εκτύπωση με raster angle 90°

Η δεύτερη μεταβλητή είναι ο ρυθμός εναλλαγής της γωνίας εκτύπωσης, δηλαδή κάθε πόσα επίπεδα (layers) θα αλλάζει η raster angle. Αν η αλλαγή γίνεται για κάθε δύο η περισσότερα

επίπεδα τότε δημιουργείται ένα block υλικού εκτυπωμένο με την ίδια γωνία. Η Τρίτη μεταβλητή είναι η κατ' όγκο περιεκτικότητα υλικού, ABS ή PLA, σε κάθε δοκίμιο. Κάθε μεταβλητή περιλαμβάνει δύο επιλογές, στην πρώτη περίπτωση η επιλογές είναι Raster Angle 1) 0/90 2) 45/-45 , στην δεύτερη είναι εναλλαγή γωνίας εκτύπωσης 1) Ανά επίπεδο 2) Ανά μπλοκ, στην τρίτη η περιεκτικότητα κάθε υλικού κατά όγκο 1) 60 % PLA - 40% ABS 2) 60% ABS – 40% PLA. Ο όρος 0/90 σημαίνει ότι αν ένα επίπεδο ή block έχει raster angle 0° το επόμενο επίπεδο ή block θα έχει raster angle 90°, αυτό συνεχίζεται σε όλα τα επίπεδα ή block του δοκιμίου. Το ίδιο ισχύει και για την περίπτωση 45/-45, δηλαδή αν ένα επίπεδο ή block έχει raster angle 45° το επόμενο επίπεδο ή block θα έχει raster angle -45°, αυτό συνεχίζεται σε όλα τα επίπεδα ή block του δοκιμίου.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ	
F1	Γωνία εκτύπωσης νήματος (Raster Angle)
F2	Εναλλαγή γωνίας νήματος
F3	Κατά όγκο περιεκτικότητα υλικών

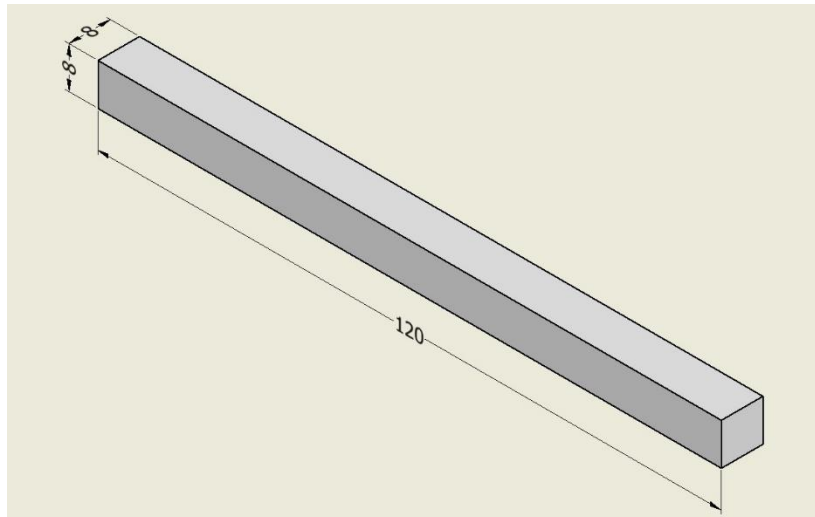
Εικόνα 20: Πίνακας μεταβλητών

ΠΙΝΑΚΑΣ TAGUCHI			
ΕΠΙΠΕΔΑ	ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ		
	F1	F2	F3
L1	0/90	BY BLOCK	60% PLA
L2	45/-45	BY LAYER	60% ABS

Εικόνα 21: Πίνακας Taguchi

Πρότυπα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις μελέτες σχετικά με το 3D Printing (Δοκιμές, υπολογισμοί κ.α.) δεν υπάρχουν, για το λόγο αυτό συνήθως εφαρμόζονται πρότυπα που αφορούν υλικά με παρεμφερείς ιδιότητες (Niranjan Kumar Choudhry, 2022) (Huan Jiang, 2022). Η επιλογή των προτύπων είναι μια από τις πιο κρίσιμες διαδικασίες του πειραματικού μέρους. Για την δοκιμή κάμψης τριών σημείων επιλέχθηκε το πρότυπο ASTM 3039 το οποίο εφαρμόζεται για την εύρεση μηχανικών ιδιοτήτων σύνθετων υλικών πολυμερούς μήτρας, βάση αυτού τα δοκίμια έχουν διαστάσεις 120 X 8 X 8 mm όπως φαίνεται στην εικόνα 22 με καταπονούμενο μήκος 80 mm. Ακόμα για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της δοκιμής κάμψης χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο ASTM D790 το οποίο εφαρμόζεται για την εύρεση των καμπτικών ιδιοτήτων ενισχυμένων και μη ενισχυμένων πλαστικών και ηλεκτρομονωτικών υλικών.

Όλη η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο “Κωσταντίνος Γιαννακόπουλος” και στο εργαστήριο Σχεδιασμού Μηχανολογικών Κατασκευών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής με την βοήθεια του κ. Παπαγεωργίου Δ. και του κ. Σαγιά Β. .



Εικόνα 22: Γεωμετρία δοκιμίου

5.1 Εξοπλισμός

Η περάτωση των πειραμάτων απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό κυρίως για την διαδικασία της εκτύπωσης και της δοκιμής κάμψης τριών σημείων. Όλα τα άλλα μέρη όπως ο σχεδιασμός πειραμάτων, η μοντελοποίηση, ο διαστασιολογικός έλεγχος και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων μπορούν να υλοποιηθούν με την βοήθεια ενός συμβατικού φορητού υπολογιστή.

➤ Νήμα εκτύπωσης

Το νήμα εκτύπωσης είναι της εταιρίας FLASHFORGE και έχει διάμετρο 1,75 mm. Το PLA είναι χρώματος μαύρου με θερμοκρασία εκτύπωσης 200 °C ενώ το ABS είναι χρώματος λευκού με θερμοκρασία εκτύπωσης 230 °C.



Εικόνα 23: Νήμα εκτύπωσης

➤ 3D Printer

Ο εκτυπωτής είναι το μοντέλο CREATOR 3 της εταιρίας FLASHFORGE με δυνατότητα εκτύπωσης δύο υλικών ταυτόχρονα στο ίδιο επίπεδο με την βοήθεια των δύο κεφαλών εναπόθεσης υλικού που περιλαμβάνει η διάταξή του. Πρόκειται για εκτυπωτή βιομηχανικού τύπου με υψηλή παραγωγική ικανότητα και ακρίβεια.



Εικόνα 24: 3D Printer

➤ Μηχανή δοκιμών

Για την δοκιμή κάμψης τριών σημείων χρησιμοποιήθηκε η μηχανή GALDABINI Quasar 100. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο “Κωσταντίνος Γιαννακόπουλος” του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής με την βοήθεια του κ. Παπαγεωργίου Δ.



Εικόνα 25: Μηχανή δοκιμών GALDABINI Quasar 100

5.2 Σχεδιασμός πειραμάτων

Για την ελαχιστοποίηση των αναγκαίων πειραμάτων χωρίς να υπάρξει απώλεια πληροφορίας εφαρμόστηκε η μεθοδολογία Taguchi. Ειδικότερα με τη χρήση ορθογωνίου πίνακα L4, δηλαδή τριών μεταβλητών και δύο επιπέδων ανά μεταβλητή, προτείνεται να γίνουν δοκιμές κάμψης σε τέσσερις συνδυασμούς των παραπάνω παραμέτρων (Εικόνα 27). Οι τέσσερις συνδυασμοί που προέκυψαν είναι αυτοί της εικόνας 28.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ	
F1	Γωνία εκτύπωσης νήματος (Raster Angle)
F2	Εναλλαγή γωνίας νήματος
F3	Κατά όγκο περιεκτικότητα υλικών

Εικόνα 26: Πίνακας μεταβλητών – παραμέτρων εκτύπωσης

ΠΙΝΑΚΑΣ TAGUCHI			
ΕΠΙΠΕΔΑ	ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ		
	F1	F2	F3
L1	0/90	BY BLOCK	60% PLA
L2	45/-45	BY LAYER	60% ABS

Εικόνα 27: Πίνακας Taguchi 3 X 2 των παραμέτρων και των επιπέδων ανά παράμετρο

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ			
A.Π.	F1	F2	F3
1	L1	L1	L1
2	L1	L2	L2
3	L2	L1	L2
4	L2	L2	L1

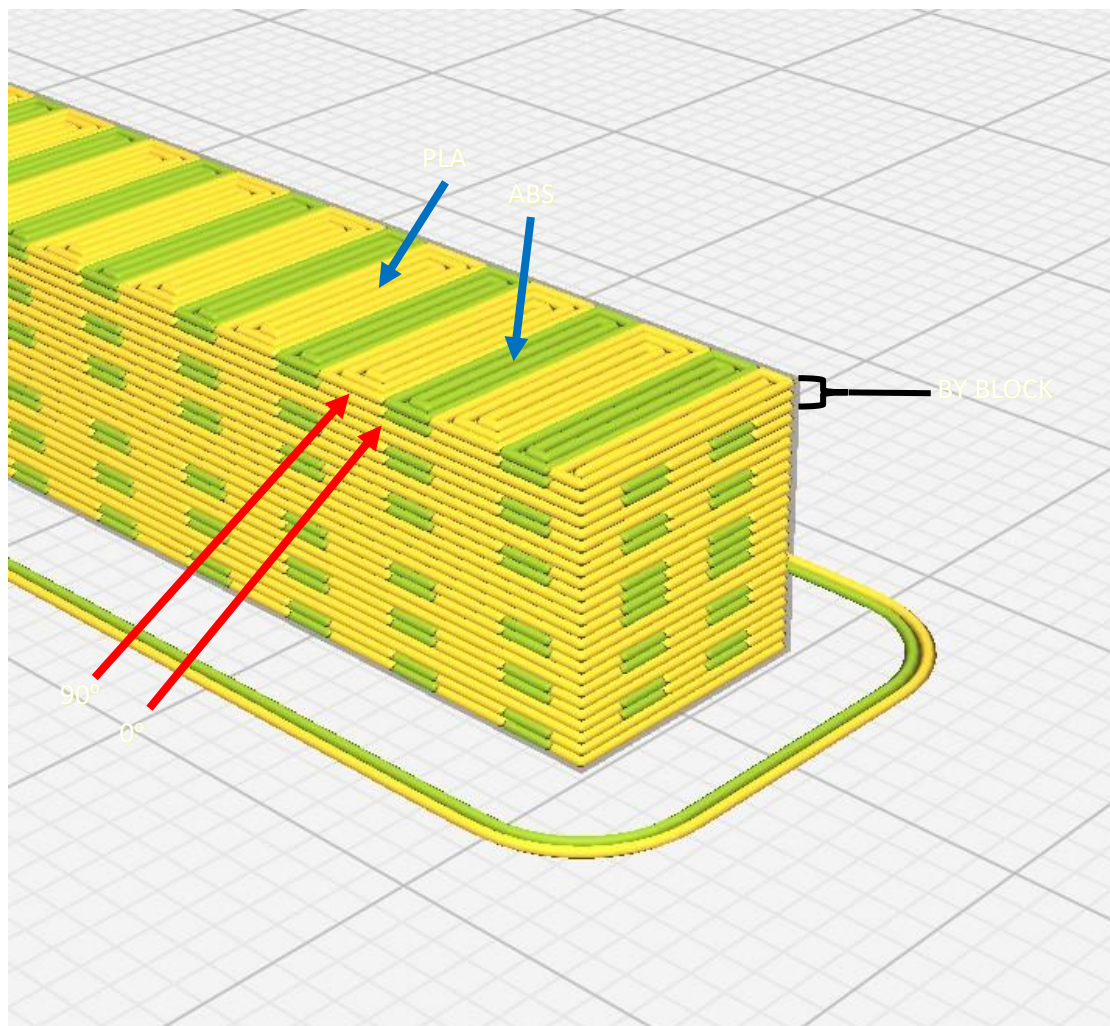
Εικόνα 28: Πίνακας σχεδιασμού πειραμάτων

Η συνδυασμοί της εικόνας 28 είναι οι παρακάτω:

1. 0/90 – BY BLOCK – 60% PLA
2. 0/90 – BY LAYER – 60% ABS
3. 45/-45 – BY BLOCK – 60% ABS
4. 45/-45 – BY LAYER – 60% PLA

➤ 1^ο Πείραμα

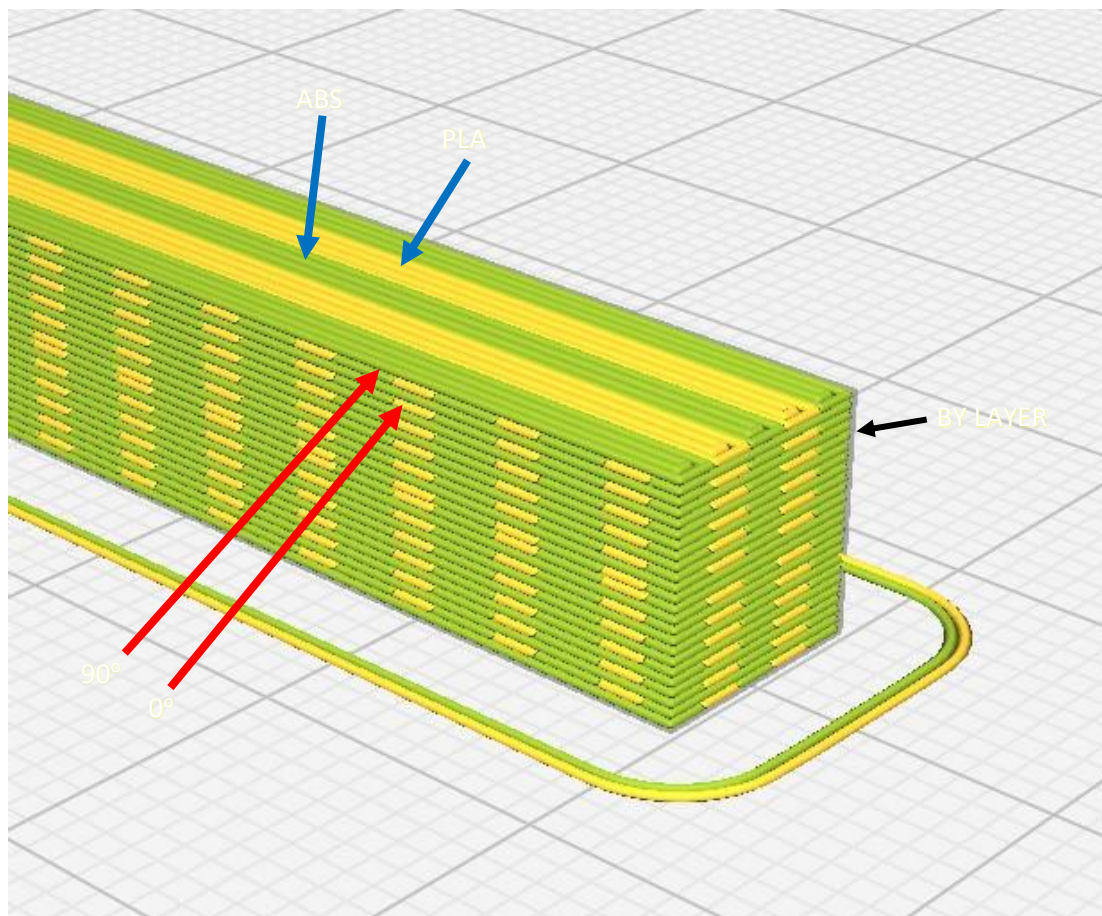
Αναλυτικότερα ο πρώτος συνδυασμός έχει raster angle 0/90 που αλλάζει ανά BLOCK και η κατ' όγκο περιεκτικότητα των υλικών είναι 60% PLA και 40% ABS. Στην εικόνα 29 φαίνεται η μορφή που έχουν τα δοκίμια του πρώτου πειράματος, όπου με κίτρινο συμβολίζεται το υλικό PLA και με πράσινο το υλικό ABS. Τα κόκκινα βέλη δείχνουν την γωνία εκτύπωσης στο συγκεκριμένο BLOCK.



Εικόνα 29: Περιγραφή παραμέτρων εκτύπωσης πρώτου πειράματος

➤ 2^ο Πείραμα

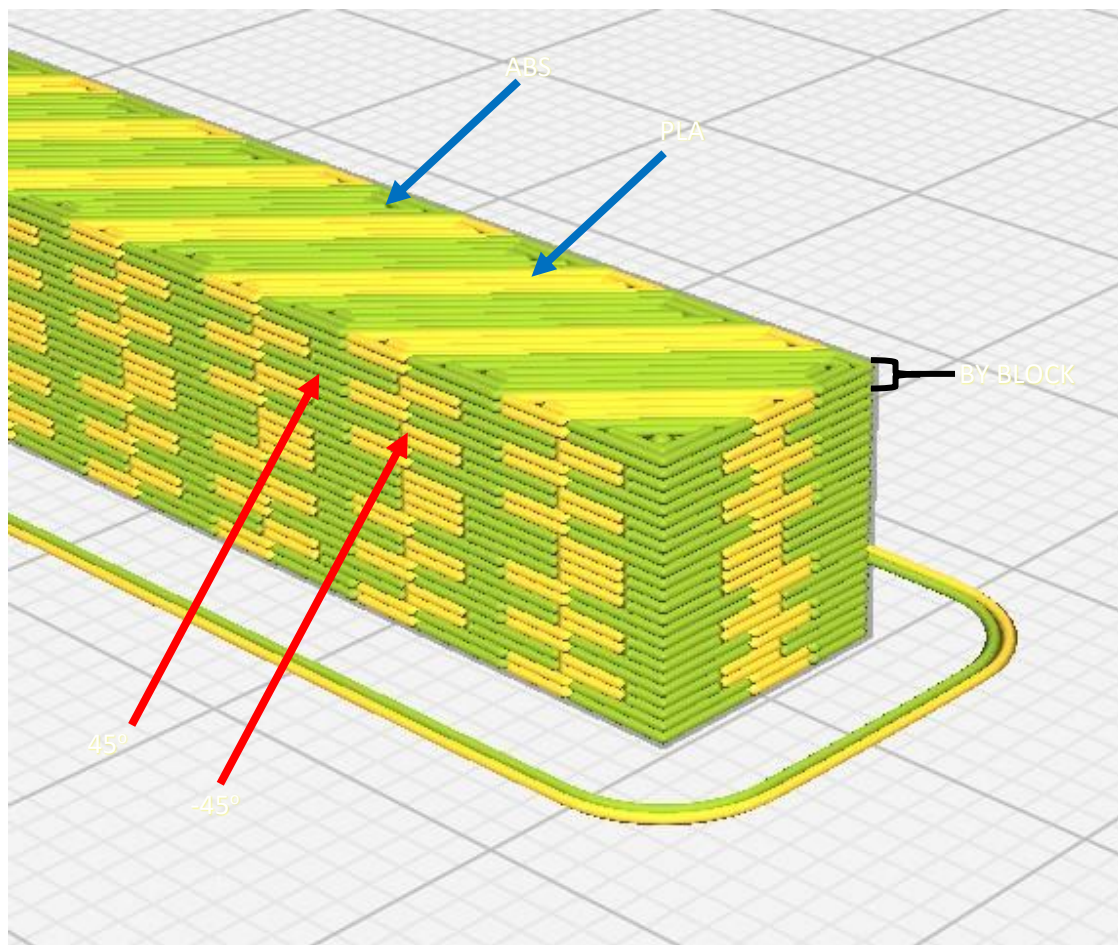
Ο δεύτερος συνδυασμός έχει raster angle 0/90 που αλλάζει ανά LAYER και η κατ' όγκο περιεκτικότητα των υλικών είναι 60% ABS και 40% PLA. Στην εικόνα 30 φαίνεται η μορφή που έχουν τα δοκίμια του πρώτου πειράματος όπου με κίτρινο συμβολίζεται το υλικό PLA και με πράσινο το υλικό ABS. Τα κόκκινα βέλη δείχνουν την γωνία εκτύπωσης στο συγκεκριμένο LAYER.



Εικόνα 30: Περιγραφή παραμέτρων εκτύπωσης δεύτερου πειράματος

➤ 3^ο Πείραμα

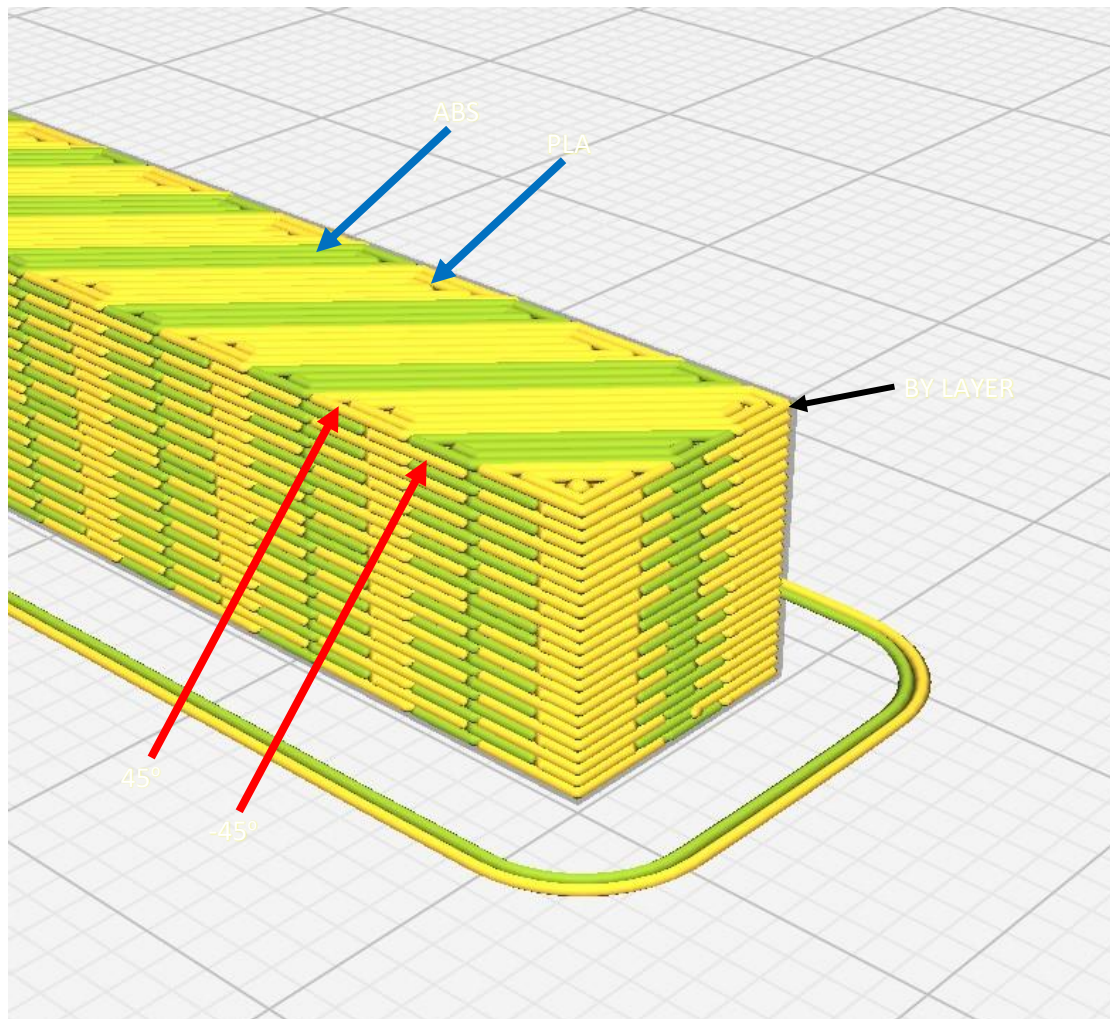
Ο δεύτερος συνδυασμός έχει raster angle 45/-45 που αλλάζει ανά BLOCK και η κατ' όγκο περιεκτικότητα των υλικών είναι 60% ABS και 40% PLA. Στην εικόνα 31 φαίνεται η μορφή που έχουν τα δοκίμια του πρώτου πειράματος όπου με κίτρινο συμβολίζεται το υλικό PLA και με πράσινο το υλικό ABS. Τα κόκκινα βέλη δείχνουν την γωνία εκτύπωσης στο συγκεκριμένο BLOCK.



Εικόνα 31: Περιγραφή παραμέτρων εκτύπωσης τρίτου πειράματος

➤ 4^ο Πείραμα

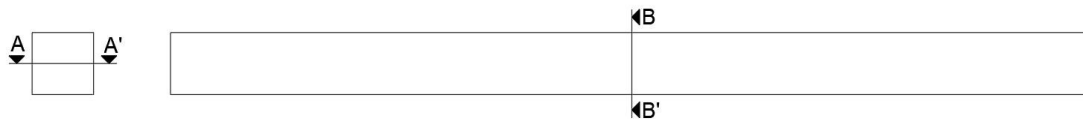
Ο δεύτερος συνδυασμός έχει raster angle 45/-45 που αλλάζει ανά LAYER και η κατ' όγκο περιεκτικότητα των υλικών είναι 60% PLA και 40% ABS. Στην εικόνα 32 φαίνεται η μορφή που έχουν τα δοκίμια του πρώτου πειράματος όπου με κίτρινο συμβολίζεται το υλικό PLA και με πράσινο το υλικό ABS. Τα κόκκινα βέλη δείχνουν την γωνία εκτύπωσης στο συγκεκριμένο LAYER.



Εικόνα 32: Περιγραφή παραμέτρων εκτύπωσης τέταρτου πειράματος

5.3 Μοντελοποίηση

Για την ικανοποίηση των μεταβλητών και των συνδυασμών του σχεδιασμού πειραμάτων η μορφολογία των δοκιμίων είναι σύνθετη. Ειδικότερα, η μεταβλητή F2 (BY BLOCK/BY LAYER) επιτυγχάνεται με τον διαχωρισμό των δοκιμίων σε 24 επίπεδα, έτσι για την επιλογή BY LAYER της μεταβλητής F2 η γωνία εκτύπωσης (Raster angle) αλλάζει για κάθε επίπεδο ενώ για την επιλογή BY BLOCK η γωνία εκτύπωσης αλλάζει κάθε δύο επίπεδα διαμορφώνοντας 12 blocks, και οι δύο περιπτώσεις φαίνονται στην Εικόνα 35. Οι μεταβλητές F1 (Raster angle) και F3 (Κατ' όγκο περιεκτικότητα υλικών) επιτυγχάνεται με τη μορφολογία κάθε επιπέδου. Το κάθε επίπεδο διαχωρίζεται σε λωρίδες PLA και ABS εναλλάξ, το πάχος αυτών διαμορφώνει τη ποσότητα των υλικών. Η κατά μήκος διεύθυνση των λωρίδων καθορίζει την Raster angle, στην εικόνα 34 φαίνονται σκαριφήματα των τομών των δοκιμίων για γωνία 0°, 90° και 45°. Η περίπτωση της raster angle -45° δεν απεικονίζεται διότι είναι αυτή των 45° αντεστραμμένη. Οι λωρίδες και το πάχος τους σε κάθε περίπτωση της εικόνας 34 είναι τέτοιες ώστε να επιτυγχάνεται ποσότητα 60% - 40%.



Εικόνα 33

A - A'

0



90

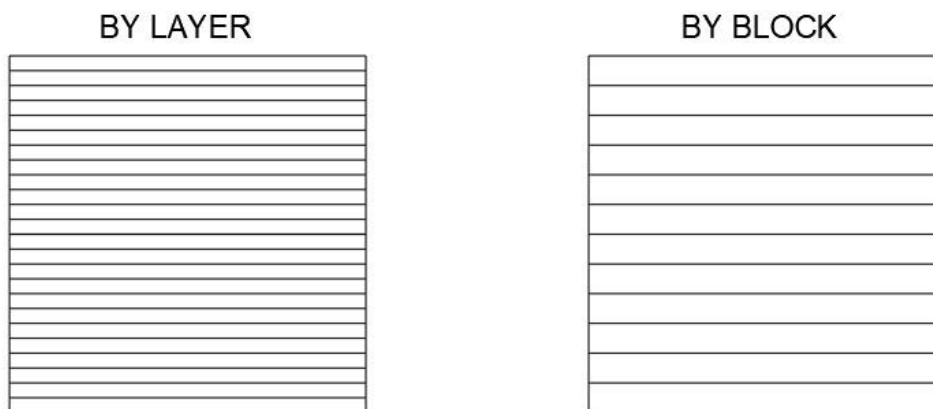


45



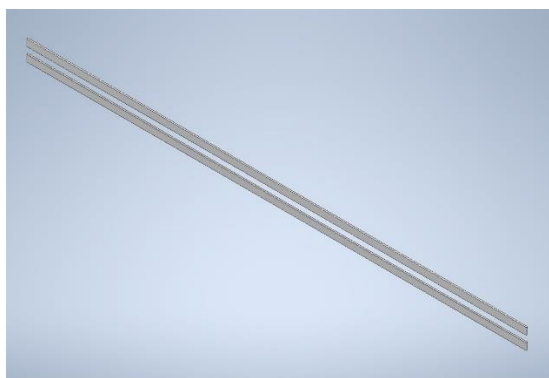
Εικόνα 34: Τομή A - A' για raster angle 0°, 90° και 45°

B - B'

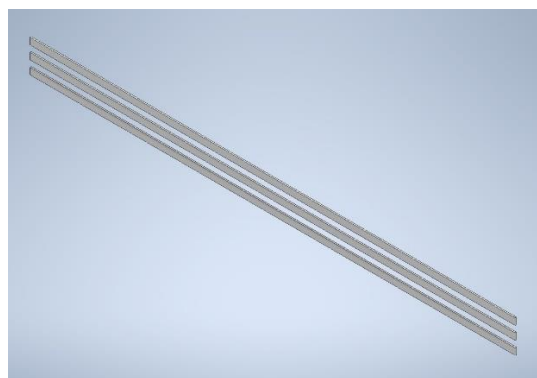


Εικόνα 35: Τομή B – B' για εκτύπωση BY LAYER και BY BLOCK

Αμέσως μετά τον καθορισμό της μορφολογίας των δοκιμίων ακολούθησε παραγωγή τρισδιάστατων μοντέλων στο πρόγραμμα Inventor. Ο σκοπός αυτού είναι η εξαγωγή S.T.L. αρχείων. Αρχικά δημιουργήθηκαν έξι ειδών parts τα οποία αναπαριστούν την κάθε περίπτωση επιπέδου, δηλαδή 60% με Raster angle 0°, 90°, 45° και 40% με Raster angle 0°, 90°, 45°. Η διαδικασία αυτή βοήθησε στην εύκολη συναρμολόγηση δύο τελικών μοντέλων ανα δοκίμιο από τα οποία το ένα αποτελεί το υλικό με ποσόστωση 60% και το άλλο το υλικό με ποσόστωση 40%.

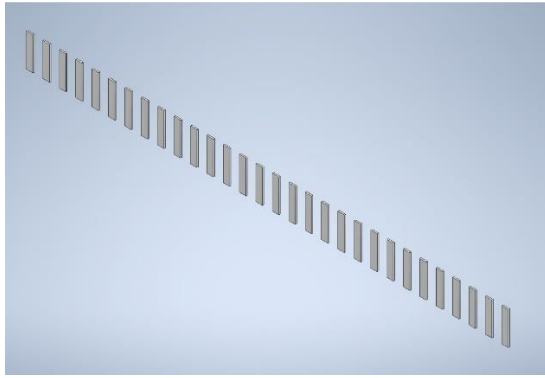


Εικόνα 36: 40% - Raster angle 0°

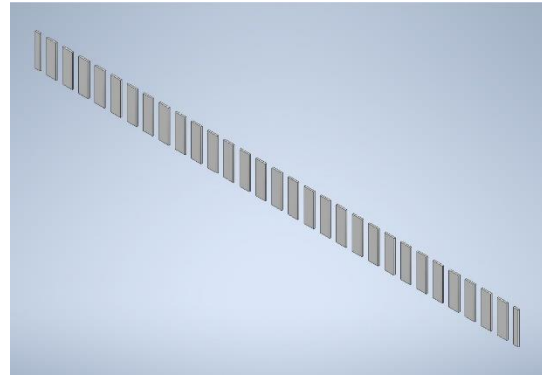


Εικόνα 37: 60% - Raster angle 0°

Στις εικόνες 36 και 37 φαίνονται τα δύο μοντέλα που αντιστοιχούν σε επίπεδο με ποσόστωση 40% και 60% αντίστοιχα για raster angle 0°

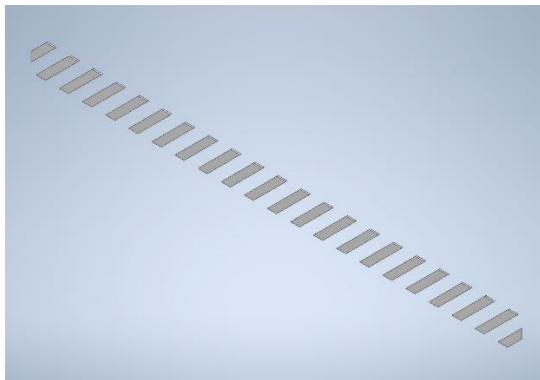


Εικόνα 38: 40% - Raster angle 90°

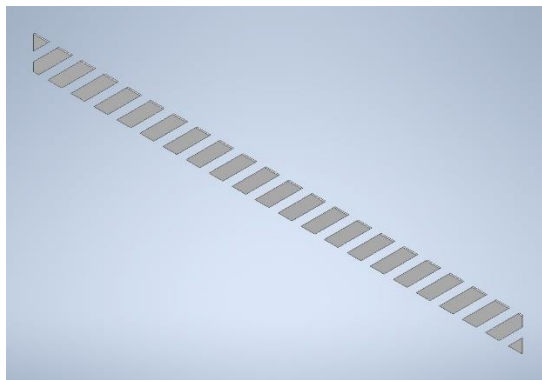


Εικόνα 39: 60% - Raster angle 90°

Στις εικόνες 38 και 39 φαίνονται τα δύο μοντέλα που αντιστοιχούν σε επίπεδο με ποσόστωση 40% και 60% αντίστοιχα για raster angle 90°.



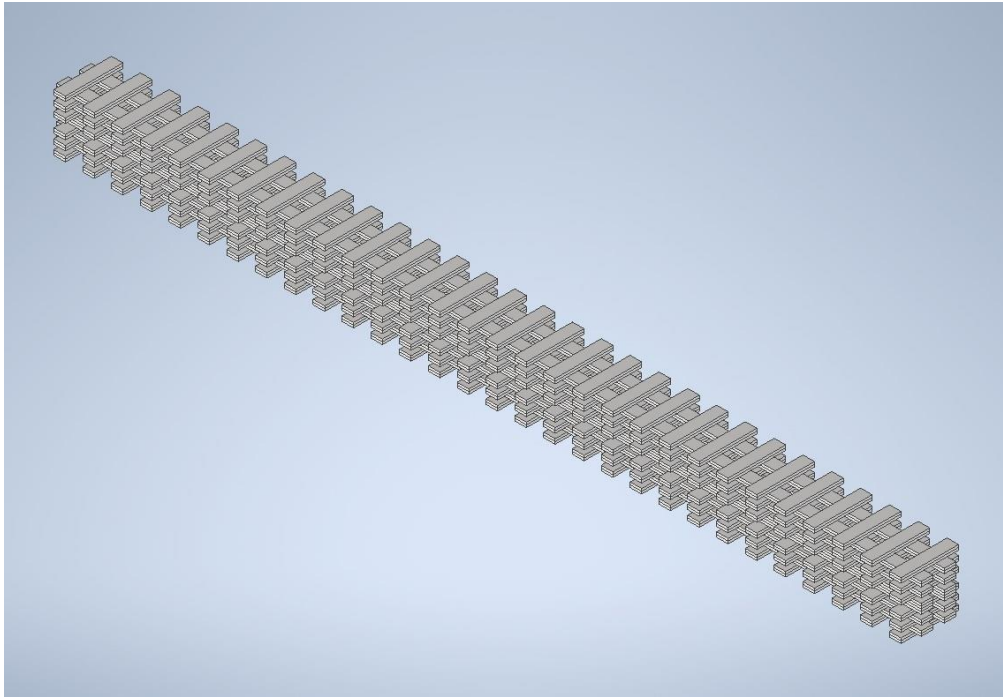
Εικόνα 40: 40% - Raster angle 45°



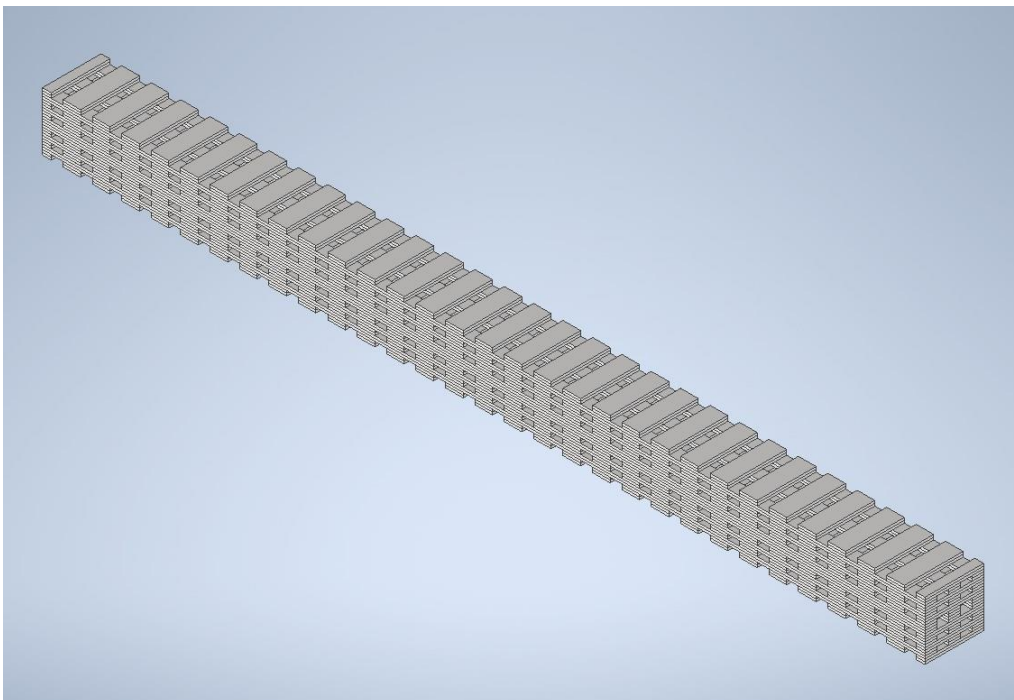
Εικόνα 41: 60% - Raster angle 45°

Στις εικόνες 40 και 41 φαίνονται τα δύο μοντέλα που αντιστοιχούν σε επίπεδο με ποσόστωση 40% και 60% αντίστοιχα για raster angle 90°.

Στη συνέχεια παράχθηκαν δύο αρχεία assembly για κάθε πείραμα από τα parts, το ένα από αυτά αποτελεί το 60% του δοκιμίου και το άλλο το 40%. Αναλυτικότερα, τα δύο assembly που προκύπτουν σε κάθε περίπτωση είναι συνδυασμοί δύο ειδών επιπέδου από τα έξι αρχικά μοντέλα. Δύο μοντέλα επιπέδου που έχουν ίδια ποσόστωση και διαφορετική γωνία εκτύπωσης τοποθετούνται εναλλάξ το ένα πάνω στο άλλο για να διαμορφώσουν την δομή BY LAYER, ενώ όταν τοποθετούνται ανά δύο με ίδια γωνία εκτύπωσης διαμορφώνουν την δομή BY BLOCK. Ο λόγος που το κάθε δοκίμιο χωρίζεται σε δύο μοντέλα είναι για να μπορέσει να γίνει η ένωση τους στον Slicer έτσι ώστε να εκτυπωθεί το κάθε ένα με το κατάλληλο υλικό.

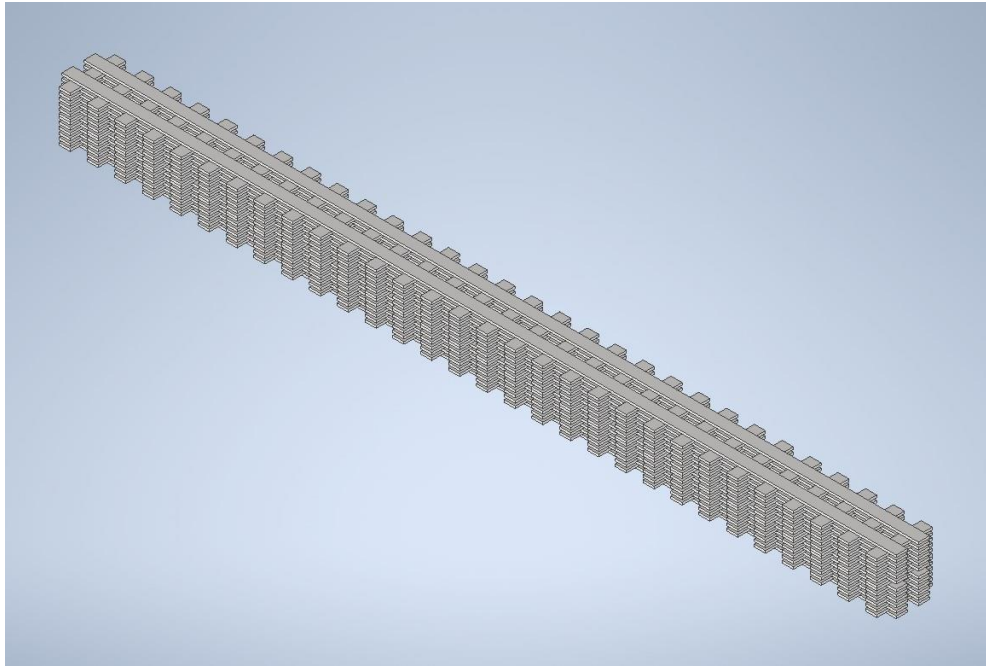


Εικόνα 42: Πείραμα 1 40%

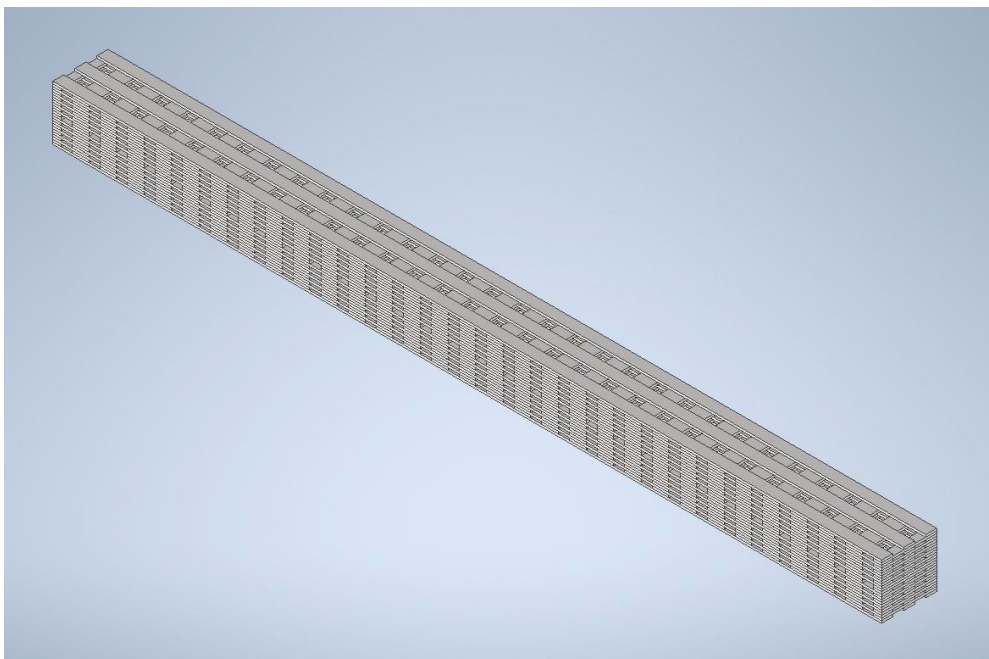


Εικόνα 43: Πείραμα 1 60%

Για το πρώτο πείραμα στην εικόνα 42 φαίνεται το μοντέλο assembly με 40% ποσόστωση υλικού του τελικού δοκιμίου και στην 43 φαίνεται το μοντέλο assembly με 60% ποσόστωση υλικού του τελικού δοκιμίου. Είναι εμφανές ότι πρόκειται για συνδιασμούς των επιπέδων 40% με raster angle $0^\circ - 90^\circ$ και 60% με raster angle $0^\circ - 90^\circ$ αντίστοιχα. Επίσης και στα δύο μοντέλα με την αλλαγή της γωνίας εκτύπωσης ανά δύο επίπεδα διαμορφώνεται η δομή BY BLOCK. Το μοντέλο assembly 40% εκτυπώθηκε με το υλικό ABS ενώ το μοντέλο assembly 60% με το υλικό PLA.

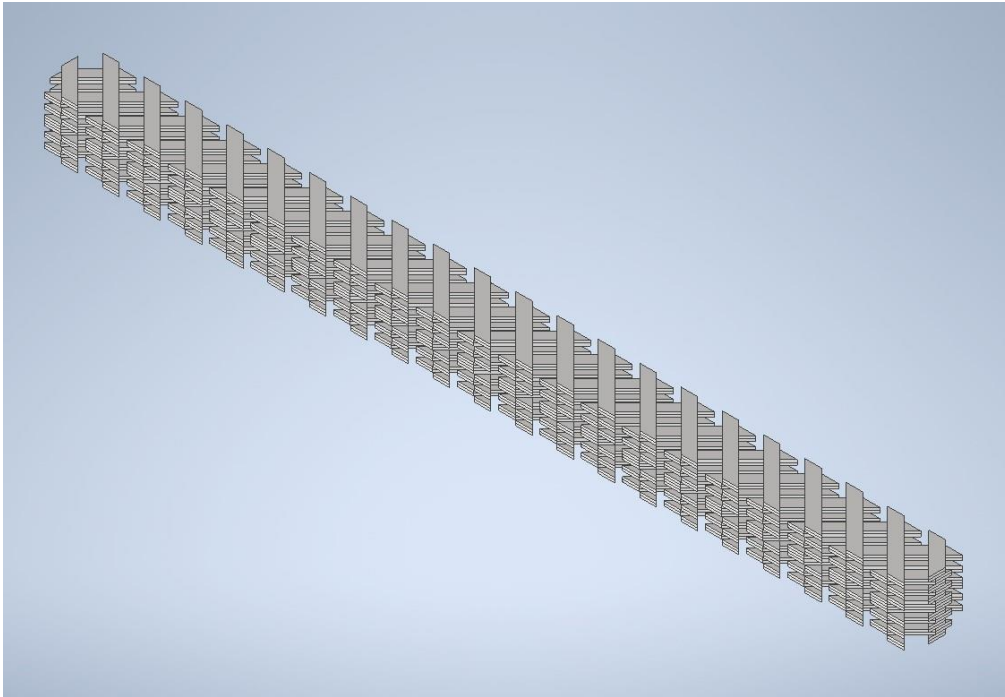


Εικόνα 44: Πείραμα 2 40%

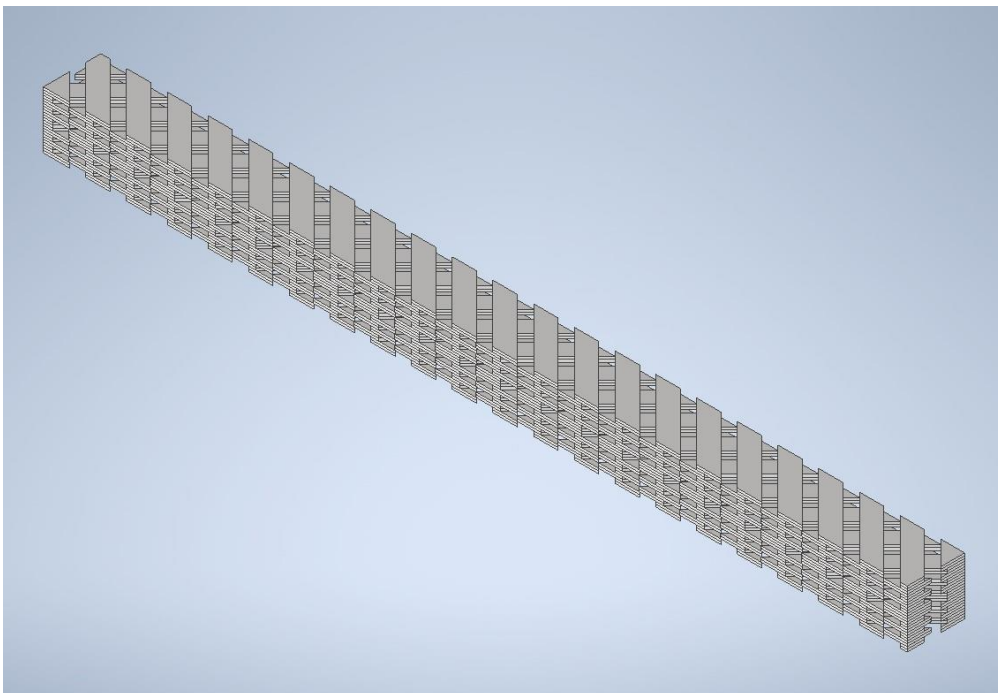


Εικόνα 45: Πείραμα 2 60%

Για το δεύτερο πείραμα στην εικόνα 44 φαίνεται το μοντέλο assembly με 40% ποσόστωση υλικού του τελικού δοκιμίου και στην 45 φαίνεται το μοντέλο assembly με 60% ποσόστωση υλικού του τελικού δοκιμίου. Είναι εμφανές ότι πρόκειται για συνδιασμούς των επιπέδων 40% με raster angle $0^\circ - 90^\circ$ και 60% με raster angle $0^\circ - 90^\circ$ αντίστοιχα. Επίσης και στα δύο μοντέλα με την αλλαγή της γωνίας εκτύπωσης ανά επίπεδο διαμορφώνεται η δομή BY LAYER. Το μοντέλο assembly 40% εκτυπώθηκε με το υλικό PLA ενώ το μοντέλο assembly 60% με το υλικό ABS.

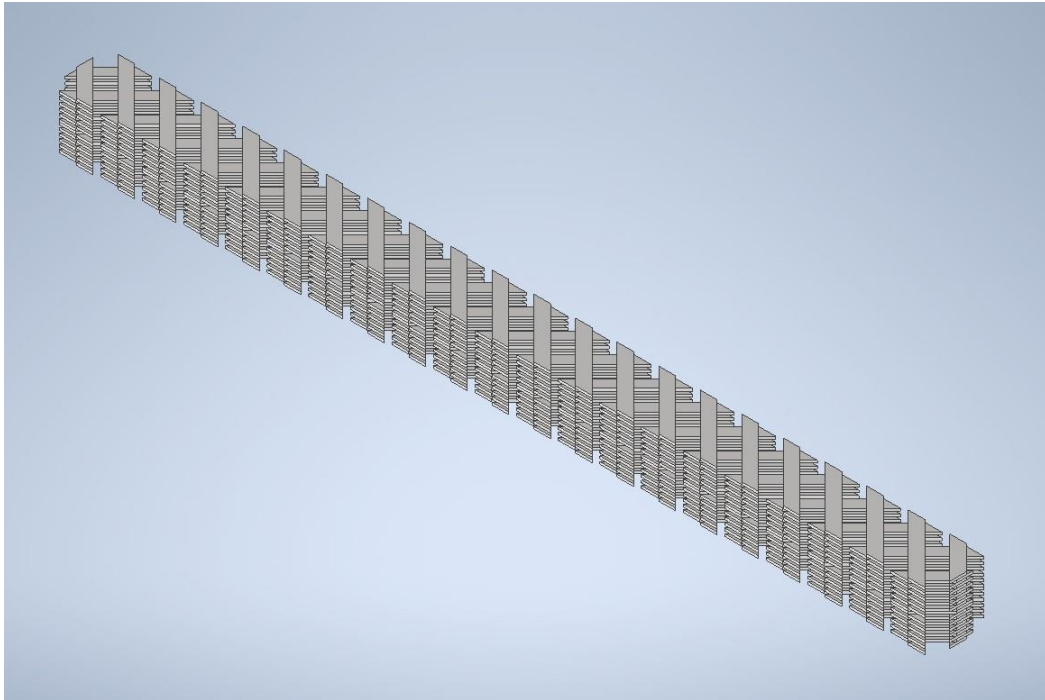


Εικόνα 46: Πείραμα 3 40%

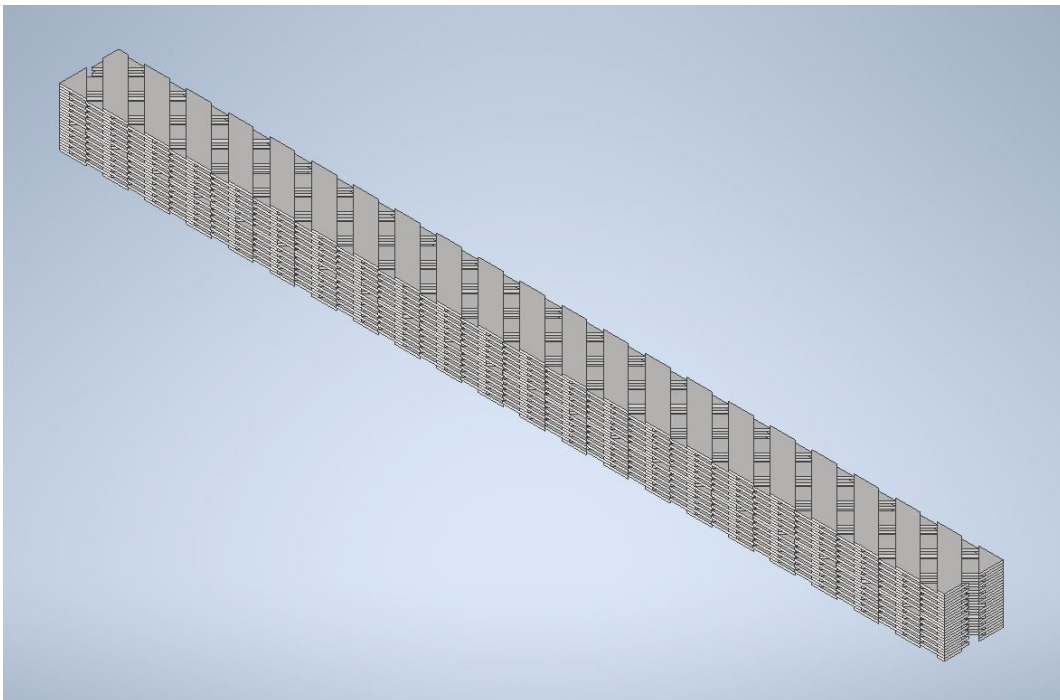


Εικόνα 47: Πείραμα 3 60%

Για το τρίτο πείραμα στην εικόνα 46 φαίνεται το μοντέλο assembly με 40% ποσόστωση υλικού του τελικού δοκιμίου και στην 47 φαίνεται το μοντέλο assembly με 60% ποσόστωση υλικού του τελικού δοκιμίου. Είναι εμφανές ότι πρόκειται για συνδιασμούς των επιπέδων 40% με raster angle 45° - -45° και 60% με raster angle 45° - -45° αντίστοιχα. Επίσης και στα δύο μοντέλα με την αλλαγή της γωνίας εκτύπωσης ανά δύο επίπεδα διαμορφώνεται η δομή BY BLOCK. Το μοντέλο assembly 40% εκτυπώθηκε με το υλικό PLA ενώ το μοντέλο assembly 60% με το υλικό ABS.



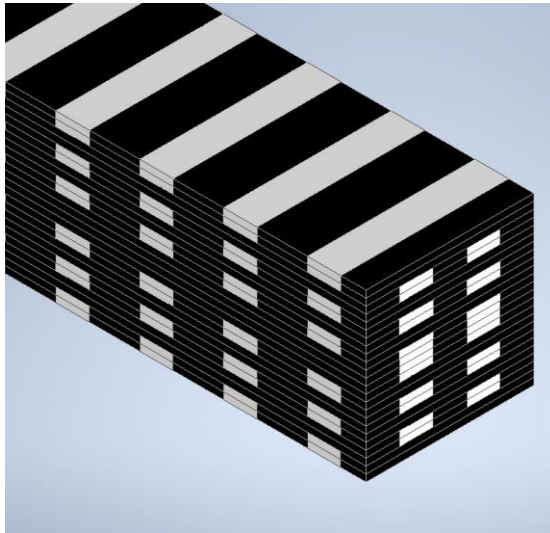
Εικόνα 48: Πείραμα 4 40%



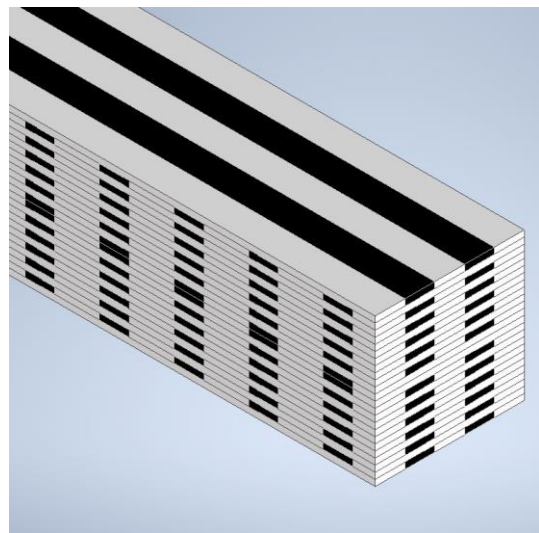
Εικόνα 49: Πείραμα 4 60%

Για το τέταρτο πείραμα στην εικόνα 48 φαίνεται το μοντέλο assembly με 40% ποσόστωση υλικού του τελικού δοκιμίου και στην 49 φαίνεται το μοντέλο assembly με 60% ποσόστωση υλικού του τελικού δοκιμίου. Είναι εμφανές ότι πρόκειται για συνδιασμούς των επιπέδων 40% με raster angle 45° - -45° και 60% με raster angle 45° - -45° αντίστοιχα. Επίσης και στα δύο μοντέλα με την αλλαγή της γωνίας εκτύπωσης ανά επίπεδο διαμορφώνεται η δομή BY LAYER. Το μοντέλο assembly 40% εκτυπώθηκε με το υλικό ABS ενώ το μοντέλο assembly 60% με το υλικό PLA.

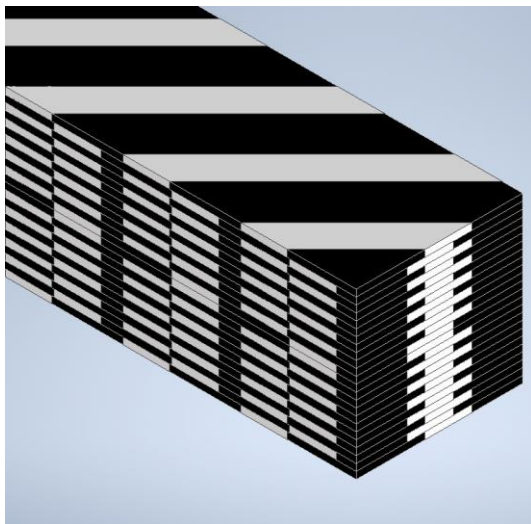
Τα μοντέλα assembly 40% και 60% του κάθε πειράματος σε συνδυασμό δίνουν τα τέσσερα είδη δοκιμών και άρα την πλήρη απεικόνιση του κάθε συνδυασμού όπου το υλικό PLA έχει μαύρο χρώμα και το ABS λευκό.



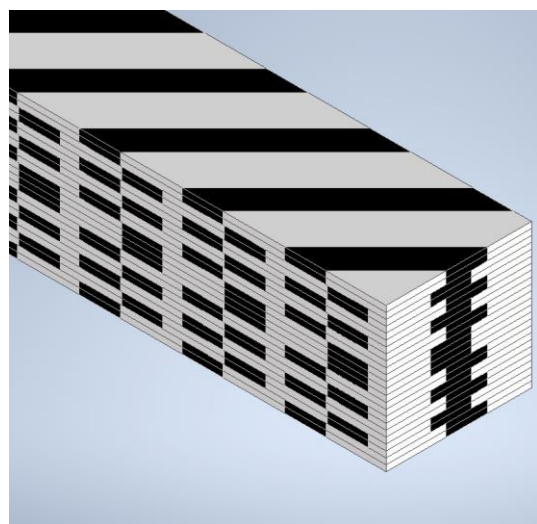
Εικόνα 50: Πείραμα 1



Εικόνα 51: Πείραμα 2

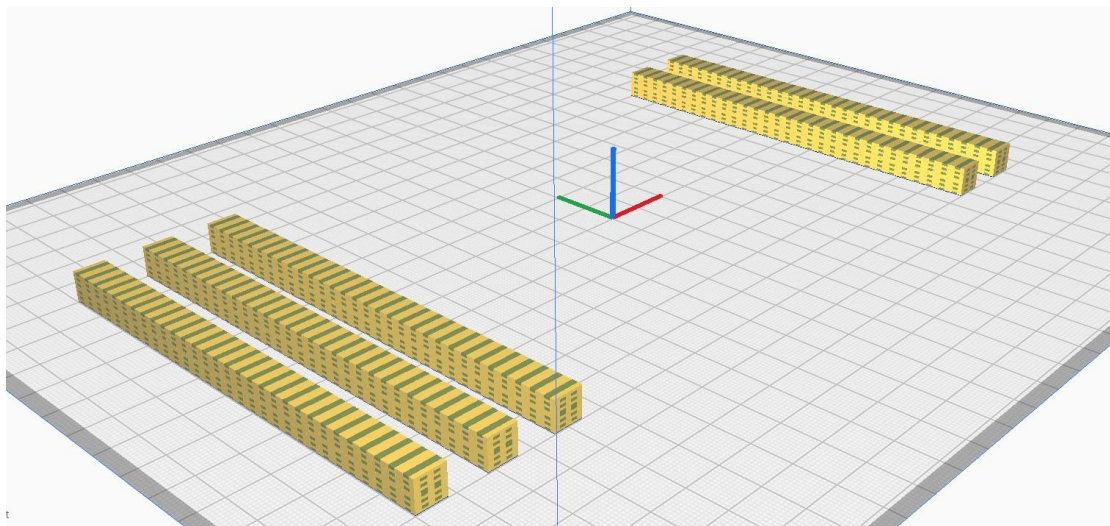


Εικόνα 52: Πείραμα 3



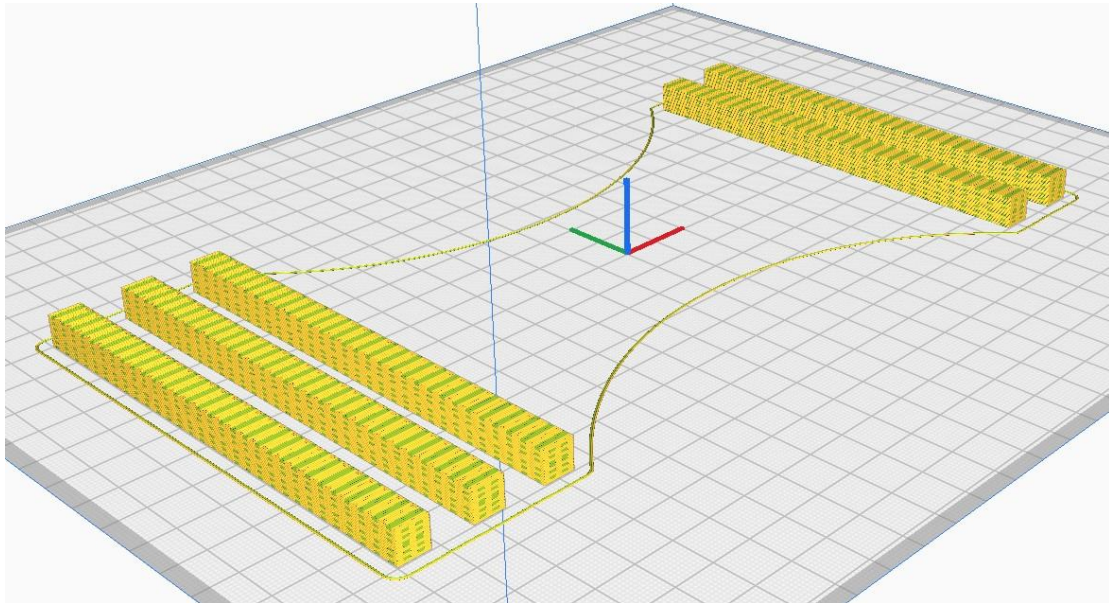
Εικόνα 53: Πείραμα 4

Στη συνέχεια τα αρχεία S.T.L εισάχθηκαν στο πρόγραμμα slicer Ultimaker Cura 5 με σκοπό να παραχθεί ο G κώδικας που θα μεταφερθεί στον εκτυπωτή. Οι ρυθμίσεις κατά την διαδικασία αυτή επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό το αποτέλεσμα της εκτύπωσης. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε εκτενής έρευνα σχετικά με αυτές και τον τρόπο που μπορεί να επιτευχθεί η βέλτιστη ποιότητα δοκιμίου ως προς την εκτύπωση. Οι πιο κρίσιμες επιλογές ήταν αυτές της θερμοκρασίας και της ταχύτητας εκτύπωσης. Ειδικότερα η θερμοκρασία εκτύπωσης του υλικού ρυθμιστήκε στους 200 °C για το PLA και 230 °C για το ABS σύμφωνα με τον κατασκευαστή. Η θερμοκρασία της τράπεζας για τα πειράματα 1 και 4 είναι 70 °C ενώ για τα 2 και 3 είναι 90 °C. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι το πρώτο επίπεδο των πειραμάτων 2 και 3 αποτελείται από 60% ABS, υλικό που τήκεται σε υψηλές θερμοκρασίες και χρειάζεται μεγαλύτερη θερμοκρασία τράπεζας έτσι ώστε να προσκολληθεί σε αυτή και να έχει την επιθυμητή πρόσφυση το δοκίμιο κατά την εκτύπωση. Η κατάλληλη ταχύτητα εκτύπωσης μετά από δοκιμές ορίστηκε στα 30 mm/s καθώς σε αυτήν παρατηρείται το βέλτιστο αποτέλεσμα ως προς την ποιότητα του δοκιμίου. Εξαιρέση αποτελεί η ταχύτητα εκτύπωσης του πρώτου επιπέδου που ρυθμίστηκε στα 10 mm/s με σκοπό την αύξηση της πρόσφυσης στην τράπεζα. Για την βελτιστοποίηση της ποιότητας του αρχικού επιπέδου, καθώς παρατηρείται διαρροή υλικού κατά την αναμονή των extruders και ύστερα δημιουργούνται κενά στα paths, επιλέχθηκε να γίνει skirt μιας γραμμής για κάθε υλικό. Βάση του προτύπου ASTM D3039 κάθε πείραμα περιλαμβάνει πέντε δοκίμια που εκτυπώθηκαν ταυτόχρονα και σε ίδιες συνθήκες. Όπως φαίνεται από στατιστικές μελέτες αυτό βοηθά στην εξασφάλιση της επιτυχίας του πειράματος σε περίπτωση σφάλματος κατά την εκτύπωση και την διαπίστωση της επαναληψιμότητας των αποτελεσμάτων. Η θέση τους πάνω στην τράπεζα είναι αυτή που φαίνεται στην εικόνα 54 και για κάθε περίπτωση είναι ίδια.

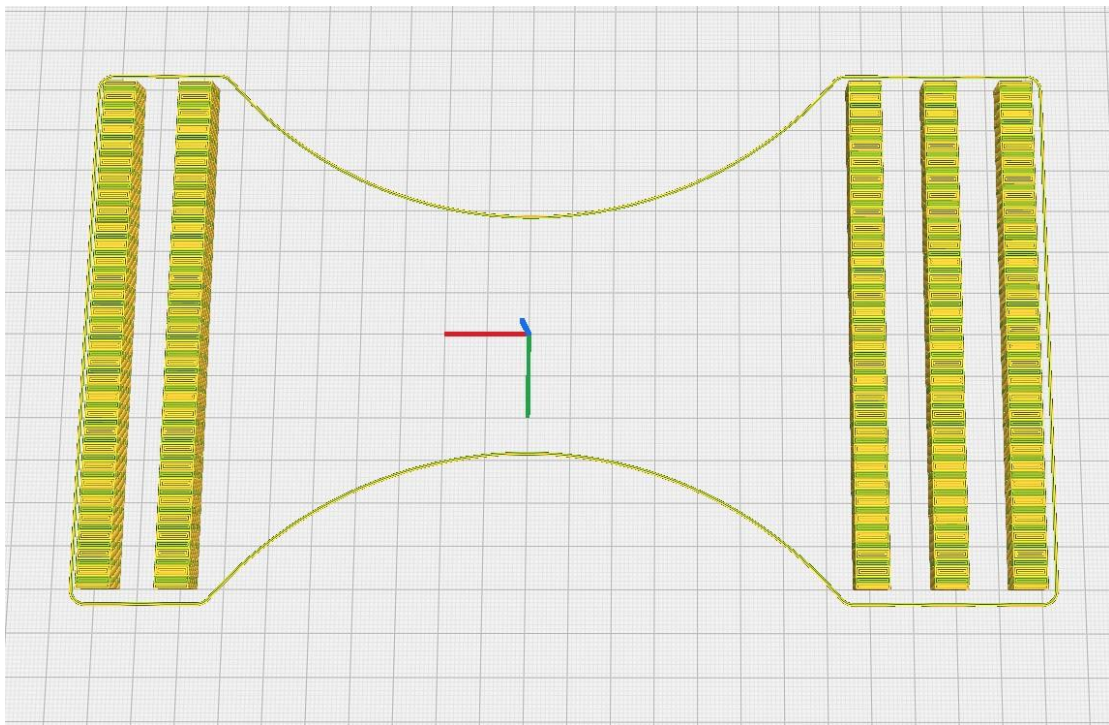


Εικόνα 54: Δοκίμια στο περιβάλλον του CURA 5 πριν το "Slicing"

Στις εικόνες 55 και 56 φαίνονται τα δοκίμια στο περιβάλλον του slicer μετά το slicing.



Εικόνα 55: Διάταξη δοκιμίων πάνω στην τράπεζα



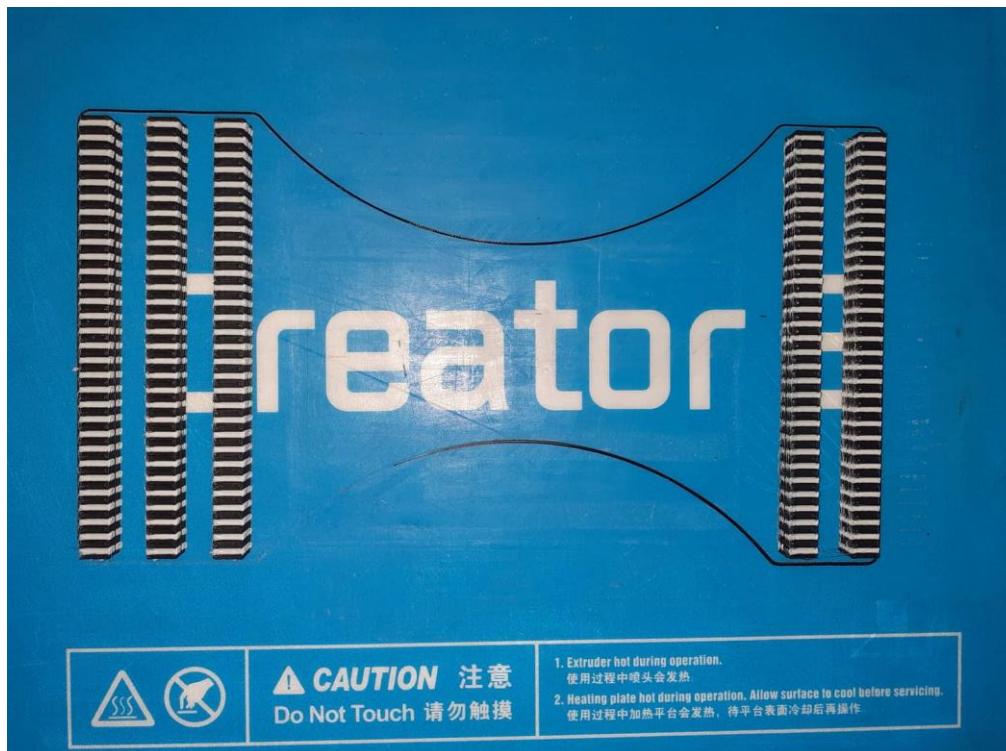
Εικόνα 56: Αρίθμηση δοκιμίων από αριστερά προς τα δεξιά 1,2,3,4 και 5

5.4 Παραγωγή δοκιμίων

Πριν την εκτύπωση των τεσσάρων πειραμάτων πραγματοποιήθηκε δοκιμαστική εκτύπωση ενός δοκιμίου για κάθε συνδυασμό με σκοπό την διαπίστωση πιθανών σφαλμάτων που μπορεί να προκύψουν κατά την πειραματική διαδικασία. Τα σημαντικότερα σφάλματα που παρατηρήθηκαν κατά την δοκιμή είναι η αποκόλληση του αρχικού επιπέδου και το φαινόμενο warping. Ακόμα διαπιστώθηκε μικρή απόκλιση των δύο κεφαλών στην γ διεύθυνση της τάξης των 0,3 mm, το γεγονός αυτό δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα του πειράματος. Τέλος, κατά την εκτύπωση των πειραματικών ομάδων δοκιμών δεν παρατηρήθηκε κάποιο σφάλμα με εξαίρεση την περίπτωση του δοκιμίου 5 του πειράματος 1 το οποίο λόγω δυσκολίας στην τροφοδοσία νήματος είχε μικρή απώλεια υλικού στο κέντρο.



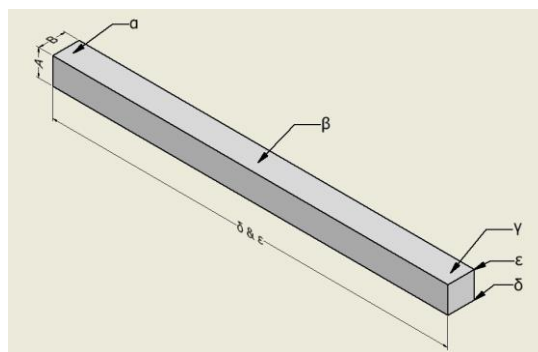
Εικόνα 57: Διαδικασία εκτύπωσης



Εικόνα 58: Εκτυπωμένα δοκίμια (Πείραμα 1)

5.5 Διαστασιολογικός έλεγχος

Μετά την διαδικασία της εκτύπωσης έγινε διαστασιολογικός έλεγχος στις κρίσιμες διαστάσεις των δοκιμών με την χρήση παχυμέτρου. Για την ακρίβεια παρατηρήθηκε μικρό συστηματικό σφάλμα ως προς το ύψος και το μήκος του δοκιμίου της τάξεις του 2% και 1% αντίστοιχα. Το πλάτος (διεύθυνση Y) των δοκιμών παρουσιάζει επίσης συστηματικό σφάλμα της τάξης του 6% όπως ήταν αναμενόμενο για τον λόγο που αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, η τιμή αυτή είναι στα όρια των ανοχών αλλά δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Επίσης η επαναληψιμότητα της εκτύπωσης είναι αρκετά ικανοποιητική.



Εικόνα 59: Σημεία μετρήσεων

ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ								
Α.Τ.	α		β		γ		δ	ε
	A	B	A	B	A	B		
BY BLOCK - 0/90 - PLA 60%								
1	7,9	8,4	8	8,5	8	8,3	120,5	120,6
2	7,9	8,4	8	8,55	8	8,6	120,65	120,7
3	7,8	8,5	7,9	8,45	7,95	8,6	120,7	120,75
4	7,75	8,4	7,8	8,4	7,95	8,4	120,6	120,7
5	7,95	8,5	7,95	8,6	7,95	8,5	120,65	120,7
BY BLOCK - 45/-45 - PLA 40%								
1	7,85	8,6	8	8,65	8	8,7	120,6	120,55
2	7,95	8,75	7,95	8,7	7,95	8,7	120,55	120,65
3	7,85	8,7	8	8,7	8	8,7	120,3	120,3
4	7,8	8,7	7,9	8,7	7,95	8,7	120,6	120,55
5	7,85	8,6	7,95	8,7	8	8,7	120,4	120,3
BY LAYER - 0/90 - PLA 40%								
1	7,95	8,7	8	8,7	8	8,7	120,4	120,45
2	7,9	8,7	7,9	8,7	7,95	8,7	120,4	120,55
3	7,85	8,7	7,9	8,7	7,9	8,55	120,5	120,5
4	7,85	8,7	7,9	8,8	7,9	8,6	120,3	120,45
5	7,85	8,8	7,95	8,6	7,95	8,6	120,4	120,4
BY LAYER - 45/-45 - PLA 60%								
1	8	8,65	8,05	8,6	8,05	8,6	120,6	120,7
2	7,9	8,7	7,95	8,7	8	8,7	120,8	120,75
3	7,85	8,8	7,9	8,7	8	8,8	120,6	120,7
4	7,8	8,7	8	8,6	8	8,6	120,6	120,55
5	7,75	8,7	7,85	8,7	7,95	8,8	120,5	120,45

Εικόνα 60 : Διαστασιολογικός πίνακας δοκιμών

Στην εικόνα 60 φαίνονται όλες οι μετρήσεις που έχουν παρθεί από τα δοκίμια. Παρατηρείται ότι στις μετρήσεις α-B, β-B και γ-B το συστηματικό σφάλμα, που έχει προαναφερθεί, είναι σταθερό στα 0,6 mm περίπου, πράγμα που επιβεβαιώνει τις παρατηρήσεις κατά την παραγωγή των δοκιμών. Οι μετρήσεις στα σημεία δ και ε δείχνουν συστηματικό σφάλμα περίπου 0,6 mm, αυτό σημαίνει ότι οι κεφαλές εκτύπωσης έχουν μικρή απόκλιση και στην Χ διεύθυνση. Οι μετρήσεις στα σημεία α-A σε σχέση με τα σημεία β-A και γ-A έχουν μεγαλύτερη απόκλιση από τα 8 mm που είναι το επιθυμητό ύψος δοκιμίου. Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στο λάθος καλιμπράρισμα της τράπεζας εκτύπωσης, ωστόσο οι αποκλίσεις είναι μικρές και δεν επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα των πειραμάτων.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ									
	Α.Π.	α		β		γ		δ	ε
		A	B	A	B	A	B		
Χm	1	7,86	8,44	7,93	8,50	7,97	8,48	120,62	120,69
	2	7,86	8,67	7,96	8,69	7,98	8,70	120,49	120,47
	3	7,88	8,72	7,93	8,70	7,94	8,63	120,40	120,47
	4	7,86	8,71	7,95	8,66	8,00	8,70	120,62	120,63
σ	1	0,15	0,11	0,14	0,13	0,05	0,23	0,13	0,08
	2	0,08	0,13	0,07	0,04	0,05	0,00	0,25	0,30
	3	0,08	0,07	0,08	0,09	0,07	0,13	0,09	0,10
	4	0,16	0,08	0,13	0,11	0,04	0,18	0,16	0,23

Εικόνα 61: Πίνακας στατιστικής ανάλυσης

5.6 Δοκιμή κάμψης

Η δοκιμή κάμψης συμμορφώνεται στο πρότυπο ASTM 3039 που υποδεικνύει καταπονούμενο μήκος 80 mm και ρυθμό αύξησης της δύναμης 0,1 mm/s. Κατά την δοκιμή έγιναν παρατηρήσεις ως προς τον τρόπο αστοχίας των δοκιμίων.



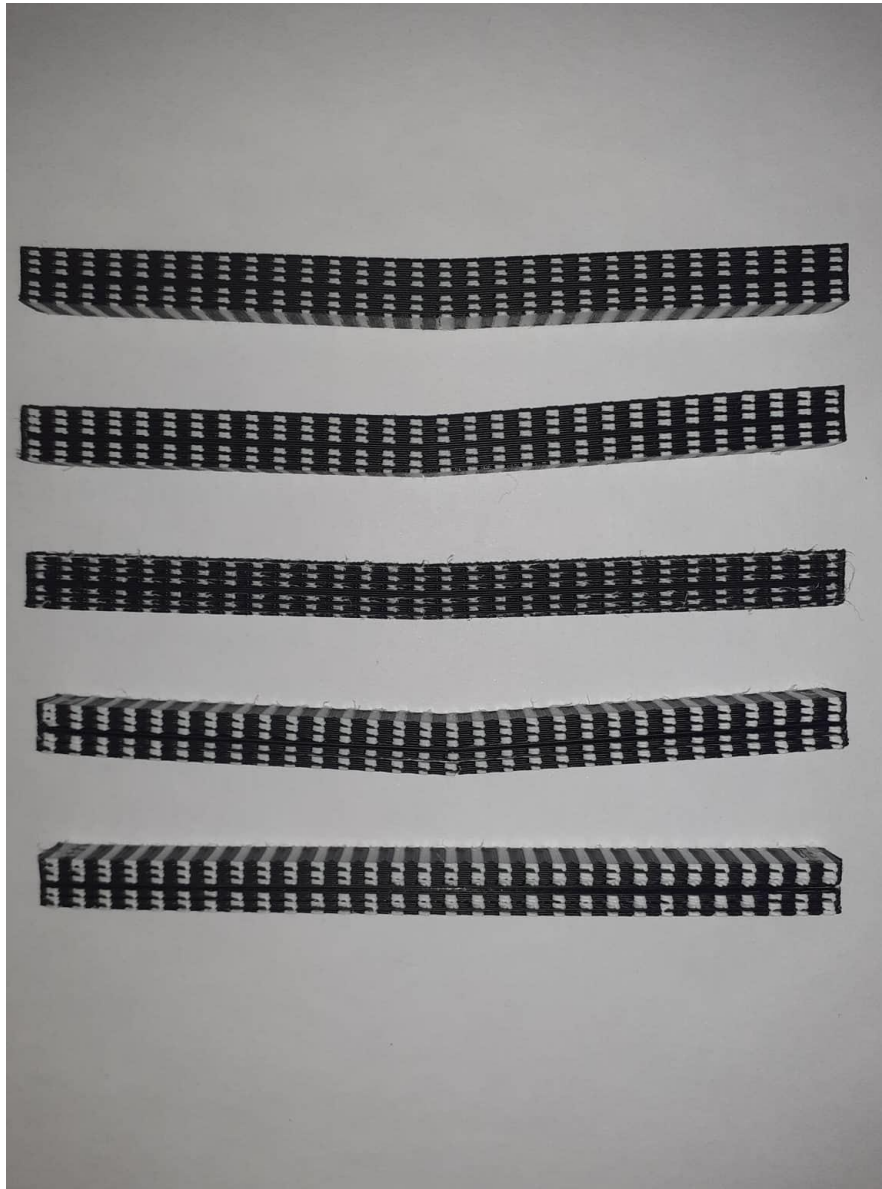
Εικόνα 62: Δοκιμή κάμψης (α)



Εικόνα 63: Δοκιμή κάμψης (β)

➤ 1^ο Πείραμα

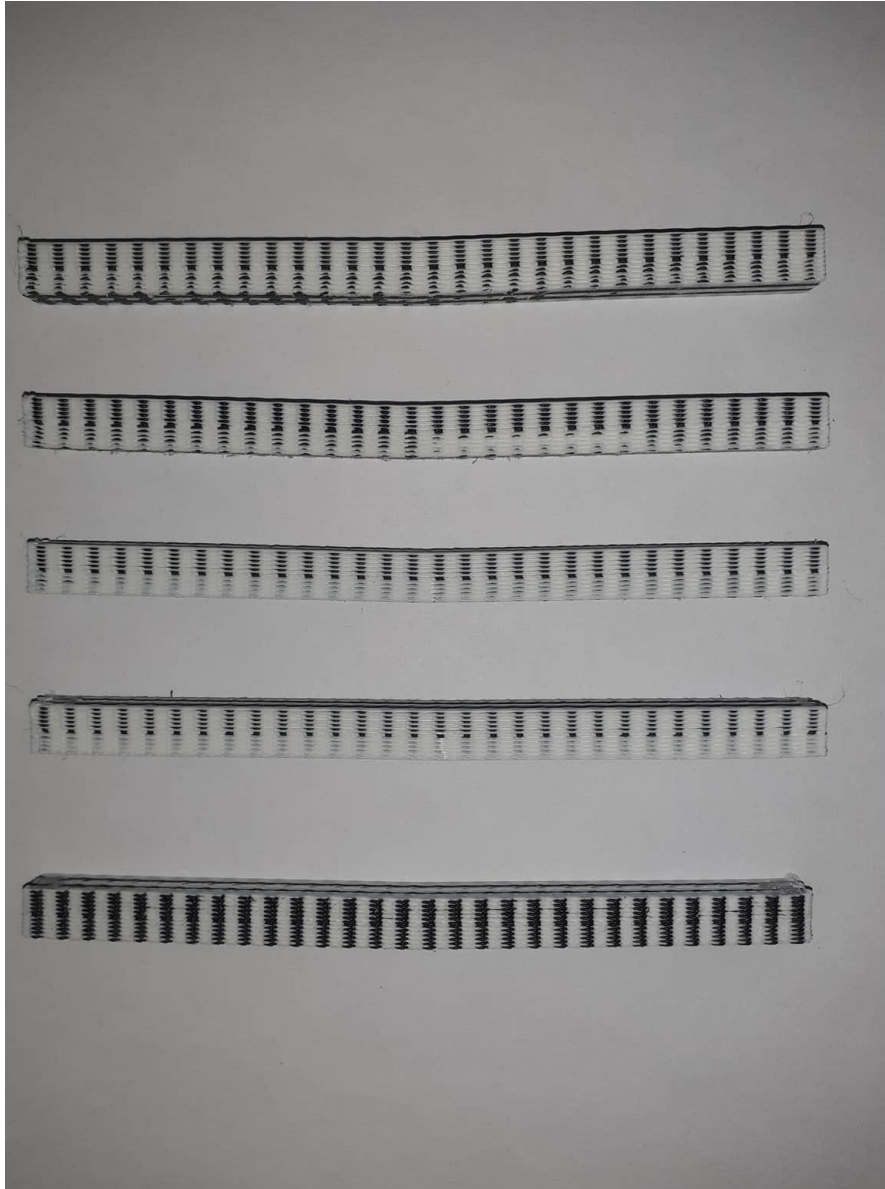
Στο πρώτο πείραμα παρατηρήθηκε ότι τα δοκίμια μετά την αστοχία δεν κατέρρευσαν απότομα. Στην θραύση δεν αποκολλήθηκαν τα επίπεδα μεταξύ τους και τα δοκίμια είχαν παραπλήσια συμπεριφορά με ομογενές υλικό.



Εικόνα 64: Δοκίμια 1^{ου} πειράματος μετά την δοκιμή κάμψης

➤ 2^ο Πείραμα

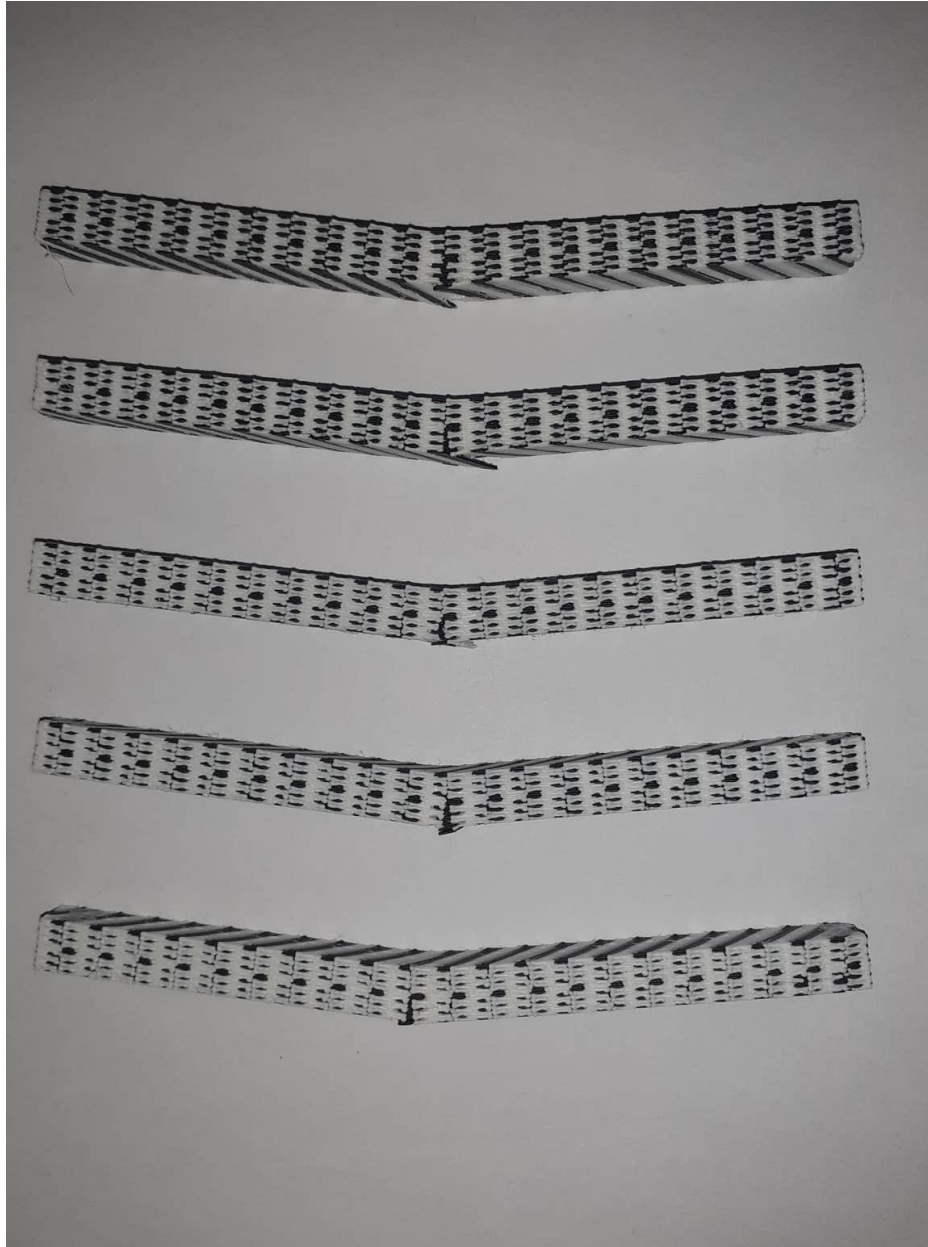
Στο δεύτερο πείραμα παρατηρήθηκε ότι τα δοκίμια μετά την αστοχία καταρρέουν απότομα. Στην θραύση δεν αποκολλήθηκαν τα επίπεδα μεταξύ τους και τα δοκίμια είχαν παραπλήσια συμπεριφορά με ομογενές υλικό.



Εικόνα 65: Δοκίμια 2^{ου} πειράματος μετά την δοκιμή κάμψης

➤ 3^ο Πείραμα

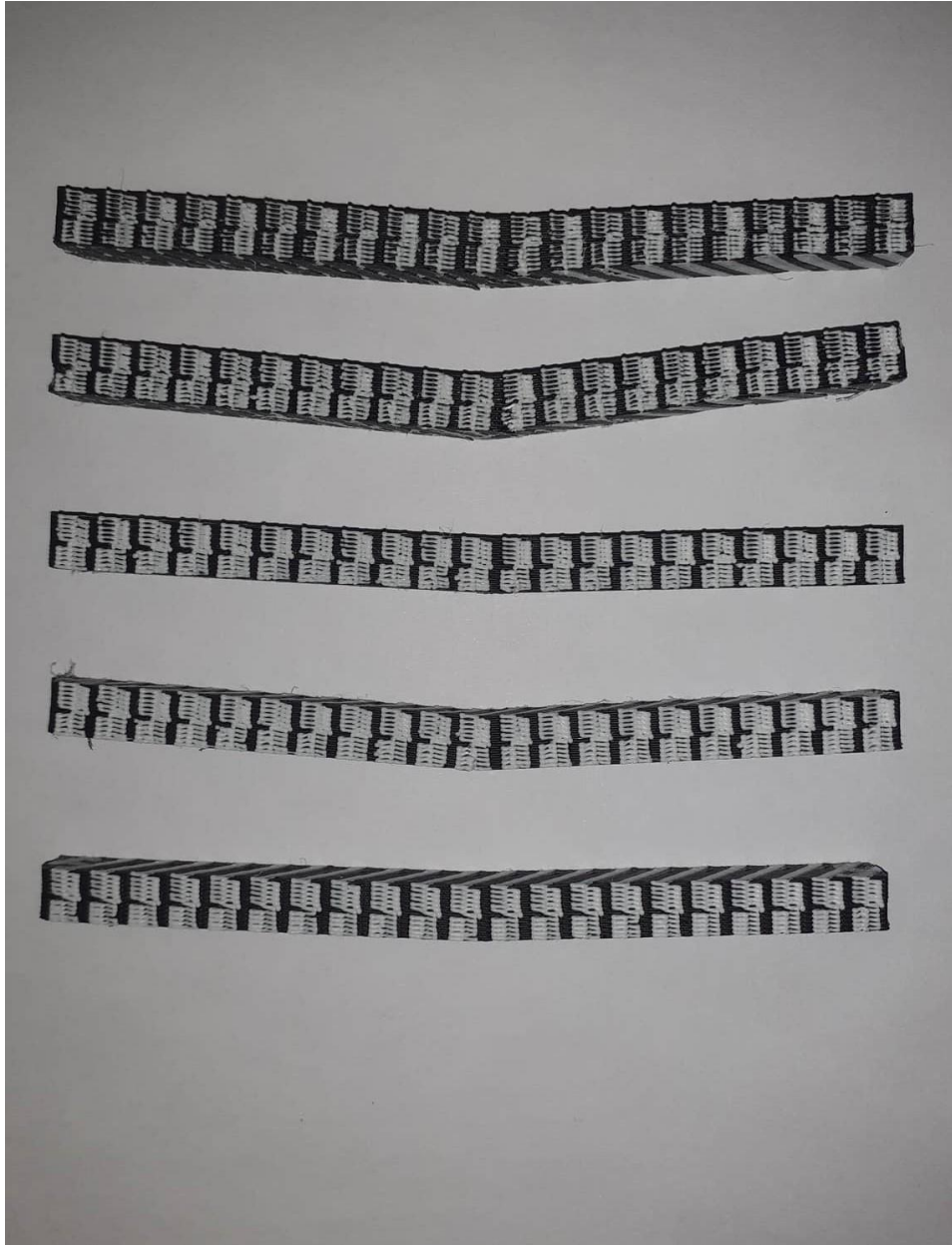
Στο τρίτο πείραμα παρατηρήθηκε ότι τα δοκίμια μετά την αστοχία δεν κατέρρευσαν απότομα. Στην θραύση δεν αποκολλήθηκαν τα επίπεδα μεταξύ τους και τα δοκίμια είχαν παραπλήσια συμπεριφορά με ομογενές υλικό.



Εικόνα 66: Δοκίμια 3^{ου} πειράματος μετά την δοκιμή κάμψης

➤ 4^ο Πείραμα

Στο τρίτο πείραμα παρατηρήθηκε ότι τα δοκίμια μετά την αστοχία δεν κατέρρευσαν απότομα. Στην θραύση δεν αποκολλήθηκαν τα επίπεδα μεταξύ τους και τα δοκίμια είχαν παραπλήσια συμπεριφορά με ομογενές υλικό.



Εικόνα 67: Δοκίμια 4^{ου} πειράματος μετά την δοκιμή κάμψης

6. Αποτελέσματα

6.1 Επεξεργασία μετρήσεων

Απο τις δοκιμές κάμψης προέκυψαν δεδομένα τα οποία μετά από επεξεργασία πήραν την μορφή αναλυτικών πινάκων και διαγραμμάτων Τάσης – Ανοιγμένης παραμόρφωσης. Πιο συγκεκριμένα τα δεδομένα που εξάχθηκαν από την μηχανή δοκιμών ήταν το βέλος κάμψης των δοκιμών σε mm και το επιβαλλόμενο φορτίο σε Newton. Για την μετατροπή τους σε ανοιγμένη παραμόρφωση (ϵ) και τάση (σ) εφαρμόστηκε το πρότυπο ASTM D790.

Τύποι που χρησιμοποιήθηκαν :

$$\sigma = 3PL/2bd^2$$

(Σχέση 1)

Όπου :

σ = τάση, N/mm²

P = επιβαλλόμενο φορτίο, N

L = καταπονούμενο μήκος, mm

b = πλάτος δοκιμίου, mm

d = ύψος δοκιμίου, mm

$$\epsilon = 6Dd/L^2$$

(Σχέση 2)

Όπου :

ϵ = ανοιγμένη παραμόρφωση, mm/mm

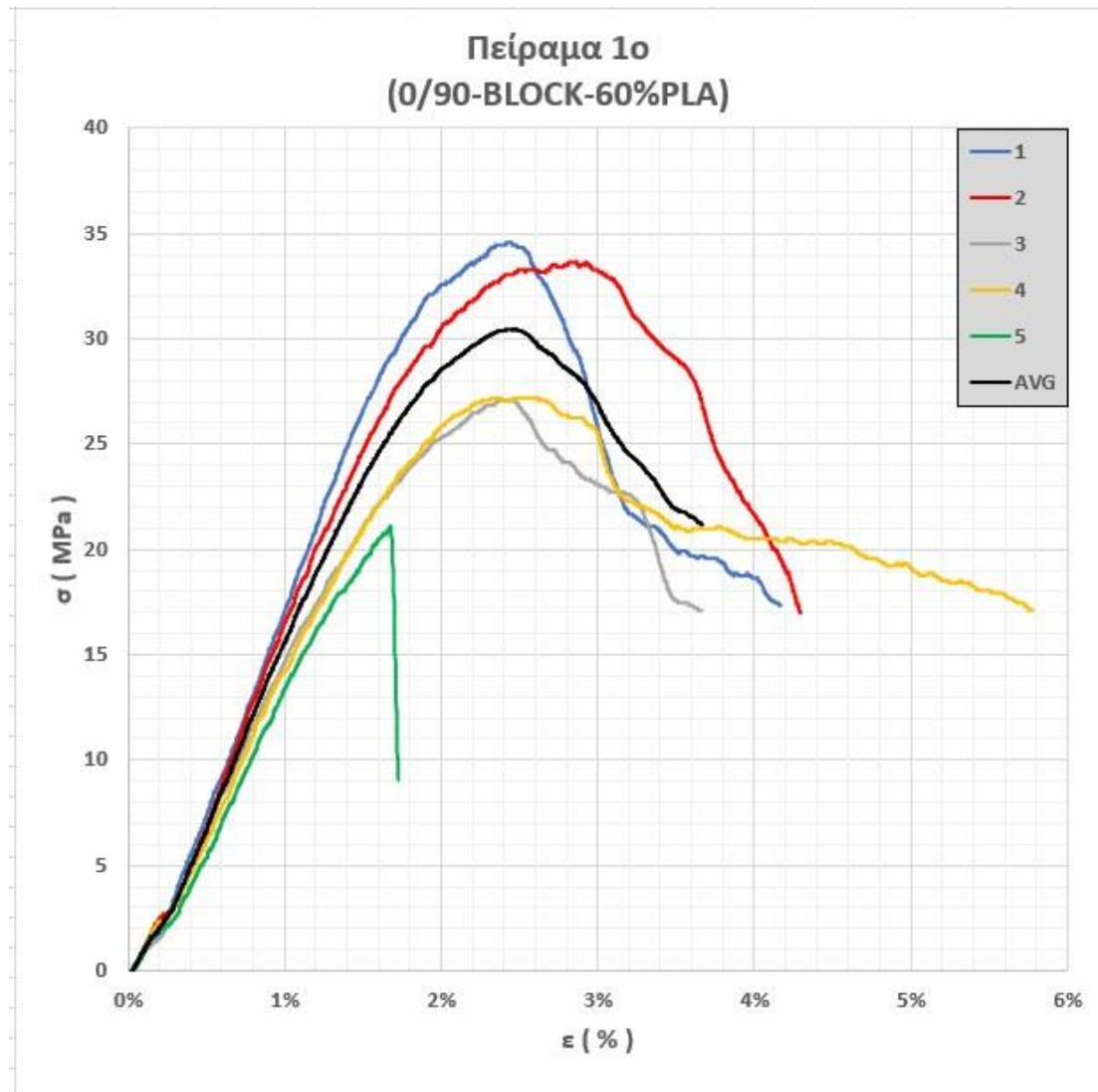
D = βέλος κάμψης, mm

L = καταπονούμενο μήκος, mm

d = ύψος δοκιμίου, mm

Σε κάθε ομάδα δοκιμών υπολογίστηκε η μέση καμπύλη τάσης - ανοιγμένης παραμόρφωσης ($\sigma - \epsilon$) με σκοπό την σύγκριση των πειραμάτων μεταξύ τους.

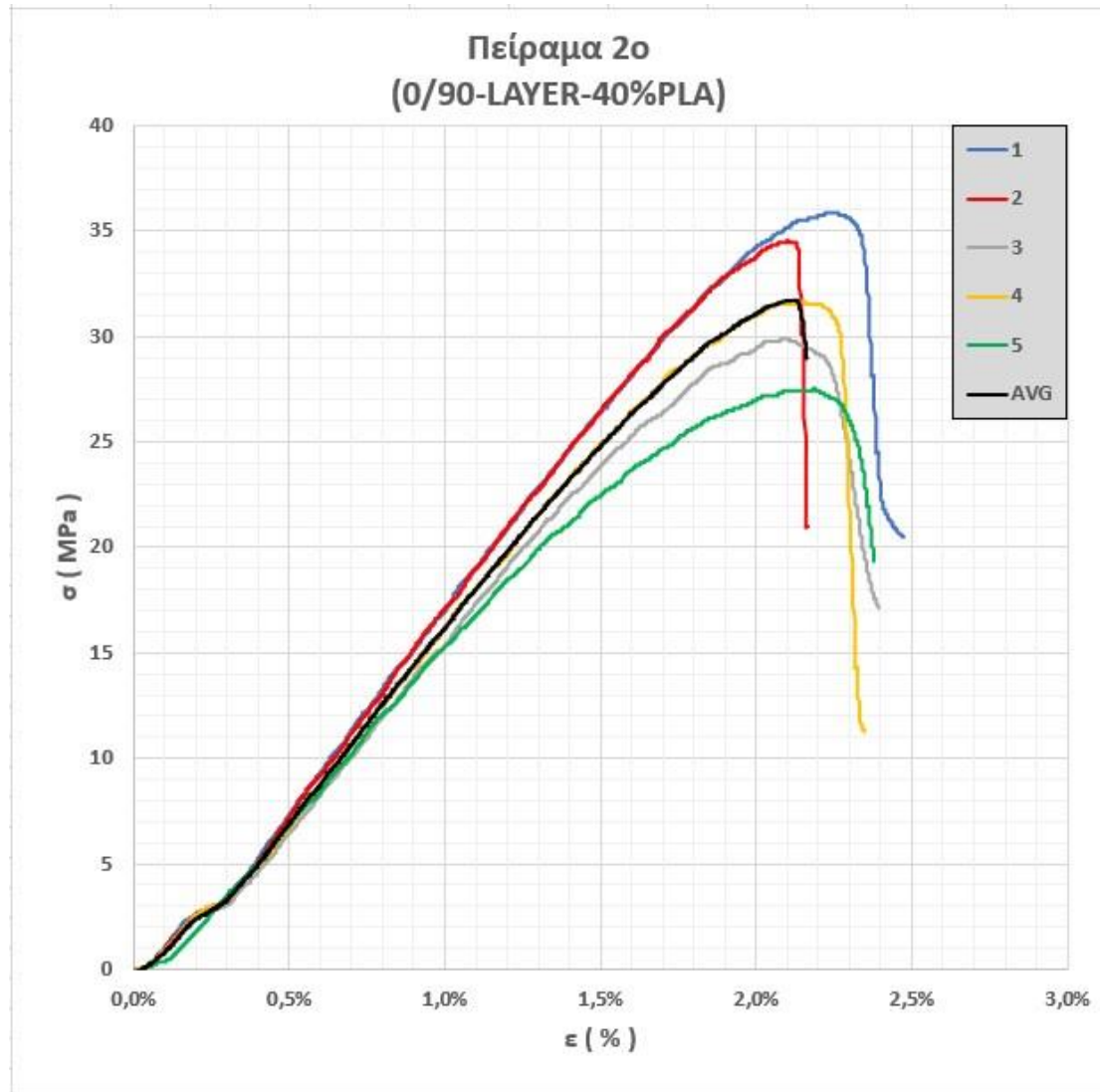
6.2 Διαγράμματα

➤ 1^ο Πείραμα (0/90 – BY BLOCK – 60% PLA)Εικόνα 68: Διάγραμμα Τάσης – Ανοιγμένης παραμόρφωσης του 1^{ου} πειράματος

A.Δ.	UTS (MPa)	STRAIN (%)
1	34,6	2,8
2	33,6	2,4
3	27,1	2,4
4	27,2	2,4
5	21,1	1,8

Εικόνα 69: Πίνακας μηχανικών ιδιοτήτων δοκιμών 1^{ου} πειράματος

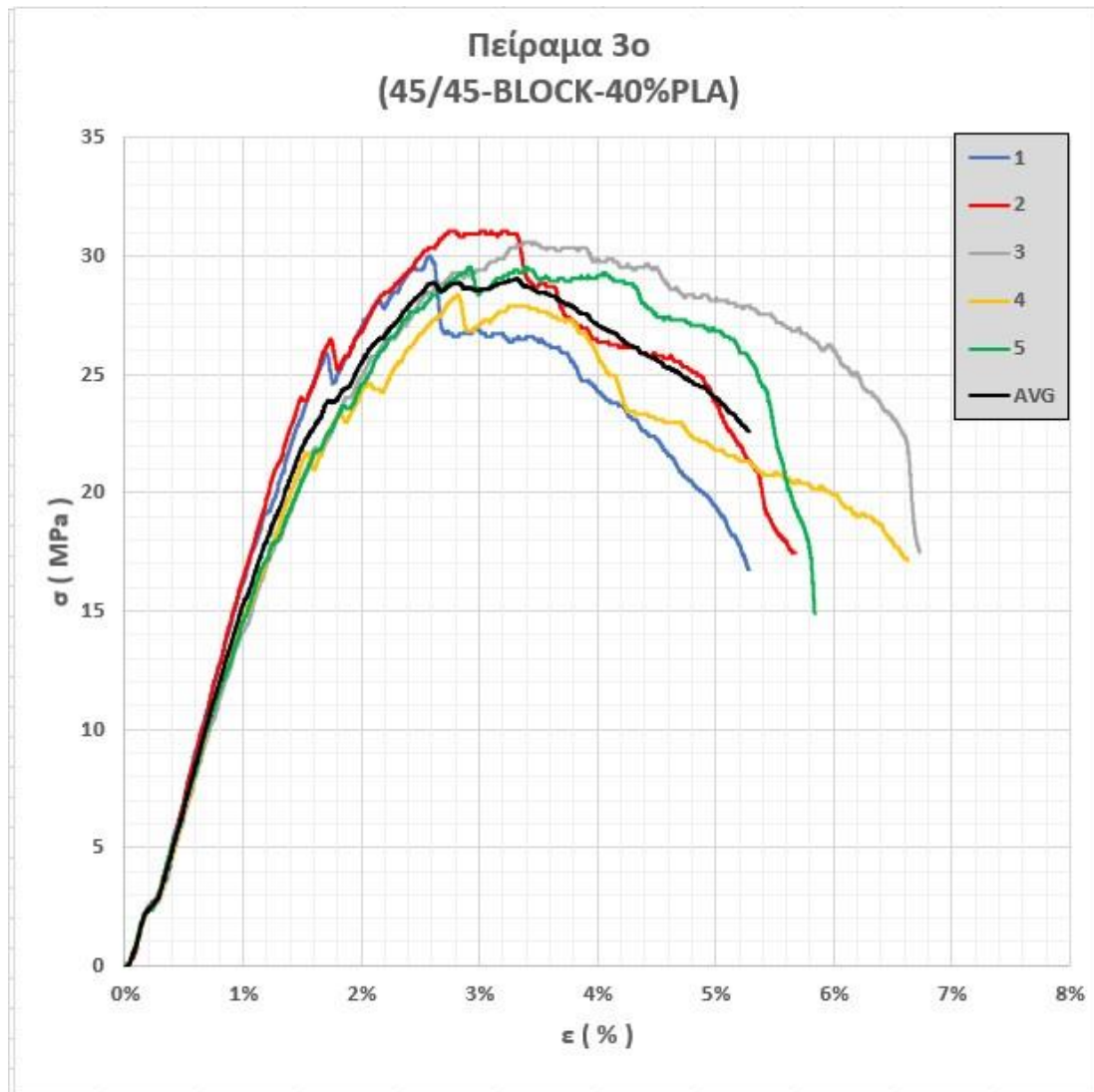
Από το διάγραμμα $\sigma - \epsilon$ του 1^{ου} πειράματος διαπιστώνουμε ότι υπάρχει ομοιογένεια στις καμπύλες τάσης – ανοιγμένης παραμόρφωσης των δοκιμών με εξαίρεση την περίπτωση του δοκιμίου 5, γεγονός αναμενόμενο καθώς όπως έχει προαναφερθεί στην ενότητα 5.5 υπήρξε σφάλμα στο συγκεκριμένο κατά την εκτύπωση. Για τον λόγο αυτό το δοκίμιο 5 δεν λαμβάνεται υπόψιν. Τα UTS των καμπυλών παρουσιάζουν διακύμανση περίπου 3,5 MPa. Η ανοιγμένη παραμόρφωση έχει μικρή διακύμανση της τάξης του 0,2 %. Το μέσω μέτρο ελαστικότητας αφού οι καμπύλες έχουν σχεδόν ίδια κλίση παίρνει την τιμή των 1724,1 MPa. Το μέσω UTS παίρνει την τιμή των 30,5 MPa, ενώ η μέση ανοιγμένη παραμόρφωση είναι 2,5%. Ακόμα φαίνεται στο διάγραμμα ότι τα δοκίμια μετά την αστοχία δεν καταρρέουν γρήγορα, αντί αυτού παρατηρείται μια σταδιακή και γεμάτη διακυμάνσεις συμπεριφορά.

➤ 2^ο Πείραμα (0/90 – BY LAYER – 40% PLA)Εικόνα 70: Διάγραμμα Τάσης – Ανοιγμένης παραμόρφωσης του 2^{ου} πειράματος

A.Δ.	UTS (MPa)	STRAIN (%)
1	35,9	2,2
2	34,6	2,1
3	29,9	2,1
4	31,6	2,1
5	27,5	2,2

Εικόνα 71: Πίνακας μηχανικών ιδιοτήτων δοκιμών 2^{ου} πειράματος

Από το διάγραμμα $\sigma - \epsilon$ του 2^{ου} πειράματος διαπιστώνουμε ότι υπάρχει ομοιογένεια στις καμπύλες τάσης – ανοιγμένης παραμόρφωσης των δοκιμών. Τα UTS των καμπυλών παρουσιάζουν διακύμανση περίπου 4 MPa. Η ανοιγμένη παραμόρφωση έχει αμελητέα διακύμανση. Το μέσω μέτρο ελαστικότητας εφόσον οι κλίσεις των καμπυλών είναι σχεδόν ίδιες παίρνει την τιμή των 1901,8 MPa. Το μέσω UTS παίρνει την τιμή των 31,7 MPa, ενώ η μέση ανοιγμένη παραμόρφωση είναι 2,1%. Επίσης στο συγκεκριμένο πείραμα διαπιστώνουμε ότι τα δοκίμια μετά την αστοχία καταρρέουν απότομα.

➤ 3^ο Πείραμα (45/-45 – BY BLOCK – 40% PLA)

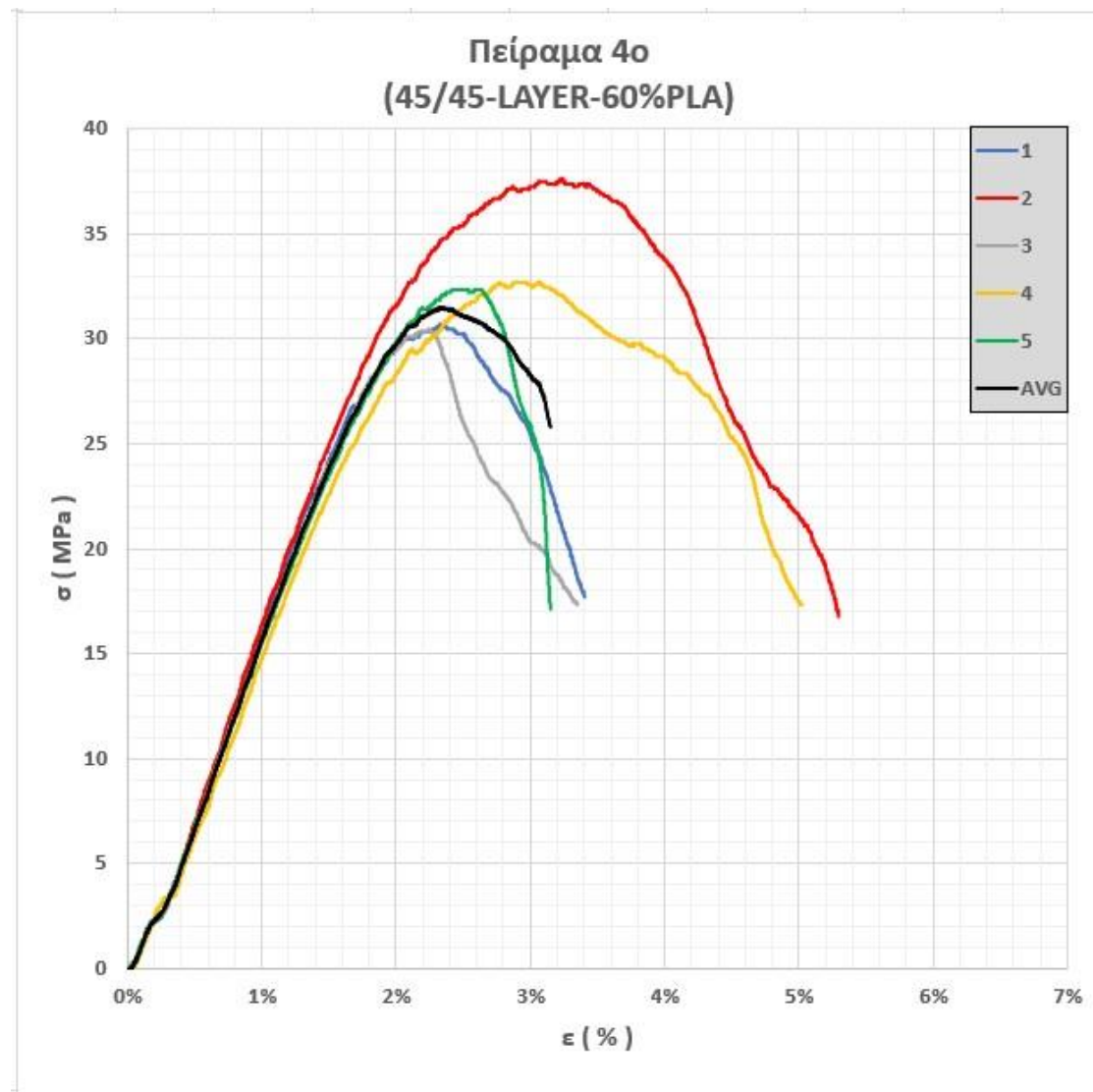
Εικόνα 72: Διάγραμμα Τάσης – Ανοιγμένης παραμόρφωσης του 3^{ου} πειράματος

A.Δ.	UTS (MPa)	STRAIN (%)
1	30,0	2,7
2	31,0	3,0
3	30,6	3,4
4	28,4	2,9
5	29,5	3,4

Εικόνα 73: Πίνακας μηχανικών ιδιοτήτων δοκιμών 3^{ου} πειράματος

Από το διάγραμμα $\sigma - \epsilon$ του 3^{ου} πειράματος διαπιστώνουμε ότι υπάρχει ομοιογένεια στις καμπύλες τάσης – ανοιγμένης παραμόρφωσης των δοκιμών. Τα UTS των καμπυλών παρουσιάζουν διακύμανση περίπου 1.5 MPa. Η ανοιγμένη παραμόρφωση έχει διακύμανση 0,4% . Το μέσο μέτρο ελαστικότητας εφόσον οι κλίσεις των καμπυλών είναι παρόμοιες παίρνει την τιμή των 1729,3 MPa. Το μέσο UTS παίρνει την τιμή των 29,1 MPa, ενώ η μέση ανοιγμένη παραμόρφωση είναι 3,3%. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον στο συγκεκριμένο πείραμα έχει η συμπεριφορά των δοκιμών πριν και μετά την αστοχία καθώς όλες οι καμπύλες παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις. Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στην αποκόλληση των δεσμών μεταξύ λωρίδων διαφορετικού υλικού. Τέλος και σε αυτή την περίπτωση έχουμε αργή κατάρρευση μετά την αστοχία.

➤ 4^ο Πείραμα (45/-45 – BY LAYER – 60% PLA)



Εικόνα 74: Διάγραμμα Τάσης – Ανοιγμένης παραμόρφωσης του 4^{ου} πειράματος

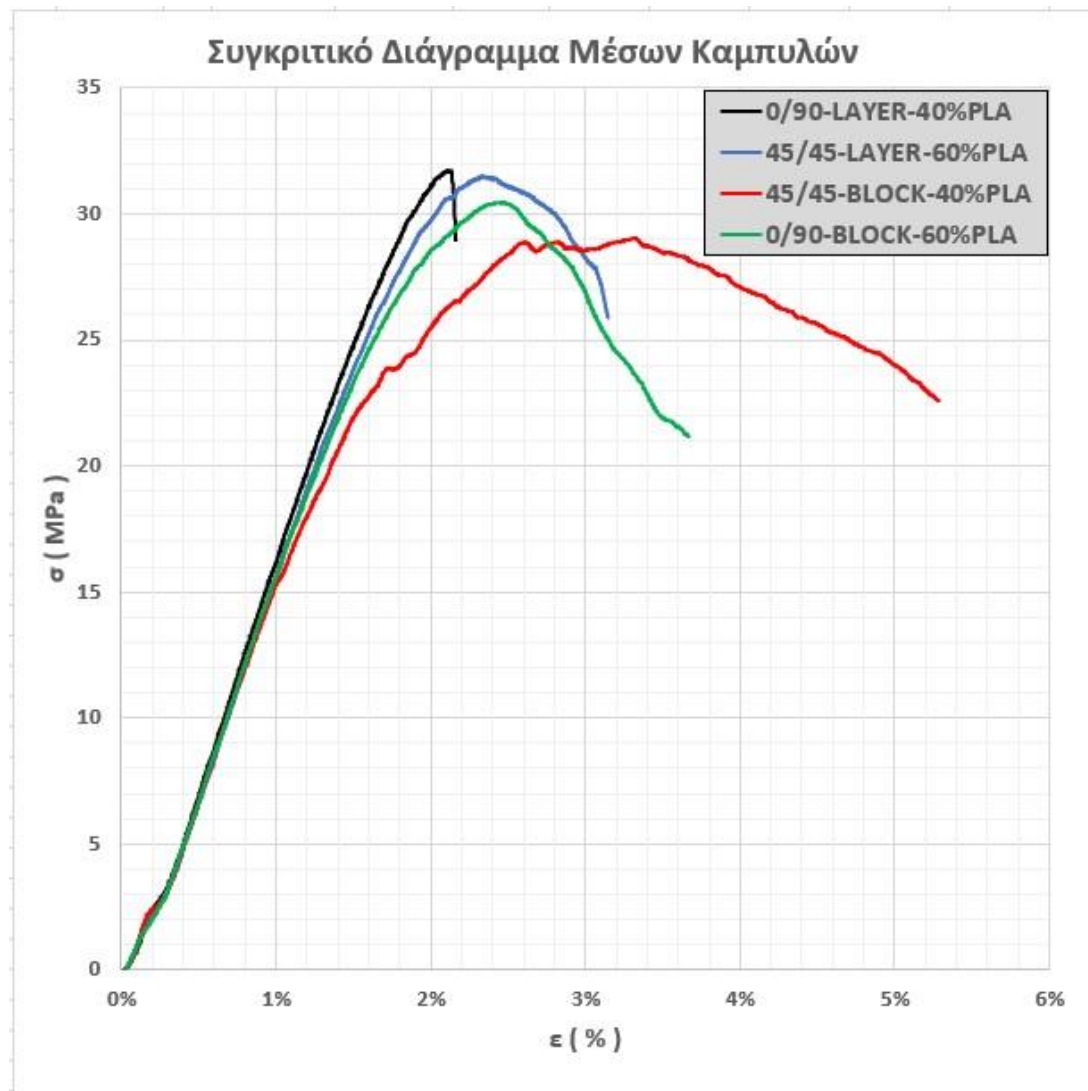
A.Δ.	UTS (MPa)	STRAIN (%)
1	30,7	2,3
2	37,6	3,2
3	30,5	2,2
4	32,7	2,8
5	32,3	2,4

Εικόνα 75: Πίνακας μηχανικών ιδιοτήτων δοκιμίων 4^{ου} πειράματος

Από το διάγραμμα $\sigma - \epsilon$ του 4^{ου} πειράματος διαπιστώνουμε ότι υπάρχει ομοιογένεια στις καμπύλες τάσης – ανοιγμένης παραμόρφωσης των δοκιμίων με εξαίρεση την καμπύλη του δοκιμίου 2, η οποία διαφέρει από τις υπόλοιπες αλλά όχι αρκετά για να μην συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς. Τα UTS των καμπυλών παρουσιάζουν διακύμανση περίπου 3,5 MPa. Η ανοιγμένη παραμόρφωση διακύμανση της τάξης του 0,5 %. Το μέσο μέτρο ελαστικότητας αφού οι καμπύλες έχουν σχεδόν ίδια κλίση παίρνει την τιμή των 1773,0 MPa. Το μέσο UTS παίρνει την τιμή των 31,5 MPa, ενώ η μέση ανοιγμένη παραμόρφωση είναι 2,3%. Επιπρόσθετα, μετά την αστοχία παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά με τα πειράματα 1 και 3.

6.3 Σύγκριση πειραμάτων

Για την σύγκριση των πειραμάτων χαράχθηκε ένα διάγραμμα τάσης – ανοιγμένης παραμόρφωσης με τις μέσες καμπύλες όλων των περιπτώσεων.



Εικόνα 76: Συγκριτικό διάγραμμα μέσων καμπυλών τάσης – ανοιγμένης παραμόρφωσης

A.Π.	UTS (MPa)	STRAIN (%)	E (MPa)
1	30,5	2,5	1724,1
2	31,7	2,1	1901,8
3	29,1	3,3	1729,3
4	31,5	2,3	1773,0

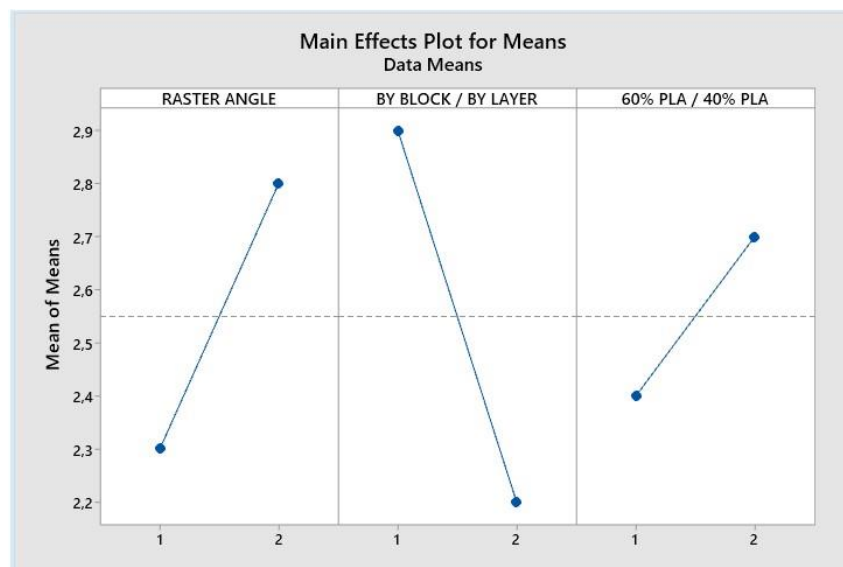
Εικόνα 77: Πίνακας μέσων UTS και μέσης ανοιγμένης παραμόρφωσης ανά πείραμα

Στο συγκριτικό διάγραμμα μέσων καμπυλών παρατηρείται ότι το μέγιστο UTS και την ελάχιστη ανοιγμένη παραμόρφωση έχει το 2^ο πείραμα παρουσιάζοντας ψαθυρή συμπεριφορά. Η απότομη κατάρρευση μετά την αστοχία είναι βασική διαφορά του συγκεκριμένου πειράματος από όλα τα υπόλοιπα. Το 1^ο και το 4^ο πείραμα έχουν παρόμοια συμπεριφορά. Διαφοροποίηση φαίνεται στο 3^ο πείραμα όπου τα δοκίμια παρουσίασαν σημαντικά μεγαλύτερη ελαστικότητα και το χαμηλότερο UTS. Η διακύμανση των UTS των μέσων καμπυλών είναι της τάξης των 1,3 MPa ενώ της ανοιγμένης παραμόρφωσης είναι της τάξης του 0,6%. Το μέτρο ελαστικότητας εμφανίζει καλή ομοιογένεια στα 1724 με 1773 MPa με εξαίρεση το πείραμα 2 που έχει μικρή διαφορά και είναι στα 1902 MPa. Η διαφορά αυτή ενδεχομένως να συνδέεται με την συμπεριφορά των δοκιμών του 2^{ου} πειράματος μετά την αστοχία. Οι καμπύλες των ομάδων 1 και 4 που έχουν εκτυπωθεί με την επιλογή BY LAYER παρουσιάζουν το μεγαλύτερο UTS και την μικρότερη ελαστικότητα. Επίσης αν συγκρίνουμε τις καμπύλες της ομάδας 1 με της ομάδας 2 και της ομάδας 3 με της ομάδας 4 οι οποίες έχουν ίδια raster angle διαπιστώνουμε την μεγάλη επιρροή που έχει η εκτύπωση by block ή by Layer στις ιδιότητες των δοκιμών. Στη συνέχεια αν συγκρίνουμε τις ομάδες 1 με 4 και 2 με 3, που έχουν ίδια την μεταβλητή F2, ως προς την raster angle φαίνεται ότι η επιλογή 0/90 παρουσιάζει μεγαλύτερο UTS και μικρότερη ελαστικότητα, το γεγονός αυτό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την διεύθυνση που πραγματοποιήθηκε η δοκιμή κάμψης. Ωστόσο η raster angle δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις ιδιότητες των δοκιμών. Μικρής σημασίας φαίνεται να είναι η περιεκτικότητα κατά όγκο του κάθε υλικού.

Από το συγκριτικό διάγραμμα μέσων καμπυλών προέκυψε για κάθε καμπύλη το UTS και η ανοιγμένη παραμόρφωση (Εικόνα 77). Για τις τιμές αυτές εφαρμόστηκε η μεθοδολογία Taguchi με σκοπό τον προσδιορισμό της επιρροής των παραμέτρων εκτύπωσης στις δύο αυτές ιδιότητες των δοκιμίων. Έτσι προέκυψαν τα γραφήματα 78 και 79.



Εικόνα 78: Διάγραμμα επιρροής της κάθε μεταβλητής ως προς το UTS των δοκιμίων.



Εικόνα 79: Διάγραμμα επιρροής της κάθε μεταβλητής ως προς την ανοιγμένη παραμόρφωση (ε) των δοκιμίων.

Απο τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι και στην περίπτωση του UTS αλλά και σε αυτήν της ανοιγμένης παραμόρφωσης ο παράγοντας BY BLOCK – BY LAYER (F2) έχει την μεγαλύτερη βαρύτητα. Ως προς το UTS ο παράγοντας raster angle έχει διπλάσια βαρύτητα από την κατά όγκο περιεκτικότητα του κάθε υλικού. Ενώ, για την ανοιγμένη παραμόρφωση η διαφορά μεταξύ αυτών των δύο παραγόντων είναι μικρότερη με την raster angle να έχει πάλι περισσότερη επιρροή. Έτσι η σειρά επιρροής των μεταβλητών του πειράματος είναι :

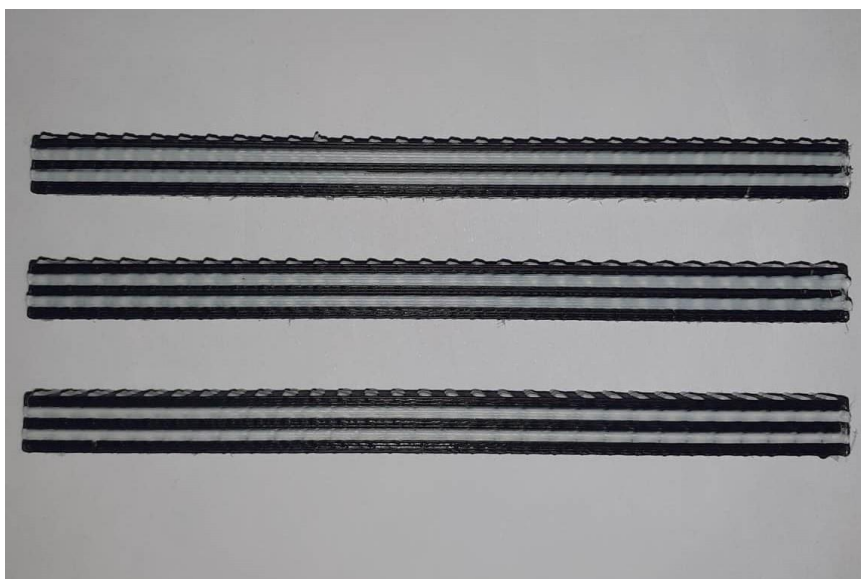
Σειρά επιρροής του UTS

1. Εναλλαγή γωνίας εκτύπωσης (F2) (BY BLOCK – BY LAYER) με δείκτη επιρροής 2,325
2. Γωνία εκτύπωσης (F1) (0/90 – 45/-45) με δείκτη επιρροής 1,601
3. Κατά όγκο περιεκτικότητα υλικών (F3) (60%PLA – 60% ABS) με δείκτη επιρροής 0,811

Σειρά επιρροής της ανοιγμένης παραμόρφωσης

1. Εναλλαγή γωνίας εκτύπωσης (F2) (BY BLOCK – BY LAYER) με δείκτη επιρροής 0,700
2. Γωνία εκτύπωσης (F1) (0/90 – 45/-45) με δείκτη επιρροής 0,500
3. Κατά όγκο περιεκτικότητα υλικών (F3) (60%PLA – 60% ABS) με δείκτη επιρροής 0,300

Επίσης από την ανάλυση Taguchi προέκυψε και ο προτεινόμενος βέλτιστος συνδυασμός των παραπάνω μεταβλητών ως προς τις ιδιότητες που εξετάζονται. Πιο συγκεκριμένα, το υψηλότερο UTS επιτυγχάνεται για raster angle 0/90, εναλλαγή γωνίας εκτύπωσης BY LAYER και κατ' όγκο περιεκτικότητα 60% PLA με προβλεπόμενη τιμή τα 32.3 MPa. Ο συνδυασμός αυτός δεν ήταν ένας από του τέσσερις που παράχθηκαν, για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε εκ νέου η διαδικασία εκτύπωσης για τρία δοκίμια (Εικόνα 80). Η προβλεπόμενη μέγιστη αντοχή των δοκιμίων επικυρώθηκε, η διαφορά μεταξύ αυτής και της υψηλότερης αντοχής των αρχικών πειραμάτων είναι της τάξης του 2%. Για την υψηλότερη ανοιγμένη παραμόρφωση ο βέλτιστος συνδυασμός των μεταβλητών είναι αυτός του πειράματος 3 δηλαδή με raster angle 45/-45, εναλλαγή γωνίας εκτύπωσης BY BLOCK και κατ' όγκο περιεκτικότητα 60% ABS με την τιμή της να είναι της τάξης του 3.3%



Εικόνα 80: Εκτυπωμένα δοκίμια βέλτιστου συνδυασμού μεταβλητών ως προς το UTS

7. Προβλήματα

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία είναι κυρίως πειραματική για το λόγο αυτό τα προβλήματα δεν έλειψαν κατά διαδικασία των πειραμάτων. Παρακάτω αναφέρονται οι σημαντικότερες επιπλοκές που αντιμετωπίστηκαν :

Ένα από τα σημαντικότερα σφάλματα που μπορεί να προκύψουν κατά την διαδικασία του 3D Printing είναι η έλλειψη πρόσφυσης στην τράπεζα εκτύπωσης. Πιο συγκεκριμένα στην φάση των δοκιμών πριν την παραγωγή των πειραματικών ομάδων διαπιστώθηκε ότι τα δοκίμια ξεκολλούσαν από την τράπεζα εκτύπωσης. Αυτό αφενός οφείλεται στην ταχύτητα εκτύπωσης και αφετέρου στην θερμοκρασία της τράπεζας εκτύπωσης. Η ταχύτητα αρχικά ήταν στα 30 mm/s για όλα τα επίπεδα του δοκιμίου. Για να περιοριστεί λοιπόν το σφάλμα αυτό μειώθηκε η ταχύτητα του αρχικού επιπέδου στα 10 mm/s. Μετά πραγματοποιήθηκε τεστ με ταχύτητα αρχικού επιπέδου 5 mm/s και παρατηρήθηκε ότι περεταίρω μείωση της δεν βελτιώνει την πρόσφυση του δοκιμίου με την τράπεζα, έτσι η τελική της τιμή ήταν τα 10 mm/s. Το πρόβλημα, παρόλο της αλλαγής στην ταχύτητα, δεν εξαλείφθηκε. Επομένως η θερμοκρασία της τράπεζας, που αρχικά ρυθμιστική στους 40 °C, μετά από διαδοχικές δοκιμές αυξάνοντας την ανά 5 °C ξαναρυθμίστηκε στους 60 °C. Διαπιστώθηκε ότι το υλικό PLA μετά τους 45 °C προσκολλάται άριστα στην τράπεζα ενώ το ABS απαιτεί θερμοκρασία 60 °C. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι το υλικό ABS είναι υψηλής θερμοκρασίας. Τέλος το πρόβλημα της πρόσφυσης αντιμετωπίστηκε με την ταχύτητα αρχικού επιπέδου στα 10 mm/s και την θερμοκρασία της τράπεζας εκτύπωσης στους 60 °C.

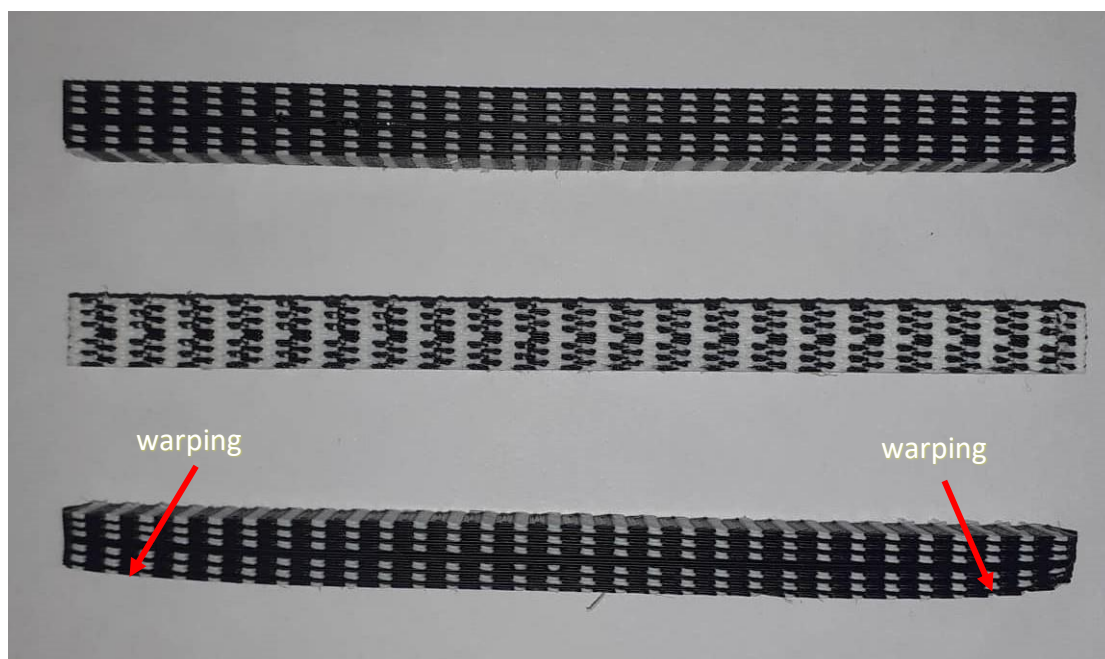
Κατά την εκτύπωση των τελευταίων επιπέδων των δοκιμών παρατηρήθηκε το φαινόμενο warping. Αναλυτικότερα το φαινόμενο αυτό συμβαίνει κατά την εκτύπωση μεγάλου μήκους δοκιμών από υλικά υψηλής θερμοκρασίας όπως το ABS, που όταν ψυχθεί συστέλλεται κατά 1,5% περίπου. Έτσι όταν τα πρώτα πέντε με δέκα επίπεδα ψυχθούν το δοκίμιο αποκολλάται από την τράπεζα και η επιφάνεια του που έρχεται σε επαφή με αυτήν αποκτά κυρτότητα. Με σκοπό την κατά ύψος ομοιόμορφη και αργή, περίπου στα πρώτα πέντε επίπεδα, ψύξη, η θερμοκρασία της τράπεζας ρυθμίστηκε στους 70 °C. Διαπιστώθηκε στα πειράματα 1 και 4, όπου το κάθε επίπεδο αποτελείται από 60% PLA, ότι το warping δεν εμφανίζεται καθόλου. Ενώ στα πειράματα 2 και 3, όπου το κάθε επίπεδο αποτελείται από 60% ABS, εμφανίζεται μικρή κυρτότητα. Για την ολοκληρωτική αντιμετώπιση του warping η θερμοκρασία της τράπεζας εκτύπωσης στα πειράματα 3 και 4 ρυθμίστηκε στους 90 °C, ταυτόχρονα στα πειράματα 1 και 4 παρέμεινε στους 70 °C.

Στις δοκιμαστικές εκτυπώσεις αλλά και κατά την διαδικασία παραγωγής των δοκιμών παρατηρήθηκε μικρή απόκλιση των κεφαλών εξώθησης υλικού ως προς τις διευθύνσεις X και Y. Ταυτόχρονα στον διαστασιολογικό έλεγχο διαπιστώθηκε ότι η τράπεζα εκτύπωσης χρειάζεται καλιμπράρισμα καθώς όλα τα δοκίμια που παράχθηκαν, στο ένα άκρο που πάρθηκε μέτρηση, παρουσιάζουν μικρή απόκλιση περίπου 0,15 mm.

Στην διαδικασία παραγωγής των δοκιμών έχει παρατηρηθεί ότι στο δοκίμιο 5 του πρώτου πειράματος και περίπου στο μισό του ύψους του υπάρχει έλλειψη υλικού σε ένα από τα επίπεδα. Το γεγονός αυτό ευθύνεται για την εξαίρεση του από τους υπολογισμούς. Ακόμα στα διαγράμματα τάσης – ανοιγμένης παραμόρφωσης φαίνεται ότι αστόχησε πολύ πριν από

τα υπόλοιπα δοκίμια. Για το σφάλμα αυτό είναι υπεύθυνη η δυσκολία τροφοδοσίας του νήματος και το πρόβλημα επιλύθηκε άμεσα αποκαθιστώντας την.

Μεγάλης σημασίας είναι η καθαριότητα του εσωτερικού του εκτυπωτή. Για την ακρίβεια, τα ακροφύσια εξώθησης υλικού είναι πολύ πιθανό να έχουν υπολείμματα μετά την εκτύπωση. Έτσι εάν δεν απομακρυνθούν, την επόμενη φορά που θα ζεσταθεί το nozzle θα λιώσουν με αποτέλεσμα να το βουλώσουν. Ένα τέτοιο περιστατικό συνέβη κατά την διάρκεια των δοκιμαστικών εκτυπώσεων. Η επαναφορά της ροής μέσα από το ακροφύσιο ήταν μια χρονοβόρα διαδικασία και επικίνδυνη για τον εξοπλισμό.



Εικόνα 81: Αποτελέσματα δοκιμαστικών εκτυπώσεων

Στην εικόνα 81 απεικονίζονται τρία δοκίμια, το πρώτο και το δεύτερο είναι μια επιτυχημένη δοκιμαστική εκτύπωση του 1^{ου} και του 3^{ου} πειράματος αντίστοιχα. Το τρίτο δοκίμιο της εικόνας είναι αποτυχημένη εκτύπωση του 1^{ου} πειράματος αφού εμφανίζει φαινόμενα warping.

8. Συμπεράσματα – Συζήτηση

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε έρευνα με σκοπό τον έλεγχο της επιρροής των παραμέτρων εκτύπωσης σε 3D printed δοκίμια. Πιο συγκεκριμένα, έγινε βιβλιογραφική έρευνα για τον προσδιορισμό των ερευνητικών κενών της τεχνολογίας FDM και ειδικότερα της εκτύπωσης διπλού υλικού. Σημαντικό μέρος της εργασίας ήταν η αναζήτηση και η επιλογή των προτύπων, για την δοκιμή κάμψης τριών σημείων εφαρμόστηκε το πρότυπο ASTM D3039 και για τους υπολογισμούς της τάσης και της ανοιγμένης παραμόρφωσης το ASTM D790. Στην συνέχεια, μετά από βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τα υλικά και τις παραμέτρους εκτύπωσης, επιλέχθηκαν τα υλικά ABS και PLA και ορίστηκαν τρεις μεταβλητές, με δύο επίπεδα η κάθε μία, βάση των οποίων προέκυψαν τα πειράματα. Ακολούθως, μέσω της μεθοδολογίας Taguchi, καθορίστηκαν τέσσερις συνδυασμοί προς εκτύπωση. Έπειτα τα δοκίμια μοντελοποιήθηκαν και εκτυπώθηκαν σε ομάδες των πέντε. Αφού έγινε διαστασιολογικός έλεγχος πραγματοποιήθηκε η δοκιμή κάμψης. Ύστερα, βάση προτύπων υπολογίστηκαν η τάση και η ανοιγμένη παραμόρφωση, από της οποίες δημιουργήθηκαν διαγράμματα $\sigma - \epsilon$ με σκοπό την εύρεση του UTS και της ανοιγμένης παραμόρφωσης στο σημείο αυτό, αλλά και την παρατήρηση της συμπεριφοράς των δοκιμίων κατά την επιβολή του φορτίου καταπόνησης. Από τα διαγράμματα εξάχθηκε και το μέσω μέτρο ελαστικότητα κάθε ομάδας δοκιμίων. Τέλος ακολούθησε σύγκριση των αποτελεσμάτων του κάθε πειράματος.

Από τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας συμπεραίνουμε τα παρακάτω:

- Κατά την διαδικασία της δοκιμής κάμψης παρατηρήθηκε ότι τα δοκίμια και των τεσσάρων πειραμάτων έχουν συμπεριφορά ομογενούς υλικού και δεν παρατηρείται αποκόλληση μεταξύ των επιπέδων. Αυτό μας δείχνει ότι οι δεσμοί μεταξύ των δύο διαφορετικών υλικών είναι ισχυροί, και παίζει σημαντικό ρόλο η παρουσία και των δύο στο ίδιο επίπεδο. Ενδεχομένως να ευθύνεται για την συμπεριφορά αυτή και η αλλαγή της γωνίας εκτύπωσης κάθε ένα η δύο επίπεδα.
- Το 2^ο πείραμα ήταν αυτό με το υψηλότερο UTS και την μικρότερη παραμόρφωση με συνδυασμό raster angle 0°/90°, εναλλαγή γωνίας BY LAYER και περιεκτικότητα 60% ABS – 40% PLA, παρουσιάζοντας μέσω UTS 31,7 MPa και ανοιγμένη παραμόρφωση 2.1 %. Όλα τα δοκίμια του συγκεκριμένου πειράματος μετά την αστοχία κατέρρευσαν απότομα και είχαν ψαθυρή συμπεριφορά, σε αντίθεση τα δοκίμια των άλλων πειραμάτων.
- Το 3^ο πείραμα ήταν αυτό με την μεγαλύτερη παραμόρφωση και το μικρότερο UTS με συνδυασμό raster angle 45°/-45°, εναλλαγή γωνίας BY BLOCK και περιεκτικότητα 60% ABS – 40% PLA, παρουσιάζοντας μέσω UTS 29,1 MPa και ανοιγμένη παραμόρφωση 3.3 %. Όλες οι καμπύλες $\sigma - \epsilon$ των δοκιμίων του συγκεκριμένου πειράματος πριν και μετά την αστοχία παρουσιάζουν διακυμάνσεις. Τα δοκίμια του έχουν ελαστική συμπεριφορά και μετά την αστοχία καταρρέουν αργά.

- Τα δοκίμια που έχουν επίπεδα με raster angle 0° , παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή όπως ήταν αναμενόμενο και από την βιβλιογραφία.
- Τα μέσα μέτρα ελαστικότητας των πειραμάτων 1,3 και 4 είναι περίπου 1700 MPa ενώ του πειράματος 2 είναι 1900 MPa. Το γεγονός αυτό ίσως συνδέεται με την ψαθυρή συμπεριφορά και την άμεση κατάρρευση, μετά την αστοχία, που παρουσιάζει το πείραμα 2 σε αντίθεση με τα άλλα τρία.
- Από την μεθοδολογία Taguchi προέκυψε ότι η εναλλαγή γωνίας εκτύπωσης BY BLOCK/BY LAYER είναι η παράμετρος που επηρεάζει περισσότερο την τιμή του UTS αλλά και της παραμόρφωσης. Η επιλογή BY LAYER παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή ενώ η BY BLOCK μεγαλύτερη ελαστικότητα. Η παράμετρος raster angle επηρεάζει πολύ λιγότερο από την προηγούμενη και στις δύο ιδιότητες. Η επιλογή $0^\circ/90^\circ$ εμφανίζει μεγαλύτερη αντοχή ενώ η $45^\circ/-45^\circ$ μεγαλύτερη ελαστικότητα. Πολύ μικρότερη επιρροή από τις άλλες παραμέτρους έχει η κατ' όγκο περιεκτικότητα σε κάθε υλικό. Η επιλογή 60% ABS – 40% PLA εμφανίζει την μεγαλύτερη ελαστικότητα ενώ η 60% PLA – 40% ABS την υψηλότερη αντοχή.
- Σύμφωνα με την μεθοδολογία Taguchi ο συνδυασμός με το υψηλότερο UTS είναι ο raster angle $0^\circ/90^\circ$, εναλλαγή γωνία εκτύπωσης BY LAYER και περιεκτικότητα 60% PLA – 40% ABS, με προβλεπόμενο UTS 32,3 MPa. Ο συγκεκριμένος συνδυασμός δεν ήταν ένας από τους τέσσερις που παράχθηκαν για το λόγο αυτό εκτυπώθηκαν τρία νέα δοκίμια και μετά από δοκιμή η προβλεπόμενη αντοχή επικυρώθηκε. Η διαφορά της ως προς το UTS με το πείραμα 2 που είχε την υψηλότερη τιμή είναι της τάξης του 2%. Για την ανοιγμένη παραμόρφωση ο βέλτιστος συνδυασμός είχε ήδη εκτυπωθεί και ήταν raster angle $45^\circ/-45^\circ$, εναλλαγή γωνίας BY BLOCK και περιεκτικότητα 60% ABS – 40% PLA, παρουσιάζοντας μέσω UTS 29,1 MPa και ανοιγμένη παραμόρφωση 3.3 %.

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας παράχθηκε όχι μόνο πληροφορία αλλά και μία βάση για περαιτέρω έρευνα γύρω από το αντικείμενο των προσθετικών κατασκευών που συγκεντρώνει το ενδιαφέρον πολλών επιστημόνων τα τελευταία χρόνια. Η γνώση γύρω από τις ιδιότητες των 3D printed προϊόντων και ειδικά της εκτύπωσης διπλού υλικού είναι ακόμα φτωχή. Έτσι η διερεύνηση και η βελτίωση τους αποτελεί μεγάλο βήμα για την εξέλιξη του τομέα. Ειδικότερα σε συνέχεια της εργασίας αυτής, θα είχε μεγάλο ενδιαφέρον ο έλεγχος της επιρροής και άλλων παραμέτρων εκτύπωσης όπως η ταχύτητα και η θερμοκρασία. Ταυτόχρονα, γνωστικό κέρδος θα είχε και η καταπόνηση δοκιμών με ίδιες παραμέτρους εκτύπωσης σε διαφορετικές μηχανικές δοκιμές όπως στρέψη, εφελκυσμό και κρούση. Σε συνδυασμό με τις παραπάνω δοκιμές θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί καταπόνηση σε περιβαλλοντικές συνθήκες (Θερμοκρασία, υγρασία). Τέλος, ο έλεγχος των κενών μεταξύ των εναποθέσεων υλικού και η παρατήρηση της ποιότητας της εναπόθεσης μέσω οπτικού μικροσκοπίου και S.E.M. θα βοηθούσε στον εντοπισμό των σφαλμάτων κατά την εκτύπωση.

9. Βιβλιογραφία

- A. Nabavi-Kivi, M. R. A. , P. R. , S. M. J. R., 2022. Investigating the effect of printing speed and mode mixity on the fracture behavior of FDM-ABS specimens.
- Aboma Wagari Gebisa, H. G. L., 2019. Influence of 3D Printing FDM Process Parameters on Tensile.
- Ali, M., 2022. On the assessment of the mechanical properties of additively manufactured lattice structures.
- Amabel García-Domínguez, J. C. M. A. S., 2019. Infill optimization for pieces obtained by 3D printing.
- Aniket Jadhav, V. S. J., 2022. A review on 3D printing: An additive manufacturing technology.
- Anketa Jandyal, I. C. I. W. A. R. P. M. I. U. H. P., 2022. 3D printing – A review of processes, materials and applications in industry 4.0.
- Ankit Sharma, A. R., 2022. Fused deposition modelling (FDM) based 3D & 4D Printing: A state of art review.
- Anoop Kumar Sood, R. O. , S. M., 2010. Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts.
- Antonio Bacciaglia, A. C. , A. L., 2022. Towards Large Parts Manufacturing in Additive Technologies for Aerospace and Automotive applications.
- Chengjun Zeng, L. L. , W. B. , J. L. , Y. L., 2021. Bending performance and failure behavior of 3D printed continuous fiber reinforced composite corrugated sandwich structures with shape memory capability.
- Chetan Y. Bachhav, P. D. S., 2022. Numerical comparison of additive manufacturing of ABS material based on infill design subjected to tensile load.
- Chih-Hsing Liu, Y. C. , S.-Y. Y., 2021. Quantification of hyperelastic material parameters for a 3D-Printed thermoplastic elastomer with different infill percentages.
- Cramer, C. L., 2022. Additive manufacturing of ceramic materials for energy applications: Road map and opportunities.
- Faisal Aqlan, C. d. V., 2020. Using 3D Printing to Teach Design and Manufacturing Concepts.
- Huan Jiang, H. Z. Z. , S. A. , Y. C., 2022. Bending behavior of 3D printed mechanically robust tubular lattice metamaterials.
- Imre Fekete, F. R. , L. ´. L., 2021. Highly toughened blends of poly(lactic acid) (PLA) and natural rubber (NR) for FDM-based 3D printing applications: The effect of composition and infill pattern.
- K.N. Gunasekaran, V. A. C. M. K. K. M. S. P. K., 2021. Investigation of mechanical properties of PLA printed materials under varying infill density.
- Khawla Essassi, J.-I. R. , A. E. M. , M. A. B. S. , A. B. , M. H., 2020.

- Lokesh N., P. B. S. R. J. V. K. V. V. S., 2022. Evaluation on effect of printing process parameter through Taguchi approach on mechanical properties of 3D printed PLA specimens using FDM at constant printing temperature.
- Luca Fontana, P. M. , L. I. , S. R. , M. S. K. , V. S., 2022. An investigation of the influence of 3d printing parameters on the tensile strength of PLA material.
- M. Heidari-Rarani, M. R.-A. A. Z., 2019. Mechanical characterization of FDM 3D printing of continuous carbon fiber reinforced PLA composites.
- Mahesh Naik, D. T. S. C., ARTICLE IN PRESS. An insight into the effect of printing orientation on tensile strength of multi-infill pattern 3D printed specimen: Experimental study.
- Manav Doshi, A. M. S. K. S. S. D., 2022. Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects.
- Marcin P. Serdeczny, R. C. , D. B. P. J. S., 2020.
- Márton Tamás Birosz, D. L. M. A., 2022. Effect of FDM infill patterns on mechanical properties.
- Md. Qamar Tanveer, G. M. S. M. R. S., 2022. Effect of infill pattern and infill density on mechanical behaviour of FDM 3D printed Parts- a current review.
- Mohammed Hikmat, S. R. , Y. M. A., 2021. Investigation of tensile property-based Taguchi method of PLA parts fabricated by FDM 3D printing technology.
- Müller, A., 2022. Progress in additive manufacturing of pure tungsten for plasma-facing component applications.
- Nichols, M. R., 2019. How does the automotive industry benefit from 3D metal printing?.
- Niranjan Kumar Choudhry, S. R. B. , B. P. , H. S., 2022. Experimental and numerical analysis of the bending behavior of 3D printed modified auxetic sandwich structures.
- Pedram Parandoush, D. L., 2017. A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites.
- Pernet, B., 2022. Compressive Strength Assessment of 3D Printing Infill Patterns.
- Pradeep Kumar Mishra, P. S. S. A. M. A., 2021. An investigation to study the combined effect of different infill pattern and infill density on the impact strength of 3D printed polylactic acid parts.
- Prairit Sharma, H. V. , R. V. , P. S. , K. M. A. , D. B., 2022. Predicting the dimensional variation of geometries produced through FDM 3D printing employing supervised machine learning.
- R. Jain, N. G., 2022. Design optimization of PLA lattice in 3D printing.
- R. Jain, N. G., 2022. Design optimization of PLA lattice in 3D printing.
- Ranvijay Kumar, N. R., 2022. Influences of infill percentage, bed temperature and outer perimeters on elongation of 3D printed nylon 6.

- Ravikumar Patel, C. D. , S. K. , M. M., 2022. A review article on FDM process parameters in 3D printing for composite materials.
- Rosalinda Ricotti, A. V. , A. B. , D. C. , F. P. , R. S. , V. S. , F. C. , G. B. , R. O. , B. A. J.-F., 2016. 3D-printed applicators for high dose rate brachytherapy: Dosimetric assessment at different infill percentage.
- Rosalinda Ricotti, D. C. , F. P. , A. B. , S. C. , R. S. , S. N. F. C. , G. B. , R. O. , A. V. , B. A. J.-F., 2017. Dosimetric characterization of 3D printed bolus at different infill percentage for external photon beam radiotherapy.
- S. Deepak Kumar, G. A. M. R. S. T., 2022. The state of art 3D printing: A case study of Ganesh Idol.
- Samiha Obeid, M. M. , S. I., 2021. Tailoring amlodipine release from 3D printed tablets: Influence of infill patterns and wall thickness.
- Samiha Obeid, M. M. , S. I., 2022. The effect of infill density on the fire properties of polylactic acid 3D printed parts: A short communication.
- Sanglae Kim, A. A. I. K. J.-H. K. J. L. , Y.-J. Y., 2022. Continuously varied infill pattern (ConVIP): improvement of mechanical properties and printing speed of fused filament fabrication (FFF) 3D printing.
- Shahrubudin, N., 2019. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications.
- Sharma, P., 2022. Predicting the dimensional variation of geometries produced through FDM 3D printing employing supervised machine learning.
- Shivani Sriya Ambati, R. A., 2022. Effect of infill density and infill pattern on the mechanical properties of 3D printed PLA parts.
- Simon Bock, T. R. , J. R. , R. S., 2022. Additive manufacturing in respiratory sciences – Current applications and future prospects.
- Szust, A. A., 2022. Using thermal annealing and salt remelting to increase tensile properties of 3D FDM prints.
- Tarunpreet Singh, S. K. S. S., 2020. 3D printing of engineering materials: A state of the art review.
- Tillmann, W., 2022. Tribo-functional PVD thin films deposited onto additively manufactured Ti6Al7Nb for biomedical applications.
- Tuan D. Ngo, A. K. , G. I. , K. T. N. , D. H., 2018. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges.
- Vaibhav Bhosale, P. G. S. D. C. S. S. J. R., 2022. Analysis of process parameters of 3D printing for surface finish, printing time and tensile strength.
- Wohlers, T., 2016. History of additive manufacturing.
- Xin Wang, M. J. , Z. Z. , J. G. , D. H., 2017. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective.

Zhiqing Hu, Z., 2022. Development of controlled release oral dosages by density gradient modification via three-dimensional (3D) printing and hot-melt extrusion (HME) technology.

