



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

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΩΝ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**

ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ: ΤΣΩΝΗΣ ΦΙΛΙΠΠΟΣ (Α.Μ. 44070)

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΣΑΓΙΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ, ΣΤΕΡΓΙΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2021



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

**DIPLOMA THESIS
COMPARATIVE STUDY ON MECHANICAL PROPERTIES OF ADDITIVE
MANUFACTURING (AM) SPECIMENTS**

STUDENT: TSONIS FILIPPOS (R.M: 44070)

SUPERVISOR NAME AND SURNAME: SAGIAS VASILEIOS, STERGIU CONSTANTINOS

ATHENS, NOVEMBER 2021



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

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΩΝ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**

ΜΕΛΗ ΖΜΕΛΟΥΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ

Στεργίου Κωνσταντίνος

Ρώσσης Κυριάκος

Σαγίας Βασίλειος

ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2021

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

ο/η

κάτωθι

υπογεγραμμένοΨη


Τσίπης Φίλιππος

του.....Αναστασίου....., με αριθμό
μητρώου.....46144070..... φοιτητήΨτρια του Πανεπιστημίου
Δυτικής Αττικής της ΣχολήςΜηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών,
δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο 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 πτυχίου μου».

Ο/Η Δηλών/ούσα



Ευρετήριο

RP Ταχεία Πρωτοτυποποίηση

CAD Σχεδίαση με τη βοήθεια υπολογιστή

CAM Κατασκευή με τη βοήθεια υπολογιστή

CNC Μηχανή αριθμητικού ελέγχου μέσω υπολογιστή

AM Τεχνολογία Προσθετικής Κατασκευής

SLA Στερεολιθογραφία

FDM Μοντελοποίηση Συντηκόμενης Εναπόθεσης

LOM Ελασματοποιημένη Κατασκευή Αντικειμένων

DED Τεχνολογίες Άμεσης Ενεργειακής Τοποθέτησης

LENS Μηχανική Ελασματοποίηση χωρίς Διαμόρφωση

EBM Τεχνολογία Τήξης με χρήση Ακτίνας Ηλεκτρονίου

3DP Τεχνολογία Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

SLS Επιλεκτική Πυροσυσσωμάτωση με Λέιζερ

ASTM Αμερικανικός Σύλλογος Ελέγχου και Υλικών

AMSC Οργανισμός Συνεργατικής Τυποποίησης των Τεχνολογιών AM

ISO Διεθνής Οργανισμός Πιστοποίησης

ASME Αμερικανική Εταιρεία Μηχανολόγων Μηχανικών

DMLS Τεχνολογία Άμεσης Σύντηξης Μετάλλου με χρήση Λέιζερ

PBF Σύντηξη Σκόνης σε Κλίνη

LENS Καθαρή Μηχανική Μορφοποίηση με χρήση Λέιζερ

Περίληψη

Στην συγκεκριμένη εργασία έγινε ανάλυση των μηχανικών ιδιοτήτων πολυμερών δοκιμίων τα οποία υποβλήθηκαν σε κάμψη μετατρέποντας συγκεκριμένες τιμές παραμέτρων κατά τη διαδικασία εκτύπωσης τους. Η δημιουργία των δοκιμίων στηρίχθηκε στην τρισδιάστατη εκτύπωση τεχνολογίας FDM (Fused Deposition Modeling) .Η συγκεκριμένη τεχνολογία στηρίζεται στην τήξη και την επιλεκτική εναπόθεση μιας λεπτής ίνας θερμοπλαστικού για τον σχηματισμό αλληπάλλληλων στρώσεων όπου και σχηματίζεται το οριστικό αντικείμενο. Ο σχεδιασμός του πειράματος (DOE) έγινε με βάση την ορθογωνική συστοιχία Taguchi. Τα δοκίμια διαμορφώθηκαν βάσει τεσσάρων παραγόντων (ταχύτητα εκτύπωσης, θερμοκρασία εξωθητή, μοτίβο γεμίσματος, τρόπος εκτύπωσης). Πρωταρχικός στόχος της εργασίας αυτής είναι η επιλογή δοκιμίου με τις βέλτιστες μηχανικές ιδιότητες αλλά και με την μικρότερη δυνατή χρήση υλικού. Για την επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού παραμέτρων και τον εντοπισμό του δοκιμίου με τις καλύτερες συνατές μηχανικές ιδιότητες απαιτήθηκαν 81 ξεχωριστοί συνδυασμοί και συγκεκριμένα από 9 δοκίμια με 4 διαφορετικές παραμέτρους και από 3 τιμές της κάθε παραμέτρος $81(3^4)$. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων έγινε με χρήση προγράμματος στατιστικής ανάλυσης και το δοκίμιο που επιλέχθηκε ως βέλτιστο είχε τη μέγιστη παραμόρφωση και τη μέγιστη αντοχή σε κάμψη τριών σημείων. Εν κατακλείδη, από την ανάλυση δεδομένων κατέστη σαφές πως κάθε παράμετρος επιδρά διαφορετικά στις μηχανικές ιδιότητες.

Abstract

In this thesis, the mechanical properties of bent polymer specimens were analyzed by converting specific parameter values during the printing process. The creation of the essays was based on the 3D printing of FDM (Fused Deposition Modeling) technology. This technology is based on the observance and selective deposition of a thin thermoplastic fiber for the formation of successive layers where the defined object is formed. The design of the experiment (DOE) was based on the rectangular Taguchi array. The specimens were formulated based on four factors (print speed, extruder temperature, filling pattern, printing method). The primary goal of the thesis is to select an essay with the best mechanical properties but also with the least possible use of material. In order to select the optimal combination of parameters and to locate the specimen with the best compatible mechanical properties, 81 separate combinations were required, namely from 9 specimens with 4 different parameters and from 3 values of each parameter $81(3^4)$. The results were compared using a statistical analysis program and the specimen selected as optimal had the maximum deformation and the maximum bending strength of three points. In conclusion, from the data analysis it became clear that each parameter affects the mechanical properties differently.

Πίνακες και Εικόνες

ΕΙΚΟΝΑ 1: DARWIN, Ο ΠΡΩΤΟΣ REPRAP ΕΚΤΥΠΩΤΗΣ DARWIN. (ALL3DP, 2016).....	17
ΕΙΚΟΝΑ 2: ΚΥΚΛΟΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ	19
ΕΙΚΟΝΑ 3: ΤΑ ΣΤΑΔΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΒΗΜΑ ΠΡΟΣ ΒΗΜΑ.	22
ΕΙΚΟΝΑ 4: ΟΠΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ: (1) ΜΟΡΦΗΣ ΑΡΧΕΙΟΥ ΑΠΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ.	23
ΕΙΚΟΝΑ 5: ΧΡΟΝΟΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΩΝ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ (TROMANS, 2013).....	27
ΕΙΚΟΝΑ 6: ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΜ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΟΥΣ ΚΛΑΔΟΥΣ ΤΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ .28	
ΕΙΚΟΝΑ 7: ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΕΡΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ ΕΝΟΣ ΚΛΑΣΙΚΟΥ VW CADDY (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ ΤΟ DRONE THOR (ΔΕΞΙΑ) ΜΕ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ.	29
ΕΙΚΟΝΑ 8: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΜ ΣΤΟΝ ΚΛΑΔΟ ΤΗΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ.....	31
ΕΙΚΟΝΑ 9: ΟΣΤΟ ΚΑΙ ΜΙΑ ΛΕΚΑΝΗ ΜΕ ΕΜΦΥΤΕΥΜΑ ΑΠΟ ΤΙΤΑΝΙΟ ΜΕ ΜΟΡΦΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΤΗΚΕ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΚΕ ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ RMIT (ΑΡΙΣΤΕΡΑ).....	32
ΕΙΚΟΝΑ 10: ΛΕΠΤΗ ΔΟΜΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΣΚΕΛΕΤΟΥ ΓΥΑΛΙΩΝ ΤΙΤΑΝΙΟ.....	33
ΕΙΚΟΝΑ 11: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΜΨΗΣ ΤΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ. (ΓΙΑΝΝΑΚΟΠΟΥΛΟΣ, 2011)	38
ΕΙΚΟΝΑ 12: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΑΜΠΤΙΚΩΝ ΡΟΠΩΝ. (ΓΙΑΝΝΑΚΟΠΟΥΛΟΣ, 2011)	39
ΕΙΚΟΝΑ 13: ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΜΕΝΟΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ	42
ΕΙΚΟΝΑ 14: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕ ΕΞΘΩΣΗ ΥΛΙΚΩΝ. (UNIVERSITY, N.D.).....	44
ΕΙΚΟΝΑ 15: ΕΠΙΛΕΚΤΙΚΗ ΠΥΡΟΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗ ΜΕ ΛΕΙΖΕΡ (SLS). (GIBSON, ET AL., 2010).....	46
ΕΙΚΟΝΑ 16: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΕΚΤΟΞΕΥΣΗΣ ΣΥΝΔΕΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ. (GIBSON, ET AL., 2010)	48
ΕΙΚΟΝΑ 17: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕ ΦΩΤΟΠΟΛΥΜΕΡΙΣΜΟ ΣΕ ΔΕΞΑΜΕΝΗ. (UNIVERSITY, N.D.)	50
ΕΙΚΟΝΑ 18: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕ ΠΙΕΣΗ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ. (UNIVERSITY, N.D.)	52
ΕΙΚΟΝΑ 19: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕ ΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΗ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. (UNIVERSITY, N.D.).....	54
ΕΙΚΟΝΑ 20: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΦΥΛΛΩΝ. (UNIVERSITY, N.D.)	56
ΕΙΚΟΝΑ 21: ΠΑΙΧΝΙΔΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ ABS.....	59
ΕΙΚΟΝΑ 22: ΜΟΡΙΑΚΗ ΔΟΜΗ ΥΛΙΚΟΥ ABS. (OMNEXUS, 2021)	60
ΕΙΚΟΝΑ 23: ΜΟΡΙΑΚΗ ΔΟΜΗ ΥΛΙΚΟΥ PLA.	62
ΕΙΚΟΝΑ 24: ΚΑΡΟΥΛΙ ΜΕ ΥΛΙΚΟ PLA ΓΙΑ ΕΚΤΥΠΩΣΗ. (CARLOTA, 2019)	64
ΕΙΚΟΝΑ 25: ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΠΟ ΥΛΙΚΟ ΝΑΥΛΟΝ.	66
ΕΙΚΟΝΑ 26: ΜΟΡΙΑΚΗ ΔΟΜΗ ΥΛΙΚΟΥ ΝΑΥΛΟΝ. (WIKIPEDIA, 2021).....	67
ΕΙΚΟΝΑ 27: ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΤΟ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ INVENTOR.	71
ΕΙΚΟΝΑ 28: ΚΟΙΝΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΑ ΓΕΜΙΣΜΑΤΑ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ (SIMMONS, 2021)	73
ΕΙΚΟΝΑ 29: ΤΡΟΠΟΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	74

ΕΙΚΟΝΑ 30:ΕΚΤΥΠΩΤΗΣ FLASHFORGE CREATOR 3. (FLASHFORGE, N.D.).....	75
ΕΙΚΟΝΑ 31:ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ.	76
ΕΙΚΟΝΑ 32:ΓΕΝΙΚΕΣ ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ FLASHPRINT	78
ΕΙΚΟΝΑ 33:ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΓΕΜΙΣΜΑΤΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ FLASHPRINT	79
ΕΙΚΟΝΑ 34:ΔΟΚΙΜΙΟ 1 ΜΕ 60% INFILL.	80
ΕΙΚΟΝΑ 35:ΔΟΚΙΜΙΟ 1 ΜΕ 15% INFILL.	82
ΕΙΚΟΝΑ 36:ΔΟΚΙΜΙΟ 2 ΜΕ 60% INFILL.	84
ΕΙΚΟΝΑ 37:ΔΟΚΙΜΙΟ 2 ΜΕ 15% INFILL.	86
ΕΙΚΟΝΑ 38:ΔΟΚΙΜΙΟ 3 ΜΕ 60% INFILL.	88
ΕΙΚΟΝΑ 39:ΔΟΚΙΜΙΟ 3 ΜΕ 15% INFILL.	90
ΕΙΚΟΝΑ 40:ΔΟΚΙΜΙΟ 4 ΜΕ 60% INFILL.	92
ΕΙΚΟΝΑ 41:ΔΟΚΙΜΙΟ 4 ΜΕ 15% INFILL.	94
ΕΙΚΟΝΑ 42:ΔΟΚΙΜΙΟ 5 ΜΕ 60% INFILL.	96
ΕΙΚΟΝΑ 43:ΔΟΚΙΜΙΟ 5 ΜΕ 15% INFILL.	98
ΕΙΚΟΝΑ 44:ΔΟΚΙΜΙΟ 6 ΜΕ 60% INFILL.	100
ΕΙΚΟΝΑ 45:ΔΟΚΙΜΙΟ 6 ΜΕ 15% INFILL.	102
ΕΙΚΟΝΑ 46:ΔΟΚΙΜΙΟ 7 ΜΕ 60% INFILL.	104
ΕΙΚΟΝΑ 47:ΔΟΚΙΜΙΟ 7 ΜΕ 15% INFILL.	106
ΕΙΚΟΝΑ 48:ΔΟΚΙΜΙΟ 8 ΜΕ 60% INFILL.	108
ΕΙΚΟΝΑ 49:ΔΟΚΙΜΙΟ 8 ΜΕ 15% INFILL.	110
ΕΙΚΟΝΑ 50:ΔΟΚΙΜΙΟ 9 ΜΕ 60% INFILL.	112
ΕΙΚΟΝΑ 51:ΔΟΚΙΜΙΟ 9 ΜΕ 15% INFILL.	114
ΕΙΚΟΝΑ 52:ΥΠΟΒΟΛΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΣΕ ΚΑΜΨΗ	116
ΕΙΚΟΝΑ 53: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ	120
ΕΙΚΟΝΑ 54: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ	120
ΕΙΚΟΝΑ 55:ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ	122
ΕΙΚΟΝΑ 56: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ	122
ΠΙΝΑΚΑΣ 1: TAGUCHI ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ	37
ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ.....	77

Περιεχόμενα

Ευρετήριο	5
Περίληψη	6
Abstract.....	7
Πίνακες και Εικόνες	8
Ιστορική αναδρομή.....	14
Θεωρητικό υπόβαθρο	17
Μελέτη της Κατασκευαστικής Διαδικασίας των Τεχνολογιών AM	21
Εισαγωγή στα Στάδια Κατασκευής των τεχνολογιών AM	21
Ανάπτυξη των σταδίων κατασκευής	24
Εφαρμογές της Τεχνολογίας Προσθετικής Κατασκευής	27
Γεωμετρία της προσθετικής κατασκευής	34
Σχεδιασμός του πειράματος	36
Κάμψη	38
Η μηχανική δοκιμή της καθαρής κάμψης	38
Τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής.....	41
Υλικά με πίεση ακροφυσίου (Material Extrusion-ME)	43
Γενικά	43
Υλικά που χρησιμοποιούνται	43
Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα	44
Διεργασία σύντηξης σε κλίνη σκόνης (Powder Bed Fusion-PBF)	45
Γενικά	45
Υλικά που χρησιμοποιούνται	45
Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα.....	46
Σύντηξη στρώματος σκόνης (Binder Jetting-BJ)	47
Γενικά	47

Υλικά που χρησιμοποιούνται	47
Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα.....	47
Φωτοπολυμερισμός σε δεξαμενή (Vat Photopolymerisation-VP).....	49
Γενικά.....	49
Υλικά που χρησιμοποιούνται	49
Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα.....	49
Εξώθηση Υλικού(Material Jetting-MJ).....	51
Γενικά.....	51
Υλικά που χρησιμοποιούνται	51
Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα.....	51
Κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας (Direct Energy Deposition-DED).....	53
Γενικά.....	53
Υλικά που χρησιμοποιούνται	53
Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα.....	54
Συγκόλληση φύλλων (Sheet Lamination)	55
Γενικά.....	55
Υλικά που χρησιμοποιούνται	55
Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα.....	56
Υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	57
ABS.....	59
Γενικά.....	59
Μοριακή δομή-Ιδιότητες υλικού.....	59
Εφαρμογές.....	60
Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα.....	61
PLA.....	62
Γενικά.....	62
Μοριακή δομή-Ιδιότητες υλικού.....	62
Εφαρμογές.....	64

Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα.....	65
Nylon.....	66
Γενικά.....	66
Μοριακή δομή-Ιδιότητες υλικού.....	66
Εφαρμογές.....	67
Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα.....	67
Πολυπροπυλένιο.....	68
HIPS.....	68
PET.....	69
Σύνθετα υλικά.....	69
Πειραματικό μέρος.....	70
Σκοπός.....	70
Μεθοδολογία.....	70
Διαδικασία πειράματος.....	71
Βήμα 1ο.....	71
Βήμα 2ο.....	71
Βήμα 3ο.....	72
Βήμα 4ο.....	74
Βήμα 5ο:.....	77
Βήμα 6ο.....	116
Εξαγωγή αποτελεσμάτων.....	117
Υπολογισμοί μετρήσεων.....	118
Αποτελέσματα προγράμματος στατιστικής ανάλυσης(Minitab).....	120
Αποτελέσματα για δοκίμια με 60% γέμισμα.....	120
Αποτελέσματα για δοκίμια με 15% γέμισμα.....	122
.....	122
Συζήτηση.....	124
Ανασκόπηση.....	124

Ανάλυση-συζήτηση.....	125
Προβλήματα που προέκυψαν	126
Μελλοντική εργασία.....	126
Επίλογος.....	126
Βιβλιογραφία.....	128

Ιστορική αναδρομή

Το 1981 μπορεί να θεωρεί ως η πρώτη φορά που κάποιος ανέφερε κάτι σχετικό με την ταχεία πρωτοτυποποίηση (Rapid Prototyping – RP) γνωστή ως σήμερα με την ονομασία προσθετική μορφοποίηση (Additive Manufacturing - AM) και στο ευρύ κοινό ως τρισδιάστατη εκτύπωση (3D

Printing – 3DP), συγκεκριμένα ο Hideo Kodama του Δημοτικού Ινστιτούτου Βιομηχανικής Έρευνας της Nagoya δημοσίευσε ένα λειτουργικό σύστημα ταχείας πρωτοτυποποίησης χρησιμοποιώντας φωτοπολυμερή. Ένα συμπαγές, τυπωμένο μοντέλο δημιουργήθηκε από στρώματα, το καθένα από τα οποία αντιστοιχούσε σε μια εγκάρσια τομή στο μοντέλο.

Τρία χρόνια αργότερα, ο Charles Hull, συνιδρυτής της εταιρείας 3D Systems, πραγματοποίησε την αρχή της τρισδιάστατης εκτύπωσης όπως την ξέρουμε σήμερα, μιας και είναι μια από τις πιο συνηθισμένες τεχνικές εκτύπωσης, επινοώντας τη στερεολιθογραφία. Η στερεολιθογραφία επιτρέπει στους σχεδιαστές να δημιουργήσουν τρισδιάστατα μοντέλα χρησιμοποιώντας ψηφιακά δεδομένα, τα οποία στη συνέχεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δημιουργήσουν ένα απτό αντικείμενο, μία από τις πιο συνηθισμένες τεχνικές εκτύπωσης 3D σήμερα.

Η μαγεία στη στερεολιθογραφία βρίσκεται στο φωτοπολυμερές το οποίο είναι ένα είδος ακρυλικού υλικού. Χτυπώντας το σε μία δεξαμενή υγρού με μια ακτίνα λέιζερ υπεριωδών ακτίνων, το εκτεθειμένο στο φως τμήμα θα μετατραπεί αμέσως σε στερεό κομμάτι πλαστικού, διαμορφωμένο στο επιθυμητό σχήμα τρισδιάστατου μοντέλου (3D). Αυτή η νέα τεχνολογία ήταν μεγάλη είδηση για τους εφευρέτες, οι οποίοι θα μπορούσαν πλέον να έχουν εύκολα στη διάθεσή τους πρωτότυπα ώστε να δοκιμάσουν σχέδια χωρίς να χρειαστεί να επενδύουν στην κατασκευή.

Ακολούθησε ο Carl Deckard καταθέτοντας μια πατέντα ευρεσιτεχνίας η οποία εκδόθηκε ύστερα από δύο χρόνια για μία μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης, την επιλεκτική σύντηξη με την χρήση ακτίνων λέιζερ (SLS) πλέον έχει γίνει η πιο δημοφιλής τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης 3D και χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών για μοντέλα και εξαρτήματα τελικής χρήσης.

Μερικά χρόνια έγινε η άφιξη της γερμανικής εταιρείας παραγωγής προσθέτων EOS GmbH. Επικεντρώθηκαν κυρίως στην τεχνολογία της επιλεκτικής σύντηξης με την χρήση ακτίνων λέιζερ (SLS) και σύντομα επινόησαν τη μέθοδο της άμεσης έγχυσης με λέιζερ (DMLS). Με το DMLS, η (SLS) θα γίνει η μόνη τεχνολογία 3D εκτύπωσης ικανή να παράγει εξολοκλήρου μεταλλικά μέρη. Αυτό επέκτεινε σημαντικά το φάσμα των εφαρμογών για τις οποίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν 3D εκτυπωτές, καθώς σύνθετα εξαρτήματα θα μπορούσαν πλέον να δημιουργηθούν από πραγματικά και ανθεκτικά μέταλλα. Την ίδια χρονιά ο Scott Crump, μαζί με τη σύζυγό του και την εφευρέτη Lisa Crump, κατέθεσε και κατοχύρωσε μια πατέντα ευρεσιτεχνίας πάνω σε μια νέα μέθοδο παρασκευής προσθέτων που ονομάζεται μοντελοποίηση με εναπόθεση τηγμένου υλικού (FDM). Αυτή η τεχνική περιλαμβάνει τήξη ενός νήματος πολυμερούς και την εναπόθεσή του πάνω σε ένα υπόστρωμα, έπειτα στρώμα με στρώμα, για να δημιουργηθεί ένα 3D αντικείμενο.

Διαδεχόμενη η εταιρία του Charles Hull δημιούργησε την πρώτη μηχανή στερεολιθογραφικών

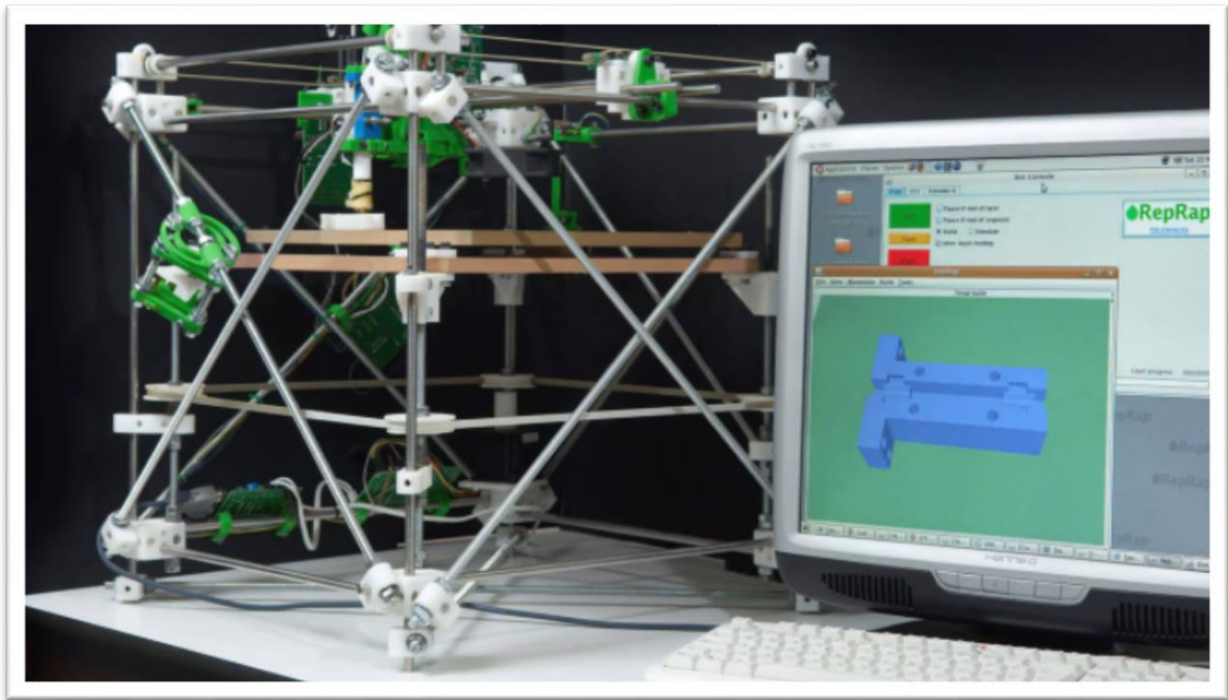
συσκευών (SLA) στον κόσμο, η οποία κατέστησε δυνατή την κατασκευή πολύπλοκων μερών, στρώμα σε στρώμα σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα. Την ίδια χρονιά, η DTM παρήγαγε την πρώτη μηχανή επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης με λέιζερ (SLS) παγκοσμίως η οποία πυροβολεί ένα λέιζερ σε σκόνη αντί για υγρό.

Όλες αυτές οι τεχνολογίες μαζί με άλλες που δημιουργήθηκαν εκείνη την περίοδο βρίσκονταν σε μικρή ηλικία και δεν ήταν τέλειες, υπήρχαν πολλοί περιορισμοί όπως στρεβλώσεις στα υλικά, απαγορευτικά δαπανηρά, αλλά το δυναμικό τους ήταν αναμφισβήτητο. Δεκαετίες αργότερα, το ιστορικό τρισδιάστατης εκτύπωσης έδειξε ότι το δυναμικό αυτό εξακολουθεί να εκτυλίσσεται. (Wikipedia, 2021)

Λίγα χρόνια μετέπειτα έγινε η πρώτη χρήση τρισδιάστατου τυπωμένου οργάνου σε χειρουργική επέμβαση σε ασθενή και αυτό γίνεται πραγματικότητα όταν μια εργαστηριακή καλλιέργεια ουροδόχου κύστης μεταμοσχεύεται με επιτυχία σε έναν ασθενή, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία που αναπτύχθηκε από το Wake Forest Institute για την Αναγεννητική Ιατρική. Συγκεκριμένα η τεχνητή κύστη δημιουργείται με τη λήψη μίας CT ανίχνευσης της ουροδόχου κύστης του ασθενούς και μετά την εκτύπωση ενός βιοαποικοδομήσιμου ικριώματος χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες στη συνέχεια εκτύπωσαν συνθετικά ικριώματα μιας ανθρώπινης ουροδόχου κύστης και στη συνέχεια επικάλυψαν με τα κύτταρα ανθρώπινων ασθενών. Ο νεοσχηματισμένος ιστός στη συνέχεια εμφυτεύτηκε στους ασθενείς, με ελάχιστη ή μηδενική πιθανότητα το ανοσοποιητικό τους σύστημα να τις απορρίψει, καθώς ήταν κατασκευασμένες από τα κύτταρα τους.

Ύστερα ο Adrian Bowyer ιδρύει το έργο RepRap, ένα έργο ανοιχτού κώδικα που στοχεύει στην κατασκευή ενός 3D εκτυπωτή που μπορεί να εκτυπώσει τα περισσότερα από τα δικά του στοιχεία, ουσιαστικά ήθελε να δημιουργήσει έναν προσιτό τρισδιάστατο εκτυπωτή που θα μπορούσε να αναδιπλασιαστεί.

Το έργο της εισαγωγής πρόσθετων υλών στο σπίτι έρχεται πραγματικά με το έργο RepRap. Ξεκίνησε το 2005, η πρωτοβουλία RepRap θέλησε να δημιουργήσει έναν προσιτό τρισδιάστατο εκτυπωτή που θα μπορούσε να αναδιπλασιαστεί. Το RepRap σημαίνει Replicated Rapid Prototyper. Με άλλα λόγια, ένας εκτυπωτής RepRap μπορεί να εκτυπώσει άλλους εκτυπωτές RepRap φέρνοντας έτσι την τρισδιάστατη εκτύπωση από το εργοστάσιο στο σπίτι. Το έργο RepRap υιοθέτησε την τεχνολογία FDM και έχει εμπνεύσει πολλούς επιτραπέζιους εκτυπωτές 3D που έχουν επίσης χρησιμοποιήσει εξώθηση. Ο σχεδιασμός του πρώτου εκτυπωτή RepRap 3D, που ονομάζεται "Darwin", κυκλοφορεί λίγα χρόνια αργότερα τον Μάρτιο του 2007 Άλλες εκδόσεις, όπως οι "Mendel", "Prusa Mendel" και "Huxley", ακολουθούν τα επόμενα χρόνια. (all3dp, 2016)



Εικόνα 1: Darwin, ο πρώτος RepRap εκτυπωτής Darwin. (all3dp, 2016)

Ένα χρόνο αργότερα η Shapeways, μια υπηρεσία εκτύπωσης 3D, κυκλοφορεί στην Ολλανδία. Όπως η RepRap, η Shapeways κάνει την τρισδιάστατη εκτύπωση διαθέσιμη σε ένα ευρύτερο κοινό. Αντί όμως να παράγουν τρισδιάστατους εκτυπωτές για το κοινό, ωστόσο, η Shapeways επιτρέπει στους χρήστες να αποστείλουν τα δικά τους 3D αρχεία, τα οποία τότε η εταιρεία εκτυπώνει και επιστρέφει.

Τα επόμενα χρόνια αναπτύσσεται περισσότερο στο κομμάτι της ιατρικής όπως προσθετικά μέλη, εμφυτεύσεις, όπως για παράδειγμα εμφύτευση τρισδιάστατης τυπωμένης κάτω σιαγόνας, ενώ παράλληλα γίνεται εκτύπωση των πρώτων αιμοφόρων αγγείων και καρδιάς προκειμένου να ενισχυθεί η δυνατότητα έρευνας.

Σημαντικό γεγονός συμβαίνει το 2009 όπου βγαίνουν για πρώτη φορά προς πώληση οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές DIY kits από την εταιρία Maker Bot Industries. Τα επόμενα χρόνια η τιμή των τρισδιάστατων εκτυπωτών πέφτει σημαντικά και έτσι ένας 3D εκτυπωτής μπορεί να βρεθεί σε κάθε σπίτι. (Matias & Rao, 2015)

Θεωρητικό υπόβαθρο

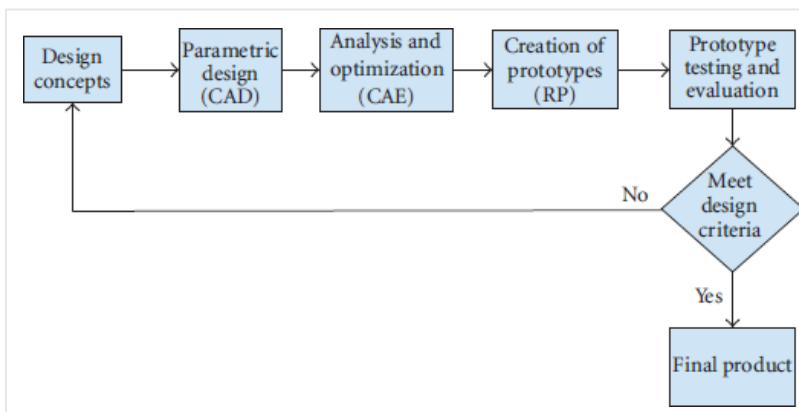
Ως Ταχεία Πρωτοτυποποίηση περιγράφεται η διαδικασία δημιουργίας ενός ολοκληρωμένου προϊόντος ή μέρος ενός συστήματος με ταχύς ρυθμούς, πριν την φάση της εμπορευματοποίησης. Μέσω μιας γρήγορης κατασκευαστικής διαδικασίας δίνεται έμφαση, είτε στην δημιουργία ενός

βασικού μοντέλου που καθίσταται ως πρωτότυπο για την γραμμή παραγωγής είτε στην δημιουργία του επιθυμητού τελικού προϊόντος με στόχο την άμεση εμπορική διάθεση. Καταλυτικός παράγοντας στην κατασκευή πρωτοτύπων αποτελεί η σχεδιαστική φάση μέσω της χρήσης λογισμικού τρισδιάστατης μοντελοποίησης. Από την σχεδίαση κάθε τεμαχίου προέρχεται ένα ψηφιακό αρχείο, το οποίο αποτελεί την βάση για το τελικό στάδιο της κατεργασίας και κατασκευής του επιθυμητού μοντέλου. (Gibson, et al., 2010)

Η Ταχεία Πρωτοτυποποίηση εμφανίστηκε ως βοηθητικό μέσω αποτύπωσης του μοντέλου και της γενικότερης σκέψης που έχουν οι μηχανικοί για αυτό που επιθυμούν να δημιουργήσουν. Ο βασικός σκοπός ανάπτυξης αυτής της τεχνολογίας αφορά στην ελαχιστοποίηση του απαιτούμενου χρόνου και κόστους της κατασκευής, στην αποδοτικότερη επικοινωνία μεταξύ των υπευθύνων κάθε έργου και γενικότερα στην δημιουργία ενός βέλτιστου κύκλου ανάπτυξης προϊόντος, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2 (Noorani, 2005) . Σημαντική είναι η ικανότητα κατασκευής οποιασδήποτε περίπλοκης μορφής αντικειμένου, γεγονός που καθιστά την ύπαρξη αυτής της τεχνολογίας σημαντική.

Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί η αδυναμία κατασκευής τεμαχίων σε πολλαπλές περιπτώσεις, όπου και θεωρείται απαραίτητη η χρήση CNC μηχανής σε κάποια φάση της κατασκευής. Μέσα από τέτοιου είδους περιπτώσεις γίνεται άμεσα αντιληπτή η σπουδαιότητα τεχνολογιών όπως είναι η σχεδίαση με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD: computer aided design), η κατασκευή με τη βοήθεια υπολογιστή (CAM: computer aided manufacturing), καθώς και η μηχανή αριθμητικού ελέγχου μέσω υπολογιστή (CNC: computer numerical control). Πρόκειται για τις τεχνολογίες, όπου συνδυαστικά αποτέλεσαν την βάση για την ανάπτυξη των τεχνολογιών με ταχεία πρωτοτυποποίηση . (Wong & Hernandez, 2012)

Στο σημείο αυτό να πούμε πως “ταχεία” πρωτοτυποποίηση δε σημαίνει “στιγμιαία” , στην πράξη, όλα σχεδόν τα αντικείμενα που κατασκευάζονται με τις μεθόδους αυτές απαιτούν τρεις έως 72 ώρες, ανάλογα με το μέγεθος και την πολυπλοκότητά τους . Επιπλέον, η τριδιάστατη εκτύπωση συνοδεύεται ακόμη από αρκετούς περιορισμούς όσον αφορά το μέγεθος των αντικειμένων που μπορούν να κατασκευαστούν και τα χρησιμοποιούμενα υλικά (η κατασκευή μεταλλικών αντικειμένων είναι σχετικά δύσκολη και ακριβή). Παρόλ’αυτά βέβαια, γίνονται πλέον μεγάλα βήματα και στην κατασκευή μεγάλων αντικειμένων κυρίως σε πιλοτική μορφή, όπως μικρές γέφυρες . (Palermo, 2015)



Εικόνα 2: Κύκλος Ανάπτυξης Προϊόντος .

Η κατασκευή προτύπων αποτελούσε πάντα μέρος της διαδικασίας σχεδίασης και ανάπτυξης ενός προϊόντος, παίζοντας σημαντικό ρόλο στην εξασφάλιση της λειτουργικότητάς του και στην ενσωμάτωση σε αυτό διαφόρων επιθυμητών χαρακτηριστικών. Οι μηχανικοί και οι σχεδιαστές που αναπτύσσουν τμήματα μηχανισμών, ή αντικείμενα πολύπλοκης μορφής, μπορούν να αποκτήσουν, να μεταφέρουν ή να εξηγήσουν σε άλλους πολύ περισσότερα στοιχεία και πληροφορίες διαθέτοντας ένα χειροπιαστό, ακριβές τριδιάστατο μοντέλο, αντί ενός σχεδίου ή μιας απεικόνισης του αντικειμένου στην οθόνη ενός υπολογιστή. Για παράδειγμα, η κατασκευή ενός ακριβούς πρωτοτύπου του εξαρτήματος κάποιου κινητήρα, επιτρέπει στους μηχανικούς να διαπιστώσουν άμεσα αν το συγκεκριμένο τμήμα ταιριάζει από την άποψη των διαστάσεων και της μορφής του με το υπόλοιπο λειτουργικό σύνολο. Κατ' ανάλογο τρόπο, οι υπεύθυνοι της προώθησης στην αγορά ενός καταναλωτικού προϊόντος μπορούν, έχοντας στα χέρια τους ένα ακριβές πρωτότυπο του αντικειμένου που προτείνει το σχεδιαστικό τμήμα, να διαπιστώσουν εύκολα και έγκαιρα εάν αυτό έχει τις επιθυμητές αναλογίες, το σχήμα ή τα άλλα χαρακτηριστικά που απαιτεί το κοινό στο οποίο απευθύνεται.

Η ανάπτυξη των μηχανών τριδιάστατης εκτύπωσης, αποτέλεσε το καθοριστικό σημείο τομής με το παρελθόν. Οι νέες μηχανές επέτρεψαν την κατασκευή πρωτοτύπων ή αντιγράφων ακριβείας, απευθείας από ψηφιακά μοντέλα των αντικειμένων δημιουργημένα με τη χρήση λογισμικού CAD (Computer Aided Design) , με μικρότερο κόστος και μέσα σε διάστημα ωρών αντί των εβδομάδων ή των μηνών που απαιτούσαν οι παλαιότερες διαδικασίες.

Η δραστική μείωση του χρόνου και του κόστους κατασκευής των πρωτοτύπων, βελτιστοποιεί τη διαδικασία της ανάπτυξης ενός προϊόντος, παρέχοντας στους κατασκευαστές τη χρονική άνεση να

τελειοποιήσουν τα προϊόντα τους στο πιο κρίσιμο στάδιο της ανάπτυξής τους, αυτό της βασικής σχεδίασης, με αποτέλεσμα να φθάνουν στην αγορά ολοκληρωμένα, ταχύτερα και με μικρότερο κόστος. (Amato, 2003)

Η τεχνολογία αυτή έχει αναπτυχθεί μέσω ποικίλων διαφορετικών διαδικασιών, κυρίως όσον αφορά στους τρόπους και τα μέσα κατεργασίας. Σε κάθε φάση εξέλιξης των διαφόρων τεχνολογιών με στόχο την βέλτιστη κατασκευαστική δημιουργία, δινόταν έμφαση στην μείωση του κόστους, της κατανάλωσης ενέργειας καθώς και στο αποτύπωμα του διοξειδίου του άνθρακα. Η χρησιμότητα, η γεωμετρική πολυπλοκότητα, η ακρίβεια και η ταχύτητα αποτελούσαν πάντα κύριο παράγοντα ανάγκης για βελτιστοποίηση της τρέχουσας κατασκευαστικής διαδικασίας. (Herderick, 2011)

Μελέτη της Κατασκευαστικής Διαδικασίας των Τεχνολογιών AM

Εισαγωγή στα Στάδια Κατασκευής των τεχνολογιών AM

Η τεχνολογία Προσθετικής Κατασκευής έχει αναπτυχθεί στηριζόμενη στην συνεχή βελτίωση τόσο της ποιότητας των υλικών όσο και της ακρίβειας του τελικού προϊόντος. Το μοντέλο που δημιουργείται παρέχει πληροφορίες στον υπεύθυνο της κατασκευής για το Σχήμα (Form), την Εφαρμογή (Fit) και την Λειτουργία (Function), γεγονός που προσδιορίζεται στον βιομηχανικό κλάδο με τον όρο “3 Fs”. Για την ολοκληρωμένη δημιουργία ενός μοντέλου δρομολογούνται μια σειρά από ενέργειες. Αυτή που καθίσταται ως βασική σε κάθε διαδικασία είναι η επιλογή της μηχανής, αφού διαμορφώνει σε μεγάλο βαθμό την επιτυχή έκβαση της κατασκευαστικής διαδικασίας και κατ’ επέκταση τον υψηλό βαθμό ποιότητας. (Gibson, et al., 2010)

Στο αρχικό στάδιο της προετοιμασίας κάθε κατεργασίας είναι αναγκαίο να μελετηθεί η τεχνολογία AM που θα χρησιμοποιηθεί, αφού κάθε μοντέλο απαιτεί την χρήση διαφορετικών μέσων κατεργασίας. Για παράδειγμα, για μικρά και σχετικά απλά προϊόντα, μπορεί να γίνει χρήση τεχνολογιών AM μόνο για οπτικοποίηση των μοντέλων, ενώ για μεγαλύτερα και πιο σύνθετα προϊόντα μπορεί να χρησιμοποιηθούν τεχνολογίες AM σε διαφορετικά στάδια κατά την διαδικασία ανάπτυξης του τελικού προϊόντος. Επιπρόσθετα, σε περίπτωση που στα πρώτα στάδια της διαδικασίας ανάπτυξης του προϊόντος απαιτείται υψηλή τραχύτητα, γίνεται χρήση AM με βάση την ταχύτητα με την οποία μπορούν να κατασκευαστούν τα αντικείμενα. Σε κατοπινά στάδια της διαδικασίας, τα μέρη μπορεί να απαιτούν προσεκτικό καθαρισμό και περισσότερη επεξεργασία πριν να χρησιμοποιηθούν (όπως λείανση, προετοιμασία της επιφάνειας, βαφή). Σε αυτές τις περιπτώσεις οι τεχνολογίες αυτές είναι χρήσιμες λόγω της ευκολίας κατασκευής αντικειμένων πολύπλοκης γεωμετρίας χωρίς να απαιτούνται εξειδικευμένα εργαλεία και εξοπλισμός. (Κωστάκης, 2017)

Επιγραμματικά, όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 3, τα στάδια που ακολουθούνται για την δημιουργία ενός μοντέλου μέσω της τεχνολογίας AM είναι τα παρακάτω:

1.	Σχεδίαση CAD (CAD Design)
2.	Δημιουργία αρχείου .STL (STL convert)
3.	Μεταφορά αρχείου .STL στην μηχανή AM (File transfer to machine)
4.	Ρύθμιση Μηχανής AM (Machine setup)
5.	Κατασκευή (Build)
6.	Απομάκρυνση Αντικειμένου (Remove)
7.	Επακόλουθη επεξεργασία (Post-process)
8.	Εφαρμογή (Application)

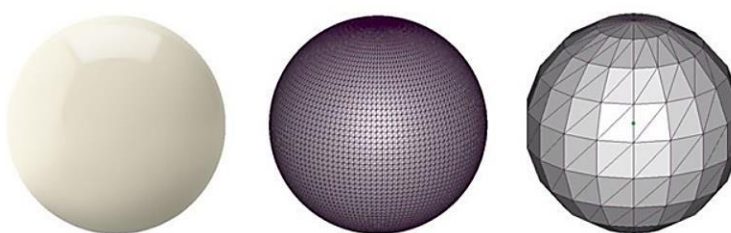


Εικόνα 3: Τα στάδια κατασκευής βήμα προς βήμα.

Παρατηρώντας τα στάδια της διαδικασίας και συγκρίνοντάς τα με τις συμβατικές μεθόδους κατεργασίας, γίνεται εμφανής η σπουδαιότητα της δημιουργίας .STL αρχείου αμέσως μετά την σχεδιαστική διαδικασία μέσω CAD συστήματος. Πρόκειται για ένα αρχείο που δημιουργήθηκε το 1987 από την εταιρία 3D Systems Inc., η οποία έθεσε και τις βάσεις για την εξέλιξη της πρώτης μεθόδου ταχεία πρωτοτυποποίησης, της Στερεολιθογραφίας (STereoLithography). Μέσω αυτής της μεθόδου τέθηκαν οι βάσεις και αποδόθηκε η ονομασία αυτή στο σχετικό αρχείο, ενώ πολλοί ειδικοί χρησιμοποιούν και τον όρο “Πρότυπη Γλώσσα Δημιουργίας Προκαθορισμένου Σχεδίου μέσω Επαναλαμβανόμενης Διαδικασίας με Διάταξη Μορφών Στενά Τοποθετημένων μαζί, χωρίς Κενά ή Αλληλοεπικαλύψεις” (Standard Tessellation Language). Μέσω της διαδικασίας δημιουργίας ενός αρχείου STL μετατρέπεται κυρίως η συνεχής γεωμετρία του μοντέλου στο αρχείο CAD σε μια κεφαλίδα, μικρά τρίγωνα, ή συντονίζεται ή τριπλή λίστα των συντεταγμένων x, y και z και αποδίδεται το κανονικό διάνυσμα στα τρίγωνα. (Wong & Hernadez, 2012)

Ουσιαστικά, προσεγγίζεται η επιφάνεια του μοντέλου μέσα από μια σειρά διαδοχικών τριγώνων. Το μέγεθος του κάθε τριγώνου υπολογίζεται στην πραγματικότητα με βάση την ελάχιστη απόσταση μεταξύ του επιπέδου που αντιπροσωπεύει το τρίγωνο και της επιφάνειας. Με άλλα λόγια, ένας βασικός εμπειρικός κανόνας είναι να διασφαλιστεί ότι η μετατόπιση του ελάχιστου τριγώνου που θα σχηματιστεί, είναι μικρότερη από την ανάλυση της μηχανής AM που θα χρησιμοποιηθεί. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η διαδικασία μετατροπής ενός αρχείου τρισδιάστατης σχεδίασης σε .STL είναι αυτόματη στα περισσότερα συστήματα CAD, με υπαρκτή, όμως, την πιθανότητα να προκύψουν σφάλματα κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης. Για αυτό το

λόγο, έχει αναπτυχθεί ένα πλήθος εργαλείων λογισμικού για την ανίχνευση τέτοιων σφαλμάτων και τη διόρθωσή τους στην περίπτωση που αυτή επιτυγχάνεται. Αυτό που καθίσταται δύσκολο μέσα από το αρχείο .STL, είναι η αδυναμία προσέγγισης διαφορών πληροφοριών που αφορούν το μοντέλο, όπως είναι το χρώμα, το υλικό, οι διαστάσεις και κάποια γενικότερα χαρακτηριστικά. Αυτοί οι περιορισμοί, έχουν οδηγήσει στην υιοθέτηση μιας νέας μορφής αρχείου, την AMF, η οποία έχει πιστοποιηθεί από την διεθνή κοινότητα. (Gibson, et al., 2010)



(1)

(2)

(3)

Εικόνα 4: Οπτική Αναπαράσταση: (1) Μορφής αρχείου από λογισμικό τρισδιάστατης μοντελοποίησης.

(2) Μορφής αρχείου .STL υψηλής ανάλυσης, (3) Μορφής αρχείου .STL χαμηλότερης ανάλυσης.

Ανάπτυξη των σταδίων κατασκευής

Το πρώτο στάδιο σε κάθε κατασκευαστική διαδικασία αφορά στην σύλληψη της ιδέας και στην παράθεση του στόχου της εκάστοτε κατασκευής. Μελετάται η λειτουργικότητα του, η εμφάνιση του και ουσιαστικά δημιουργείται ένα αντιπροσωπευτικό μοντέλο με βάση την ιδέα που προϋπάρχει. Στις περιπτώσεις των τεχνολογιών AM κρίνεται απαραίτητη η ψηφιοποίηση του φυσικού μοντέλου, σε μορφή συμβατή με τις απαιτήσεις των συστημάτων των συγκεκριμένων τεχνολογιών. Αυτό πραγματοποιείται με την χρήση των λογισμικών συστημάτων τρισδιάστατης μοντελοποίησης CAD, όπου γίνεται ακριβής απεικόνιση του μοντέλου. Υπάρχουν μια πληθώρα τρόπων με τους οποίους επιτυγχάνεται η ψηφιακή τρισδιάστατη απεικόνιση. Συγκεκριμένα, ένας έμπειρος σχεδιαστής τρισδιάστατων μερών μπορεί να αποδώσει με ακρίβεια το προς κατασκευή μοντέλο. Επίσης ένα λογισμικό ως μέρος ενός αυτοματοποιημένου αλγορίθμου βελτιστοποίησης, η χρήση εξοπλισμού αναστροφής μηχανικής για την σάρωση ενός ήδη υφιστάμενου τεμαχίου με χρήση τρισδιάστατου σαρωτή (3D scanning) ή ο συνδυασμός όλων, μπορούν να δημιουργήσουν την ψηφιακή μορφή που επιθυμεί ο κατασκευαστής. Τα περισσότερα σύγχρονα εργαλεία CAD μοντελοποίησης μπορούν να αποδώσουν ξεκάθαρες γεωμετρικές αναπαραστάσεις ενός τμήματος. Ουσιαστικά, αυτό το στάδιο είναι το θεμέλιο για την πραγματοποίηση των επακόλουθων σταδίων.

Η δημιουργία .STL αρχείου ή και άλλων πανομοιότυπων μορφών, όπως περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα, πραγματοποιείται από το ήδη υπάρχων CAD αρχείο. Σχεδόν όλα τα μηχανήματα προσθετικής προσέγγισης δέχονται αρχεία αυτής της μορφής, όπου τα αποκωδικοποιούν με βάση το λειτουργικό σύστημα τους για να πραγματοποιηθεί η κατασκευή. Παράλληλα σχεδόν όλα τα συστήματα CAD μπορούν να εξαγάγουν αυτά τα αρχεία. Η κρισιμότητα αυτού του αρχείου έγκειται στην ικανότητα περιγραφής της κλειστής εξωτερικής επιφάνειας του πρωτότυπου μοντέλου CAD και στην δημιουργία της βάσης για το σχηματισμό των τομών.

Σε επόμενο στάδιο, θεωρείται τελειοποιημένη η δημιουργία και η επιδιόρθωση του αρχείου .STL, ώστε να σταλεί αμέσως στο μηχάνημα AM. Σε αυτή τη φάση πρέπει να ελεγχθούν κάποιες σημαντικές λεπτομέρειες, όπως η επαλήθευση της ορθής απεικόνισης και τοποθέτησης του μέρους, γεγονός που μπορεί να επιτευχθεί μέσα από τα εργαλεία οπτικής παρακολούθησης και χειρισμού που διαθέτουν τα μηχανήματα AM. Πρακτικά ελέγχονται θέματα τοποθέτησης, προσανατολισμού, μεγέθους και λεπτομέρειες που σχετίζονται με την λειτουργία του εκάστοτε μηχανήματος.

Στο στάδιο της ρύθμισης της μηχανής λαμβάνονται υπόψιν μια σειρά παραμέτρων ελέγχων, που

διαφοροποιούνται σε κάθε κατασκευή και σχετίζονται κατά κύριο λόγο με την ποιότητα του προς κατασκευή μέρους. Ελέγχεται το πάχος κάθε στρώσης, οι κατασκευαστικοί παράμετροι ανάλογα με την πρώτη ύλη που θα χρησιμοποιηθεί, καθώς και ο χρόνος κατασκευής, ο οποίος επηρεάζεται από ένα σύνολο παραγόντων. Λανθασμένες ρυθμίσεις μπορούν να επιφέρουν κακό ποιοτικό αποτέλεσμα. Επιπρόσθετα, κρίνεται απαραίτητος ο έλεγχος της ποσότητας της πρώτης ύλης και της ορθής λειτουργίας των εξαρτημάτων κάθε μηχανήματος, όπως της πλάκας κατασκευής (build plate). Πολλές φορές πρόκειται για αυτοματοποιημένες διαδικασίες κατά την εκκίνηση της κατασκευής, αλλά στην πλειονότητα των περιπτώσεων κρίνεται απαραίτητος ο χειροκίνητος έλεγχος από τον εκάστοτε χειριστή.

Η φάση της κατασκευής εξαρτάται ολοκληρωτικά από τον υπολογιστή. Πρόκειται για την διαδικασία της στρωματοποίησης, δηλαδή της δημιουργίας των διαδοχικών στρώσεων. Σε αυτή την διαδικασία, αφού έχουν ελεγχθεί ο μηχανισμός εναπόθεσης της πρώτης ύλης, το ύψος της βάσης τοποθέτησης και κατασκευής του μέρους, καθώς και η κεφαλή του εργαλείου που θα προκαλέσει την απόθεση, πραγματοποιείται η κατασκευή. Σε κάποιες μηχανές πραγματοποιούνται ταυτόχρονα η εναπόθεση της πρώτης ύλης και η στρωματοποίηση, ενώ σε κάποιες άλλες γίνονται ξεχωριστά. Όσο δεν εμφανίζονται σφάλματα, η κατασκευή θα συνεχίζει να εκτυλίσσεται μέχρι να ολοκληρωθεί.

Μετά το πέρας της κατασκευαστικής φάσης, ιδανικά το μέρος πρέπει να είναι έτοιμο για άμεση χρήση χωρίς την ανάγκη επακόλουθης παρέμβασης, γεγονός το οποίο δεν συμβαίνει συχνά. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία της κατασκευής, το τεμάχιο είτε απομακρύνεται από την πλατφόρμα που είναι τοποθετημένο είτε αφαιρείται από το πλεονάζον υλικό που το περιβάλλει. Σε αυτό το στάδιο της απομάκρυνσης του αντικειμένου, απαιτείται αρκετή χειρωνακτική εργασία και θεωρείται κρίσιμη η διαχείρισή του από έμπειρους χειριστές ώστε να μην προκληθούν ζημιές κυρίως στην εξωτερική επιφάνεια του μέρους. Σε πολλές περιπτώσεις θεωρείται στάδιο πρώιμης επεξεργασίας μετά την κατασκευή, ενώ ακολουθεί η μετέπειτα επεξεργασία.

Το στάδιο της επακόλουθης επεξεργασίας, αναφέρεται κυρίως στην χειροκίνητη επεξεργασία που δέχεται το κατασκευασμένο μέρος ώστε να φτάσει στην τελική και επιθυμητή μορφή. Πρόκειται για μια διαδικασία που απαιτεί λεπτό χειρισμό ανάλογα με την ευαισθησία του μέρους και μελέτη του κατάλληλου τρόπου επεξεργασίας, όπως το γυάλισμα ή η αφαίρεση στιγμάτων. Μπορεί να απαιτηθεί χημική ή θερμική επεξεργασία, πάντα με προσοχή να μην προκληθεί αλλοίωση στην ποιότητα της υπάρχουσας κατασκευής. Ουσιαστικά ολοκληρώνεται η κατασκευή με την διόρθωση κάποιων λεπτομερειών.

Όσον αφορά το τελευταίο στάδιο, το κατασκευασμένο μέρος είναι έτοιμο για χρήση. Πολλές

φορές το κατασκευασμένο μέρος αποτελεί στοιχείο μιας μεγαλύτερης κατασκευής και χρειάζεται να συνδεθεί με άλλα μηχανικά ή ηλεκτρονικά εξαρτήματα για να ολοκληρωθεί η αρχική κατασκευή. (Gibson, et al., 2010) (Κωστάκης, 2017)

Εφαρμογές της Τεχνολογίας Προσθετικής Κατασκευής

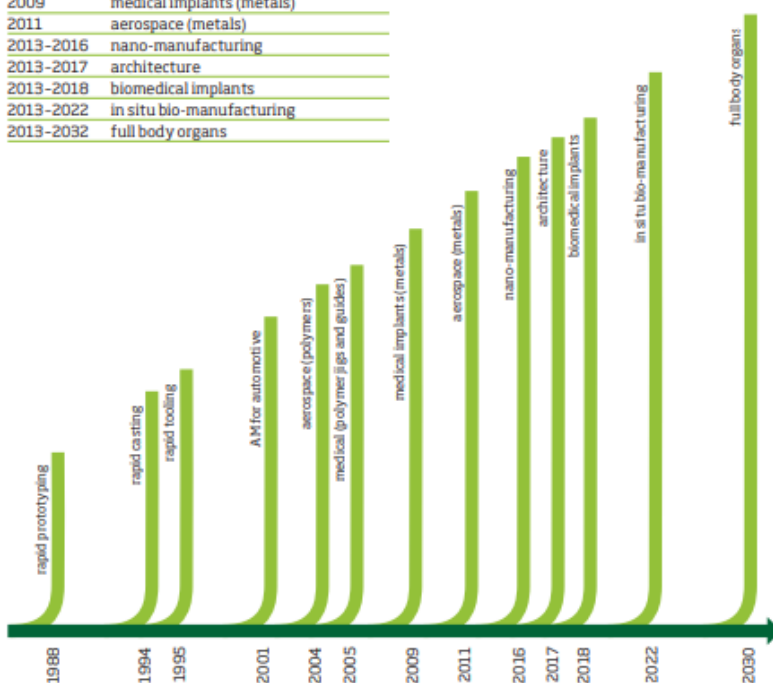
Σκεπτόμενοι ότι ένα πεδίο εφαρμογών στον τομέα της τεχνολογίας ορίζει τις βάσεις του από τα πρώιμα ερευνητικά στάδια, οι δραστηριότητες γύρω από την τεχνολογία της Προσθετικής Κατασκευής πραγματοποιήθηκαν τις δεκαετίες 1950-1960, με τις πρώτες επιτυχημένες ευρεσιτεχνίες να δημιουργούνται την δεκαετία του 1980. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι οι δράσεις γύρω από τον συγκεκριμένο τομέα πραγματοποιούνταν παράλληλα στην Αμερική, στην Ιαπωνία και στην Γαλλία. Καταλυτικό ρόλο κατείχε η ευρεσιτεχνία του Charles Hull το 1983. Πρόκειται για την άμεση ισχυροποίηση της τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης μέσω της εμπορικής διάθεσης που πραγματοποίησε για πρώτη φορά η εταιρία 3D Systems. Ακολούθως, ένα σημαντικό ποσοστό εταιριών σε όλο τον κόσμο επέλεξε να δραστηριοποιηθεί σε αυτό τον τομέα, με την Γερμανική εταιρία EOS και την Ισραηλινή Cubital να αποκτούν σημαντικό προβάδισμα μέσω των εξελικτικών και καινοτόμων μεθόδων που εφάρμοσαν . (Gibson, et al., 2010)

AM applications timeline

This timeline lays out past, present and potential future AM developments and applications.

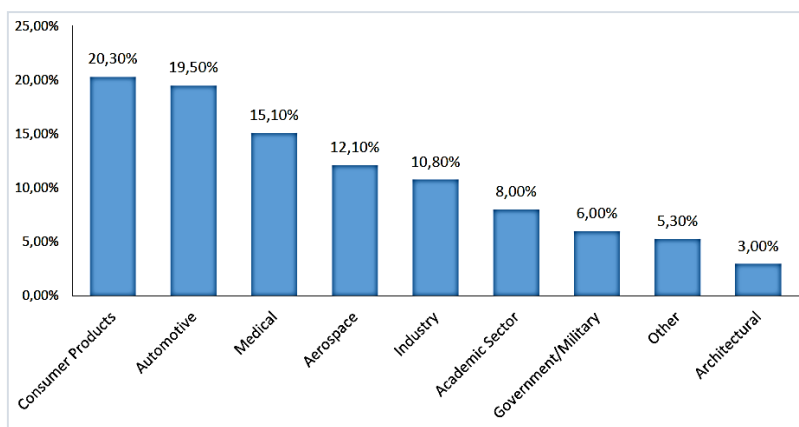
(courtesy of Graham Tromans)

1988-1994	rapid prototyping
1994	rapid casting
1995	rapid tooling
2001	AM for automotive
2004	aerospace (polymers)
2005	medical (polymer jigs and guides)
2009	medical implants (metals)
2011	aerospace (metals)
2013-2016	nano-manufacturing
2013-2017	architecture
2013-2018	biomedical implants
2013-2022	in situ bio-manufacturing
2013-2032	full body organs



Εικόνα 5: Χρονοδιάγραμμα δυνατότητας και εξέλιξης των εφαρμογών των προσθετικών κατασκευών (Tromans, 2013).

Η τεχνολογίες AM ξεπερνούν τα κατασκευαστικά όρια που επιβάλλονται από τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής. Λειτουργικά στοιχεία με σύνθετες γεωμετρίες και καθορισμένες αεροδυναμικές ιδιότητες μπορούν να κατασκευαστούν γρήγορα και οικονομικά. Επιτρέπεται η παραγωγή πλέγματος δομών με χαμηλή πυκνότητα, υψηλή αντοχή, καλή απορρόφηση ενέργειας και θερμικές ιδιότητες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές όπως οι εναλλάκτες θερμότητας στις αεροδιαστημικές και ηλεκτρονικές βιομηχανίες, καθώς και στις αυτοκινητοβιομηχανίες. Επιπρόσθετα μπορεί να αυξηθεί η αποδοτικότητα των διαδικασιών R&D, επιτρέποντάς την ταχύτερη διάθεση των προϊόντων στην αγορά και αποφεύγοντας την ανάγκη για αποθήκευση. (Παπαγεωργίου, 2016)

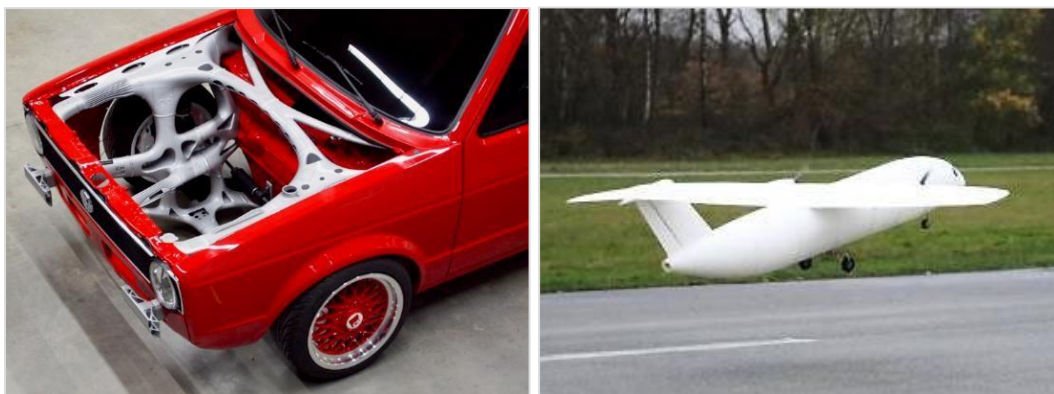


Εικόνα 6: Κατανομή εφαρμογών των τεχνολογιών AM σε διάφορους κλάδους της βιομηχανίας.

Τρεις από τα ταχύτερα αναπτυσσόμενα πεδία για τις προσθετικές κατασκευές είναι η ιατρική, οδοντιατρική, αυτοκινητοβιομηχανία και οι αεροδιαστημικοί τομείς. Η επιτυχία της προσθετικής κατασκευής στον βιοϊατρικό τομέα στηρίζεται στην ικανότητα της να δημιουργεί εξατομικευμένα εμφυτεύματα, αντικατάσταση ιστών και περίπλοκα μέρη του σώματος συμπεριλαμβανόμενα και τα αγγεία αυτού. Η ανάπτυξη στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας «είναι μέρος της αναγέννησης της βρετανικής αυτοκινητοβιομηχανίας», είπε ο Peter Marsh συγγραφέας και δημοσιογράφος κατασκευών. (Tromans, 2013)

Εστιάζοντας στους διάφορους κατασκευαστικούς τομείς, μια σημαντική εφαρμογή παρατηρείται στην δυνατότητα κατασκευής ελαφρών μηχανισμών (lightweight machines). Τόσο στον κλάδο της αυτοκινητοβιομηχανίας όσο και σε αυτόν της αεροδιαστημικής, ο κύριος στόχος είναι να σχεδιαστεί το πιο ελαφρύ πρακτικό αυτοκίνητο ή αεροσκάφος διατηρώντας τα επίπεδα ασφάλειας και ποιότητας. Μέσω των τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής έγινε εφικτή η δημιουργία σύνθετων περιοχών διατομής όπως το κυψελοειδές κύτταρο ή κάθε άλλο υλικό μέρος που περιέχει κοιλότητες και εγκοπές, οι οποίες μειώνουν τη σχέση βάρους- αντοχής.

Οι SLS και EBM μέθοδοι αξιοποιούνται από τις αεροναυπηγικές και τις αεροδιαστημικές βιομηχανίες, με τους μηχανικούς να έχουν την δυνατότητα εκτέλεσης σχεδιαστικών μοντέλων εντός των κατασκευαστικών περιορισμών, σε συνδυασμό με την δυνατότητα αξιοποίησης ενός διευρυμένου φάσματος επιλογών.



Εικόνα 7: Κατασκευή μερών εσωτερικής δομής ενός κλασικού VW Caddy (αριστερά) και το drone THOR (δεξιά) με τρισδιάστατη εκτύπωση.

Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 7, καθώς το εμπρόσθιο μέρος της εσωτερικής δομής του κλασικού VW Caddy περιελάμβανε παθητική ψύξη (passive cooling), σχεδιάστηκαν κανάλια αέρα για να ψύχουν τις μπαταρίες και τα συστήματα πέδησης (braking systems). Επιπλέον ενσωματώθηκαν χαρακτηριστικά ασφάλειας, αποθήκες ρευστών και λειτουργίες που σχετίζονται με την διαχείριση της θερμότητας. Στον τομέα της αεροδιαστημικής, η εταιρία Airbus παρουσίασε το drone THOR (Test of High-Tech Objectives in Reality) στην Διεθνή έκθεση Αεροδιαστημικής το 2016 στο Βερολίνο. Αυτό το γεγονός αποτέλεσε την αρχή μιας σειράς εφαρμογών βασισμένες στην τρισδιάστατη εκτύπωση. (Katoch, 2017)

Ακολούθως, στον κλάδο της αεροναυπηγικής έχουν ήδη δημιουργηθεί λειτουργικά μέρη από την αξιοποίηση των τεχνολογιών AM. Η GE αεροπορία σχεδιάζει έναν καινούργιο κινητήρα αεροσκάφους, ο οποίος θα περιλαμβάνει κρίσιμα μεταλλικά μέρη κατασκευασμένα με την προσθετική προσέγγιση, έχοντας ως στόχο την εξοικονόμηση του βάρους, την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού, της αξιοπιστίας και του συνολικού κόστους. Αντιστοίχως, η Boeing χρησιμοποιεί τις τεχνολογίες αυτές πάνω από μια δεκαετία, για την παραγωγή αγωγών (ducts) και ηλεκτρονικών καλυμμάτων. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι σήμερα, χρησιμοποιεί την προσθετική μέθοδο για την δημιουργία περισσότερων από 20.000 διαφορετικών μερών σε περισσότερα από 10 στρατιωτικά και εμπορικά αεροσκάφη.

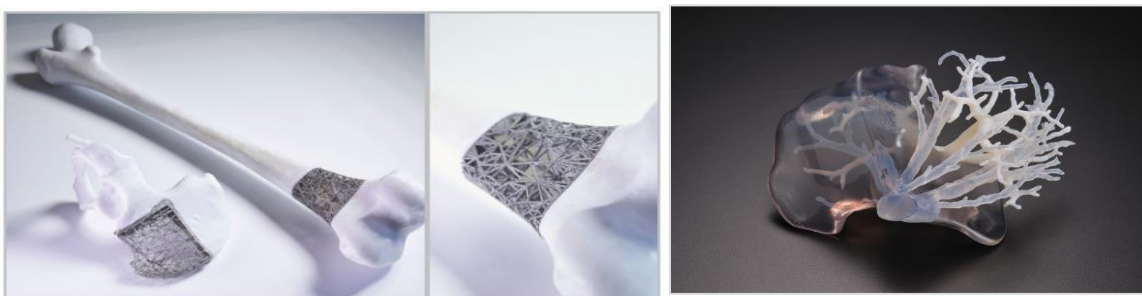
Ένας άλλος τομέας στον οποίο η συμβολή αυτών των τεχνολογικών μεθόδων κρίνεται σπουδαία, είναι ο Αρχιτεκτονικός και ο Αστικός Σχεδιασμός (Architectural Modeling, Civil Construction). Η δημιουργία φυσικών μοντέλων καθίσταται πολύ σημαντική στους τομείς αυτούς, κυρίως για την μελέτη της λειτουργικότητας των χώρων που δημιουργούν και της συνολικής εικόνας που θα παρουσιαστεί στους πελάτες. Η διαδικασία αυτή απλουστεύεται με την δημιουργία των μοντέλων μέσω των τεχνολογιών αυτών. Αυτό που παρατηρείται έντονα είναι η μείωση του συνολικού βάρους του μοντέλου και η δυνατότητα δημιουργίας πολύ πολύπλοκων κατασκευών. Μέσω της μεθόδου της Στερεολιθογραφίας (SLA), οι μηχανικοί αποκτούν το μοντέλο που έχουν σχεδιάσει ψηφιακά με υψηλή ανάλυση εκτύπωσης και πολύ καλή ποιότητα πρώτης ύλης.



Εικόνα 8: Εφαρμογή των τεχνολογιών AM στον κλάδο της αρχιτεκτονικής.

Καταλυτική είναι η αξιοποίηση αυτών των τεχνολογιών από τον Ιατρικό κλάδο. Μια από τις πιο σημαντικές εφαρμογές είναι η δημιουργία οστών για την διαδικασία της μεταμόσχευσης των οστών (bone transplants) και της δημιουργίας οστών προς επιδιόρθωση. Μέσα από μια διαδικασία ανάλυσης της περίπτωσης κάθε ασθενή, οι τεχνολογίες AM επιτρέπουν την σάρωση (scanning) και την κατασκευή ενός ελαττωματικού οστού, δίνοντας την δυνατότητα στον γιατρό να μελετήσει ευκολότερα την μέθοδο που πρέπει να ακολουθήσει. Κατασκευάζοντας ένα οστό με αυτές τις διαδικασίες δεν υπάρχει μόνο λεπτομερής απόδοση στο τελικό αποτέλεσμα, αλλά και καλύτερος συνδυασμός κόστους-χρόνου.

Λόγω της απεριόριστης μορφής ή του σχήματος που θα μπορούσε να κατασκευαστεί, οι γιατροί έχουν την επιλογή να δημιουργήσουν ένα πορώδες ελεγχόμενο υλικό που θα επιτρέπει την οστό-αγωγιμότητα ή τη δημιουργία ενός όμοιου με το πρωτότυπο μεταμόσχευμα από μέταλλο, ανάλογα με το προς αντικατάσταση οστό. Χαρακτηριστικά των μοσχευμάτων όπως η πυκνότητα, το σχήμα και το μέγεθος των πόρων και η διασύνδεση των πόρων είναι σημαντικές παράμετροι που θα επηρεάσουν την ανάπτυξη των ιστών και τις μηχανικές ιδιότητες του εμφυτευμένου οστού. Η μηχανική αντοχή αυτών των εμφυτευμάτων είναι τρεις έως πέντε φορές υψηλότερη σε σύγκριση με τις άλλες διεργασίες, καθώς επίσης μειώνεται η πιθανότητα φλεγμονής που προκαλείται από μικροθραύσματα που διασπώνται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. (Wong & Hernandez, 2012)



Εικόνα 9: Οστό και μια λεκάνη με εμφύτευμα από τιτάνιο με μορφή πλέγματος που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στο Κέντρο RMIT (αριστερά).

Τα μοντέλα AM έχουν χρησιμοποιηθεί για ιατρικές εφαρμογές σχεδόν από την αρχή, όταν η τεχνολογία αυτή εμπορευματοποιήθηκε για πρώτη φορά. Η AM δεν θα μπορούσε να υπάρξει πριν 3D CAD, δεδομένου ότι η τεχνολογία είναι ψηφιακά καθοδηγούμενη. Υπολογιστική τομογραφία (CT) ήταν επίσης μια τεχνολογία που αναπτύχθηκε παράλληλα με τις τεχνικές τρισδιάστατης αναπαράστασης. σε σχέση με την πηγή ακτίνων X, έτσι ώστε να μπορεί να γίνει συσχέτιση μεταξύ της θέσης και της προφίλ απορρόφησης. Συνδυάζοντας πολλαπλές εικόνες με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να δημιουργηθεί μια τρισδιάστατη εικόνα οικοδομηθεί. Το επίπεδο απορρόφησης των ακτίνων X εξαρτάται από την πυκνότητα του αντικειμένου, με τα οστά να φαίνονται πολύ καλά επειδή είναι πολύ πυκνότερα από τα περιβάλλοντα μαλακά μόρια. Αυτό που μερικοί άνθρωποι δεν συνειδητοποιούν είναι ότι οι εικόνες των μαλακών ιστών μπορούν επίσης να δημιουργηθούν με τη χρήση τεχνολογίας αξονικής τομογραφίας. Οι κλινικοί γιατροί χρησιμοποιούν την τεχνολογία αξονικής τομογραφίας για τη δημιουργία τρισδιάστατων εικόνες για την προβολή του θέματος από οποιαδήποτε γωνία, έτσι ώστε να κατανοηθεί καλύτερα κάθε σχετική ιατρική κατάσταση. (Gibson, et al., 2010)

Ο τομέας των καυσίμων έχει εξελιχθεί μέσω των κατασκευαστικών βελτιώσεων των κυψελών καυσίμου (fuel cells). Οι τεχνολογίες AM μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαδικασίες που απαιτούν την δημιουργία ενός πολύ λεπτού φιλμ συγκεκριμένου υλικού. Στην κατασκευή κυψελών καυσίμου μεμβράνης πολυμερούς ηλεκτρολύτη (PEMFC), είναι απαραίτητο να τοποθετηθεί με ακρίβεια ένα πολύ λεπτό στρώμα πλατίνας, που απαιτείται για την οξείδωση και τη μείωση των αντιδράσεων. Αυτό καθίσταται κρίσιμο στην περίπτωση μαζικής χρήσης της διαδικασίας αυτής.

Ο τομέας της μόδας, της κατασκευής επίπλων και πολλοί κλάδοι της βιομηχανίας που εστιάζουν στην μαζική παραγωγή και επιδιώκουν την δημιουργία πολυσύνθετων μοντέλων, έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τους στις τεχνολογίες AM. Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι οι τεχνολογίες αυτές αξιοποιούνται και από ένα ευρύτερο φάσμα ανθρώπων που οικειοποιούνται ένα μέρος

της τεχνολογίας για δικούς τους προσωπικούς σκοπούς. Πρόκειται για μια επανάσταση που άρχισε το 2007 με την πώληση εκτυπωτών που κόστιζαν έως \$500 και περιλάμβαναν μια παραλλαγή της μεθόδου FDM.

Για την σωστή χρήση και την εκτέλεση ολόκληρης της διαδικασίας μοντελοποίησης χρειαζόταν η σχετική γνώση, γεγονός που οδήγησε σε ένα καινούριο πεδίο εφαρμογών. Πληθώρα εταιριών ξεκίνησαν την εξέλιξη των τεχνολογιών AM και στον τομέα της μαζικής εμπορικής διάθεσης.



Εικόνα 10: Λεπτή δομή πλέγματος σκελετού γυαλιών τιτανίου

Γεωμετρία της προσθετικής κατεσκευής

Το θεώρημα του Fubini, που πήρε το όνομά του από τους Ιταλούς μαθηματικούς Guido Fubini, δηλώνει ότι ένα αντικείμενο όπου n οι διαστάσεις μπορούν να αναπαρασταθούν ως ένα φάσμα από στρώματα σχημάτων των $n-1$ διαστάσεων. Αυτό σημαίνει ότι ένα τρισδιάστατο σχήμα (οποιασδήποτε μορφής στον πραγματικό κόσμο) μπορεί να αναπαρασταθεί ως στρώματα σχημάτων 2 διαστάσεων. Για να αναλύσουμε το θεώρημα, υποθέτουμε ότι τα A και B είναι πλήρης μετρήσιμοι χώροι. Υποτίθεται ότι το $f(x, y)$ είναι $A \times B$ μετρήσιμο.

$$\int_{A \times B} |f(x, y)| d(x, y) < \infty,$$

όπου το ολοκλήρωμα λαμβάνεται σε σχέση με ένα μέτρο γινομένου από το χώρο $A \times B$, τότε

$$\int_A \left(\int_B f(x, y) dy \right) dx = \int_B \left(\int_A f(x, y) dx \right) dy = \int_{A \times B} f(x, y) d(x, y),$$

Τα δύο πρώτα ολοκληρώματα είναι επαναλαμβανόμενα ολοκληρώματα σε σχέση με τα δύο μέτρα, αντίστοιχα, και το τρίτο είναι ένα ολοκλήρωμα σε σχέση με ένα γινόμενο από αυτά τα δύο μέτρα. Εάν η απόλυτη τιμή του παραπάνω ολοκληρώματος δεν είναι πεπερασμένη, τότε τα δύο επαναλαμβανόμενα ολοκληρώματα μπορεί στην πραγματικότητα να έχουν διαφορετικές τιμές. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα παράδειγμα αυτής της δυνατότητας. Αν $f(x, y) = g(x)h(y)$ για κάποιες συναρτήσεις g και h , τότε:

$$\int_A g(x) dx \int_B h(y) dy = \int_{A \times B} f(x, y) d(x, y),$$

Μια άλλη εκδοχή του θεωρήματος Fubini δηλώνει ότι αν A και B έχουν πεπερασμένο μέτρο χώρου, όχι απαραίτητα πλήρεις, και εάν είτε

$$\int_A \left(\int_B |f(x, y)| dy \right) dx < \infty \quad \text{είτε} \quad \int_B \left(\int_A |f(x, y)| dx \right) dy < \infty \quad \text{τότε}$$

$$\int_{A \times B} |f(x, y)| \, d(x, y) < \infty$$

και
$$\int_A \left(\int_B f(x, y) \, dy \right) \, dx = \int_B \left(\int_A f(x, y) \, dx \right) \, dy = \int_{A \times B} f(x, y) \, d(x, y).$$

Σε αυτή την εκδοχή είναι απαραίτητη η προϋπόθεση ότι τα μέτρα αυτά είναι πεπερασμένα.
(Anastasiou, et al., 2013)

Σχεδιασμός του πειράματος

Η μέθοδος Taguchi σχεδιασμό των πειραμάτων (DOE) περιλαμβάνει τη μείωση της διακύμανσης σε μια διαδικασία μέσω του σχεδιασμού των πειραμάτων. Ο γενικός στόχος της μεθόδου είναι να παράγει υψηλής ποιότητας προϊόν με χαμηλό κόστος για τον κατασκευαστή. Η μέθοδος αναπτύχθηκε από τον Genichi Taguchi. Ανέπτυξε μια μέθοδο με την οποία διερευνάται ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζουν οι διαφορετικές παράμετροι την κάθε διαδικασία ενός πειράματος. Ουσιαστικά με αυτή την μέθοδο είναι δυνατόν να εντοπίσουμε τους πιο σημαντικούς παράγοντες μίας πειραματικής διαδικασίας. Παράλληλα με αυτή την διαδικασία βελτιστοποιείται η διαδικασία τροποποιώντας κάθε παράγοντα για την επίτευξη βέλτιστων αποτελεσμάτων. Ο πειραματικός σχεδιασμός που πρότεινε ο Taguchi περιλαμβάνει τη χρήση ορθογώνιων συστοιχιών για την οργάνωση των παραμέτρων που επηρεάζουν την διαδικασία και τα επίπεδα στα οποία πρέπει να ποικίλουν δοκιμάζοντας όλα τα πιθανά ζεύγη συνδυασμών. Αυτό επιτρέπει τη συλλογή των απαραίτητων δεδομένων χρησιμοποιώντας ελάχιστο ποσό πειραματισμού, εξοικονομώντας έτσι χρόνο και πόρους.

Οι κλασικές πειραματικές μέθοδοι σχεδιασμού είναι πολύ περίπλοκες και δεν είναι εύχρηστες. Επίσης ένας μεγάλος αριθμός πειραμάτων πρέπει να πραγματοποιηθεί όταν αυξάνεται ο αριθμός των παραμέτρων της διαδικασίας του πειράματος. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα, η μέθοδος Taguchi χρησιμοποιεί έναν ειδικό σχεδιασμό ορθογώνιων συστοιχιών για τη μελέτη το συνόλου των παραμέτρων με μικρό αριθμό πειραματικών διαδικασιών. Κάθε παράμετρος έχει τρία επίπεδα - δηλαδή χαμηλό, μεσαίο και υψηλό, συμβολίζεται με 1, 2 και 3 αντίστοιχα. Σύμφωνα με την μέθοδο Taguchi με ορθογωνική συστοιχία L9 υπάρχουν τρεις παράμετροι και 3 επίπεδα για κάθε παράμετρο και αντί για $3^3 = 27$ δοκιμές πραγματοποιούνται μόνο 9 δοκιμές (L9). Στην συγκεκριμένη διαδικασία χρησιμοποιήθηκε σχεδιασμός τριών επιπέδων με τέσσερις παράγοντες $3^4 = 81$ με χρησιμοποιώντας μόνο 9 δοκίμια. (Ranjit, 2010)

Experiment No.	Parameter 1 (Level)	Parameter 2 (Level)	Parameter 3 (Level)	Parameter 4 (Level)
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Πίνακας 1: Taguchi ορθογωνικής συστοιχίας

Κάμψη

Η μηχανική δοκιμή της καθαρής κάμψης

Η μηχανική δοκιμή της καθαρής κάμψης αποτελεί μία εκ των βασικότερων μηχανικών δοκιμών που πραγματοποιούνται σε μεταλλικά και μη μεταλλικά υλικά.

Ο επιθετικός προσδιορισμός "καθαρή" δηλώνει την ύπαρξη αποκλειστικά και μόνο καμπτικών ροπών στην φορτισμένη δοκό, με τελικό αποτέλεσμα την κάμψη της και την ανάπτυξη ορθών μηχανικών τάσεων, οι οποίες δεν οφείλονται σε αξονικά φορτία, αλλά σε καμπτικές ροπές, γι' αυτό και καλούνται καμπτικές τάσεις ή ορθές τάσεις λόγω κάμψης.

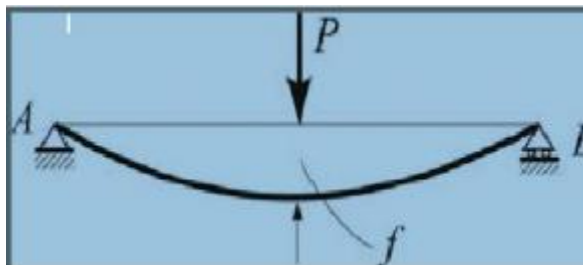
Συνοπτικά, οι συνθήκες που πρέπει να πληρούνται ώστε να αναπτυχθούν συνθήκες καθαρής κάμψης σε μία δοκό είναι οι ακόλουθες:

$$\sum F_x = 0$$

$$\sum F_y = 0$$

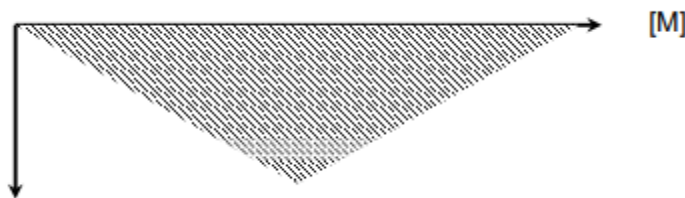
$$\sum M_k \neq 0$$

$$\sum M_t = 0$$



Εικόνα 11: Σχηματική απεικόνιση κάμψης τριών σημείων. (Γιαννακόπουλος, 2011)

Στο άνω σχήμα απεικονίζεται η δοκιμή της κάμψης τριών σημείων (3 point bending test), κατά την οποία η δοκός στηρίζεται αμφιέριστα ή ως αμφιπροέχουσα και φέρει στο μέσον της σημειακό φορτίο P . Κατά την ανωτέρω φόρτιση και από την επίλυση των στερεοστατικών εξισώσεων ισορροπίας καθώς και από τον προσδιορισμό και τον σχεδιασμό του διαγράμματος καμπτικών ροπών, προκύπτουν τα ακόλουθα.



Εικόνα 12: Διάγραμμα καμπτικών ροπών. (Γιαννακόπουλος, 2011)

$$M_{\max} = \frac{P \cdot L}{4}$$

Οι βασικές παραδοχές της καθαρής κάμψης είναι οι ακόλουθες:

1. Το ύψος h της διατομής της δοκού είναι μικρότερο από το μισό του ανοίγματος A ($h < A/2$).
2. Υπάρχει τουλάχιστον ένας άξονας συμμετρίας.
3. Ο ουδέτερος άξονας της δοκού (διαμήκης), ο οποίος διέρχεται από τα κέντρα βάρους των διατομών, είναι ευθύγραμμος, όταν η δοκός είναι αφόρτιστη.
4. Τα εξωτερικά φορτία είναι κάθετα στον άξονα της δοκού και βρίσκονται στο επίπεδο φόρτισης ή καμπτόμενο επίπεδο, που συμπίπτει με το επίπεδο συμμετρίας της δοκού (διαφορετικά θα έχουμε σύνθετη κατάσταση).

5. Η δοκός είναι από υλικό με ίδιο μέτρο ελαστικότητας (E) σε εφελκυσμό και θλίψη και οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι μικρότερες του ορίου αναλογίας του υλικού, άρα ισχύει ο Νόμος του Hooke.

6. Οι διατομές (κάθετες τομές στον άξονα είναι επίπεδες, όταν η δοκός

είναι απαραμόρφωτη και παραμένουν επίπεδες και κάθετες στον άξονα, ακόμα κι

όταν αυτός καμπυλώνεται μετά τη φόρτιση (υπόθεση των Bernoulli-Navier). (Γιαννακόπουλος, 2011)

Τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής

Η έννοια της τριδιάστατης εκτύπωσης μπορεί να οριστεί ως η μετατροπή ενός τριδιάστατου ψηφιακού μοντέλου σε ένα τριδιάστατο αντικείμενο το οποίο μεταφέρεται στον υλικό κόσμο. Η τριδιάστατη εκτύπωση βρίσκεται σε εξελισσόμενο στάδιο, καθώς η τελική της μορφή δεν έχει ακόμα διαμορφωθεί. Ο τομέας της 3d εκτύπωσης περιστρέφεται γύρω από τρεις βασικούς άξονες: α) Τον σχεδιαστικό τομέα, κατά τον οποίο απαιτείται η εγκατάσταση και χρήση λογισμικού που εξειδικεύεται σε 3d σχεδιασμό. Τέτοια λογισμικά είναι γνωστά στην βιομηχανία ως CAD (Computer Aided Design) και επιτρέπουν στο χρήστη:

- την πλήρη διαμόρφωση ενός αντικειμένου και στις τρεις διαστάσεις.
- την τελική φάση της εκτύπωσης, όπου ο παραγωγός μπορεί να τελειοποιήσει το προϊόν ή να εντοπίσει και να επιδιορθώσει πιθανές ατέλειες.

Οι τεχνολογίες προτυποποίησης περιλαμβάνουν έξι βασικές μεθόδους τριδιάστατης εκτύπωσης:

- Στερεολιθογραφία Stereo lithography (STL)
- Επιλεκτική σύντηξη με laser Selective laser sintering (SLS)
- Συγκόλληση λεπτών φύλλων Laminated object manufacturing (LOM)
- Εναπόθεση διαδοχικών στρώσεων Fused deposition modeling (FDM)
- Τριδιάστατη εκτύπωση inkjet 3d inkjet printing
- Παραλλαγή στερεολιθογραφίας Solid ground curing (SGC)

Τα πέντε κοινά στάδια που ακολουθούν όλες οι τεχνικές 3d εκτύπωσης είναι:

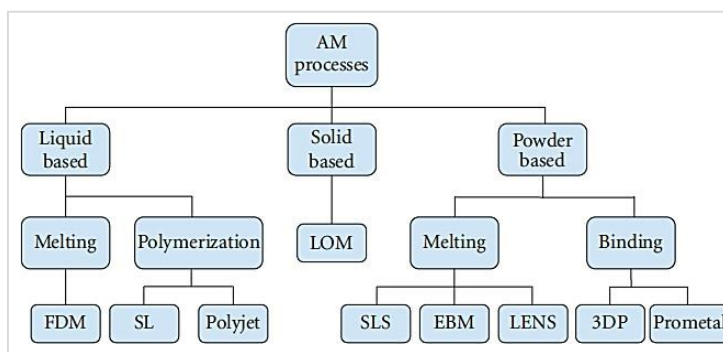
- α) Δημιουργία αρχικού ψηφιακού μοντέλου CAD
- β) Μετατροπή του μοντέλου CAD σε format STL
- γ) Τεμαχισμός του αρχείου STL σε διατομές ελάχιστου πάχους

δ) Κατασκευή του αντικειμένου με αλληλαπόθεση των διατομών

ε) Καθαρισμός και τελικό φινίρισμα του μοντέλου

Η τεχνολογία αυτή έχει κατηγοριοποιηθεί σε διαφορετικές μεθόδους ανάλογα με τη βασική μέθοδο επεξεργασίας. Έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι έχοντας ως βάση το υγρό στοιχείο (liquid based), το στερεό στοιχείο (solid based), καθώς και τη χρήση σκόνης (powder based). Η Στερεολιθογραφία (Stereolithography-SLA), η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης Polyjet, η Μοντελοποίηση Συντηκόμενης Εναπόθεσης (Fused Deposition Modeling-FDM), η Ελασματοποιημένη Κατασκευή Αντικειμένων (Laminated Object Manufacturing-LOM), η Μηχανική Ελασματοποίηση χωρίς Διαμόρφωση (Laminated Engineered Net Shaping-LENS), η τεχνολογία Τήξης Δέσμης Ηλεκτρονίου (Electron Beam Melting-EBM), η τεχνολογία Τρισδιάστατης Εκτύπωσης (3D Printing-3DP), η τεχνολογία Prometal, καθώς και η Επιλεκτική Πυροσυσσωμάτωση με Λέιζερ (Selective Laser Sintering-SLS) αποτελούν κάποιες από τις σημαντικότερες τεχνολογικές μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί με την προσθετική προσέγγιση, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 14 . (Kruth, 1991)

Η εξέλιξη στον τομέα των κατεργασιών καθιστά τις μεθόδους που βασίζονται στο υγρό στοιχείο και στη χρήση σκόνης να αξιοποιούνται τεχνολογικά σε ένα ευρύ φάσμα τόσο εργαστηριακό όσο και βιομηχανικό, γεγονός που ενισχύει την βέβαιη μελλοντική τους εξέλιξη. Αντίθετα, οι μέθοδοι που στηρίζονται στην επεξεργασία με χρήση στερεού υλικού χρησιμοποιούνται λιγότερο, με κύρια έμφαση να αποδίδεται στην σημερινή επικρατούσα τεχνολογία LOM . (Wong & Hernandez, 2012)



Εικόνα 13: Κατηγοριοποιημένοι μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης .

Υλικά με πίεση ακροφυσίου (Material Extrusion-ME)

Γενικά

Η μοντελοποίηση εναπόθεσης τήξης (FDM) είναι μια κοινή διαδικασία εξώθησης υλικών και είναι κατοχυρωμένη από την εταιρεία Stratasys. Το υλικό τραβιέται μέσω ενός ακροφυσίου, όπου θερμαίνεται και στη συνέχεια εναποτίθεται στρώμα προς στρώμα. Το ακροφύσιο μπορεί να κινείται οριζόντια και μια πλατφόρμα κινείται πάνω και κάτω κάθετα μετά την εναπόθεση κάθε νέου στρώματος. Πρόκειται για μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική που χρησιμοποιείται σε πολλούς φθηνούς, οικιακούς και ερασιτεχνικούς τρισδιάστατους εκτυπωτές.

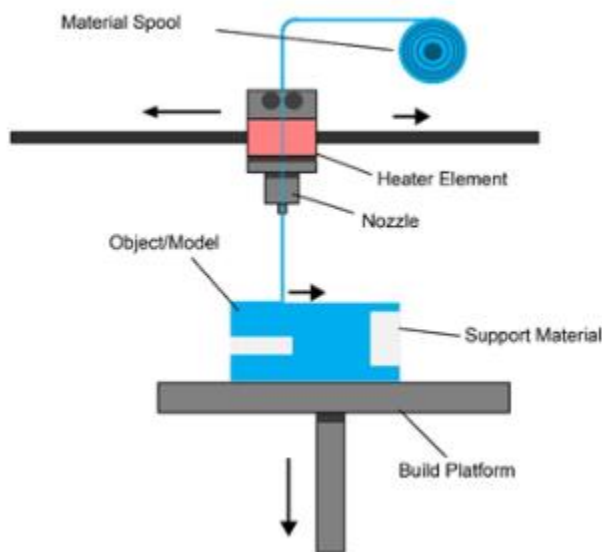
Η διαδικασία έχει πολλούς παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα του τελικού μοντέλου, αλλά έχει μεγάλες δυνατότητες και βιωσιμότητα όταν οι παράγοντες αυτοί ελέγχονται με επιτυχία. Ενώ η FDM είναι παρόμοια με όλες τις άλλες διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης, καθώς κατασκευάζει στρώμα προς στρώμα, διαφέρει στο γεγονός ότι το υλικό προστίθεται μέσω ενός ακροφυσίου υπό σταθερή πίεση και σε συνεχή ροή. Αυτή η πίεση πρέπει να διατηρείται σταθερή και με σταθερή ταχύτητα για να είναι δυνατή η επίτευξη ακριβών αποτελεσμάτων. Τα στρώματα υλικού μπορούν να συγκολληθούν με έλεγχο της θερμοκρασίας ή με τη χρήση χημικών παραγόντων. (University, n.d.)

Υλικά που χρησιμοποιούνται

Το πιο δημοφιλές υλικό είναι το υλικό ABSplus, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις τρέχουσες Stratasys FDM. Πρόκειται για μια ενημερωμένη έκδοση του αρχικού υλικού ABS (ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο) που αναπτύχθηκε για παλαιότερη τεχνολογία FDM. Οι χρήστες που ενδιαφέρονται για ένα ημιδιαφανές εφέ μπορούν να επιλέξουν το υλικό ABSi, το οποίο έχει παρόμοιες ιδιότητες με άλλα υλικά της σειράς ABS. Ορισμένες μηχανές διαθέτουν επίσης μία επιλογή για ABS αναμεμιγμένο με πολυκαρβονικό (PC). Η τεχνολογία FDM λειτουργεί καλύτερα με πολυμερή που είναι άμορφα από τη φύση τους και όχι από τα ιδιαίτερα κρυσταλλικά πολυμερή που είναι πιο κατάλληλα για τις διαδικασίες PBF. Αυτό το επειδή τα πολυμερή που λειτουργούν καλύτερα είναι αυτά που εξωθούνται σε μια παχύρρευστη πάστα παρά σε μορφή χαμηλότερου ιξώδους. Ως άμορφα πολυμερή, δεν υπάρχει ευδιάκριτη σημείο τήξης και το υλικό μαλακώνει όλο και περισσότερο και το ιξώδες μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας. (Gibson, et al., 2010)

Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα

Οι μηχανές FDM της είναι πολύ επιτυχημένες και ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις των πολλών βιομηχανικών χρηστών. Αυτό οφείλεται εν μέρει στις ιδιότητες του υλικού και εν μέρει λόγω του χαμηλού κόστους των μηχανημάτων εισαγωγικού επιπέδου. Ωστόσο, υπάρχουν, μειονεκτήματα κατά τη χρήση αυτής της τεχνολογίας, κυρίως όσον αφορά την ταχύτητα κατασκευής, την ακρίβεια και την πυκνότητα του υλικού. Έχουν δυνατότητα επιλογής πάχους στρώματος 0,078 mm, αλλά αυτή είναι διαθέσιμη μόνο με το μηχάνημα με το υψηλότερο κόστος και η χρήση αυτού του επιπέδου ακρίβειας θα οδηγήσει σε μεγαλύτερους χρόνους κατασκευής. Επίσης ότι όλα τα ακροφύσια είναι κυκλικά και επομένως είναι αδύνατο να σχεδιαστούν αιχμηρές εξωτερικές γωνίες, ακτίνα ισοδύναμη με εκείνη του ακροφυσίου σε κάθε γωνία ή άκρη. Εσωτερικές γωνίες και ακμές θα παρουσιάζουν επίσης στρογγυλοποίηση. Το σχήμα που παράγεται εξαρτάται από το ακροφύσιο, τα χαρακτηριστικά επιτάχυνσης και επιβράδυνσης και την ιξωδοελαστική συμπεριφορά του υλικού καθώς στερεοποιείται. (Gibson, et al., 2010)



Εικόνα 14: Διαδικασία προσθετικής κατασκευής με εξώθηση υλικών. (University, n.d.)

Διεργασία σύντηξης σε κλίνη σκόνης (Powder Bed Fusion-PBF)

Γενικά

Οι διεργασίες σύντηξης σε κλίνη σκόνης (PBF) ήταν από τις πρώτες εμπορικές διαδικασίες AM διεργασίες. Αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο του Τέξας στο Όστιν των ΗΠΑ, η επιλεκτική λέιζερ(SLS) ήταν η πρώτη εμπορική διεργασία PBF. Η βασική της μέθοδος λειτουργία της παρουσιάζεται σχηματικά στην εικόνα 15, και όλες οι άλλες διεργασίες PBF τροποποιούν αυτή τη βασική προσέγγιση με έναν ή περισσότερους τρόπους για να βελτιώσουν την παραγωγικότητα της μηχανής, να επιτρέψουν την επεξεργασία διαφορετικών υλικών και/ή την αποφυγή συγκεκριμένων χαρακτηριστικών που έχουν κατοχυρωθεί με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας. Όλες οι διεργασίες PBF μοιράζονται ένα βασικό σύνολο χαρακτηριστικών. Αυτά περιλαμβάνουν ένα ή περισσότερα θερμικές πηγές για την πρόκληση σύντηξης μεταξύ των σωματιδίων σκόνης, μια μέθοδο έλεγχο της σύντηξης της σκόνης σε μια καθορισμένη περιοχή κάθε στρώματος, και μηχανισμούς για την προσθήκη και εξομάλυνση στρώσεων σκόνης. Οι πιο κοινές θερμικές πηγές για PBF είναι τα λέιζερ. Οι διεργασίες PBF που χρησιμοποιούν λέιζερ είναι γνωστές ως πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (LS). Δεδομένου ότι οι μηχανές πυροσυσσωμάτωσης πολυμερών με λέιζερ (PLS) και οι μηχανές πυροσυσσωμάτωσης μετάλλων με λέιζερ(mLS) διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Επιπλέον, καθώς η δέσμη ηλεκτρονίων και άλλες θερμικές πηγές απαιτούν σημαντικά διαφορετικές αρχιτεκτονικές μηχανών από τις μηχανές πυροσυσσωμάτωσης με λέιζερ, οι μη θερμικές πηγές λέιζερ θα εξεταστούν ξεχωριστά από τις πηγές λέιζερ στο τέλος. του κεφαλαίου. Οι διεργασίες LS αναπτύχθηκαν αρχικά για την παραγωγή πλαστικών πρωτοτύπων με τη χρήση τεχνική σάρωσης με λέιζερ κατά σημείο. Η προσέγγιση αυτή επεκτάθηκε στη συνέχεια σε σε μεταλλικές και κεραμικές σκόνες- χρησιμοποιούνται τώρα πρόσθετες θερμικές πηγές- και παραλλαγές για τη σύντηξη κατά στρώματα υλικών σε σκόνη βρίσκονται στο εμπόριο εισήχθησαν. Ως αποτέλεσμα, οι διεργασίες PBF χρησιμοποιούνται ευρέως παγκοσμίως, έχουν ευρεία φάσμα υλικών (συμπεριλαμβανομένων πολυμερών, μετάλλων, κεραμικών και σύνθετων υλικών) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, και χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για την άμεση κατασκευή τελικής χρήσης προϊόντων, δεδομένου ότι οι ιδιότητες των υλικών είναι συγκρίσιμες με πολλές μηχανικής ποιότητας πολυμερή, μέταλλα και κεραμικά. (Gibson, et al., 2010)

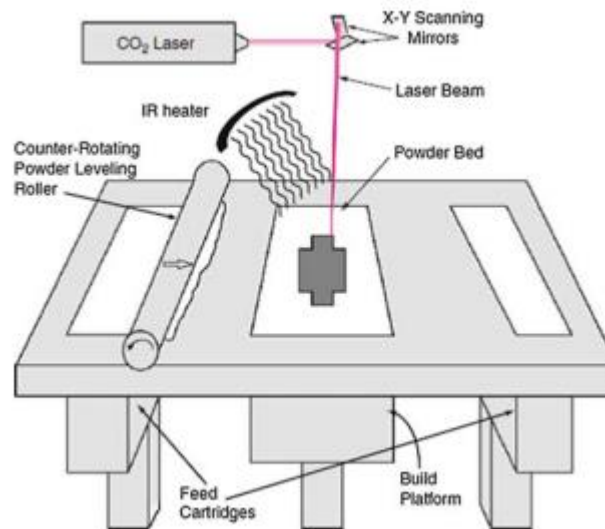
Υλικά που χρησιμοποιούνται

Λόγω της φύσης του, το PBF μπορεί να επεξεργαστεί μια πολύ μεγάλη ποικιλία υλικών, σε αντίθεση με τις άλλες διεργασίες AM. Αν και είναι ευκολότερο να ελεγχθεί η επεξεργασία ημικρυσταλλικών πολυμερών, η επεξεργασία με PBF άμορφων πολυμερών έχει επιτύχει. Πολλά μέταλλα μπορούν να υποστούν επεξεργασία- όπως αναφέρθηκε, εάν ένα μέταλλο μπορεί να συγκολληθεί, είναι ένα καλός

υποψήφιος για mLS. Ορισμένα κεραμικά υλικά είναι διαθέσιμα στο εμπόριο, αλλά αρκετά άλλα έχουν καταδειχθεί στην έρευνα. (Gibson, et al., 2010)

Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα

Με τις διεργασίες PBF, ο συνολικός χρόνος κατασκευής εξαρτημάτων μπορεί να διαρκέσει περισσότερο από άλλες διαδικασίες προσθετικής κατασκευής λόγω των κύκλων προθέρμανσης και ψύξης που εμπλέκονται. Ωστόσο, όπως συμβαίνει με αρκετά νεότερα σχέδια μηχανών, οι αφαιρούμενες πλατφόρμες κατασκευής επιτρέπουν την προθέρμανση και την ψύξη εκτός γραμμής, επιτρέποντας έτσι πολύ μεγαλύτερη παραγωγικότητα της μηχανής. Επιπλέον, η δυνατότητα τοποθέτησης πολυμερών εξαρτημάτων σε τριών διαστάσεων, καθώς δεν απαιτούνται δομές στήριξης, σημαίνει ότι πολλά εξαρτήματα μπορούν να παράγονται σε μία μόνο κατασκευή, βελτιώνοντας έτσι δραματικά την παραγωγικότητα αυτών των διαδικασιών σε σύγκριση με τις διαδικασίες που απαιτούν στηρίγματα. (Gibson, et al., 2010)



Εικόνα 15: Επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (SLS). (Gibson, et al., 2010)

Σύντηξη στρώματος σκόνης (Binder Jetting-BJ)

Γενικά

Η διαδικασία εκτόξευσης συνδετικού υλικού χρησιμοποιεί δύο υλικά: ένα υλικό σε σκόνη και ένα συνδετικό υλικό. Το συνδετικό υλικό δρα ως συγκολλητικό υλικό μεταξύ των στρώσεων σκόνης. Το συνδετικό υλικό είναι συνήθως σε υγρή μορφή και το υλικό κατασκευής σε μορφή σκόνης. Μια κεφαλή εκτύπωσης κινείται οριζόντια κατά μήκος των αξόνων x και y της μηχανής και εναποθέτει εναλλασσόμενα στρώματα του υλικού κατασκευής και του συνδετικού υλικού. Μετά από κάθε στρώση, το αντικείμενο που εκτυπώνεται χαμηλώνει στην πλατφόρμα δόμησης. Λόγω της μεθόδου δέσμευσης, τα χαρακτηριστικά του υλικού δεν είναι πάντα κατάλληλα για δομικά μέρη και παρά τη σχετική ταχύτητα της εκτύπωσης, η πρόσθετη μετεπεξεργασία μπορεί να προσθέσει σημαντικό χρόνο στη συνολική διαδικασία.

Όπως συμβαίνει και με άλλες μεθόδους κατασκευής με βάση τη σκόνη, το αντικείμενο που εκτυπώνεται στηρίζεται μόνο του μέσα στην κλίση σκόνης και απομακρύνεται από την αδέσμευτη σκόνη μόλις ολοκληρωθεί η εκτύπωση. Η τεχνολογία αναφέρεται συχνά ως τεχνολογία 3DP και προστατεύεται με αυτό το όνομα. (University, n.d.)

Υλικά που χρησιμοποιούνται

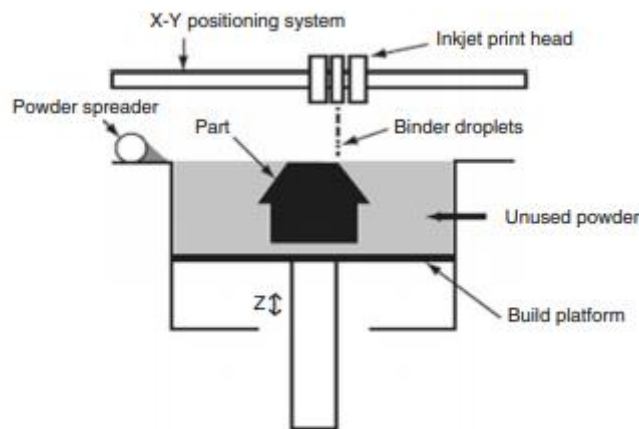
Όταν η Z Corporation ξεκίνησε στα μέσα της δεκαετίας του 1990, το πρώτο της υλικό ήταν το άμυλο με βάση το άμυλο και χρησιμοποιούσε ένα συνδετικό υλικό με βάση το νερό, παρόμοιο με μια συνηθισμένη κόλλα οικιακής χρήσης. Στο σήμερα, η εμπορικά διαθέσιμη σκόνη από την 3D Systems είναι με βάση τον γύψο (ημιυδρικό θειικό ασβέστιο) και το συνδετικό υλικό έχει βάση το νερό. (Printers, n.d.)

Τα εκτυπωμένα μέρη είναι αρκετά αδύναμα, οπότε συνήθως διεισδύουν με άλλο υλικό. 3D Systems παρέχει τρία διηθητικά υλικά, το διηθητικό υλικό ColorBond, το οποίο έχει βάση το ακρυλικό και είναι παρόμοιο με τη σούπερ κόλλα, το διηθητικό StrengthMax που είναι διηθητικό δύο συστατικών και το Salt Water Cure, ένα φιλικό προς το περιβάλλον και ακίνδυνο διηθητικό. (Gibson, et al., 2010)

Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα

Οι διεργασίες εκτόξευσης συνδετικού υλικού μοιράζονται πολλά από τα πλεονεκτήματα της εκτόξευσης υλικού σε σχέση με άλλες διεργασίες AM. Όσον αφορά την MJ, η εκτόξευση συνδετικού υλικού έχει ορισμένες διακριτές πλεονεκτήματα. Πρώτον, μπορεί να είναι ταχύτερη, δεδομένου ότι μόνο ένα μικρό

κλάσμα του συνολικού όγκου του τεμαχίου πρέπει να διανεμηθεί μέσω των κεφαλών εκτύπωσης. Ωστόσο, η ανάγκη διανομής της σκόνης προσθέτει ένα επιπλέον βήμα, επιβραδύνοντας κάπως τις διεργασίες δέσμης. Δεύτερον, ο συνδυασμός υλικών σε σκόνη και πρόσθετων σε συνδεδεμένα υλικά επιτρέπει συνθέσεις υλικών που δεν είναι δυνατές ή δεν επιτυγχάνονται εύκολα με τη χρήση άμεσων μεθόδων. Τρίτον, οι πολτοί με υψηλότερα φορτία στερεών είναι δυνατές με το BJ, σε σύγκριση με το MJ, επιτρέποντας καλύτερες ποιότητες κεραμικών και μεταλλικών εξαρτημάτων. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι διεργασίες BJ προσφέρονται εύκολα για την εκτύπωση χρωμάτων στα εξαρτήματα. (Gibson, et al., 2010)



Εικόνα 16: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας εκτόξευσης συνδεδεμένου υλικού. (Gibson, et al., 2010)

Φωτοπολυμερισμός σε δεξαμενή (Vat Photopolymerisation-VP)

Γενικά

Ο πολυμερισμός σε δεξαμενή χρησιμοποιεί μια δεξαμενή με υγρή φωτοπολυμερή ρητίνη, από την οποία το μοντέλο κατασκευάζεται στρώμα προς στρώμα. Ένα υπεριώδες (UV) φως χρησιμοποιείται για τη σκλήρυνση ή τη σκλήρυνση της ρητίνης όπου απαιτείται, ενώ μια πλατφόρμα μετακινεί το αντικείμενο που κατασκευάζεται προς τα κάτω μετά τη σκλήρυνση κάθε νέου στρώματος.

Καθώς η διαδικασία χρησιμοποιεί υγρό για τη διαμόρφωση των αντικειμένων, δεν υπάρχει δομική υποστήριξη από το υλικό κατά τη φάση της κατασκευής, σε αντίθεση με τις μεθόδους που βασίζονται στη σκόνη, όπου η υποστήριξη παρέχεται από το μη δεσμευμένο υλικό. Σε αυτή την περίπτωση, συχνά θα πρέπει να προστεθούν δομές στήριξης. Οι ρητίνες σκληρύνονται με τη διαδικασία του φωτοπολυμερισμού ή με υπεριώδες φως, όπου το φως κατευθύνεται στην επιφάνεια της ρητίνης με τη χρήση καθρεφτών που ελέγχονται από κινητήρα. Όπου η ρητίνη έρχεται σε επαφή με το φως, σκληραίνει ή σκληραίνει. (University, n.d.)

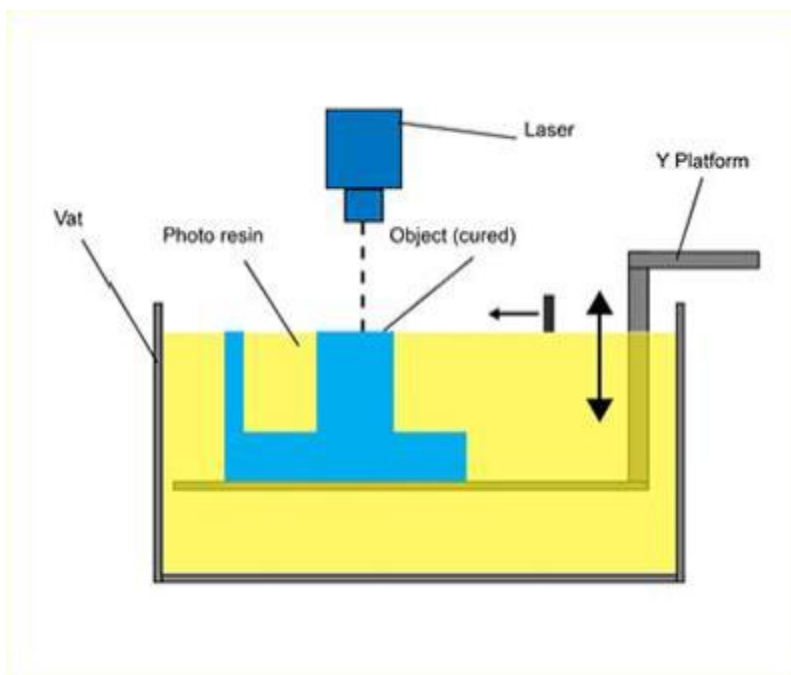
Υλικά που χρησιμοποιούνται

Η ρητίνη χρησιμοποιείται στις διαδικασίες στερεολιθογραφίας (SLA) και ψηφιακής επεξεργασίας φωτός (DLP) τρισδιάστατης εκτύπωσης για πρωτότυπα, υφάσματα, μικρορευστομηχανές, προϊόντα πολλαπλών χρωμάτων και πολλαπλών υλικών- πρότυπα χύτευσης επενδύσεων- κομμάτια εσωτερικού αυτοκινήτου και βάσεις κινητήρα- γυαλιά, διαφανή συγκροτήματα, ιατρικά όργανα και ηλεκτρικές συνδέσεις. Τα εξαρτήματα που κατασκευάζονται από ρητίνη είναι ανθεκτικά στη θερμότητα και το νερό, ανθεκτικά, σκληρά και έχουν χαμηλό ιξώδες. Ορισμένα είναι ελαστικά, εύκαμπτα και ισχυρά. (Whiteclouds, n.d.)

Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα

Δύο από τα κύρια πλεονεκτήματα της τεχνολογίας φωτοπολυμερισμού σε δεξαμενή έναντι άλλων AM τεχνολογιών είναι η ακρίβεια των τεμαχίων και το φινίρισμα της επιφάνειας. Αυτά τα χαρακτηριστικά οδήγησαν στην ευρεία χρήση των εξαρτημάτων στερεολιθογραφίας διανυσματικής σάρωσης, καθώς η μορφή, η εφαρμογή και, σε μικρότερο βαθμό, λειτουργικά πρωτότυπα καθώς αναπτύχθηκε ο τομέας της ταχείας πρωτοτυποποίησης. Οι τυπικές διαστασιολογικές ακρίβειες για τις μηχανές SL αναφέρονται συχνά ως αναλογία σφάλματος ανά μονάδα μήκους. Οι σύγχρονες μηχανές SL έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια .0,002 in./in. . Επιφανειακό φινίρισμα των SL κυμαίνεται από submicron Ra για τις επιφάνειες πάνω από 100 μm Ra για τις επιφάνειες σε κεκλιμένες γωνίες.

Ένα μειονέκτημα των διεργασιών VP είναι η χρήση φωτοπολυμερών, δεδομένου ότι οι χημικές ουσίες περιορίζονται σε ακρυλικά και εποξικά για εμπορικά υλικά. Παρόλο που το αρκετά άλλα συστήματα υλικών είναι φωτοπολυμερίσιμα, κανένα δεν έχει αναδειχθεί εμπορικά επιτυχημένο για να εκτοπίσει τις τρέχουσες χημείες. Γενικά, τα σημερινά SL υλικά δεν έχουν την αντοχή στην κρούση και την ανθεκτικότητα των καλής ποιότητας υλικών έγχυσης θερμοπλαστικών με έγχυση. Επιπλέον, είναι γνωστό ότι γερνούν, με αποτέλεσμα να υποβαθμίζονται μηχανικές ιδιότητες με την πάροδο του χρόνου. Αυτοί οι περιορισμοί εμποδίζουν τις διαδικασίες SL να χρησιμοποιηθούν για πολλές εφαρμογές παραγωγής.



Εικόνα 17: Διαδικασία προσθετικής κατασκευής με φωτοπολυμερισμό σε δεξαμενή. (University, n.d.)

Εξώθηση Υλικού (Material Jetting-MJ)

Γενικά

Η εκτόξευση υλικού δημιουργεί αντικείμενα με παρόμοια μέθοδο με έναν εκτυπωτή εκτόξευσης μελάνης δύο διαστάσεων. Το υλικό εκτοξεύεται σε μια πλατφόρμα κατασκευής χρησιμοποιώντας είτε μια συνεχή είτε μια προσέγγιση Drop on Demand (DOD).

Το υλικό εκτοξεύεται στην επιφάνεια ή την πλατφόρμα κατασκευής, όπου στερεοποιείται και το μοντέλο κατασκευάζεται στρώμα προς στρώμα. Το υλικό εναποτίθεται από ένα ακροφύσιο που κινείται οριζόντια στην πλατφόρμα κατασκευής. Οι μηχανές ποικίλουν ως προς την πολυπλοκότητα και τις μεθόδους ελέγχου της εναπόθεσης του υλικού. Τα στρώματα του υλικού σκληραίνονται ή σκληραγωγούνται στη συνέχεια με τη χρήση υπεριώδους (UV) φωτός.

Καθώς το υλικό πρέπει να εναποτίθεται σε σταγόνες, ο αριθμός των διαθέσιμων προς χρήση υλικών είναι περιορισμένος. Τα πολυμερή και τα κεριά είναι κατάλληλα και συνήθως χρησιμοποιούμενα υλικά, λόγω της ιξώδους φύσης τους και της ικανότητάς τους να σχηματίζουν σταγόνες. (University, n.d.)

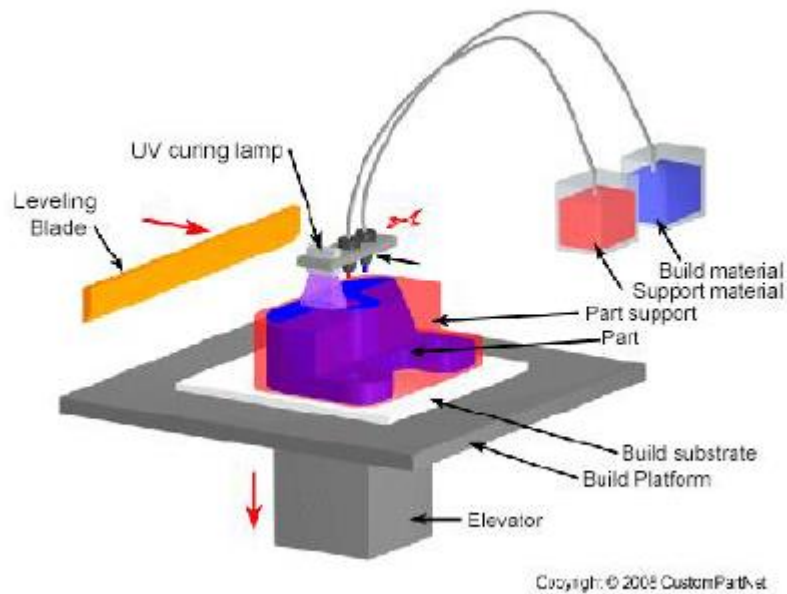
Υλικά που χρησιμοποιούνται

Ενώ οι φορείς του κλάδου έχουν εισάγει μέχρι στιγμής μηχανήματα εκτύπωσης που χρησιμοποιούν κηρώδη πολυμερή και ακρυλικά φωτοπολυμερή αποκλειστικά, ερευνητικές ομάδες σε όλο τον κόσμο έχουν πειραματιστεί με τις δυνατότητες για μηχανές εκτύπωσης που θα μπορούσαν να ενσωματώσουν αυτά τα και άλλα υλικά. Μεταξύ αυτών των υλικών που μελετήθηκαν περισσότερο και είναι τα πλέον υποσχόμενα για μελλοντικές εφαρμογές είναι τα πολυμερή, τα κεραμικά και τα μέταλλα. Εκτός από τα εμπορικά διαθέσιμα υλικά, η παρούσα ενότητα επισημαίνει τα επιτεύγματα της σχετικής έρευνας. (Gibson, et al., 2010)

Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα

Κάθε διαδικασία AM έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της. Τα κύρια πλεονεκτήματα της εκτύπωσης, τόσο της άμεσης εκτύπωσης όσο και της εκτύπωσης με συνδεδετικό υλικό, ως διαδικασία AM περιλαμβάνουν χαμηλό κόστος, υψηλή ταχύτητα, την επεκτασιμότητα, την ευκολία κατασκευής εξαρτημάτων από πολλαπλά υλικά και τη δυνατότητα εκτύπωσης χρωμάτων. Οι μηχανές εκτύπωσης έχουν πολύ χαμηλότερο κόστος από άλλες μηχανές AM, ιδίως αυτές που χρησιμοποιούν λέιζερ. Σε γενικές γραμμές, οι μηχανές εκτύπωσης μπορούν να συναρμολογηθούν από τυποποιημένα εξαρτήματα (δίσκοι, στάδια, κεφαλές εκτύπωσης), ενώ άλλες μηχανές έχουν. Όπως αναφέρθηκε, η Stratasys διαθέτει

στην αγορά τις μηχανές Connex που εκτυπώνουν σε δύο ή περισσότερες υλικά μέρη. Μπορεί κανείς να φανταστεί την προσθήκη περισσότερων κεφαλών εκτύπωσης για να αυξήσει τη δυνατότητα σε πολλά διαφορετικά υλικά και η χρήση μοτίβων εναπόθεσης dithering να αυξήσει τον αριθμό των αποτελεσματικών υλικών σε εκατοντάδες. Ανάγκη συμβατότητας και ανάλυσης πρέπει να διασφαλιστεί, αλλά φαίνεται ότι αυτού του είδους οι βελτιώσεις θα πρέπει να συμβούν στην στο εγγύς μέλλον. (Gibson, et al., 2010)



Εικόνα 18: Διαδικασία προσθετικής καταργασίας με πίεση ακροφυσίου. (University, n.d.)

Κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας (Direct Energy Deposition-DED)

Γενικά

Η κατευθυνόμενη ενεργειακή εναπόθεση (DED) καλύπτει μια σειρά από ορολογίες: "Laser engineered net shaping, directed light fabrication, direct metal deposition, 3D laser cladding" Είναι μια πιο σύνθετη διαδικασία εκτύπωσης που χρησιμοποιείται συνήθως για την επισκευή ή την προσθήκη πρόσθετου υλικού σε υπάρχοντα εξαρτήματα.

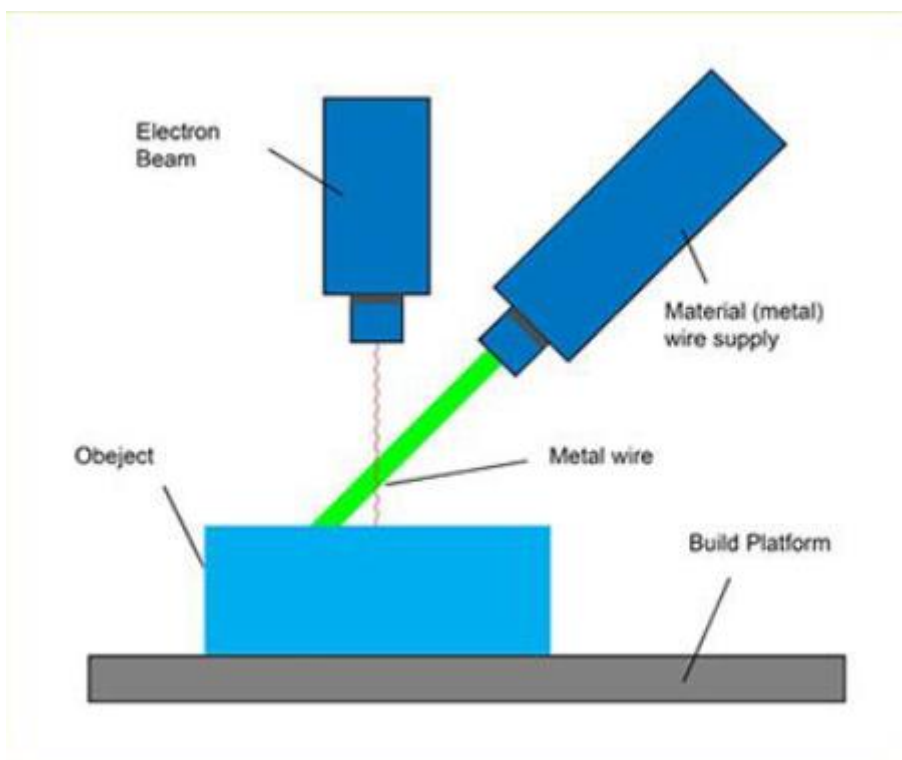
Μια τυπική μηχανή DED αποτελείται από ένα ακροφύσιο τοποθετημένο σε βραχίονα πολλαπλών αξόνων, το οποίο εναποθέτει λιωμένο υλικό στην καθορισμένη επιφάνεια, όπου στερεοποιείται. Η διαδικασία είναι κατ' αρχήν παρόμοια με την εξώθηση υλικού, αλλά το ακροφύσιο μπορεί να κινείται προς πολλαπλές κατευθύνσεις και δεν είναι σταθερό σε συγκεκριμένο άξονα. Το υλικό, το οποίο μπορεί να εναποτεθεί από οποιαδήποτε γωνία λόγω των μηχανών 4 και 5 αξόνων, λιώνει κατά την εναπόθεση με δέσμη λέιζερ ή ηλεκτρονίων. Η διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί με πολυμερή, κεραμικά, αλλά συνήθως χρησιμοποιείται με μέταλλα, είτε με τη μορφή σκόνης είτε με τη μορφή σύρματος. τυπικές εφαρμογές περιλαμβάνουν την επισκευή και τη συντήρηση δομικών εξαρτημάτων. (University, n.d.)

Υλικά που χρησιμοποιούνται

Οι διεργασίες DED μπορούν να τροφοδοτηθούν με τόσο σε σκόνη όσο και σε σύρμα. Η σκόνη είναι πιο ευέλικτη πρώτη ύλη και τα περισσότερα μεταλλικά και κεραμικά υλικά είναι εύκολα διαθέσιμα σε μορφή σκόνης. Ωστόσο, δεν συλλαμβάνεται όλη η σκόνη στο τήγμα (π.χ. απόδοση σύλληψης σκόνης μικρότερη από 100 %), οπότε χρησιμοποιείται η περίσσεια σκόνης. Πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα ώστε να διασφαλίζεται ότι η περίσσεια σκόνης συλλαμβάνεται σε καθαρή κατάσταση, εάν η ανακύκλωση είναι επιθυμητή. Στην περίπτωση τροφοδοσίας σύρματος, ο όγκος της απόθεσης είναι πάντα ο όγκος του σύρματος που έχει τροφοδοτηθεί, και υπάρχει απόδοση σύλληψης πρώτης ύλης 100 % (μείον ένα λίγο "πιτσίλισμα" από τη λίμνη τήξης). Τα σύρματα είναι πιο αποτελεσματικά για απλές γεωμετρίες, "τετράγωνες" γεωμετρίες χωρίς πολλές μεταβάσεις λεπτού πάχους ή για την επικάλυψη επιφανειών. Όταν είναι επιθυμητά πολύπλοκα, μεγάλα ή/και πλήρως πυκνά εξαρτήματα, οι παράμετροι διεργασίας που σχετίζονται με τη γεωμετρία (όπως το πλάτος της καταπακτής, το πάχος στρώματος, η διάμετρος του σύρματος και η τροφοδοσία του σύρματος ρυθμός σύρματος) πρέπει να ελέγχονται προσεκτικά για την επίτευξη κατάλληλου μεγέθους και σχήματος εναπόθεσης. Ακριβώς όπως στις διεργασίες εξώθησης, οι μεγάλες αποθέσεις με γεωμετρική πολυπλοκότητα πρέπει να έχουν πορώδες σχεδιασμένο σε αυτά για να παραμείνουν γεωμετρικά ακριβή. (Gibson, et al., 2010)

Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα

Οι διεργασίες DED παράγουν πλήρως πυκνά εξαρτήματα με ελεγχόμενες μικροδομικά χαρακτηριστικά. Αυτές οι διεργασίες μπορούν να παράγουν λειτουργικά διαβαθμισμένα εξαρτήματα με μεταβολές της σύνθεσης στις διευθύνσεις X, Y και Z. Οι κύριοι περιορισμοί των διεργασιών DED είναι η χαμηλή ανάλυση και το φινίρισμα της επιφάνειας. Μια ακρίβεια καλύτερη από 0,25 mm και μια επιφανειακή τραχύτητα μικρότερη από 25 μm είναι δύσκολο με τις περισσότερες διεργασίες DED. Η χαμηλότερη ταχύτητα κατασκευής είναι ένας άλλος περιορισμός. Οι χρόνοι κατασκευής μπορεί να είναι πολύ μεγάλοι για αυτές τις διεργασίες. Για να επιτευχθούν καλύτερες ακρίβειες, μικρά μεγέθη δέσμης και ρυθμοί εναπόθεσης. Αντίθετα, για να επιτευχθούν γρήγοροι ρυθμοί εναπόθεσης, προκύπτει υποβάθμιση της ανάλυσης και του τελειώματος της επιφάνειας. Αλλαγές στην ισχύ του λέιζερ και στη σάρωση ρυθμού για την επίτευξη καλύτερων ακρίβειας ή ρυθμών εναπόθεσης μπορεί επίσης να επηρεάσουν το μικροδομές των εξαρτημάτων που εναποτίθενται, και συνεπώς η εύρεση βέλτιστων συνθηκών εναπόθεσης απαιτεί συμβιβασμούς μεταξύ ταχύτητας κατασκευής, ακρίβειας και μικροδομής. (Gibson, et al., 2010)



Εικόνα 19: Διαδικασία προσθετικής κατασκευής με κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας. (University, n.d.)

Συγκόλληση φύλλων (Sheet Lamination)

Γενικά

Μία από τις πρώτες τεχνικές προσθετικής κατασκευής που εμπορευματοποιήθηκαν (1991) ήταν η κατασκευή πλαστικοποιημένων αντικειμένων (LOM). Η LOM περιελάμβανε τη στρωματοποίηση στρώμα-προς-στρώμα από φύλλα χαρτιού, κομμένα με χρήση λέιζερ CO₂, κάθε φύλλο αντιπροσώπευε ένα στρώμα διατομής του μοντέλου CAD του εξαρτήματος. Στο LOM, το τμήμα του φύλλου χαρτιού που δεν περιέχεται στο τελικό τεμάχιο τεμαχίζεται σε κύβους υλικού με τη χρήση ενός διασταυρούμενης κοπής.

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες άλλες διεργασίες που βασίζονται στην πλαστικοποίηση φύλλων που περιλαμβάνουν άλλα υλικά κατασκευής και στρατηγικές κοπής. Λόγω της κατασκευής αρχής, κόβονται μόνο τα εξωτερικά περιγράμματα των εξαρτημάτων και τα φύλλα μπορούν να είναι είτε να κοπούν και στη συνέχεια να στοιβάζονται ή να στοιβάζονται και στη συνέχεια να κόβονται. Αυτές οι διαδικασίες μπορούν να είναι περαιτέρω κατηγοριοποιηθούν με βάση τον μηχανισμό που χρησιμοποιείται για την επίτευξη της συγκόλλησης μεταξύ των στρωμάτων: (α) κόλληση ή συγκόλληση, (β) θερμική συγκόλληση, (γ) σύσφιξη και (δ) συγκόλληση με υπερήχους. Καθώς η χρήση της συγκόλλησης με υπερήχους περιλαμβάνει μοναδικές στερεές χαρακτηριστικά συγκόλλησης και μπορεί να επιτρέψει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. (Gibson, et al., 2010)

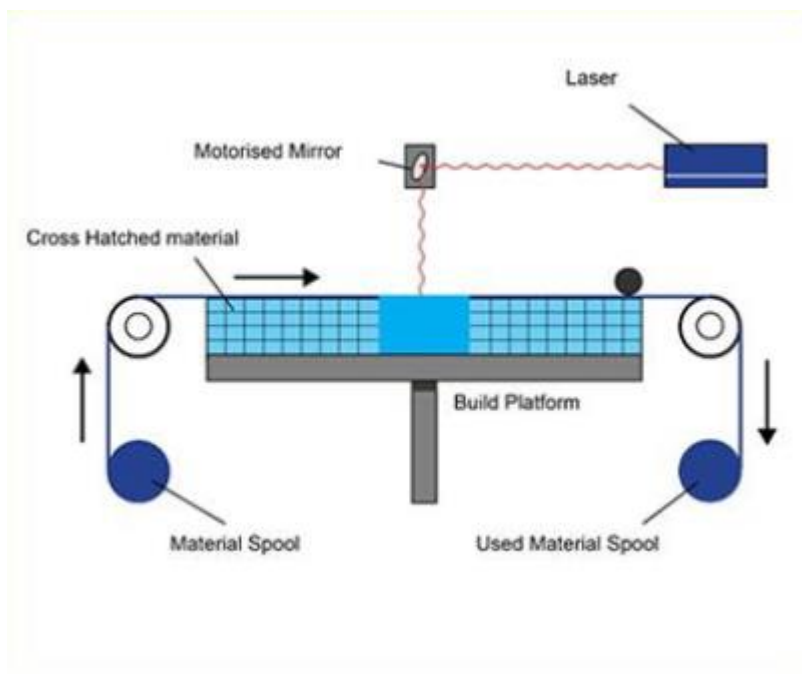
Υλικά που χρησιμοποιούνται

Μια μεγάλη ποικιλία υλικών έχει υποστεί επεξεργασία χρησιμοποιώντας μια ποικιλία διαδικασιών πλαστικοποίησης φύλλων, συμπεριλαμβανομένων πλαστικών, μετάλλων, κεραμικών, και χαρτί. Το χασαπόχαρτο ήταν το πρώτο υλικό που χρησιμοποιήθηκε στην αρχική διαδικασία LOM της Helisys. Επικαλύπτεται στη μία πλευρά με ένα λεπτό στρώμα θερμοπλαστικού πολυμερούς. Είναι αυτή η πολυμερής επικάλυψη που λιώνει και εξασφαλίζει ότι ένα στρώμα χαρτιού συνδέεται με το στρώμα χαρτιού με την προηγούμενη στρώση. Δεδομένου ότι το χασαπόχαρτο είναι αρκετά ισχυρό και βαρύ, σχηματίζει ανθεκτικά μέρη αφού κατασκευαστεί το κατάλληλο πάχος (>5-6 mm συνήθως). Μετά το μέρος την κατασκευή, τα μέρη τελειοποιούνται σαν να ήταν ξύλο με λείανση, λίμα, βαφή, και βερνίκωμα ή σφράγιση. Στον τομέα των μετάλλων, τόσο οι προσεγγίσεις bond-then-form όσο και οι προσεγγίσεις form-then-bond έχουν ακολουθηθεί. Ίσως η πιο απλή εννοιολογικά διαδικασία κατασκευής είναι το φύλλο η προσέγγιση σύσφιξης μετάλλων, όπου τα φύλλα μετάλλου κόβονται για να σχηματίσουν διατομές εξαρτημάτων, στη συνέχεια. Οι διαδικασίες πλαστικοποίησης φύλλων, τα κεραμικά υλικά κατασκευάζονται συχνότερα με τη χρήση διεργασίες bond-then-form με χρήση ταινιών γεμισμένων με

κεραμικό υλικό. Οι μέθοδοι χύτευσης ταινιών σχηματίζουν φύλλα υλικού που αποτελούνται από κεραμικά σε σκόνη, όπως σύνθετα υλικά SiC, TiC-Ni. Για τα πολυμερή υλικά, το παράδειγμα της Solidimension είναι το πιο γνωστό και το πιο αποτελεσματικό χρησιμοποιούμενα φύλλα PVC. (Gibson, et al., 2010)

Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα

Τα πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν ταχύτητα, χαμηλό κόστος, ευκολία στο χειρισμό του υλικού, αλλά η αντοχή και η ακεραιότητα των μοντέλων εξαρτάται από τη χρησιμοποιούμενη κόλλα. Επιπροσθέτως η κοπή μπορεί να είναι πολύ γρήγορη λόγω του ότι η διαδρομή κοπής είναι μόνο η διαδρομή του περιγράμματος του σχήματος και όχι ολόκληρη η διατομή. Από την άλλη μεριά τώτα, τα φινιρίσματα μπορεί να ποικίλουν ανάλογα με το χαρτί ή το πλαστικό υλικό, αλλά μπορεί να απαιτείται μεταγενέστερη επεξεργασία για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος. Επίσης η χρήση υλικών είναι περιορισμένη. Και τέλος οι διεργασίες σύντηξης απαιτούν περισσότερη έρευνα για την περαιτέρω προώθηση της διαδικασίας σε μια πιο συνηθισμένη τοποθέτηση. (University, n.d.)



Εικόνα 20: Διαδικασία προσθετικής κατεργασίας με συγκόλληση φύλλων. (University, n.d.)

Υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης

Η πλειονότητα των σημερινών καταναλωτικών προϊόντων - και πολλά εμπορικά - αποτελούνται από θερμοπλαστικά. Κατά το σχεδιασμό ενός νέου προϊόντος, οι μηχανικοί μπορούν να προβλέψουν την τελική του απόδοση με την κατασκευή πρωτοτύπων με ένα υλικό όσο το δυνατόν πιο παρόμοιο με αυτό. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η τρισδιάστατη εκτύπωση με θερμοπλαστικά εφαρμόζεται τόσο ευρέως. Χρησιμοποιώντας την τεχνολογία (FDM), οι μηχανικοί έχουν τη δυνατότητα να κατασκευάσουν εξαρτήματα με τα πιο κοινά χρησιμοποιούμενα θερμοπλαστικά, όπως το ABS, το πολυκαρβονικό, ένα μείγμα, καθώς και κατασκευασμένα θερμοπλαστικά για την αεροδιαστημική, την ιατρική, την αυτοκινητοβιομηχανία, τα ηλεκτρονικά και άλλες ειδικές εφαρμογές. Κατά τη χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης για την παραγωγή τελικών προϊόντων, η χρήση ενός θερμοπλαστικού είναι ακόμα πιο σημαντική, και μπορεί να είναι η μόνη επιλογή για πολλές εφαρμογές.

Για την παραγωγή τελικών προϊόντων, δεν υπάρχουν συντομεύσεις. Σταθερότητα υλικών και μακροχρόνια απόδοση είναι υψίστης σημασίας. Έτσι, θα πρέπει να λαμβάνονται υπ όψη οι μηχανικές, θερμικές, ηλεκτρικές και χημικές ιδιότητες και τυχόν αλλαγές που προκύπτουν από το χρόνο ή την περιβαλλοντική έκθεση. Ωστόσο, επειδή τα εξαρτήματα που δημιουργούνται με μια μηχανή FDM μοιράζονται πολλά από τα χαρακτηριστικά των χυτευμένων θερμοπλαστικών, μπορείτε να αξιοποιηθεί ό,τι είναι ήδη γνωστό.

Για όλες τις άλλες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των λειτουργικών πρωτότυπα, πρότυπα, εργαλεία και κατασκευές βοηθήματα, η διαδικασία επιλογής είναι πολύ απλούστερη. Το κλειδί είναι η κατανόηση των χαρακτηριστικά που καθιστούν κάθε υλικό FDM μοναδικό. Αυτά που θα πρέπει να εξετάζεται είναι οι εξής ιδιότητες:

- Χαρακτηριστικά του υλικού
- Διαθεσιμότητα μηχανής FDM
- Τύπος υλικού υποστήριξης
- Χρώμα

Για να επιλεγθεί το σωστό υλικό, ο καλύτερος συνδυασμός αυτών των χαρακτηριστικών του υλικού όσο τηρούνται προτεραιότητες εκεί που ανήκουν. Καθώς εξετάζονται οι επιλογές υλικών, μπορεί να

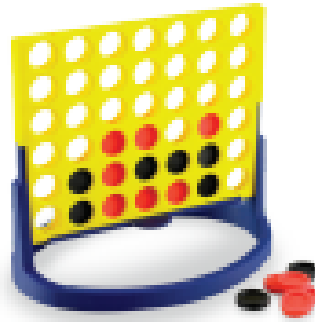
διαπιστωθεί ότι η επιλογή είναι απλή λόγω μιας κρίσιμης απόδοσης προτύπου (π.χ. χημική αδράνεια) ή προσωπικής προτίμησης (π.χ. μεταγενέστερη επεξεργασία χωρίς επαφή).

Από τις πρώτες μέρες της, η τεχνολογία FDM έχει ταυτίστηκε με τα βιομηχανικά θερμοπλαστικά, και η διαδικασία ήταν αρχικά γνωστή για το ABS (ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο). Αλλά τα υλικά για την FDM έχουν προχωρήσει και εξελιχθεί. (Fisher, 2008)

ABS

Γενικά

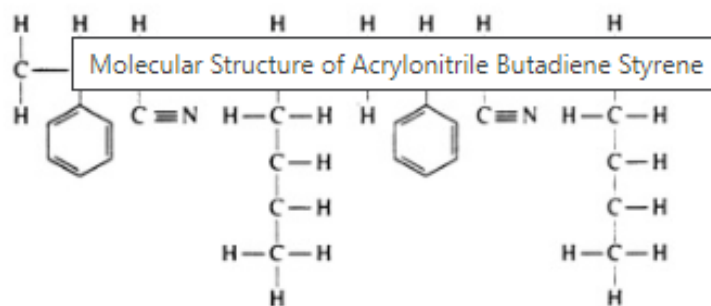
Το ABS, ένα από τα πιο κοινά χρησιμοποιούμενα θερμοπλαστικά, έχει το θεμέλιο για το FDM για πολλά χρόνια. Μετράται από ετήσια κατανάλωση, είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό στις μηχανές FDM. Είναι χρησιμοποιείται τόσο ευρέως που μπορεί να χαρακτηριστεί "γενικής χρήσης", το οποίο είναι ακριβές αλλά παραπλανητικό. Τα υλικά ABS αποτελούν εξαιρετική επιλογή για μοντέλα, πρωτότυπα, πατρόν, εργαλεία και τελική χρήση. μέρη. Σαράντα έως εβδομήντα τοις εκατό ισχυρότερα από τα FDM πριν από λίγα μόλις χρόνια, τα σημερινά υλικά θερμοπλαστικά για τις μηχανές FDM προσφέρουν μεγαλύτερα αντοχή σε εφελκυσμό, κρούση και κάμψη. (Fisher, 2008)



Εικόνα 21: Παιχνίδι κατασκευασμένο από ABS

Μοριακή δομή-Ιδιότητες υλικού

Το ABS παράγεται με την τεχνική γαλακτώματος ή συνεχούς μάζας. Ο χημικός τύπος του Acrylonitrile Butadiene Styrene είναι $(C_8H_8-C_4H_6-C_3H_3N)_n$. Το φυσικό υλικό έχει αδιαφανές ιβουάρ χρώμα και χρωματίζεται εύκολα με χρωστικές ή βαφές. (Omnexus, 2021)



Εικόνα 22:Μοριακή δομή υλικού ABS. (Omnexus, 2021)

Το ακρυλονιτρίλιο στο ABS παρέχει χημική και θερμική σταθερότητα, ενώ το βουταδιένιο προσθέτει ανθεκτικότητα και αντοχή. Το στυρένιο προσδίδει στο τελικό πολυμερές ένα ωραίο, γυαλιστερό φινίρισμα. Το ABS έχει χαμηλό σημείο τήξης, γεγονός που επιτρέπει την εύκολη χρήση του στη διαδικασία χύτευσης με έγχυση και στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Έχει επίσης υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και είναι πολύ ανθεκτικό σε φυσικές κρούσεις και χημική διάβρωση, γεγονός που επιτρέπει στο τελικό πλαστικό να αντέχει σε βαριά χρήση και σε δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες. Το ABS μπορεί εύκολα να μορφοποιηθεί, να λειανθεί και να διαμορφωθεί, ενώ η γυαλιστερή επιφάνειά του είναι εξαιρετικά συμβατή με ένα ευρύτερο φάσμα χρωμάτων και κολλών. Τα πλαστικά ABS παίρνουν εύκολα χρώμα, επιτρέποντας τη βαφή των τελικών προϊόντων σε ακριβείς αποχρώσεις ώστε να ανταποκρίνονται στις ακριβείς προδιαγραφές του έργου. (AdrecoPlastics, n.d.)

Εφαρμογές

Εκτός από τις χρήσεις του σε εξαρτήματα ηλεκτρολογίων υπολογιστών και τουβλάκια LEGO, το ABS χρησιμοποιείται συνήθως για την κατασκευή πλαστικών προστατευτικών για πρίζες και προστατευτικών περιβλημάτων για ηλεκτρικά εργαλεία. Χρησιμοποιείται επίσης συχνά στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας, για αντικείμενα όπως πλαστικά κράματα και διακοσμητικά εσωτερικά μέρη αυτοκινήτων. Στον κατασκευαστικό κλάδο, το ABS έρχεται να κάνει την εμφάνισή του στην κατασκευή πλαστικών σωλήνων και κυματοειδών πλαστικών κατασκευών. Μπορεί να κοπεί στο μέγεθος και διατίθεται σε μεγάλη ποικιλία χρωμάτων και φινιρισμάτων. Είναι επίσης χρήσιμο στην κατασκευή προστατευτικών καλύψεων κεφαλής, όπως κράνη και κράνη. Άλλες συνήθεις χρήσεις του θερμοπλαστικού πολυμερούς ABS περιλαμβάνουν εκτυπωτές, ηλεκτρικές σκούπες, σκεύη κουζίνας, φαξ, μουσικά όργανα (φλογέρες και πλαστικά κλαρινέτα, για να αναφέρουμε μόνο δύο) και πλαστικά παιχνίδια.

Τα πλαστικά αντικείμενα που έχουν σχεδιαστεί για να ζουν σε εξωτερικούς χώρους κατασκευάζονται συχνά επίσης από ABS, καθώς το ευπροσάρμοστο θερμοπλαστικό μπορεί να αντέξει καλά στη βροχή, τις καταιγίδες και τους ανέμους. Ωστόσο, για να παρατείνει τη διάρκεια ζωής του σε εξωτερικούς χώρους, πρέπει να προστατεύεται επαρκώς από την υπεριώδη ακτινοβολία και την έκθεση σε πιο ακραίες καιρικές συνθήκες. Το σχετικά φτηνό κόστος παραγωγής του επιτρέπει επίσης να χρησιμοποιείται οικονομικά αποδοτικά για την παραγωγή πρωτοτύπων και πλαστικών μοντέλων προεπισκόπησης. (Adrecoplastics, n.d.)

Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα

Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα του πλαστικού ABS, από το λογικό κόστος παραγωγής μέχρι τη στιβαρή, αισθητικά ευχάριστη δομή του. Η ικανότητά του να αντέχει να θερμαίνεται και να ψύχεται πολλές φορές το καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλο για ανακύκλωση. Το ABS είναι ευπροσάρμοστο όσον αφορά το εύρος των επιλογών χρώματος και υφής επιφάνειας που μπορούν να επιτευχθούν και μπορεί να κατασκευαστεί με πολύ υψηλής ποιότητας φινίρισμα. Είναι ελαφρύ και κατάλληλο για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Τέλος, το ABS έχει χαμηλή αγωγιμότητα θερμότητας και ηλεκτρισμού που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για προϊόντα που απαιτούν προστασία από ηλεκτρική μόνωση. Προσφέρει επίσης εξαιρετική αντοχή στην κρούση και μπορεί να απορροφήσει αποτελεσματικά και αξιόπιστα τους κραδασμούς.

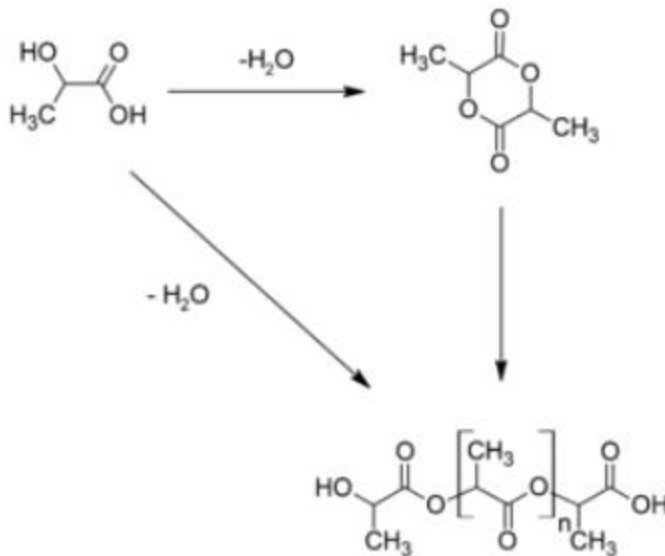
Σε αντιστάθμισμα αυτών των πλεονεκτημάτων, υπάρχουν ορισμένα μειονεκτήματα του πλαστικού ABS. Το χαμηλό σημείο τήξης του το καθιστά ακατάλληλο για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών και ιατρικά εμφυτεύματα. Έχει επίσης φτωχή αντοχή σε διαλύτες και κόπωση και δεν αντέχει τόσο καλά στην έκθεση στην υπεριώδη ακτινοβολία και στις καιρικές συνθήκες, εκτός αν προστατεύεται κατάλληλα. Η χαμηλή αγωγιμότητά του σημαίνει ότι δεν μπορεί πάντα να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις όπου αυτό θα αποδεικνυόταν εμπόδιο για τον συνολικό σχεδιασμό. Όταν καίγεται, το υλικό ABS εκπέμπει υψηλή παραγωγή καπνού, γεγονός που θα μπορούσε να προκαλέσει ανησυχίες σχετικά με την ατμοσφαιρική ρύπανση. Παρόλο που υπάρχουν μειονεκτήματα όπως αυτά, αν το ABS χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου δεν είναι ευάλωτο στους περιορισμούς που αναφέρονται παραπάνω, μπορεί να αποδειχθεί ένα οικονομικά αποδοτικό, ελκυστικό και υψηλής απόδοσης θερμοπλαστικό με μεγάλη ποικιλία πλεονεκτημάτων και χρήσεων. (Adrecoplastics, n.d.)

PLA

Γενικά

Το πολυγαλακτικό οξύ (PLA) είναι ένα από τα κυρίαρχα νήματα που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης, η οποία είναι ένα είδος τεχνολογίας προσθετικής κατασκευής (AM), κατά την οποία ένας εκτυπωτής εκτυπώνει το ημι-λιωμένο νήμα στο τραπέζι του, στρώμα προς στρώμα, σχηματίζοντας ένα τμήμα της επιθυμητής διάστασης. Τα τελικά τρισδιάστατα εκτυπωμένα εξαρτήματα έχουν γενικά χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες από τις συμβατικές τεχνικές κατασκευής, όπως η χύτευση με έγχυση. Οι κύριοι λόγοι για τις συγκριτικά χαμηλές μηχανικές ιδιότητες είναι ο ανεπαρκής σχηματισμός δεσμών μεταξύ των ινών και οι εναπομένουσες θερμικές τάσεις που προκαλούνται λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση του νήματος. Η θερμική επεξεργασία του τρισδιάστατα εκτυπωμένου τεμαχίου μπορεί να μειώσει σημαντικά τις εσωτερικές τάσεις που αναπτύσσονται κατά τη διαδικασία εκτύπωσης και να βελτιώσει επίσης το σχηματισμό δεσμών μεταξύ των ινών. (Jaswanth, et al., 2021)

Μοριακή δομή-Ιδιότητες υλικού



Εικόνα 23:Μοριακή δομή υλικού PLA.

Λόγω της χηλικής φύσης του γαλακτικού οξέος, υπάρχουν πολλές διαφορετικές μορφές πολυλακτιδίου: πολυ-L-λακτίδιο (PLLA) είναι το προϊόν που προκύπτει από τον πολυμερισμό του L,L-λακτιδίου (επίσης γνωστό ως L-λακτίδιο). PLLA έχει κρυσταλλικότητα γύρω στο 37%, θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης 60-65 °C, θερμοκρασία τήξης 173-178 °C και μέτρο ελαστικότητας 2,7–16 GPa. Το ανθεκτικό στη

Θερμότητα PLA μπορεί να αντέξει σε θερμοκρασίες από 110 °C. Το PLA είναι διαλυτό σε χλωριωμένους διαλύτες, θερμό βενζόλιο, τετραϋδροφουράνιο, και διοξάνιο. Το πολυγαλακτικό οξύ μπορεί να επεξεργαστεί, όπως τα περισσότερα θερμοπλαστικά σε ίνες (για παράδειγμα, με χρήση συμβατικών διεργασιών νηματοποίησης με τήξη) και μεμβράνες. Το PLA έχει παρόμοιες μηχανικές ιδιότητες με το πολυμερές PETE, αλλά έχει σημαντικά χαμηλότερη μέγιστη συνεχή θερμοκρασία χρήσης. Η αντοχή τάσης για το 3-D τυπωμένο PLA έχει προσδιοριστεί προηγουμένως. Βρέθηκε να κυμαίνεται ευρέως ανάλογα με τις συνθήκες εκτύπωσης που επιτεύχθηκαν με χρήση RepRap 3-D εκτυπωτών. Αποτελέσματα από μια πρόσφατη μελέτη έδωσαν μία αντοχή τάσης στην εκτύπωση περίπου 50 MPa και δείχνουν ότι η 3-D εκτύπωση του PLA επηρεάζει τις ιδιότητές του - έδειξαν μια ισχυρή σχέση μεταξύ αντοχής τάσης και ποσοστού κρυσταλλικότητας ενός 3-D τυπωμένου δείγματος και μια ισχυρή σχέση μεταξύ του ποσοστού κρυσταλλικότητας και της θερμοκρασίας εξωθητή (extruder).

Η θερμοκρασία τήξης του PLLA μπορεί να αυξηθεί κατά 40–50 °C και η θερμοκρασία θερμικής παραμόρφωσης μπορεί να αυξηθεί από περίπου 60 °C έως 190 °C με τη φυσική ανάμειξη του πολυμερούς με PDLA (πολυ-D-λακτίδιο). Τα PDLA και PLLA αποτελούν ένα εξαιρετικά τακτικό στερεοσύμπλοκο με αυξημένη κρυσταλλικότητα. Η θερμική σταθερότητα μεγιστοποιείται όταν χρησιμοποιείται ένα μείγμα 1:1, αλλά ακόμη και σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις του PDLA 3-10%, εξακολουθεί να υπάρχει ουσιαστική βελτίωση. Στην τελευταία περίπτωση, το PDLA λειτουργεί ως παράγοντας δημιουργίας πυρήνων, αυξάνοντας έτσι το ποσοστό κρυστάλλωσης. Η βιοαποικοδόμηση του PDLA είναι πιο αργή απ' ό,τι για το PLA λόγω της υψηλότερης κρυσταλλικότητας του PDLA.

Υπάρχει επίσης το πολυ(L-λακτίδιο-co-D,L-λακτίδιο) (PLDLLA) – που χρησιμοποιείται ως PLDLLA/TCP σε καλούπια στη μηχανική των οστών. (Wikipedia, 2021)



Εικόνα 24: Καρούλι με υλικό PLA για εκτύπωση. (Carlota, 2019)

Εφαρμογές

Το PLA χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη σε επιτραπέζιους 3D εκτυπωτές επεξεργασίας ινών (π.χ. RepRap). Τα τυπωμένα στερεά από PLA μπορεί να είναι εγκιβωτισμένα σε γύψινα καλούπια, στη συνέχεια να ψήνονται στο φούρνο, έτσι ώστε το προκύπτον κενό να μπορεί να πληρωθεί με τηγμένο μέταλλο. Αυτό είναι γνωστό ως "χύτευση κενού PLA", ένα είδος χύτευσης επένδυσης.

Όντας σε θέση να διασπαστεί σε αβλαβείς γαλακτικό οξύ, το PLA χρησιμοποιείται σε ιατρικά εμφυτεύματα με τη μορφή αγκυρών, βιδών, πλακών, καρφιών, ράβδων, και πλέγματος. Ανάλογα με τον ακριβή τύπο που χρησιμοποιείται, διασπάται μέσα στο σώμα μέσα σε 6 μήνες έως 2 χρόνια. Αυτή η σταδιακή διάσπαση είναι επιθυμητή για μια κατασκευή υποστήριξης, διότι μεταφέρει σταδιακά το φορτίο στο σώμα (π.χ. στο οστό) καθώς η περιοχή θεραπεύεται. Τα χαρακτηριστικά αντοχής των εμφυτευμάτων από PLA και PLLA είναι καλά τεκμηριωμένα.

Το PLA μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως ένα διασπώμενο υλικό συσκευασίας, παραγωγής είτε με χύτευση, έγχυση σε καλούπι, ή περιστροφή. Από αυτό το υλικό έχουν γίνει κούπες και τσάντες. Σε μορφή φιλμ, έχει την ιδιότητα να συρρικνώνεται με τη θέρμανση, δίνοντας τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί σε σήραγγες συρρίκνωσης. Είναι χρήσιμο για την παραγωγή χαλαρού πληρωτικού υλικού συσκευασίας, τσαντών κομπόστ, συσκευασιών τροφίμων, και επιτραπέζιων σκευών μίας χρήσης. Με τη μορφή των ινών και μη υφασμένων υφασμάτων, το PLA έχει επίσης πολλές δυνατότητες χρήσης, για παράδειγμα, ως ταπετσάρια, ενδύματα μίας χρήσης, τέντες, προϊόντα γυναικείας υγιεινής, πάνες.

Το ρακεμικό και το απλό PLLA έχει χαμηλή θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης, η οποία είναι ανεπιθύμητη. Ένα στερεοσύμπλοκο του PDLA και του PLLA έχει υψηλότερη θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης, που του δίνει περισσότερη μηχανική αντοχή. Έχει ένα ευρύ φάσμα των εφαρμογών, όπως υφαντά πουκάμισα (με δυνατότητα να σιδερωθούν), δίσκους για συσκευές μικροκυμάτων, εφαρμογές hot-fill και ακόμη και πλαστικά εφαρμοσμένης μηχανικής (σε αυτή την περίπτωση, το στερεοσύμπλοκο αναμιγνύεται με ένα ελαστικό πολυμερές όπως το ABS). Τέτοια μείγματα έχουν επίσης καλή σταθερότητα και οπτική διαφάνεια, καθιστώντας τα χρήσιμα για εφαρμογές συσκευασίας low-end. Το καθαρό πολυ-L-γαλακτικό οξύ (PLLA), από την άλλη πλευρά, είναι το κύριο συστατικό στο Sculptra, ενός υλικού μακράς διάρκειας με χρήση ως ενισχυτικό του όγκου του προσώπου, για τη λιποατροφία στα μάγουλα. Η πρόοδος στη βιοτεχνολογία έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη της εμπορικής παραγωγής του D-εναντιομερούς, κάτι που δεν ήταν δυνατό μέχρι πρόσφατα. (Wikipedia, 2021)

Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα

Το PLA παράγεται από ανανεώσιμες πρώτες ύλες. Έχει μειωμένο αποτύπωμα άνθρακα σε σύγκριση με τα πλαστικά ορυκτής προέλευσης: Οι καλλιέργειες απορροφούν CO₂ κατά την καλλιέργεια, χρειάζεται λιγότερη ενέργεια και αυτό παράγει λιγότερα αέρια του θερμοκηπίου για την παραγωγή PLA σε σχέση με τα πλαστικά ορυκτής προέλευσης. Το PLA επίσης λιώνει πιο εύκολα επειδή έχει χαμηλότερο σημείο τήξης από πολλά πλαστικά με βάση τα ορυκτά. Είναι εύκολο να εργαστείτε με PLA και απαιτεί λιγότερη ενέργεια για τη μετατροπή του. Έχει χαμηλό σημείο τήξης, φθινό, εύκολο στην εκτύπωση, χωρίς αναθυμιάσεις. Ακόμη το PLA είναι κομποστοποιήσιμο και όταν το αποτεφρώνεται, εκπέμπει λιγότερες τοξικές αναθυμιάσεις από τα πλαστικά με βάση το πετρέλαιο. Παρόλα αυτά, δεν κομποστοποιείται αρκετά γρήγορα για τους βιομηχανικούς κομποστοποιητές, δεν βελτιώνει την ποιότητα του εδάφους. Αλλάζει την τιμή του pH του εδάφους, το καθιστά πιο όξινο. Έχει χαμηλότερο σημείο τήξης και δεν μπορεί να ανακυκλωθεί μαζί με άλλα πλαστικά. Δεν υπάρχει αρκετό PLA και είναι πολύ διασκορπισμένο για να είναι οικονομικά βιώσιμη η ανακύκλωση. ο χαμηλό σημείο τήξης καθιστά το PLA ακατάλληλο για εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας. Μπορεί ακόμη και να παρουσιάσει σημάδια μαλάκυνσης ή παραμόρφωσης σε μια ζεστή καλοκαιρινή ημέρα. Έχει υψηλότερη διαπερατότητα από άλλα πλαστικά. Η υγρασία και το οξυγόνο θα περάσουν μέσα από αυτό πιο εύκολα από άλλα πλαστικά. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την ταχύτερη αλλοίωση των τροφίμων. Το PLA δεν συνιστάται για εφαρμογές μακροχρόνιας αποθήκευσης τροφίμων. Το PLA δεν είναι το πιο σκληρό ή ανθεκτικό πλαστικό. Και τέλος δεν είναι κατάλληλο για εφαρμογές όπου η σκληρότητα και η αντοχή σε κρούση είναι κρίσιμες. (Barrett, 2020)

Nylon

Γενικά

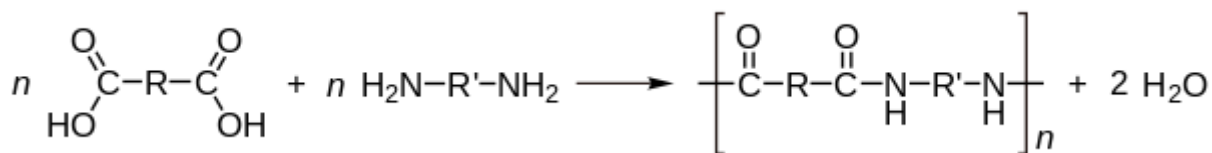
Τα αντικείμενα από πολυαμίδια (νάιλον) δημιουργούνται συνήθως από μια λεπτή, λευκή, κοκκώδη σκόνη με την τεχνολογία SLS. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένες παραλλαγές του υλικού, όπως το νάιλον, που διατίθενται επίσης σε νήματα που χρησιμοποιούνται στη μοντελοποίηση με τη μέθοδο της λιωμένης εναπόθεσης (FDM). Λόγω της βιοσυμβατότητάς τους, τα πολυαμίδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία εξαρτημάτων που έρχονται σε επαφή με τρόφιμα (εκτός από τρόφιμα που περιέχουν αλκοόλη). (Martel, 2020)



Εικόνα 25:Κατασκευή απο υλικό νάιλον.

Μοριακή δομή-Ιδιότητες υλικού

Αποτελούμενα από ημικρυσταλλικές δομές, τα πολυαμίδια έχουν μια καλή ισορροπία χημικών και μηχανικών χαρακτηριστικών που προσφέρουν καλή σταθερότητα, ακαμψία, ευκαμψία και αντοχή σε κρούσεις. Αυτά τα πλεονεκτήματα σημαίνουν ότι το υλικό έχει πολλές εφαρμογές σε όλους τους τομείς και προσφέρει υψηλό επίπεδο λεπτομέρειας. Λόγω της υψηλής ποιότητάς τους, τα πολυαμίδια χρησιμοποιούνται στην κατασκευή γραναζιών, εξαρτημάτων για την αεροδιαστημική αγορά, την αυτοκινητοβιομηχανία, τη ρομποτική, τις ιατρικές προθέσεις και τα καλούπια έγχυσης. (Martel, 2020)



Εικόνα 26:Μοριακή δομή υλικού νάυλον. (Wikipedia, 2021)

Εφαρμογές

Το νάυλον χρησιμοποιείται συχνά σε γρανάζια, δακτυλίους και πλαστικά ρουλεμάν λόγω των εγγενών ιδιοτήτων χαμηλής τριβής του. Το νάυλον δεν είναι το πιο ολισθηρό πλαστικό που διατίθεται - συνήθως, συνιστούμε την ακετάλη εάν η χαμηλή τριβή είναι το μόνο ζητούμενο. Ωστόσο, οι υψηλές επιδόσεις του σε άλλες μηχανικές/χημικές/θερμικές ιδιότητες το καθιστούν καλή επιλογή για εξαρτήματα που μπορεί να υποστούν μεγάλη φθορά. Το νάυλον είναι επίσης ένα απίστευτα χρήσιμο πλαστικό για εφαρμογές που απαιτούν τόσο ένα πλαστικό υλικό όσο και μια υψηλή θερμοκρασία τήξης. Είναι επίσης απίστευτα ποικιλόμορφο. Το νάυλον μπορεί να προσαρμοστεί σε μια μεγάλη ποικιλία χρήσεων λόγω των πολλών διαφορετικών παραλλαγών που υπάρχουν στην παραγωγή και των ρυθμιζόμενων ιδιοτήτων υλικού αυτών των παραλλαγών που προκύπτουν από τα διαφορετικά υλικά με τα οποία μπορεί να συνδυαστεί το νάυλον. Στη Creative Mechanisms, έχουμε χρησιμοποιήσει το νάυλον σε διάφορες εφαρμογές σε διάφορους κλάδους. Μερικά παραδείγματα περιλαμβάνουν τα εξής: - Το Nylon έχει χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή και την κατασκευή προϊόντων από το Nylon, καταναλωτικά προϊόντα (π.χ. παιχνίδια).

Τρισδιάστατα εκτυπωμένα μοντέλα για εφαρμογές υψηλής θερμότητας όταν το ABS δεν αποτελεί επιλογή (αν και αυτή είναι μια επιλογή, συνήθως χρησιμοποιούμε σύνθετα υλικά από νάυλον περισσότερο για την αντοχή τους και λιγότερο για την απόδοσή τους στη θερμοκρασία κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση). Τέλος και γρανάζια για τη μετάδοση κίνησης μηχανισμών. (Staff, 2016)

Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα

Το νάυλον είναι πολύ χρήσιμο για την κατασκευή αλιευτικών δικτύων, σχοινιών, αλεξιπτώτων και άλλων τύπων καλωδίων. Ο ιδιαίτερος λόγος γι' αυτό είναι ότι πρόκειται για μια ίνα υψηλής αντοχής. Άλλα νάυλον μπορεί ακόμη και να χρησιμοποιούνται ως πλαστικό για την κατασκευή τύπων εξαρτημάτων μηχανών. Έτσι, πρέπει να αναμιγνύεται με μαλλί για την ενίσχυση της ισχύος. Το νάυλον έχει μια ιδιότητα μακράς διάρκειας. Φθείρεται καλά, δηλαδή σε ρούχα και άλλα υφάσματα είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό. Άλλα προϊόντα όπως το βαμβάκι ή το spandex μπορούν επίσης να αναμιχθούν με αυτό. Το νάυλον έχει την ιδιότητα να είναι ανθεκτικό στο νερό. Το νάυλον έχει την τάση να το ωθεί στην επιφάνεια ενός υγρού

και έτσι εξατμίζεται πιο εύκολα. Αντί να απορροφά και να διατηρεί την υγρασία όπως οι φυσικές ίνες, αντιστέκεται στο νερό. Δεδομένου ότι το νάιλον είναι ένα συνθετικό ύφασμα που κατασκευάζεται από τον άνθρωπο και όχι ένα φυσικό ύφασμα, πρέπει να καλλιεργείται ή να συλλέγεται από ζώα, δηλαδή το υλικό είναι λιγότερο δαπανηρό. Αν και μπορεί να μην φέρει την ίδια αύρα με το μαλλί μερινό ή το κασμίρ, για παράδειγμα, για να αποκτήσει μια συγκρίσιμη και συμβατή αίσθηση, το νάιλον μπορεί να υφανθεί. Κατά συνέπεια, τα ρούχα από νάιλον είναι λιγότερο ακριβά από άλλα προϊόντα που κατασκευάζονται από παρόμοιες φυσικές πηγές. Απο την άλλη πλευρά όμως καθώς το νάιλον είναι πυρίμαχο, λιώνει εύκολα. Επίσης, μπορεί εύκολα να συρρικνωθεί και να αντιδράσει με την υγρασία, επιτρέποντάς του να τεντωθεί. Το νάιλον είναι από τη φύση του υγροσκοπικό, οπότε ακόμη και από τον αέρα απορροφά εύκολα νερό. Δεν έχει αντοχή στην υπεριώδη ακτινοβολία και κιτρινίζει ανεξάρτητα από το χρώμα του, γίνεται εύθραυστο και φθείρεται γρήγορα. (toppr, 2021)

Πολυπροπυλένιο

Το πολυπροπυλένιο είναι ένα άλλο θερμοπλαστικό που χρησιμοποιείται ευρέως στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας, στον τομέα των επαγγελματικών κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων και στην κατασκευή εκατοντάδων καθημερινών αντικειμένων. Το PP είναι γνωστό για την αντοχή του στην τριβή και την ικανότητά του να απορροφά τους κραδασμούς, καθώς και για τη σχετική ακαμψία και ευελιξία του. Ωστόσο, στα μειονεκτήματα του υλικού περιλαμβάνονται η αντοχή του σε χαμηλές θερμοκρασίες και η ευαισθησία του στις υπεριώδεις ακτίνες UV, οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν τη διόγκωσή του. Εξαιτίας αυτού, αρκετοί κατασκευαστές έχουν αναπτύξει εναλλακτικούς τύπους PP, το προσομοιωτικό-προπυλένιο, που είναι ισχυρότερο τόσο από φυσική όσο και από μηχανική άποψη. (Martel, 2020)

HIPS

Το HIPS (High Impact Polystyrene) είναι ένα αναλώσιμο γενικής χρήσης που έγινε διάσημο λόγω της ικανότητάς του να διαλυθεί σε Limonene. HIPS και ABS έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά εκτύπωσης, όπως η εκτύπωση θερμοκρασίας, και ως εκ τούτου, προσκολλώνται καλά το ένα στο άλλο. Έτσι προέκυψε η χρήση του παράλληλα με το ABS σε εκτυπωτές 2 κεφαλών, με το HIPS να χρησιμοποιείται αποκλειστικά για υποστηρίγματα τα οποία μετά διαλύονται με εμβάπτιση σε Limonene, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα για σύνθετες εκτυπώσεις μοντέλων που ως και πριν δε γινόταν να τυπωθούν καθώς με αυτή τη μέθοδο είναι πλέον εφικτή η αφαίρεση υποστηριγμάτων από δύσκολα εσωτερικά σημεία και πολύπλοκες εσωτερικές δομές χωρίς σημάδια και ζημιά στο μοντέλο. (Martel, 2020)

PET

Το τереφθαλικό πολυαιθυλένιο, ή PET, συναντάται συνήθως σε πλαστικά μπουκάλια μίας χρήσης. Το PET είναι το ιδανικό νήμα για οποιαδήποτε κομμάτια που προορίζονται για επαφή με τρόφιμα. Επιπλέον, το υλικό είναι αρκετά άκαμπτο και έχει καλή χημική αντοχή. Για να επιτύχετε τα καλύτερα αποτελέσματα κατά την εκτύπωση με PET, εκτυπώστε μεταξύ 75 - 90°C. Το PET διατίθεται συνήθως στην αγορά ως ημιδιαφανές νήμα, ενώ πωλούνται επίσης παραλλαγές όπως PETG, PETE και PETT. Τα πλεονεκτήματα του PET περιλαμβάνουν ότι το υλικό δεν απελευθερώνει οσμές κατά την εκτύπωση και είναι 100% ανακυκλώσιμο. (Martel, 2020)

Σύνθετα υλικά

Τα σύνθετα υλικά είναι εξαιρετικά ευεργετικά για την κατασκευή ελαφρών αλλά ισχυρών εξαρτημάτων. Οι ίνες προσθέτουν αντοχή σε ένα εξάρτημα χωρίς να προσθέτουν βάρος, γι' αυτό και αναφερόμαστε στα σύνθετα υλικά ως υλικά ενισχυμένα με ίνες. Υπάρχουν δύο τύποι ενισχύσεων, οι βραχείες ίνες ή οι συνεχείς ίνες. Στην πρώτη περίπτωση, οι τεμαχισμένες ίνες, οι οποίες αποτελούνται από τμήματα μήκους μικρότερου του χιλιοστού, αναμειγνύονται στα παραδοσιακά πλαστικά τρισδιάστατης εκτύπωσης για να αυξήσουν τη δυσκαμψία και σε μικρότερο βαθμό την αντοχή των εξαρτημάτων. Οι τεμαχισμένες ίνες μπορούν να αναμιχθούν με θερμοπλαστικά όπως το νάιλον, το ABS ή το PLA.

Εναλλακτικά, οι ίνες μπορούν να προστίθενται στα θερμοπλαστικά συνεχώς για να καταλήξουν σε ένα ισχυρότερο εξάρτημα. Οι κύριες ίνες που χρησιμοποιούνται στον τομέα της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι οι ίνες άνθρακα, αλλά υπάρχουν και άλλες ίνες όπως οι ίνες γυαλιού ή το Kevlar. (Martel, 2020)

Πειραματικό μέρος

Σκοπός

Σκοπός του πειράματος είναι η διερεύνηση του τρόπου τρισδιάστατης εκτύπωσης υλικού ABS με τον οποίο θα έχουμε τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες σε κάμψη. Συγκεκριμένα θα εξεταστεί αυτό εκτυπώνοντας δοκίμια με διαφορετική τιμή θερμοκρασίας εκτύπωσης στο άκρο του εξωθητή, ταχύτητα εκτύπωσης, διαφορετικό μοτίβο γεμίσματος και με διαφορετική γεωμετρία εκτύπωσης. Το υλικό ABS είναι πολυμερές το οποίο διαθέτει ανώτερα χαρακτηριστικά ροής τήγματος. Έχει υψηλή ανοχή στη θερμότητα, γεγονός που του επιτρέπει να αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες, αλλά εκεί που πραγματικά λάμπει είναι η ανθεκτικότητά του. Αυτό το νήμα είναι ιδανικό για αντικείμενα που χειρίζονται συχνά, πέφτουν ή θερμαίνονται. Προσφέρει αντοχή και εκτυπώνεται σε θερμοκρασίες 215-245°C. Η τεχνολογία εκτύπωσης που χρησιμοποιήθηκε είναι η FDM η οποία βασίζεται στην τήξη και την επιλεκτική εναπόθεση μιας λεπτής ίνας θερμοπλαστικού για τον σχηματισμό αλληπάλληλων στρώσεων οι οποίες και θα δημιουργήσουν το τελικό αντικείμενο. Τέλος οι τιμές των παραμέτρων που επιλέχθηκαν είναι 215°C-230°C-245°C για την θερμοκρασία εξωθητή, 25mm/s-38mm/s-50mm/s για την ταχύτητα εκτύπωσης, ευθύγραμμο-τριγωνικό-κυψελωτό για το μοτίβο γεμίσματος και x-y-z οι άξονες στον οποίο εκτυπώθηκαν. Επίσης έγιναν δύο σετ εκτυπώσεων, ένα με 15% πυκνότητα πλήρωσης(fill density) και ένα με 60% πυκνότητα πλήρωσης(fill density). Ο εκτυπωτής που χρησιμοποιήθηκε στις εργαστηριακές δοκιμές ήταν ο FlashForge Creator 3. Τέλος το πρόγραμμα(slicer) που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Flashprint.

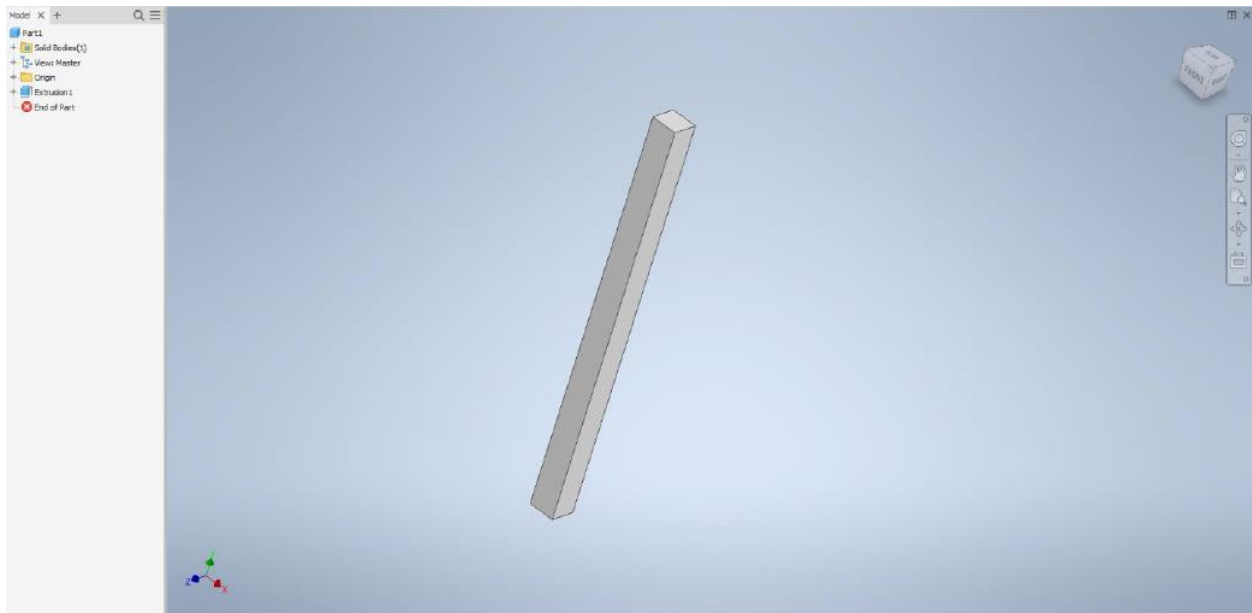
Μεθοδολογία

Η πειραματική διαδικασία ξεκίνησε με τον σχεδιασμό του δοκιμίου στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Inventor Professional 2020. Η μετατροπή του αρχείου αυτού σε .stl ήταν το επόμενο βήμα ούτως ώστε να αναγνωριστεί και να φορτωθεί από το λογισμικό Flashprint του εκτυπωτή Flashforge Creator 3. Έπειτα έγινε εισαγωγή των εκάστοτε ρυθμίσεων στο λογισμικό με σκοπό την εκτύπωση όλων των δοκιμών. Αφότου εκτυπώθηκαν όλα τα δοκίμια ακολούθησε η υποβολή αυτών σε κάμψη.

Οι μετρήσεις οι οποίες προέκυψαν μέσω του προγράμματος excel κατέληξαν σε διαγράμματα ξεχωριστά για το κάθε δοκίμιο αλλά και ένα συγκεντρωτικό. Μέσω των διαγραμμάτων υπολογίστηκαν η τάση και η παραμόρφωση.

Διαδικασία πειράματος

Βήμα 1ο :Σχεδιασμός δοκιμίου διαστάσεων πλάτους 8mm, πάχους 8mm και μήκους 120mm.



Εικόνα 27:Δοκίμιο στο μηχανολογικό σχεδιαστικό πρόγραμμα Inventor.

Βήμα 2ο : Μετατροπή του αρχείου σε .stl ώστε να μπορεί να διαβαστεί και να φορτωθεί στο λογισμικό(FlashPrint) του εκτυπωτή(Flashforge Creator 3).

Βήμα 3ο :Μέσω του λογισμικού του εκτυπωτή ρυθμίστηκαν 9 διαφορετικά προφίλ εκτύπωσης βασισμένα στις εξής παραμέτρους:

- Θερμοκρασία

Θερμοκρασίες εξωθητή: 180°C - 230°C - 245°C

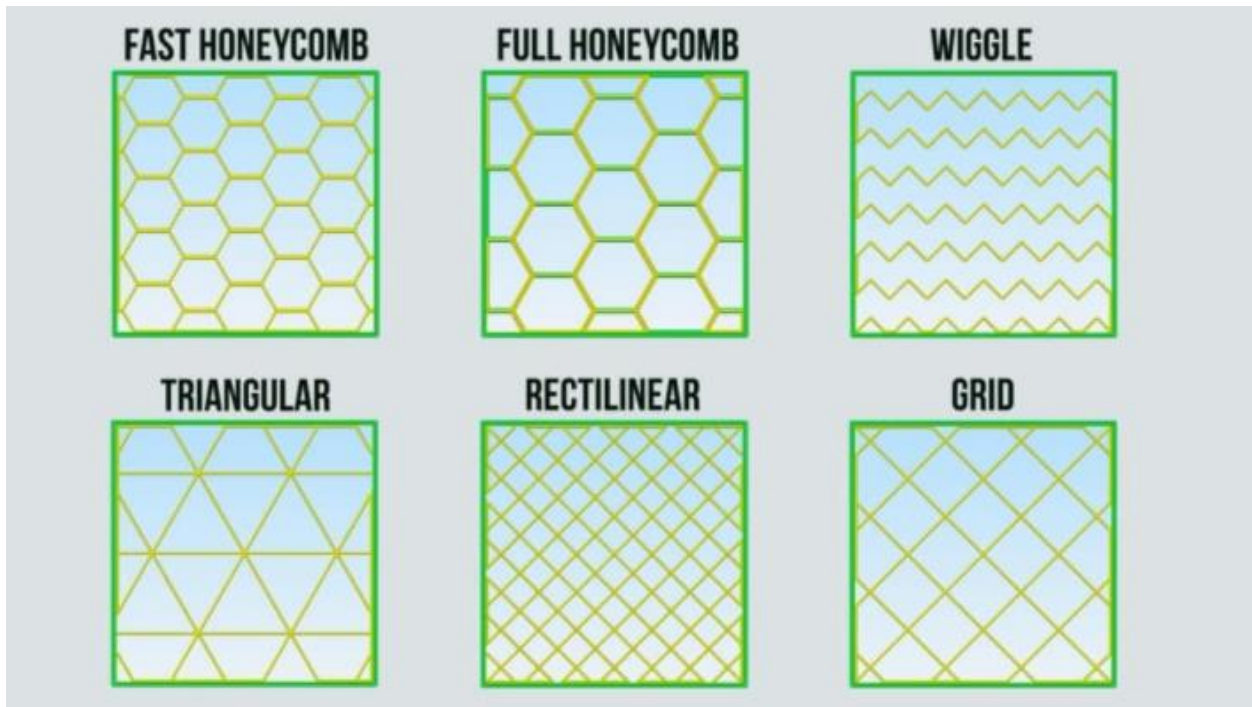
Να σημειωθεί ότι η θερμοκρασία στο τραπέζι του εκτυπωτή ήταν σταθερή στους 120°C

- Ταχύτητα εκτύπωσης

Ταχύτητα εκτύπωσης εξωθητή: 25mm/s - 38mm/s - 50mm/s

- Μοτίβο γεμίσματος

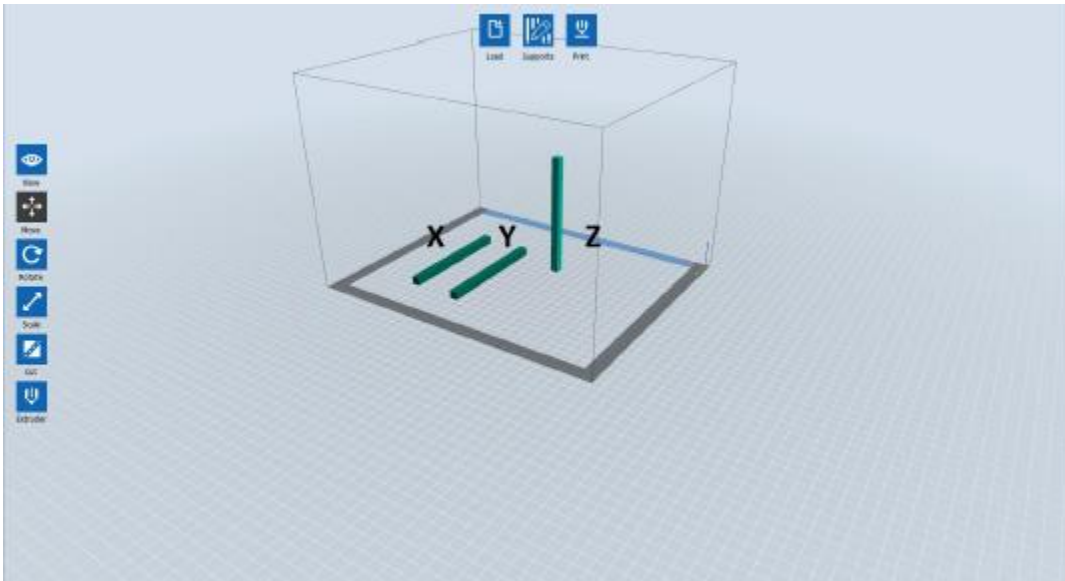
Το εσωτερικό των δοκιμών είχαν τα εξής μοτίβα: Ευθύγραμμο - Τριγωνικό - κυψελωτό



Εικόνα 28: Κοινά εσωτερικά γεμίσματα τρισδιάστατης εκτύπωσης (Simmons, 2021)

- Τρόπος εκτύπωσης

Άξονας κατά τον οποίον εκτυπώθηκαν: X - Y - Z



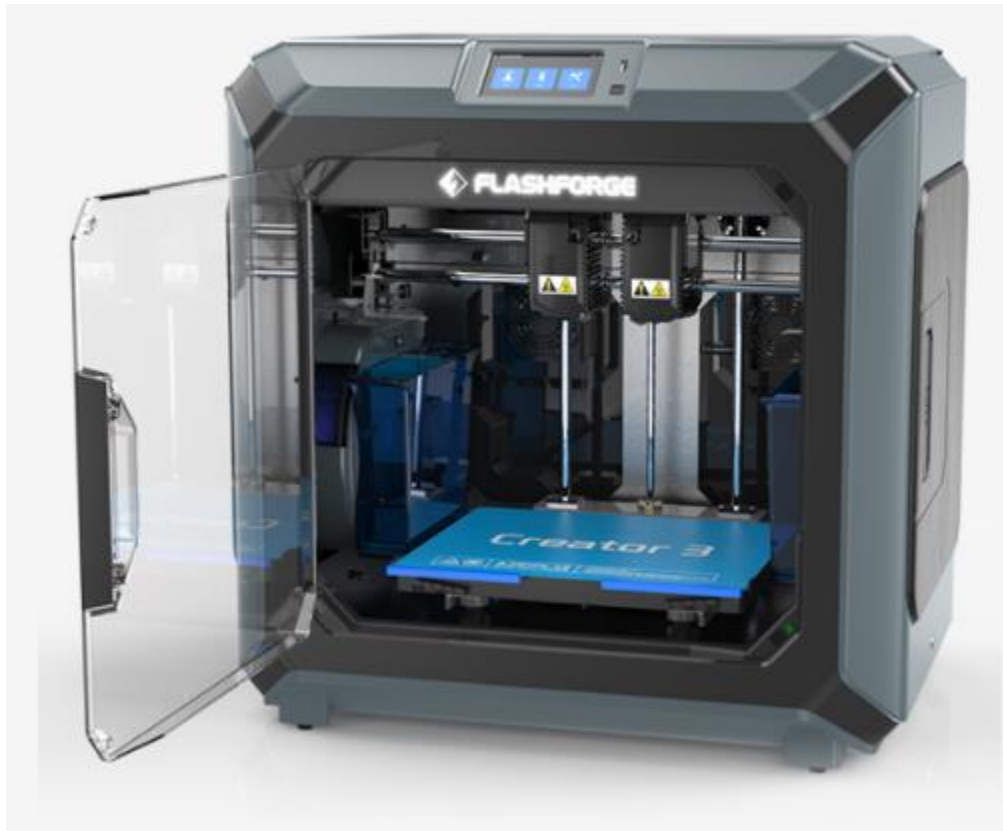
Εικόνα 29: Τρόπος εκτύπωσης των δοκιμίων

Σύμφωνα με αυτή τη παράμετρο η εκτύπωση στον X και Y άξονα είναι με τον ίδιο τρόπο, όμως κατά την διαδικασία ελέγχου κάμψης τα δοκίμια που έχουν ως παράμετρο Y θα περιστραφούν κατά 90°.

Βήμα 4ο : Εκτύπωση δοκιμίων

Ο εκτυπωτής που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο FlashForge Creator 3 με σύστημα δύο κεφαλών με ανεξάρτητη κίνηση και δυνατότητα ανάμειξης υλικών. Επιφάνεια εκτύπωσης 300mm x 250mm x 200mm. Δυνατότητα

εκτύπωσης υλικών PLA/ ABS/ TPU/ PVA/ HIPS/ PETG/ WPC/ Nylon και πάχους 1.75mm. Creator 3, ως επιτραπέζιος τρισδιάστατος εκτυπωτής βιομηχανικού επιπέδου παρέχει λειτουργικό σχεδιασμό υψηλής απόδοσης εξαρτήματα με προηγμένα υλικά μηχανικής. Ο άνθρακας ινών παρέχει σημαντικά βελτιωμένη ακαμψία, αντοχή και αντοχή στη θερμότητα με εξαιρετική πρόσφυση στρώματος. (flashforge, n.d.)



Εικόνα 30: Εκτυπωτής Flashforge Creator 3. (flashforge, n.d.)



Εικόνα 31: Κατά την διαδικασία εκτύπωσης δοκιμίου.

Βήμα 5ο: Επιλογή των δοκιμίων

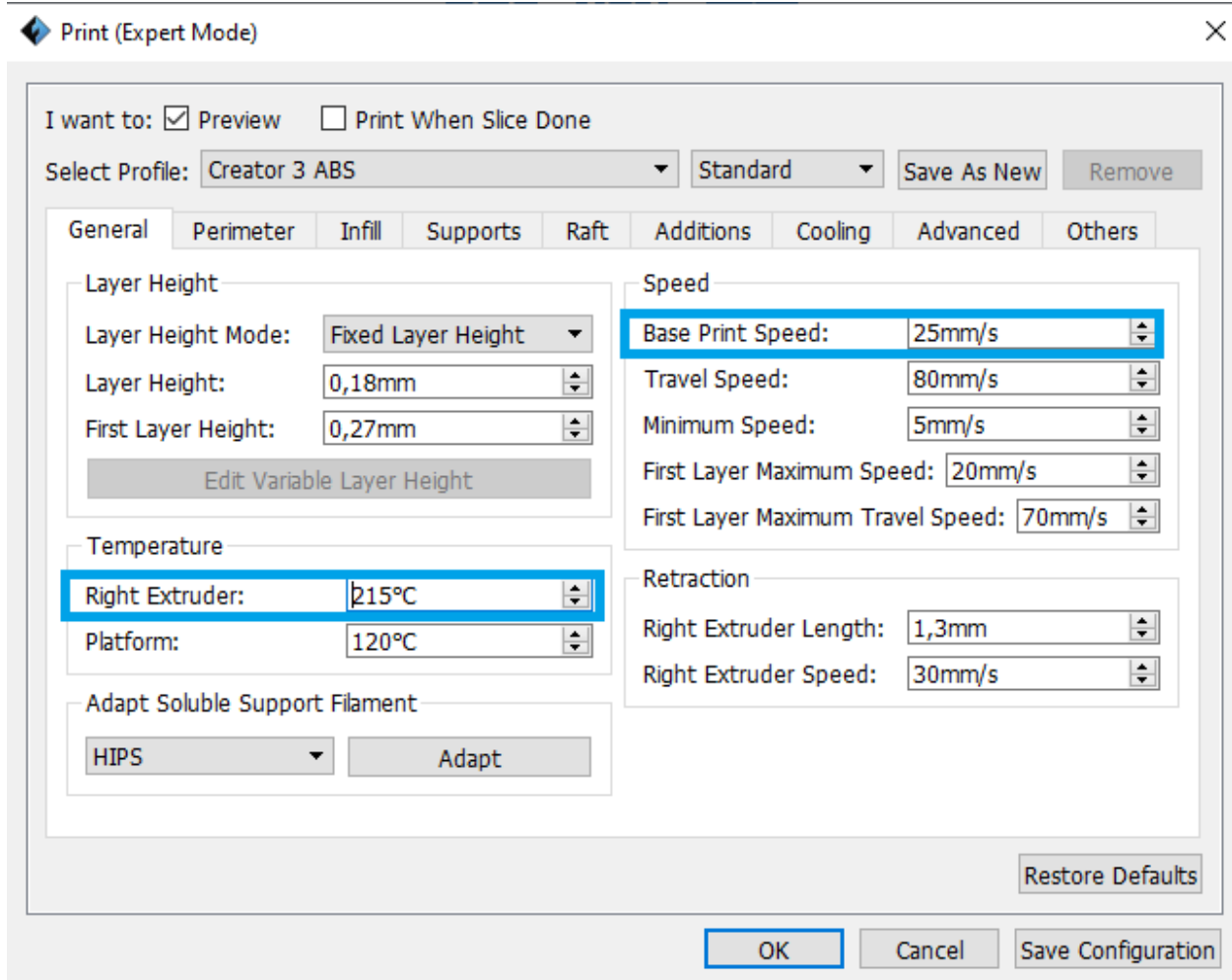
Η επιλογή έγινε σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα με βάση τις τέσσερις παραπάνω παραμέτρους:

Α.ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ(°C)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ(mm/s)	ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΓΕΜΙΣΜΑ	ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ
1	215	25	Ευθύγραμμο	X
2	215	38	Κυψελωτό	Y
3	215	50	Τριγωνικό	Z
4	230	25	Κυψελωτό	Z
5	230	38	Τριγωνικό	X
6	230	50	Ευθύγραμμο	Y
7	245	25	Τριγωνικό	Y
8	245	38	Ευθύγραμμο	Z
9	245	50	Κυψελωτό	X

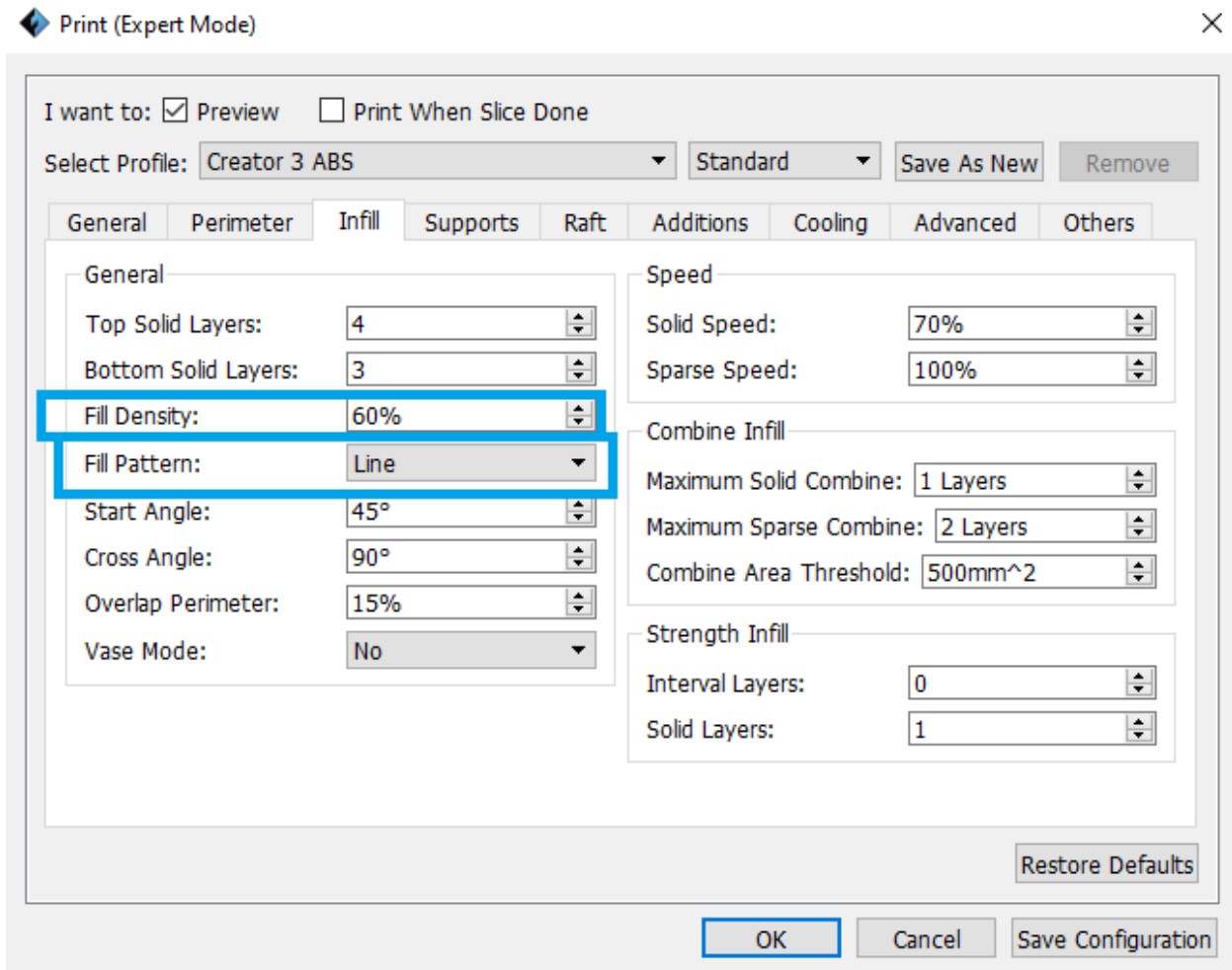
Πίνακας 2: Παράμετροι επιλογής δοκιμίου

Τα δοκίμια επιλέχθηκαν με βάση τον πειραματικό σχεδιασμό (DOE). Στο το συγκεκριμένο πείραμα για τον εντοπισμό του καλύτερου συνδυασμού παραμέτρων και την εύρεση του δοκιμίου με τις βέλτιστες μηχανικές ιδιότητες χρειάστηκαν στο σύνολο 81 πειράματα και από 9 δοκίμια με 4 διαφορετικές παραμέτρους και από 3 τιμές η κάθε παράμετρος $3^4 = 81$.

Οι σειρές εκτυλώσεων με 60% και 15% γέμισμα(fill density) έγινε με βάση τις παρακάτω βασικές παραμέτρους:



Εικόνα 32:Γενικές ρυθμίσεις προγράμματος Flashprint

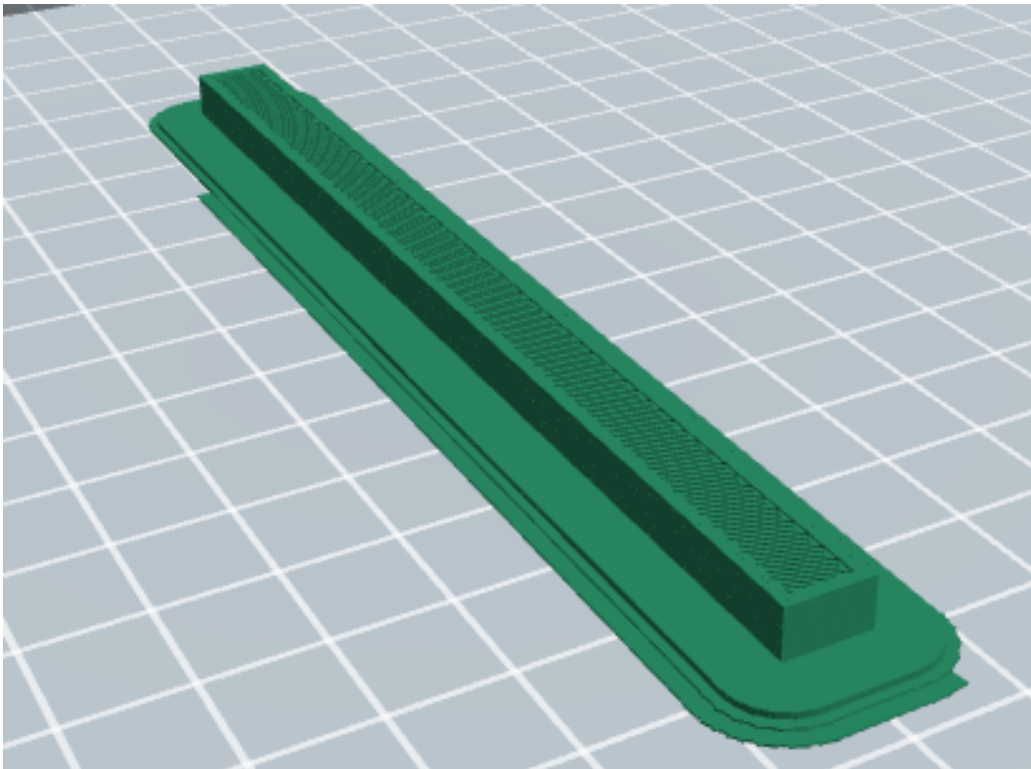


Εικόνα 33: Ρυθμίσεις γεμίματος προγράμματος Flashprint

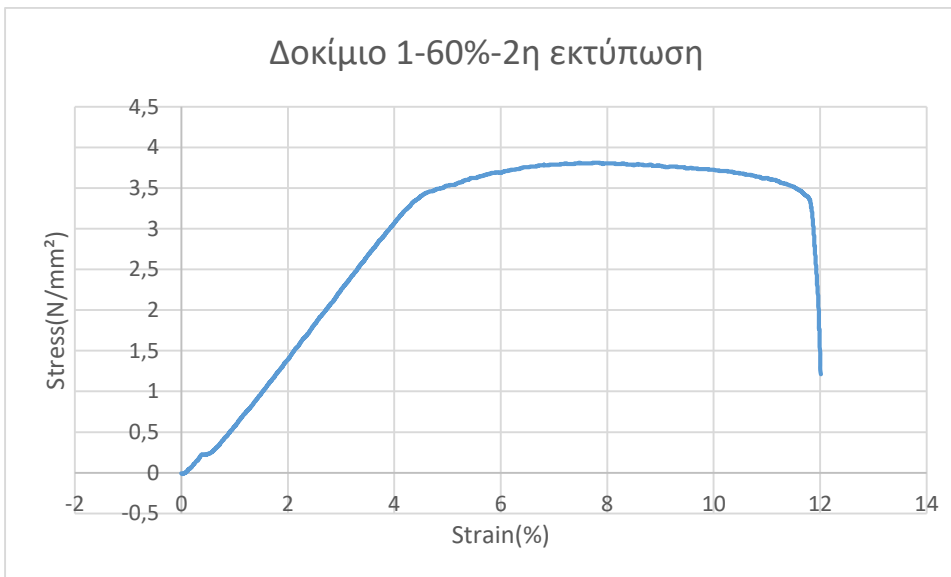
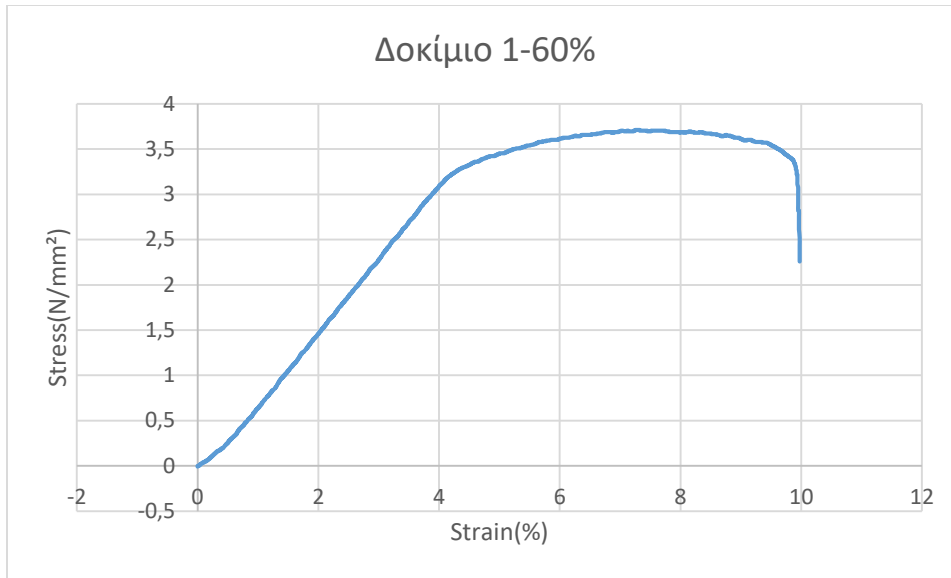
Όπως φαίνεται και στις δύο παραπάνω εικόνες οι παράμετροι οι οποίες διαφοροποιούνται σε κάθε εκτύπωση είναι η θερμοκρασία εξωθητή, η ταχύτητα εκτύπωσης, Fill Density και Fill Pattern και η τοποθέτηση κατά την εκτύπωση.

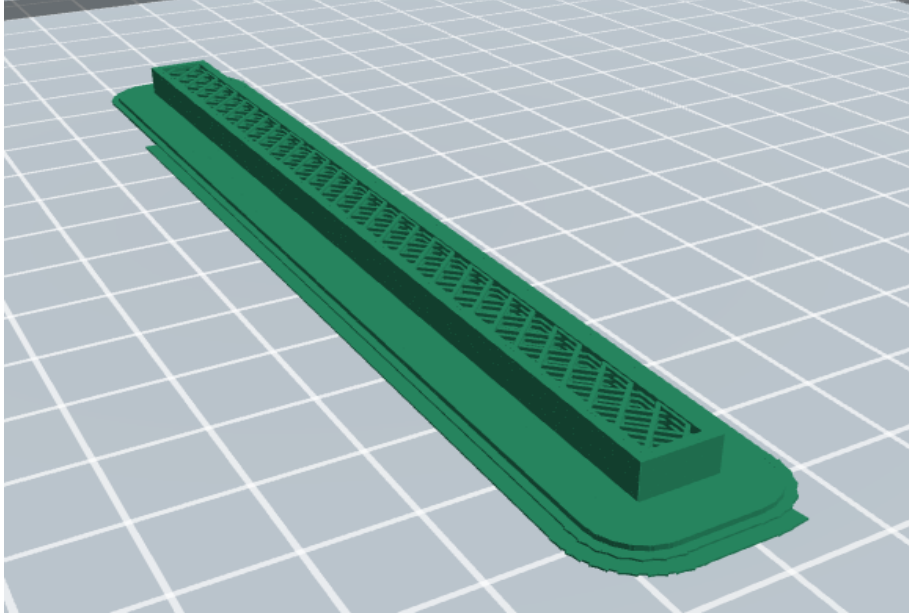
Δοκίμιο 1°

- Θερμοκρασία εξωθητή: 215°C
- Ταχύτητα εκτύπωσης: 25 mm/s
- Fill Density: 60% και 15%
- Fill Pattern: Line
- Τοποθέτηση: Χ άξονα

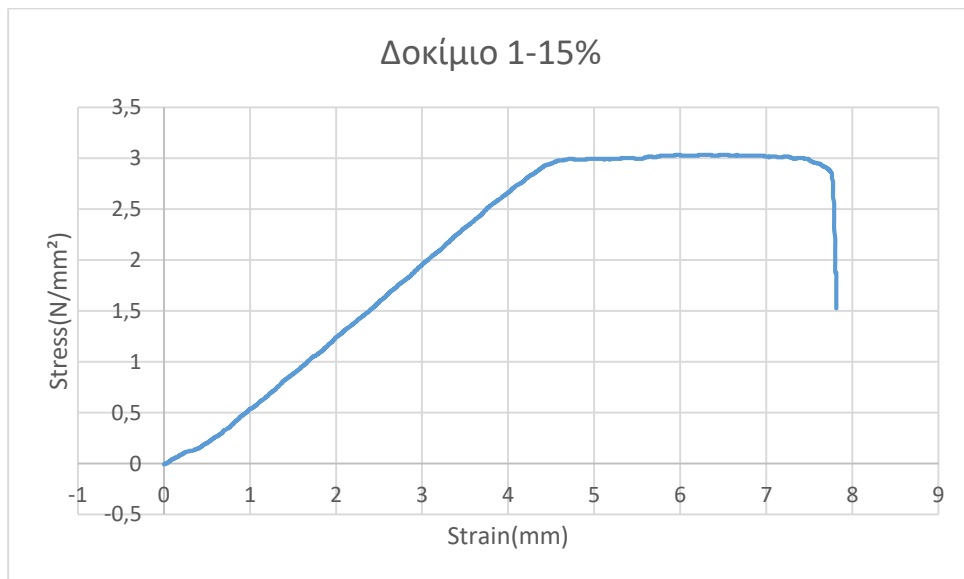


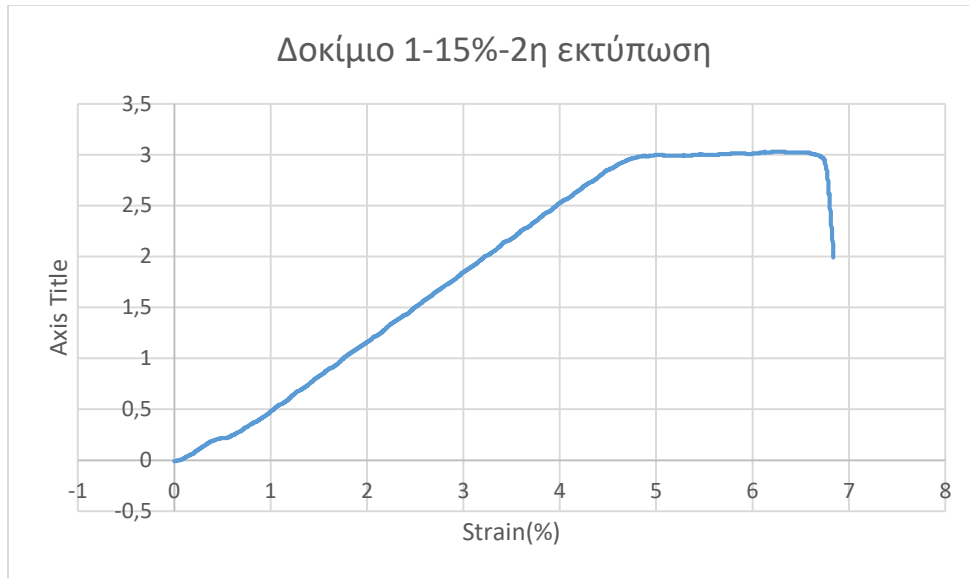
Εικόνα 34: Δοκίμιο 1 με 60% infill.





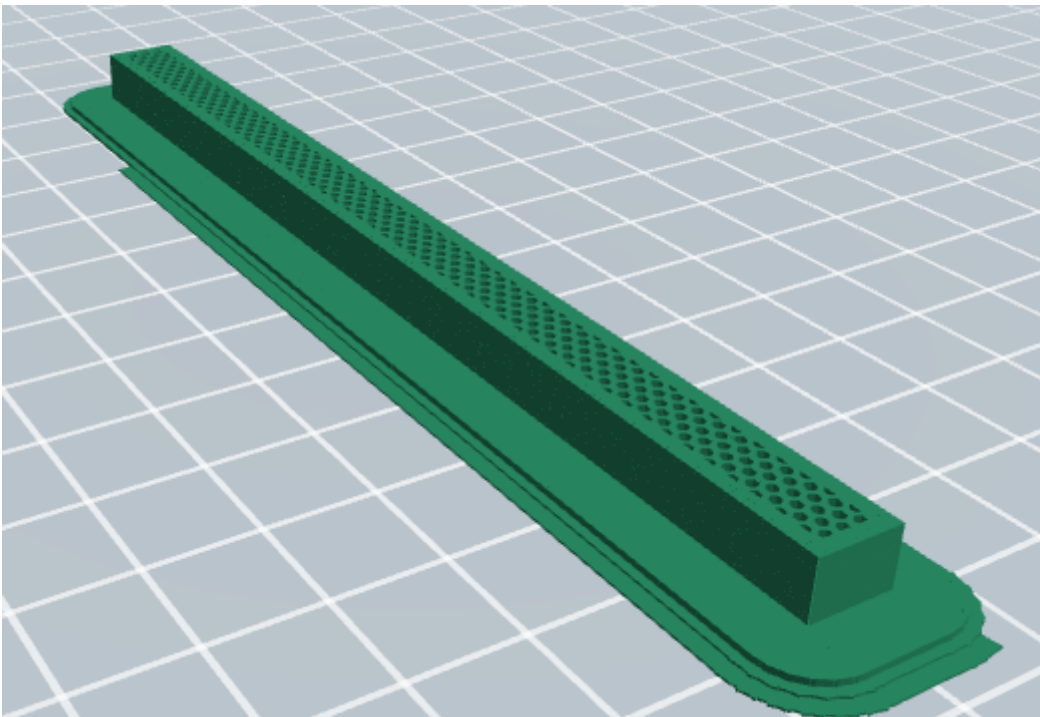
Εικόνα 35: Δοκίμιο 1 με 15% infill.



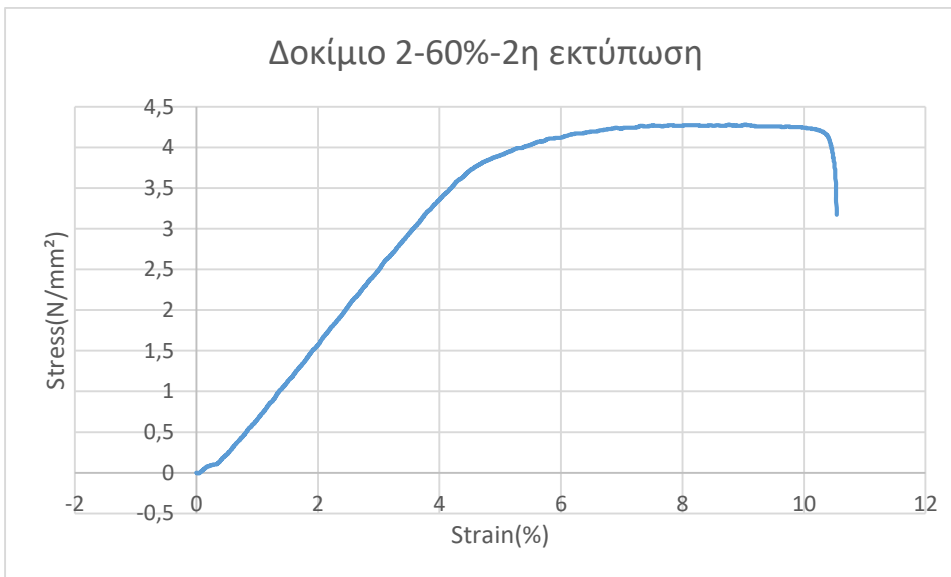
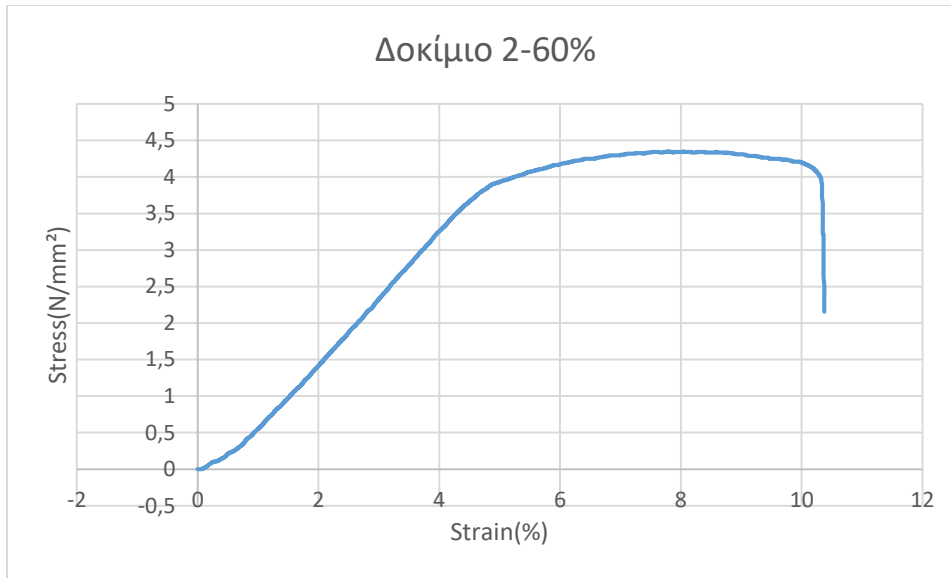


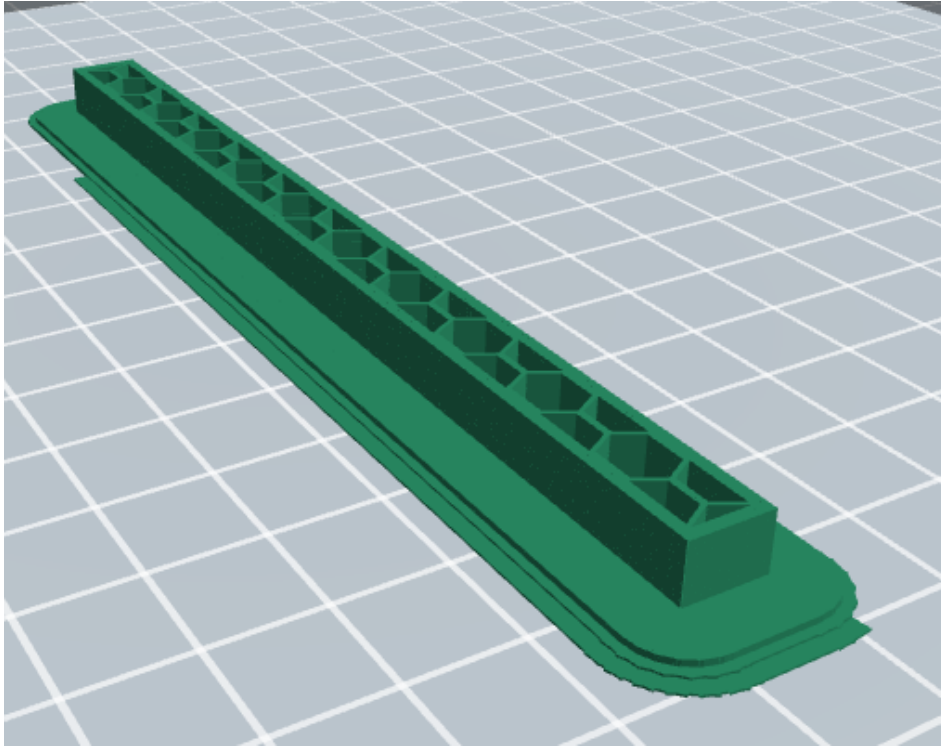
Δοκίμιο 2°

- Θερμοκρασία εξωθητή: 215°C
- Ταχύτητα εκτύπωσης: 38 mm/s
- Fill Density: 60% και 15%
- Fill Pattern: Hexagon
- Τοποθέτηση: Υ άξονα

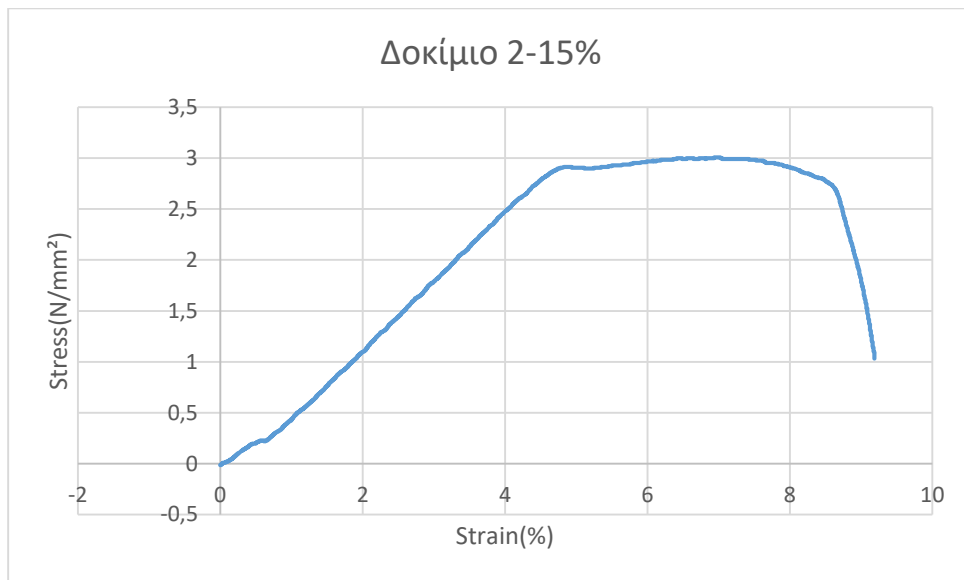


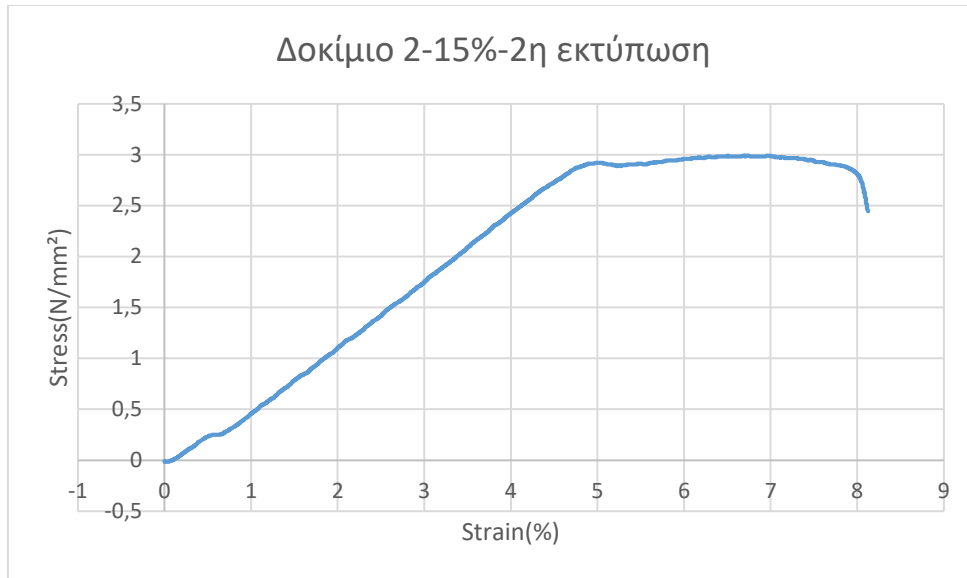
Εικόνα 36: Δοκίμιο 2 με 60% infill.





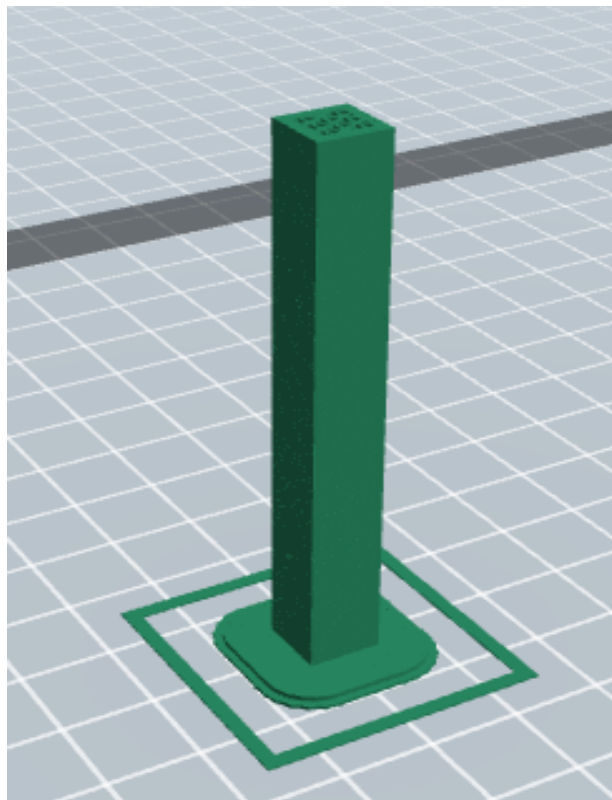
Εικόνα 37: Δοκίμο 2 με 15% infill.



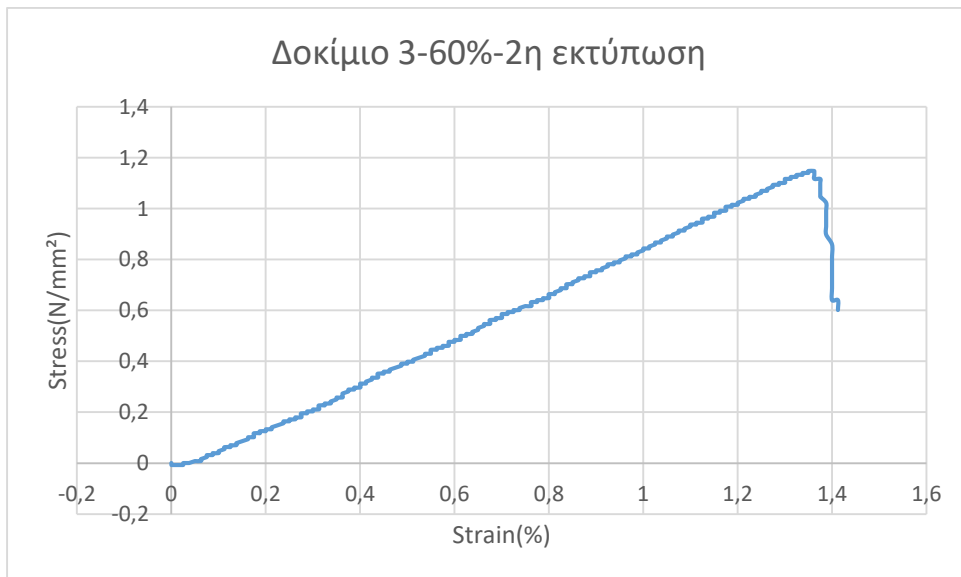
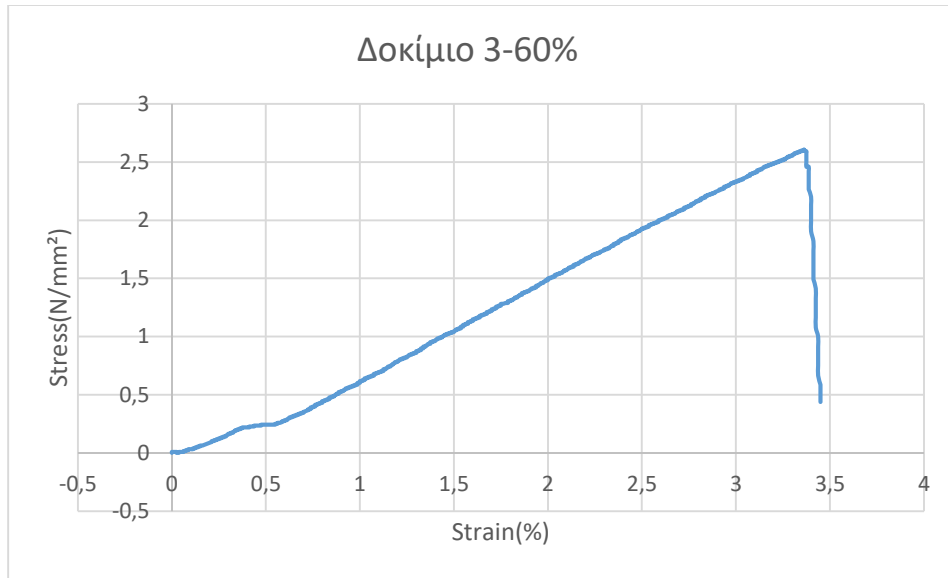


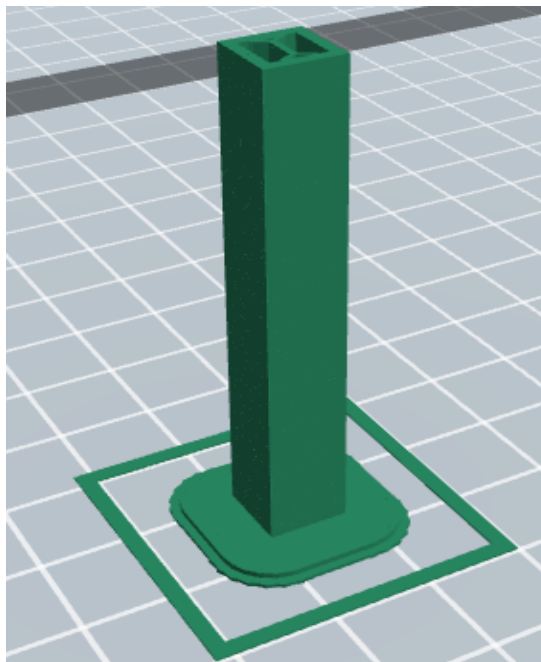
Δοκίμιο 3°

- Θερμοκρασία εξωθητή: 215°C
- Ταχύτητα εκτύπωσης: 50 mm/s
- Fill Density: 60% και 15%
- Fill Pattern: Triangle
- Τοποθέτηση: Z άξονα

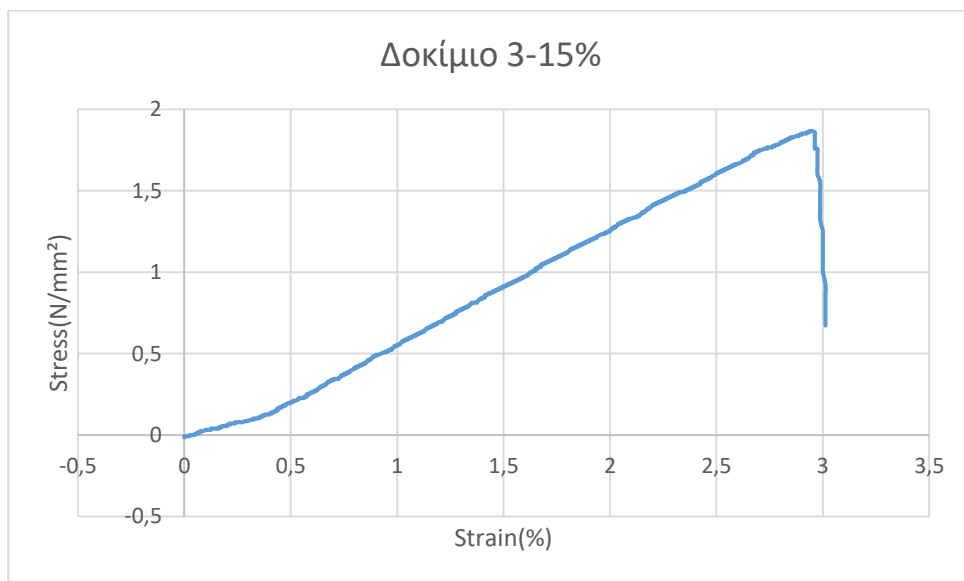


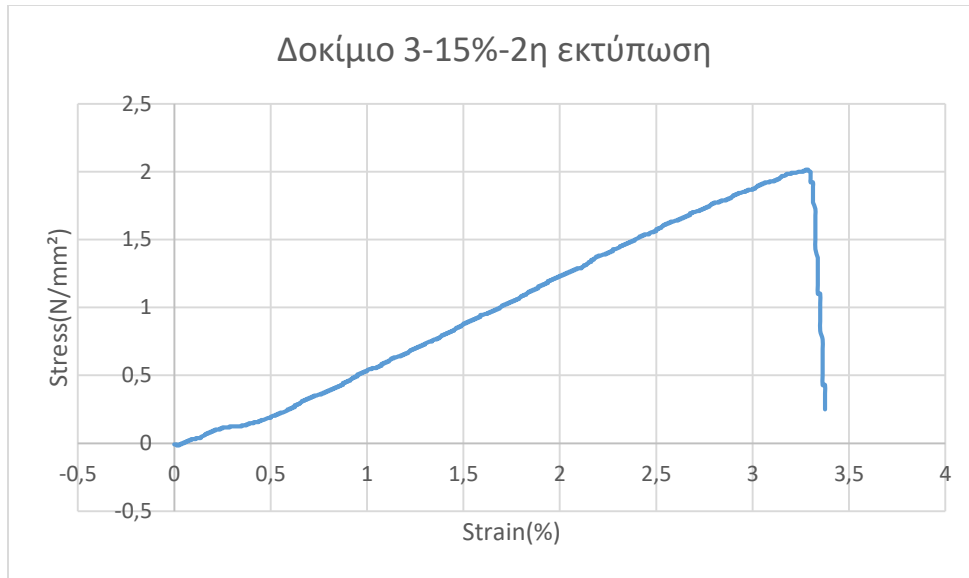
Εικόνα 38: Δοκίμιο 3 με 60% infill.





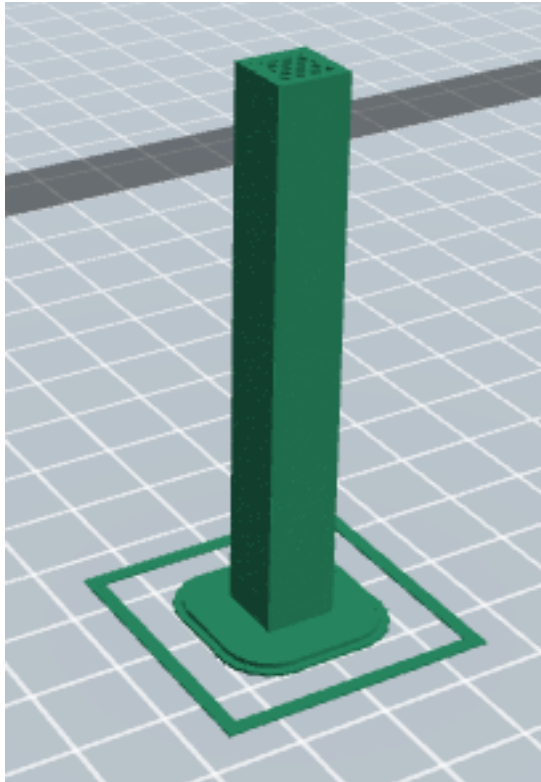
Εικόνα 39: Δοκίμο 3 με 15% infill.



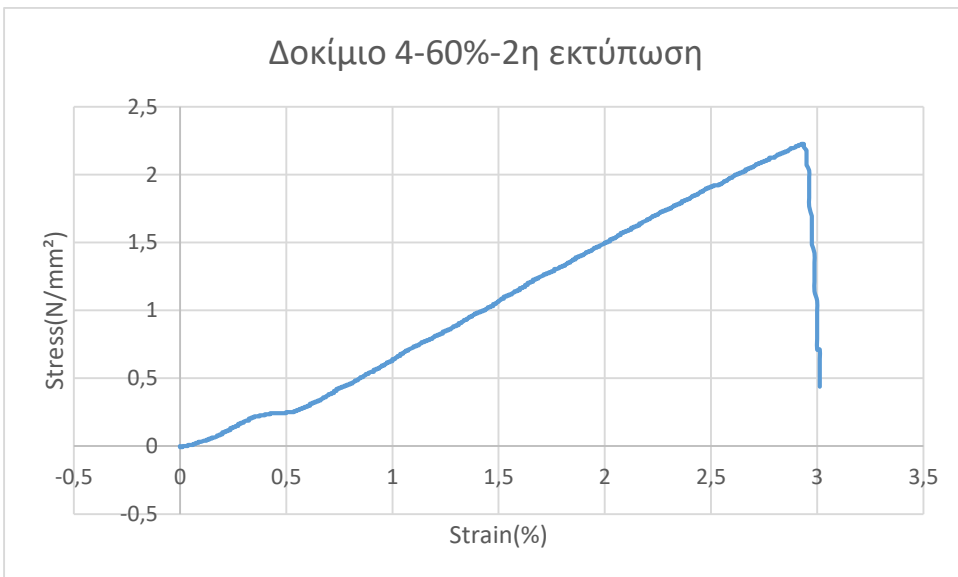
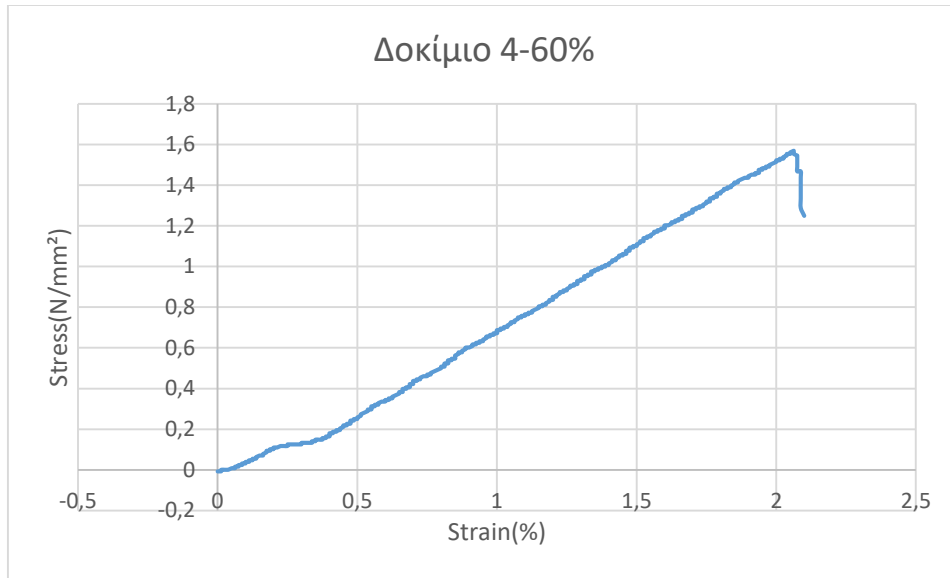


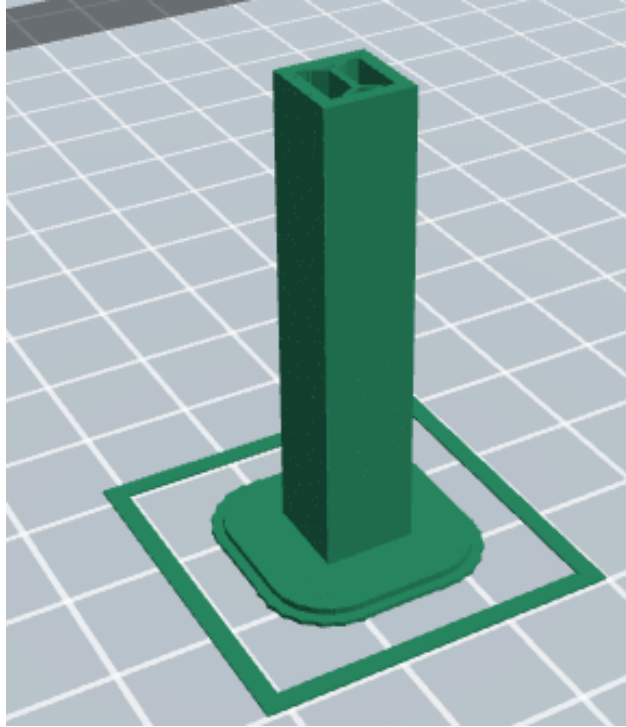
Δοκίμιο 4°

- Θερμοκρασία εξωθητή:230°C
- Ταχύτητα εκτύπωσης:25 mm/s
- Fill Density:60% και 15%
- Fill Pattern: Hexagon
- Τοποθέτηση:Z άξονα

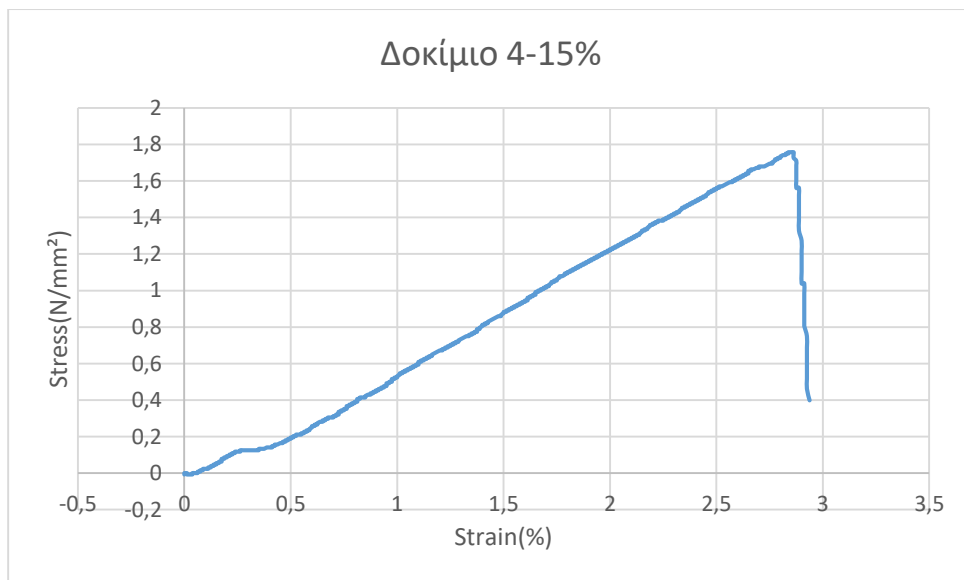


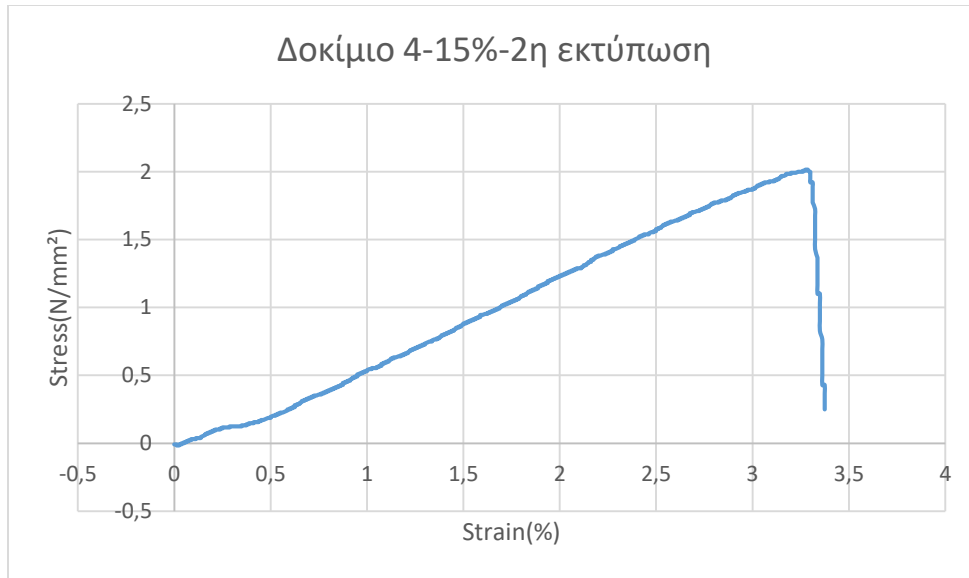
Εικόνα 40:Δοκίμιο 4 με 60% infill.





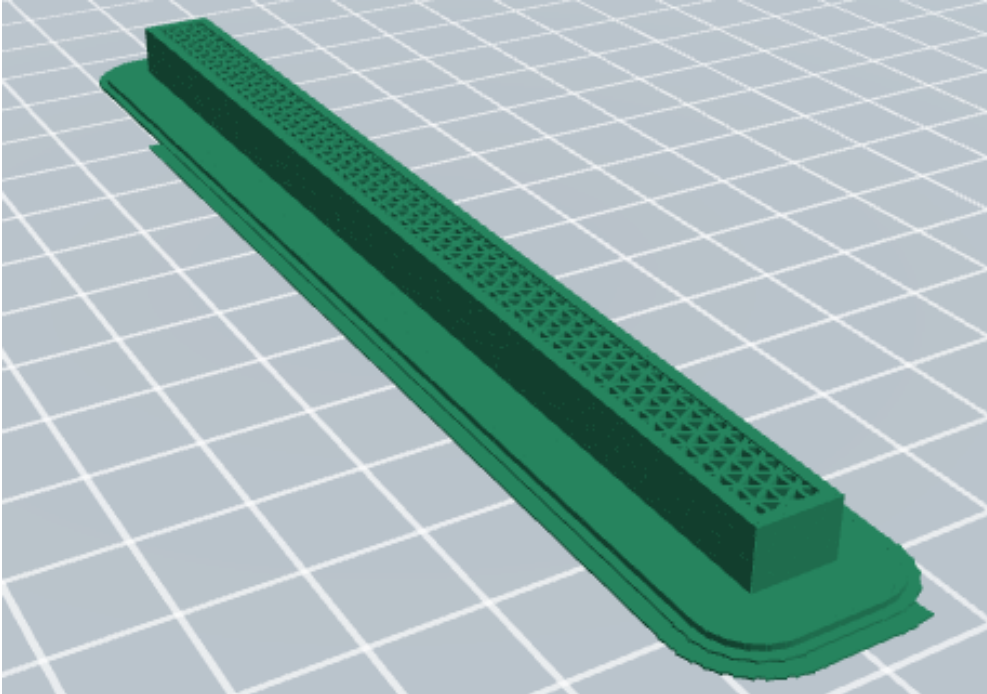
Εικόνα 41: Δοκίμιο 4 με 15% infill.



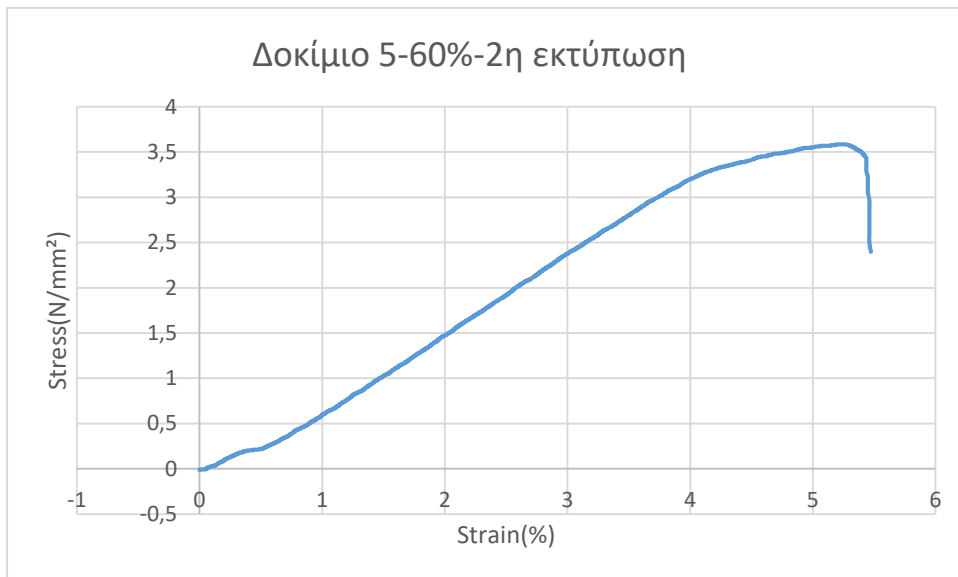
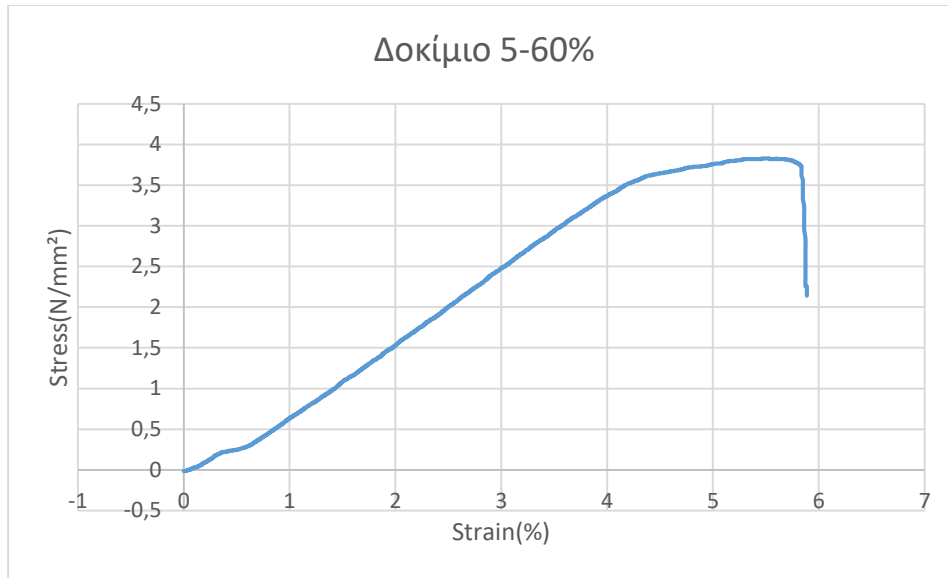


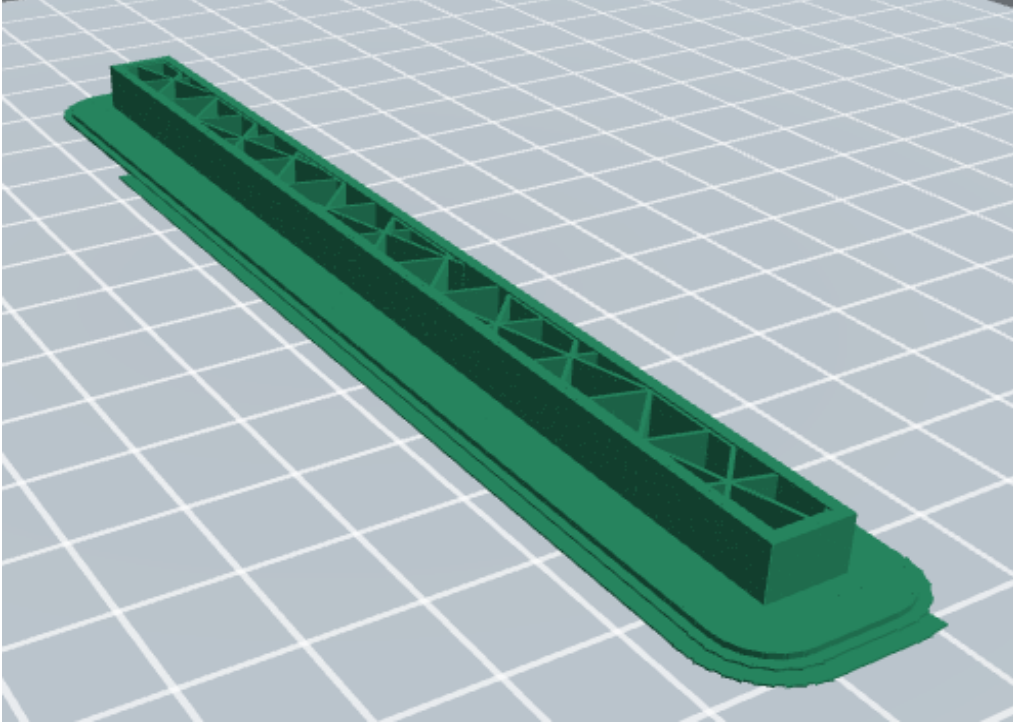
Δοκίμιο 5°

- Θερμοκρασία εξωθητή: 230°C
- Ταχύτητα εκτύπωσης: 38 mm/s
- Fill Density: 60% και 15%
- Fill Pattern: Triangle
- Τοποθέτηση: Χ άξονα

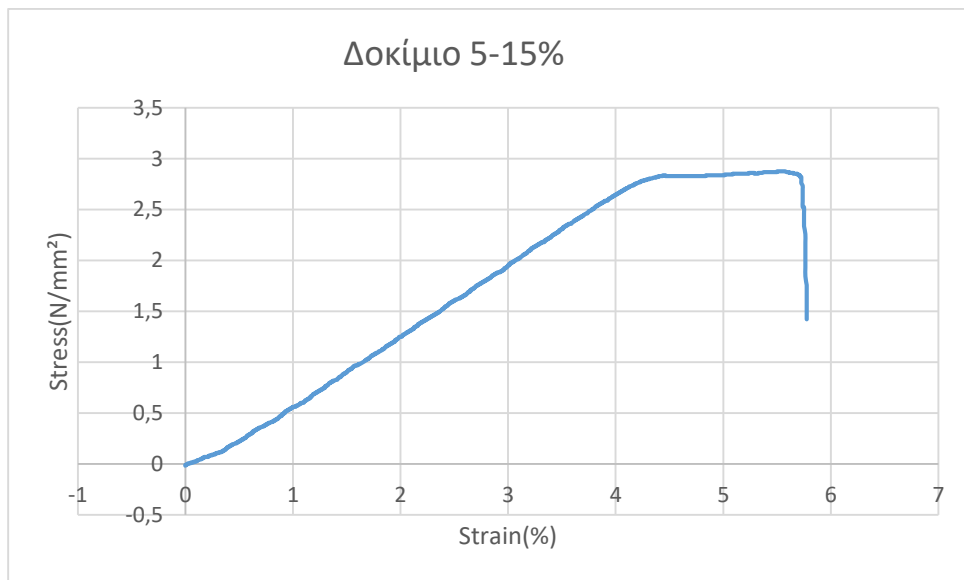


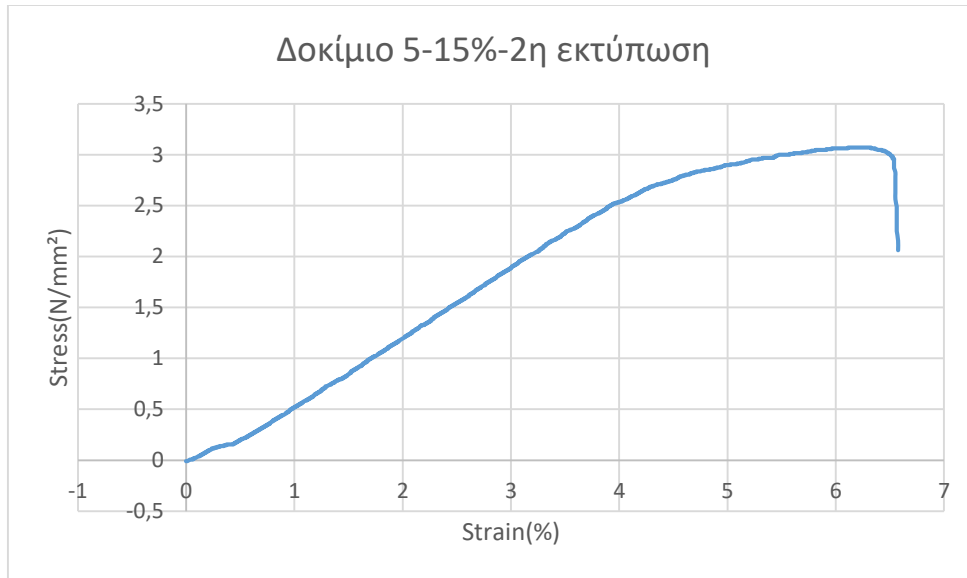
Εικόνα 42: Δοκίμιο 5 με 60% infill.





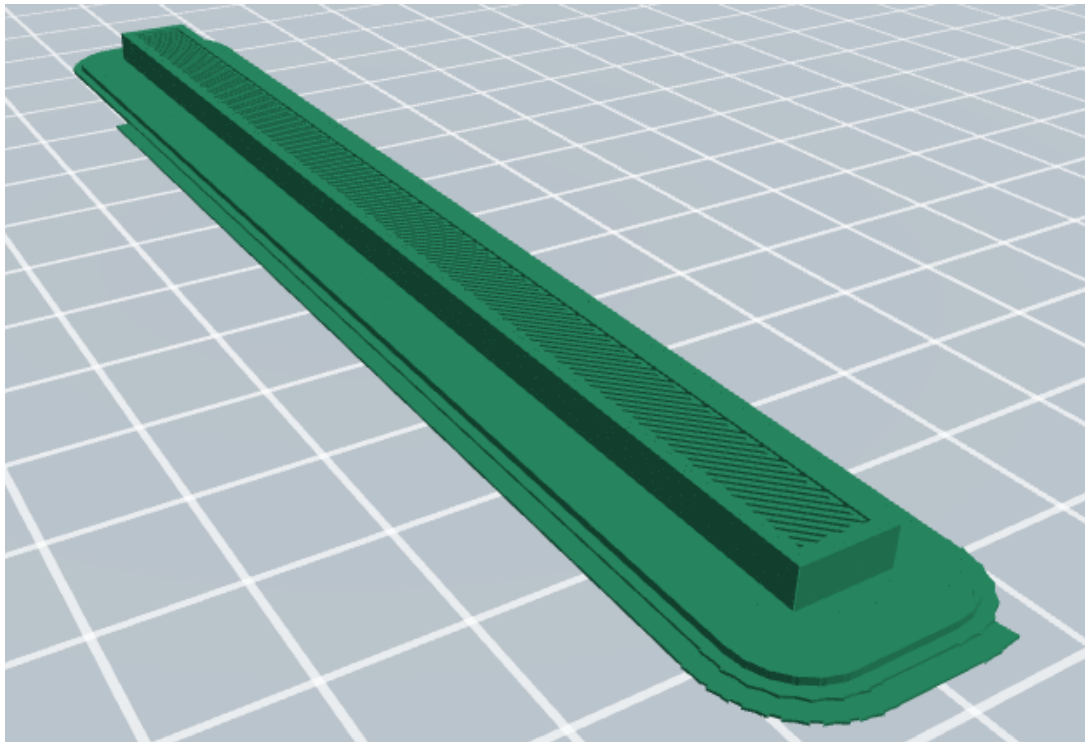
Εικόνα 43: Δοκίμο 5 με 15% infill.



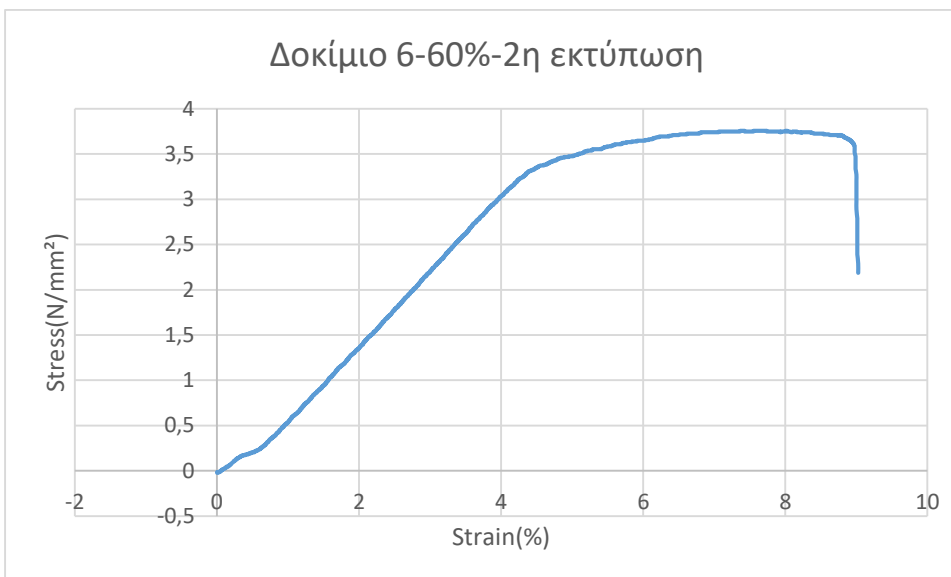
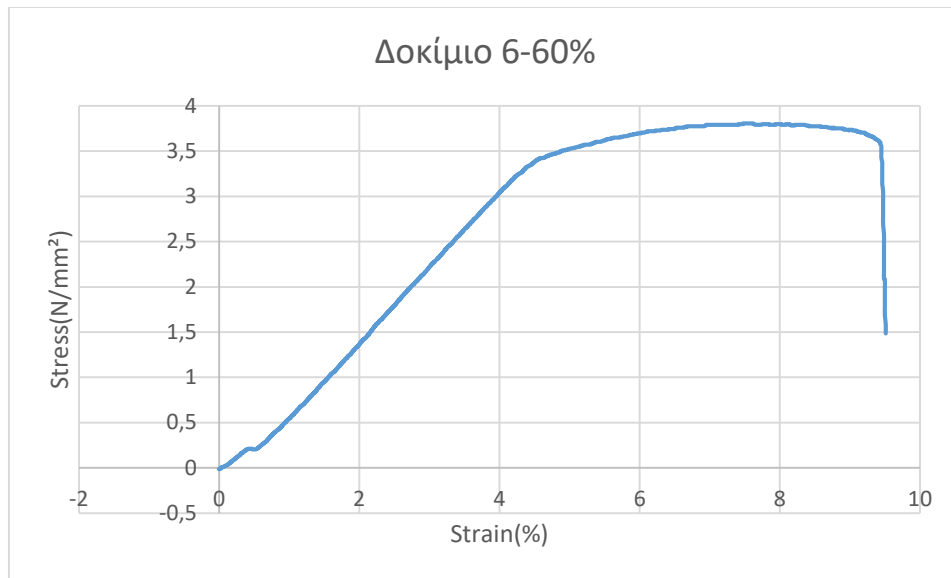


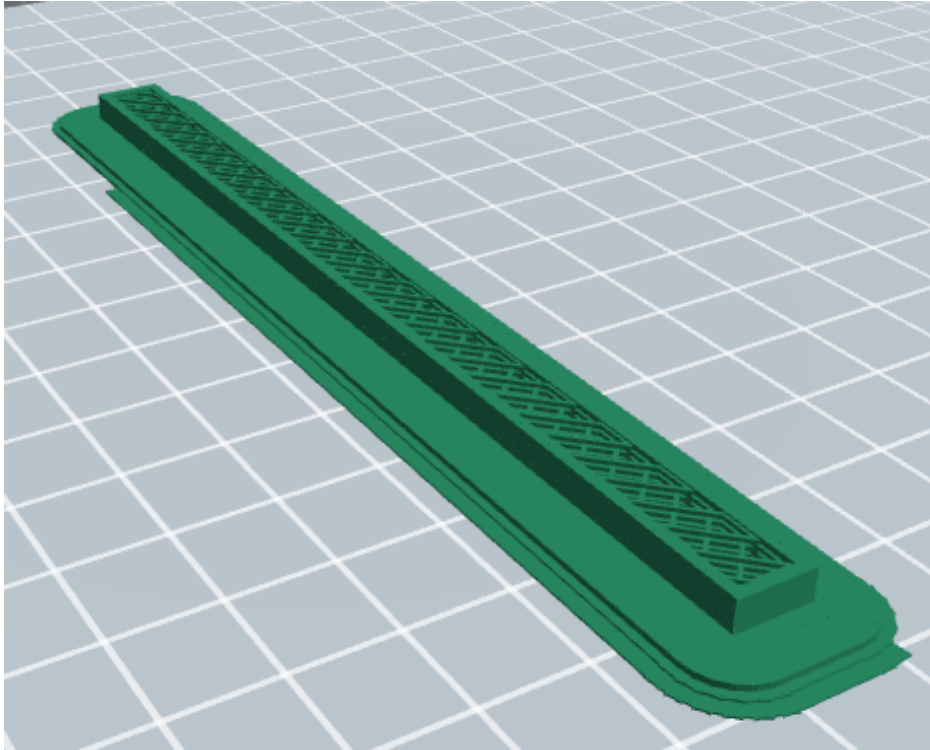
Δοκίμιο 6°

- Θερμοκρασία εξωθητή: 230°C
- Ταχύτητα εκτύπωσης: 50 mm/s
- Fill Density: 60% και 15%
- Fill Pattern: Line
- Τοποθέτηση: Υ άξονα

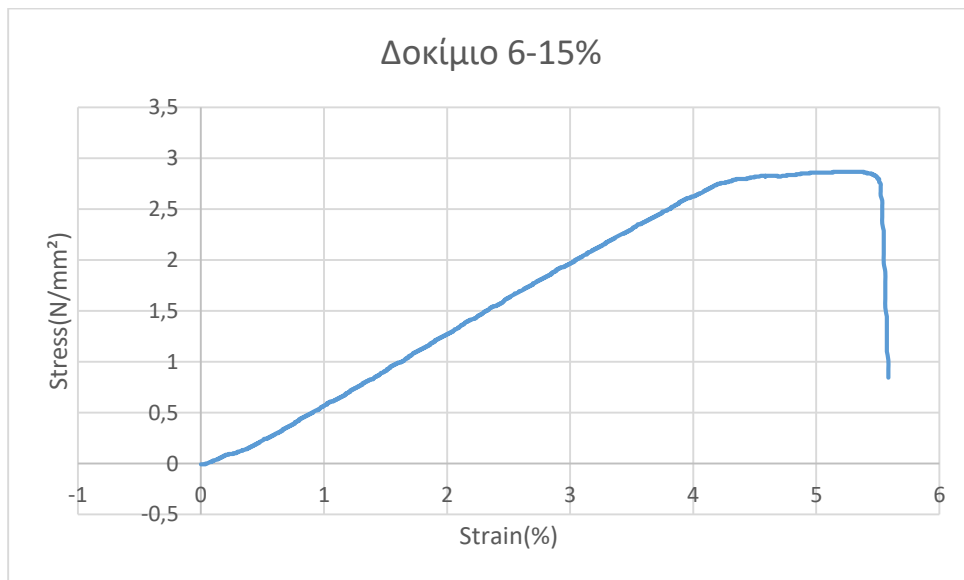


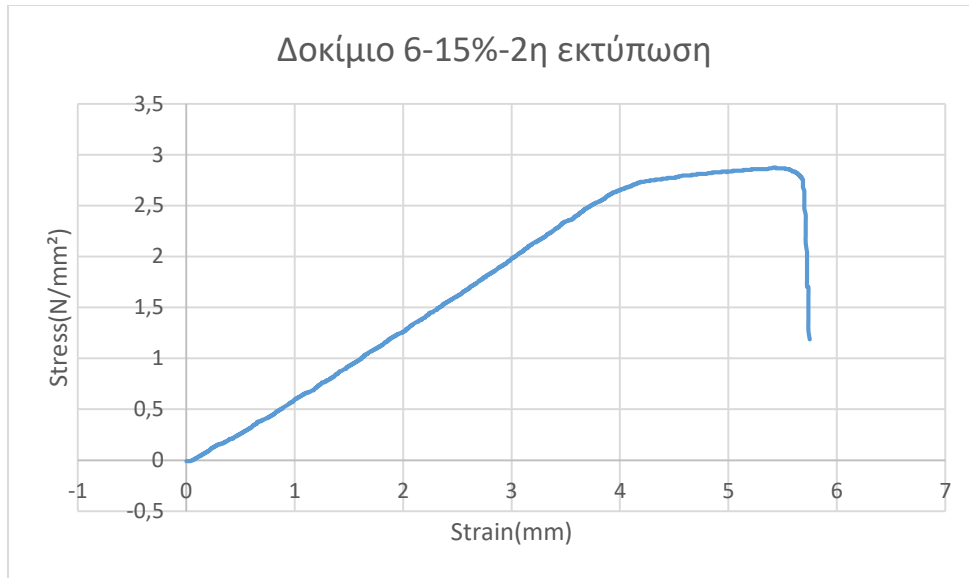
Εικόνα 44: Δοκίμιο 6 με 60% infill.





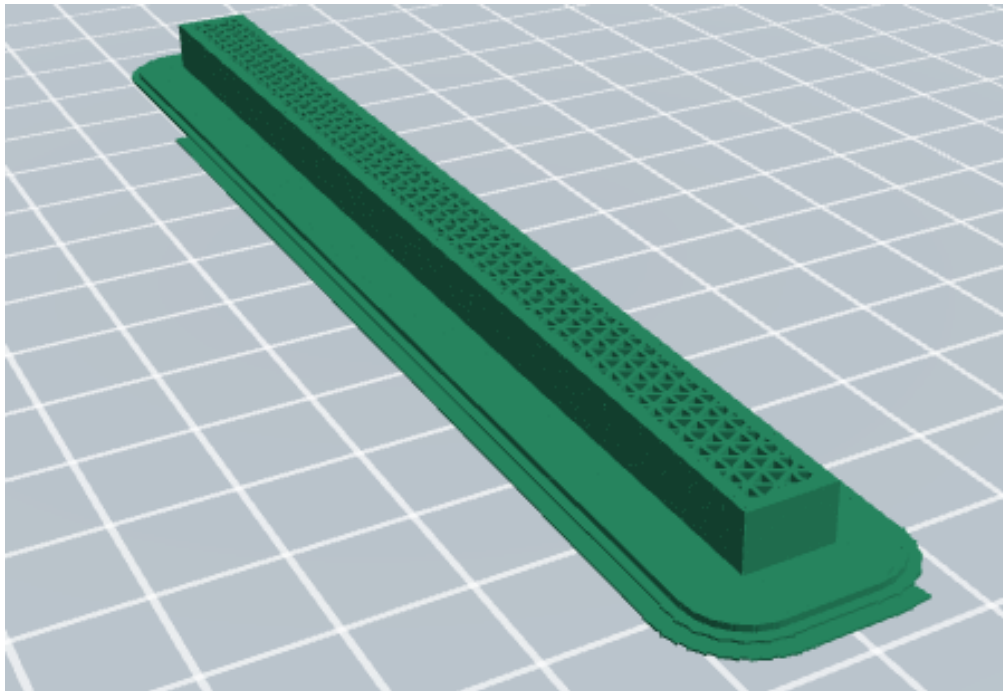
Εικόνα 45: Δοκίμο 6 με 15% infill.



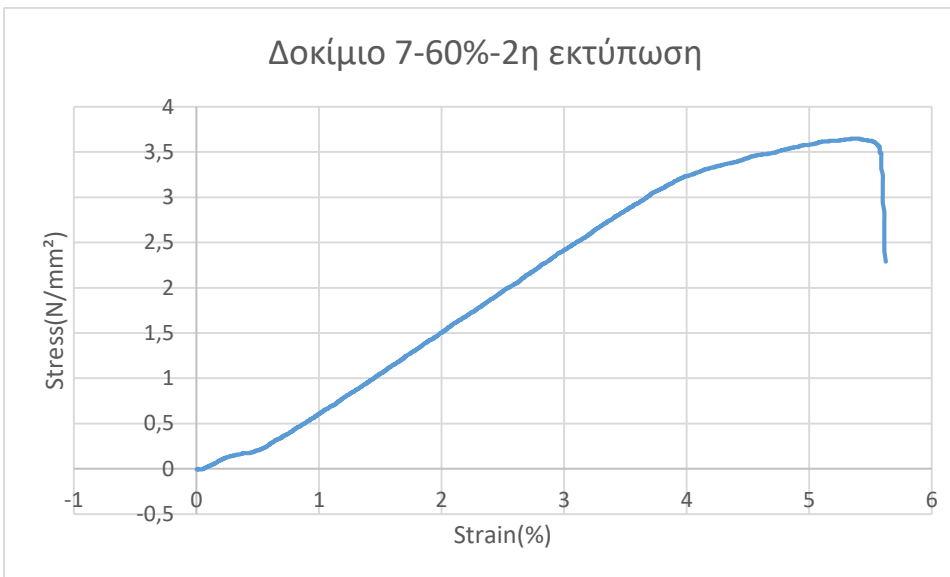
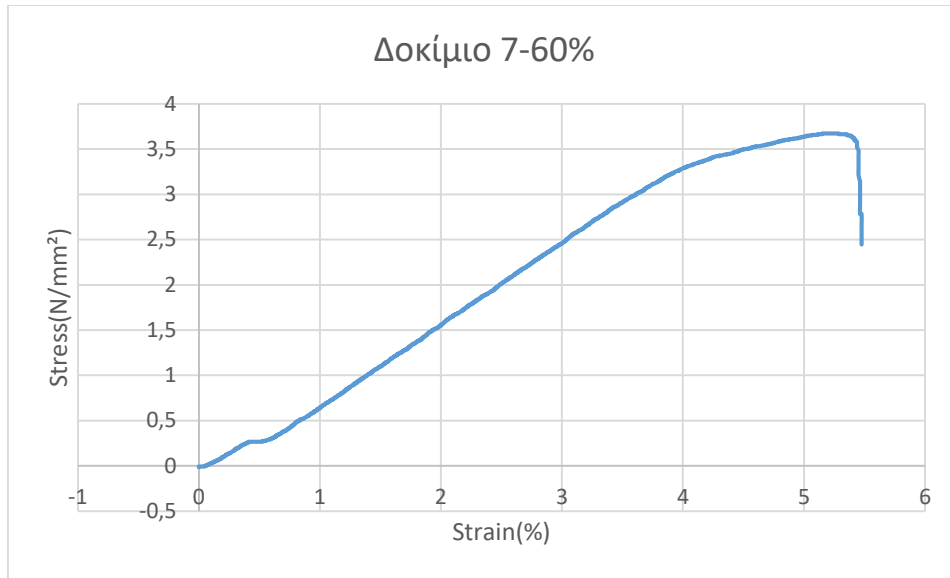


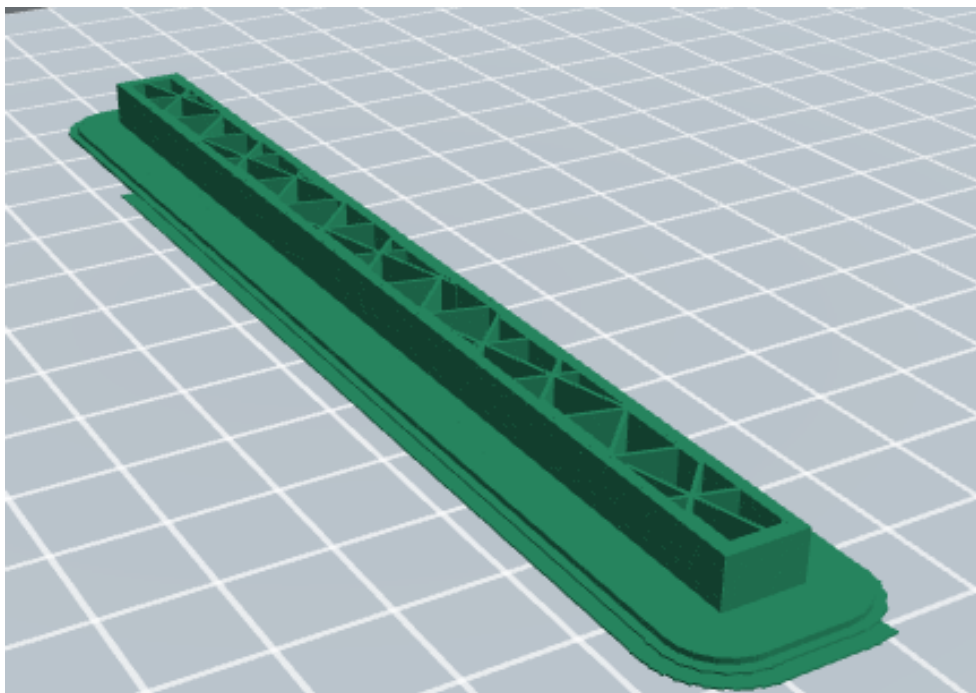
Δοκίμιο 7°

- Θερμοκρασία εξωθητή: 245°C
- Ταχύτητα εκτύπωσης: 25 mm/s
- Fill Density: 60% και 15%
- Fill Pattern: Triangle
- Τοποθέτηση: Υ άξονα

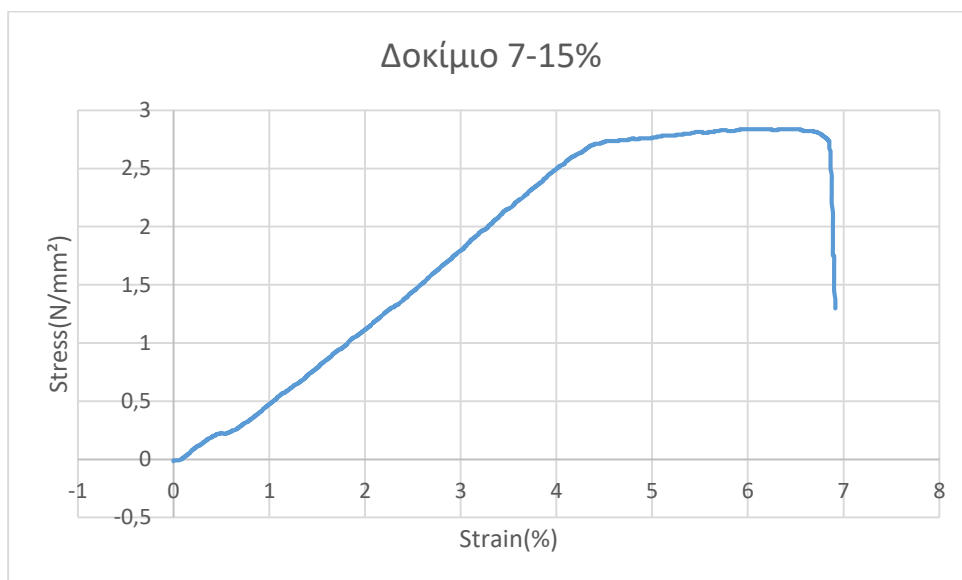


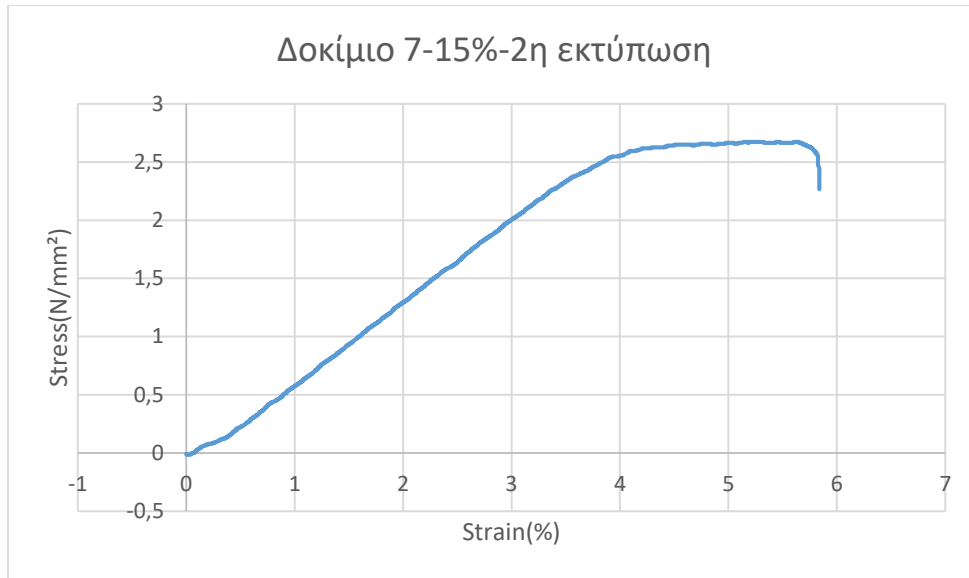
Εικόνα 46: Δοκίμιο 7 με 60% infill.





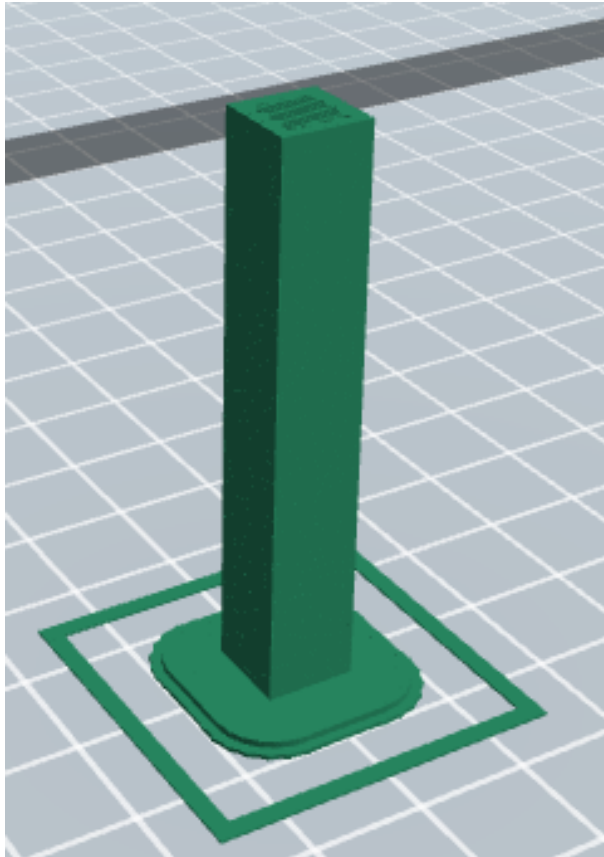
Εικόνα 47: Δοκίμο 7 με 15% infill.



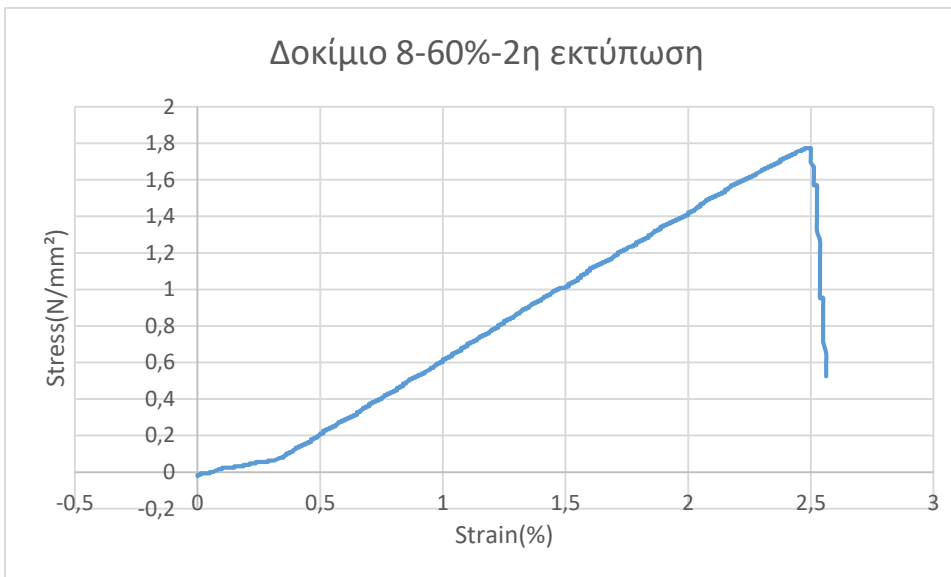
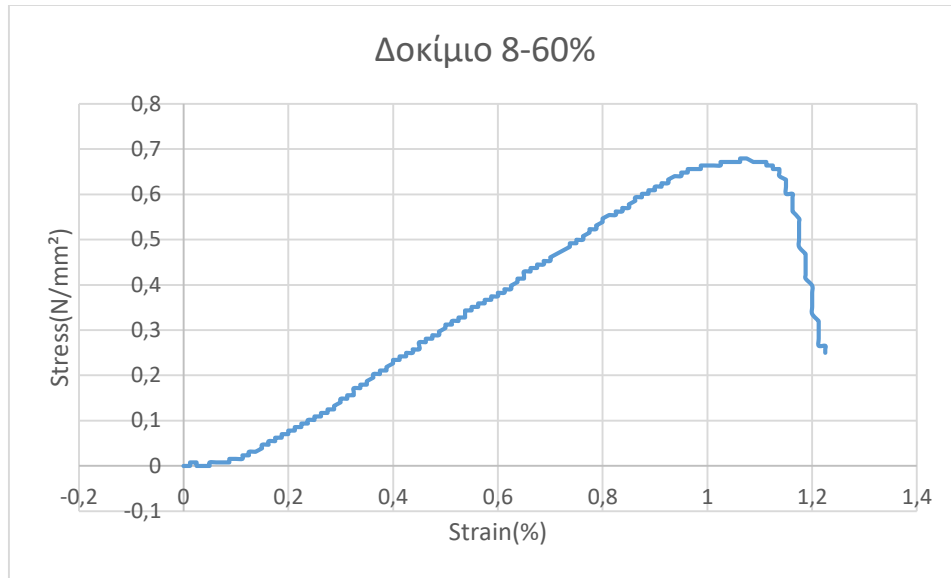


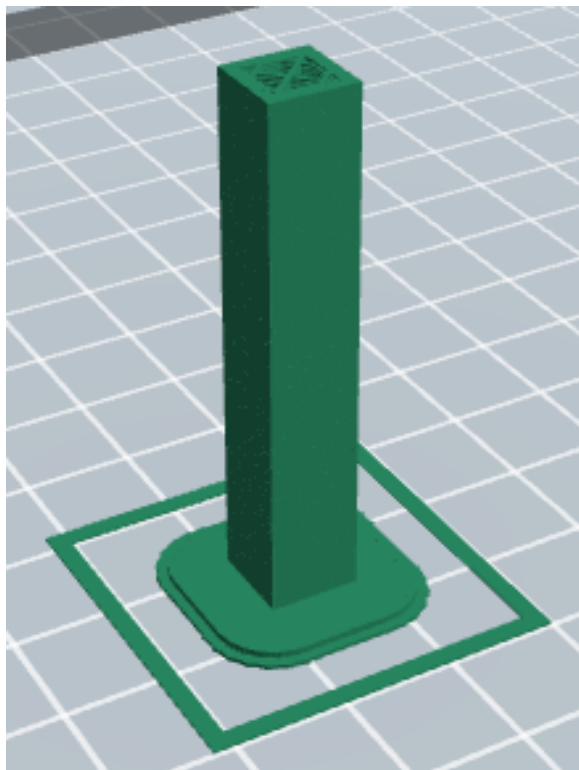
Δοκίμιο 8°

- Θερμοκρασία εξωθητή: 245°C
- Ταχύτητα εκτύπωσης: 38 mm/s
- Fill Density: 60% και 15%
- Fill Pattern: Line
- Τοποθέτηση: Z άξονα

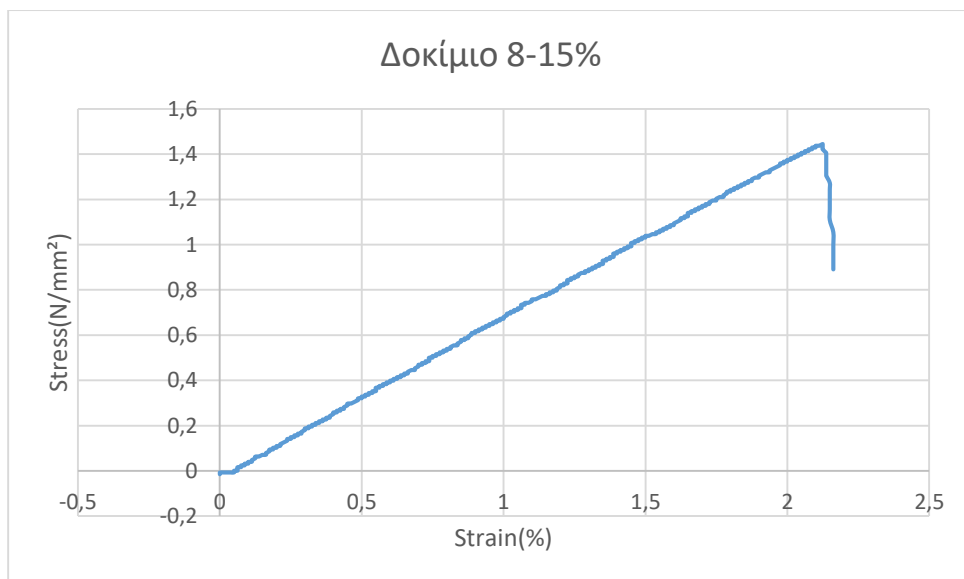


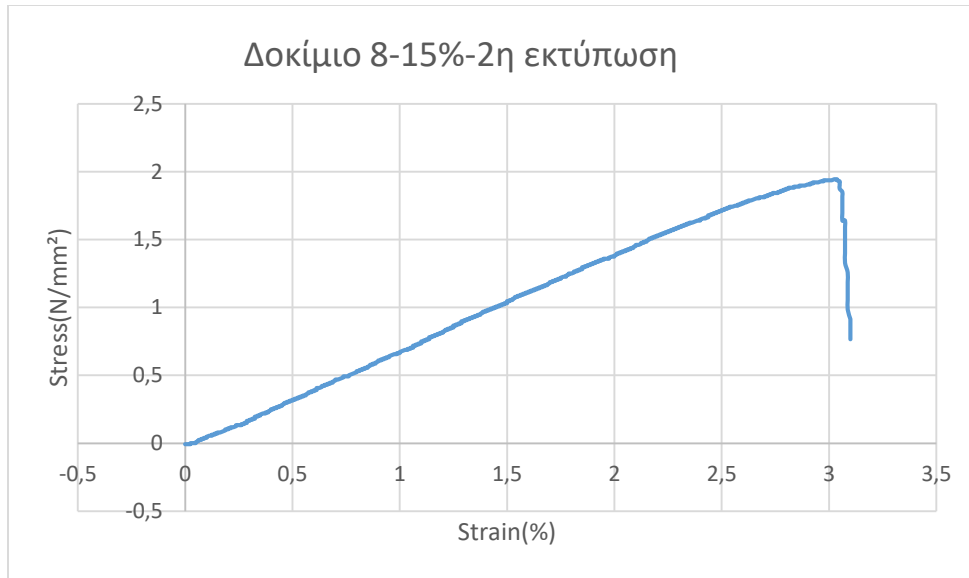
Εικόνα 48: Δοκίμιο 8 με 60% infill.





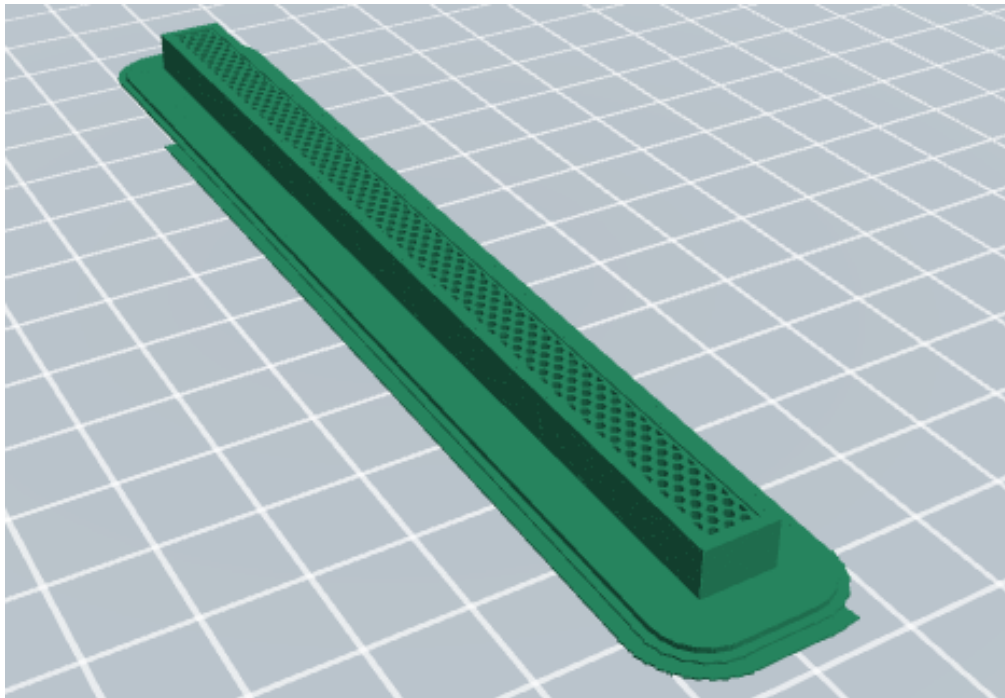
Εικόνα 49: Δοκίμο 8 με 15% infill.



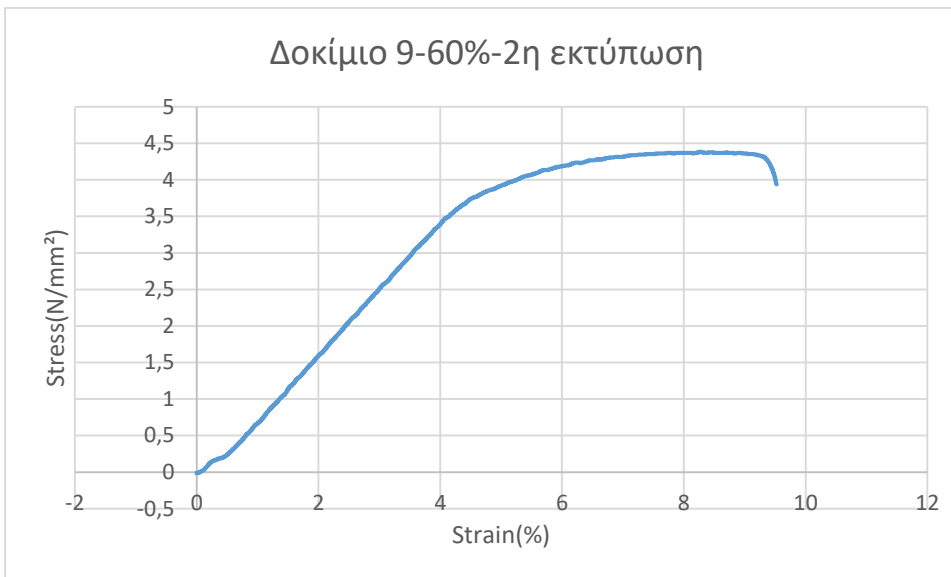
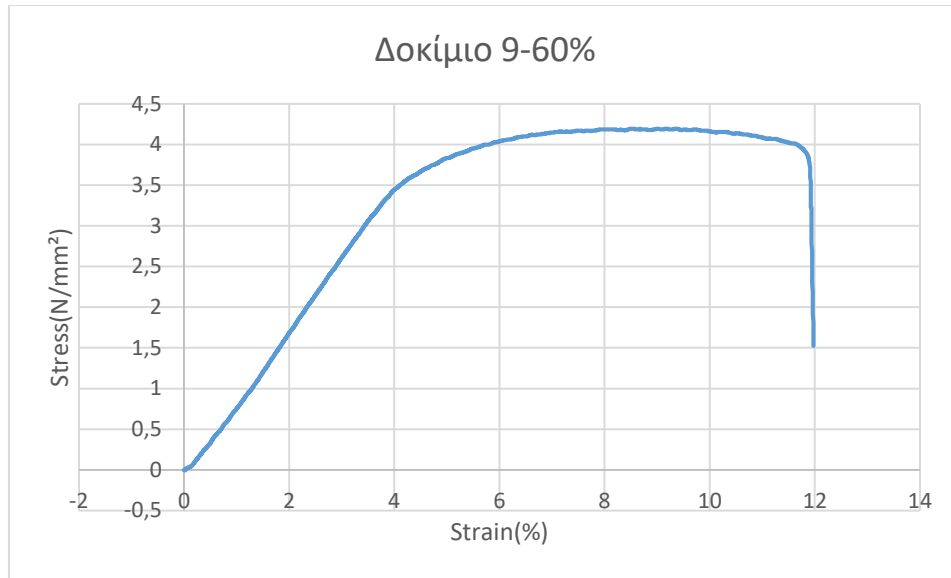


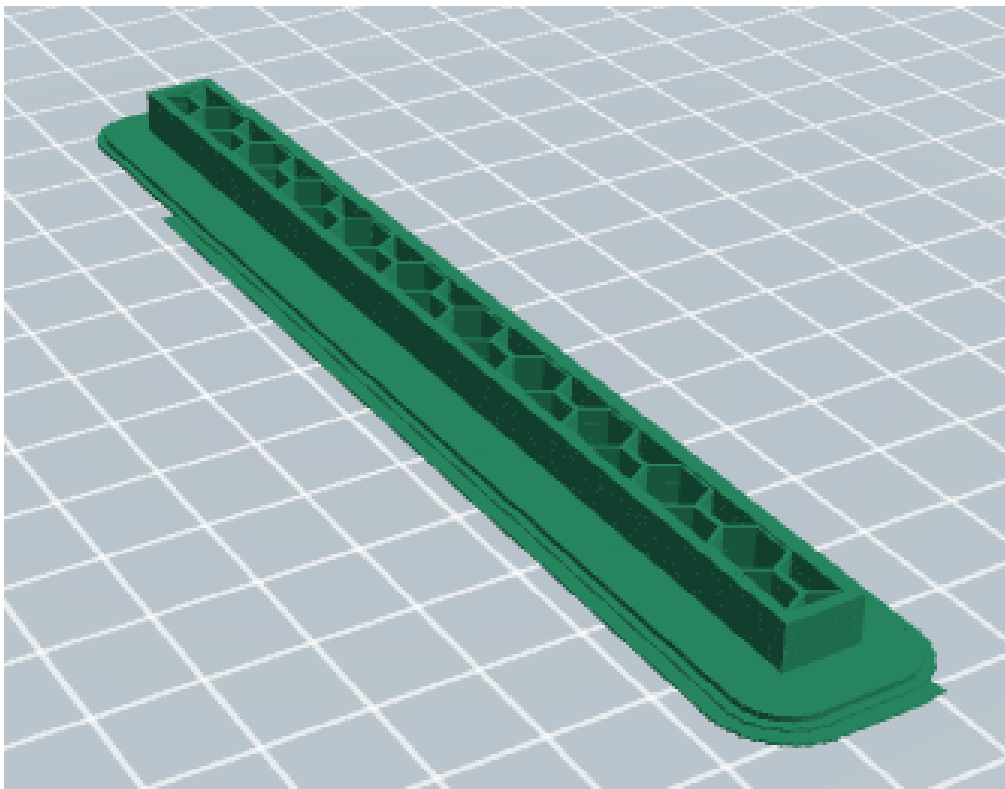
Δοκίμιο 9°

- Θερμοκρασία εξωθητή: 245°C
- Ταχύτητα εκτύπωσης: 50 mm/s
- Fill Density: 60% και 15%
- Fill Pattern: Hexagon
- Τοποθέτηση: Χ άξονα

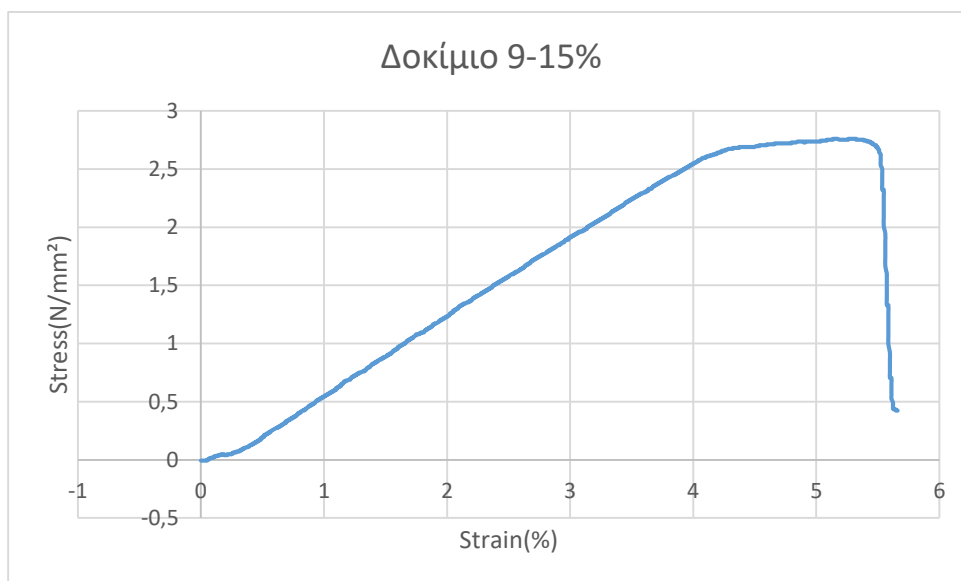


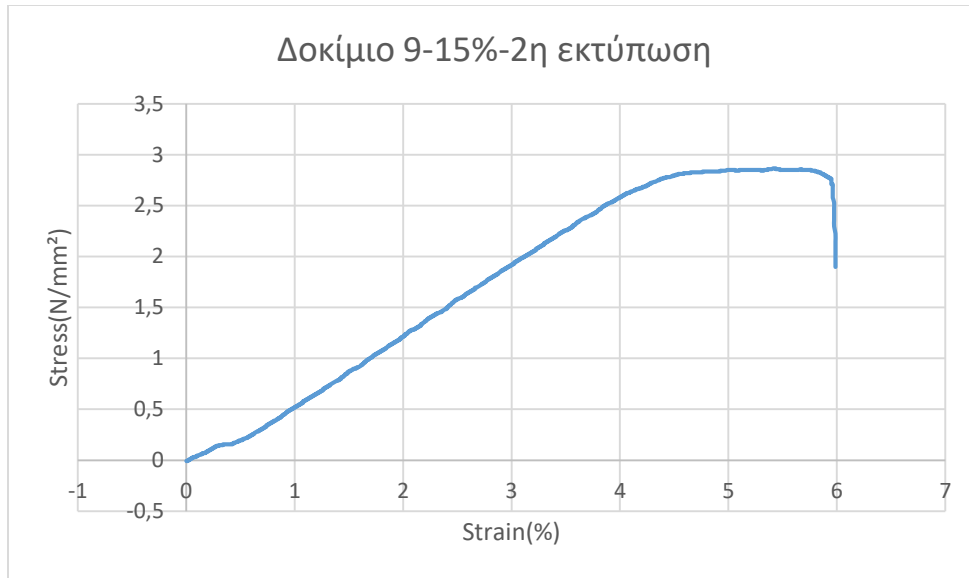
Εικόνα 50: Δοκίμιο 9 με 60% infill.





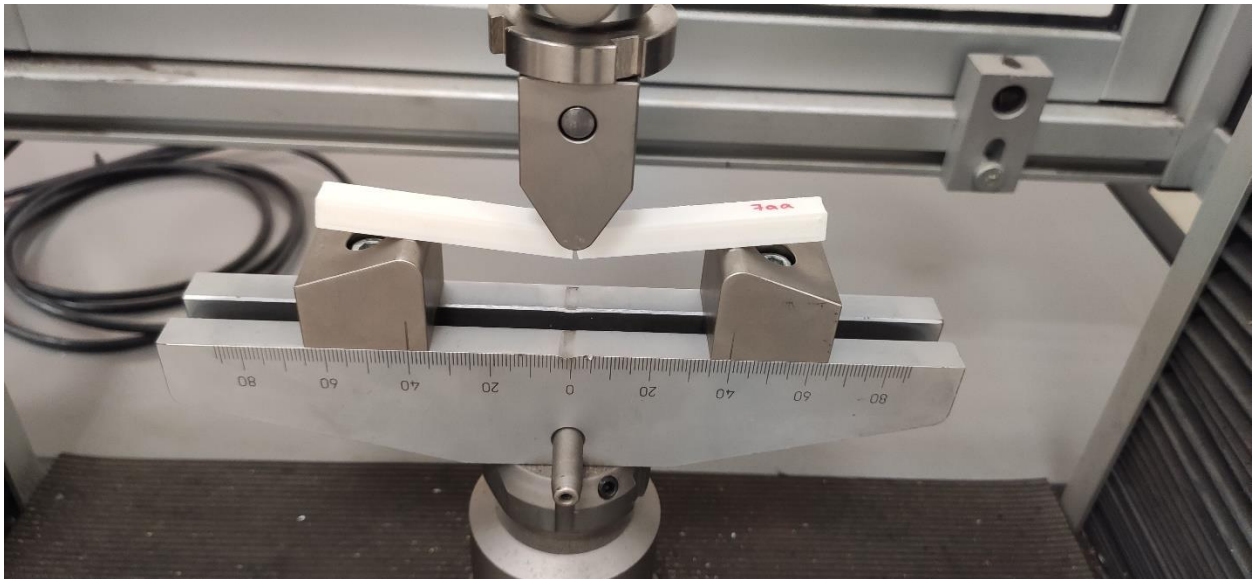
Εικόνα 51: Δοκίμιο 9 με 15% infill.





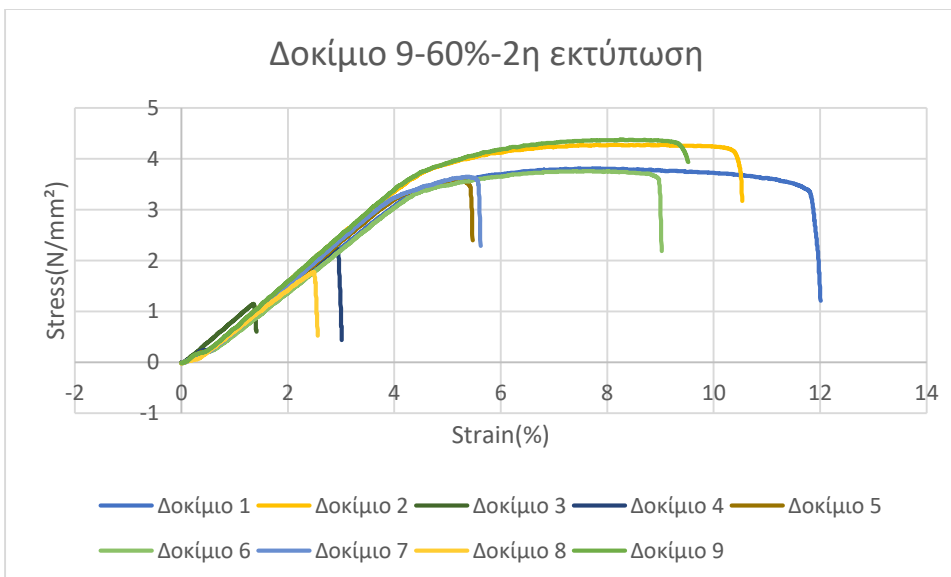
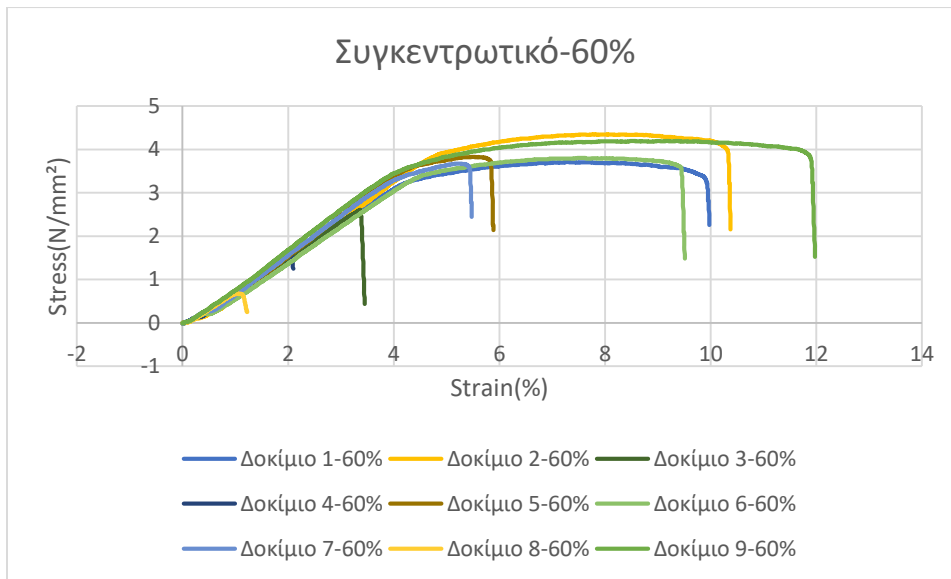
Βήμα 6ο : Δοκιμή σε κάμψη

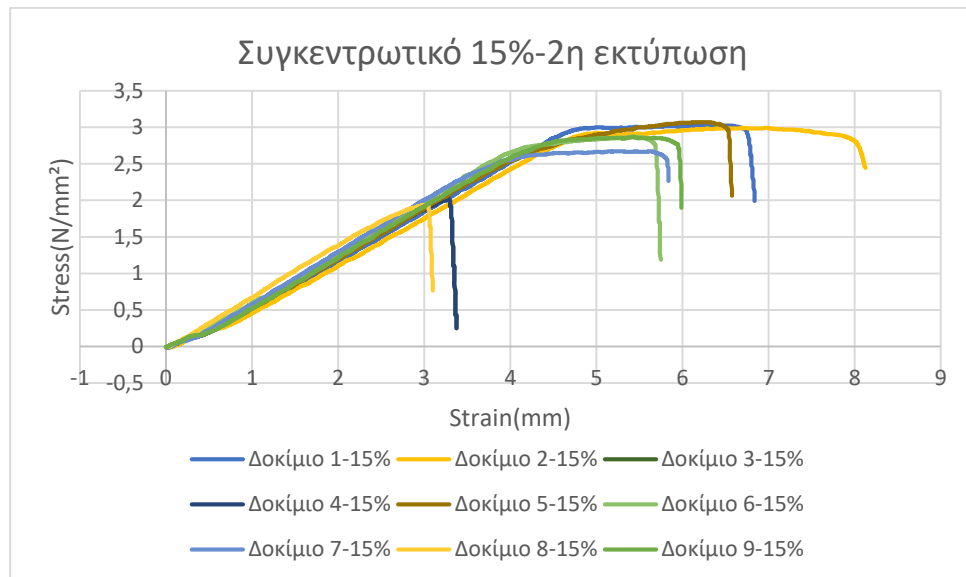
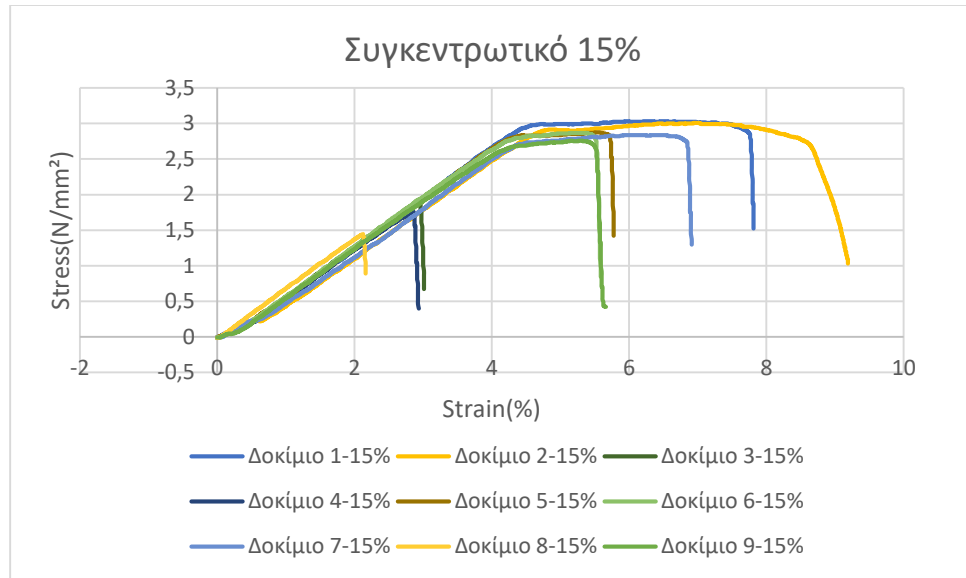
Η υποβολή των δοκιμίων έγινε σε κάμψη τριών σημείων, τα άκρα στήριξης των δοκιμίων με αυτές τις διαστάσεις (8x8x120mm) πρέπει να προκύπτει $L=80\text{mm}$. Το L δηλώνει την απόσταση μεταξύ των δύο στηριγμάτων σχηματίζοντας ορθές γωνίες με τα στηρίγματα και το έμβολο που θα ασκήσει το φορτίο. Πριν την εκκίνηση επιβολής του φορτίου βεβαιωνόμαστε για την συμμετρία ως προς το φορτίο ώστε να είναι το έμβολο στη μέση του δοκιμίου και το κατεβάζουμε ώστε να αγκίζει λίγο το δοκίμιο. Τέλος ρυθμίζουμε τον ρυθμό φόρτισης στα $0,1\text{mm}/\text{sec}$ και πατάμε εκκίνηση.



Εικόνα 52:Υποβολή δοκιμίου σε κάμψη

Εξαγωγή αποτελεσμάτων





Υπολογισμοί μετρήσεων

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν ύστερα από την κάμψη ήταν σε φορτίο (Load) και σε παραμόρφωση (Deflection). Έγινε μετατροπή αυτών σε τάση (Stress) και ποσοστιαία παραμόρφωση (Strain) ως εξής:

$$\text{Stress} = \frac{\text{Load (N)}}{\text{Area (mm}^2\text{)}} = \frac{2,875 \text{ N}}{8 \cdot 8 \text{ mm}^2} = 0,045 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Strain} = \frac{\text{Deflection (mm)}}{\text{Length (mm)}} \cdot 100 = \frac{4,55 \text{ mm}}{80 \text{ mm}} \cdot 100 = 5.69\%$$

Load=Φορτίο (N)

Deflection=Παραμόρφωση (mm)

Stress=Τάση (N/mm²)

Strain=Παραμόρφωση (%)

Area=Διατομή (mm²)

Length=Μήκος στήριξης (mm)

Αποτελέσματα προγράμματος στατιστικής ανάλυσης(Minitab)

Αποτελέσματα για δοκίμια με 60% γέμισμα

Response Table for Signal to Noise Ratios

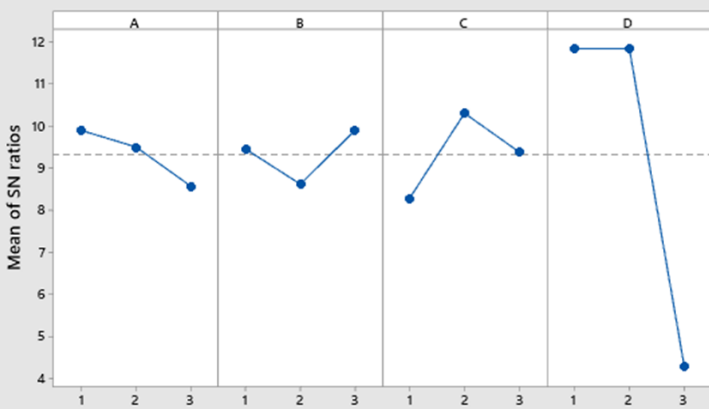
Larger is better

Level	A	B	C	D
1	9.896	9.449	8.278	11.845
2	9.500	8.619	10.306	11.842
3	8.564	9.893	9.376	4.273
Delta	1.332	1.274	2.028	7.572
Rank	3	4	2	1

Response Table for Means

Level	A	B	C	D
1	3.319	3.107	2.923	3.919
2	3.129	3.083	3.501	3.919
3	3.059	3.316	3.082	1.668
Delta	0.260	0.233	0.578	2.251
Rank	3	4	2	1

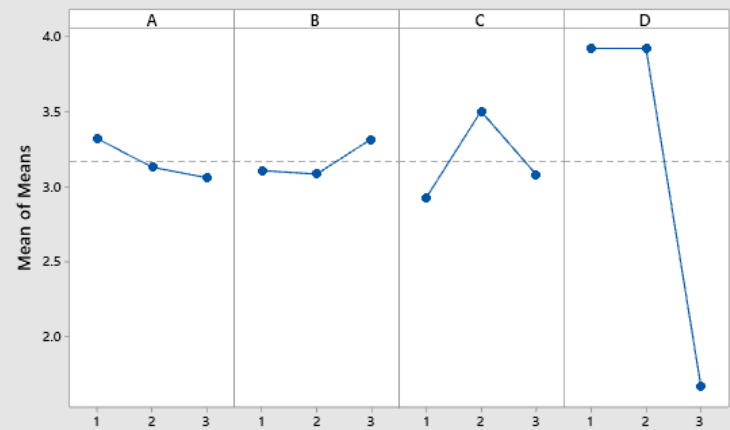
Main Effects Plot for SN ratios
Data Means



Signal-to-noise: Larger is better

Εικόνα 54: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου επιρροής παραγόντων

Main Effects Plot for Means
Data Means



Εικόνα 53: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου επιρροής παραγόντων

Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα και με τη βοήθεια του Minitab, πρόγραμμα στατιστικής ανάλυσης, βρέθηκαν οι βέλτιστες επιλογές παραγόντων για την κάθε μηχανική ιδιότητα που αναζητήθηκε. Για τον πρώτη παράμετρο την θερμοκρασία η βέλτιστη τιμή ήταν η (1) με 215°C. Για τον δεύτερο παράγοντα την ταχύτητα εκτύπωσης ήταν η (3) με 50mm/s. Στη συνέχεια για το μοτίβο γεμίματος η βέλτιστη τιμή ήταν η (2), το κυψελωτό μοτίβο γεμίματος και για τον τελευταίο παράγοντα, η τοποθέτηση του δοκιμίου, ήταν η τιμή (1) εκτυπώνοντας το δοκίμιο κατά την διεύθυνση του άξονα Χ. Υπολογίζοντας τις παραπάνω βέλτιστες τιμές του κάθε παράγοντα να βρίσκεται η θεωρητική μέγιστη τιμή όλης της πειραματικής διαδικασίας, με βάση το πρόγραμμα στατιστικής ανάλυσης.

Παράμετροι	60% γέμισμα
Θερμοκρασία	3
Ταχύτητα εκτύπωσης	4
Εσωτερικό γέμισμα	2
Τοποθέτηση	1

Οι δύο παράγοντες που επηρεάζουν περισσότερο τα αποτελέσματα είναι η τοποθέτηση και το εσωτερικό γέμισμα.

Παράμετροι	60% γέμισμα
Θερμοκρασία	1-215°C
Ταχύτητα εκτύπωσης	3-50mm/s
Εσωτερικό γέμισμα	2-κυψελωτό
Τοποθέτηση	1-Χ

Συνθήκες για βέλτιστο **UTS=4,55** σύμφωνα με την πρόβλεψη Taguchi.

Αποτελέσματα για δοκίμια με 15% γέμισμα

Response Table for Means [□]

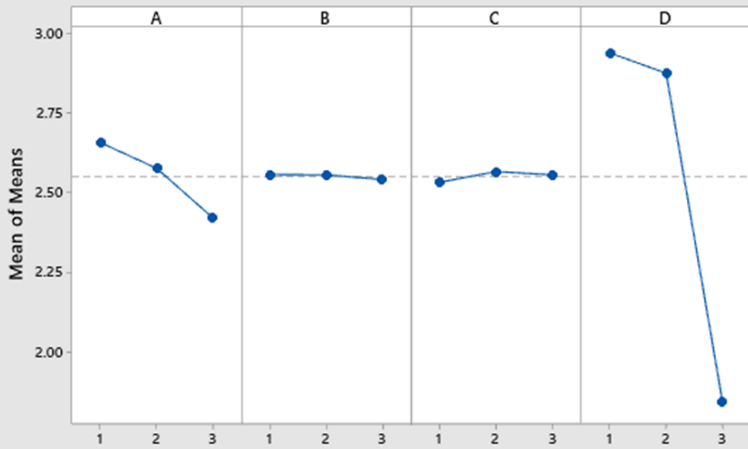
Level	A	B	C	D
1	2.658	2.557	2.533	2.939
2	2.577	2.556	2.566	2.875
3	2.421	2.542	2.556	1.841
Delta	0.237	0.016	0.034	1.098
Rank	2	4	3	1

Response Table for Signal to Noise Ratios

Larger is better

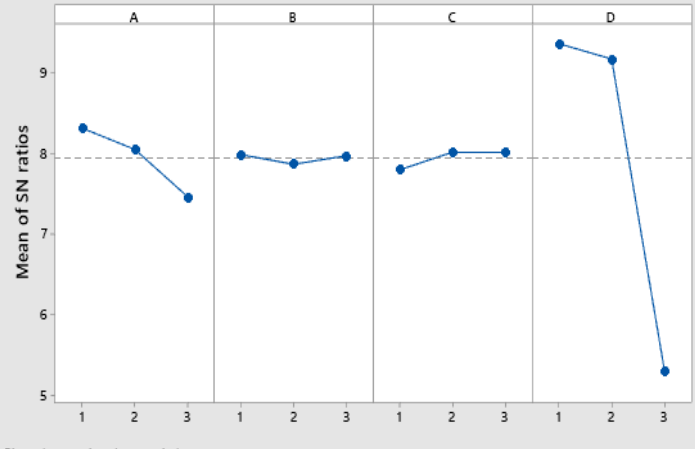
Level	A	B	C	D
1	8.312	7.982	7.793	9.359
2	8.046	7.863	8.013	9.167
3	7.455	7.968	8.008	5.287
Delta	0.857	0.118	0.220	4.072
Rank	2	4	3	1

Main Effects Plot for Means
Data Means



Εικόνα 55: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου επιρροής παραγόντων

Main Effects Plot for SN ratios
Data Means



Signal-to-noise: Larger is better

Εικόνα 56: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου επιρροής παραγόντων

Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα και με τη βοήθεια του Minitab, πρόγραμμα στατιστικής ανάλυσης, βρέθηκαν οι βέλτιστες επιλογές παραγόντων για την κάθε μηχανική ιδιότητα που αναζητήθηκε. Για τον πρώτη παράμετρο την θερμοκρασία η βέλτιστη τιμή ήταν η (1) με 215°C. Για τον δεύτερο παράγοντα την ταχύτητα εκτύπωσης ήταν η (1) με 25mm/s. Στη συνέχεια για το μοτίβο γεμίσματος η βέλτιστη τιμή ήταν η (2), το κυψελωτό μοτίβο γεμίσματος και για τον τελευταίο παράγοντα, η τοποθέτηση του δοκιμίου, ήταν η τιμή (1) εκτυπώνοντας το δοκίμιο κατά την διεύθυνση του άξονα Χ. Υπολογίζοντας τις παραπάνω βέλτιστες τιμές του κάθε παράγοντα να βρίσκεται η θεωρητική μέγιστη τιμή όλης της πειραματικής διαδικασίας, με βάση το πρόγραμμα στατιστικής ανάλυσης.

Παράμετροι	15% γέμισμα
Θερμοκρασία	2
Ταχύτητα εκτύπωσης	4
Εσωτερικό γέμισμα	3
Τοποθέτηση	1

Οι δύο παράγοντες που επηρεάζουν περισσότερο τα αποτελέσματα είναι η τοποθέτηση και η θερμοκρασία.

Παράμετροι	15% γέμισμα
Θερμοκρασία	1-215°C
Ταχύτητα εκτύπωσης	3-50mm/s
Εσωτερικό γέμισμα	2-κυψελωτό
Τοποθέτηση	1-Χ

Συνθήκες για βέλτιστο **UTS=3,05** σύμφωνα με την πρόβλεψη Taguchi.

Συζήτηση

Ανασκόπηση

Στην συγκεκριμένη διπλωματική ακολουθήθηκαν ορισμένες διαδικασίες. Πρωταρχικά, έγινε βιβλιογραφική ανασκόπηση, μελέτη πάνω στην τρισδιάστατη εκτύπωση (υλικά εκτύπωσης, τεχνολογίες κατασκευής, διαδικασία εκτύπωσης).

Στη συνέχεια, έγινε διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων και επιλέχθηκαν η μέγιστη τάση και η μέγιστη παραμόρφωση σαν αρχικές μηχανικές ιδιότητες. Μέσω του σχεδιασμού πειραμάτων DOE και με την χρήση της μεθοδολογίας Taguchi ορθογωνικής συστοιχίας, λήφθηκε πληροφορία πολλών πειραμάτων με τον ελάχιστο αριθμό δοκιμών. Συγκεκριμένα για 81 διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων χρειάστηκαν 9 δοκίμια, με 4 διαφορετικές παραμέτρους και από 3 τιμές για την κάθε παράμετρο $81(3^4)$. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο αυτή επιλέχθηκαν τέσσερις διαφορετικοί παράμετροι (θερμοκρασία εξωθητή, ταχύτητα εκτύπωσης, μοτίβο γεμίσματος, τρόπος εκτύπωσης) με τρεις διαφορετικές τιμές. Οι τιμές των παραμέτρων έγινε με βάση των χαρακτηριστικών του υλικού (ABS) και του εκτυπωτή ο οποίος χρησιμοποιήθηκε.

Μέσω του σχεδιαστικού προγράμματος Inventor έγινε ο σχεδιασμός του δοκιμίου και με τη βοήθεια του λογισμικού του εκτυπωτή έγινε η παραμετροποίηση και η δημιουργία του αρχείου ώστε να είναι συμβατό με τον τρισδιάστατο εκτυπωτή. Έτσι αφού εκτυπώθηκαν τα 36 δοκίμια (18 για 60% πλήρωση και 18 για 15% πλήρωση) υποβλήθηκαν σε δοκιμή κάμψης. Από τα αποτελέσματα αυτής σχεδιάστηκαν διαγράμματα μέσω excel και από αυτά υπολογίστηκε η τάση και η ποσοστιαία παραμόρφωση των δοκιμών.

Με τη βοήθεια του προγράμματος στατιστικής ανάλυσης (Minitab) και αναλύοντας τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων κάμψης έγινε η επιλογή του βέλτιστου δοκιμίου με τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Επίσης μέσω της μεθοδολογίας Taguchi προβλέφθηκαν οι μέγιστες τιμές για το UTS (μέγιστη τάση).

Ανάλυση-συζήτηση

Όσον αφορά την ανάλυση των αποτελεσμάτων, παρατηρήθηκε ότι τα δοκίμια που εκτυπώθηκαν στον κατακόρυφο άξονα (Z) είχαν λιγότερα καλές μηχανικές ιδιότητες τόσο όσο προς την αντοχή αλλά και την παραμόρφωση ανεξαρτήτου ποσοστού πλήρωσης (60% και 15%). Ειδικότερα, τα δοκίμια αυτά είχαν ελάχιστη παραμόρφωση αλλά συνάμα και μικρή αντοχή. Ταυτόχρονα, τα εκτυπωμένα δοκίμια στον οριζόντιο άξονα (X) σημείωσαν τη μέγιστη παραμόρφωση. Επόμενος πιο σημαντικός παράγοντας για τα δοκίμια με 60% ποσοστό πλήρωσης είναι το μοτίβο γεμίσματος. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι τα δοκίμια που έχουν εκτυπωθεί με κυψελωτό μοτίβο γεμίσματος έχουν σημαντικά υψηλότερη αντοχή και μεγαλύτερη παραμόρφωση συγκριτικά με τα υπόλοιπα μοτίβα γεμίσματος. Για τα δοκίμια με 15% ήταν η θερμοκρασία ο δεύτερος παράγοντας που επηρέασε με την χαμηλότερη (215°C) να υπερτερεί έναντι των υπολοίπων. Η θερμοκρασία αποτέλεσε σημαντικό παράγοντα για τα δοκίμια με 15% με την μικρότερη να είναι και η βέλτιστη. Απο την άλλη μεριά, η θερμοκρασία για τα δοκίμια με 60% ποσοστό πλήρωσης δεν ήταν ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας όμως με την χαμηλότερη θερμοκρασία να ξεχωρίζει. Ο παράγοντας που επηρέασε ελάχιστα τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων και στα δύο ποσοστά πλήρωσης ήταν η ταχύτητα εκτύπωσης με καλύτερη τη μεγαλύτερη ταχύτητα τα 50(mm/s) χωρίς σημαντική διαφορά απο τις υπόλοιπες ταχύτητες. Το εύρος των τιμών στην αντοχή στην τάση και στην ποσοστιαία παραμόρφωση προέκυψαν αρκετά μεγάλα, αυτό οφείλεται όχι μόνο στο μεγάλο εύρος τιμών που πήραν οι παράμετροι αλλά και στην υπερευαισθησία του τρισδιάστατου εκτυπωτή. Συγκεκριμένα για τα δοκίμια με 60% ποσοστό πλήρωσης η μεγαλύτερη τιμή τάσης με την μικρότερη είχαν διαφορά $4,38 \text{ N/mm}^2 - 1,15 \text{ N/mm}^2 = 3,23 \text{ N/mm}^2$ δηλαδή η μικρότερη είναι το **26,26%** της μεγαλύτερης. Ομοίως για τα δοκίμια με 15% ποσοστό πλήρωσης η μεγαλύτερη τιμή τάσης με την μικρότερη είχαν διαφορά $2,99 \text{ N/mm}^2 - 1,94 \text{ N/mm}^2 = 1,05 \text{ N/mm}^2$ δηλαδή η μικρότερη είναι το **64,88%** της μεγαλύτερης. Επίσης για το ποσοστό της παραμόρφωσης για τα δοκίμια με 60% ποσοστό πλήρωσης $12,01 \% - 1,41 \% = 10,6\%$ δηλαδή η μικρότερη παραμόρφωση είναι το **11,7 %** της μεγαλύτερης. Ομοίως για τα δοκίμια με 15% ποσοστό πλήρωσης $8,12 \% - 3,10 \% = 5,02 \%$ δηλαδή η μικρότερη παραμόρφωση είναι το **38,18%** της μεγαλύτερης

Προβλήματα που προέκυψαν

Στα αρχικά στάδια της πειραματικής διαδικασίας αντιμετωπίστηκαν ορισμένα προβλήματα και συγκεκριμένα κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης των δοκιμών. Σε όλα τα δοκίμια χρησιμοποιήθηκε σχεδία (raft) για υποβοήθηση στην επιτυχή εκτύπωση των δοκιμών. Στα δοκίμια που ήταν όρθια (εκτύπωση κατά τον Z άξονα) έγινε επανεκτύπωση 3 φορές σε κάθε ένα απο αυτά ώστε να έχουμε ένα επιτυχές αποτέλεσμα μιας και κατά την εκτύπωση η κεφαλή σε κάποια φάση χτυπούσε το δοκίμιο με αποτέλεσμα να το ρίχνει κάτω και να καθιστά τη συνέχιση της διαδικασίας αδύνατη. Συγκεκριμένα στα δοκίμια υπ' αριθμόν 3 (εκτυπωμένα κατά τον Z άξονα) χρησιμοποιήθηκε χείλος (brim) το οποίο δημιούργησε μια πιο γερή βάση ώστε να αποφευχθεί η αποκόληση που είχε παρατηρηθεί. Επίσης δοκιμάστηκαν και διαφορετικές θερμοκρασίες κρεβατιού συγκεκριμένα 110°C και 115°C κάτι το οποίο δεν βοήθησε ιδιαίτερα καθώς πάλι τα δοκίμια ξεκολούσαν απο το κρεβάτι.

Μελλοντική εργασία

Ο κλάδος της προσθετικής κατασκευής εμφανίζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και προσφέρει τη δυνατότητα για νέες ανακαλύψεις. Έτσι λοιπόν ένα απο τα βήματα για την παιρεταίρω εξέλιξη αυτής της πειραματικής διαδικασίας θα ήταν να γίνει το ίδιο πείραμα με διαφορετικά υλικά θερμοπλαστικά ή μη με σκοπό τη άμεση σύγκριση των υλικών. Μια ακόμα ενδιαφέρουσα επιλογή θα ήταν σύμπτυξη δύο υλικών μαζί. Κάτι τέτοιο θα είχε αρκετά συναρπαστικά αποτελέσματα. Επίσης, η μέτρηση υγρασίας και θερμοκρασίας κατά τη διαδικασία της εκτύπωσης θα ήταν άξιο αναζήτησης καθώς είναι δύο παράγοντες οι οποίοι παίζουν σημαντικό ρόλο στο τελικό αποτέλεσμα μιάς εκτύπωσης και τη συμπεριφορά του υλικού.

Επίλογος

Με την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εμπλουτίστηκαν οι γνώσεις μου πάνω στο αντικείμενο της προσθετικής κατασκευής. Ο σχεδιασμός και η κατασκευή των δοκιμών με την τρισδιάστατη εκτύπωση σε εργαστηριακό περιβάλλον συνέβαλλε στην ουσιαστική και σε βάθος κατανόηση της μεθόδου αυτής. Ένα ακόμη κέρδος που αποκόμισα απ' την εργασία αυτή είναι η γνώση και ο σωστός χειρισμός προγραμμάτων και στατιστικών μεθόδων (flashprint, minitab). Τέλος θεωρώ πως και εγώ με την εμπλοκή μου στο κομμάτι της προσθετικής κατασκευής και της τρισδιάστατης εκτύπωσης έθεσα κάποιες βάσεις για την περαιτέρω μελέτη και εξέλιξη της τεχνολογίας αυτής. Τα

αποτελέσματα της στατιστικής μελέτης απέδειξαν την θεωρία όσον αφορά της όχι καλή επαναληψιμότητα της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Βιβλιογραφία

AdrecoPlastics, n.d. *adrecoPlastics*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://adrecoPlastics.co.uk/abs-plastic-properties/>

[Πρόσβαση 01 September 2021].

all3dp, 2016. *all3dp*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://all3dp.com/history-of-the-reprap-project/>

[Πρόσβαση 03 August 2021].

all3dp, 2016. *all3dp*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://all3dp.com/history-of-the-reprap-project/>

[Πρόσβαση 28 June 2021].

Amato, I., 2003. *technologyreview*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: www.technologyreview.com/2003/11/01/233646/instant-manufacturing/

[Πρόσβαση 01 September 2021].

Anastasiou, A. και συν., 2013. 3D printing: Basic concepts mathematics and technologies. *International Conference of Bionformatics and Bioengineering (BIBE)*, Τόμος 1, pp. 1-4.

Barrett, A., 2020. *bioplasticnews*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://bioplasticsnews.com/2020/06/09/polylactic-acid-pla-dis-advantages/>

[Πρόσβαση 02 September 2021].

Carlota, V., 2019. *3dnatives*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.3dnatives.com/en/pla-3d-printing-guide-190820194/>

[Πρόσβαση 5 June 2021].

Fisher, F., 2008. *smg3d*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: https://www.smg3d.co.uk/files/ssys-wp-thermoplastics-09-11_ashx.pdf

[Πρόσβαση 05 June 2021].

flashforge, n.d. *Zhejiang Flashforge 3D technology Co.*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.flashforge.com/product-detail/1>

[Πρόσβαση 15 September 2021].

Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B., 2010. *Additive Manufacturing Technologies-3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. 2nd εκμ. Berlin: Springer.

Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B., 2010. *Additive Manufacturing Technologies-3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. 2nd ed. Berlin: Springer.

Herderick, E., 2011. *Additive Manufacturing of Metals: A Review*, Ohio: Materials Science and Technology.

Jaswanth, R. και συν., 2021. Effect of heat treatment on mechanical properties of 3D printed PLA. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Τόμος 123, p. 1.

Katoch, P., 2017. *Indian Defence Review*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <http://www.indiandefencereview.com/news/military-applications-of-3d-printing-where-are-we/>

[Πρόσβαση 22 July 2021].

Kruth, J. P., 1991. Material Incess Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques. *CIRP Annals*, 40(2), pp. 603-614.

Manufacturing, A. M. & A. A., 2017. *ansi*. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

https://share.ansi.org/Shared%20Documents/Standards%20Activities/AMSC/AMSC_Roadmap_February_2017.pdf

[Πρόσβαση 06 August 2021].

Martel, A., 2020. *3dnatives*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.3dnatives.com/en/plastics-used-3d-printing110420174/#!>

[Πρόσβαση 15 July 2021].

Matias, E. & Rao, B., 2015. *3D Printing: On Its Historical Evolution and the Implications for Business*, Portland: PICMET.

Noorani, R., 2005. *Rapid prototyping-Principles and Applications*. 1st εκμ. California: Willey.

Omnexus, 2021. *specialchem*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/acrylonitrile-butadiene-styrene-abs-plastic>

[Πρόσβαση 01 September 2021].

Palermo, E., 2015. *LIVESCIENCE*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: www.livescience.com/52750-robots-build-3d-printed-bridge.html

[Πρόσβαση 5 August 2021].

Price, A., 2013. *nottingham.ac*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.nottingham.ac.uk/research/groups/advanced-manufacturing-technology-research-group/documents/manufacturing-metrology-team/qcam-17/bsi.pdf>

[Πρόσβαση 02 August 2021].

Printers, 3. S. P., n.d. *3dsystems*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: www.3dsystems.com/3d-printers/professional/overview

[Πρόσβαση 22 June 2021].

Ranjit, R., 2010. *A Primer on the Taguchi Method*. 2nd επιμ. s.l.:Society of Manufacturing Engineers.

Simmons, J., 2021. *the3dbros*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://the3dbros.com/3d-print-infill-patterns-explained/>

[Πρόσβαση 16 August 2021].

Staff, C. M., 2016. *creativemechanisms*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.creativemechanisms.com/blog/3d-printing-injection-molding-cnc-nylon-plastic-pa>

[Πρόσβαση 01 September 2021].

toppr, 2021. *toppr*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.toppr.com/guides/chemistry/polymers/nylon/>

[Πρόσβαση 01 September 2021].

Tromans, G., 2013. *Additive manufacturing:opportunities and constraints*. London: Royal Academy of Engineering.

University, L., n.d. *lboro.ac*. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>

[Πρόσβαση 12 August 2021].

University, L., n.d. *lboro.ac*. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/directedenergydeposition/>

[Πρόσβαση 12 August 2021].

University, L., n.d. *lboro.ac*. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialjetting/>

[Πρόσβαση 13 August 2021].

University, L., n.d. *lboro.ac*. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/sheetlamination/>

[Πρόσβαση 13 August 2021].

University, L., n.d. *lboro.ac*. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialextrusion/>

[Πρόσβαση 01 August 2021].

University, L., n.d. *lboro.ac*. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/vatphotopolymerisation/>

[Πρόσβαση 21 August 2021].

Whiteclouds, n.d. *whiteclouds*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.whiteclouds.com/3d-printing/#Processes>

[Πρόσβαση 19 July 2021].

Wikipedia, 2021. *wikipedia*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9D%CE%AC%CE%B9%CE%BB%CE%BF%CE%BD>

[Πρόσβαση 01 September 2021].

Wikipedia, 2021. *wikipedia*. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CE%BF%CE%BB%CF%85%CE%B3%CE%B1%CE%BB%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE%B9%CE%BA%CF%8C_%CE%BF%CE%BE%CF%8D

[Πρόσβαση 28 August 2021].

Wikipedia, 2021. *Wikipedia*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing

[Πρόσβαση 1 May 2021].

Wong, K. & Hernadez, A., 2012. A review of Additive Manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*,

Τόμος Ι, pp. 1-2.

Γιαννακόπουλος, Κ., 2011. *Σημειώσεις Πειραματικής Αντοχής υλικών*. Αθήνα: ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ.

Κωστάκης, Ι., 2017. *Μελέτη Κατασκευαστικών Δυνατοτήτων Τεχνολογιών Additive Manufacturing στην Παραγωγή Μη Επανδρομένων Αεροσκαφών*, Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.

Παπαγεωργίου, Μ., 2016. *3D Printing: Ανάλυση Τεχνολογιών και Μεθοδολογία Εφαρμογών*, Χανιά:

Πολυτεχνείο Κρήτης.