



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σύγκριση λογισμικών για την παραγωγή μοντέλων προσθετικών
κατεργασιών

ΤΟΥ

Πανανάκη Αθανάσιου

Αιγάλεω

Ιούλιος 2019



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Εργαστήριο «Σχεδιασμού Μηχανολογικών Κατασκευών»

Σύγκριση λογισμικών για την παραγωγή μοντέλων προσθετικών
κατεργασιών

Software comparison study on Additive Manufacturing (AM) modelling

Πανανάκης Αθανάσιος

Αριθμός Μητρώου: 43066

Πτυχιακή Εργασία

υποβαλλόμενη για τη μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για το πτυχίο του

ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

Επιβλέπων Καθηγητής: Σαγιάς Βασίλειος

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Ιουλίου 2019

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

Στεργίου Κωνσταντίνος

Γιαννακόπουλος
Κωνσταντίνος

Σαγιάς Βασίλειος

Πνευματικά δικαιώματα

Copyright © Αθανάσιος Πανανάκης, 2019

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Ευχαριστίες

Για την πραγματοποίηση αυτής της πτυχιακής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω πρώτα τον επιβλέπων καθηγητή μου κ. Σαγιά Βασίλειο για τον χρόνο που αφιέρωσε, την συνεχή καθοδήγηση και τις συμβουλές που μου παρείχε σε όλο αυτό το διάστημα εκπόνησης της εργασίας. Τον πρόεδρο του τμήματος και διευθυντή του θεσμοθετημένου εργαστηρίου «Σχεδιασμού Μηχανολογικών Κατασκευών» Δρ. Μηχανολογίας Στεργίου Κωνσταντίνο για την άδεια που μου παραχώρησε να χρησιμοποιώ το χώρο του εργαστηρίου και τις μηχανές προσθετικής κατασκευής καθώς και την αμέριστη βοήθεια του σε όποιο θέμα παρουσιαζόταν. Επίσης τον κ. Γιαννακόπουλο Κωνσταντίνο για την πολύτιμη συνεισφορά του στη πραγματοποίηση της εργασίας και ειδικότερα στα πειράματα της στρέψης. Τέλος δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω την οικογένειά μου και όλους αυτούς που με στήριξαν, παρέχοντας μου τα απαραίτητα εφόδια και τον απαιτούμενο χρόνο.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία, θα παρουσιαστεί η βασική έννοια της τεχνολογίας Προσθετικής Κατασκευής (Additive Manufacturing) και η ιστορική εξέλιξη της. Θα αναλυθούν τα στάδια της τεχνολογίας και όλες οι διεργασίες ξεχωριστά που έχουν αναπτυχθεί ώστε ο αναγνώστης να λάβει το απαιτούμενο θεωρητικό υπόβαθρο. Έπειτα από τις διεργασίες, θα αναφερθούν οι εφαρμογές της τεχνολογίας στον παρών και οι προσδοκίες του μέλλοντος.

Θα ακολουθήσει αναφορά των ειδών των λογισμικών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή αντικειμένων και θα παρουσιαστούν κάποια προγράμματα από κάθε είδος. Στην συνέχεια θα γίνει επιλογή μίας από τις μηχανές προσθετικής κατασκευής που διαθέτει το εργαστήριο Σχεδιασμού Μηχανολογικών Κατασκευών και θα πραγματοποιηθούν τα στάδια κατασκευαστικών διαδικασιών. Σκοπός αυτών είναι η παραγωγή ίδιων αντικειμένων από διαφορετικά λογισμικά, για να πραγματοποιηθούν έλεγχοι και να βγουν συμπεράσματα. Τα συμπεράσματα αυτά θα βοηθήσουν στην σύγκριση των λογισμικών, που έχουν χρησιμοποιηθεί.

Λέξεις κλειδιά: Προσθετική Κατασκευή, Simplify 3D, CubePro, Ultimaker Cura, λογισμικά τεμαχισμού

ABSTRACT

In this thesis, it will be presented the basic concept of Additive Manufacturing and its historical evolution. It will be analyzed the phases of technology and all the processes that have been developed to give the reader the required theoretical background. After the processes, it will be mentioned the applications of technology in the present and the expectations of the future.

There will be a list of the types of the softwares used to produce objects and some programs of any type will be presented. After that, it will be selected one of the 3D Printers by the Engineering Design Laboratory and the phases of the manufacturing processes will be carried out. pose of these is to produce the same objects from different software in order to conducted checks and draw conclusions. These conclusions will help to compare the softwares that has been used.

Key words: Additive Manufacturing, Slicing Softwares, Fused Deposition Modeling, 3D Systems

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Σύγκριση μηχανών AM	40
Πίνακας 2: Διαστασιολογικός έλεγχος διαφορών караβιού (πρότυπο μοντέλο - κατασκευασμένο από Simplify 3D).....	76
Πίνακας 3: Διαστασιολογικός έλεγχος διαφορών караβιού (πρότυπο μοντέλο - κατασκευασμένο από CubePro)	87
Πίνακας 4: Διαστασιολογικός έλεγχος διαφορών ράβδου (πρότυπο μοντέλο - κατασκευασμένο από Simplify 3D).....	94
Πίνακας 5: Διαστασιολογικός έλεγχος διαφορών ράβδου (πρότυπο μοντέλο - κατασκευασμένο από CubePro)	97
Πίνακας 6: Διαστασιολογικός έλεγχος διαφορών ράβδου (πρότυπο μοντέλο - κατασκευασμένο από Ultimaker Cura).....	100
Πίνακας 7: Μετρήσεις πειράματος στρέψης ράβδου	102
Πίνακας 8: Διαστασιολογικός έλεγχος.....	109

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Βήματα Προσθετικής Κατασκευής	3
Σχήμα 2: Διάγραμμα Ροπής Στρέψης συναρτήσει Γωνίας Στροφής.....	104

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Dr Hideo Kodama (Lonjon, n.d.).....	4
Εικόνα 2: Ο Charles Chuck Hull και η SLA-1 (1987) (Bensoussan, 2016)	5
Εικόνα 3: Mr Scott Crump ο ιδρυτής της εταιρείας Stratasys (Aldridge, n.d.)	5
Εικόνα 4: Διάταξη μηχανής Στερεολιθογραφίας (PrintSpace3D, n.d.).....	10
Εικόνα 5: Διαδικασία κατασκευής με Στελεολιθογραφία (Bournias Varotsis, n.d.)	11
Εικόνα 6: Διάταξη μηχανής φωτοπολυμερισμού σε κάδο προβολής με μάσκα (Lighting, n.d.)	12
Εικόνα 7: Διεργασία Επιλεκτικής Συσσωμάτωσης με laser (WikiPops, n.d.).....	14
Εικόνα 8: Διάταξη μηχανής τεχνολογίας εξώθηση τηγμένου υλικού (LLP, n.d.)	16
Εικόνα 9: Διάταξη μηχανής τεχνολογίας εναπόθεσης υλικού (Bournias Varotsis, n.d.).....	17
Εικόνα 10: Διαδικασία κατασκευή με εναπόθεση συγκολλητικής ουσίας (Marc, n.d.)	19
Εικόνα 11: Διάταξη μηχανής τεχνολογίας επάλληλων φύλλων	21
Εικόνα 12: Καλούπι κατασκευασμένος με τεχνολογία προσθετικής Κατασκευής (SpecialChem, 2016)	24
Εικόνα 13: Ορθοδοντικά μοντέλα και οστά κατασκευασμένα με τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής.....	25
Εικόνα 14: Nike Flyprint (Stevenson, 2018)	26
Εικόνα 15: Michelin Uptis (Michelin, 2019).....	27
Εικόνα 16: TinkerCAD.....	30
Εικόνα 17: 3D Builder.....	30
Εικόνα 18: Autodesk Inventor.....	31
Εικόνα 19: Solidworks	32
Εικόνα 20: MakePrintable.....	33
Εικόνα 21: Netfabb	34
Εικόνα 22: Ultimaker Cura 4.1	35
Εικόνα 23: KiSSlicer 1.6.3	36
Εικόνα 24: Slic3r.....	37
Εικόνα 25: Simplify 3D	38
Εικόνα 26: CubePro.....	39
Εικόνα 27: Σχεδιασμός ράβδου στο Autodesk Inventor 1	41
Εικόνα 28: Σχεδιασμός ράβδου στο Autodesk Inventor 2	42
Εικόνα 29: Εξαγωγή αρχείου STL από Autodesk Inventor 1.....	43
Εικόνα 30: Εξαγωγή αρχείου STL από Autodesk Inventor 2.....	43
Εικόνα 31: Παρουσίαση πρότυπου μοντέλου (καράβι)	44
Εικόνα 32: Έλεγχος ράβδου στο Netfabb 1	45
Εικόνα 33: Έλεγχος ράβδου στο Netfabb 2	45
Εικόνα 34: Έλεγχος καραβιού στο Netfabb 1	46
Εικόνα 35: Έλεγχος καραβιού στο Netfabb 2	46
Εικόνα 36: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό CubePro 1	47
Εικόνα 37: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό CubePro 2	48
Εικόνα 38: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό CubePro 3	48
Εικόνα 39: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό CubePro 4	49
Εικόνα 40: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό CubePro 5	49

Εικόνα 41: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό CubePro 6	50
Εικόνα 42: Προετοιμασία καραβιού με λογισμικό CubePro 1	50
Εικόνα 43: Προετοιμασία καραβιού με λογισμικό CubePro 2	51
Εικόνα 44: Προετοιμασία καραβιού με λογισμικό CubePro 3	51
Εικόνα 45: Προετοιμασία καραβιού με λογισμικό CubePro 4	52
Εικόνα 46: Simplify 3D	53
Εικόνα 47: Προετοιμασία καραβιού με λογισμικό Simplify 3D 1.....	53
Εικόνα 48: Προετοιμασία καραβιού με λογισμικό Simplify 3D 2.....	54
Εικόνα 49: Προετοιμασία καραβιού με λογισμικό Simplify 3D 3.....	55
Εικόνα 50: Προετοιμασία καραβιού με λογισμικό Simplify 3D 4.....	55
Εικόνα 51: Προετοιμασία καραβιού με λογισμικό Simplify 3D 5.....	56
Εικόνα 52: Προετοιμασία καραβιού με λογισμικό Simplify 3D 6.....	56
Εικόνα 53: Προετοιμασία καραβιού με λογισμικό Simplify 3D 7.....	57
Εικόνα 54: Προετοιμασία καραβιού με λογισμικό Simplify 3D 8.....	57
Εικόνα 55: Προετοιμασία καραβιού με λογισμικό Simplify 3D 9.....	58
Εικόνα 56: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό Simplify 3D 1.....	58
Εικόνα 57: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό Simplify 3D 2.....	59
Εικόνα 58: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό Simplify 3D 3.....	59
Εικόνα 59: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό Ultimaker Cura 1.....	60
Εικόνα 60: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό Ultimaker Cura 2.....	61
Εικόνα 61: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό Ultimaker Cura 3.....	62
Εικόνα 62: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό Ultimaker Cura 4.....	62
Εικόνα 63: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό Ultimaker Cura 5.....	63
Εικόνα 64: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό Ultimaker Cura 6.....	63
Εικόνα 65: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό Ultimaker Cura 7.....	64
Εικόνα 66: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό Ultimaker Cura 8.....	64
Εικόνα 67: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό Ultimaker Cura 9.....	65
Εικόνα 68: Προετοιμασία καραβιού με λογισμικό Ultimaker Cura 1.....	65
Εικόνα 69: Προετοιμασία καραβιού με λογισμικό Ultimaker Cura 2.....	66
Εικόνα 70: Προετοιμασία καραβιού με λογισμικό Ultimaker Cura 3.....	66
Εικόνα 71: Κατασκευή πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 1 Simplify 3D	69
Εικόνα 72: Κατασκευή πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 2 Simplify 3D	70
Εικόνα 73: Κατασκευή πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 3 Simplify 3D	71
Εικόνα 74: Απομάκρυνση πρότυπου μοντέλου (καραβιού) από την πλάκα κατασκευής 1 Simplify 3D	72
Εικόνα 75: Απομάκρυνση στηριγμάτων από πρότυπο μοντέλο (καράβι) 1 Simplify 3D	73
Εικόνα 76: Απομάκρυνση στηριγμάτων από πρότυπο μοντέλο (καράβι) 2 Simplify 3D	74
Εικόνα 77: Μελέτη πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 1 Simplify 3D	75
Εικόνα 78: Μελέτη πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 2 Simplify 3D	77
Εικόνα 79: Μελέτη πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 3 Simplify 3D	78
Εικόνα 80: Μελέτη πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 4 Simplify 3D	79
Εικόνα 81: Μελέτη πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 5 Simplify 3D	80
Εικόνα 82: Μελέτη πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 6 Simplify 3D	81
Εικόνα 83: Μελέτη πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 7 Simplify 3D	82
Εικόνα 84: Κατασκευή πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 1 CubePro.....	83
Εικόνα 85: Κατασκευή πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 2 CubePro.....	84

Εικόνα 86: Κατασκευή πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 3 CubePro.....	85
Εικόνα 87: Αποτέλεσμα κατασκευής πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 1 CubePro	86
Εικόνα 88: Μελέτη πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 1 CubePro	87
Εικόνα 89: Μελέτη πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 2 CubePro	88
Εικόνα 90: Μελέτη πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 3 CubePro	89
Εικόνα 91: Μελέτη πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 4 CubePro	90
Εικόνα 92: Μελέτη πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 5 CubePro	91
Εικόνα 93: Μελέτη πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 6 CubePro	92
Εικόνα 94: Μελέτη πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 7 CubePro	93
Εικόνα 95: Κατασκευή ράβδου Simplify 3D.....	94
Εικόνα 96: Αποτέλεσμα κατασκευής ράβδου Simplify 3D	95
Εικόνα 97: Αποτέλεσμα κατασκευής ράβδου CubePro.....	96
Εικόνα 98: Μελέτη ράβδου CubePro.....	96
Εικόνα 99: Κατασκευή ράβδου Ultimaker Cura 1.....	98
Εικόνα 100: Κατασκευή ράβδου Ultimaker Cura 2.....	99
Εικόνα 101: Κατασκευή ράβδου Ultimaker Cura 3.....	100
Εικόνα 102: Μελέτη ράβδου Ultimaker Cura	101
Εικόνα 103: Αποτέλεσμα πειράματος στρέψης σε ράβδο Simplify 3D	103

Πίνακας περιεχομένων

Κεφάλαιο 1.	Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 2.	Θεωρητική επισκόπηση	2
2.1	Έννοια και βασικές αρχές.....	2
2.2	Ιστορική αναδρομή	3
2.3	Προπαρασκευαστικές διαδικασίες.....	6
2.4	Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής.....	8
2.4.1	Διεργασίες φωτοπολυμερισμού σε κάδο	8
2.4.1.1	Στερεολιθογραφία (Stereolithography).....	9
2.4.1.2	Φωτοπολυμερισμός σε μικρο-κάδο	11
2.4.1.3	Φωτοπολυμερισμός σε κάδο προβολής με μάσκα	12
2.4.1.4	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της διεργασίας	13
2.4.2	Διεργασία σύντηξης πούδρας σε κλίνη	13
2.4.3	Διεργασίες εξώθησης υλικού.....	15
2.4.4	Διεργασίες εναπόθεσης υλικού	17
2.4.5	Διεργασίες εναπόθεσης συγκολλητικής ουσίας.....	18
2.4.6	Διεργασίες επάλληλων φύλλων	20
2.5	Εργασίες Μετεπεξεργασίας	21
2.6	Εφαρμογές	23
Κεφάλαιο 3.	Μεθοδολογία Έρευνας	28
Κεφάλαιο 4.	Μελέτη Περιπτώσεων Έρευνας	29
4.1	Σύγκριση Λογισμικών.....	29
4.1.1	Λογισμικά 3D CAD στερεάς μοντελοποίησης.....	29
4.1.1.1	Autodesk TinkerCAD	29
4.1.1.2	3D Builder.....	30
4.1.1.3	Autodesk Inventor.....	31
4.1.1.4	Solidworks	31
4.1.2	Λογισμικά επεξεργασίας & διόρθωσης STL αρχείων	32
4.1.2.1	MakePrintable.....	32
4.1.3	Λογισμικά Slicing.....	33
4.1.3.1	Netfabb	33
4.1.3.2	Ultimaker Cura	35
4.1.3.3	Kisslicer 1.6.3.....	35
4.1.3.4	Slic3r.....	36

4.1.3.5	Simplify 3D	37
4.1.3.6	CubePro	38
4.2	Επιλογή λογισμικών	39
4.3	Διεξαγωγή έρευνας	41
4.3.1	Σχεδιασμός εξαγωνικής ράβδου και παρουσίαση πρότυπου μοντέλου ..	41
4.3.2	Έλεγχος σφαλμάτων στο Netfabb	44
4.3.3	Προετοιμασία μοντέλων με λογισμικό CubePro	47
4.3.4	Προετοιμασία μοντέλων με λογισμικό Simplify 3D	52
4.3.5	Προετοιμασία μοντέλων με λογισμικό Ultimaker Cura	60
4.3.6	Κατασκευαστική διαδικασία	69
4.3.7	Πειραματικός έλεγχος στρέψης	101
Κεφάλαιο 5.	Συμπεράσματα	107
Βιβλιογραφία		111

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

Ο όρος Προσθετική Κατασκευή (Additive Manufacturing - AM) καθιερώθηκε για την κατασκευή αντικειμένων με εναπόθεση υλικού και ειδικότερα με την στρωματική παραγωγή των προϊόντων. Έχουν αναπτυχθεί πολλές διαφορετικές τεχνολογίες για την δημιουργία των τρισδιάστατων μοντέλων. Αρχικά οι τεχνολογίες αυτές χρησιμοποιήθηκαν για την ταχεία παραγωγή πρωτοτύπων, για την μελέτη και ανάπτυξη των προϊόντων. Καθώς οι τεχνολογίες αναπτύσσονταν, οι επιδόσεις των μηχανών προσθετικής κατασκευής βελτιώνονταν και τα υποστηριζόμενα υλικά αυξάνονταν και βελτιστοποιούνταν, τα αντικείμενα που παράγονταν είχαν τα απαραίτητα χαρακτηριστικά για να χρησιμοποιηθούν σαν τελικά προϊόντα. Στις μέρες μας η χρήση πια προϊόντων που έχουν κατασκευαστεί με κάποια τεχνολογία προσθετικής κατασκευής είναι συχνή.

Στην παρούσα εργασία θα παρουσιασθούν τόσο τα θεωρητικά στοιχεία της κάθε τεχνολογίας όσο και τα βήματα της διαδικασίας παραγωγής ενός μοντέλου. Θα γίνει αναφορά στους διάφορους τύπους λογισμικών που χρησιμοποιούνται σε όλη τη διαδικασία και στο τέλος θα πραγματοποιηθεί πειραματική κατασκευή αντικειμένων για την περαιτέρω ανάλυση. Βασικός στόχος των παραπάνω ενεργειών και γενικότερα όλης της εργασίας είναι η συγκριτική μελέτη των λογισμικών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή αντικειμένων με την χρήση τεχνολογιών προσθετικών κατασκευών, ώστε να γίνει κατανοητό ότι τα διαφορετικά λογισμικά μπορεί να παρέχουν διαφορετικά αποτελέσματα. Η εξαγωγή συμπερασμάτων από αυτή τη μελέτη μπορεί να βοηθήσει τόσο στον εκπαιδευτικό όσο και στον επαγγελματικό χώρο.

Στην συνέχεια της πτυχιακής εργασίας ο όρος Προσθετική Κατασκευή θα αναφέρεται με την διεθνή ορολογία Additive Manufacturing ή με την συντομογραφία AM.

Κεφάλαιο 2. Θεωρητική επισκόπηση

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει θεωρητική επισκόπηση γενικότερα της τεχνολογίας Προσθετικής Κατασκευής, ώστε ο αναγνώστης να αποκτήσει το απαραίτητο γνωστικό υπόβαθρο αυτής της νέας και γρήγορα αναπτυσσόμενης τεχνολογίας, που θα μας χρειαστεί στο κύριο μέρος της εργασίας. Αρχικά θα γίνει βασική παρουσίαση και σύντομη αναδρομή στην εξέλιξη της τεχνολογίας AM από τα πρώτα χρόνια παρουσίας της στον κατασκευαστικό κλάδο μέχρι και σήμερα. Θα ακολουθήσει η ανάλυση των διαδικασιών πριν την κατασκευή του τεμαχίου (προπαρασκευαστικές διαδικασίες) και η περιγραφή της κάθε τεχνολογίας AM ξεχωριστά, καθώς και της ανάπτυξης τους μέχρι σήμερα. Έπειτα θα παρακολουθήσουμε τις εργασίες μετεπεξεργασίας που εκτελούνται στα τεμάχια ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε κατά την κατασκευή τους, προκειμένου να αποκτήσουν όλα τα χαρακτηριστικά που χρειάζονται πριν τη χρήση. Τέλος θα αναφερθούν οι εφαρμογές της προσθετικής κατασκευής που έχουν αναπτυχθεί για εμπορικούς σκοπούς.

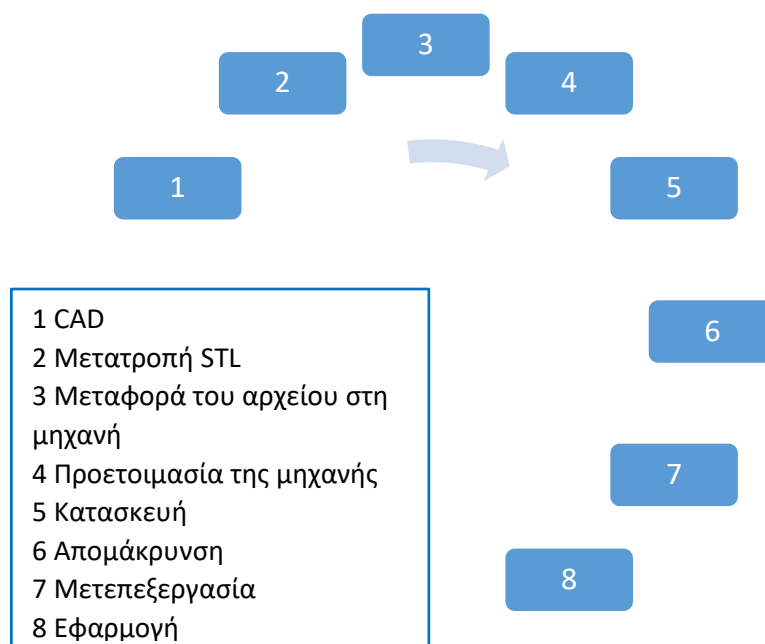
2.1 Έννοια και βασικές αρχές

Η Προσθετική Κατασκευή (Additive Manufacturing) είναι η κατασκευαστική διεργασία ενός τεμαχίου, που απεικονίζεται σε 3D CAD σύστημα. Η έννοια αυτή έχει ταυτιστεί με τη στρωματική κατασκευή ενός αντικειμένου. (Γιαννατσής, et al., 2015)

Για την δημιουργία του τεμαχίου, είναι απαραίτητη η ανάλυση της γεωμετρίας του σε δισδιάστατες διατομές συγκεκριμένου πάχους. Οι διατομές αυτές δημιουργούνται διαδοχικά με εναπόθεση υλικού, η μια πάνω στην άλλη, για να σχηματιστεί το τελικό κομμάτι. (3D Printing Industry, n.d.) Με τη χρήση της συγκεκριμένης κατασκευαστικής μεθόδου επιτυγχάνεται η ταχύτερη δημιουργία του αντικειμένου, η διαστασιολογική του ακρίβεια και η ευκολία παραγωγής.

Όλη η διεργασία κατασκευής ενός αντικειμένου, χωρίζεται σε οκτώ βασικά στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι η αναπαράσταση του αντικειμένου σε λογισμικό 3D CAD. Δεύτερο στάδιο είναι η εξαγωγή της επιφανειακής γεωμετρίας του αντικειμένου σε STL αρχείο, όλα τα λογισμικά τρισδιάστατης μοντελοποίησης παρέχουν αυτή τη δυνατότητα. Στο τρίτο στάδιο το αρχείο STL που έχει παραχθεί μεταφέρεται στην μηχανή AM όπου γίνεται επεξεργασία ως προς το μέγεθος κατασκευής του αντικειμένου και τον προσανατολισμό του εντός της μηχανής. Η προετοιμασία της μηχανής είναι το αμέσως επόμενο στάδιο, πρέπει να δηλωθούν όλες οι παράμετροι που χρειάζονται για την κατασκευή του αντικειμένου, οι επιλογές αυτές είναι εξατομικευμένες και αφορούν την εκάστοτε μηχανή AM. Πέμπτο στάδιο είναι η κατασκευή του αντικειμένου, αυτό το στάδιο είναι πλήρως

αυτοματοποιημένο καθώς η μηχανή AM δημιουργεί το αντικείμενο στρώση προς στρώση. Στο έκτο στάδιο γίνεται η απομάκρυνση του αντικειμένου από την μηχανή. Το έβδομο στάδιο, η μετεπεξεργασία, δεν είναι πάντα υποχρεωτικό αν και τις περισσότερες φορές είναι απαραίτητη κάποια ενέργεια. Αυτή μπορεί να είναι ο καθαρισμός του κομματιού από το υλικό των στηριγμάτων, είτε η βελτίωση των ιδιοτήτων του αντικειμένου είτε η αισθητική βελτίωση πριν την χρήση. Τελευταίο στάδιο είναι η χρήση του αντικειμένου. Μπορεί να είναι άμεση ή μπορεί να περάσει από άλλα στάδια ώστε να τοποθετηθεί σε μια μεγαλύτερη κατασκευή. (Gibson, et al., 2017)



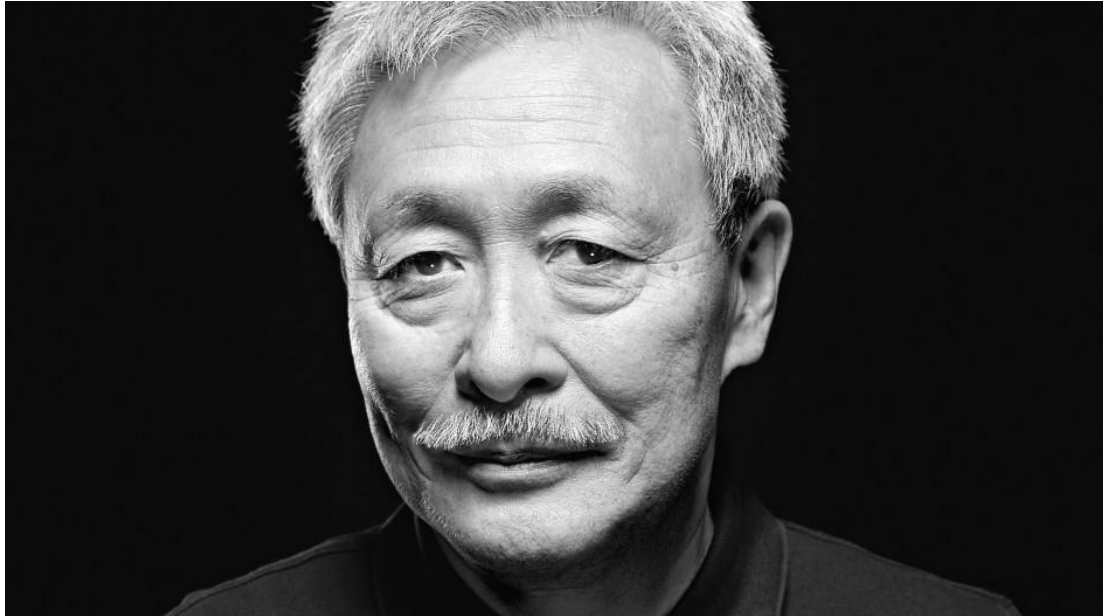
Σχήμα 1: Βήματα Προσθετικής Κατασκευής

2.2 Ιστορική αναδρομή

Η ιδέα της δημιουργίας αντικειμένων με πρόσθεση υλικού αντί για αφαίρεση ή κατασκευή με χύτευση, που ήταν οι συνηθισμένες κατασκευαστικές μέθοδοι, υπήρχε ήδη από την δεκαετία του 1950, όμως δεν είχε βρεθεί ακόμα το απαραίτητο τεχνολογικό υπόβαθρο (υπολογιστές, laser, κ.α.) για την ανάπτυξη της μεθόδου.

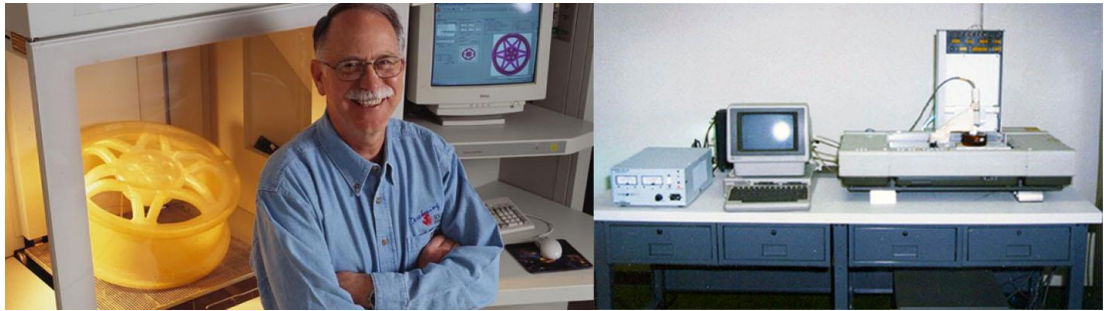
Ως αρχή της Προσθετικής Κατασκευής μπορούμε να ορίσουμε τον Μάιο του 1980. Τότε ο Dr Hideo Kodama έκανε την πρώτη αίτηση για την καταχώρηση πατέντας τεχνολογίας κατασκευής 3D μοντέλου στην Ιαπωνία, δυστυχώς όμως δεν

κατατέθηκε η πλήρης περιγραφή της τεχνολογίας εντός της χρονικής προθεσμίας που είχε να την παρουσιάσει. (Kocovic, 2017)



Εικόνα 1: Dr Hideo Kodama (Lonjon, n.d.)

Τα πρώτα χρόνια της δεκαετίας του 1980, ο Charles (Chuck) Hull πειραματιζόμενος με φωτοπολυμερή ριτίνες παρατήρησε ότι εκθέτοντας τες σε μια δέσμη laser στερεοποιούνταν. Επιπλέον ανακάλυψε ότι κινώντας τη δέσμη laser με συγκεκριμένο μοτίβο η ρητίνη στερεοποιούταν και σχημάτιζε μια επιφάνεια. Αν η στερεοποιημένη επιφάνεια ήταν ακριβώς πάνω από μια άλλη επιφάνεια που είχε στερεοποιηθεί νωρίτερα, μπορούσε να δημιουργήσει ένα στερεό 3D αντικείμενο. Αυτή ήταν και η αρχή της τεχνολογίας της στερεολιθογραφίας. Η αίτηση για καταχώρηση της πατέντας έγινε το 1984 στην Αμερική, το ίδιο έτος υποβλήθηκαν και άλλες αιτήσεις για ανάλογες πατέντες στην Ιαπωνία, τη Γαλλία και τις ΗΠΑ. Όλες οι πατέντες είχαν σαν κύρια ιδέα την στρωματική κατασκευή του 3D αντικειμένου. Η ιδέα του Charles Hull αναγνωρίζεται ως η σημαντικότερη, καθώς οδήγησε στην ίδρυση της εταιρείας 3D Systems και την πρώτη κυκλοφορία εμπορικού συστήματος τεχνολογίας προσθετικής κατασκευής (SLA-1, 1987). Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι η κάθε τεχνολογία προσθετικής κατασκευής έχει διαφορετική ιστορική εξέλιξη. (Gibson, et al., 2017)



Εικόνα 2: Ο Charles Chuck Hull και η SLA-1 (1987) (Bensoussan, 2016)

Το 1986, ο Carl Deckard, ο οποίος δούλευε στο Πανεπιστήμιο του Texas, USA κατοχύρωσε την πατέντα για την τεχνολογία επιλεκτικής συσσωμάτωσης με laser (Selective Laser Sintering ή SLS), χάρις στην οποία ιδρύθηκε η εταιρεία DTM. Το ίδιο έτος κατοχυρώθηκαν άλλες δύο τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής οι οποίες αντίστοιχα συνέβαλαν στην δημιουργία εταιρειών. Η κατασκευή με συγκόλληση επάλληλων φύλλων (Laminated Object Manufacturing ή LOM) με την εταιρεία Helisys και η κατασκευή με την τεχνολογία πολυμερισμού κόκκων (Solid Ground Curing ή SGC) με την εταιρεία Cubital. Αξίζει να σημειωθεί ότι καμία από τις τρεις εταιρείες δεν υφίσταται εμπορικά στο χώρο της Προσθετικής Κατασκευής, η DTM συγχωνεύθηκε το 2001 με τη 3D Systems και οι υπόλοιπες έκλεισαν οριστικά. Παρόλα αυτά οι τεχνολογίες δεν σταμάτησαν την ανάπτυξη τους. (3D Printing Industry, n.d.)

Το 1989, ο Scott Crump, ανέπτυξε την τεχνολογία της εναπόθεσης τηγμένου υλικού (Fused Deposition Modeling ή FDM), η οποία κατέχει σημαντικό ποσοστό χρήσης σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες μέχρι και σήμερα. Η κατοχύρωση της πατέντας έγινε το ίδιο έτος και ιδρύθηκε η εταιρεία Stratasys. (SYS, n.d.)



Εικόνα 3: Mr Scott Crump ο ιδρυτής της εταιρείας Stratasys (Aldridge, n.d.)

Λίγα χρόνια αργότερα, στη Γερμανία, με την ίδρυση της εταιρείας EOS, ο Hans Langer ανέπτυξε την τεχνολογία συσσωμάτωσης με laser (Laser Sintering – LS). Επόμενο στάδιο της τεχνολογίας αυτής υπήρξε η άμεση συσσωμάτωση μετάλλων με λέιζερ (Direct Metal Laser Sintering – DMLS). (EOS, n.d.)

Οι τρεις εταιρείες που αναφέραμε (3D Systems, Stratasys και EOS) αποτελούν τους πρωτοπόρους στον κλάδο της προσθετικής κατασκευής. Από το 2010 κι έπειτα οι πατέντες που είχαν κατοχυρωθεί έχουν ξεκινήσει να λήγουν, κάτι που έχει οδηγήσει στην απότομη αύξηση των εταιρειών που ασχολούνται με αυτές τις τεχνολογίες και στη ραγδαία εξέλιξη τους. (Gibson, et al., 2017)

2.3 Προπαρασκευαστικές διαδικασίες

Προπαρασκευαστικές διαδικασίες είναι όλες οι ενέργειες που πρέπει να προηγηθούν πριν ξεκινήσει η κατασκευή του τεμαχίου σε οποιαδήποτε μηχανή Προσθετικής Κατασκευής. Οι ενέργειες αυτές πραγματοποιούνται κατά τα πρώτα τέσσερα στάδια της γενικευμένης διεργασίας Προσθετικής Κατασκευής, που αναφέραμε παραπάνω. Τα προπαρασκευαστικά στάδια είναι ίδια για όλες τις τεχνολογίες, όμως οι ενέργειες που απαιτούνται σε κάθε στάδιο μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με την τεχνολογία και την μηχανή που θα χρησιμοποιηθεί κατά την κατασκευή.

Πρώτο στάδιο είναι η δημιουργία του 3D μοντέλου σε σύστημα 3D CAD στερεάς μοντελοποίησης. Αν η δημιουργία του αντικειμένου γίνεται για πρώτη φορά, τότε ο σχεδιαστής ή ο μηχανικός που έχει αναλάβει αυτή την εργασία θα πρέπει πρώτα να αντιληφθεί όλες τις ανάγκες που θα πρέπει να καλύψει το τελικό προϊόν, ώστε όταν κατασκευαστεί να ανταποκρίνεται στις προσδοκίες. Η σύλληψη της ιδέας είναι η σημαντικότερη ενέργεια για την κατασκευή του τεμαχίου. Ίσως χρειαστούν πολλές αλλαγές στο αρχικό σχέδιο και μελέτες όπως για παράδειγμα στην αντοχή, με σκοπό να φτάσει στο επιθυμητό αποτέλεσμα. (Gibson, et al., 2017) Άλλος τρόπος δημιουργίας του 3D μοντέλου είναι η 3D σάρωση ενός ήδη κατασκευασμένου τεμαχίου. Με τον τρόπο αυτό σκανάρουμε το επιθυμητό αντικείμενο και μπορούμε να περάσουμε τα γεωμετρικά του στοιχεία στο 3D CAD λογισμικό για παραπάνω επεξεργασία. (3D Printing Industry, n.d.)

Ο σχεδιαστής πρέπει να έχει υπόψη του και κάποιους καθοριστικούς παράγοντες κατά την δημιουργία του μοντέλου. Αρχικά ο προσανατολισμός του κομματιού στη μηχανή Προσθετικής κατασκευής παίζει καίριο ρόλο στη γεωμετρική ακρίβεια του αντικειμένου. Λόγω της επικάλυψης των στρώσεων κατά τον Z άξονα, τα χαρακτηριστικά που δημιουργούνται σε κάθε στρώση στους άξονες X-Y έχουν καλύτερη ακρίβεια και ποιότητα επιφανείας. Ο σωστός προσανατολισμός βοηθάει επίσης στην ελαχιστοποίηση των απαιτούμενων στηριγμάτων κατά τη κατασκευή. Ο

σχεδιαστής θα πρέπει να έχει προβλέψει να είναι δυνατή η απομάκρυνση των στηριγμάτων μετά το τέλος της κατασκευής και ότι το αντικείμενο θα αποκομίσει μικρά σημάδια σε εκείνη την περιοχή. Στις περισσότερες τεχνολογίες η ύπαρξη των στηριγμάτων είναι βασική για τη μη στρέβλωση κατά τον άξονα Z του τελικού τεμαχίου. (Γιαννατοής, et al., 2015)

Ακόμη δύο παράγοντες είναι η μείωση του απαιτούμενου υλικού και η απλοποίηση της κατασκευής και κατά συνέπεια η μείωση του απαιτούμενου χρόνου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη δημιουργία κοιλοτήτων με ανάλογες δομές σε παχιά τοιχώματα του τεμαχίου, χωρίς όμως να μειωθεί η λειτουργικότητα του αντικειμένου. Επίσης με την διαίρεση του μοντέλου σε πιο απλές γεωμετρίες ή αντιθέτως την απευθείας συναρμολόγηση επιμέρους κομματιών κατά την κατασκευή μπορούν να επιτευχθούν οι παραπάνω παράγοντες. Τέλος ο σχεδιαστής μπορεί να εκμεταλλευτεί την διεργασία της πρόσθεσης υλικού και να χαρακτηρίσει το κάθε τελικό προϊόν με τον δικό του μοναδικό κωδικό. (Gibson, et al., 2017)

Κλείνοντας με τον σχεδιασμό να τονίσουμε ότι ο σχεδιαστής θα πρέπει να κατασκευάσει το μοντέλο σε 3D λογισμικό στερεάς μοντελοποίησης ώστε να μην υπάρχουν επιφανειακά κενά και η αναπαράσταση του μοντέλου να είναι γεωμετρικά σαφής. Όλα τα τελευταία λογισμικά CAD είναι σχεδιασμένα ώστε το 3D μοντέλο που σχεδιάζεται να είναι πλήρως κλειστό στερεό. Αν υπάρχει κάποιο πρόβλημα με τη γεωμετρία θα εντοπιστεί στο επόμενο στάδιο. (3D Printing Industry, n.d.)

Το επόμενο στάδιο είναι η μετατροπή του 3D μοντέλου σε μορφή αρχείου STL ή AMF. Η μετατροπή αυτή γίνεται συνήθως από το ίδιο λογισμικό που σχεδιάσαμε το μοντέλο. Κατά το πρότυπο STL, οι επιφάνειες του στερεού προσεγγίζονται με ένα σύνολο πολλών, μικρών, τριγωνικών εδρών, οπότε δημιουργείται ένας κατάλογος με τα τρίγωνα που αποτελούν το μοντέλο. Το μέγεθος και ο αριθμός των τριγώνων επηρεάζουν τη γεωμετρική ακρίβεια του αντικειμένου, αυτή η εργασία γίνεται αυτοματοποιημένα από το σύστημα κι έτσι εξασφαλίζεται η απαραίτητη γεωμετρική ακρίβεια. Το αρχείο STL περιέχει μόνο τον κατάλογο των τριγώνων, οπότε είναι εύκολα αντιληπτό ότι δεν μπορούμε να δώσουμε χαρακτηριστικά όσον αφορά το χρώμα ή το υλικό κατασκευής μέσω αυτού του αρχείου. Για αυτό το λόγο εμφανίστηκε μια νέα μορφή προτύπου βασισμένη στο πρότυπο ASTM/ISO, το AMF, όπου περιλαμβάνει αυτά τα χαρακτηριστικά, καθώς επίσης και διαστασιολογικά δεδομένα και άλλες πληροφορίες για το τεμάχιο.

Στο τρίτο στάδιο γίνεται η μεταφορά του αρχείου STL στη μηχανή προσθετικής κατασκευής που έχουμε επιλέξει. Πριν την έναρξη της κατασκευής η μηχανή ελέγχει το αρχείο STL ώστε να επαληθευτεί η γεωμετρία του προς κατασκευή αντικειμένου. Το κομμάτι θα πρέπει να μπορεί να κατασκευαστεί εντός του χώρου της μηχανής. Οι περισσότερες μηχανές προσθετικής κατασκευής έχουν τη δυνατότητα να κατασκευάσουν ταυτόχρονα πολλά αντικείμενα, επομένως πρέπει να γίνει οπτική

επαλήθευση των κομματιών προς κατασκευή. Μόλις ολοκληρωθούν οι έλεγχοι, η έναρξη της κατασκευής του προϊόντος απέχει ένα βήμα.

Στο τελευταίο στάδιο γίνεται η προετοιμασία της μηχανής, η οποία διαφέρει ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιεί η κάθε μηχανή ΑΜ. Κάποιες ενέργειες γίνονται αυτοματοποιημένα, αφού έχουν ρυθμιστεί από τις προεπιλεγμένες τιμές παραμέτρων για την κατασκευή του κομματιού. Αυτές μπορεί να είναι η μεταφορά σε συγκεκριμένη θερμοκρασία του χώρου κατασκευής ή η προετοιμασία του laser. Επιπλέον υπάρχουν και ενέργειες που πρέπει να εκτελεστούν από εκπαιδευμένο χειριστή. Στην διεργασία εξώθησης υλικού ελέγχεται ή συμπληρώνεται το απαραίτητο υλικό. Στις μηχανές που χρησιμοποιούν πούδρα, σε κάθε κατασκευαστική διεργασία θα πρέπει να γεμίζεται, να φορτώνεται και να στρώνεται όλος ο απαιτούμενος χώρος με πούδρα. Τέλος στις διεργασίες που χρησιμοποιούν κατασκευαστική πλάκα, θα πρέπει να τοποθετηθεί κόλλα πάνω σε αυτήν. Έτσι θα εκτυπωθεί πάνω εκεί το τεμάχιο χωρίς να μετακινηθεί. Στη συνέχεια θα τοποθετηθεί η πλάκα εντός της μηχανής για να ευθυγραμμιστεί ως προς τους άξονες της. (Gibson, et al., 2017)

Με αυτό το τρόπο έχουμε ολοκληρώσει όλες τις προπαρασκευαστικές διαδικασίες και είμαστε έτοιμοι να συνεχίσουμε με την κατασκευή του τεμαχίου.

2.4 Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής

Για την δημιουργία αντικειμένων με τη μέθοδο της προσθετικής κατασκευής έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνολογίες και συνεχώς αναπτύσσονται και άλλες. Όλες οι τεχνολογίες που παρουσιάζονται λειτουργούν με τη μέθοδο της στρωματικής κατασκευής των προϊόντων. Παρακάτω θα αναλύσουμε τις κυριότερες τεχνολογίες και πιο συγκεκριμένα τα βήματα λειτουργίας τους, τα βασικά χαρακτηριστικά, τις παραμέτρους τους καθώς και τα υλικά που χρησιμοποιούν. Σε κάθε διεργασία θα αναφερθούν και τα μοναδικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που διαθέτουν.

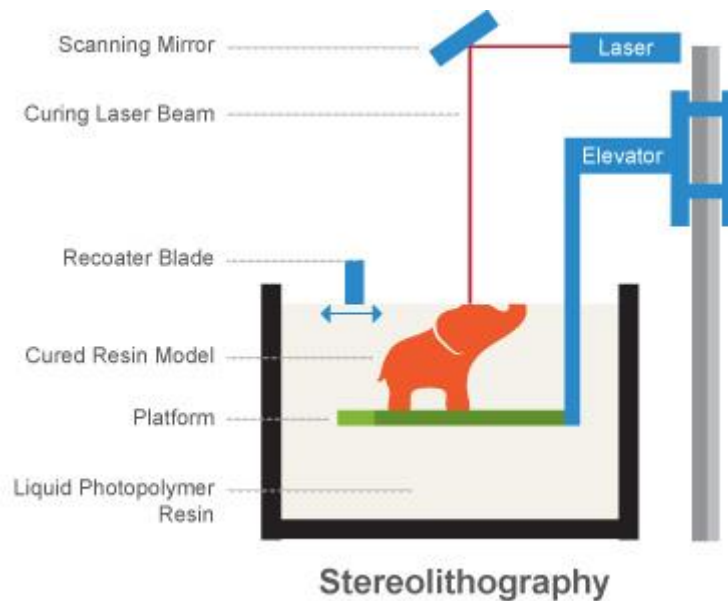
2.4.1 Διεργασίες φωτοπολυμερισμού σε κάδο

Η τεχνολογία που αναπτύχθηκε πρώτη από τις διεργασίες προσθετικής κατασκευής ήταν η Στερεολιθογραφία από τον Charles Hull γύρω στο 1984. Η τεχνολογία αυτή βασίστηκε στη στερεοποίηση φωτοπολυμερών ρητινών με τη χρήση δέσμης laser υπεριώδους ακτινοβολίας. Η στερεολιθογραφία είναι όμως μία μόνο από τις τεχνολογίες που ανήκουν στον γενικότερο όρο των διεργασιών φωτοπολυμερισμού σε κάδο (Vat Polymerization ή VP). Εκτός από αυτήν υπάρχουν

άλλες δύο συγγενικές τεχνολογίες που θα μας απασχολήσουν σε αυτό το κεφάλαιο. Αυτές είναι ο φωτοπολυμερισμός σε κάδο προβολής με μάσκα και ο φωτοπολυμερισμός σε μικρο-κάδο. Όλες οι τεχνολογίες φωτοπολυμερισμού σε κάδο βασίζονται στην ίδια ιδέα, διαφέρουν ωστόσο στα μέσα που χρησιμοποιεί η κάθε τεχνολογία. Η βασική κατασκευαστική ακολουθία είναι η στερεοποίηση της απαιτούμενης γεωμετρίας μίας στρώσης ρητίνης ακριβώς πάνω σε μια άλλη με την χρησιμοποίηση ακτινοβολίας. Η ακτινοβολία που προσπίπτει μπορεί να είναι διαφόρων ειδών ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται.

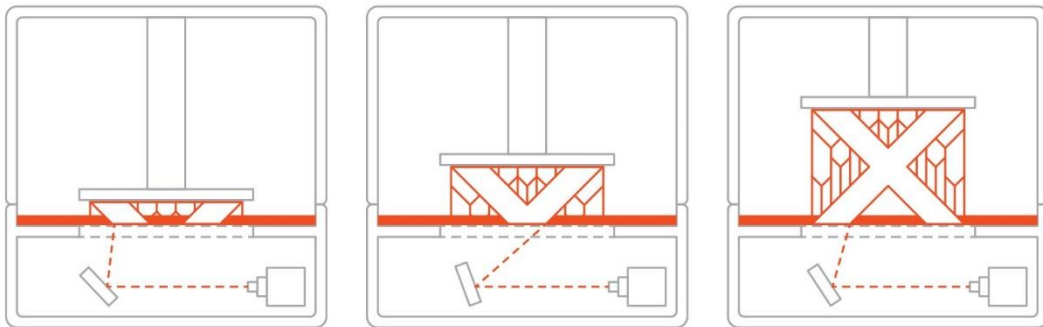
2.4.1.1 Στερεολιθογραφία (Stereolithography)

Στην στερεολιθογραφία, η δημιουργία του τεμαχίου γίνεται μέσω της στερεοποίησης της υγρής φωτοπολυμερούς ρητίνης με τη χρήση laser UV υπεριώδους ακτινοβολίας. Η υγρή ρητίνη βρίσκεται εντός του κάδου της μηχανής. Η δέσμη laser προσπίπτει στην επιφάνεια της ρητίνης, όπου την στερεοποιεί, και κινείται με τέτοιο τρόπο ώστε να διαγράψει ολόκληρη τη διατομή που έχει προκύψει από το CAD μοντέλο για δεδομένη στρώση. Η μία στρώση κατασκευάζεται ακριβώς πάνω από την άλλη και όλο το αντικείμενο δομείται πάνω σε μια πλατφόρμα. Για να κατασκευαστεί η μία στρώση ακριβώς πάνω από την άλλη πρέπει όταν τελειώσει η κατασκευή της μιας διατομής, η πλατφόρμα να μετακινηθεί προς τα κάτω όσο είναι το πάχος μιας στρώσης. Η μετακίνηση της πλατφόρμας γίνεται από διάταξη ανυψωτή με τη χρήση κοχλία κίνησης. (3D Printing Industry, n.d.) Όταν συμβαίνει αυτό η υγρή ρητίνη καλύπτει το τεμάχιο που έχει μεταφερθεί προς τα κάτω. Για να επιβεβαιώσουμε ότι η ρητίνη έχει επικαλύψει ολόκληρο το τεμάχιο και υπάρχει η ίδια ποσότητα ρητίνης σε όλη την επιφάνεια χρησιμοποιούμε ένα σύστημα επίστρωσης που αποτελείται από μια κοίλη λεπίδα. Η λεπίδα γεμίζει με ρητίνη από τον κάδο και περνά πάνω από την περιοχή κατασκευής του κομματιού. Αν σε κάποιο σημείο δεν υπάρχει η απαιτούμενη ποσότητα ρητίνης, η λεπίδα εναποθέτει ρητίνη για την πλήρωση της περιοχής. (Gibson, et al., 2017) Η διάταξη της δέσμης που προσπίπτει στην ρητίνη αποτελείται από ένα Laser υπεριώδους ακτινοβολίας, οπτικά για τη ρύθμιση και την εστίαση του και δύο γαλβανόμετρα που καθοδηγούν τη δέσμη του laser. Κατά την κατασκευή του αντικειμένου είναι απαραίτητη η χρήση υποστηρικτικών δομών, η οποία θα έχει προσδιοριστεί από τον σχεδιαστή στην προετοιμασία του αντικειμένου. (Γιαννατσής, et al., 2015)



Εικόνα 4: Διάταξη μηχανής Στερεολιθογραφίας (PrintSpace3D, n.d.)

Η στερεολιθογραφία όπως και ο φωτοπολυμερισμός σε μικρο-κάδο, που θα αναλυθεί αργότερα αποτελεί τεχνολογία διανυσματικής σάρωσης λόγω της στερεοποίησης της ρητίνης από την προσπίπτουσα δέσμη laser που κινείται εντός του κάδου. Στις αρχές του 2009, με τη λήξη της πατέντας που είχε καταχωρηθεί, πραγματοποιήθηκε μια ραγδαία αύξηση των εταιρειών που ασχολούνταν με την συγκεκριμένη τεχνολογία παραγωγής, κάτι που συνέβαλε και στην άμεση ανάπτυξη της. (Gibson, et al., 2017) Θα αναφερθούν περιληπτικά δύο κύριες μετατροπές/εξελιξεις που πραγματοποιήθηκαν με σκοπό την ευκολότερη κατασκευή. Η πρώτη είναι ότι όλη η διάταξη της μηχανής αντιστράφηκε, δηλαδή η δέσμη laser δεν προσπίπτει από πάνω στην επιφάνεια της ρητίνης αλλά από κάτω. Ο κάδος παραμένει στην ίδια θέση όμως το laser για να στερεοποιήσει την επιφάνεια της ρητίνης, αφού προσπίπτει από κάτω προς τα πάνω, περνάει μέσα από την υπόλοιπη ρητίνη. Αντίστοιχα η πλατφόρμα αντί να κατεβαίνει κάθε φορά που τελειώνει η μια διατομή για να δημιουργηθεί η άλλη από πάνω, ανυψώνεται. Το αντικείμενο είναι κατασκευασμένο στη κάτω πλευρά της οπότε η επόμενη στρώση θα κατασκευαστεί ακριβώς από κάτω. (Formlabs, 2019) Ο προσανατολισμός του κομματιού δεν χρειάζεται να αλλάξει, αυτή η μετατροπή της διάταξης της μηχανής γίνεται για να μην είναι απαραίτητη η χρήση της λεπίδας επίστρωσης. Όταν ανυψώνεται το αντικείμενο η ρητίνη λόγω βαρύτητας, ρυθμίζει η ίδια τη στάθμη της με αποτέλεσμα να διαθέτει το ίδιο πάχος σε όλη την επιφάνεια της. (Bournias Varotsis, n.d.)



Εικόνα 5: Διαδικασία κατασκευής με Στερεολιθογραφία (Bournias Varotsis, n.d.)

Η δεύτερη εξέλιξη της τεχνολογίας στερεολιθογραφίας ανακοινώθηκε από την εταιρεία Formlabs, τον Απρίλιο του 2019, και πήρε το όνομα Στερεολιθογραφία Χαμηλής Ισχύος (Low Force Stereolithography ή LFS). Η τεχνολογία αυτή έχει αναπτύξει όλα τα συστήματα των μηχανών που υπήρχαν τα προηγούμενα χρόνια. Η διάταξη έχει παραμείνει όπως την αναφέραμε στην πρώτη εξέλιξη όμως για την δέσμη laser έχει αναπτυχθεί σύστημα κλιμακούμενης Μονάδας Επεξεργασίας Φωτός (LPU). (Formlabs, 2019) Η μονάδα αυτή αποτελείται από φακούς και κάτοπτρα που παρέχουν ακριβή έλεγχο. Με ένα ενιαίο γαλβανόμετρο η δέσμη λέιζερ υψηλής πυκνότητας περνάει μέσα από ένα χωρικό φίλτρο και κατευθύνεται σε έναν καθρέπτη πτυχώσεως και ένα παραβολικό κάτοπτρο έτσι η δέσμη είναι πάντα κάθετη προς το επίπεδο κατασκευής. Το άλλο σύστημα που αναπτύχθηκε είναι η ευέλικτη δεξαμενή. Η ποσότητα της ρητίνης εντός του κάδου είναι πολύ μικρή και ρυθμίζεται από μια μεμβράνη που βρίσκεται στο πάνω μέρος της ρητίνης, επομένως δεν υπάρχει ποτέ λιγότερη ρητίνη από την απαιτούμενη. Το αποτέλεσμα αυτών των συστημάτων είναι να μειώνονται οι δυνάμεις που ασκούνται στο προϊόν κατά την κατασκευή του. Αυτό επίσης εξυπηρετεί και στην χρήση ελάχιστων υποστηρικτικών δομών κατά την κατασκευή του. (Griffiths, 2019)

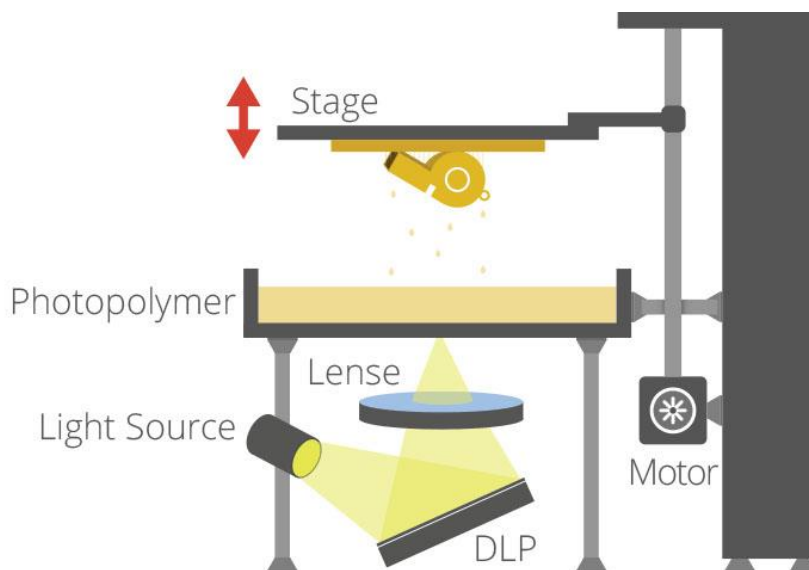
2.4.1.2 Φωτοπολυμερισμός σε μικρο-κάδο

Η ανάγκη παραγωγής τεμαχίων με ιδιαίτερα μικρές διαστάσεις ανέπτυξε την τεχνολογία φωτοπολυμερισμού σε μικρο-κάδο με τη χρήση laser ή ακτίνων Χ. Με αυτή τη διεργασία κατασκευάζονται πολύπλοκης γεωμετρικής μορφής τεμάχια που έχουν μέγεθος μικρότερο του 1 mm. Η διαφορά στα συστήματα των μηχανών που χρησιμοποιούν φωτοπολυμερισμό σε μικρο-κάδο είναι πρώτον ότι το μέγεθος της δέσμης του laser που προσπίπτει στη ρητίνη πρέπει να είναι της τάξεως μερικών μm και δεύτερον ότι η κίνηση για την δημιουργία της διατομής της στρώσης δεν γίνεται από το laser αλλά από τον κάδο. Η δέσμη laser λόγω της διάταξης της και των δίσκων εστίασης που χρησιμοποιούνται προσπίπτει πάντοτε σε ένα σημείο και για να

στερεοποιηθεί η πολυμερής ρητίνη πρέπει να κινείται ο κάδος. Για να επιτευχθεί η απαραίτητη γεωμετρική ακρίβεια θα πρέπει και ο κάδος να μετακινείται με ακρίβεια τοποθέτησης μικρότερης του 1 μm . Το μέγιστο μέγεθος αντικειμένου που κατασκευάζεται στις συμβατικές μηχανές φωτοπολυμερισμού σε μικρο-κάδο είναι 10mm x 10mm x 10mm. (Gibson, et al., 2017)

2.4.1.3 Φωτοπολυμερισμός σε κάδο προβολής με μάσκα

Η τεχνολογία φωτοπολυμερισμού σε κάδο προβολής με μάσκα δεν είναι διανυσματικής σάρωσης όπως οι άλλες δύο τεχνολογίες. Σε αυτή τη τεχνολογία η στερεοποίηση της ρητίνης γίνεται σε όλη τη στρώση ταυτόχρονα. Δυναμικές εικόνες προβάλλονται στην επιφάνεια της ρητίνης με τη χρήση κατόπτρων DMD και ως πηγή ακτινοβολίας υπεριώδεις λάμπες. Βέβαια ως πηγή ακτινοβολίας έχουν χρησιμοποιηθεί πολλά είδη, ακόμα και λάμπες ορατού φωτός. Η κατασκευή του προϊόντος γίνεται στρώση προς στρώση και είναι εύκολα αντιληπτό ότι το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι η ταχύτητα δημιουργίας του κομματιού. (3D Printing Industry, n.d.)



Εικόνα 6: Διάταξη μηχανής φωτοπολυμερισμού σε κάδο προβολής με μάσκα (Lighting, n.d.)

2.4.1.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της διεργασίας

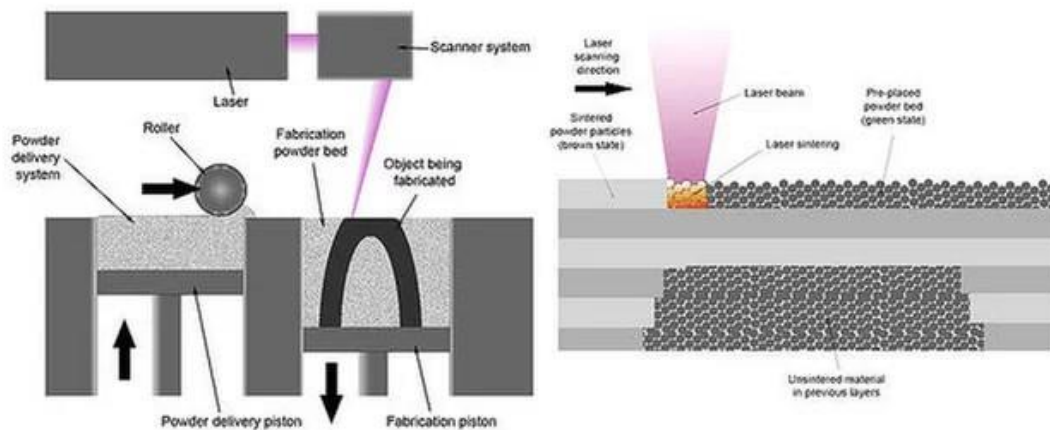
Γενικά οι τεχνολογίες πολυμερισμού σε κάδο παρουσιάζουν τα ίδια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Τα πλεονεκτήματα είναι η γεωμετρική ακρίβεια και η ποιότητα επιφανείας του κομματιού, όπως και η δυνατότητα, μέσω των διάφορων μηχανών, να κατασκευαστούν αντικείμενα σε πολλές κλίμακες μεγεθών. Το μειονέκτημα των τεχνολογιών αυτών είναι η χρήση μόνο φωτοπολυμερών υλικών και ειδικότερα των ακρυλικών και εποξειδικών. Τα υλικά αυτά δεν παρουσιάζουν αντοχή σε κρούση και με το πέρασμα του χρόνου υποβαθμίζονται συνεχώς οι μηχανικές ιδιότητες. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων παρατηρείται ότι οι τεχνολογίες φωτοπολυμερισμού σε κάδο είναι απόλυτα επωφελείς για την αναπαράσταση ενός 3D μοντέλου όμως δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή τεμαχίων με στόχο τη λειτουργική χρήση τους.

2.4.2 Διεργασία σύντηξης πούδρας σε κλίνη

Μία από τις πρώτες τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής που αναπτύχθηκε για εμπορικούς σκοπούς ήταν η επιλεκτική συσσωμάτωση με laser (Selective Laser Sintering ή SLS) από το Πανεπιστήμιο του Texas. Αυτή αποτέλεσε τον βασικό κορμό λειτουργίας όλων των διεργασιών σύντηξης πούδρας σε κλίνη (Powder Bed Fusion ή PBF). Σε αρκετά επιστημονικά άρθρα ή βιβλία το σύνολο των διεργασιών αναφέρεται ως διεργασίες επιλεκτικής συσσωμάτωσης με laser. Η χρήση αυτή όμως είναι λανθασμένη, καθώς έχει αναπτυχθεί μεγάλος αριθμός τεχνολογιών όπου η συσσωμάτωση γίνεται με άλλες πηγές θερμότητας. Επίσης έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνολογίες όπου πέρα από τα κοινά χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν, επικεντρώνονται στο υλικό της πούδρας που χρησιμοποιούν για την κατασκευή του αντικειμένου. Αρχικά οι τεχνολογίες συσσωμάτωσης με laser αναπτύχθηκαν για την δημιουργία πλαστικών πρωτοτύπων, όμως άμεσα επεκτάθηκαν και σε πολλά άλλα υλικά και κυρίως στη μεταλλική πούδρα.

Τα κοινά χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν όλες οι τεχνολογίες σύντηξης πούδρας σε κλίνη είναι η χρήση μιας ή περισσότερων πηγών θερμότητας, η δημιουργία μηχανισμού για την πρόσθεση και εξομάλυνση της πούδρας στο θάλαμο κατασκευής και η ύπαρξη θερμαντικής διάταξης. Επίσης τα βήματα που ακολουθούνται για την κατασκευή ενός τεμαχίου είναι σχεδόν τα ίδια. Η κατασκευή του αντικειμένου γίνεται εντός κλειστού θαλάμου, ο οποίος είναι γεμάτος με αέριο άζωτο για την αποφυγή οξείδωσης. Η θερμοκρασία εντός του θαλάμου διατηρείται σε υψηλά επίπεδα και λίγο κάτω από το σημείο τήξης από θερμαντικές διατάξεις υπέρυθρης ακτινοβολίας, για να μην απαιτείται μεγάλο ποσό ενέργειας από το laser για τη σύντηξη. (Gibson, et al., 2017) Κατά την έναρξη της κατασκευής η πούδρα βρίσκεται εντός των τροφοδοτικών δοχείων. Η διάταξη πρόσθεσης και εξομάλυνσης

της πούδρας, που ίσως αποτελείται από έναν κύλινδρο διάστρωσης, εναποθέτει το πρώτο στρώμα πούδρας επάνω στην πλατφόρμα κατασκευής. Η πηγή θερμότητας που συνήθως είναι μία δέσμη laser CO₂ κινείται πάνω στη πούδρα και τήκει τους κόκκους της πούδρας με στόχο να σχηματίσει την απαραίτητη διατομή. Μετά το τέλος της διατομής η πλατφόρμα, πάνω στην οποία κατασκευάζεται το τεμάχιο, υποβαθμίζεται κατά το πάχος μίας στρώσης. Αμέσως μετά ακολουθεί η εναπόθεση του επόμενου στρώματος πούδρας. Ύστερα από την περάτωση της κατασκευής του μοντέλου ο θάλαμος κατασκευής πρέπει να φτάσει ομαλά σε θερμοκρασία περιβάλλοντος γιατί αλλιώς υπάρχει περίπτωση στρέβλωσης του κομματιού. Όταν ο θάλαμος είναι σε κατάλληλη θερμοκρασία μπορούμε να απομακρυνθεί η υπολειπόμενη πούδρα που έχει βοηθήσει κατά την κατασκευή σαν υποστηρικτική δομή του τεμαχίου. (Koslow, 2019)



Εικόνα 7: Διεργασία Επιλεκτικής Συσσωμάτωσης με laser (WikiPops, n.d.)

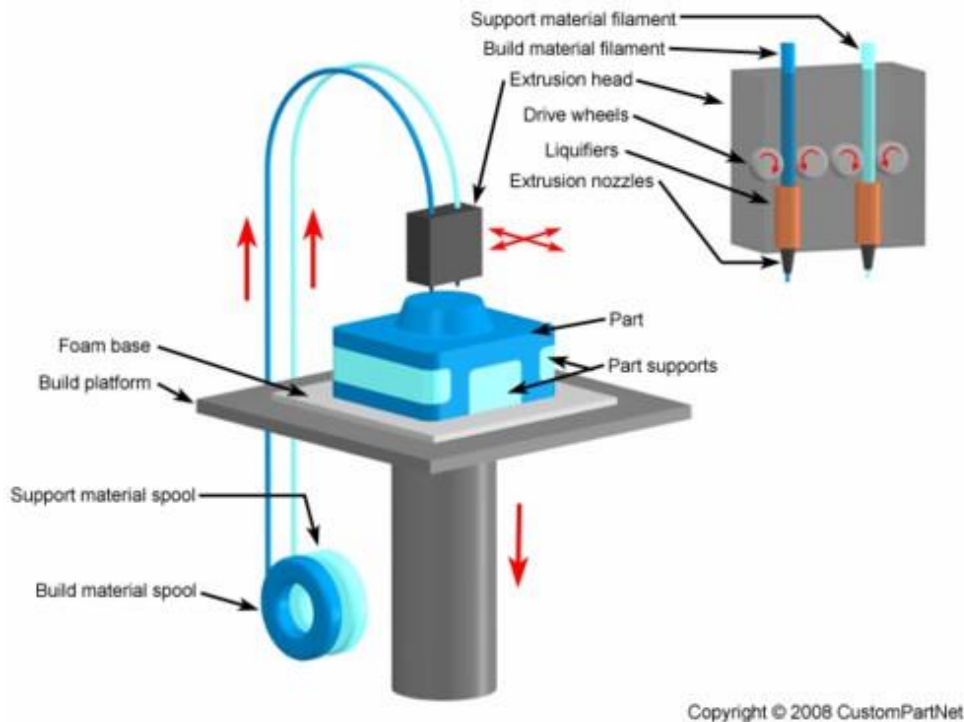
Η χρήση τεχνολογιών σύντηξης πούδρας σε κλίνη παρέχει κάποιες δυνατότητες που θα μπορούσαμε να χαρακτηρίσουμε ως πλεονεκτήματα αυτής της διεργασίας. Η πρώτη δυνατότητα αφορά την ποικιλία των υλικών που μπορεί να επεξεργαστεί. Επειδή το υλικό βρίσκεται σε μορφή πούδρας μπορεί να επεξεργαστεί με ανάλογη ευκολία μέταλλα, πλαστικά και κεραμικά υλικά. Μια δεύτερη δυνατότητα είναι ότι με την ύπαρξη της υπολειπόμενης πούδρας σε κάθε στρώση, εξοικονομείται χρόνος από την μη κατασκευή υποστηρικτικών δομών και το τελικό προϊόν μπορεί να κατασκευαστεί εύκολα όσο πολύπλοκη και να είναι η γεωμετρία του. (Bournias Varotsis, n.d.)

Τα μειονεκτήματα των τεχνολογιών αυτών εντοπίζονται κυρίως στο μεγάλο χρόνο απόψυξης για την αποφυγή στρέβλωσης, στην δημιουργία πορώδους και την ποιότητα επιφανείας. Η ποιότητα επιφανείας εξαρτάται από τους κόκκους της πούδρας, όσο μικρότεροι είναι οι κόκκοι τόσο καλύτερη ποιότητα επιφανείας δημιουργείται κατά την κατασκευή. Η ποιότητα της επιφάνειας μπορεί να μετεπεξεργαστεί για να φτάσει στο απαιτούμενο επίπεδο. (Gibson, et al., 2017)

2.4.3 Διεργασίες εξώθησης υλικού

Οι μηχανές προσθετικής κατασκευής που χρησιμοποιούν τεχνολογία εξώθησης υλικού είναι οι πλέον δημοφιλής στην αγορά. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η αγορά τους ακόμα και για οικιακή χρήση, χάρις στην προσιτή τιμή τους. Η τεχνολογία εξώθησης υλικού βασίζεται στην στρωματική κατασκευή του αντικειμένου όπως και οι προηγούμενες διεργασίες. Η κατασκευή του κομματιού γίνεται με την εξώθηση υλικού και έπειτα τη στερεοποίηση του. Πιο συνηθισμένη τεχνολογία θεωρείται η εναπόθεση τηγμένου υλικού (Fused Deposition Modeling ή FDM) από ακροφύσιο εντός θερμαινόμενου θαλάμου και η στερεοποίηση του υλικού με τη μείωση της θερμοκρασίας του. Υπάρχουν όμως και εναλλακτικές τεχνολογίες όπου το υλικό στερεοποιείται έπειτα από μια χημική αλλαγή, όπως με τη χρήση ενός σκληρυντή, με υπολειπόμενο διαλύτη ή με αντίδραση με τον αέρα. (Gibson, et al., 2017)

Για την κατασκευή αντικειμένου με τη χρήση μηχανών προσθετικής κατασκευής με εξώθηση υλικού τροφοδοτείται η διάταξη με το απαραίτητο υλικό. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι τα πολυμερή ABS και PLA. Η τροφοδοσία είναι συνεχής και γίνεται με την βοήθεια ενός κοχλία ή παρόμοιου προωθητικού μηχανισμού σε μορφή συνεχούς νήματος. Το υλικό επίσης μπορεί να είναι σε μορφή πούδρας ή σφαιριδίων, τότε η ρευστοποίηση του υλικού γίνεται εντός του θαλάμου και έπειτα προωθείται με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα. Η θερμοκρασία εντός του θαλάμου ρευστοποίησης πρέπει να μένει σταθερή και να είναι λίγο μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία τήξης του υλικού. Την απαραίτητη θερμότητα στη διάταξη παρέχουν θερμικά πηνία που βρίσκονται γύρω από το θάλαμο ρευστοποίησης. Για να επιτευχθεί σταθερότερη θερμοκρασία πρέπει ο θάλαμος να είναι μικρός. Η εξώθηση του ρευστοποιημένου υλικού γίνεται μέσω του ακροφυσίου, οπότε η ακρίβεια της επιφάνειας και το ελάχιστο κατασκευασμένο χαρακτηριστικό εξαρτάται από τη διάμετρο του. Η εξώθηση του υλικού διαμέσου του ακροφυσίου ελέγχεται από την πτώση πίεσης μεταξύ του θαλάμου και της ατμόσφαιρας και την ταχύτητα κίνησης όλης της διάταξης του ακροφυσίου σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση. Το υλικό που έχει εξωθηθεί ιδανικά διατηρεί το ίδιο σχήμα και μέγεθος. Η θερμοκρασία του παραμένει για λίγο χρονικό διάστημα υψηλή ώστε να συγκολληθεί με τις στρώσεις που έρχεται σε επαφή και να στερεοποιηθεί μαζί με αυτές. Η διάταξη του ακροφυσίου κατά την δημιουργία μιας στρώσης κινείται στους άξονες X-Y χρησιμοποιώντας σύστημα με κοχλίες ή ιμάντες κίνησης. Η μετακίνηση κατά τον άξονα Z για την δημιουργία της επόμενης στρώσης γίνεται είτε με τη μετακίνηση της πλατφόρμας προς τα κάτω είτε με την μετακίνηση του συστήματος κίνησης του ακροφυσίου προς τα πάνω. (Bournias Varotsis, n.d.)



Εικόνα 8: Διάταξη μηχανής τεχνολογίας εξώθησης τηγμένου υλικού (LLP, n.d.)

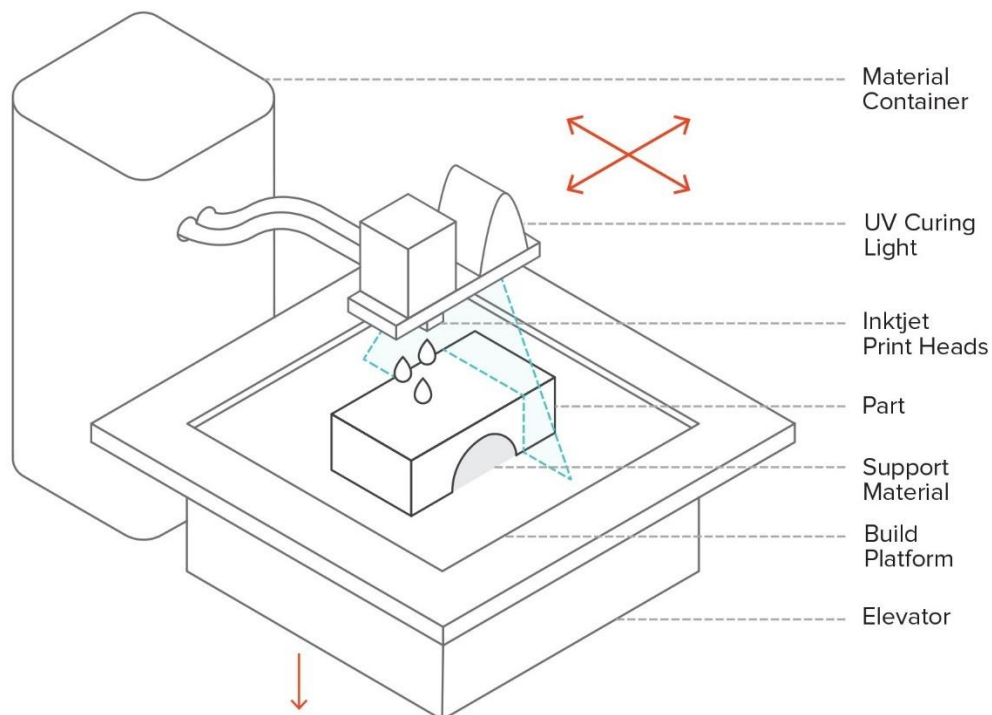
Η τεχνολογία αυτή απαιτεί την δημιουργία δομών για την στήριξη των ελεύθερων γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Αρχικά οι υποστηρικτικές δομές αποτελούνταν από το ίδιο υλικό, η ανάπτυξη όμως της τεχνολογίας και η χρήση δύο ή περισσότερων θαλάμων εξώθησης έδωσαν τη δυνατότητα η κατασκευή των στηριγμάτων να γίνεται από δευτερεύων υλικό οπότε και η απομάκρυνση του να είναι πολύ πιο εύκολη. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονίσουμε ένα βασικό χαρακτηριστικό της τεχνολογίας εξώθησης υλικού. Κατά την προετοιμασία η μηχανή προσθετικής κατασκευής λαμβάνει από το STL αρχείο τα περιγράμματα της κατασκευαζόμενης διατομής όμως επειδή πριν την εξώθηση ο χώρος ήταν κενός θα πρέπει να μεριμνήσει ο χειριστής για την συμπλήρωση του χώρου με κάποιο μοτίβο συμπλήρωσης που θα επιλέξει.

Χρησιμοποιώντας μηχανές προσθετικής κατασκευής με χρήση τεχνολογίας εξώθησης υλικού παρατηρούνται κάποια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας αφορούν το εύρος των υλικών που χρησιμοποιούνται και τις μηχανικές ιδιότητες που παρουσιάζουν τα κατασκευασμένα κομμάτια. Η ταχύτητα κατασκευής με τη χρήση αυτής της τεχνολογίας είναι αργή σε σχέση με άλλες τεχνολογίες όμως εξαιτίας της διαθεσιμότητας πολλών μηχανών, που χρησιμοποιούν αυτή την τεχνολογία, επιτυγχάνονται οι στόχοι της άμεσης διάθεσης των αντικειμένων. Μειονέκτημα αυτής της διεργασίας αποτελεί η ορατή αλλαγή των στρώσεων. Για την επίτευξη λείας επιφάνειας απαιτείται φινίρισμα.

2.4.4 Διεργασίες εναπόθεσης υλικού

Η εναπόθεση υλικού είναι μια διεργασία προσθετικής κατασκευής τρισδιάστατων αντικειμένων που βασίζεται στη λειτουργία των inkjet εκτυπωτών. Όπως οι εκτυπωτές τεχνολογίας inkjet χρησιμοποιούνται για να εναποθέσουν μελάνι πάνω στο χαρτί, έτσι και οι διεργασίες εναπόθεσης υλικού απελευθερώνουν το υλικό σε ρευστή μορφή για την δημιουργία μιας στρώσης.

Η διαδικασία κατασκευής του αντικειμένου ξεκινάει με την παροχή του υλικού κατασκευής στην μηχανή. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι κεραμικά, μέταλλα και πολυμερή, συνήθως όμως χρησιμοποιούνται θερμοπλαστικές φωτοπολυμερείς ρητίνες. Έπειτα το υλικό θερμαίνεται για να ρευστοποιηθεί και να επιτευχθεί το απαραίτητο ιξώδες. Όταν η μηχανή AM είναι έτοιμη, η κεφαλή εκτύπωσης που διαθέτει εκατοντάδες ακροφύσια κινείται στον άξονα X και όπου είναι απαραίτητο απελευθερώνει μικροσκοπικά σταγονίδια ρευστού υλικού. Μια πηγή υπεριώδους ακτινοβολίας που είναι συνδεδεμένη με την κεφαλή εκτύπωσης πολυμερίζει το εναποτεθειμένο υλικό, στερεοποιώντας το και δημιουργώντας το πρώτο στρώμα του κομματιού. Για τη δημιουργία του επόμενου στρώματος η πλατφόρμα, πάνω στην οποία είναι κατασκευασμένο το πρώτο στρώμα, μετακινείται προς τα κάτω κατά το πάχος μίας στρώσης. (Greguric, 2019)



Εικόνα 9: Διάταξη μηχανής τεχνολογίας εναπόθεσης υλικού (Bournias Varotsis, n.d.)

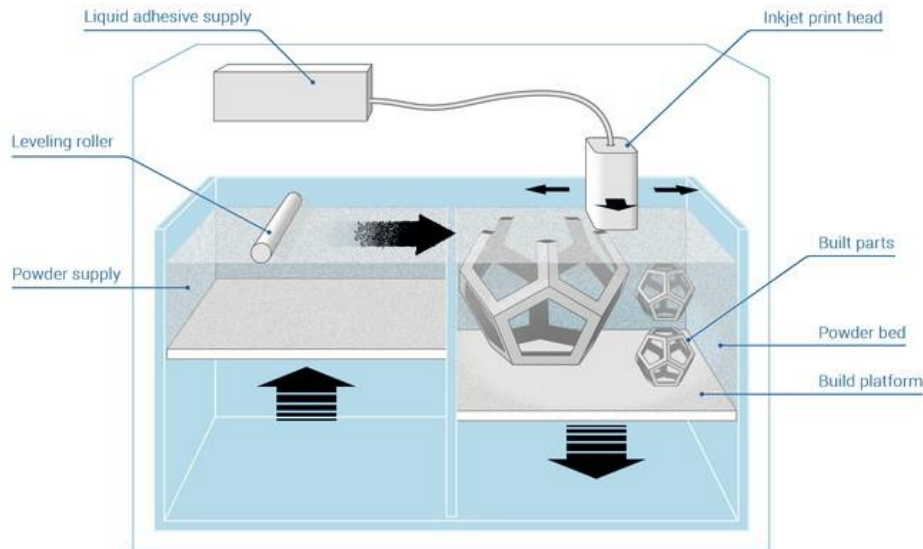
Το τελικό προϊόν διαθέτει υψηλή ακρίβεια και πολύ λεία επιφάνεια. Η χρήση κεφαλής εκτύπωσης με εκατοντάδες ακροφύσια παρέχει πλεονεκτήματα που δεν παρουσιάζονται σε άλλες διεργασίες. Πρώτο και κυριότερο είναι η κατασκευή τεμαχίων με τη χρήση πολλών διαφορετικών υλικών καθώς και χρωμάτων. Αυτό συμβαίνει αλλάζοντας τη σύσταση του υλικού εντός των δύο κεφαλών εκτύπωσης, που μπορεί να διαθέτει η μηχανή προσθετικής κατασκευής. Δεύτερο πλεονέκτημα είναι η χρήση διαφορετικού υλικού για την δημιουργία της υποστηρικτική δομής, καθιστώντας την απομάκρυνση του πιο εύκολη. Οι διεργασίες εναπόθεσης υλικού χρησιμοποιούνται συνήθως για τη κατασκευή ρεαλιστικών και απτικών μοντέλων λόγω της ακρίβειας και της λειότερης επιφάνειας όμως μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία καλουπιών χύτευσης. (Bournias Varotsis, n.d.)

2.4.5 Διεργασίες εναπόθεσης συγκολλητικής ουσίας

Η τεχνολογία εναπόθεσης συγκολλητικής ουσίας (Binder Jetting ή BJ) αναπτύχθηκε στο MIT και πήρε αρχικά το όνομα τρισδιάστατη εκτύπωση λόγω της ομοιότητας της με την τεχνολογία inkjet των δισδιάστατων εκτυπωτών. Η διεργασία αυτή παρουσιάζει πολλά κοινά χαρακτηριστικά με άλλες δύο διεργασίες που είδαμε πιο πριν και αναλύσαμε και ουσιαστικά αποτελεί μια μείξη αυτών.

Οι διεργασίες αυτές είναι της σύντηξης πούδρας σε κλίνη και της εναπόθεσης υλικού. Η κατασκευή του αντικειμένου γίνεται με την επιλεκτική εναπόθεση συγκολλητικής ουσίας που παρέχει σύνδεση στους κόκκους της πούδρας. Ειδικότερα η διαδικασία της δημιουργίας ενός αντικειμένου ξεκινάει με την επίστρωση ενός στρώματος πούδρας πάνω στην πλατφόρμα κατασκευής. Παρόμοια με την επίστρωση στη διεργασία σύντηξης πούδρας σε κλίνη, η επίστρωση γίνεται με την βοήθεια ενός αντίστροφα με τους δείκτες του ρολογιού περιστρεφόμενου κυλινδρικού μηχανισμού. Αφού έχει στρωθεί το κατασκευαστικό υλικό, κινείται η κεφαλή εκτύπωσης στους άξονες X – Y και εναποθέτει επιλεκτικά συγκολλητική ουσία, ώστε να συγκολληθούν οι κόκκοι της πούδρας μεταξύ τους σε ένα στερεό αντικείμενο. Η κεφαλή εκτύπωσης διαθέτει όπως στην διεργασία εναπόθεσης υλικού πολλά ακροφύσια. Για την δημιουργία χρωματισμένων τελικών αντικειμένων υπάρχουν κεφαλές όπου χωρίζουν τα ακροφύσια. Σε κάποια από αυτά περνάει μόνο η συγκολλητική ουσία, ενώ στα υπόλοιπα περνάει μόνο το χρώμα. Με τον ίδιο τρόπο που γίνεται η εναπόθεση της συγκολλητικής ουσίας για τη δημιουργία του τεμαχίου, γίνεται και η επιλεκτική εναπόθεση του χρώματος για τον χρωματισμό του αντικειμένου. Μετά τη δημιουργία μιας στρώσης η πλατφόρμα κατασκευής κινείται προς τα κάτω και γίνεται επίστρωση του επόμενου στρώματος, οπότε η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την ολοκλήρωση της κατασκευής του κομματιού. Το

αντικείμενο παραμένει εντός της κλίνης μέχρι να στερεοποιηθεί η συγκολλητική ουσία και να αποκτήσει το τεμάχιο την απαραίτητη αντοχή. (Bournias Varotsis, n.d.)



Εικόνα 10: Διαδικασία κατασκευής με εναπόθεση συγκολλητικής ουσίας (Marc, n.d.)

Αντίστοιχα με τη διεργασία σύντηξης πούδρας σε κλίνη έτσι και σε αυτή τη διεργασία δεν χρειάζεται η δημιουργία υποστηρικτικής δομής γιατί στηρίζεται όλο το τεμάχιο με την ασύνδετη πούδρα. Ανάλογα με το υλικό και τη συγκολλητική ουσία που έχουμε επιλέξει ακολουθούμε και κάποια βήματα μετεπεξεργασίας. Πρώτο βήμα είναι η αφαίρεση του τελικού προϊόντος από την μηχανή και η απομάκρυνση της ασύνδετης πούδρας. Έπειτα γίνεται επεξεργασία με διηθητικό παράγοντα ή τοποθέτηση εντός θερμικού κλίβανου, με σκοπό την βελτίωση της μηχανικής αντοχής του και την απόκτηση άλλων επιθυμητών μηχανικών ιδιοτήτων. Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι στη διεργασία αυτή δεν χρησιμοποιείται καμία διάταξη πρόσδοσης θερμότητας και ο χρόνος κατασκευής του αντικειμένου εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα εναπόθεσης της κεφαλής. Οι κεφαλές εναποθέτουν την συγκολλητική ουσία με μεγάλη ταχύτητα, οπότε η διεργασία αυτή συνδυάζει το χαμηλό κόστος με την ταχύτητα παραγωγής. Η λειτουργικότητα των κομματιών εξαρτάται επίσης από τα υλικά που χρησιμοποιήσαμε, δηλαδή αντικείμενα που παράγονται από πούδρες αμύλου ή πολυμερούς χρησιμοποιούνται κυρίως για οπτικά μοντέλα. Τεμάχια που κατασκευάζονται από πούδρα πολυμερούς και έχουν υποστεί επεξεργασία με κηροειδή διηθητικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μοντέλα χύτευσης ακριβείας. Σαν λειτουργικά πρωτότυπα χρησιμοποιούνται κομμάτια που κατασκευάζονται από πούδρες μετάλλων. Τέλος η διεργασία αυτή είναι η μόνη που έχει εξελιχθεί στο κομμάτι της δυνατότητας κατασκευής με συνεχή

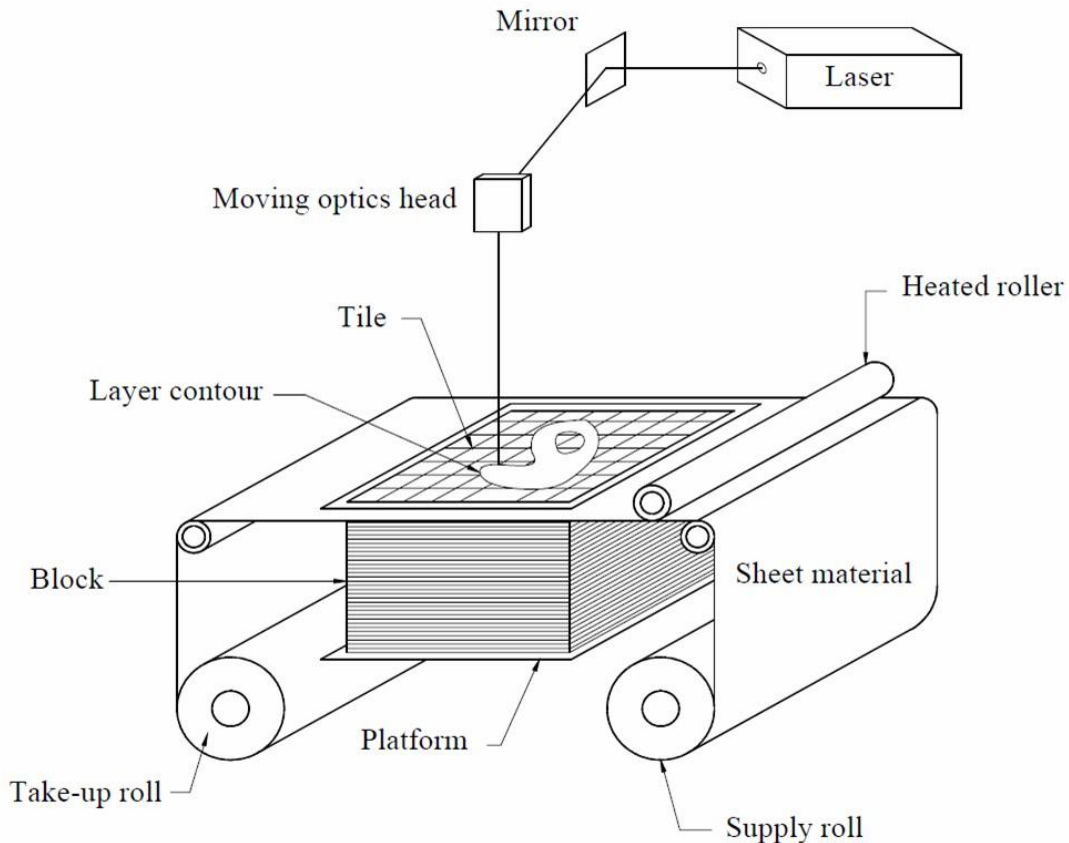
τρόπο, δηλαδή η μηχανή μπορεί να κατασκευάζει ένα αντικείμενο με διαστάσεις πολύ μεγαλύτερες από τις δικές της. (Gibson, et al., 2017)

2.4.6 Διεργασίες επάλληλων φύλλων

Η διεργασία συγκόλλησης επάλληλων φύλλων ήταν από τις πρώτες εμπορικά διαθέσιμες τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής. Βασίζεται και αυτή στην στρωματική κατασκευή του τελικού προϊόντος όμως η λειτουργία της διαφέρει αρκετά σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες. Η κατασκευή του κομματιού γίνεται με τη συγκόλληση φύλλων και τη διαμόρφωση τους για να πάρουν την τελική τους μορφή. Για τη δημιουργία του κομματιού έχουν αναπτυχθεί δύο διεργασίες που διαφέρουν στην σειρά των σταδίων κατασκευής. Στην πρώτη διεργασία γίνεται πρώτα η συγκόλληση του νέου στρώματος στα προηγούμενα και μετά η διαμόρφωση του ενώ στη δεύτερη γίνεται πρώτα η διαμόρφωση της κάθε διατομής και μετά η συγκόλληση του στρώματος στα προηγούμενα. Πιο συχνά χρησιμοποιείται η πρώτη διεργασία οπότε θα αναλύσουμε τα στάδια αυτής. Η συγκόλληση των στρώσεων μπορεί να γίνει με διάφορες τεχνικές, όπως με κόλλα, με θερμική συνένωση, με σύσφιγξη ή και με συνδυασμό. (Gibson, et al., 2017)

Η κατασκευαστική διαδικασία ξεκινάει με την παροχή του απαραίτητου φύλλου πάνω στην πλατφόρμα κατασκευής από κυλίνδρους τροφοδοσίας. Τα φύλλα είναι επικαλυμμένα με κόλλα πολυμερικής βάσης από την κάτω πλευρά. Όταν σταματήσουν την κίνησή τους οι κύλινδροι τροφοδοσίας, περνάει πάνω από το φύλλο ένας θερμαινόμενος κύλινδρος, που θερμαίνει την κόλλα και ασκεί την απαιτούμενη πίεση στο φύλλο για να κολλήσει. Έπειτα μια δέσμη laser CO₂ 25-50 W ή μια λεπίδα προσπίπτει και κόβει το φύλλο για αντίστοιχες διατομές του STL αρχείου. Το υπόλοιπο φύλλο που δεν ανήκει στο κομμάτι, τεμαχίζεται σε ορθογώνια τμήματα. Όταν τελειώσει η κατασκευή της στρώσης, η πλατφόρμα κινείται προς τα κάτω και οι κύλινδροι παρέχουν την επόμενη στρώση του φύλλου. Αφού ολοκληρωθεί η κατασκευή, το αντικείμενο βρίσκεται εγκλωβισμένο από το πλεονάζον υλικό, δηλαδή τα κομμάτια ορθογωνικής διατομής. Η απομάκρυνση γίνεται μόνο χειρωνακτικά με μεγάλη προσοχή στις περιοχές με ιδιαίτερα μορφολογικά χαρακτηριστικά. (Γιαννατσής, et al., 2015) Με την διεργασία αυτή μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε πολλά διαφορετικά υλικά που μπορούν να παραχθούν σε φύλλα, όπως χαρτιά, πολυμερή και μέταλλα. Το πλεονάζον υλικό, που ενδεχομένως είναι και περισσότερο από το υλικό του τελικού τεμαχίου, είναι άχρηστο οπότε η χρήση πολυμερών ή μετάλλων αυξάνει υπερβολικά το κόστος της κατασκευής. Αντίθετα για το χαρτί το κόστος δεν είναι μεγάλο. Επιπλέον μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής αν το αντικείμενο έχει δημιουργηθεί από χαρτί πρέπει να καλυφθεί με βερνίκι για την αποφυγή της υγρασίας. Τα τελικά προϊόντα χρησιμοποιούνται ως πρότυπα. Η λειτουργική τους χρήση είναι απαγορευτική. Το

χαμηλό κόστος και η ταχύτητα κατασκευής του μοντέλου είναι οι λόγοι που έχει αναπτυχθεί αυτή η διεργασία, επικαλύπτοντας έτσι το μειονέκτημα της ακρίβειας του προϊόντος. (Gibson, et al., 2017)



Εικόνα 11: Διάταξη μηχανής τεχνολογίας επάλληλων φύλλων

2.5 Εργασίες Μετεπεξεργασίας

Μετά το πέρας της κατασκευής του κομματιού, είναι απαραίτητη η μετεπεξεργασία για να αποκτήσει το τεμάχιο τις τελικές προδιαγραφές που έχει θέσει ο κατασκευαστής. Οι εργασίες αυτές αφορούν τόσο την γεωμετρική ακρίβεια και την υφή της τελικής επιφάνειας όσο και τις φυσικές ιδιότητες που πρέπει να πληρεί το τεμάχιο, πριν τη χρήση του.

Ξεκινώντας η πρώτη εργασία που πρέπει να γίνει σε όλα τα τεμάχια είναι η απομάκρυνση τους από την μηχανή κατασκευής. Αυτή η ενέργεια διαφέρει από μηχανή σε μηχανή ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιεί. Στις μηχανές που χρησιμοποιούν πούδρα, απαιτείται χρόνος μετά την κατασκευή του τεμαχίου για να αποκτήσει ομαλά ο χώρος κατασκευής θερμοκρασία περιβάλλοντος. Έπειτα ο χειριστής της μηχανής μπορεί να αφαιρέσει τον κάδο που περιέχει το τεμάχιο και με

την βοήθεια ενός πινέλου να απομακρύνει την περιττή πούδρα για να απομείνει το τεμάχιο. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι η περιττή πούδρα λειτουργεί ως υποστηρικτική δομή του αντικειμένου. Αντίστοιχα στις μηχανές που χρησιμοποιούν εξώθηση υλικού κατά τις προπαρασκευαστικές διεργασίες πρέπει να προστεθούν υποστηρικτικές δομές για να μην αστοχήσει διαστασιολογικά το τελικό προϊόν. Τα στηρίγματα είναι απαραίτητα να απομακρυνθούν κατά τη μετεπεξεργασία. Αν τα στηρίγματα είναι από το ίδιο υλικό με το προϊόν, η αφαίρεση τους γίνεται με χειρωνακτική εργασία. Σε περίπτωση που τα στηρίγματα είναι από διαφορετικό υλικό, η αφαίρεση τους μπορεί να γίνει εμβαπτίζοντας τα σε κατάλληλο διαλύτη ή τοποθετώντας τα σε θερμικό κλίβανο. Και στις δύο περιπτώσεις το τελικό αντικείμενο δεν αλλοιώνεται.

Οι επιφάνειες του τελικού προϊόντος συνήθως χρειάζονται επεξεργασία για να αποκτήσουν την τελική τους απαιτούμενη υφή. Ανάλογα με την υφή που απαιτείται, διαλέγουμε και την εργασία μετεπεξεργασίας που θα χρησιμοποιηθεί. Κάποιες από τις εργασίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι η σφαιροβολή, το στεγνό ή υγρό γυαλοχάρτισμα, η επικάλυψη και μετά το γυαλοχάρτισμα, η λείανση σε περιστρεφόμενο βαρέλι και η λείανση με παχύρευστα υγρά. Η σφαιροβολή γίνεται χτυπώντας την επιφάνεια με μικρά πλαστικά σφαιρίδια με αποτέλεσμα να εξομαλυνθεί η υφή και να πάρει μια ματ εμφάνιση. Αν επιθυμούμε πιο λεία επιφάνεια τότε πρέπει να εφαρμοστεί χειρωνακτικά στεγνό ή υγρό γυαλοχάρτισμα. Ακόμα πιο λεία και γυαλιστερή επιφάνεια αποκτά το αντικείμενο αν προηγηθεί και η επικάλυψη από το γυαλοχάρτισμα. Συνήθως η επικάλυψη γίνεται με κάποιο κυανοακρυλικό στόκο. Με αυτό το τρόπο φράσσονται κάποιοι επιφανειακοί πόροι και η επιφάνεια γίνεται πιο λεία από την αρχική. Στη συνέχεια το γυαλοχάρτισμα θα βελτιώσει το τελικό αποτέλεσμα.

Οι δύο επόμενες εργασίες είναι αυτοματοποιημένες σε αντίθεση με αυτές που προαναφέρθηκαν. Η λείανση σε περιστρεφόμενο βαρέλι γίνεται με τη χρήση μεταλλικών ρινισμάτων και τη δύναμη της περιστροφής. Το αντικείμενο τοποθετείται εντός του βαρελιού όπου υπάρχουν ήδη τα ρινίσματα. Με την έναρξη της περιστροφής του βαρελιού υπάρχει μια συνεχής ανάμιξη όπου πετυχαίνει την λείανση των εξωτερικών επιφανειών του αντικειμένου. Για την λείανση των εσωτερικών επιφανειών χρησιμοποιούνται παχύρευστα υγρά. Το παχύρευστο υγρό, που βρίσκεται σε μορφή πάστας, έχει κόκκους μετάλλου και εξωθείται με μεγάλη πίεση στις εσωτερικές επιφάνειες του αντικειμένου. Η τριβή του παχύρευστου υγρού με την επιφάνεια δημιουργεί την απαιτούμενη υφή.

Ως μετεπεξεργασία μπορούμε να χαρακτηρίσουμε και τις εργασίες αισθητικής βελτίωσης του προϊόντος, όπως τη βαφή του στο χρώμα που θέλουμε ή την επιμετάλλωση. Ο χρωματισμός του τελικού τεμαχίου, μπορεί να γίνει και την ώρα της κατασκευής του στις μηχανές που χρησιμοποιούν τεχνολογίες εναπόθεσης συγκολλητικής ουσίας. Στις άλλες τεχνολογίες δεν έχει αναπτυχθεί ακόμα κάποια μέθοδος που να χρωματίζει το αντικείμενο κατά την κατασκευή, οπότε ο

χρωματισμός μπορεί να πραγματοποιηθεί αργότερα, με εμβάπτιση του κομματιού σε λουτρό με χρωστική ουσία. Αυτή είναι η καταλληλότερη μέθοδος για τεμάχια που έχουν κατασκευαστεί με διεργασία πούδρας. Επίσης η βαφή των εξωτερικών επιφανειών μπορεί να γίνει ακόμα και με τη χρήση ενός πινέλου. Η επιμετάλλωση οποιουδήποτε τεμαχίου, εκτός από την αισθητική βελτίωση που προσφέρει στο κομμάτι δίνοντας του την μορφή μεταλλικού αντικειμένου, βελτιώνει και την μηχανική του αντοχή.

Κατά το στάδιο της μετεπεξεργασίας είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν και βελτιώσεις στις ιδιότητες των τελικών αντικειμένων. Το πορώδες, που εμφανίζεται συνήθως στα κομμάτια που δημιουργούνται με διεργασίες πούδρας ή εξώθησης υλικού, αντιμετωπίζεται εφαρμόζοντας διήθηση με ένα υψηλής αντοχής υλικό. Έχουν αναπτυχθεί πολλά υλικά και μέθοδοι, που χρησιμοποιώντας διήθηση ή νανοσυνθετικές ενισχύσεις, αυξάνουν την μηχανική αντοχή, την ολκιμότητα, την θερμοκρασία θερμικής εκτροπής κάμψης, την αντίσταση στην αναφλεξιμότητα, την θωράκιση από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και άλλες ιδιότητες.

Κατά τη διάρκεια της κατασκευής τεμαχίων από φωτοπολυμερή υλικό μπορεί να μην έχει γίνει ο πλήρης πολυμερισμός τους, οπότε αυτά τα αντικείμενα τοποθετούνται σε συσκευές μεταπολυμερισμού, που χρησιμοποιούν UV και ορατή ακτινοβολία, για να γίνει ο πλήρης πολυμερισμός.

Εξίσου σημαντικές είναι και οι παραδοσιακές θερμικές επεξεργασίες των μετάλλων και των κραμάτων που χρησιμοποιούνται για να επιτευχθούν οι επιθυμητές μικροδομές εντός του υλικού ή να εκτονωθούν οι παραμένουσες εσωτερικές τάσεις. Παρόλα αυτά λόγω της θερμικής επεξεργασίας τα μεταλλικά ή κεραμικά αντικείμενα που δημιουργήθηκαν με διεργασία εναπόθεσης συγκολλητικής ουσίας μπορούν να γίνουν συμπαγή και χρηστικά. Τοποθετώντας αυτά τα τεμάχια εντός θερμικού κλιβάνου, επιτυγχάνεται η απομάκρυνση της συγκολλητικής ουσίας, η συσσωμάτωση και η διήθηση τους, αν και η διαστασιολογική τους ακρίβεια μειώνεται λόγω συρρίκνωσης που παρατηρείται στα τεμάχια και είναι δύσκολο να ελεγχθεί. (Gibson, et al., 2017)

2.6 Εφαρμογές

Η χρήση της προσθετικής κατασκευής για εμπορικούς σκοπούς διανύει πλέον την τρίτη δεκαετία της και έχει λάβει τη θέση της μεταξύ των άλλων κατασκευαστικών διεργασιών. Αρχικά η χρήση της προσθετικής κατασκευής εφαρμοζόταν για την εξυπηρέτηση αναγκών πρωτοτυποποίησης όμως με την συνεχή ανάπτυξη των τεχνολογιών μεγάλωσε και το πεδίο των εφαρμογών. Σε αυτό συνέβαλλε η βελτίωση της κατασκευαστικής ακρίβειας, των μηχανικών ιδιοτήτων, η μείωση του κόστους των μηχανών και των τελικών προϊόντων. Η ανάπτυξη των τεχνολογιών προσφέρει πλέον αντικείμενα, τα οποία προορίζονται ως τελικά

προϊόντα ή ως εξαρτήματα ενός ολοκληρωμένου προϊόντος. Οι κλάδοι της αυτοκινητοβιομηχανίας, της αεροδιαστημικής και των ιατρικών επιστημών ήταν αυτοί που από την πρώτη στιγμή ασχολήθηκαν με τις νέες τεχνολογίες με θεαματικά αποτελέσματα. (3D Printing Industry, n.d.)

Το πρώτο όνομα που δόθηκε στις τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής ήταν τεχνολογίες ταχείας πρωτοτυποποίησης (Rapid Prototyping ή RP). Στα πρώτα στάδια της ανάπτυξης η τεχνολογία επέτρεπε την υλοποίηση της ιδέας του σχεδιαστή άμεσα και την παραγωγή απτών τελικών μοντέλων ανεξάρτητα από την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας τους. Η παραγωγή μοντέλων βοήθησε στη μείωση του χρόνου σχεδιασμού και ανάπτυξης του μοντέλου, άρα και στο κόστος τους. Ο προσδιορισμός “ταχεία” δόθηκε κυρίως λόγω της αυτοματοποίησης της διαδικασίας κατασκευής του αντικειμένου από ένα CAD μοντέλο και όχι λόγω της άμεσης κατασκευής. Ο χρόνος κατασκευής ενός κομματιού μπορεί να διαρκέσει ακόμα και μέρες ανάλογα με την γεωμετρία του. Αντιθέτως η κατασκευή του με τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής θα διαρκούσε σίγουρα περισσότερο. Ακόμα με τη χρήση των τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής οι εταιρείες σταμάτησαν τη χρήση εξατομικευμένων διατάξεων και εργαλείων για την παραγωγή των πρωτοτύπων τους. (Γιαννατσής, et al., 2015)

Έπειτα οι τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής αναπτύχθηκαν σε ένα δεύτερο πεδίο, την κατασκευή εργαλείων παραγωγής. Η δημιουργία καλούπιών ή μητρών, για την παραγωγή μικρού αριθμού προϊόντων, γίνεται πιο γρήγορα και με μικρότερο κόστος. Η διάρκεια ζωής τους είναι μικρότερη από τα ίδια εργαλεία με συμβατικές μεθόδους.



Εικόνα 12: Καλούπι κατασκευασμένος με τεχνολογία προσθετικής Κατασκευής (SpecialChem, 2016)

Η κατασκευή των εργαλείων όμως μπορεί να είναι και έμμεση. Οι μηχανές που χρησιμοποιούν διεργασίες προσθετικής κατασκευής μπορούν να φτιάξουν το επιθυμητό μοντέλο και αυτό να χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία του καλουπιού γύρω του, όπως συμβαίνει στη χύτευση σε κενό χρησιμοποιώντας σιλικόνη. (Gibson, et al., 2017)

Εν έτη 2019, οι τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής έχουν αναπτυχθεί σε τέτοιο βαθμό που χρησιμοποιούνται σε όλους τους παραγωγικούς κλάδους για την παραγωγή τελικών αντικειμένων. Ο σημαντικότερος από όλους τους παράγοντες που διαθέτουν οι τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής είναι η δημιουργία εξατομικευμένων προϊόντων. Αυτό σε συνδυασμό με την επεξεργασία πάρα πολλών υλικών από διάφορες τεχνολογίες και τη μεγάλη ακρίβεια των παραγόμενων κομματιών έχουν συμβάλει στην ένταξη των τεμαχίων στην καθημερινή μας ζωή.

Από τα πρώτα χρόνια χρήσης των τεχνολογιών αυτών εμφανίστηκαν εταιρείες στον κλάδο της ιατρικής όπου κατασκεύαζαν ορθοδοντικούς νάρθηκες βασισμένους στην γεωμετρία και στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κάθε ασθενή. Επίσης στον κλάδο της ιατρικής χρησιμοποιούνται οι τεχνολογίες αυτές για την δημιουργία μοντέλων σκελετικών μυϊκών κυττάρων για την περαιτέρω κατανόηση και μελέτη τους από τους γιατρούς. Τα τελευταία χρόνια παράγονται και εμφυτεύματα τα οποία χρησιμοποιούνται σε ανθρώπους. Αν υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί ακόμα στη χρήση των προσθετικών κατασκευών σε ιατρικές εφαρμογές, αυτοί είναι το κόστος και η μη ύπαρξη των απαιτούμενων εγκρίσεων και πιστοποιήσεων για την χρήση των τελικών προϊόντων. (BIO-ΔΙΑΣΤΑΣΗ, 2017)

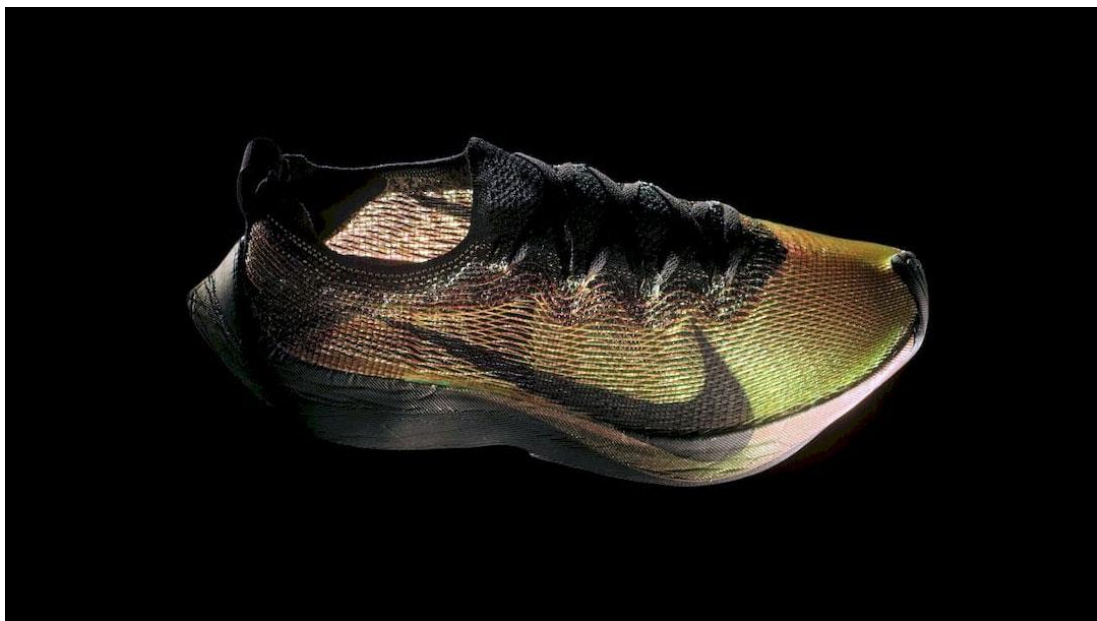


Εικόνα 13: Ορθοδοντικά μοντέλα και οστά κατασκευασμένα με τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής

Οι κλάδοι της αεροδιαστημικής και της αυτοκινητοβιομηχανίας έχουν επίσης αναπτυχθεί πολύ χάρις την χρήση των τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής. Η συνεχής βελτίωση κομματιών που χρησιμοποιούνται σε αεροπλάνα, διαστημόπλοια και αυτοκίνητα καθώς και η δημιουργία μόνο των απαραίτητων τεμαχίων, έχουν μειώσει κατακόρυφα το κόστος κατασκευής αλλά και συντήρησης. (Goehrke, 2018) Πολλές βιομηχανίες στρέφονται πια στην ακόμα μεγαλύτερη ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών και επενδύουν πολλά λεφτά. Χαρακτηριστικό παράδειγμα η BMW Group όπου σχεδιάζει μονάδα Προσθετικής Κατασκευής, μια επένδυση που ξεπερνά τα 10 εκατομμύρια ευρώ, με σκοπό την συγκέντρωση και συνεργασία όλου του

εκπαιδευμένου προσωπικού για την ανάπτυξη ακόμα περισσότερο των τεχνολογιών. (BMW Group, 2018)

Καθημερινά ανακοινώνονται νέες εφαρμογές των τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής. Άλλες αφορούν άμεσα την κατασκευή προϊόντων που παρέχονται κατευθείαν στην αγορά και άλλες την μελέτη προϊόντων που θα βγουν στο εμπόριο τα επόμενα χρόνια. Πρώτη η Nike έφερε στην αγορά παπούτσια που είχαν κατασκευαστεί από μηχανές προσθετικής κατασκευής. (Nike, 2018) Γρήγορα όλες οι μεγάλες εταιρείες υπόδησης καθώς και πολλές νεοφυείς, παρήγαγαν τα δικά τους παπούτσια. Όπως οι εταιρείες υπόδησης παρέχουν στην αγορά τελικά προϊόντα από μηχανές προσθετικής κατασκευής, έτσι και άλλες εταιρείες σε άλλους κλάδους έχουν αναπτύξει τα προϊόντα τους, ώστε να πωλούνται στον πελάτη.



Εικόνα 14: Nike Flyprint (Stevenson, 2018)

Η LG είναι μια εταιρεία που δραστηριοποιείται στο χώρο της τεχνολογίας, είναι λογικό λοιπόν να έχουν αναπτυχθεί πολύ οι τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής σε αυτόν τον κλάδο. Η LG είναι η πρώτη εταιρεία που κατασκευάζει σε μεγάλες ποσότητες πλαστικά καπάκια ίδιας γεωμετρίας για τις τηλεοράσεις της και έχει πετύχει την μείωση του κόστους σε σχέση με τις συμβατικές κατασκευαστικές μεθόδους. Μέσω της συνεργασίας των εταιρειών Michelin, General Motors με την NASA αναπτύχθηκε ένας νέος τύπος ελαστικών κατασκευασμένων από μηχανές προσθετικής κατασκευής χωρίς την χρήση αέρα. Τα ελαστικά αυτά διαθέτουν την ίδια αντοχή με τα κοινά ελαστικά που χρησιμοποιούνται σήμερα αλλά δεν τρυπάνε και δεν αποφέρουν τα προβλήματα ενός ελαστικού χωρίς αέρα. Η παρουσίαση τους έγινε το Μάιο του 2019 και ο εκτιμώμενος χρόνος για να εισέλθουν στην αγορά είναι από αρχές του 2024. (Michelin, 2019) Τέλος πολλές εταιρείες σε διάφορους κλάδους έχουν αναπτύξει την δυνατότητα να παρέχουν στους καταναλωτές τους εξατομικευμένα προϊόντα, κατόπιν παραγγελίας.



Εικόνα 15: Michelin Uptis (Michelin, 2019)

Κεφάλαιο 3. Μεθοδολογία Έρευνας

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούν γενικότερα τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την έρευνα και την εκπόνηση αυτής της μελέτης. Το θέμα αφορά τη σύγκριση λογισμικών για την παραγωγή μοντέλων προσθετικών κατεργασιών.

Για να πραγματοποιηθεί σύγκριση μεταξύ λογισμικών, πρέπει να προηγηθεί έρευνα των λογισμικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μοντέλων. Αρχικά η έρευνα υπέδειξε αρκετά λογισμικά που εκτελούν τις ίδιες ενέργειες. Οι ενέργειες που πρέπει να πραγματοποιηθούν για την παραγωγή ενός προϊόντος από μία μηχανή AM είναι πέντε. Οι πέντε λειτουργίες των λογισμικών είναι ο σχεδιασμός του 3D αντικειμένου, η δημιουργία, η επεξεργασία και η επιδιόρθωση του STL αρχείου και η δημιουργία του αρχείου διατομών του μοντέλου. Τα λογισμικά που έχουν αναπτυχθεί μπορούν να εκτελέσουν περισσότερες από μία λειτουργίες. Ξεκινώντας θα γίνει μια παρουσίαση αυτών των λογισμικών και στη συνέχεια θα ακολουθήσει η επιλογή αυτών που θα χρησιμοποιηθούν για την περαιτέρω σύγκριση. Η επιλογή των λογισμικών θα γίνει βάσει των μηχανών προσθετικής κατασκευής που διαθέτει το θεσμοθετημένο εργαστήριο "ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ" του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, με απώτερο στόχο την δημιουργία μοντέλων. Θα μελετηθούν τα λογισμικά όσον αφορά την επικοινωνία τους με την μηχανή προσθετικής κατασκευής και θα αναλυθούν όλες οι παράμετροι που χρειάζεται να ενταχθούν στα λογισμικά, ώστε να πραγματοποιηθεί η διαδικασία της παραγωγής.

Επόμενο στάδιο είναι η προετοιμασία για παραγωγή συγκεκριμένων μοντέλων. Από τα μοντέλα, το ένα θα είναι πρότυπο και ένα δεύτερο θα σχεδιαστεί από την αρχή σε λογισμικό 3D CAD στερεάς μοντελοποίησης. Μετά το πέρας του σχεδιασμού θα ακολουθήσει η δημιουργία του STL αρχείου από το ίδιο λογισμικό. Το αρχείο που θα εξαχθεί από το πρόγραμμα καθώς και το STL αρχείο του πρότυπου μοντέλου, θα ελεγχθούν για τυχόν ατέλειες σε άλλο λογισμικό. Τα STL αρχεία θα εισαχθούν σε λογισμικά για τον τεμαχισμό, δηλαδή τη δημιουργία του αρχείου διατομών, και την ρύθμιση των παραμέτρων της κατασκευαστικής διαδικασίας του κάθε μοντέλου. Η διαδικασία του τεμαχισμού και της ρύθμισης των παραμέτρων αναφέρεται διεθνώς ως slicing (τεμαχισμός). Τα slicing λογισμικά που θα χρησιμοποιηθούν θα είναι τρία. Αφού γίνει η λειτουργία slicing από κάθε λογισμικό σε κάθε μοντέλο θα παραχθούν έξι αρχεία (τρία για κάθε μοντέλο) για την εισαγωγή τους στην μηχανή προσθετικής κατασκευής. Τα έξι τελικά προϊόντα θα μελετηθούν και θα παρουσιαστούν οι διαφορές τους κατά την διάρκεια κατασκευής καθώς και μετά το τέλος αυτής.

Κεφάλαιο 4. Μελέτη Περιπτώσεων Έρευνας

4.1 Σύγκριση Λογισμικών

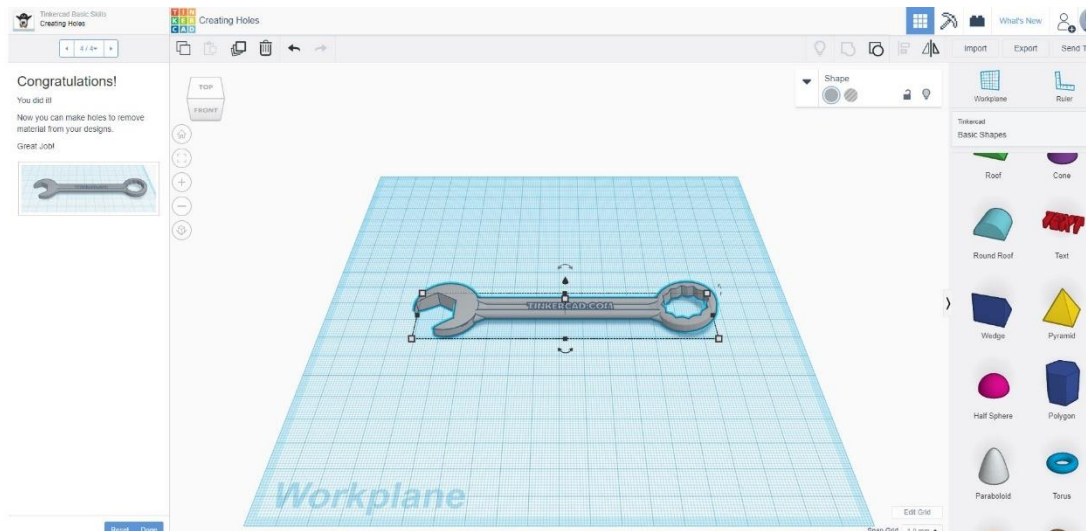
Η δημιουργία μοντέλων προσθετικών κατεργασιών γίνεται με τη βοήθεια υπολογιστών και διαφόρων λογισμικών. Η προετοιμασία των κομματιών είναι μία ροή εργασίας που ακολουθεί διάφορα στάδια. Τα εργαλεία και λογισμικά που χρησιμοποιούνται, αναπτύχθηκαν για να εκτελέσουν τα στάδια αυτά. Τα λογισμικά μπορεί να εκτελούν μόνο μία ή περισσότερες λειτουργίες. Αυτές είναι ο σχεδιασμός του 3D τεμαχίου, η δημιουργία, η επεξεργασία και η επιδιόρθωση του STL αρχείου και ο τεμαχισμός του μοντέλου.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει ανάλυση λογισμικών που εκτελούν τις παραπάνω λειτουργίες.

4.1.1 Λογισμικά 3D CAD στερεάς μοντελοποίησης

4.1.1.1 Autodesk TinkerCAD

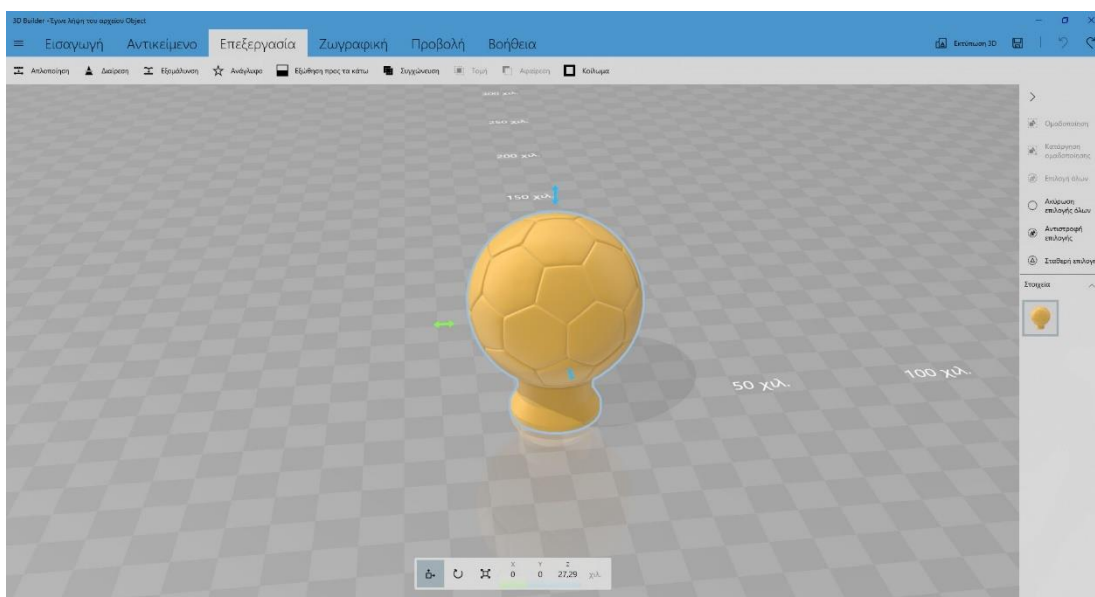
Το TinkerCAD είναι ένα δωρεάν online πρόγραμμα για την 3D σχεδίαση μοντέλων. Είναι κατάλληλο για αρχάριους χρήστες όλων των ηλικιών, καθώς βοηθάει στη δημιουργία βασικών μοντέλων με απλές εντολές. Ο χειριστής μπορεί να σχεδιάσει, χρησιμοποιώντας έτοιμα αντικείμενα, επιλέγοντας, σύροντας, τοποθετώντας και συνδυάζοντας τα με όποιον τρόπο θέλει. Επίσης είναι εύκολη η μεταφορά του CAD σχεδίου σε STL αρχείο για την κατασκευή του κομματιού. Ωστόσο, οι δυνατότητες του προγράμματος είναι περιορισμένες επομένως για σύνθετα σχέδια ο χειριστής πρέπει να χρησιμοποιήσει κάποιο ισχυρότερο πρόγραμμα. (Thingiverse, n.d.)



Εικόνα 16: TinkerCAD

4.1.1.2 3D Builder

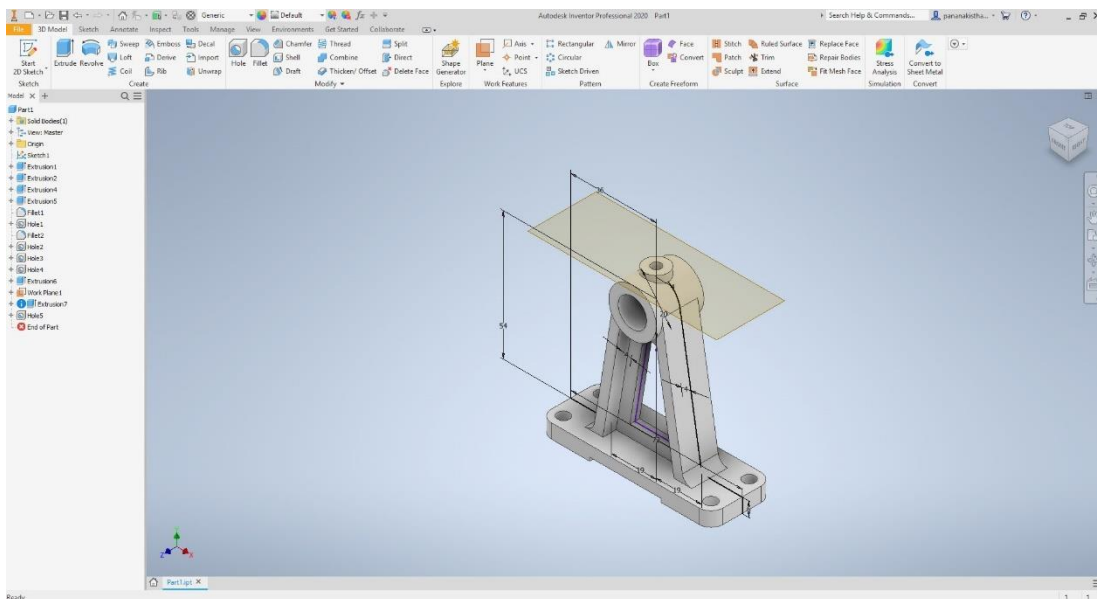
Το 3D Builder είναι μια ελεύθερη εφαρμογή, που βρίσκεται προεγκατεστημένη σε όλους τους υπολογιστές που διαθέτουν Windows, για την σχεδίαση 3D μοντέλων. Παρέχει στο χειριστή ένα σύνολο εύχρηστων εργαλείων και λειτουργιών για την σχεδίαση και επεξεργασία του τρισδιάστατου αντικειμένου. Ακόμα οι χρήστες μπορούν να εισάγουν σχέδια είτε από μια μεγάλη βάση δεδομένων είτε με τη χρήση 3D scanner και μετά να επεξεργαστούν αυτά τα σχέδια. Έπειτα από τη σχεδίαση του τελικού προϊόντος, το πρόγραμμα παρέχει την δυνατότητα της εξαγωγής του τεμαχίου σε όλους τους τύπους αρχείων που διαθέτουν πληροφορίες του 3D τεμαχίου, όπως STL, 3MF και OBJ. (ALL3DP, n.d.)



Εικόνα 17: 3D Builder

4.1.1.3 Autodesk Inventor

Το Autodesk Inventor είναι ένα επαγγελματικό λογισμικό 3D μηχανικής σχεδίασης στερεών μοντέλων που αναπτύχθηκε από την Autodesk, για τη δημιουργία τρισδιάστατων ψηφιακών πρωτοτύπων. Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιείται για 3D μηχανικό σχεδιασμό, δημιουργία εργαλείων και προσομοίωση προϊόντων. Αυτό το λογισμικό επιτρέπει στους χρήστες να παράγουν ακριβή 3D μοντέλα για να βοηθήσουν στο σχεδιασμό, την οπτικοποίηση και την προσομοίωση των προϊόντων προτού κατασκευαστούν. Πέρα από το σχεδιασμό, το λογισμικό παρέχει τη δυνατότητα δυναμικών και άλλων προσομοιώσεων για τον έλεγχο του λειτουργίας του προϊόντος σε πραγματικές συνθήκες. Τέλος μπορεί να ετοιμάσει το τεμάχιο και να το εξάγει σε μορφή αρχείου STL. Αυτή τη στιγμή παρέχονται από το λογισμικό τα πρώτα δύο στάδια για την προετοιμασία της κατασκευής των αντικειμένων. Σκοπός της εταιρείας είναι μελλοντικά το πρόγραμμα αυτό να πραγματοποιεί όλα τα στάδια μέχρι την παραγωγή των αντικειμένων και να επικοινωνεί απευθείας με τις μηχανές AM. (Techopedia, n.d.)

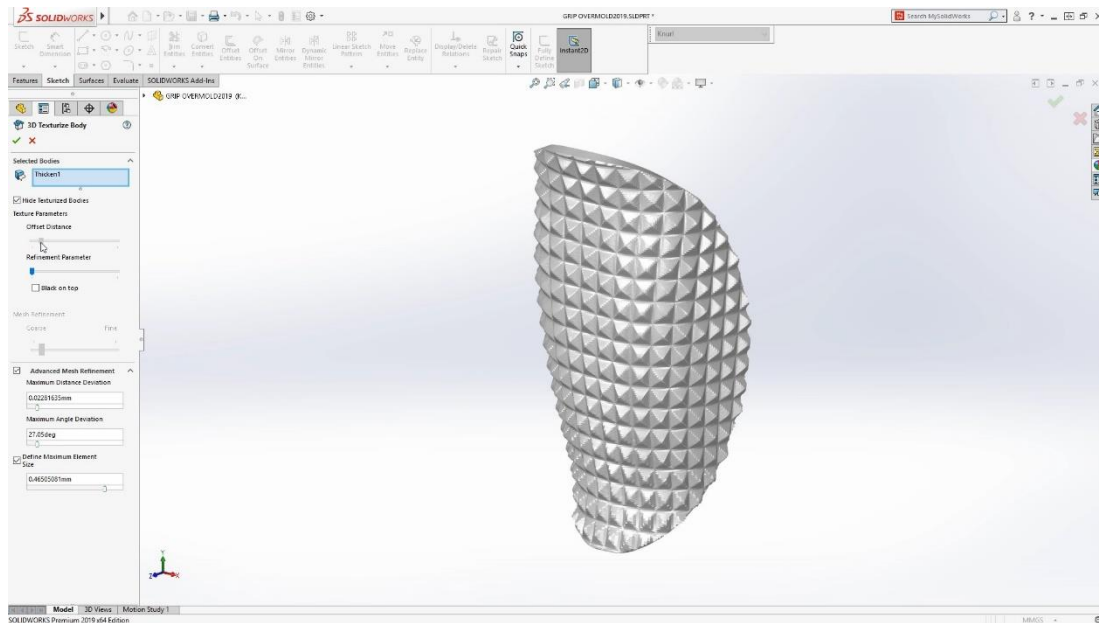


Εικόνα 18: Autodesk Inventor

4.1.1.4 Solidworks

Το Solidworks είναι και αυτό επαγγελματικό λογισμικό 3D μηχανικής σχεδίασης και ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία των τρισδιάστατων υβριδικών μοντελοποιητών, όπως και το Autodesk Inventor. Αναπτύχθηκε από την εταιρεία Dassault Systèmes και χρησιμοποιείται ευρέως μεταξύ των μηχανικών και των

σχεδιαστών. Το λογισμικό διαθέτει ισχυρά εργαλεία σχεδιασμού, προσομοίωσης, κίνησης και αντίστροφης μηχανικής. Το πρόγραμμα μπορεί να δημιουργήσει αρχεία STL.



Εικόνα 19: Solidworks

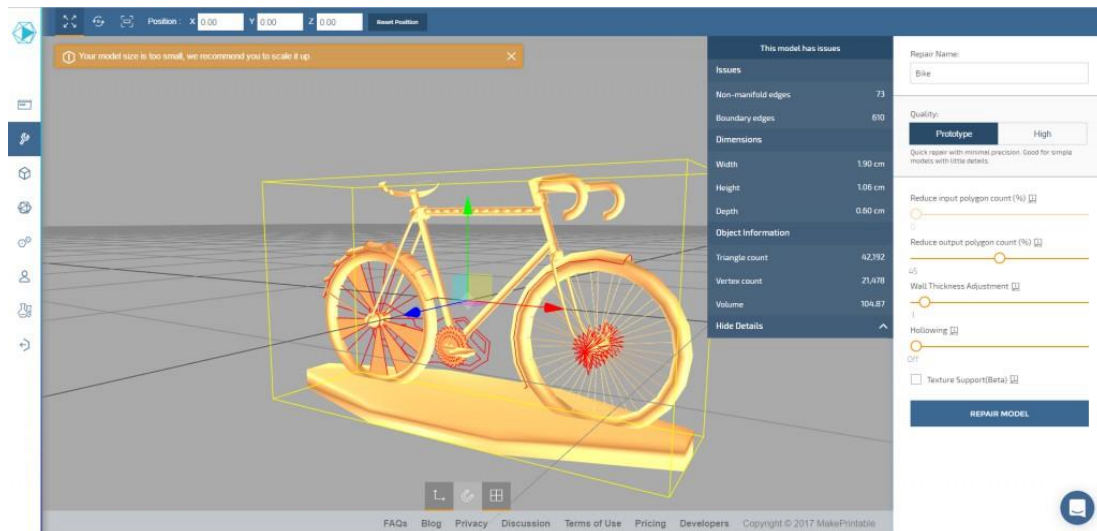
4.1.2 Λογισμικά επεξεργασίας & διόρθωσης STL αρχείων

Τα λογισμικά που επεξεργάζονται και διορθώνουν τα STL αρχεία είναι ήδη ελάχιστα στην αγορά. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται η ένταξη αυτών των λειτουργιών στα λογισμικά slicing σαν εργαλεία ώστε κατά την εισαγωγή του STL αρχείου να γίνεται έλεγχος και επιδιόρθωση τυχόν σφαλμάτων.

4.1.2.1 MakePrintable

Το MakePrintable είναι μία ιστοσελίδα που παρέχει δωρεάν χρήση αλλά και χρήση επί πληρωμής. Η δωρεάν χρήση παρέχεται για έως τρία αντικείμενα τον μήνα. Η ιστοσελίδα δίνει τη δυνατότητα της επισκόπησης ενός αρχείου STL, της επιδιόρθωσης του και μετά, αν επιθυμεί ο πελάτης, μπορεί να επιλέξει το υλικό και την τεχνολογία και η εταιρεία αναλαμβάνει την κατασκευή και την αποστολή του. Εμείς θα επικεντρωθούμε στη επισκόπηση και την επιδιόρθωση του STL αρχείου. Η ιστοσελίδα λαμβάνει από τον χρήστη το αρχείο STL που έχει δημιουργήσει από άλλο λογισμικό και το αναλύει για να ελέγξει αν υπάρχουν λάθη που ενδέχεται να

καταστρέψουν την εκτύπωση. Αν υπάρχουν τα επιδιορθώνει. Τα λάθη μπορεί να είναι επικαλύψεις, οριακές ακμές, τεμνόμενα αντικείμενα, πολύ λεπτές περιοχές τοιχώματος και ανοίγματα του 3D τεμαχίου. Επίσης βελτιστοποιεί το πλέγμα των τριγώνων του σχεδίου. Μετά τη επεξεργασία εξάγει πάλι το αρχείο STL. (MakePrintable, n.d.)



Εικόνα 20: MakePrintable

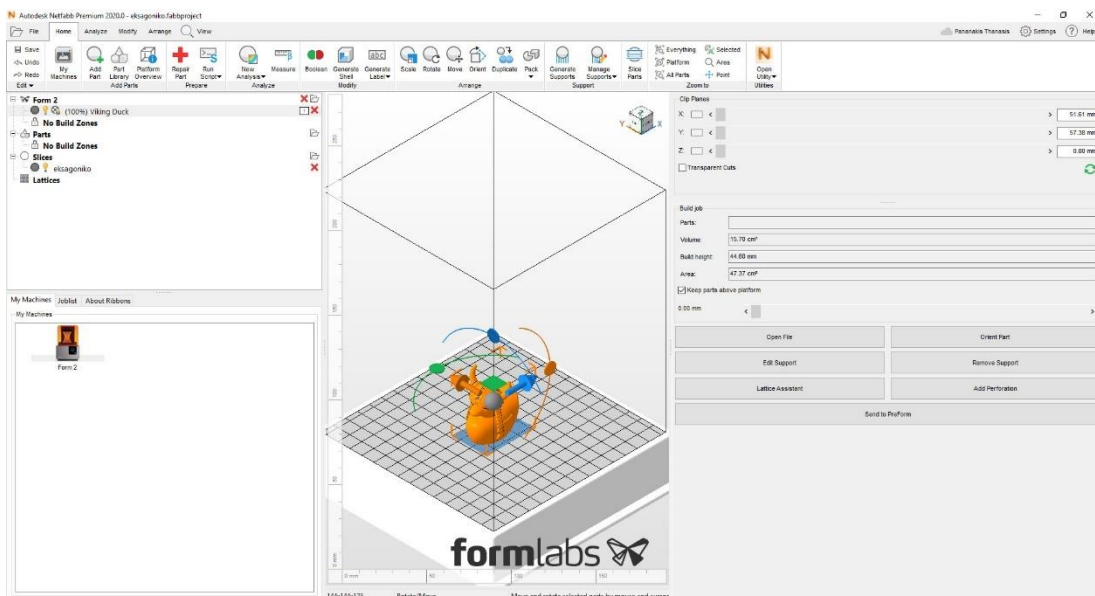
4.1.3 Λογισμικά Slicing

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η τάση του μέλλοντος είναι η ένταξη όλων των λειτουργιών της προετοιμασίας ενός μοντέλου για κατασκευή στα προγράμματα 3D CAD στερεάς μοντελοποίησης καθώς και η απευθείας επικοινωνία του προγράμματος με τις μηχανές AM. Στο παρόν, για την προετοιμασία μιας κατασκευαστικής διεργασίας απαιτούνται τουλάχιστον δύο λογισμικά, το ένα για την 3D μοντελοποίηση και το δεύτερο για την πραγματοποίηση όλων των άλλων λειτουργιών.

4.1.3.1 Netfabb

Το Netfabb είναι ένα επαγγελματικό λογισμικό από την εταιρεία Autodesk όπου επεξεργάζεται και διορθώνει το αρχείο STL και τεμαχίζει το αντικείμενο σε διατομές για τη δημιουργία του. Επειδή είναι το πρώτο λογισμικό δημιουργίας αρχείου δισδιάστατων διατομών, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι όπως οι μετεξεργασίες διαφέρουν ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε από την μηχανή AM, έτσι και τα λογισμικά που δημιουργούν τα αρχεία διατομών

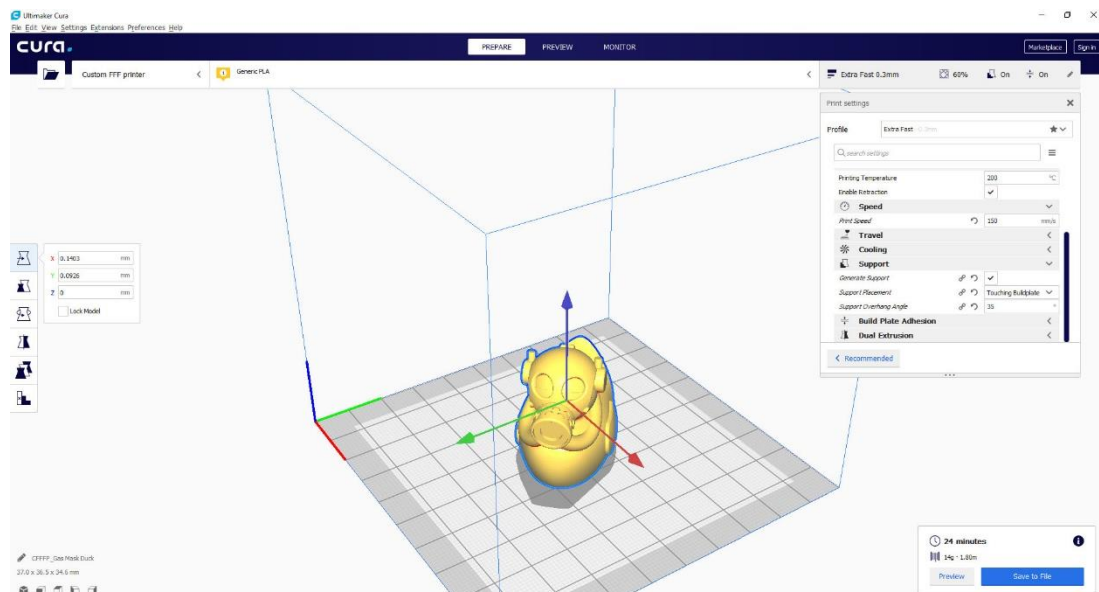
διαφέρουν ανάλογα με την τεχνολογία και την μηχανή AM που θα χρησιμοποιηθεί κατά την κατασκευή. Κατά την έναρξη του προγράμματος, ανοίγει ένα παράθυρο με μια λίστα από μηχανές AM όπου πρέπει να επιλέξεις με ποια θα γίνει η κατασκευαστική διαδικασία. Ανάλογα με την μηχανή και την τεχνολογία της αλλάζουν οι ρυθμίσεις που πρέπει να πραγματοποιηθούν. Το λογισμικό αυτό διαθέτει προηγμένες τεχνολογίες για την ανάλυση του τεμαχίου και την επισκευή του STL αρχείου. Κατά την εισαγωγή ενός μοντέλου για κατασκευή, γίνεται έλεγχος για επισκευή τυχών σφαλμάτων. Οι λειτουργίες που διαθέτει για την επισκευή του κομματιού είναι, η αφαίρεση των διπλών τριγώνων, η διόρθωση των λεπτών τοιχωμάτων, η επισκευή των ανοιχτών διατομών και η αφαίρεση προβληματικών περιοχών. Το λογισμικό παρέχει ακόμα πολλές δυνατότητες, όπως την μέτρηση των διαστάσεων του αντικειμένου, την μετακίνηση του αντικειμένου εντός του χώρου κατασκευής, την πραγματοποίηση ελέγχων για το κέντρο βάρους, τις επάνω και κάτω επιφάνειες και την λεπτότητα των τοιχών του αντικειμένου. Επίσης μπορεί να δημιουργήσει υποστηρικτικές δομές και επιγραφές πάνω στα αντικείμενα. Έπειτα γίνεται ο τεμαχισμός του αντικειμένου. Το λογισμικό επιτρέπει στο χειριστή να δει όλες τις στρώσεις που δημιουργούνται καθώς και την κίνηση του εργαλείου. Το πρόγραμμα παρέχει και προσομοίωση της κατασκευαστικής διαδικασίας για να αποφευχθούν σφάλματά κατά την κατασκευή. Ακολουθεί η εξαγωγή του αρχείου. Το αρχείο διατομών δημιουργείται για την μηχανή AM που επιλέξαμε κατά την έναρξη του προγράμματος.



Εικόνα 21: Netfabb

4.1.3.2 Ultimaker Cura

Το λογισμικό Ultimaker Cura έχει αναπτυχθεί από την εταιρεία Ultimaker για τη προετοιμασία των αντικειμένων για κατασκευή στους εκτυπωτές της ίδιας εταιρείας, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία του αρχείου διατομών και για άλλες μηχανές AM. Το λογισμικό λειτουργεί για μηχανές προσθετικής κατασκευής που χρησιμοποιούν εναπόθεση τηγμένου υλικού και άλλες τεχνολογίες. Η χρήση του μπορεί να γίνει ακόμα και από αρχάριους καθώς παρέχει τις περισσότερες ρυθμίσεις για την εκτύπωση και επιτρέπει στο χρήστη να επιλέξει μεταξύ βασικών επιλογών. Βέβαια αν ο χειριστής είναι έμπειρος του δίνει τη δυνατότητα να διαχειρίζεται περισσότερες ρυθμίσεις. Η δυνατότητα επιλέγεται από τον χειριστή στα πρώτα βήματα. Αφού γίνει η διαδικασία slicing του αντικειμένου από το λογισμικό παρέχονται πληροφορίες, όπως ο χρόνος και το υλικό που θα χρειαστεί. Τέλος το αρχείο διατομών μπορεί επίσης να εξαχθεί σε πάρα πολλές μορφές ανάλογα με την μηχανή προσθετικής κατασκευής που θα χρησιμοποιηθεί. (Ultimaker, n.d.)

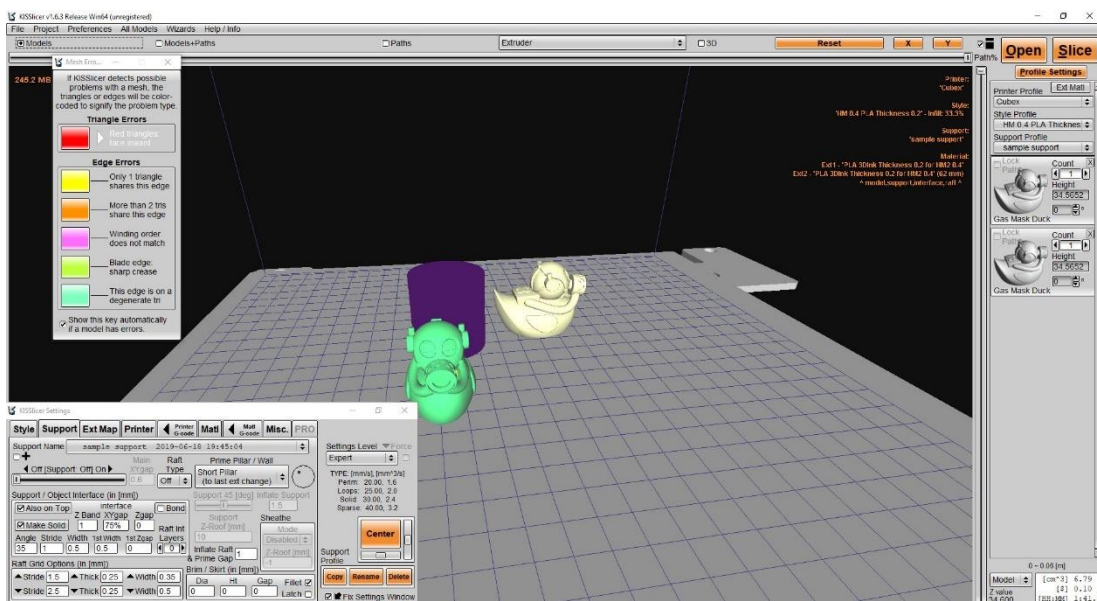


Εικόνα 22: Ultimaker Cura 4.1

4.1.3.3 Kisslicer 1.6.3

Το Kisslicer 1.6.3 είναι ένα ανοιχτό λογισμικό τεμαχισμού του αντικειμένου για τη δημιουργία αρχείου διατομών. Με την πρώτη ματιά, οι περισσότεροι θεωρούν το λογισμικό αυτό παλιό και ιδιαίτερα δύσκολο στη χρήση, όμως είναι από τα καλύτερα λογισμικά της κατηγορίας του. Επιτρέπει τη ρύθμιση από τον χρήστη όλων των

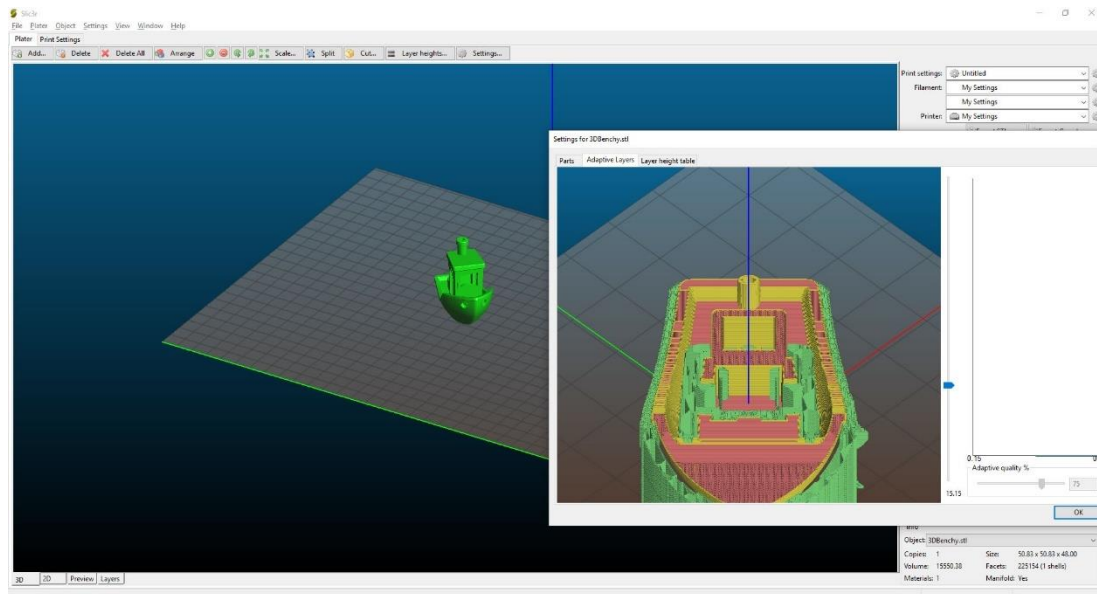
παραμέτρων της εκτύπωσης. Έπειτα από τον τεμαχισμό το λογισμικό παρουσιάζει στον χρήστη τις στρώσεις που έχουν δημιουργηθεί. Η εξαγωγή από το λογισμικό αυτό, σε αντίθεση με τα περισσότερα λογισμικά, γίνεται σε μόνο ένα τύπο αρχείου. Στο αρχείο αυτό υπάρχει ο G κώδικας που είναι η κίνηση του εργαλείου κατά την εκτύπωση. Όλες οι εταιρείες ουσιαστικά μετατρέπουν τον G κώδικα σε τύπο αρχείου που είναι κατάλληλος μόνο για τις δικές τους μηχανές προσθετικής κατασκευής. (ALL3DP, n.d.)



Εικόνα 23: KiSSlicer 1.6.3

4.1.3.4 Slic3r

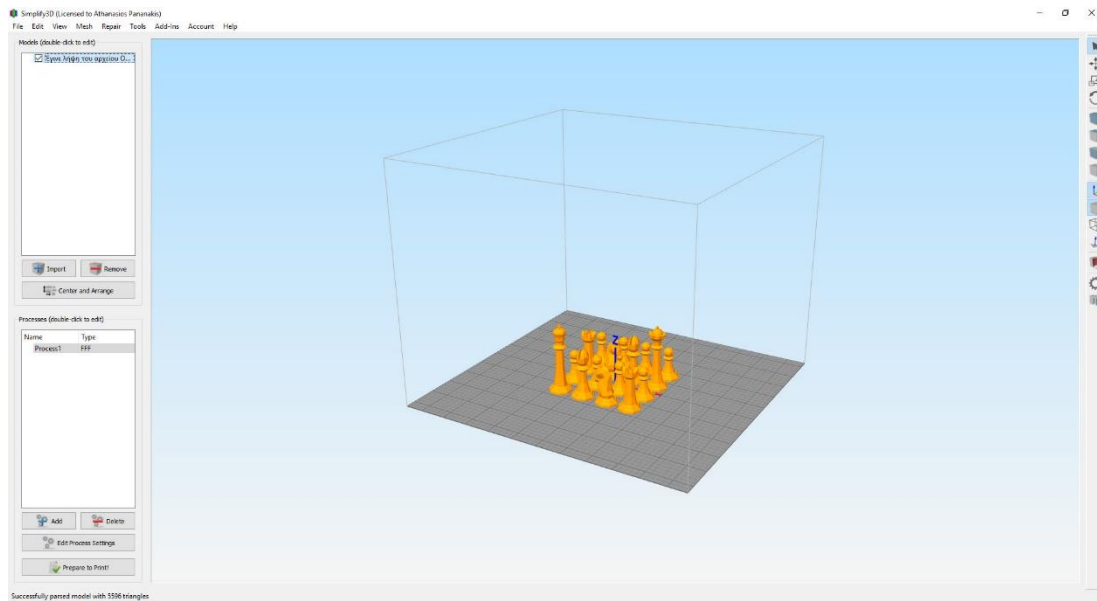
Το Slic3r είναι επίσης ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα για τον τεμαχισμό του αντικειμένου. Το λογισμικό αυτό παρέχει τη δυνατότητα όπως και το Ultimaker Cura να επιλέξει ο χειριστής στη αρχή αν θα το χρησιμοποιήσει με τις βασικές ρυθμίσεις ή θα έχει τη δυνατότητα της ρύθμισης περισσότερων παραμέτρων. Ιδιαιτερότητα αυτού του λογισμικού είναι η παροχή πολλών διαφορετικών μοτίβων σάρωσης κατά την κατασκευή. Μετά τον τεμαχισμό γίνεται η παρουσίαση των στρώσεων του αντικειμένου. Τέλος το αρχείο διατομών εξάγεται σε μορφή G κώδικα, όπως στο λογισμικό KiSSlicer, για μηχανές προσθετικής κατασκευής με χρήση τεχνολογίας εναπόθεσης τηγμένου υλικού. (Slic3r, n.d.)



Εικόνα 24: Slic3r

4.1.3.5 Simplify 3D

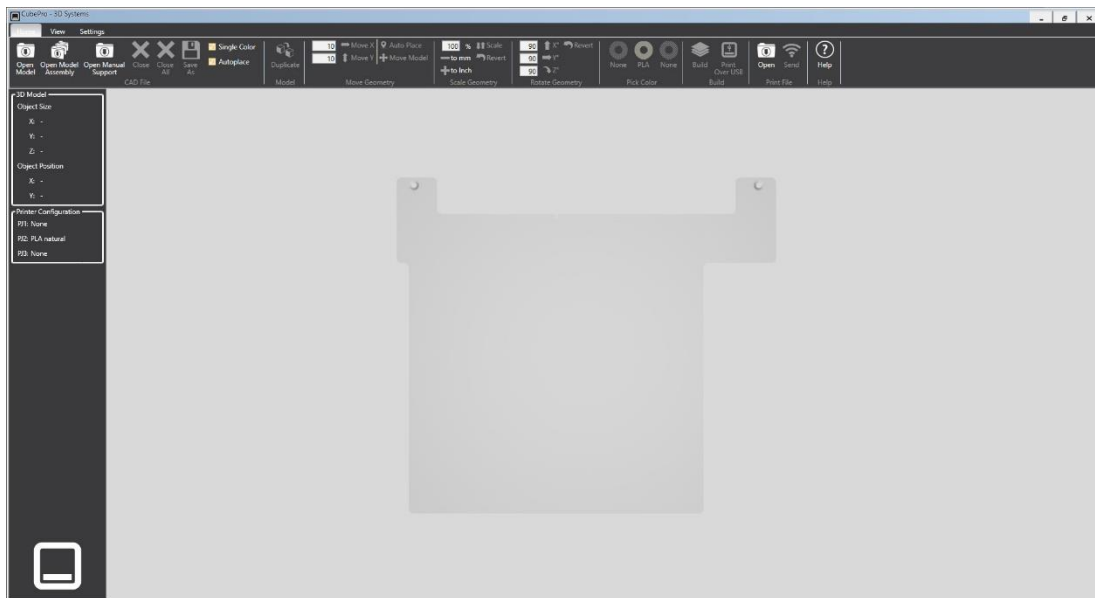
Το Simplify 3D είναι ένα εμπορικό λογισμικό της εταιρείας Simplify 3D για επαγγελματίες για την προετοιμασία και τον τεμαχισμό ενός μοντέλου. Το λογισμικό υποστηρίζει μια ευρεία γκάμα μηχανών προσθετικής κατασκευής, οι οποίες διαθέτουν διαφορετικές γλώσσες προγραμματισμού. Για την σωστή εργασία εντός του προγράμματος πρέπει αρχικά να επιλεγεί το προφίλ της μηχανής προσθετικής κατασκευής που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια. Επίσης το λογισμικό παρέχει πολλές δυνατότητες που επιτρέπουν στο χρήστη να επισκευάσει, να προετοιμάσει, να δει, να αναλύσει και να διαγράψει τα τρισδιάστατα μοντέλα. Πριν ξεκινήσει ο τεμαχισμός, πρέπει να καθοριστούν οι ρυθμίσεις βάσει των οποίων θα πραγματοποιηθεί η κατασκευαστική διαδικασία. Το πρόγραμμα επιτρέπει στο χρήστη να ρυθμίσει όλες τις παραμέτρους ώστε να εκτελέσει την κατασκευή ακριβώς όπως απαιτείται. Τέλος μετά το τεμαχισμό το πρόγραμμα ανάλογα με το προφίλ της μηχανής που έχει επιλεγεί αρχικά εξάγει την κατάλληλη μορφή αρχείων που αναγνωρίζει η μηχανή προσθετικής κατασκευής.



Εικόνα 25: Simplify 3D

4.1.3.6 CubePro

Το CubePro είναι ένα ελεύθερο λογισμικό που παρέχεται από την εταιρεία 3D Systems για τον τεμαχισμό και την προετοιμασία του μοντέλου για την κατασκευαστική λειτουργία. Το πρόγραμμα αυτό έχει αναπτυχθεί μόνο για την επικοινωνία με μηχανές CubePro της ίδιας εταιρείας και δεν λειτουργεί για κάποια άλλη μηχανή. Οι ρυθμίσεις που παρέχονται από το πρόγραμμα είναι μόνο οι βασικές, όπως το πάχος στρώματος, η πυκνότητα πλήρωσης και η δημιουργία υποστηρικτικής δομής. Μετά τον τεμαχισμό το πρόγραμμα εξάγει μόνο αρχεία της μορφής .cubepro. Αυτή η μορφή είναι η μόνη που αναγνωρίζεται από της μηχανές CubePro. Η αναφορά αυτού του λογισμικού γίνεται, λόγω της ύπαρξης των μηχανών AM CubePro Duo και CubeX στο θεσμοθετημένο εργαστήριο "ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ" του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.



Εικόνα 26: CubePro

4.2 Επιλογή λογισμικών

Σε αυτό το σημείο θα γίνει επιλογή λογισμικών βάσει των μηχανών AM που διαθέτει το εργαστήριο "ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ", με στόχο την προετοιμασία μοντέλων για κατασκευή. Το εργαστήριο διαθέτει δύο μηχανές AM, την CubePro Duo της εταιρείας 3D Systems και την CubeX της ίδιας εταιρείας. Και οι δύο μηχανές είναι σχεδιασμένες βάσει εσωτερικής αρχιτεκτονικής (Firmware) Bits from Bytes, δηλαδή αυτή είναι η γλώσσα προγραμματισμού λειτουργίας της μηχανής AM. Η CubePro Duo παρέχει τη δυνατότητα κατασκευής με δύο κεφαλές εκτύπωσης σε αντίθεση με την CubeX. Επίσης ισχύουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Πίνακας 1: Σύγκριση μηχανών AM

	CubeX (Single head)	CubePro Duo
Τεχνολογία	FDM	FDM
Μέγιστο Μέγεθος Κατασκευής	275(w) x 265 (d) x 240(h) (mm)	242.9(w) x 270.4(d) x 230(h) (mm)
Ανάλυση κατά Z άξονα	0,100mm (100 microns)	0,100mm (100 microns)
Ελάχιστο Πάχος Στρώσεων	100 (microns)	70 – 100 – 200 (microns)
Ταχύτητα εναπόθεσης	15 (mm ³ /sec)	15 (mm ³ /sec)
Μέγιστη θερμοκρασία στην άκρη του ακροφυσίου	280 (°C)	280 (°C)
Διάμετρος ακροφυσίου	0,4 (mm)	0,4 (mm)
Υλικά	ABS, PLA	ABS, PLA, INF

Τα χαρακτηριστικά των μηχανών προσθετικής κατασκευής όπως μπορούμε να δούμε είναι σχεδόν ίδια. Επιλέχθηκε η μηχανή CubePro Duo βάσει του επιπλέον ενός ακροφυσίου που παρέχεται και της μεγαλύτερης ανάλυσης στο πάχος στρώσεων.

Η επιλογή των λογισμικών που θα χρησιμοποιηθούν για τον τεμαχισμό βασίζεται στο Firmware της μηχανής προσθετικής κατασκευής, Bits from Bytes όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Η κατασκευάστρια εταιρεία (3D Systems) έχει προγραμματίσει έτσι την μηχανή ώστε να αντιλαμβάνεται αρχεία που έχουν παραχθεί μόνο από το επίσημο πρόγραμμα που παρέχει μαζί με την μηχανή κατά την αγορά. Το πρόγραμμα αυτό είναι το CubePro και εξάγει μόνο αρχεία .cubepro, τα οποία διαβάζει η μηχανή προσθετικής κατασκευής για να ξεκινήσει η κατασκευαστική διαδικασία. Τα αρχεία αυτά έχουν δημιουργηθεί από αρχεία .bfb (Bits from Bytes) που έχουν υποστεί κρυπτογράφηση Blowfish ECB για να μην μπορούν να τροποποιηθούν. Για να κατασκευασθεί ένα αντικείμενο με τη χρήση λογισμικού διαφορετικού από αυτό που παρέχεται από την 3D Systems, απαιτείται η εξαγωγή από λογισμικό Slicing μόνο αρχείου bfb ώστε μετά να επεξεργαστεί με κωδικοποιητή που χρησιμοποιεί κρυπτογράφηση Blowfish ECB, για να εξαχθεί αρχείο cubepro που μπορεί να αναγνωρίσει η μηχανή προσθετικής κατασκευής. Δυστυχώς το Firmware Bits from Bytes σπάνια χρησιμοποιείται σε μηχανές AM, οπότε έχουν αναπτυχθεί και λίγα λογισμικά που επεξεργάζονται και εξάγουν αρχεία bfb. Εδώ θα ήθελα να τονιστεί ότι τα αρχεία bfb διαθέτουν τροποποιημένο τον G-code δηλαδή την κίνηση των κεφαλών εκτύπωσης για την παραγωγή του προϊόντος. Τα περισσότερα λογισμικά δίνουν την δυνατότητα να εξαχθεί από τον τεμαχισμό αρχείο .gcode, που και αυτός ο τύπος αρχείου διαθέτει τον G-code. Οι πληροφορίες αυτών των αρχείων είναι παρόμοιες με τα αρχεία bfb αλλά παρέχονται με διαφορετικό τρόπο.

Εξαιτίας όλων των παραπάνω επιλέχθηκαν τρία λογισμικά για τον τεμαχισμό των δύο μοντέλων που έχουν επιλεγεί. Το κάθε λογισμικό διαφέρει στο αρχείο εξαγωγής

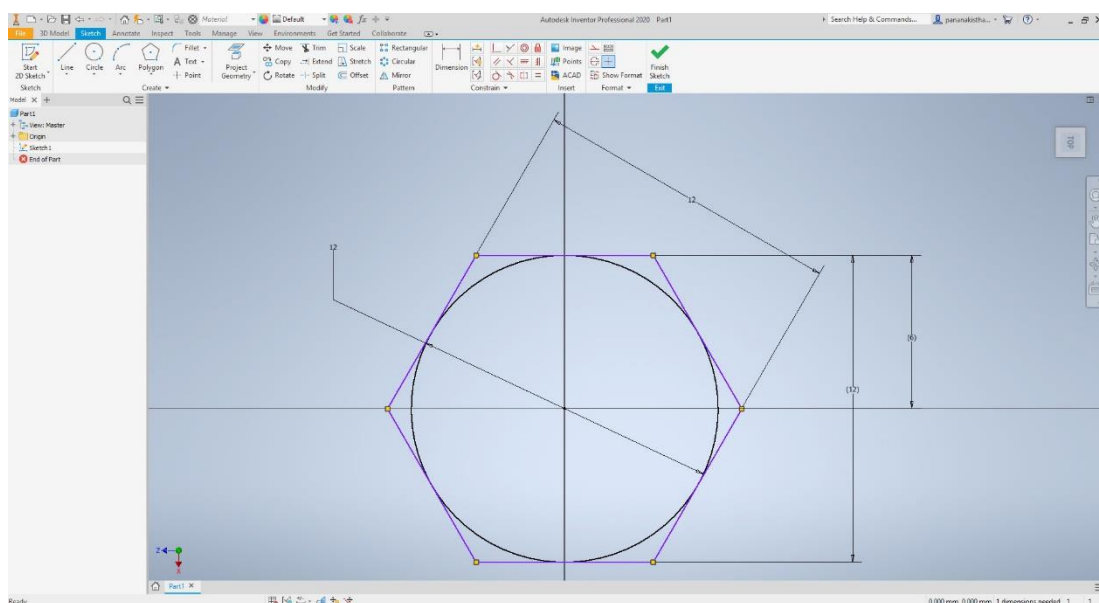
που παρέχει, οπότε θα εξεταστούν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις. Το πρώτο λογισμικό είναι το CubePro, το επίσημο λογισμικό που παρέχει η κατασκευάστρια εταιρεία της μηχανής. Το δεύτερο είναι το Simplify3D, το οποίο αυτή τη στιγμή είναι το μόνο πρόγραμμα που παρέχει την δυνατότητα χειρισμού μηχανών AM που χρησιμοποιούν την αρχιτεκτονική Bits from Bytes. Το πρόγραμμα αυτό μπορεί να εξάγει αρχείο μορφής .bfb. Τέλος το τρίτο λογισμικό που θα εξετάσουμε είναι το Ultimaker Cura, η επιλογή αυτή πραγματοποιήθηκε για δύο λόγους. Πρώτον η αναζήτηση ενός ακόμα λογισμικού που να εξάγει το απαιτούμενο αρχείο απέβει άκαρπη. Δεύτερον το πρόγραμμα αυτό παρόλο που δεν εξάγει αρχεία bfb αλλά αρχεία .gcode παρέχει τη δυνατότητα χειρισμού μηχανών με Firmware Bits from Bytes. Οπότε είναι σημαντικό να παρατηρήσουμε τα αποτελέσματά του.

Αφού επιλέχθηκαν τα λογισμικά που θα χρησιμοποιηθούν στον τεμαχισμό, ακολούθησε η διενέργεια της έρευνας.

4.3 Διεξαγωγή έρευνας

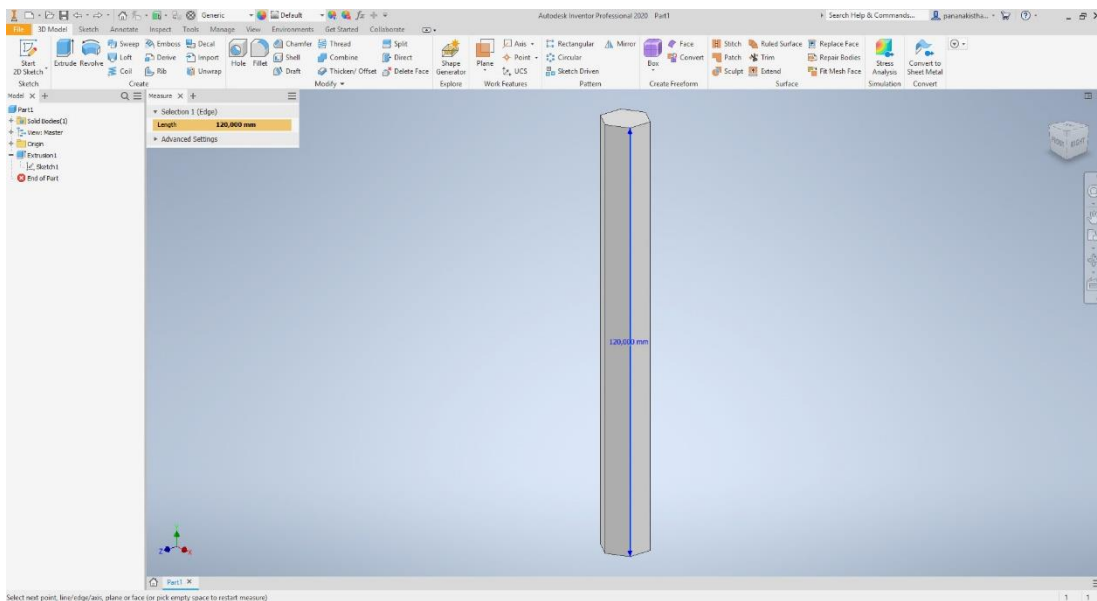
4.3.1 Σχεδιασμός εξαγωνικής ράβδου και παρουσίαση πρότυπου μοντέλου

Ξεκινώντας, θα χρησιμοποιήσουμε το λογισμικό Autodesk Inventor για να σχεδιάσουμε τρισδιάστατο στερεό μοντέλο μιας εξαγωνικής μπάρας, με διαστάσεις έξι χιλιοστά (6 mm) από το κέντρο του πολυγώνου σε κάθε του πλευρά και μήκος της ράβδου εκατόν είκοσι χιλιοστά (120 mm).



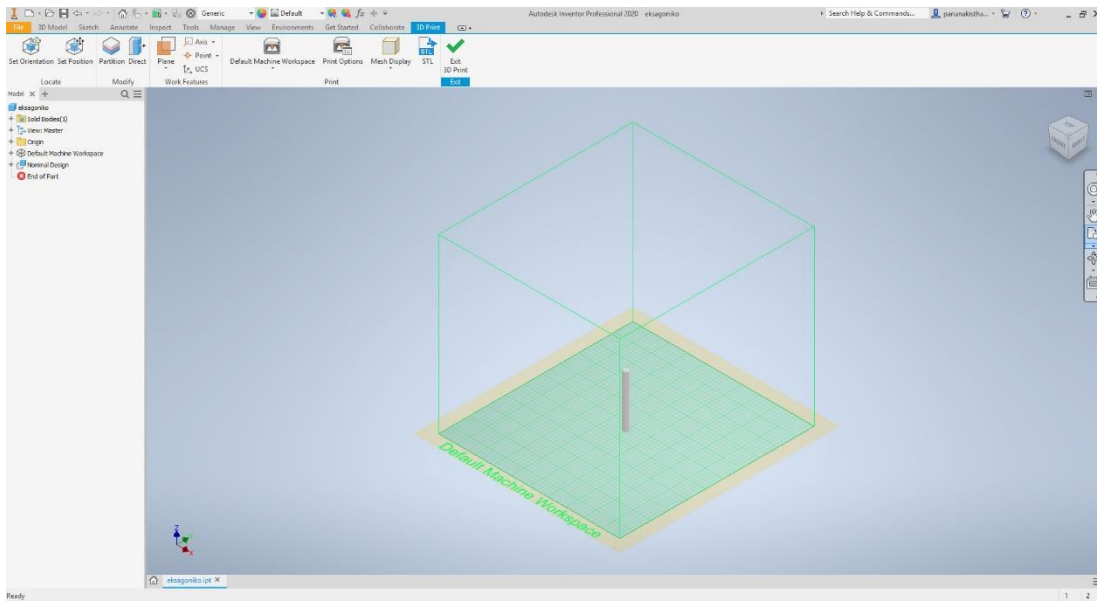
Εικόνα 27: Σχεδιασμός ράβδου στο Autodesk Inventor 1

Για τον σχεδιασμό του εξάγωνου πρέπει πρώτα να φτιάξουμε έναν κύκλο διαμέτρου δώδεκα χιλιοστών (12 mm). Το εξάγωνο που θα σχεδιάσουμε θα πρέπει να είναι περιγεγραμμένο του κύκλου, ώστε το αποτέλεσμα να είναι ένα εξάγωνο με απόσταση των απέναντι πλευρών δώδεκα χιλιοστά (12 mm) και απόσταση της κάθε πλευράς από το κέντρο έξι χιλιοστά (6 mm). Αφού τελειώσει η σχεδίαση του εξάγωνου, πατάμε την εντολή “Extrude” και επιλέγουμε την διατομή του εξάγωνου και το ύψος που θέλουμε να έχει η ράβδος και έπειτα δημιουργείται η τρισδιάστατη ράβδος.



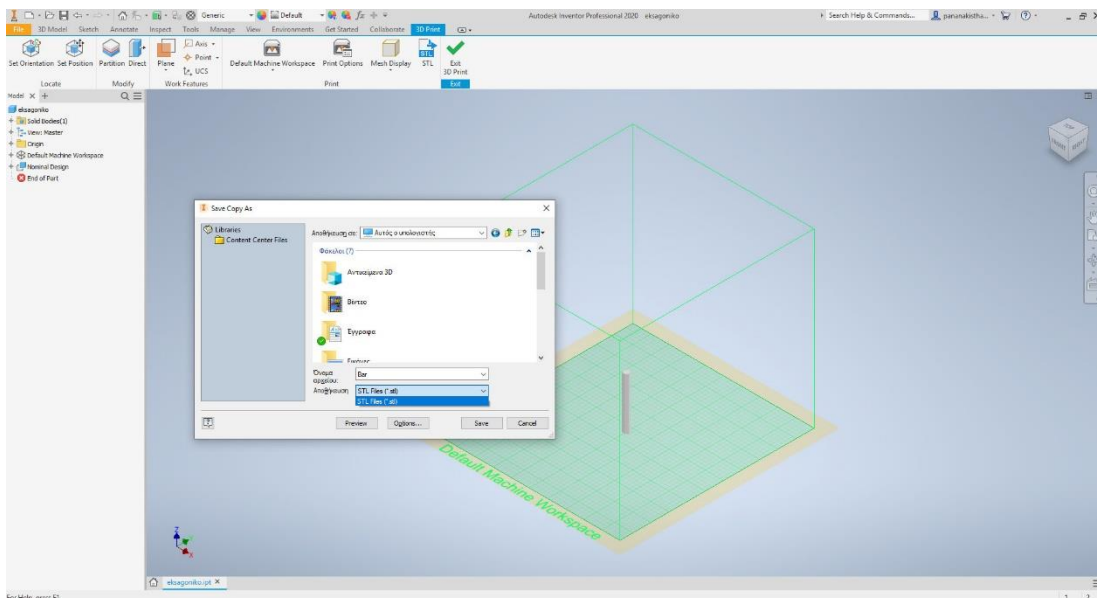
Εικόνα 28: Σχεδιασμός ράβδου στο Autodesk Inventor 2

Το λογισμικό Autodesk Inventor μας παρέχει την δυνατότητα να τοποθετείται το αντικείμενο σε επιφάνεια κατασκευής μιας μηχανής προσθετικής κατασκευής για να απεικονίζεται όλο το μοντέλο και ο προσανατολισμός του, που θα εξαχθεί σε μορφή αρχείου STL.



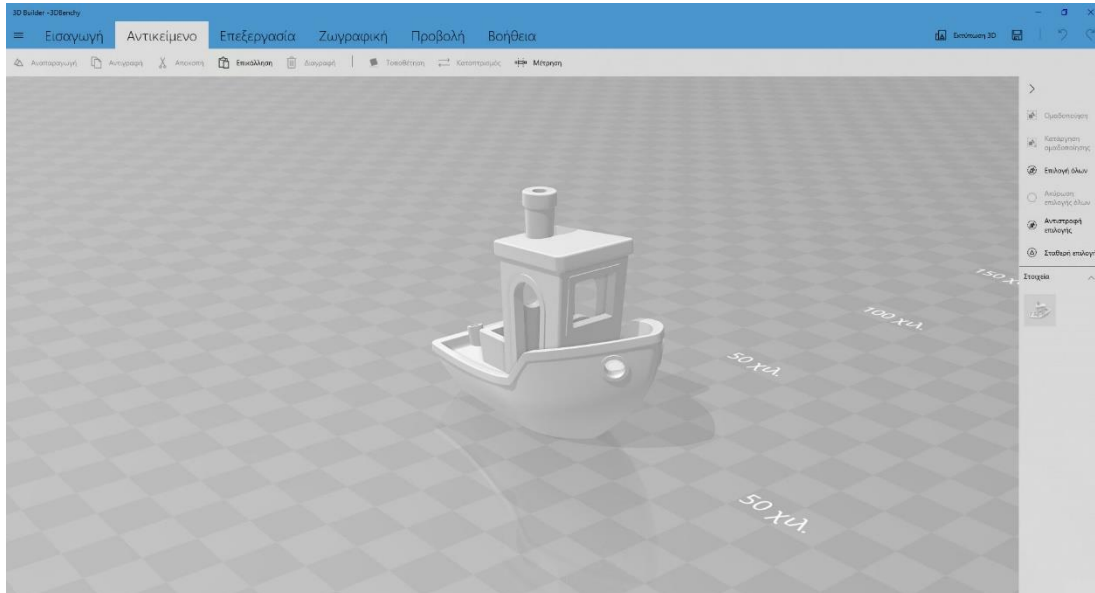
Εικόνα 29: Εξαγωγή αρχείου STL από Autodesk Inventor 1

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι για την εξαγωγή του STL αρχείου του αντικειμένου, γίνεται αυτόματα η προσέγγιση των επιφανειών του 3D μοντέλου με τρίγωνα. Αυτή η ενέργεια μπορεί να επιφέρει σφάλματα στο σχεδιασμένο αντικείμενο, δηλαδή η γεωμετρία του αντικειμένου στο STL αρχείο να είναι διαφορετική από την γεωμετρία που σχεδιάστηκε. Για αυτό το λόγω είναι απαραίτητος ο έλεγχος για τυχόν σφάλματα σε επόμενο στάδιο.



Εικόνα 30: Εξαγωγή αρχείου STL από Autodesk Inventor 2

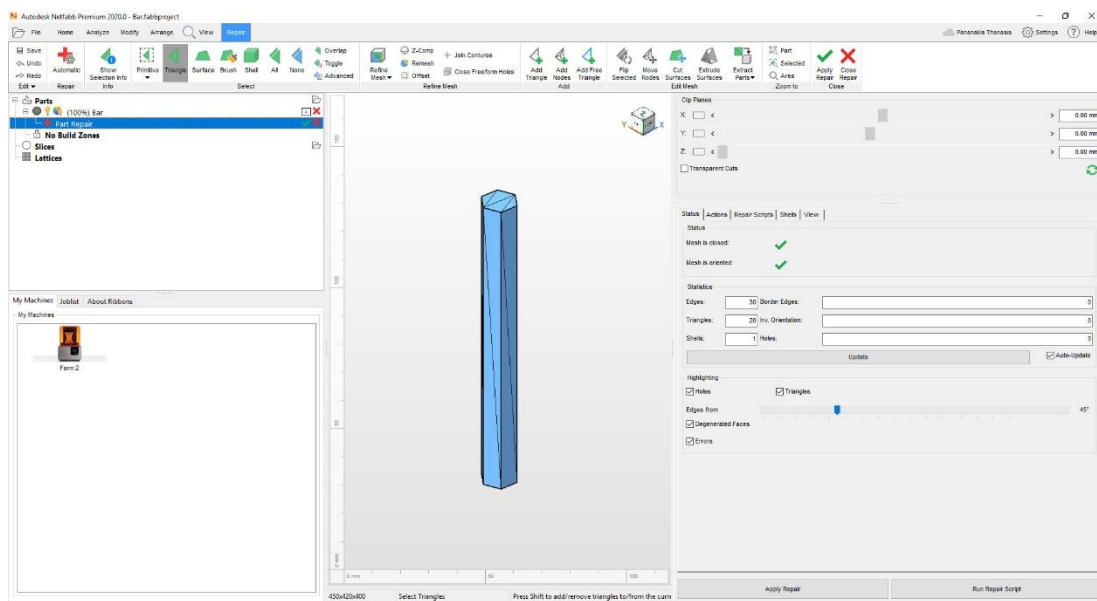
Το πρώτο από τα δύο μοντέλα είναι έτοιμο, ως προς τον σχεδιασμό του και την παραγωγή του STL αρχείου. Το δεύτερο αντικείμενο θα είναι ένα πρότυπο μοντέλο που χρησιμοποιείται για σύγκριση λογισμικών και μηχανών AM, λόγω των μικρών διαστάσεων και των πολλών ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του. Το αντικείμενο υπάρχει έτοιμο σε αρχείο STL.



Εικόνα 31: Παρουσίαση πρότυπου μοντέλου (καράβι)

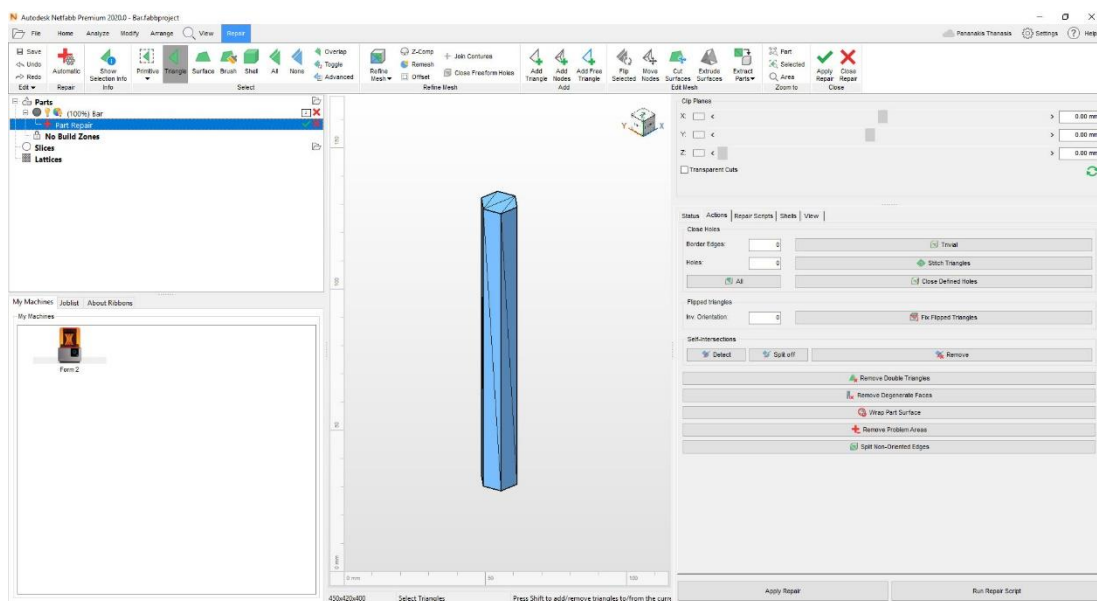
4.3.2 Έλεγχος σφαλμάτων στο Netfabb

Τα δυο αρχεία STL εισήχθησαν στο λογισμικό Autodesk Netfabb ώστε να γίνει έλεγχος και τυχόν επιδιορθώσεις. Χρησιμοποιήθηκε αυτό το λογισμικό διότι πρώτον είναι επαγγελματικό και παρέχει πολλές δυνατότητες ελέγχου και επιδιόρθωσης των αρχείων, όπως αφαίρεση των διπλών τριγώνων, διόρθωση των λεπτών τοιχωμάτων, επισκευή των ανοιχτών διατομών και αφαίρεση προβληματικών περιοχών. Δεύτερον επιλέχθηκε ο έλεγχος των αρχείων να γίνει από διαφορετικό λογισμικό έτσι ώστε και τα τρία λογισμικά που θα λάβουν τα τελικά STL αρχεία να είναι έτοιμα προς τεμαχισμό. Εδώ είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα περισσότερα λογισμικά που αφορούν τον τεμαχισμό, εκτελούν πρώτα έλεγχο και εάν είναι απαραίτητο επιδιορθώνουν το STL αρχείο που τους έχει φορτωθεί. Έτσι τα λογισμικά που εκτελούσαν έλεγχο, επιδιόρθωση και επεξεργασία των STL αρχείων δεν είναι απαραίτητα πια και γι' αυτό οι εταιρείες έχουν σταματήσει τη διάθεσή τους.

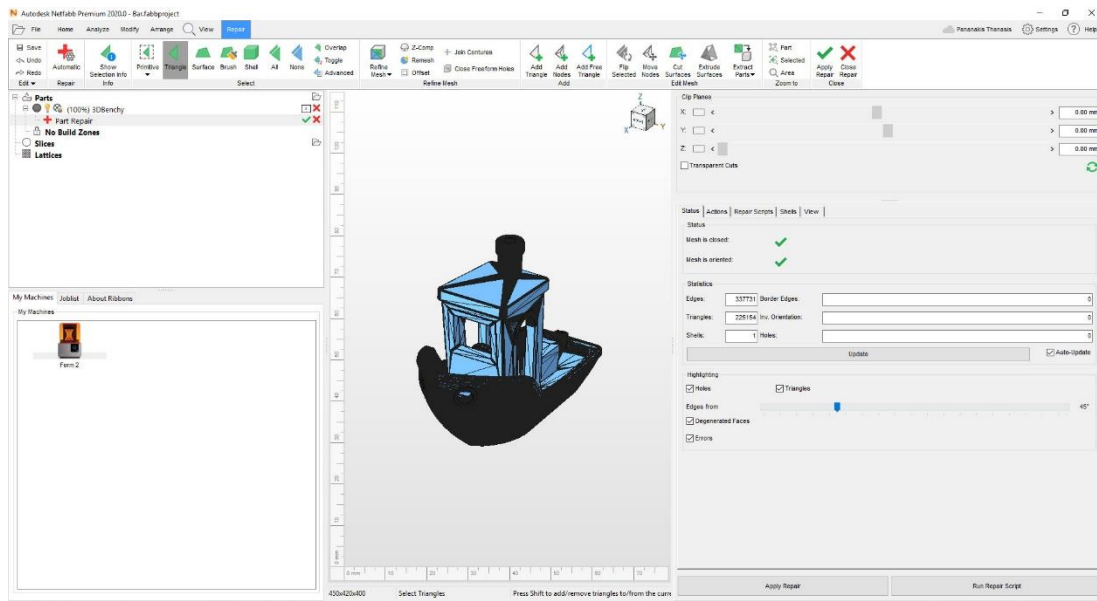


Εικόνα 32: Έλεγχος ράβδου στο Netfabb 1

Κατά την εισαγωγή του αρχείου STL της ράβδου στο λογισμικό Netfabb παρατηρήθηκε ότι η δημιουργία του STL αρχείου έγινε χωρίς να προκληθεί κάποιο σφάλμα, οπότε η ράβδος είναι έτοιμη. Επίσης το λογισμικό παρουσιάζει την ψηφιδωτή αναπαράσταση, δηλαδή τις επιφάνειες της ράβδου με τα τρίγωνα που έχουν δημιουργηθεί.

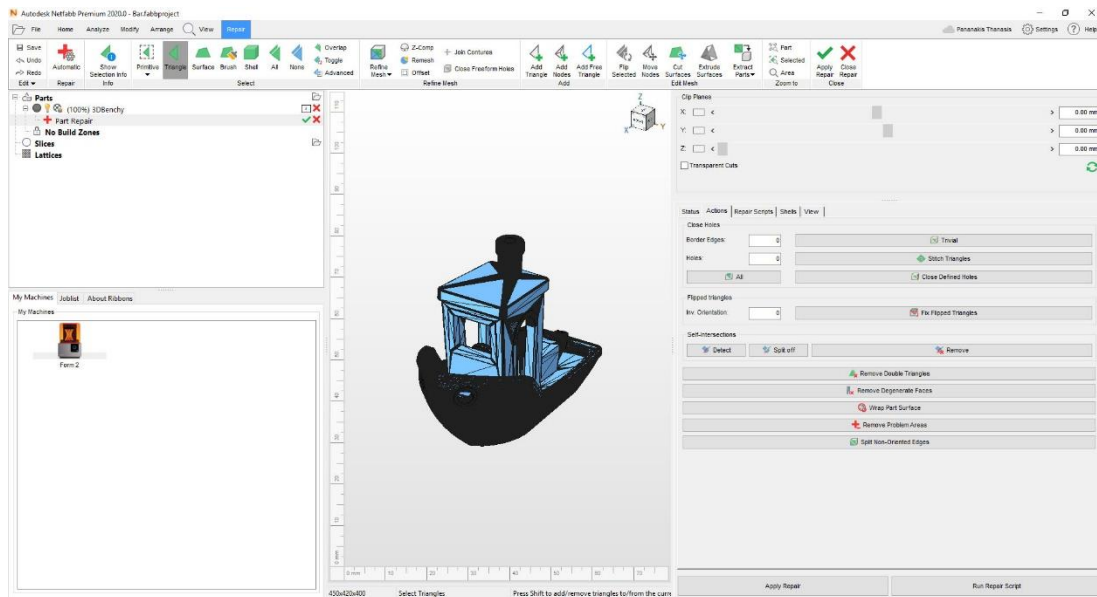


Εικόνα 33: Έλεγχος ράβδου στο Netfabb 2



Εικόνα 34: Έλεγχος καραβιού στο Netfabb 1

Έπειτα ακολούθησε η εισαγωγή του STL αρχείου του πρότυπου μοντέλου (καράβι) στο Netfabb για τον έλεγχο σφαλμάτων. Ο έλεγχος δεν παρουσίασε κάποιο σφάλμα, οπότε και το STL αρχείο του καραβιού είναι έτοιμο.

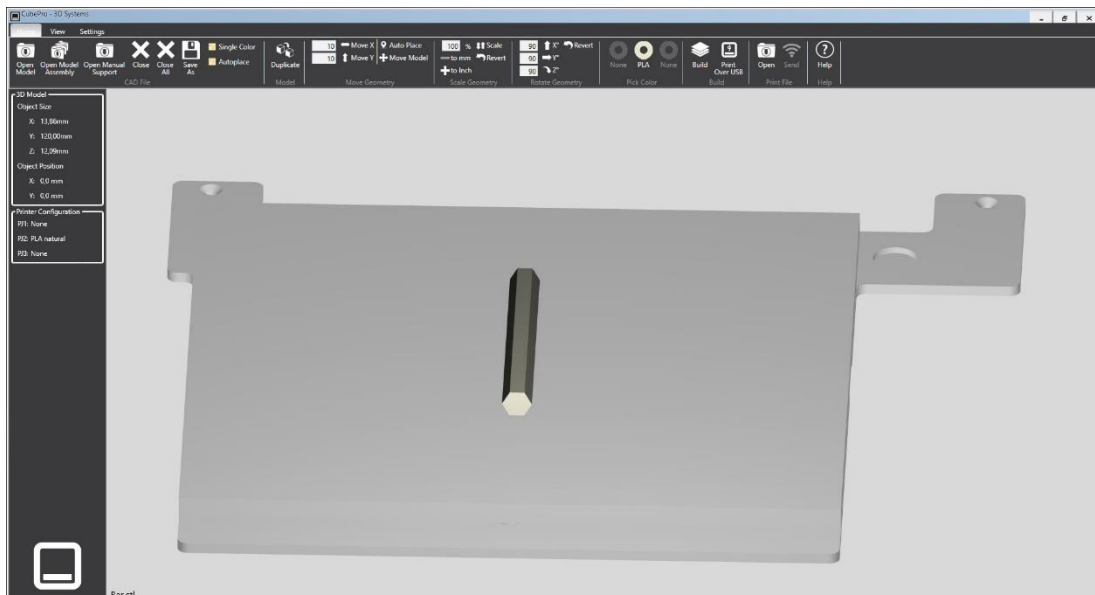


Εικόνα 35: Έλεγχος καραβιού στο Netfabb 2

Αφού έγινε και ο έλεγχος των δύο αρχείων, συνέχεια έχει η ρύθμιση των παραμέτρων της κατασκευαστικής διαδικασίας, η προετοιμασία και ο τεμαχισμός των μοντέλων από το κάθε λογισμικό.

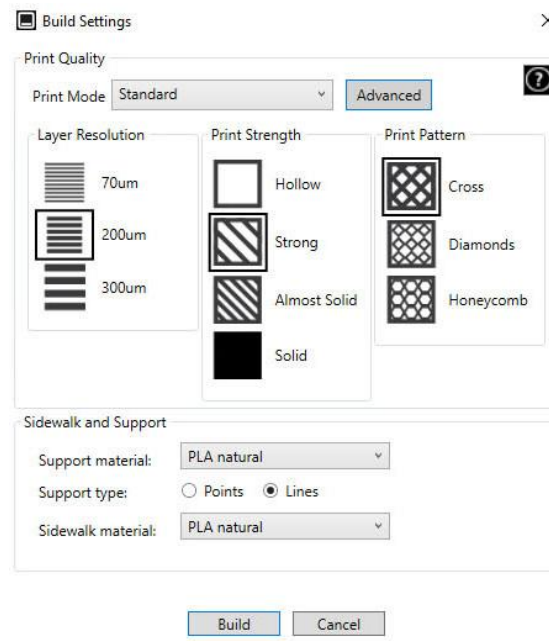
4.3.3 Προετοιμασία μοντέλων με λογισμικό CubePro

Πρώτο λογισμικό που θα χρησιμοποιηθεί είναι το CubePro της κατασκευάστριας εταιρείας της μηχανής προσθετικής κατασκευής. Το λογισμικό αυτό είναι ανοιχτό προς όλους τους χρήστες και παρέχεται από την 3D Systems ειδικά για την δημιουργία αρχείων που αναγνωρίζονται από την CubePro Duo. Πρώτα εισάγουμε το STL αρχείο της ράβδου.



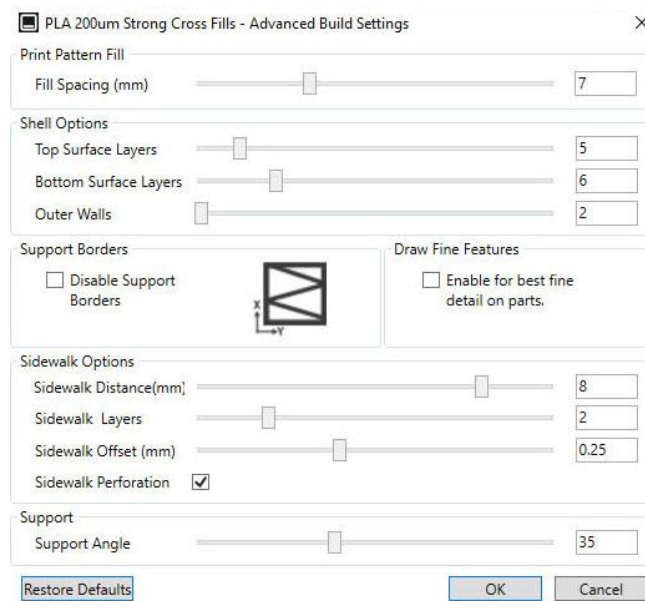
Εικόνα 36: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό CubePro 1

Αφού τοποθετηθεί το μοντέλο πάνω στην κατασκευαστική πλάκα, γίνεται να μετακινηθεί ώστε να αλλάξει ο προσανατολισμός του και να τροποποιηθεί η κλίμακα ολόκληρου του τεμαχίου, ώστε να μεγαλώσει ή να μικρύνει. Επίσης γίνεται να καθοριστεί ο αριθμός των ίδιων τεμαχίων που απαιτείται να κατασκευαστούν σε μία κατασκευαστική διαδικασία. Αυτές οι δυνατότητες παρέχονται από το πρόγραμμα με τις εντολές που υπάρχουν στην γραμμή εντολών του λογισμικού. Στην γραμμή εντολών επίσης υπάρχει το υλικό και το χρώμα του που έχει επιλεγεί σε κάθε κεφαλή εκτύπωσης.



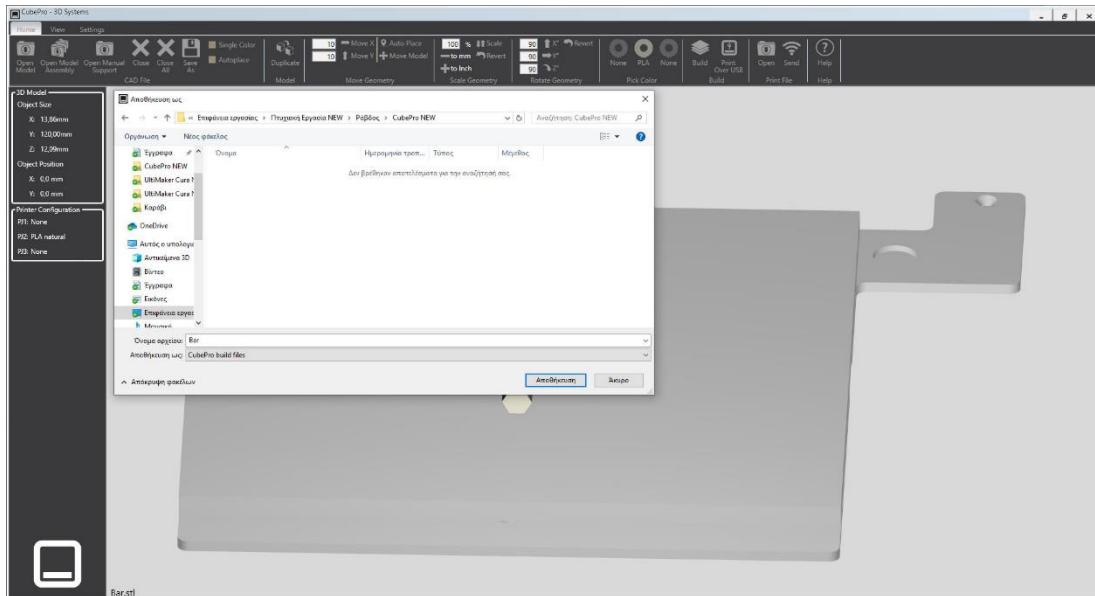
Εικόνα 37: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό CubePro 2

Επόμενο στάδιο είναι ο τεμαχισμός. Για να γίνει ο τεμαχισμός παρέχουμε στο πρόγραμμα κάποιες ιδιότητες ανάλογα με τις απαιτήσεις. Οι ιδιότητες που μπορούν να τροποποιηθούν είναι το πάχος στρώματος, η πυκνότητα της πλήρωσης εντός του αντικειμένου, το μοτίβο κατασκευής της πλήρωσης, το είδος και το υλικό των στηριγμάτων και η γωνία στήριξης.



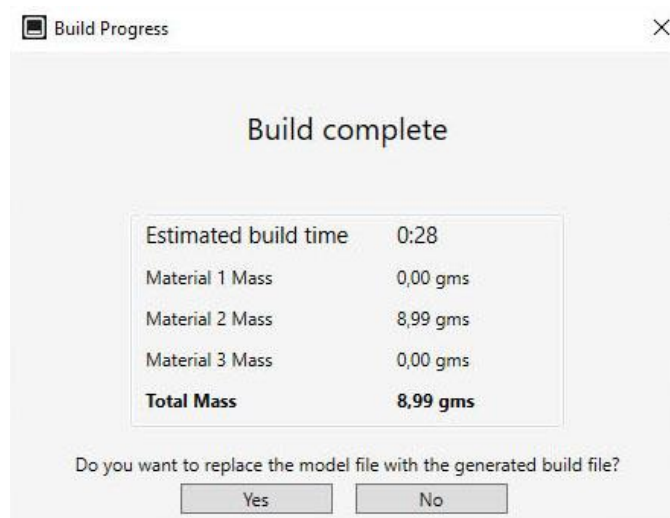
Εικόνα 38: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό CubePro 3

Αφού ρυθμιστούν οι παράμετροι της κατασκευαστικής διαδικασίας, το λογισμικό ανοίγει ένα παράθυρο για την αποθήκευση του τελικού αρχείου. Τα αρχεία που εξάγονται μπορεί να είναι της μορφής .cubepro ή .bfb.



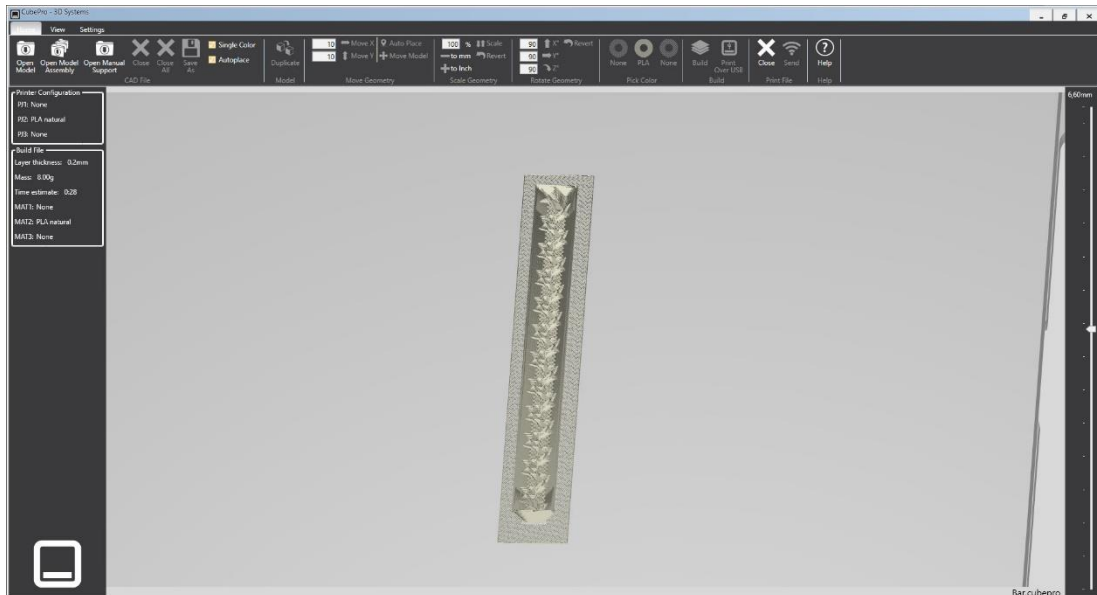
Εικόνα 39: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό CubePro 4

Μετά τον τεμαχισμό το λογισμικό υπολογίζει και παρουσιάζει τον απαιτούμενο χρόνο κατασκευής και την απαιτούμενη ποσότητα του υλικού.



Εικόνα 40: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό CubePro 5

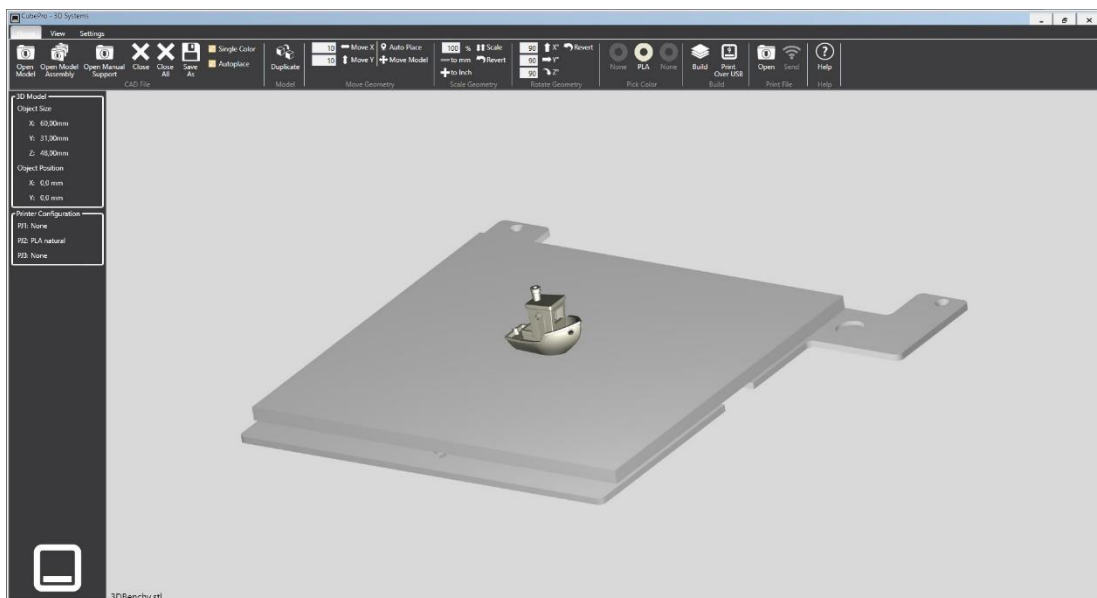
Τέλος το λογισμικό παρέχει τη δυνατότητα στον χειριστή να ελέγξει το αρχείο διατομών που δημιουργήθηκε μετά τον τεμαχισμό.



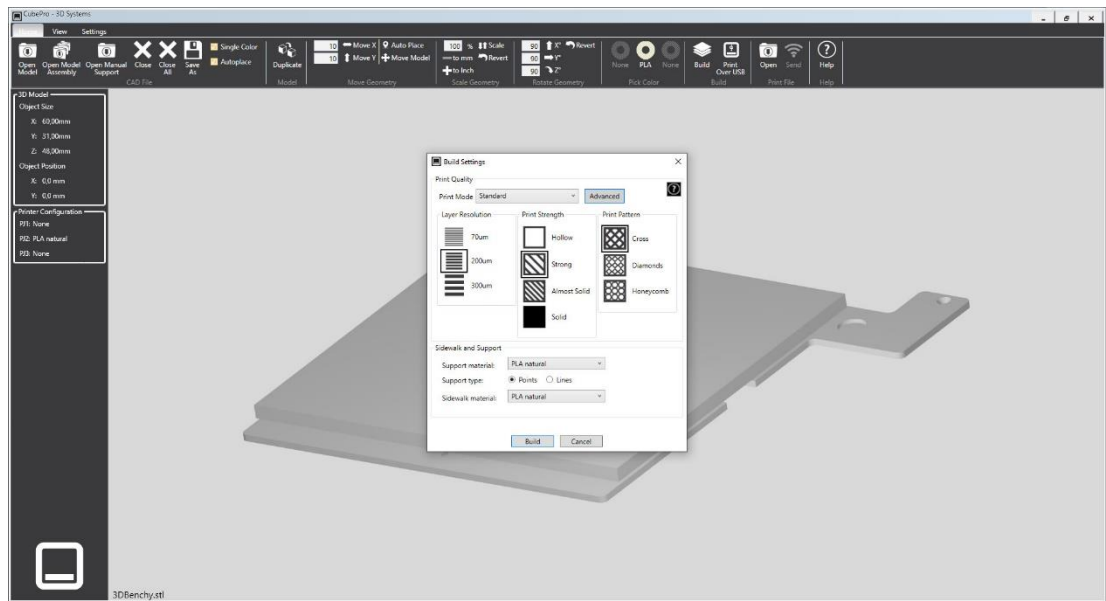
Εικόνα 41: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό CubePro 6

Το αρχείο που έχει εξαχθεί από το λογισμικό είναι της μορφής .cubepro οπότε είναι έτοιμο και αναγνωρίζεται από την μηχανή προσθετικής κατασκευής.

Ακολουθεί η ίδια διαδικασία για το πρότυπο μοντέλο (καράβι).

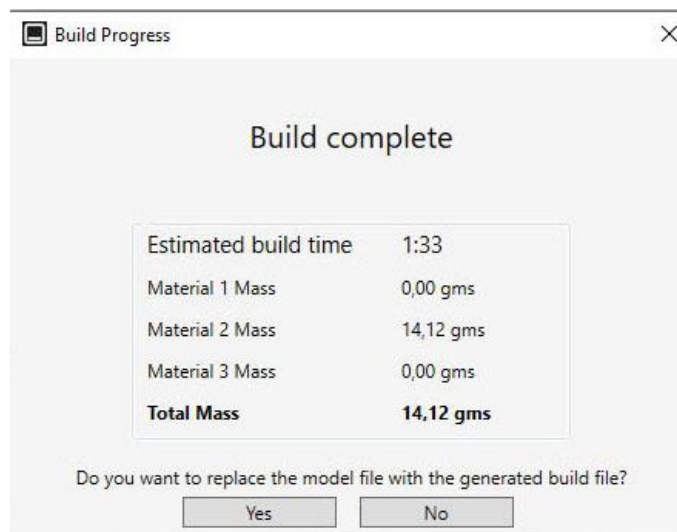


Εικόνα 42: Προετοιμασία καραβιού με λογισμικό CubePro 1

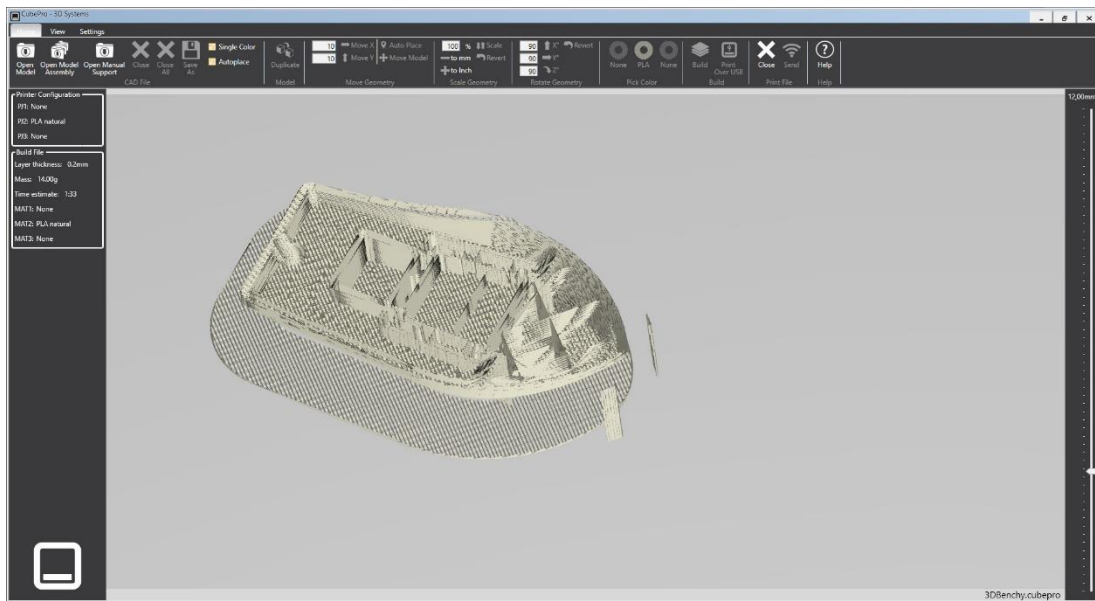


Εικόνα 43: Προετοιμασία καρναβιού με λογισμικό CubePro 2

Μετά τον τεμαχισμό του πρότυπου μοντέλου το λογισμικό υπολόγισε ότι θα απαιτηθεί μία ώρα και τριάντα τρία λεπτά για την παραγωγή του αντικειμένου.



Εικόνα 44: Προετοιμασία καρναβιού με λογισμικό CubePro 3

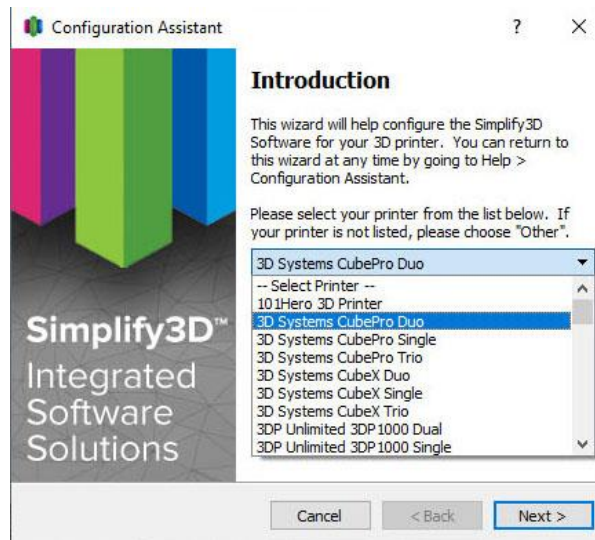


Εικόνα 45: Προετοιμασία каравиού με λογισμικό CubePro 4

Το αρχείο .cubeprο που δημιουργήθηκε από το λογισμικό CubePro είναι έτοιμο και αναγνωρίζεται από την μηχανή προσθετικής κατασκευής.

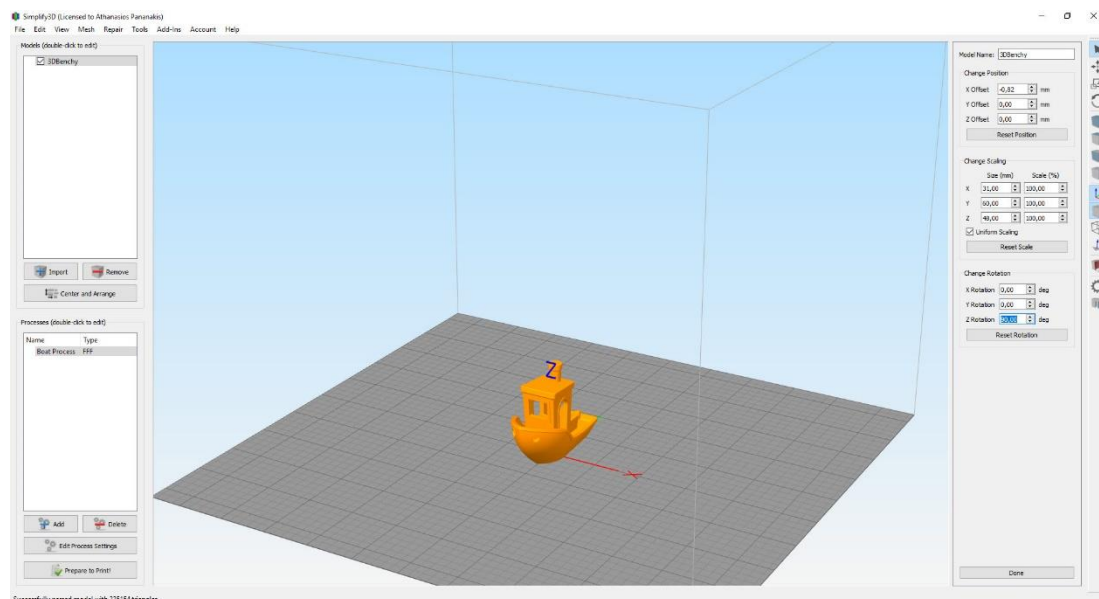
4.3.4 Προετοιμασία μοντέλων με λογισμικό Simplify 3D

Το δεύτερο λογισμικό που θα χρησιμοποιηθεί είναι το Simplify 3D. Είναι εμπορικό πρόγραμμα που συνεργάζεται με μία ευρεία γκάμα μηχανών προσθετικής κατασκευής, άρα και με διάφορα Firmware των εκτυπωτών. Ξεκινώντας την χρήση του προγράμματος πρέπει πρώτα να προσδιοριστεί η μηχανή προσθετικής κατασκευής με την οποία έχει σκοπό ο χειριστής να κατασκευάσει το αντικείμενο. Η μηχανή προσθετικής κατασκευής που διαθέτει το εργαστήριο είναι η CubePro Duo, οπότε επιλέγεται αυτή στο πρόγραμμα. Κατά την επιλογή παρέχεται στο χρήστη ένα προφίλ της μηχανής που διαθέτει όλες τις ιδιότητες της.



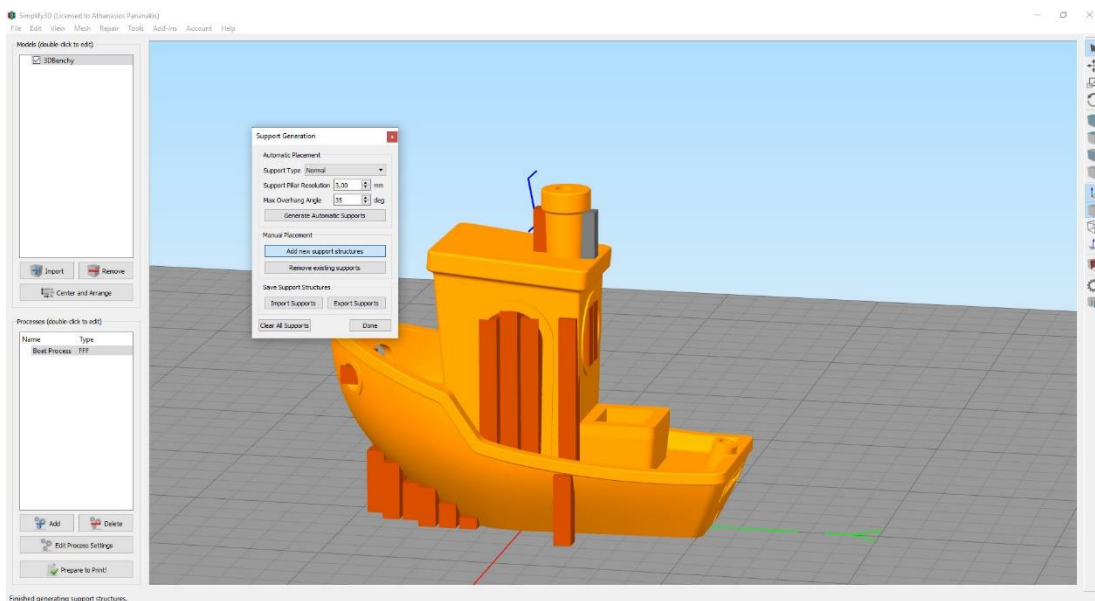
Εικόνα 46: Simplify 3D

Αφού έχει επιλεγθεί το προφίλ της μηχανής προσθετικής κατασκευής, εισάγεται το μοντέλο. Το μοντέλο μπορεί να μετακινηθεί εντός του χώρου κατασκευής, να αλλάξει ο προσανατολισμός του, να αλλάξει η κλίμακα του, να περιστραφεί και να πολλαπλασιαστεί για να κατασκευαστούν περισσότερα ίδια κομμάτια. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα ο χειριστής να δει την εσωτερική δομή του σε όλη την έκταση του κομματιού και να δημιουργηθούν αυτόματα ή χειροκίνητα στηρίγματα.



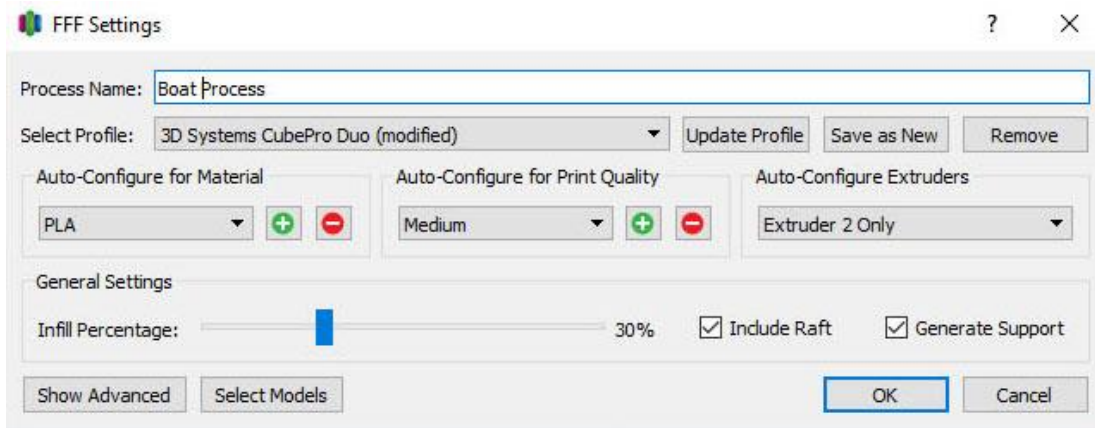
Εικόνα 47: Προετοιμασία καραβιού με λογισμικό Simplify 3D 1

Τα στηρίγματα αποτελούνται από τετραγωνικές διατομές διαφορετικών διαστάσεων που στηρίζουν το αντικείμενο. Εκτός από την δημιουργία των στηριγμάτων μπορεί να γίνει και αφαίρεση κάποιων που έχουν δημιουργηθεί αυτόματα και δεν είναι απαραίτητα.



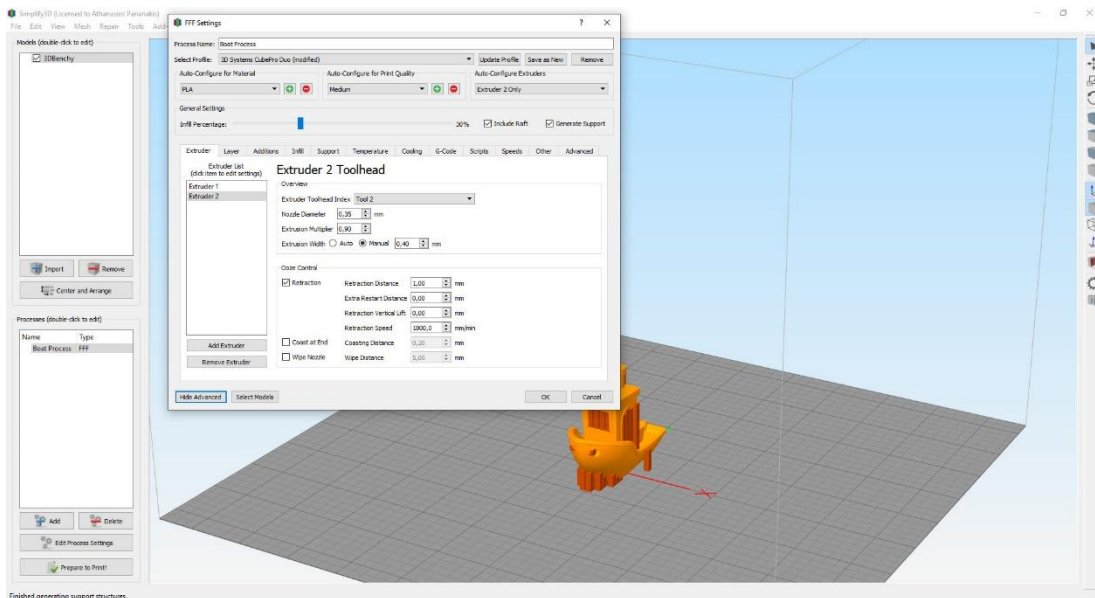
Εικόνα 48: Προετοιμασία καρβιού με λογισμικό Simplify 3D 2

Προετοιμάζοντας το αντικείμενο για τον τεμαχισμό πρέπει να προσδιοριστούν οι ρυθμίσεις του τεμαχισμού και της κατασκευαστικής διαδικασίας. Αρχικά εμφανίζονται οι απλές ρυθμίσεις, όπως το υλικό κατασκευής, την ποιότητα κατασκευής, το κεφαλή εκτύπωσης που θα χρησιμοποιηθεί, η πυκνότητα της πλήρωσης εσωτερικά, η δημιουργία βάση κάτω από το αντικείμενο και η αυτόματη παραγωγή στηριγμάτων.

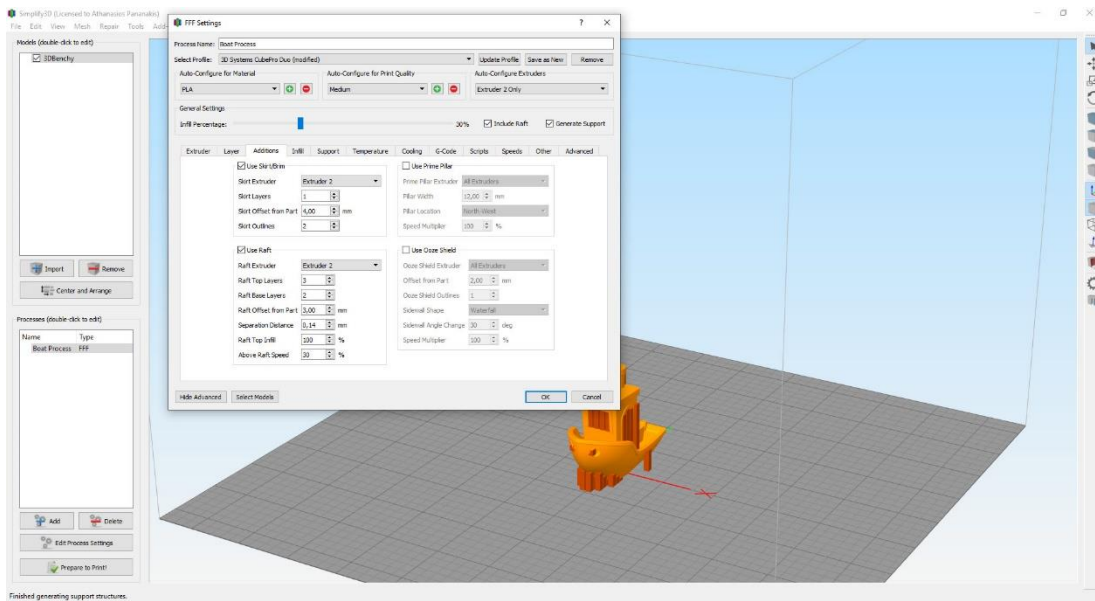


Εικόνα 49: Προετοιμασία καραβιού με λογισμικό Simplify 3D 3

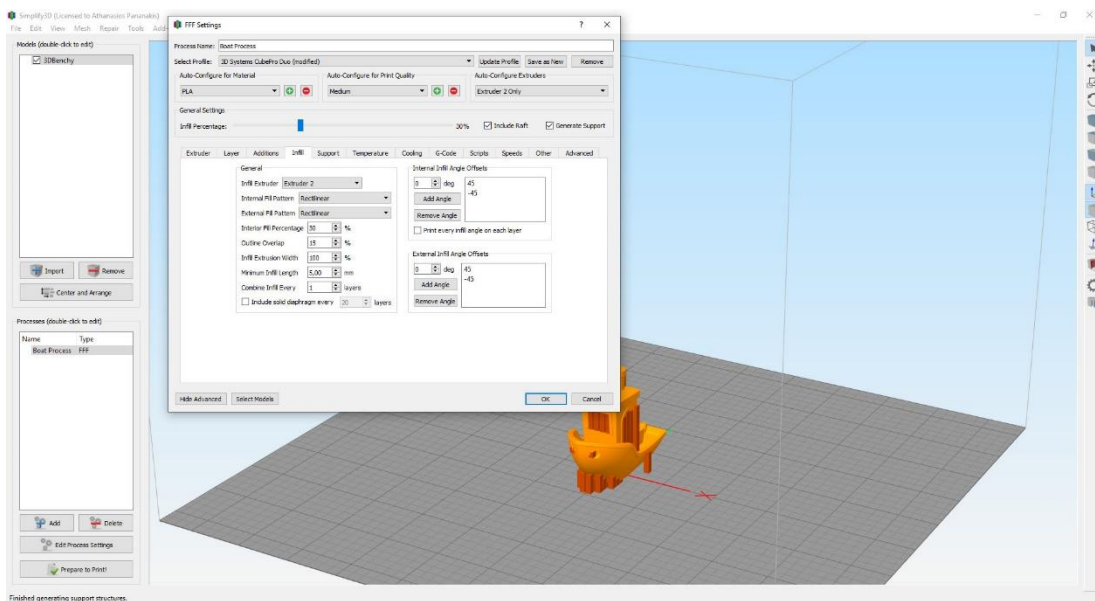
Ανοίγοντας όμως το παράθυρο των επαγγελματικών ρυθμίσεων, μπορούν να τροποποιηθούν πάρα πολλές ρυθμίσεις για την εκτύπωση του αντικειμένου, όπως επιγραμματικά η διάμετρος ακροφυσίου, η επικάλυψη, το πάχος στρώματος, το μοτίβο πλήρωσης, την θερμοκρασία του θαλάμου και του ακροφυσίου, τις στροφές των ανεμιστήρων, την ταχύτητα εναπόθεσης και κίνησης του ακροφυσίου κ.α.



Εικόνα 50: Προετοιμασία καραβιού με λογισμικό Simplify 3D 4

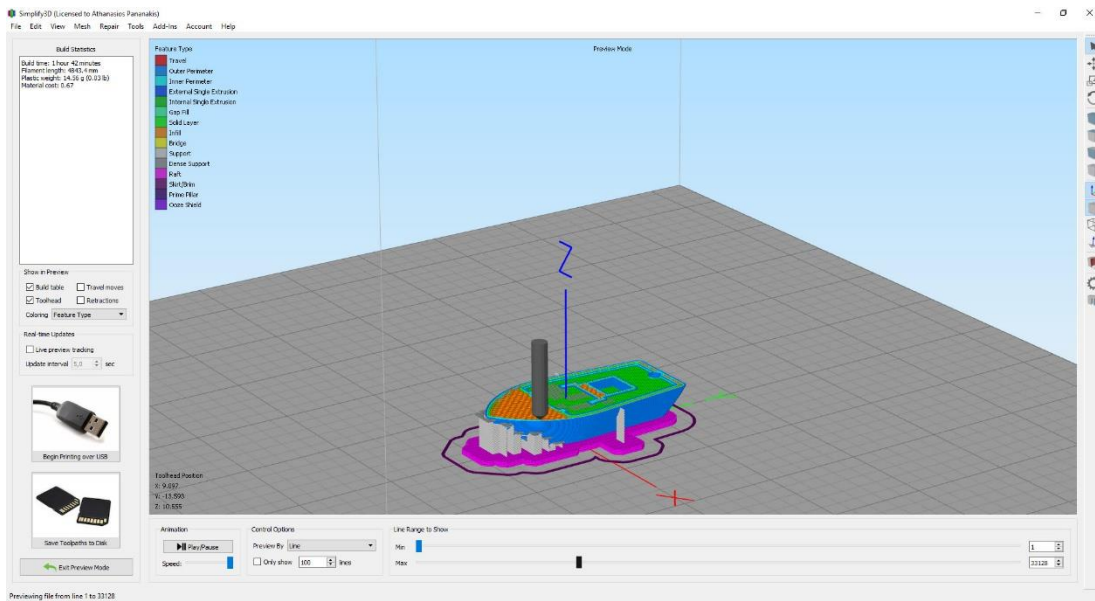


Εικόνα 51: Προετοιμασία καραβιού με λογισμικό Simplify 3D 5



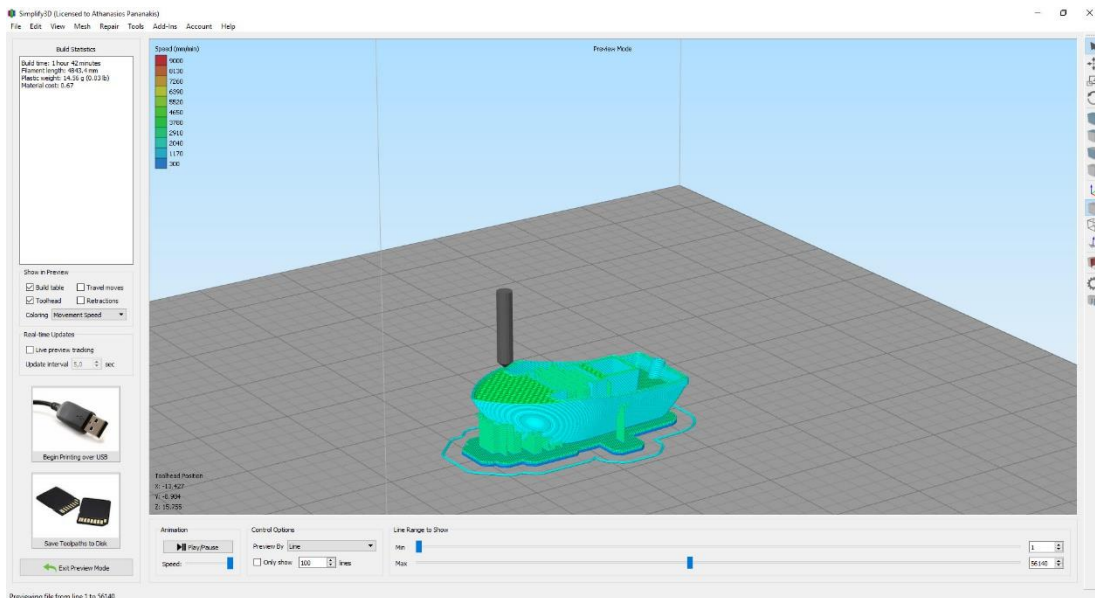
Εικόνα 52: Προετοιμασία καραβιού με λογισμικό Simplify 3D 6

Μετά τον προσδιορισμό όλων των ρυθμίσεων, ακολουθεί η παρουσίαση του τεμαχισμένου αντικειμένου. Το λογισμικό παρέχει τη δυνατότητα παρουσίασης της κάθε στρώσης αλλά και της κίνησης του εργαλείου για την κατασκευή τους. Το αντικείμενο είναι χρωματισμένο με διάφορα χρώματα που έχει χρησιμοποιήσει το λογισμικό για να παρουσιάσει στο χρήστη τα διαφορετικά κατασκευασμένα χαρακτηριστικά της κάθε στρώσης. Η αντιστοιχία των χρωμάτων με τα χαρακτηριστικά φαίνεται επάνω αριστερά στην οθόνη.

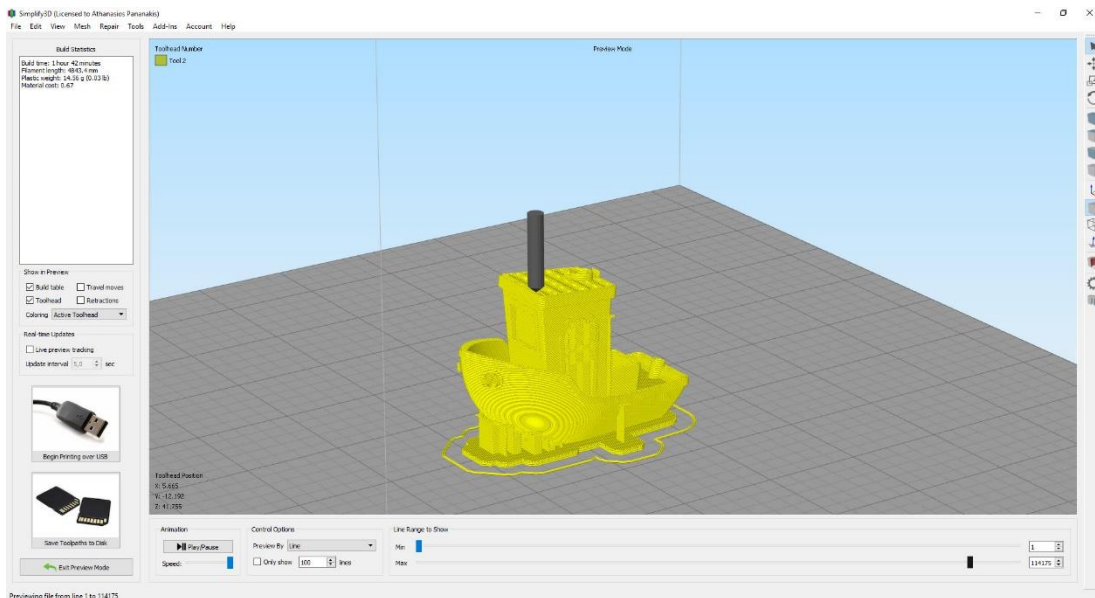


Εικόνα 53: Προετοιμασία καραβιού με λογισμικό Simplify 3D 7

Εκτός από τα χαρακτηριστικά της κάθε στρώσης μπορεί να παρουσιάσει το πρόγραμμα είτε την ταχύτητα κίνησης της κεφαλής εκτύπωσης, είτε την χρήση του κάθε ακροφυσίου (αν χρησιμοποιούνται και τα δυο).



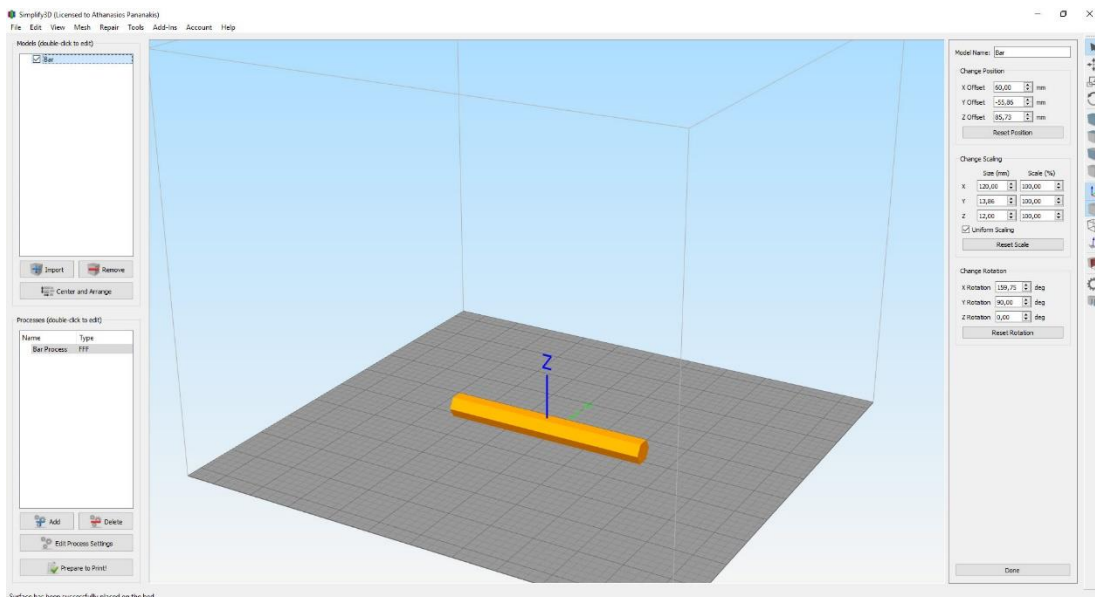
Εικόνα 54: Προετοιμασία καραβιού με λογισμικό Simplify 3D 8



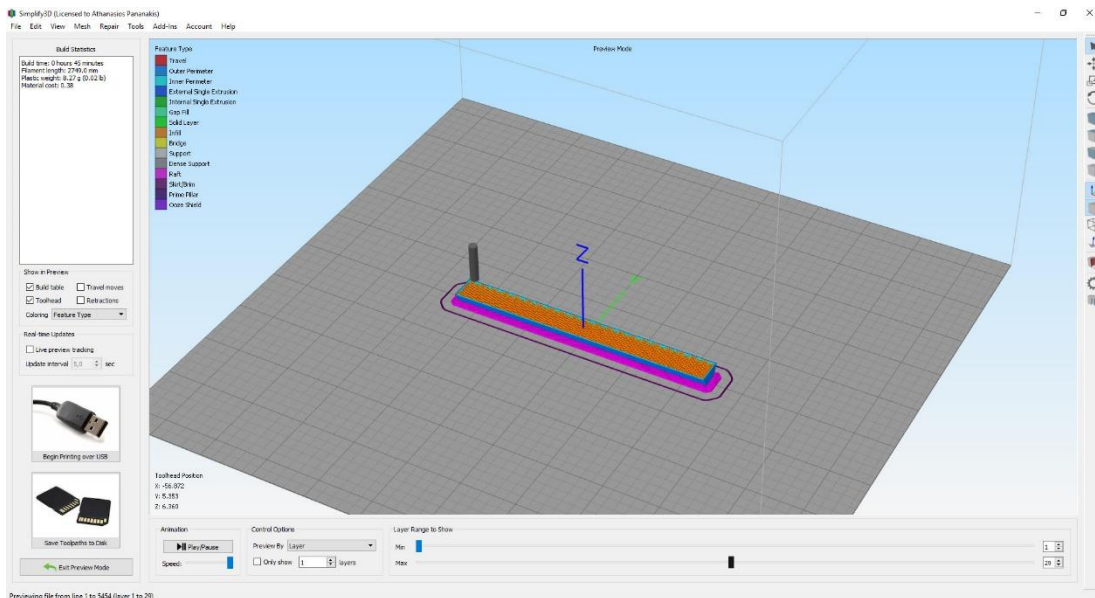
Εικόνα 55: Προετοιμασία καρβιού με λογισμικό Simplify 3D 9

Το αρχείο που εξάγεται από το πρόγραμμα είναι της μορφής .bfb και δεν αναγνωρίζεται απευθείας από την μηχανή προσθετικής κατασκευής.

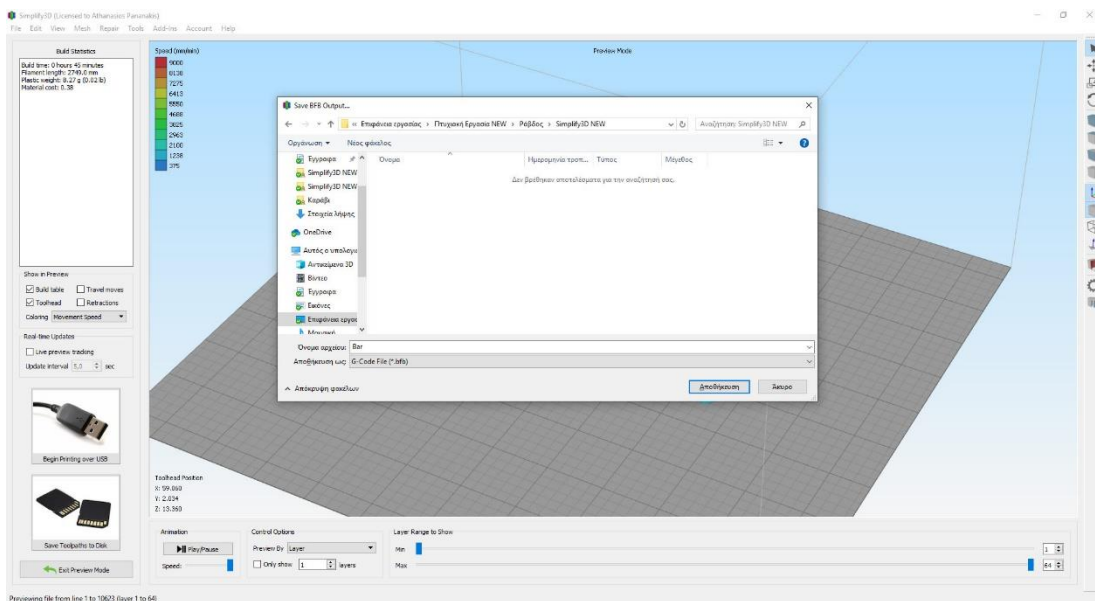
Θα ακολουθήσει η ίδια διαδικασία και για το άλλο μοντέλο, την ράβδο.



Εικόνα 56: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό Simplify 3D 1



Εικόνα 57: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό Simplify 3D 2



Εικόνα 58: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό Simplify 3D 3

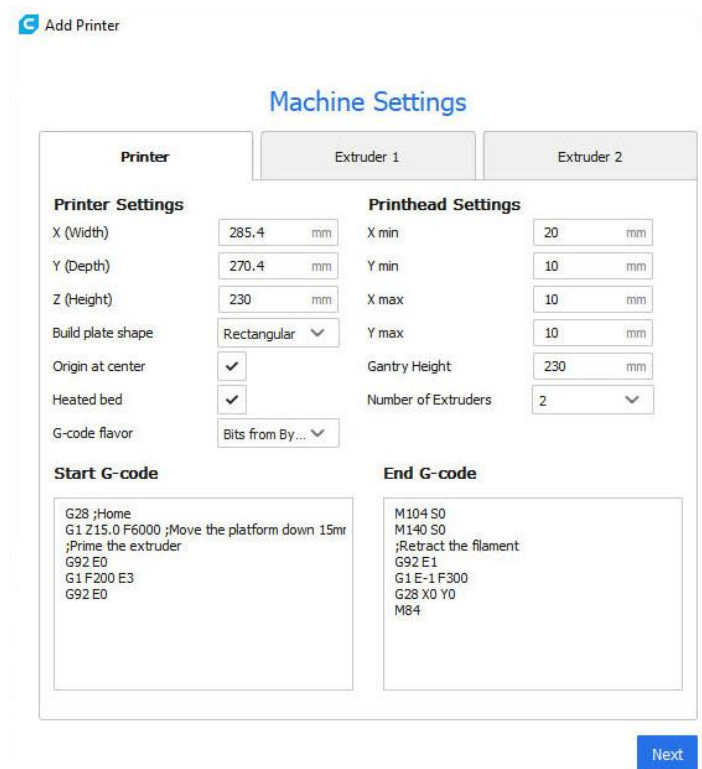
Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία παράγεται αρχείο μορφής .bfb, το οποίο όμως δεν αναγνωρίζεται από την μηχανή προσθετικής κατασκευής.

Νωρίτερα είχε γίνει αναφορά στο τύπο αρχείου .cubepro, το οποίο είναι αρχείο της μορφής .bfb που έχει κωδικοποιηθεί με κρυπτογράφηση Blowfish ECB. Οπότε για να μετατρέψουμε τα δύο αρχεία μας από .bfb σε .cubepro θα πρέπει να τα εισάγουμε σε έναν κωδικοποιητή. Η μετατροπή είναι άμεση και παράγει αρχεία .cubepro, τα οποία αναγνωρίζονται από την CubePro Duo.

Τα αρχεία της μορφής bfb είναι κατάλληλα για να εισαχθούν σε οποιαδήποτε μηχανή AM που χρησιμοποιεί Firmware Bits from Bytes. Η CubePro Duo είναι κατασκευασμένη με αυτό το Firmware όμως η κατασκευάστρια εταιρεία πρόσθεσε και την κρυπτογράφηση Blowfish ECB.

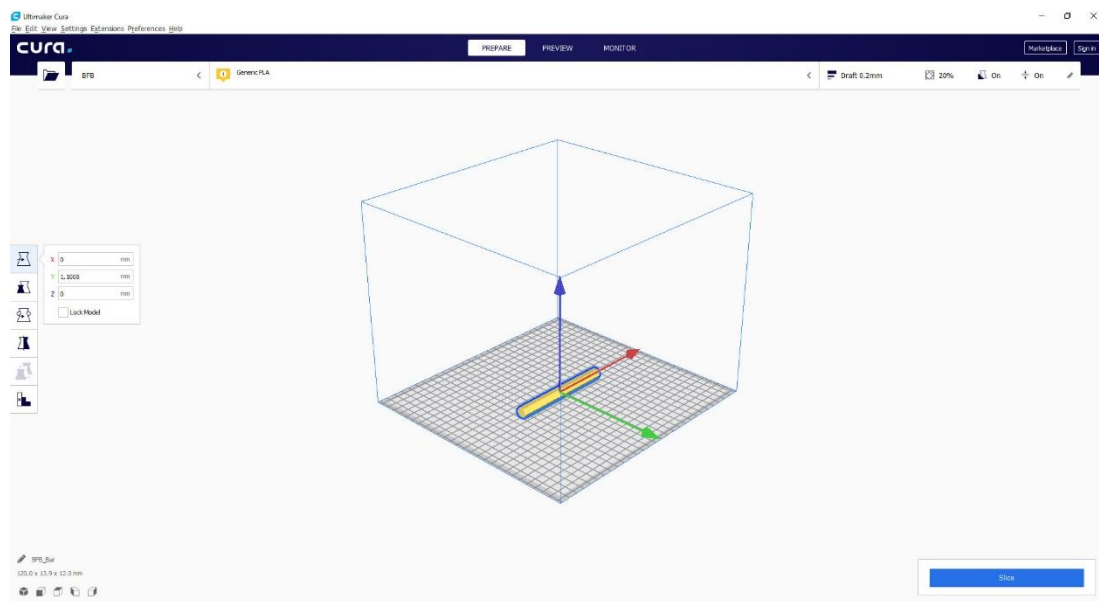
4.3.5 Προετοιμασία μοντέλων με λογισμικό Ultimaker Cura

Το τρίτο λογισμικό που θα χρησιμοποιηθεί είναι το Ultimaker Cura. Έχει αναπτυχθεί από την εταιρεία Ultimaker και παρέχεται δωρεάν κυρίως για την χρήση του σε συνεργασία με τις μηχανές προσθετικής κατασκευής της ίδιας εταιρείας, παρόλα αυτά υποστηρίζει πολλές γλώσσες προγραμματισμού. Κατά την έναρξη πρέπει να προσδιοριστεί η μηχανή προσθετικής κατασκευής που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του προϊόντος. Επειδή η CubePro Duo δεν υπάρχει στη λίστα θα πρέπει να προσαρμόσουμε εμείς τα χαρακτηριστικά της μηχανής μας. Οι ρυθμίσεις αυτές είναι βασικές όπως οι διαστάσεις του χώρου κατασκευής, ο αριθμός των ακροφυσίων, η διάσταση του στομίου του ακροφυσίου και ο τύπος της αρχιτεκτονικής της μηχανής προσθετικής κατασκευής. Επίσης υπάρχουν έτοιμες οι εντολές που προστίθενται στην αρχή και στο τέλος της γλώσσας προγραμματισμού για την δημιουργία κατάλληλου αρχείου.



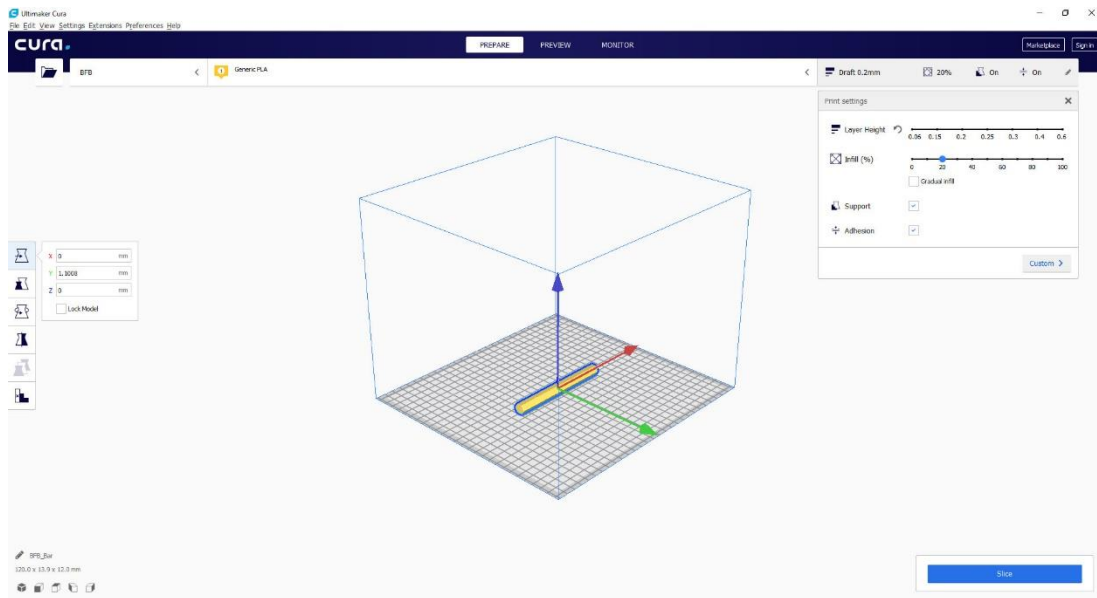
Εικόνα 59: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό Ultimaker Cura 1

Έπειτα εισάγεται το πρώτο αρχείο STL, η ράβδος. Όταν τοποθετηθεί το αντικείμενο εντός του χώρου κατασκευαστικής, ο χειριστής μπορεί να μετακινήσει το αντικείμενο, να αλλάξει τον προσανατολισμό του, να αλλάξει την κλίμακα του, να το περιστρέψει και να το πολλαπλασιαστεί για να κατασκευάσει περισσότερα ίδια κομμάτια. Επίσης το λογισμικό παρέχει την δυνατότητα, εάν ο χειριστής έχει προσθέσει δύο ή περισσότερα αντικείμενα το κάθε ένα να κατασκευαστεί με διαφορετικά χαρακτηριστικά.



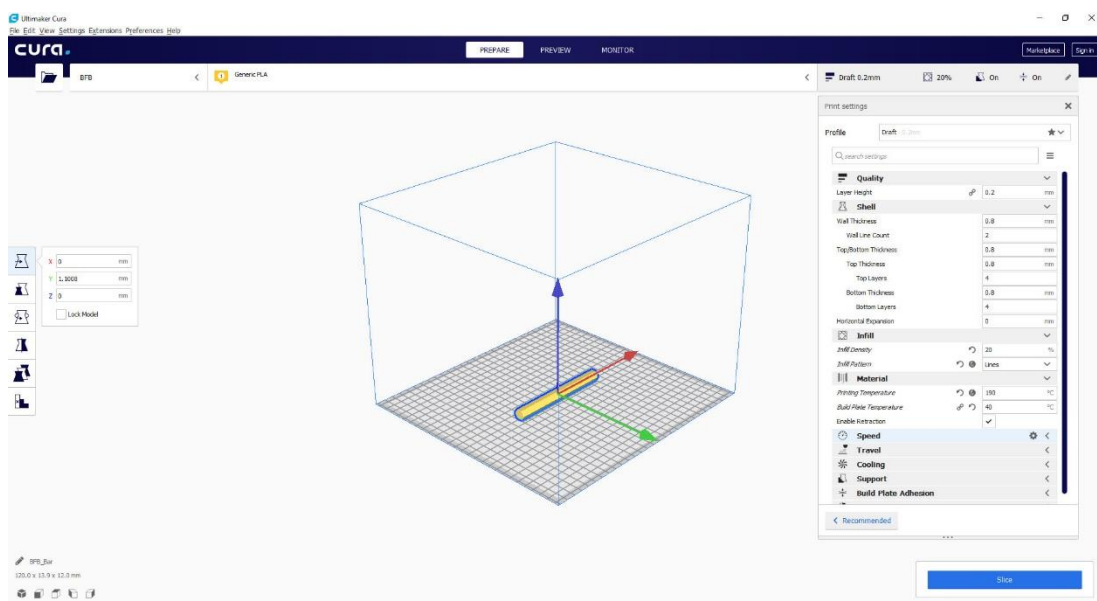
Εικόνα 60: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό Ultimaker Cura 2

Το πρόγραμμα έχει εξ αρχής καθορισμένα κάποια χαρακτηριστικά για τον τεμαχισμό και την κατασκευαστική λειτουργία της μηχανής. Ανάλογα με τις γνώσεις του χειριστή, το πρόγραμμα παρουσιάζει τις ρυθμίσεις που μπορούν να τροποποιηθούν. Τα βασικά χαρακτηριστικά είναι το πάχος στρώματος, η πυκνότητα πλήρωσης εντός του τεμαχίου και η δημιουργία ή όχι υποστηρικτικής δομής.

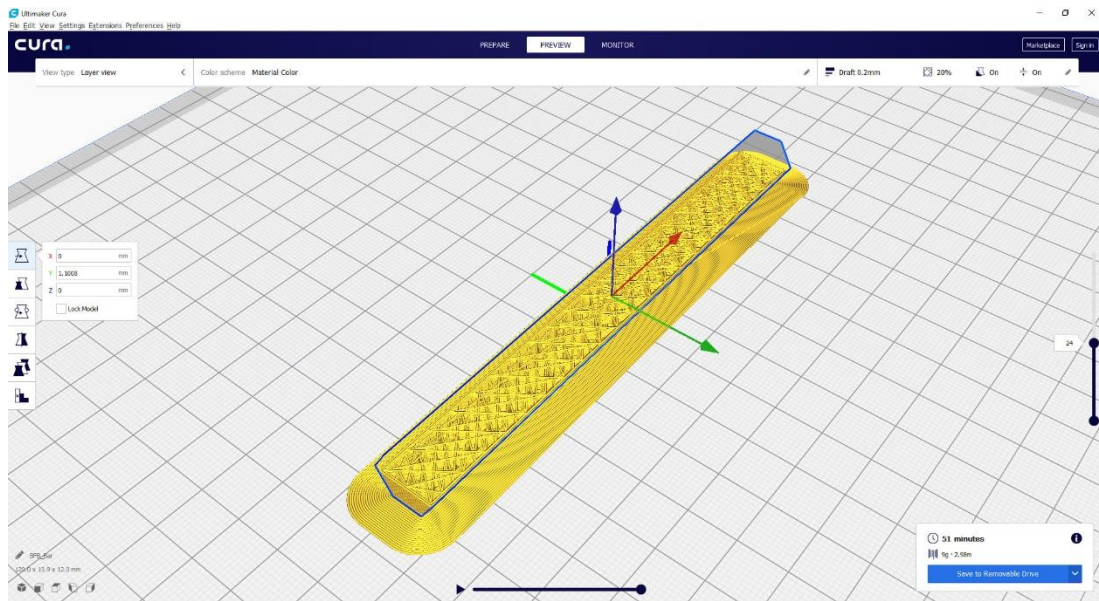


Εικόνα 61: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό Ultimaker Cura 3

Οι επιπλέον ρυθμίσεις που παρέχει το λογισμικό είναι το πάχος των τοιχωμάτων, η επικάλυψη, ο αριθμός των στρώσεων των τοιχωμάτων μέσα από τους γίνεται η πλήρωση, το μοτίβο της πλήρωσης, η θερμοκρασία του χώρου κατασκευής και η θερμοκρασία στο ακροφύσιο, η ταχύτητα ανάλογα με την κάθε κατασκευαστική διαδικασία, η λειτουργία και οι στροφές του ανεμιστήρα, το μοτίβο των στηριγμάτων και η κρίσιμη γωνία δημιουργίας υποστηρικτικής δομής κ.α. Αφού τροποποιηθούν οι ρυθμίσεις βάσει των απαιτήσεων ακολουθεί ο τεμαχισμός.

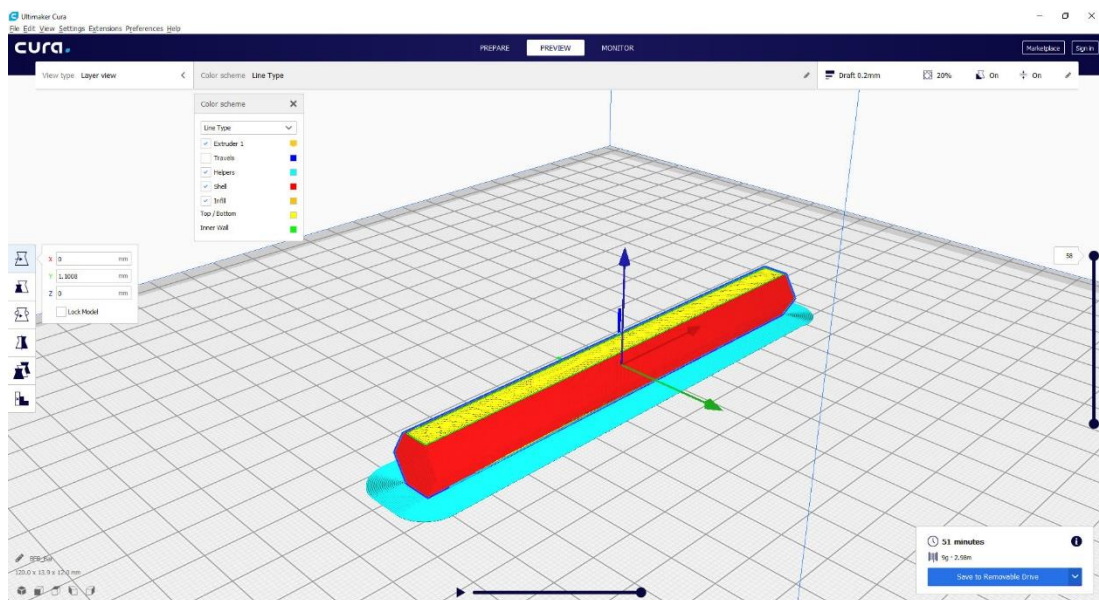


Εικόνα 62: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό Ultimaker Cura 4



Εικόνα 63: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό Ultimaker Cura 5

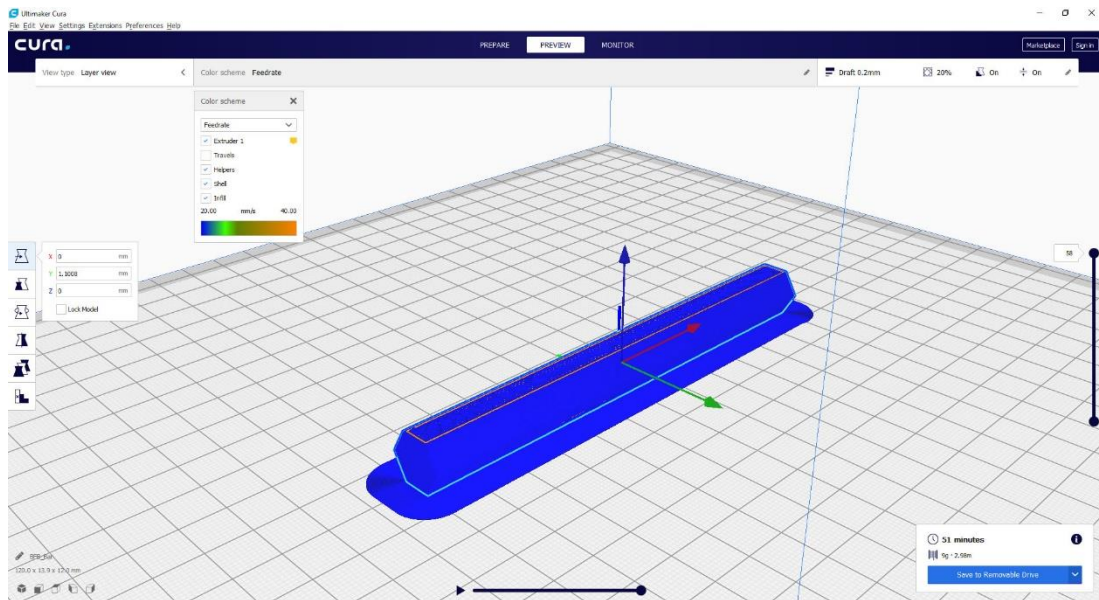
Μετά το τέλος του τεμαχισμού παρουσιάζεται από το πρόγραμμα ο εκτιμώμενος χρόνος κατασκευής και το απαιτούμενο υλικό. Ακόμα υπάρχει η δυνατότητα να της παρουσιάσης του τεμαχισμένου μοντέλου.



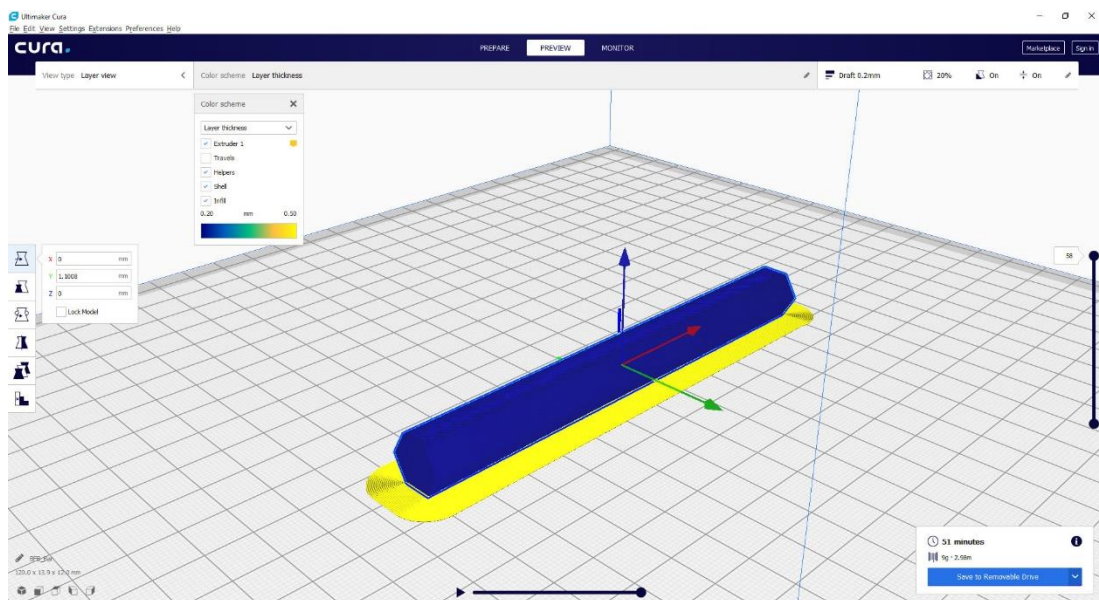
Εικόνα 64: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό Ultimaker Cura 6

Ο χειριστής μπορεί να ελέγξει τη δημιουργία της κάθε στρώσης και την κίνηση του εργαλείου. Επίσης εμφανίζονται με διάφορα χρώματα πάνω στο αντικείμενο, το

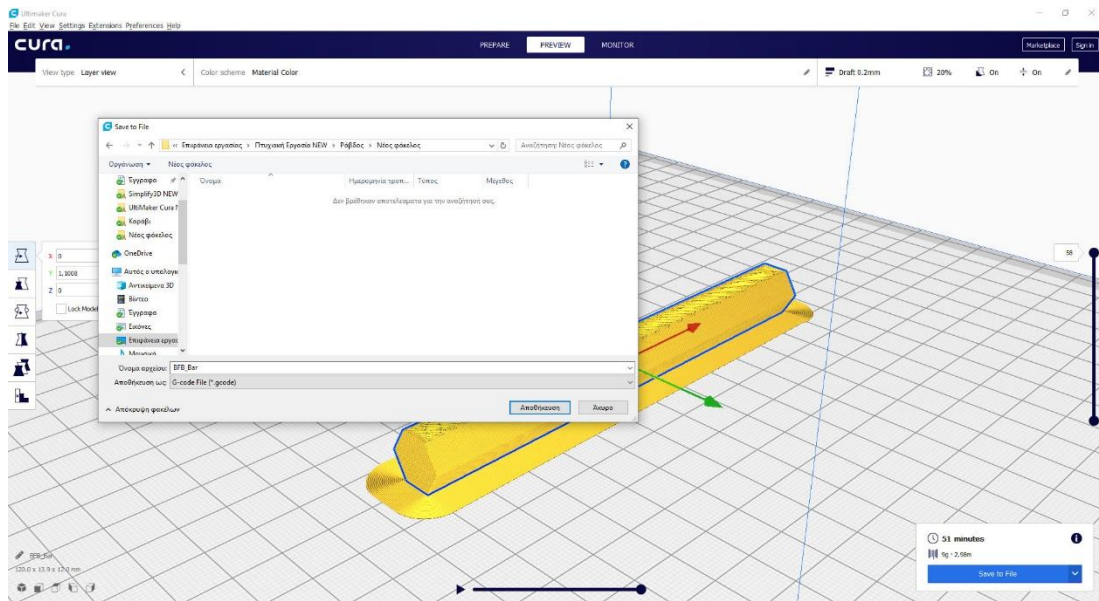
υλικό κατασκευής, το πάχος του κάθε στρώματος, οι διαφορετικές διαδικασίες κατασκευής που ακολουθούνται και ο ρυθμός εναπόθεσης υλικού.



Εικόνα 65: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό Ultimaker Cura 7



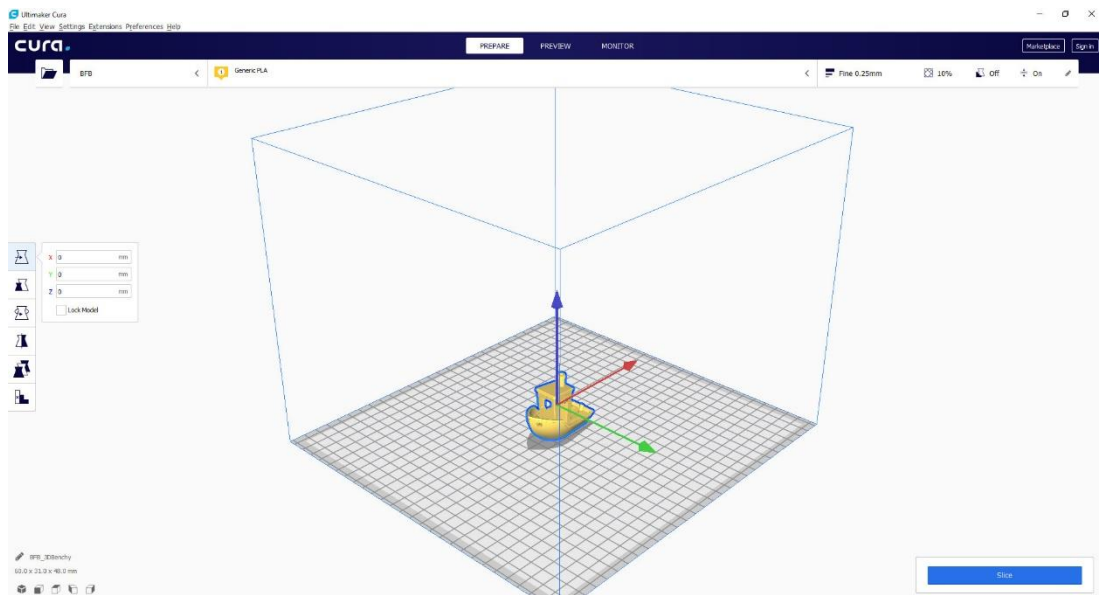
Εικόνα 66: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό Ultimaker Cura 8



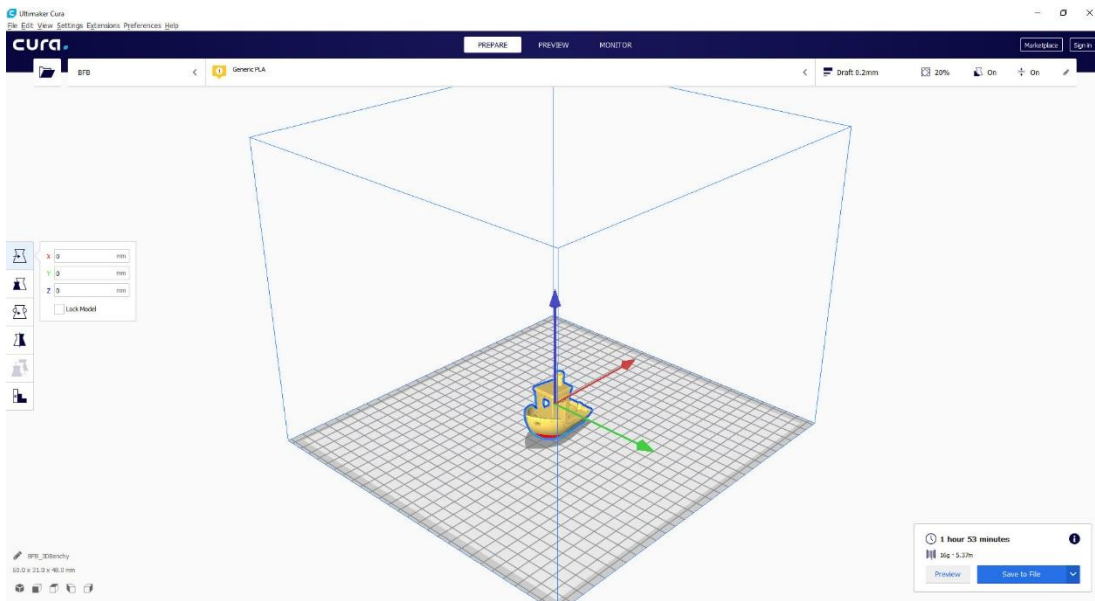
Εικόνα 67: Προετοιμασία ράβδου με λογισμικό Ultimaker Cura 9

Τέλος η εξαγωγή του τελικού αρχείου είναι της μορφής .gcode. Αυτή η μορφή αρχείου δεν αναγνωρίζεται από την CubePro Duo.

Η ίδια διαδικασία θα ακολουθηθεί και για το άλλο μοντέλο.

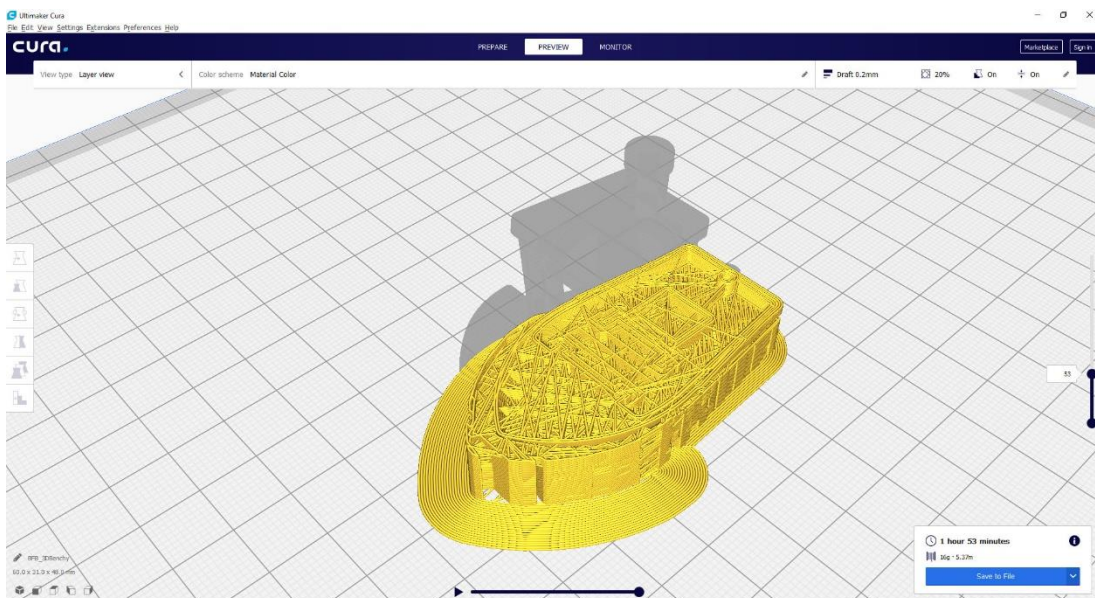


Εικόνα 68: Προετοιμασία καρβιού με λογισμικό Ultimaker Cura 1



Εικόνα 69: Προετοιμασία καραβιού με λογισμικό Ultimaker Cura 2

Έπειτα από τον τεμαχισμό του πρότυπου μοντέλου το λογισμικό υπολόγισε ότι η κατασκευαστική διαδικασία θα διαρκέσει μία ώρα και πενήντα τρία λεπτά και απαιτούνται 5,37 μέτρα υλικό.



Εικόνα 70: Προετοιμασία καραβιού με λογισμικό Ultimaker Cura 3

Μετά το τέλος της διαδικασίας το αρχείο που εξάγεται είναι της μορφής .gcode και δεν αναγνωρίζεται από την μηχανή προσθετικής κατασκευής.

Στο προηγούμενο λογισμικό χρησιμοποιήθηκε ένας κωδικοποιητής για την μετατροπή των αρχείων .bfb σε .cubepro. Ακριβώς η ίδια μέθοδο θα ακολουθηθεί και για τα αρχεία που δημιουργήθηκαν από το λογισμικό Ultimaker Cura. Η μετατροπή από αρχεία .gcode σε .cubepro είναι άμεση. Όμως η μηχανή προσθετικής κατασκευής δεν αναγνωρίζει και πάλι αυτά τα αρχεία και δεν μπορεί να ξεκινήσει η κατασκευαστική διαδικασία. Επιστρέφοντας πίσω στο λογισμικό επεξεργαζόμαστε τον G-code που μας παρείχε κατά την εκκίνηση το πρόγραμμα όταν προσαρμόσαμε τις ρυθμίσεις στην δική μας μηχανή προσθετικής κατασκευής. Εκεί θα πρέπει να συμπληρωθούν κάποιες εντολές στην γλώσσα προγραμματισμού ώστε το τελικό αρχείο .gcode να δημιουργείται αποκλειστικά για την CubePro Duo. Ο G-code που συμπληρώθηκε για την αρχή και το τέλος του αρχείου εντολών παρατίθεται αυτούσιος παρακάτω:

G-code αρχής

```
^Firmware:V1.10
^Minfirmware:V1.00
^DRM:000000000000
^PrinterModel:CUBEPRO
^MaterialCodeE1:-1
^MaterialCodeE2:214
^MaterialCodeE3:-1
^MaterialLengthE1: 0.000
^MaterialLengthE2: 1
^MaterialLengthE3: 0.000
^ModelHeight: 20.000
^LayerCount: 100
^LayerHeight:0.2
^Supports:-1
^Raft:-1
^Sidewalks:-1
^Density:Strong
^Pattern:Diamond
^Version:891
^Time:103
M404 S40
M227 P250 S250 G300 F700
M228 P0 S250
M231 P0 S0
M232 P2500 S2500
M233 P1850
M106 P100
G4 P0
M601 P2 S30 F5
M228 P0 S1
M227 P1 S1 G1000 F1000
```


M240 S1400
M204 S230 P1
G1 X118.000 Y136.000 Z5.2000 F9000.0
G1 X118.000 Y161.000 Z5.2000 F9000.0
G1 X118.000 Y157.000 Z5.2000 F9000.0
M104 S0
M204 S190
M552 P1500 S50
G1 X118.000 Y136.000 Z5.2000 F9000.0
M601 P2 S30 F5
M404 S40 P1
M107
^InitComplete
#Vector T2
M228 P0 S250
M227 P250 S250 G300 F700
M227 P250 S250 G300 F700
M228 P0 S250
M103
G1 X0.000 Y0.000 Z0.394 F9000
G1 X15.689 Y-1.894 Z0.394 F4500
M201
M227 P1 S1 G1000 F1000
M228 P0 S1
M108 S22.1

G-code τέλους

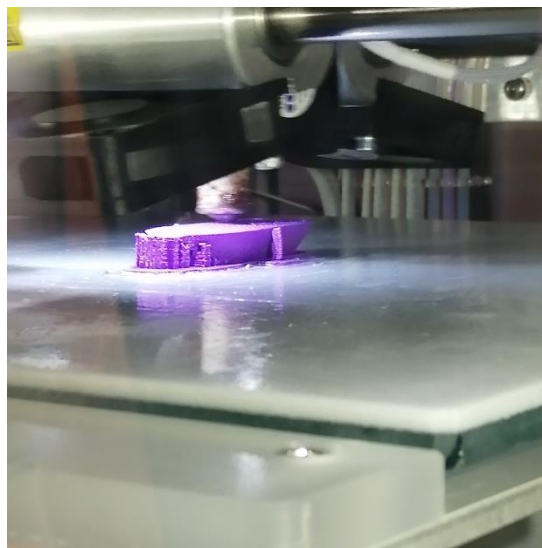
M227 P250 S250 G300 F700
M228 P0 S250
M103
M562 P400 S500
G4 P1
M104 S0
M204 S0
M107

Έπειτα ακολουθείται από την αρχή η ίδια διαδικασία και για τα δυο μοντέλα μας. Παράγονται οπότε δυο αρχεία .gcode από το λογισμικό και μετά αυτά μετατρέπονται με τη βοήθεια του κωδικοποιητή με κρυπτογράφηση Blowfish ECB σε αρχεία .cubepro. Αυτά τα αρχεία αναγνωρίζονται κανονικά από την CubePro Duo.

Τα αρχεία είναι έτοιμα για να εισαχθούν στην μηχανή προσθετικής κατασκευής και να ξεκινήσει η κατασκευαστική διαδικασία.

4.3.6 Κατασκευαστική διαδικασία

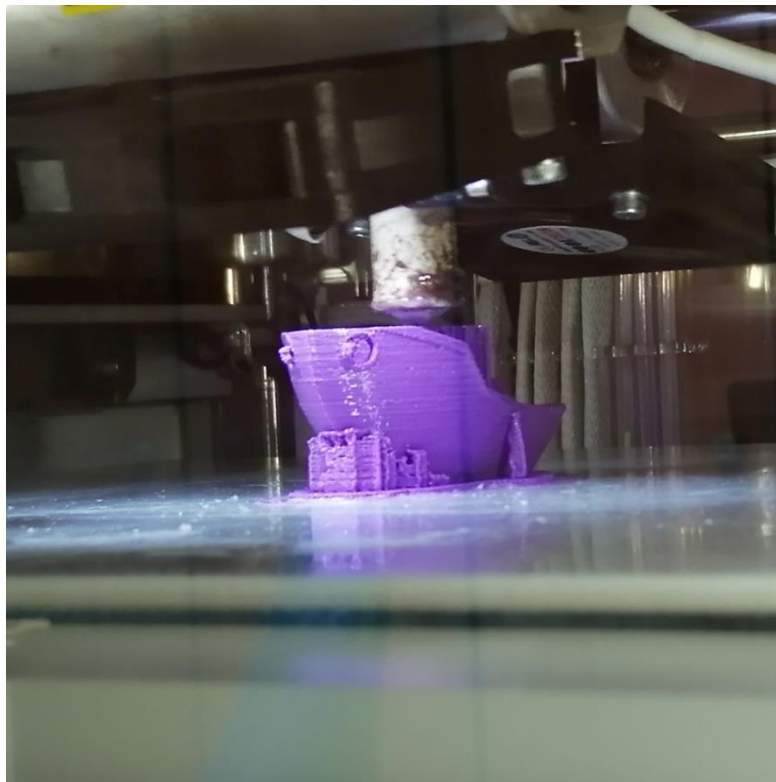
Πρώτα κατασκευάστηκε το καράβι που προετοιμάστηκε με το λογισμικό Simplify 3D. Για την έναρξη της κατασκευής, τοποθετήθηκε το στικάκι μνήμης USB στην μηχανή CubePro Duo και επιλέχθηκε η εντολή "Print". Η μηχανή αναγνώρισε το αρχείο .cubepro, το όνομα του, το υλικό και τον απαιτούμενο χρόνο κατασκευής αλλά δεν παρουσίασε στη οθόνη το μοντέλο του αντικειμένου που θα κατασκευαζόταν. Έπειτα επιλέχθηκε πάλι η εντολή "Print" και προτού ξεκινήσει η παραγωγή η μηχανή έδωσε την εντολή να καλύψουμε με κόλλα το κομμάτι της επιφάνειας της πλάκας κατασκευής πάνω στο οποίο θα γίνει η κατασκευή. Μετά από την τοποθέτηση της κόλλας πατήσαμε το σημάδι (✓). Ξεκινώντας, η μηχανή θερμαίνει τον θάλαμο και την κεφαλή εκτύπωσης μέχρι να φτάσουν στην απαιτούμενη θερμοκρασία. Εδώ θα είναι σημαντικό να θυμίσουμε ότι με το λογισμικό Simplify 3D ο χειριστής μπορεί να ρυθμίσει και τις δύο θερμοκρασίες, σε αντίθεση με το λογισμικό CubePro. Όταν επιτευχθούν οι απαιτούμενες θερμοκρασίες, η μηχανή εναποθέτει μικρή ποσότητα υλικού στην άκρη της πλάκας κατασκευής, καθαρίζει την κεφαλή εκτύπωσης και ξεκινάει την δημιουργία του αντικειμένου.



Εικόνα 71: Κατασκευή πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 1 Simplify 3D

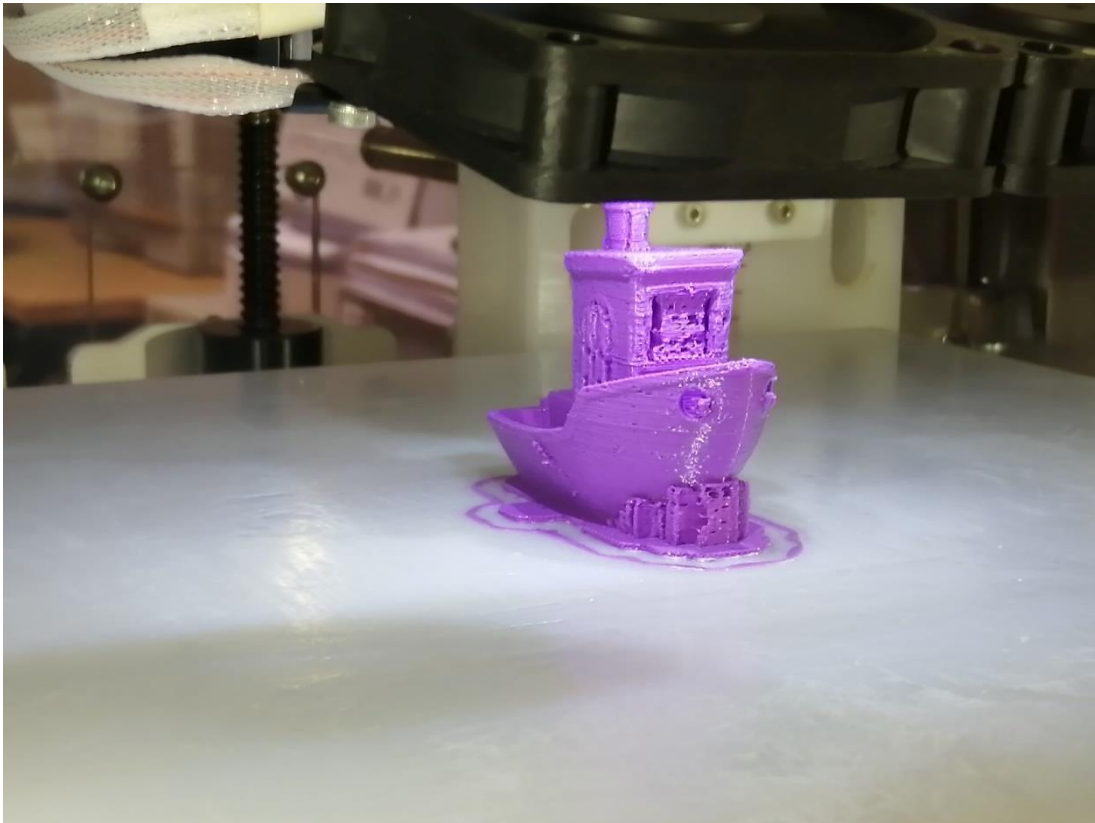
Κατά τα πρώτα βήματα κατασκευάζεται η βάση πάνω στην οποία θα παραχθεί το αντικείμενο. Το λογισμικό Simplify 3D παρέχει στο χειριστή τη δυνατότητα να επιλέξει εάν θέλει το αντικείμενο να κατασκευαστεί πάνω σε βάση και αν ναι τον τύπο της βάσης. Η επιλογή που είχε γίνει νωρίτερα ήταν να κατασκευαστεί βάση και ο τύπος της ονομάζεται σχεδία (Raft). Ο τύπος αυτός της

βάσης βοηθάει στην προσκόλληση του κομματιού στη πλάκα κατασκευής, στην αποφυγή στρέβλωσης και την σταθεροποίηση του αντικειμένου. Επίσης το αντικείμενο μετά την κατασκευή απομακρύνεται πάνω από τη βάση εύκολα και δεν καταστρέφεται η κατώτερη επιφάνεια του.



Εικόνα 72: Κατασκευή πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 2 Simplify 3D

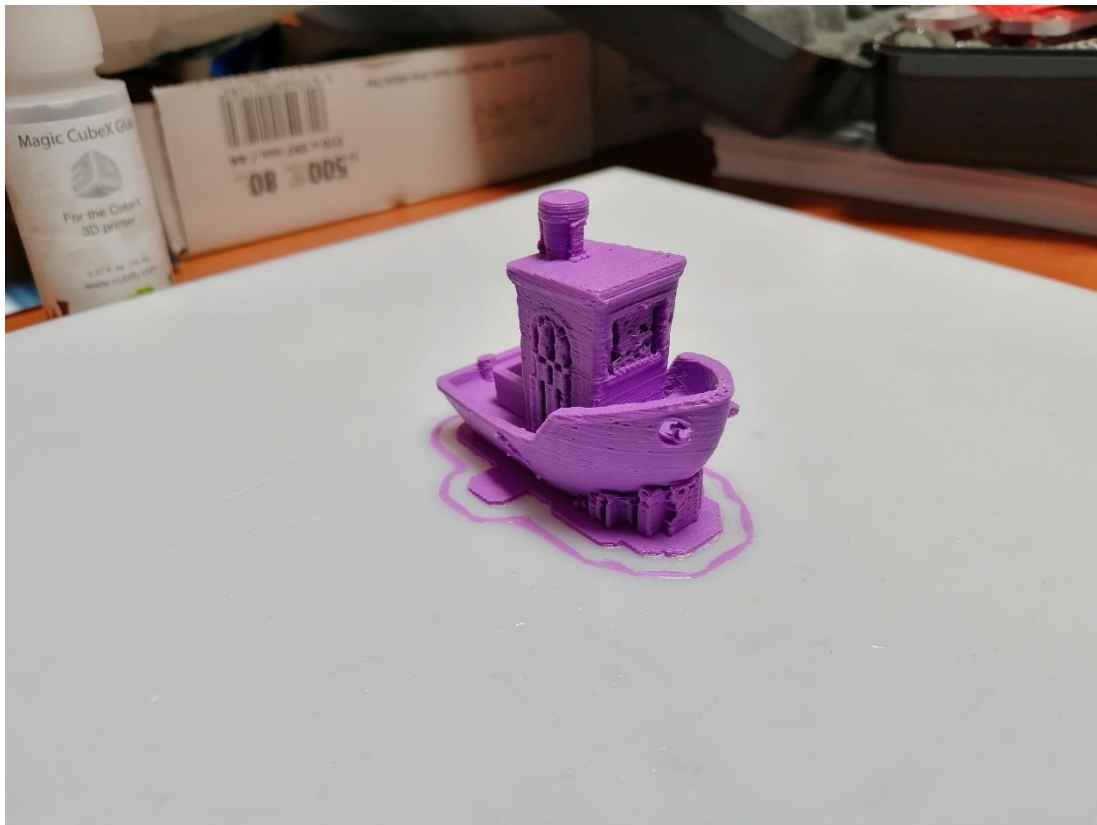
Μετά από την κατασκευή της βάσης, ξεκινάει η δημιουργία του αντικειμένου και των στηριγμάτων του, όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα. Κατά την διάρκεια της κατασκευής μπορεί γίνει κατανοητή η κίνηση της κεφαλής εκτύπωσης και ιδιαίτερα κατά την πλήρωση του εσωτερικού του αντικειμένου, που μπορεί να παρακολουθηθεί το μοτίβο που έχει επιλεχθεί.



Εικόνα 73: Κατασκευή πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 3 Simplify 3D

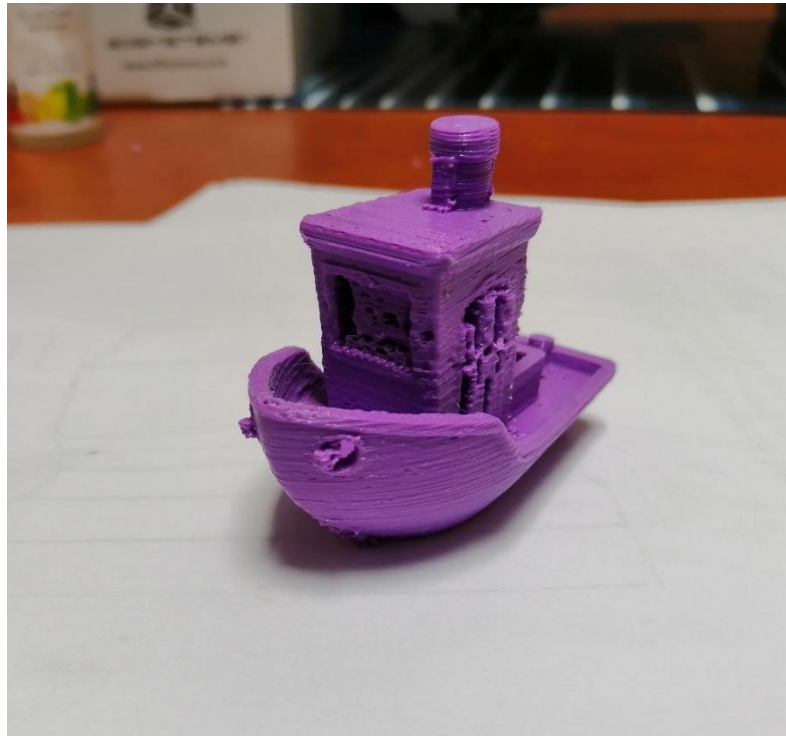
Λίγες στρώσεις πριν τελειώσει η κατασκευή του αντικειμένου γίνεται αντιληπτό ότι ο χρόνος παραγωγής που απομένει βάση της μηχανής έχει ήδη μηδενιστεί. Το αντικείμενο έχει πάρει την τελική του μορφή και μπορούν να διακριθούν οι περισσότερες επιφάνειες του.

Η κατασκευαστική διαδικασία τελείωσε σε δύο ώρες και οκτώ λεπτά όπως εμφανίζεται στην οθόνη της CubePro Duo, ενώ ο εκτιμώμενος χρόνος κατασκευής ήταν μία ώρα και σαράντα δύο λεπτά. Για να ολοκληρωθεί η διαδικασία πρέπει να επιλεγεί το σημάδι (✓) στην οθόνη της μηχανής. Μετά την επιλογή ο θάλαμος σταματάει να θερμαίνεται και η θερμοκρασία μειώνεται μέχρι την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αφαιρείται από τον θάλαμο η πλάκα κατασκευής με το αντικείμενο.



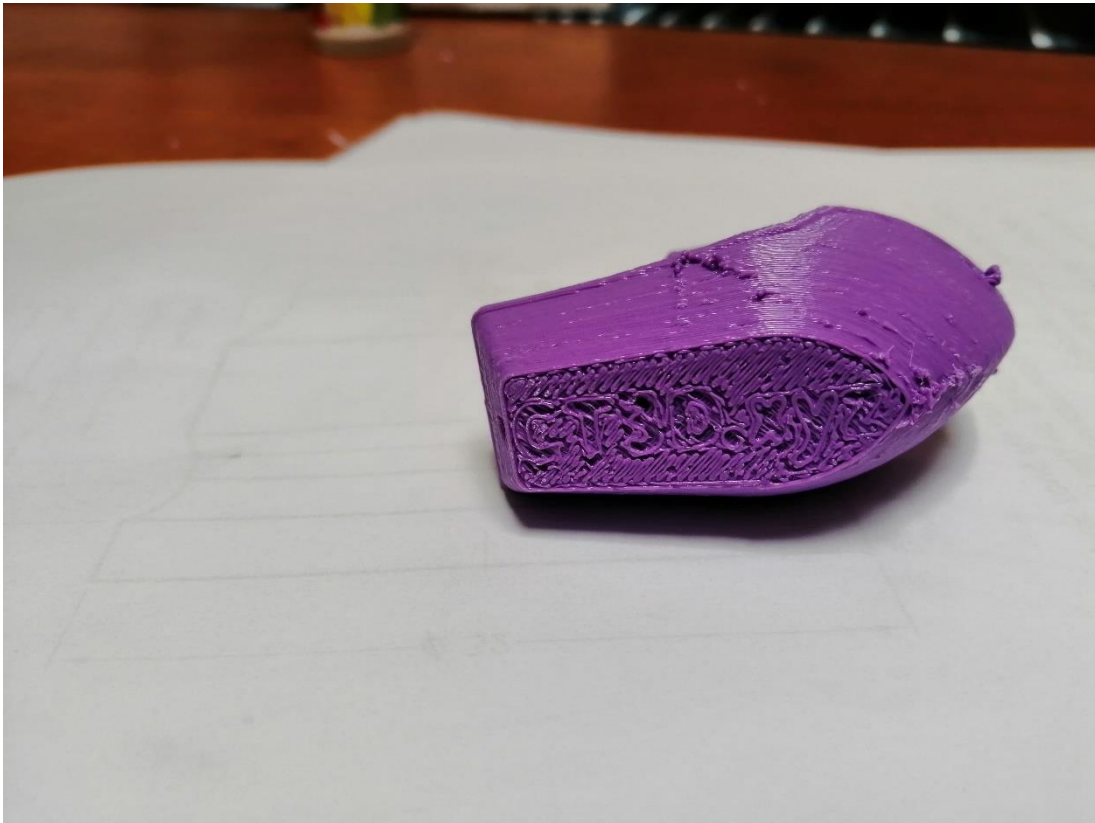
Εικόνα 74: Απομάκρυνση πρότυπου μοντέλου (καραβιού) από την πλάκα κατασκευής 1 Simplify 3D

Το προϊόν είναι κολλημένο πάνω στην πλάκα και για την απομάκρυνση του απαιτείται η χρήση σπάτουλας. Αφού αφαιρεθεί το κομμάτι η πλάκα πρέπει να πλυθεί με νερό και να σκουπιστεί για να είναι έτοιμη προς χρήση στην επόμενη κατασκευαστική διεργασία.



Εικόνα 75: Απομάκρυνση στηριγμάτων από πρότυπο μοντέλο (καράβι) 1 Simplify 3D

Η απομάκρυνση της βάσης και της υποστηρικτικής δομής που δημιουργήθηκε πάνω σε αυτήν για να στηρίξει το αντικείμενο ήταν πολύ εύκολη και γρήγορη, παρόλο που ήταν κατασκευασμένες από το ίδιο υλικό. Η εργασία αυτή έγινε χειρωνακτικά.



Εικόνα 76: Απομάκρυνση στηριγμάτων από πρότυπο μοντέλο (καράβι) 2 Simplify 3D

Ακολούθησε η απομάκρυνση των στηριγμάτων που δημιουργήθηκαν γύρω από την καμινάδα του καραβιού. Η εργασία ήταν επίσης εύκολη και γρήγορη αν και χρειάστηκε ειδικό εργαλείο (μυτοσίμπιδο). Μετά την απομάκρυνση των δύο στηριγμάτων παρατηρήθηκε ότι απέμειναν μικρά εξογκώματα στην περιοχή. Τελευταία έμειναν τα στηρίγματα που δημιουργήθηκαν εντός της καμπίνας. Η υποστηρικτική δομή είχε τη μορφή παράλληλων ευθειών και ήταν κατασκευασμένες σε επαφή με το κύριο αντικείμενο. Η απομάκρυνση τους ήταν πολύ δύσκολη, χρειάστηκαν ειδικά εργαλεία, όπως μυτοσίμπιδο και κοφτάκι και όλη η διαδικασία διήρκεσε γύρω στα τριάντα λεπτά. Εν τέλει τα στηρίγματα απομακρύνθηκαν και δεν έμεινε κάποιο σημάδι στο πάτωμα της καμπίνας, όμως υπάρχει ακόμα υλικό από στήριγμα πάνω στο τιμόνι που δεν μπορεί να απομακρυνθεί χωρίς την καταστροφή του.



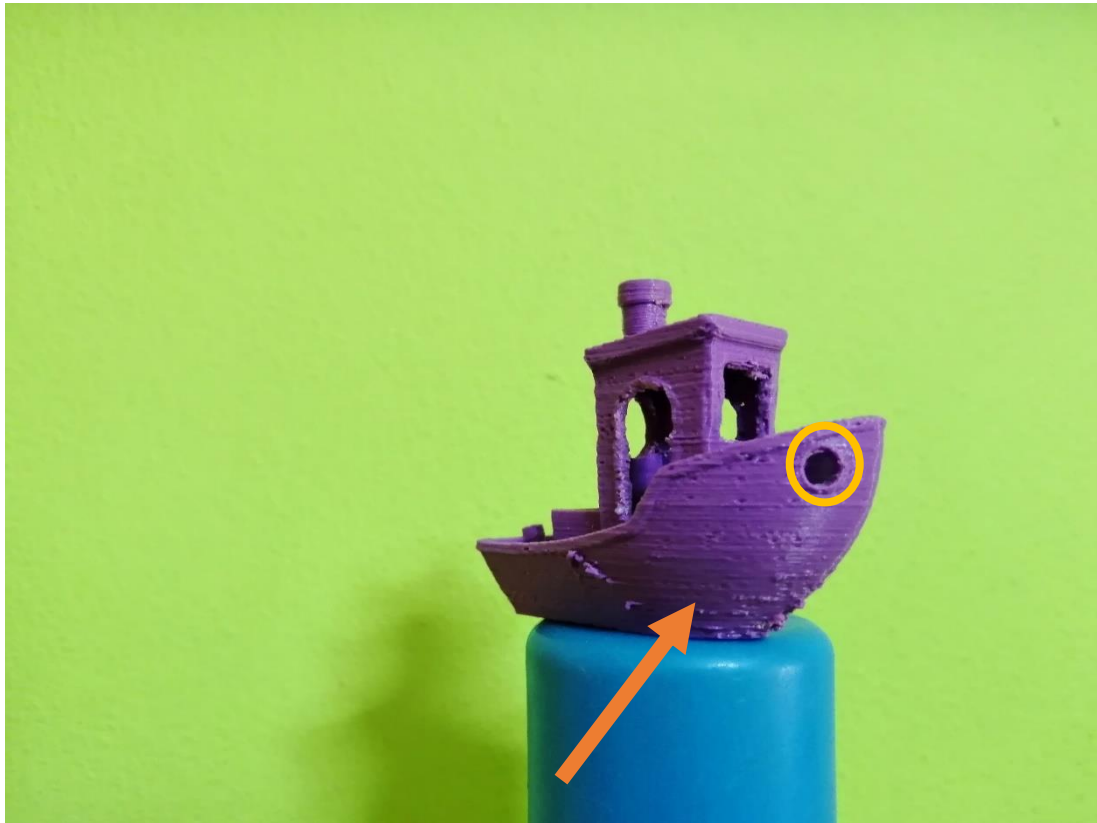
Εικόνα 77: Μελέτη πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 1 Simplify 3D

Το μοντέλο απέκτησε την τελική του μορφή. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε διαστασιολογικός έλεγχος για να αποτυπωθούν οι διαφορές με το 3D πρότυπο μοντέλο.

Πίνακας 2: Διαστασιολογικός έλεγχος διαφορών καραβιού
(πρότυπο μοντέλο - κατασκευασμένο από Simplify 3D)

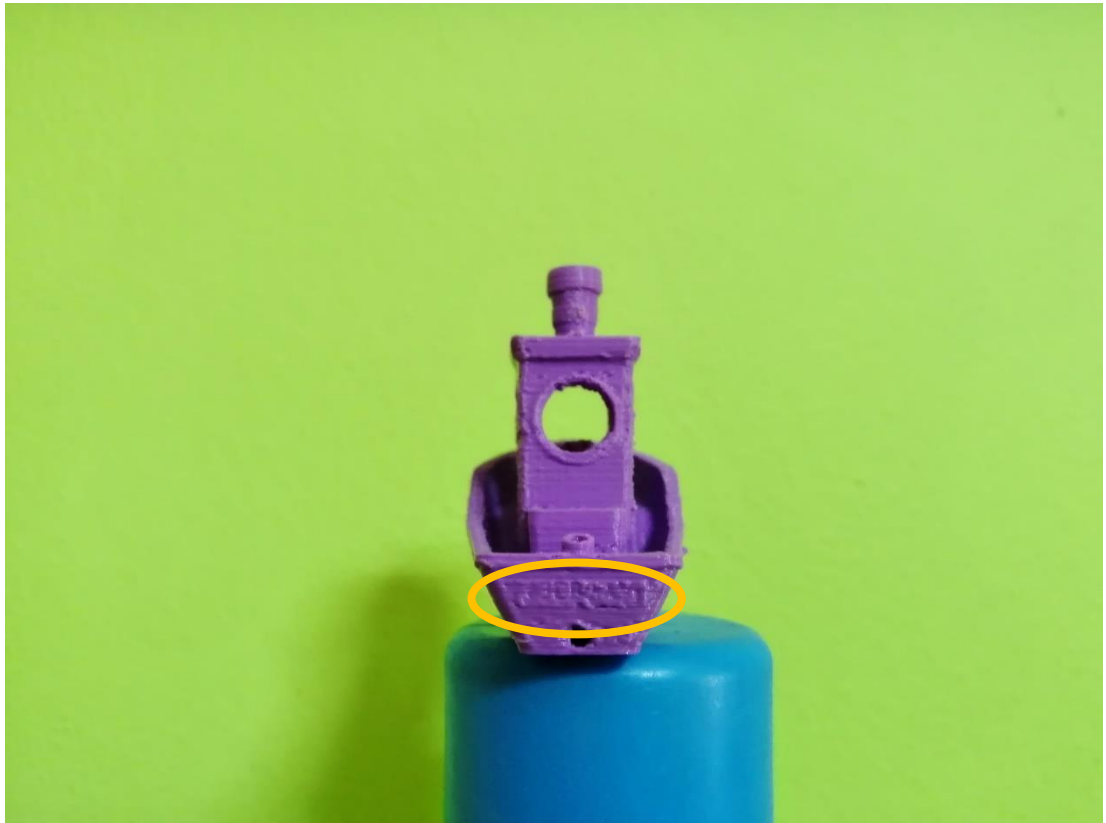
	Πρότυπο 3D μοντέλο	Κατασκευασμένο προϊόν
Ύψος αντικειμένου	48,00 mm	48,40 mm
Μήκος αντικειμένου	60,00 mm	60,00 mm
Πλάτος αντικειμένου	31,00 mm	31,00 mm
Μήκος οροφής	23,00 mm	23,00 mm
Εξωτερική διάμετρος Καμινάδας	7,00mm	7,80 mm
Εσωτερική διάμετρος τρύπας καμινάδας	3,00 mm	Δεν υπάρχει
Ύψος από βάση μέχρι το κουτί	15,50 mm	15,70 mm
Εσωτερικές διαστάσεις κουτιού	8,00 mm x 7,00 mm	8,00 mm x 7,00 mm
Εξωτερικές διαστάσεις κουτιού	12,00 mm x 10,81 mm	12,00 mm 10,90 mm
Διαστάσεις μπροστινού παραθύρου	10,50 mm x 9,50 mm	10,50 mm x 9,50 mm
Διάμετρος πίσω παραθύρου	9,00 mm	9,00 mm

Μετά τον διαστασιολογικό έλεγχο ακολουθεί ο οπτικός έλεγχος. Η δεξιά μεγάλη επιφάνεια του κήτους έχει κατασκευαστεί ομοιόμορφα, υπάρχουν βέβαια κάποια κενά ασυνέχειας όμως η επιφάνεια είναι αρκετά καλή μέχρι να συναντήσει μπροστά της άλλη επιφάνεια του κήτους. Χαμηλά στις πρώτες στρώσης της πλήρης υπάρχουν εξογκώματα και φουσκάλες.



Εικόνα 78: Μελέτη πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 2 Simplify 3D

Στην αριστερή επιφάνεια του κήτους υπάρχουν πάλι εξογκώματα του υλικού και κενά ασυνέχειας όμως κατά τα άλλα και αυτή η επιφάνεια είναι ομοιόμορφη. Οι δύο οπές που υπάρχουν στο κήτος είναι στρογγυλές και δεν έχουν παραμορφωθεί. Στο πίσω μέρος του κήτους που στο 3D μοντέλο υπάρχει επιγραφή, υπάρχει η επιγραφή αλλά δεν φαίνονται καλά τα γράμματα. Η κουπαστή πάνω από το κύτος έχει κατασκευαστεί ομαλά, μόνο στο ανώτερο ύψος της στην πλώρη παρατηρείται κενό.



Εικόνα 79: Μελέτη πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 3 Simplify 3D

Το πάτωμα του караβιού έχει κατασκευαστεί πολύ ομαλό και λείο ακόμα και στο σημείο που υπήρχαν τα στηρίγματα εντός της καμπίνας. Υπάρχουν βέβαια μικρά κενά χωρίς υλικό. Το κουτί πίσω από την καμπίνα είναι εντελώς κλειστό και δεν υπάρχει κενό μεταξύ των τοίχων του. Επίσης η κάθετη οπή στην πρύμνη έχει δημιουργηθεί κανονικά χωρίς κανένα ψεγάδι.



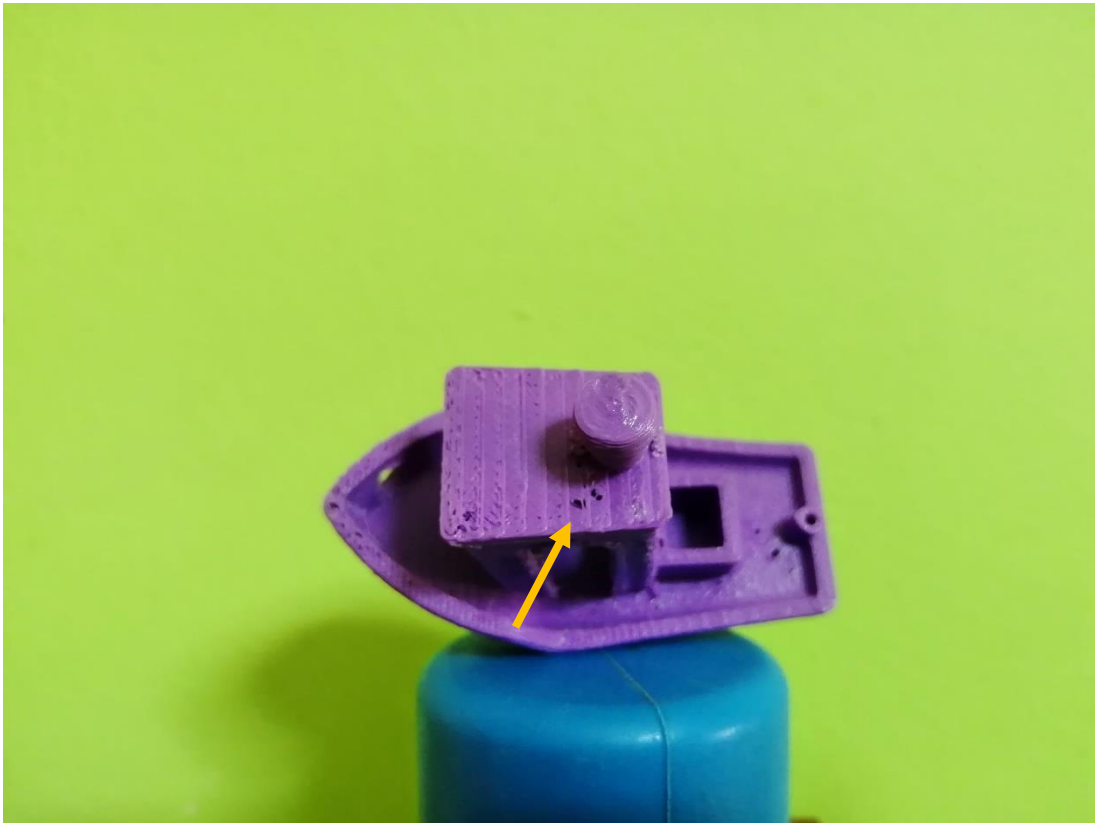
Εικόνα 80: Μελέτη πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 4 Simplify 3D

Οι εξωτερικοί τοίχοι της καμπίνας έχουν δημιουργηθεί ομαλά, παρουσιάζουν κενά ασυνέχειας και εξογκώματα στα σημεία που υπήρχε επαφή με τα στηρίγματα. Σαν αποτέλεσμα όμως είναι αρκετά καλό γιατί δεν υπάρχει πουθενά αστοχία. Μειονέκτημα είναι μόνο οι επάνω επιφάνειες των κοιλοτήτων των πορτών και των παραθύρων. Εντός της καμπίνας το τιμόνι είναι άμεσα συνδεδεμένο με το στηρίγμα του από την κάτω πλευρά και η προσπάθεια απομάκρυνση του στηρίγματος μπορεί να καταστρέψει το τιμόνι. Η περιοχή του τιμονιού είναι το μόνο μέρος που έχει αστοχήσει η κατασκευή του κομματιού.



Εικόνα 81: Μελέτη πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 5 Simplify 3D

Η οροφή της καμπίνας είναι ομοιόμορφα κατασκευασμένη και παρουσιάζει μόνο δυο μικρά κενά. Δυστυχώς έχουν απομείνει πάνω κάποια σημάδια από τα στηρίγματα της καμινάδας. Η καμινάδα έχει κατασκευαστεί σωστά αρχικά με μικρότερη εξωτερική διάμετρο και στη συνέχεια με μεγαλύτερη. Στο κέντρο της καμινάδας θα έπρεπε όμως να υπάρχει οπή κάτι που δεν συμβαίνει. Όλη η καμινάδα είναι κλειστή.



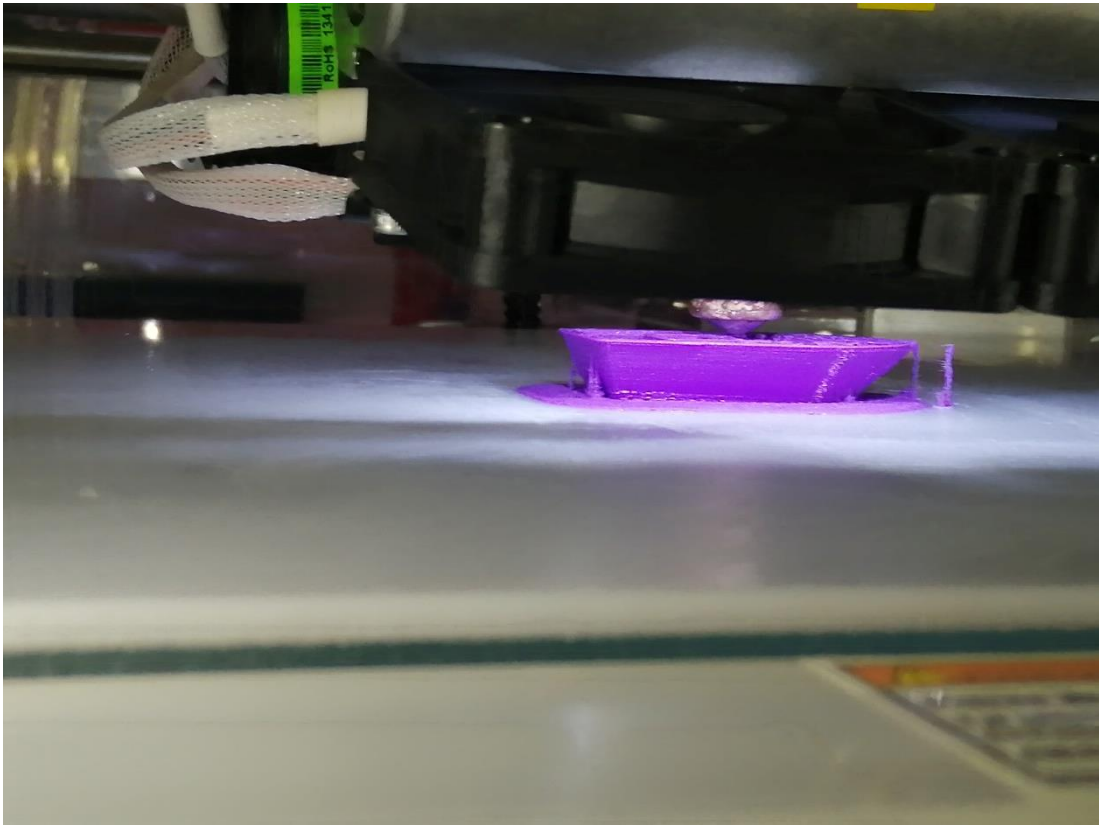
Εικόνα 82: Μελέτη πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 6 Simplify 3D

Για να ολοκληρωθεί ο οπτικός έλεγχος μένει μόνο η βάση του πλοίου. Η βάση είναι λεία και ομαλή διαθέτει όμως επιφανειακά κενά και υπάρχει επιγραφή που μπορεί εύκολα να αναγνωσθεί.



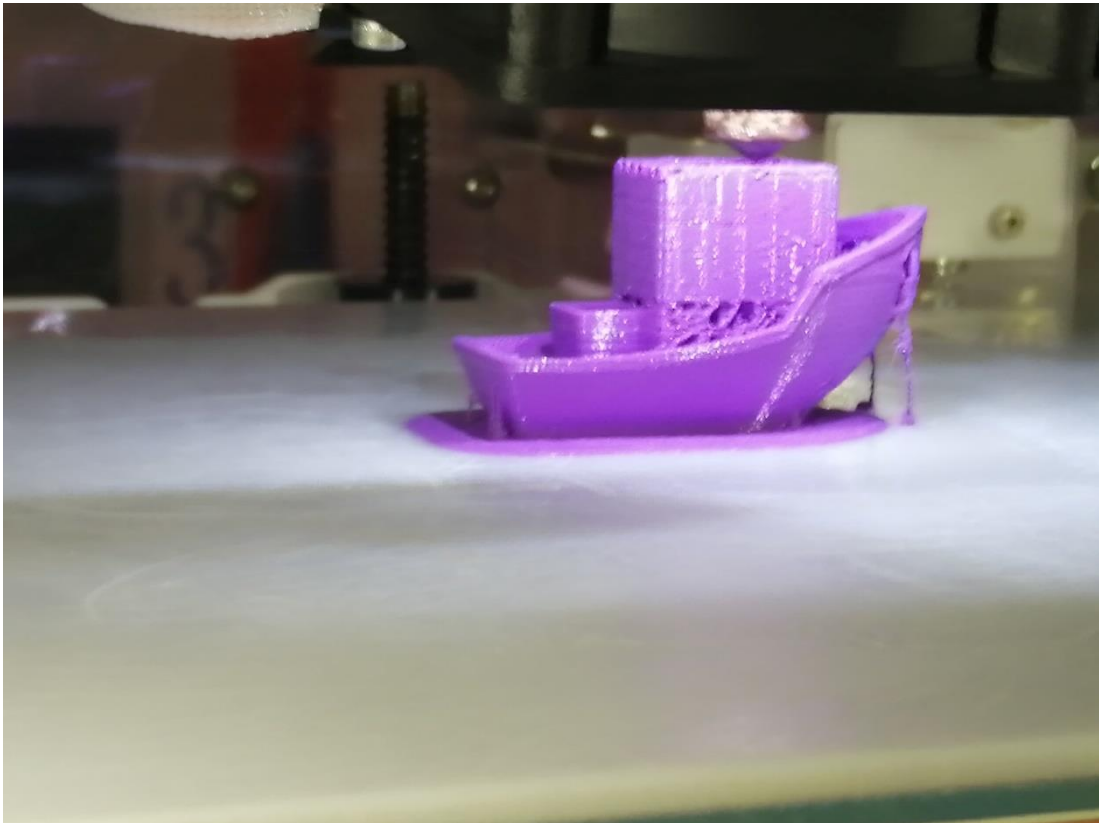
Εικόνα 83: Μελέτη πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 7 Simplify 3D

Έπειτα κατασκευάστηκε το καράβι που προετοιμάστηκε με το λογισμικό CubePro. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν ακριβώς η ίδια. Αφού τοποθετήθηκε το στικάκι μνήμης USB, η μηχανή αναγνώρισε το αρχείο .cubepro, το όνομα του, το υλικό και τον απαιτούμενο χρόνο κατασκευής και παρουσίασε στη οθόνη το μοντέλο του αντικείμενου που θα κατασκευαζόταν, σε αντίθεση με την προηγούμενη φορά. Έπειτα η μηχανή ξεκίνησε την αύξηση της θερμοκρασίας της κεφαλής εκτύπωσης και του θαλάμου, χωρίς να γνωρίζει ο χρήστης τις θερμοκρασίες αυτές. Η κατασκευή του κομματιού ξεκίνησε δημιουργώντας πάνω στη πλάκα κατασκευής το αντικείμενο και γύρω γύρω ένα πλέγμα. Αυτή η ρύθμιση είναι προεπιλεγμένη και ο χρήστης δεν μπορεί να κάνει κάτι για να την μετατρέψει. Επίσης τα στηρίγματα που δημιουργήθηκαν ήταν σημειακά και όχι γραμμικά, όπως είχε επιλεγθεί στο πρόγραμμα.



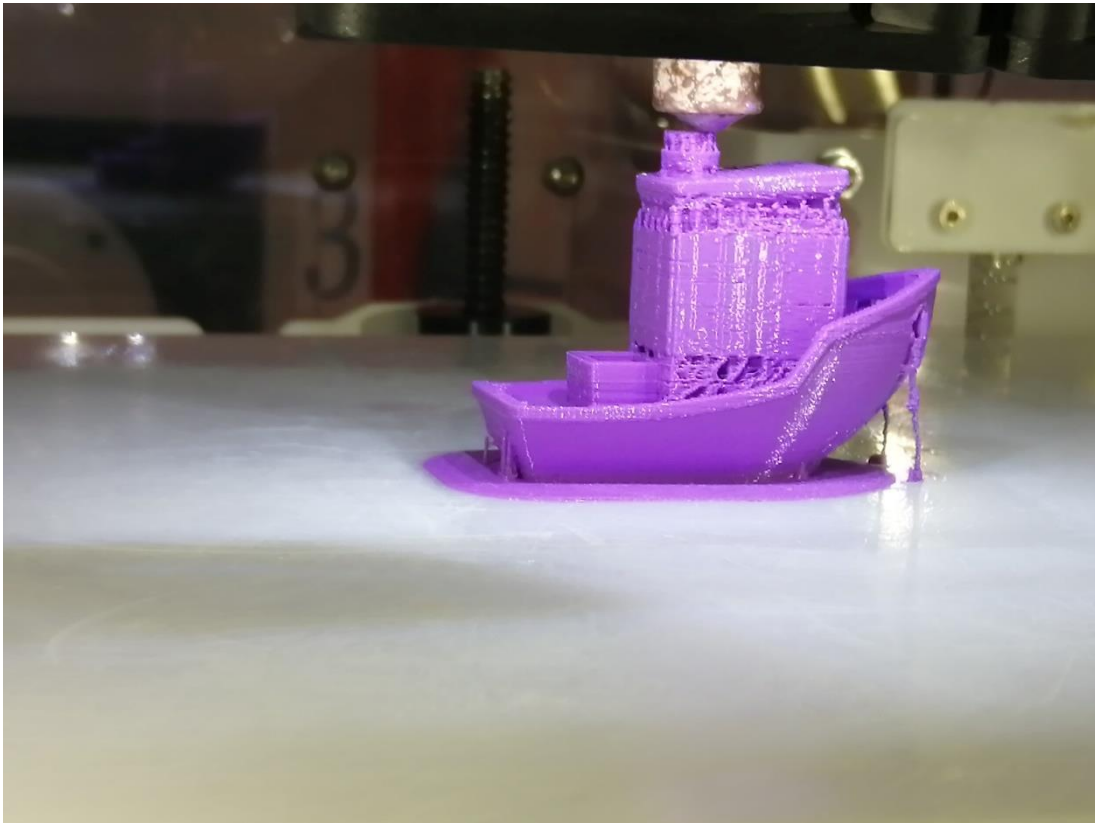
Εικόνα 84: Κατασκευή πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 1 CubePro

Από όσο γίνεται να παρακολουθήσει κάποιος κατά την ώρα της κατασκευής η δημιουργία της επιφάνειας του κήτους γίνεται ομαλά. Όταν όμως ξεκινάει η κατασκευή της καμπίνας το υλικό της υποστηρικτικής δομής με το υλικό του τεμαχίου γίνεται ένα. Δημιουργείται οπότε ένα στερεό συμπαγές ορθογώνιο στη θέση της καμπίνας.



Εικόνα 85: Κατασκευή πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 2 CubePro

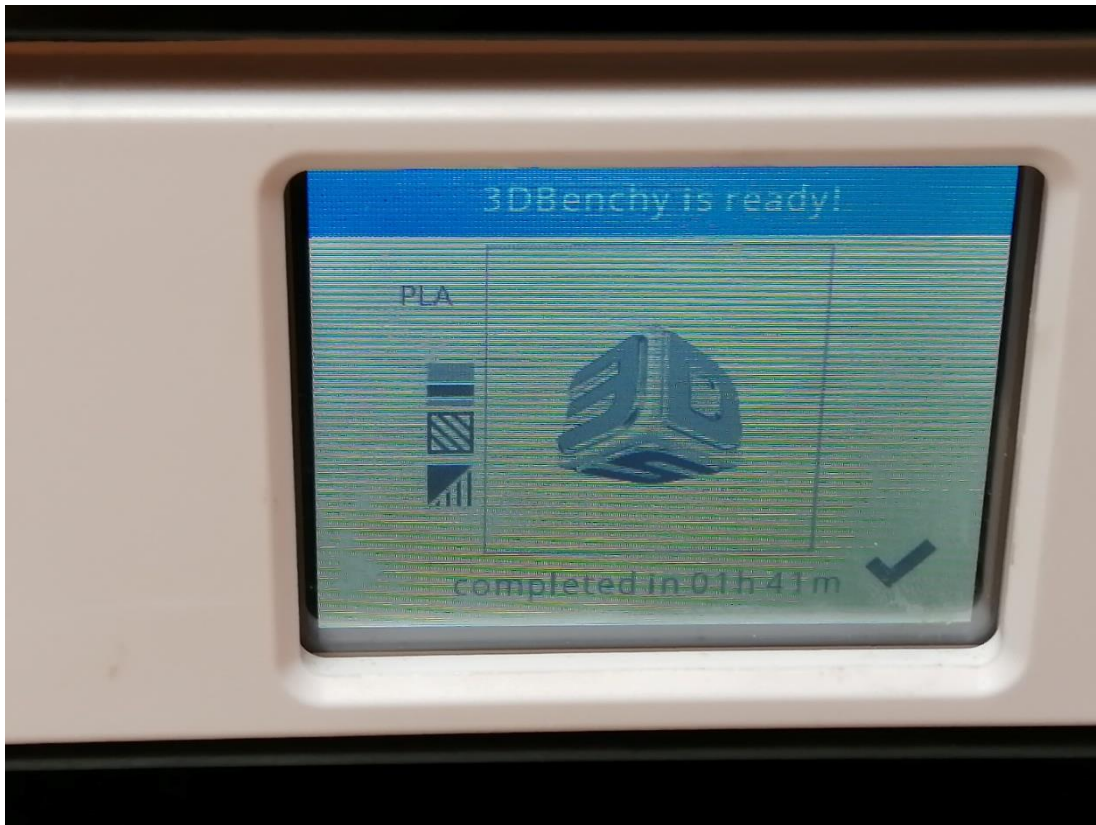
Συνεχίζοντας η κατασκευή φτάνουν στη δημιουργία της καμινάδας όπου πάλι δημιουργούνται ακανόνιστα εξογκώματα γύρω γύρω σαν δομές στήριξης, που όμως είναι συνδεδεμένα με το αντικείμενο.



Εικόνα 86: Κατασκευή πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 3 CubePro

Η κατασκευαστική διεργασία διήρκησε μία ώρα και σαράντα ένα λεπτά ενώ ο εκτιμώμενος χρόνος ήταν μία ώρα και τριάντα τρία λεπτά. Αφού η θάλαμο κατασκευής φτάσει στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, αφαιρείτε το αντικείμενο με την πλάκα κατασκευής. Για την απομάκρυνση του αντικειμένου από την πλάκα χρησιμοποιείται πάλι η σπάτουλα. Λόγω της μη δημιουργίας βάσης πρέπει να προσεχθεί πάρα πολύ η αποκόλληση για να μην καταστραφεί το κομμάτι. Μετά την απομάκρυνση του κομματιού συνέχεια έχουν τα στηρίγματα του. Η υποστηρικτική δομή της καμπίνας και της καμινάδας δεν θα επεξεργαστεί για να μην καταστραφεί όλο το αντικείμενο.

Το πλέγμα γύρω γύρω από τη βάση και τα στηρίγματα που δημιουργήθηκαν από την πλάκα κατασκευής απομακρύνθηκαν με τη βοήθεια ειδικού εργαλείου (μυτοσίμπιδο).



Εικόνα 87: Αποτέλεσμα κατασκευής πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 1 CubePro

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε διαστασιολογικός έλεγχος για να αποτυπωθούν οι διαφορές με το 3D πρότυπο μοντέλο.

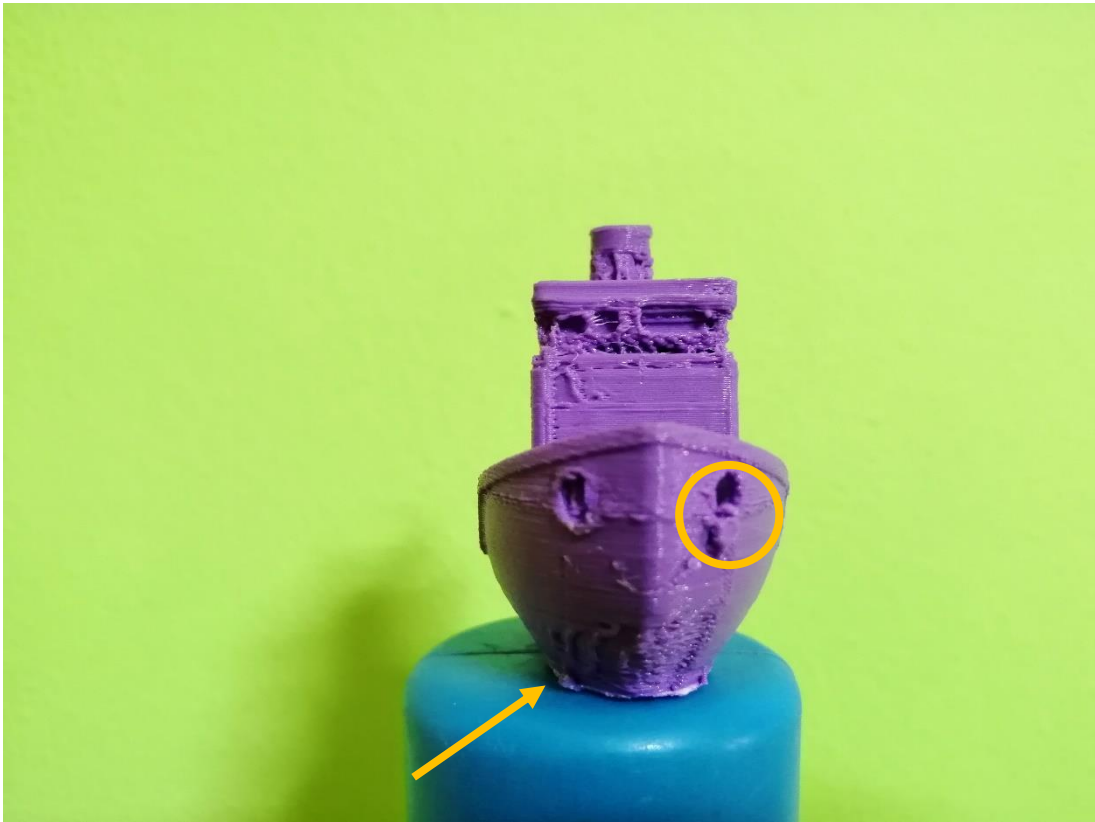
Πίνακας 3: Διαστασιολογικός έλεγχος διαφορών καραβιού
(πρότυπο μοντέλο - κατασκευασμένο από CubePro)

	Πρότυπο 3D μοντέλο	Κατασκευασμένο προϊόν
Ύψος αντικειμένου	48,00 mm	47,70 mm
Μήκος αντικειμένου	60,00 mm	59,70 mm
Πλάτος αντικειμένου	31,00 mm	31,00 mm
Μήκος οροφής	23,00 mm	22,90 mm
Εξωτερική διάμετρος Καμινάδας	7,00mm	7,10 mm
Εσωτερική διάμετρος τρύπας καμινάδας	3,00 mm	1,60 mm
Ύψος από βάση μέχρι το κουτί	15,50 mm	15,10 mm
Εσωτερικές διαστάσεις κουτιού	8,00 mm x 7,00 mm	8,00 mm x 7,15 mm
Εξωτερικές διαστάσεις κουτιού	12,00 mm x 10,81 mm	11,80 mm 8,00 mm
Διαστάσεις μπροστινού παραθύρου	10,50 mm x 9,50 mm	Δεν υπάρχει
Διάμετρος πίσω παραθύρου	9,00 mm	Δεν υπάρχει



Εικόνα 88: Μελέτη πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 1 CubePro

Μετά τον διαστασιολογικό έλεγχο ακολουθεί ο οπτικός έλεγχος. Γύρω γύρω από τη βάση του караβιού, οι στρώσεις που έρχονται σε επαφή με το πλέγμα έχουν εξογκώματα. Η δεξιά μεγάλη επιφάνεια του κήτους έχει κατασκευαστεί ομοιόμορφα και χωρίς κανένα κενό ασυνέχειας. Επίσης είναι πολύ λεία επιφάνεια. Στην πλήρη του караβιού στις περισσότερες στρώσεις υπάρχουν είτε εξογκώματα είτε βαθουλώματα, δημιουργώντας ανομοιόμορφη επιφάνεια.



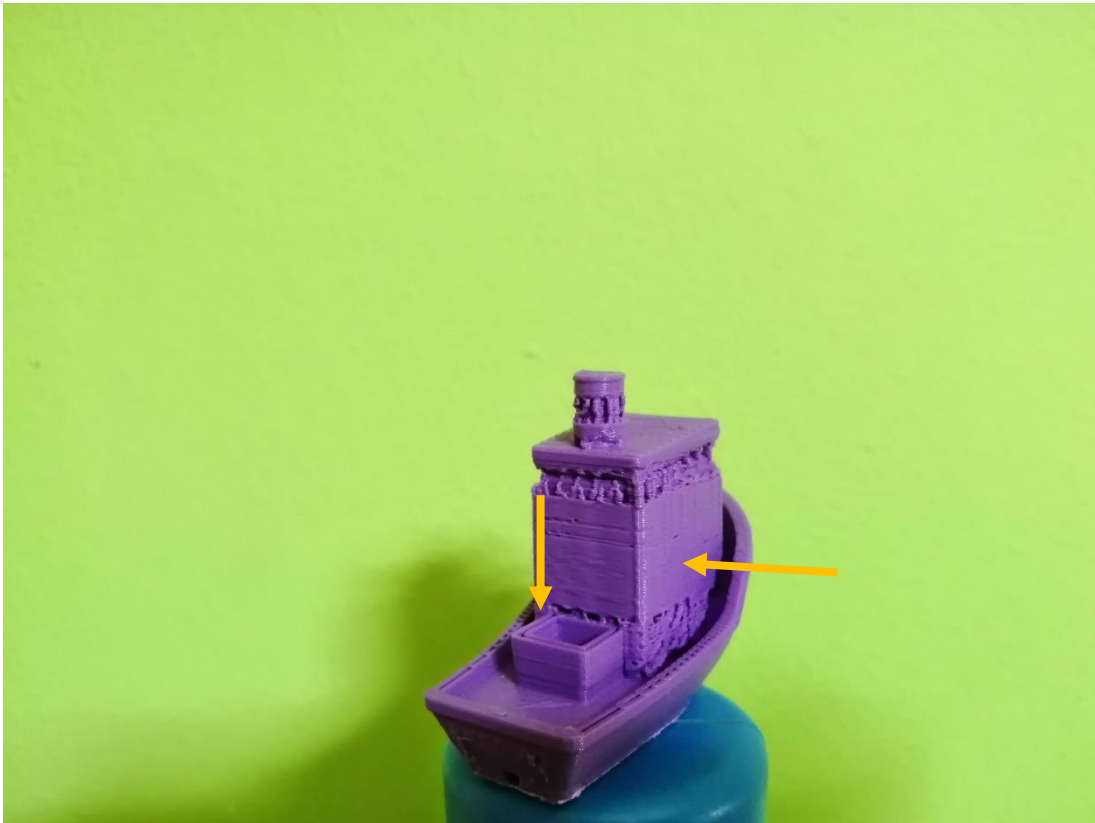
Εικόνα 89: Μελέτη πρότυπου μοντέλου (καράβι) 2 CubePro

Στην αριστερή επιφάνεια του κήτους είναι εξίσου ομαλή και λεία με την δεξιά, δεν παρατηρείται επίσης κάποιος επιφανειακό κενό. Οι δύο οπές που υπάρχουν στο κήτος είναι στρογγυλές και δεν έχουν παραμορφωθεί, όμως η ποσότητα του υλικού που βρίσκεται γύρω από τις οπές δεν είναι ίδια παντού. Στο επάνω και το κάτω μέρος της οπής παρουσιάζεται μεγαλύτερη ποσότητα υλικού. Στο πίσω μέρος του κήτους που στο 3D μοντέλο υπάρχει επιγραφή, εδώ δεν υπάρχει η επιγραφή μόνο κάποια εξογκώματα στην επιφάνεια. Η κουπαστή πάνω από το κήτος έχει κατασκευαστεί ομαλά, παρουσιάζει όμως κενό πλήρωσης μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού τοίχου.



Εικόνα 90: Μελέτη πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 3 CubePro

Το πάτωμα του караβιού έχει κατασκευαστεί πολύ ομαλό και λείο και δεν υπάρχουν κενά, τουλάχιστον στα σημεία που δεν έχουν επικαλυφθεί με τα στηρίγματα. Οι πλευρές του κουτιού πίσω από την καμπίνα είναι ομαλές όμως δεν υπάρχει πλήρωση μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού τοίχους. Στο σημείο που υπήρχε βάση με οπή στη πρύμνη έχει κατασκευαστεί μόνο η οπή, η κυκλική βάση δεν έχει δημιουργηθεί.



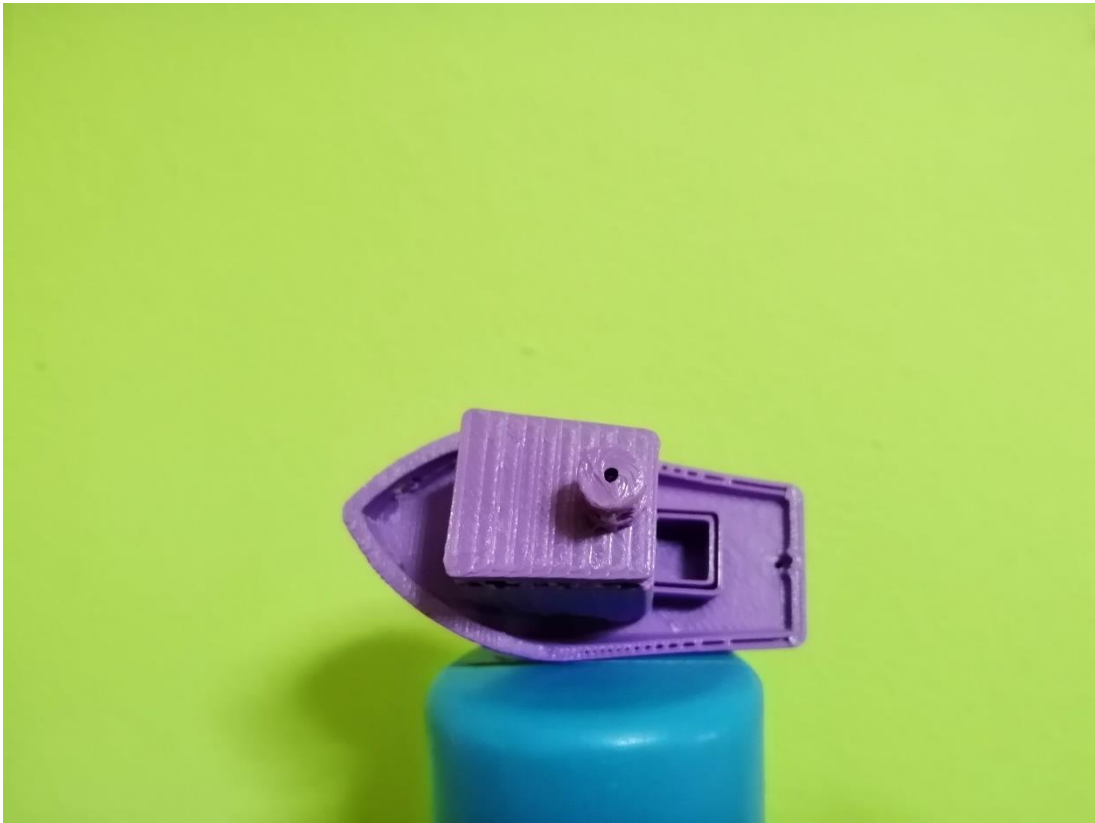
Εικόνα 91: Μελέτη πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 4 CubePro

Ο χώρος της καμπίνας, όπως αναφέρθηκε και κατά την διαδικασία της κατασκευής, έχει κατασκευαστεί συμπαγής μαζί με την υποστηρικτική δομή. Η προσπάθεια απομάκρυνσης των στηριγμάτων θα κατέστρεφε το αντικείμενο. Το τελικό αυτό αποτέλεσμα δεν είναι αποδεκτό και εννοείται δεν μας δίνει την δυνατότητα να παρατηρήσουμε καλύτερα την συμπεριφορά του λογισμικού σε δύσκολες γεωμετρίες.



Εικόνα 92: Μελέτη πρότυπου μοντέλου (καρβιού) 5 CubePro

Η οροφή της καμπίνας είναι ομοιόμορφα κατασκευασμένη και δεν παρουσιάζει κανένα κενό. Η καμινάδα έχει κατασκευαστεί συμπαγής στην αρχή με μεγαλύτερη διάμετρο, έπειτα υπάρχουν στηρίγματα και η διάμετρό της μειώνεται και στο τέλος η διάμετρος της ξανά αυξάνεται. Στο κέντρο της καμινάδας υπάρχει σπή μικρότερης διαμέτρου όμως από του 3D μοντέλου.



Εικόνα 93: Μελέτη πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 6 CubePro

Τελειώνοντας τον οπτικό έλεγχο μένει μόνο η βάση του πλοίου. Η βάση είναι λεία και ομαλή, όμως δεν υπάρχουν τα γράμματα της επιγραφής. Επίσης φαίνεται έντονα η απομάκρυνση του πλέγματος που υπήρχε γύρω γύρω.



Εικόνα 94: Μελέτη πρότυπου μοντέλου (καραβιού) 7 CubePro

Επόμενο κομμάτι ήταν η ράβδος που προετοιμάστηκε από το πρόγραμμα Simplify 3D. Ακολουθήθηκε πάλι η ίδια διαδικασία και αφού ξεκίνησε η μηχανή την δημιουργία, κατασκεύασε πρώτα τη βάση του κομματιού. Η κατασκευή της ράβδου ήταν ταχύτερη λόγω της εύκολης γεωμετρίας και της μη ύπαρξης στηριγμάτων.



Εικόνα 95: Κατασκευή ράβδου Simplify 3D

Η ράβδος κατασκευάστηκε σε σαράντα οκτώ λεπτά και εκτιμώμενος χρόνος ήταν τα σαράντα πέντε λεπτά. Μετά το τέλος της διαδικασίας κατασκευής αφαιρέσαμε την πλάκα κατασκευής με το κομμάτι από την μηχανή. Με την βοήθεια μια σπάτουλας απομακρύναμε τη ράβδο από την πλάκα. Υποστηρικτική δομή δεν υπήρχε οπότε έγινε μόνο η απομάκρυνση της βάσης από τη ράβδο. Η εργασία αυτή ήταν πολύ εύκολη και έγινε χειρωνακτικά.

Ακολούθησε διαστασιολογικός έλεγχος για να αποτυπωθούν οι διαφορές με το 3D πρότυπο μοντέλο.

Πίνακας 4: Διαστασιολογικός έλεγχος διαφορών ράβδου
(πρότυπο μοντέλο - κατασκευασμένο από Simplify 3D)

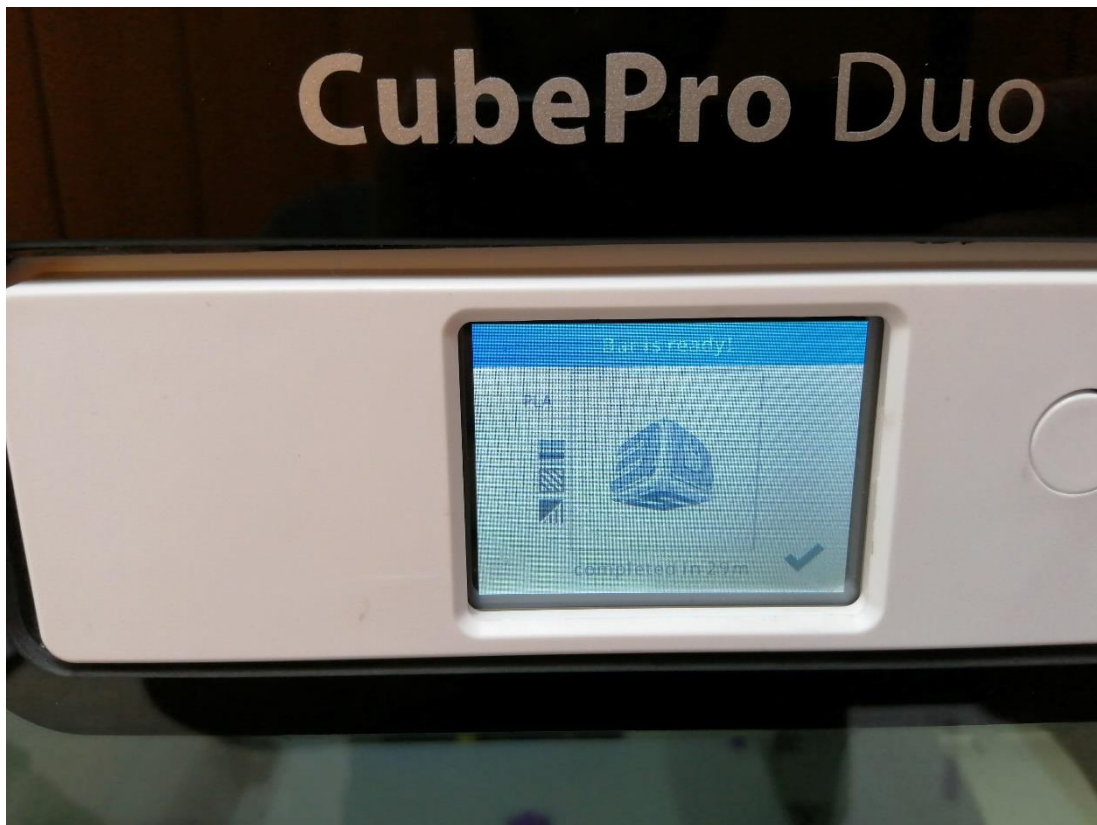
	Πρότυπο 3D μοντέλο	Κατασκευασμένο προϊόν
Ύψος αντικειμένου	12,00 mm	12,00 mm
Μήκος αντικειμένου	120,00 mm	120,00 mm
Απέναντι πλευρές αντικειμένου 1	12,00 mm	12,00 mm
Απέναντι πλευρές αντικειμένου 2	12,00 mm	12,00 mm



Εικόνα 96: Αποτέλεσμα κατασκευής ράβδου Simplify 3D

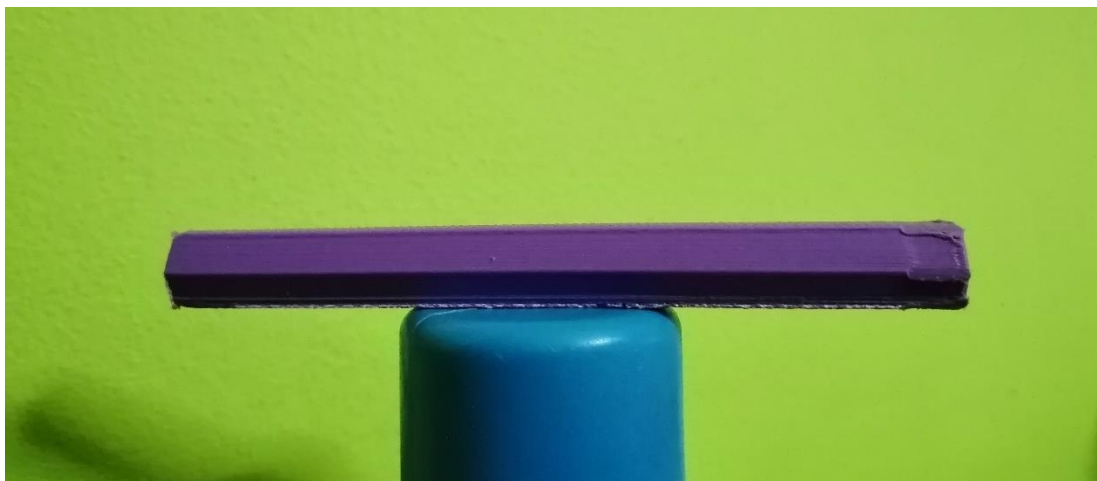
Τέλος πραγματοποιήθηκε οπτικός έλεγχος. Ο έλεγχος παρουσίασε απόλυτα ομαλές και λείες επιφάνειες χωρίς κενά ή εξογκώματα στις πλάγιες επιφάνειες. Η επιφάνεια της βάσης και της κορυφής παρουσιάζουν λίγα επιφανειακά κενά αλλά το γενικό αποτέλεσμα είναι ιδανικό.

Επόμενο κομμάτι στη σειρά είναι η ράβδος που τεμαχίστηκε με το λογισμικό CubePro. Ακολουθήθηκε πάλι η ίδια διαδικασία. Τοποθετήθηκε το στικάκι μνήμης USB στη μηχανή CubePro Duo, η μηχανή αναγνώρισε το αρχείο .cubepro, το όνομα του, το υλικό και τον απαιτούμενο χρόνο κατασκευής και παρουσίασε στη οθόνη τη ράβδο που θα κατασκευαζόταν. Έπειτα η μηχανή ξεκίνησε την αύξηση της θερμοκρασίας της κεφαλής εκτύπωσης και του θαλάμου. Η κατασκευή του κομματιού ξεκίνησε δημιουργώντας πάνω στη πλάκα κατασκευής το αντικείμενο και γύρω γύρω ένα πλέγμα.



Εικόνα 97: Αποτέλεσμα κατασκευής ράβδου CubePro

Ο εκτιμώμενος χρόνος για την παραγωγή της ράβδου ήταν είκοσι οκτώ λεπτά και ο χρόνος που απαιτήθηκε ήταν είκοσι εννιά λεπτά. Το τελικό αντικείμενο απομακρύνθηκε από την πλάκα κατασκευής με τη βοήθεια σπάτουλας και αφαιρέθηκε το πλέγμα γύρω γύρω από το αντικείμενο. Για την εργασία αυτή απαιτήθηκε η χρήση ειδικού εργαλείου (μυτοσίμπιδο).



Εικόνα 98: Μελέτη ράβδου CubePro

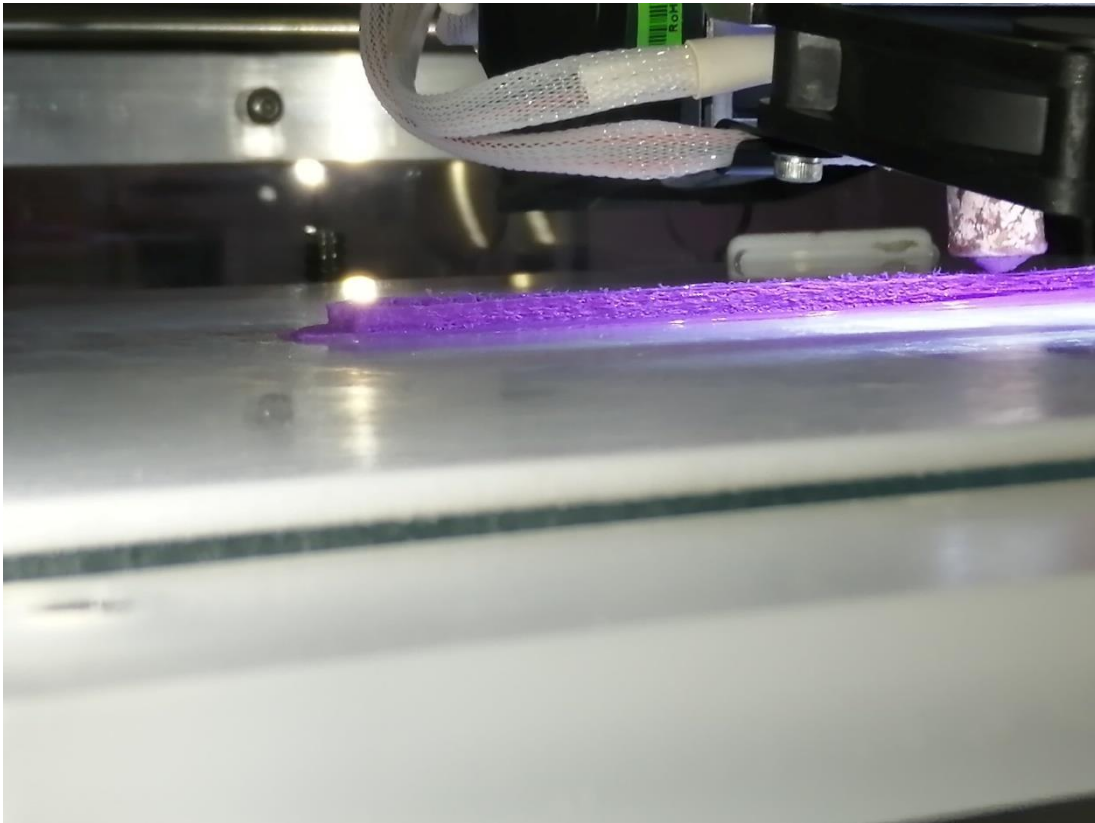
Ακολούθησε διαστασιολογικός έλεγχος για να αποτυπωθούν οι διαφορές με το 3D πρότυπο μοντέλο.

Πίνακας 5: Διαστασιολογικός έλεγχος διαφορών ράβδου
(πρότυπο μοντέλο - κατασκευασμένο από CubePro)

	Πρότυπο 3D μοντέλο	Κατασκευασμένο προϊόν
Ύψος αντικειμένου	12,00 mm	11,90 mm
Μήκος αντικειμένου	120,00 mm	119,90 mm
Απέναντι πλευρές αντικειμένου 1	12,00 mm	12,30 mm
Απέναντι πλευρές αντικειμένου 2	12,00 mm	12,10 mm

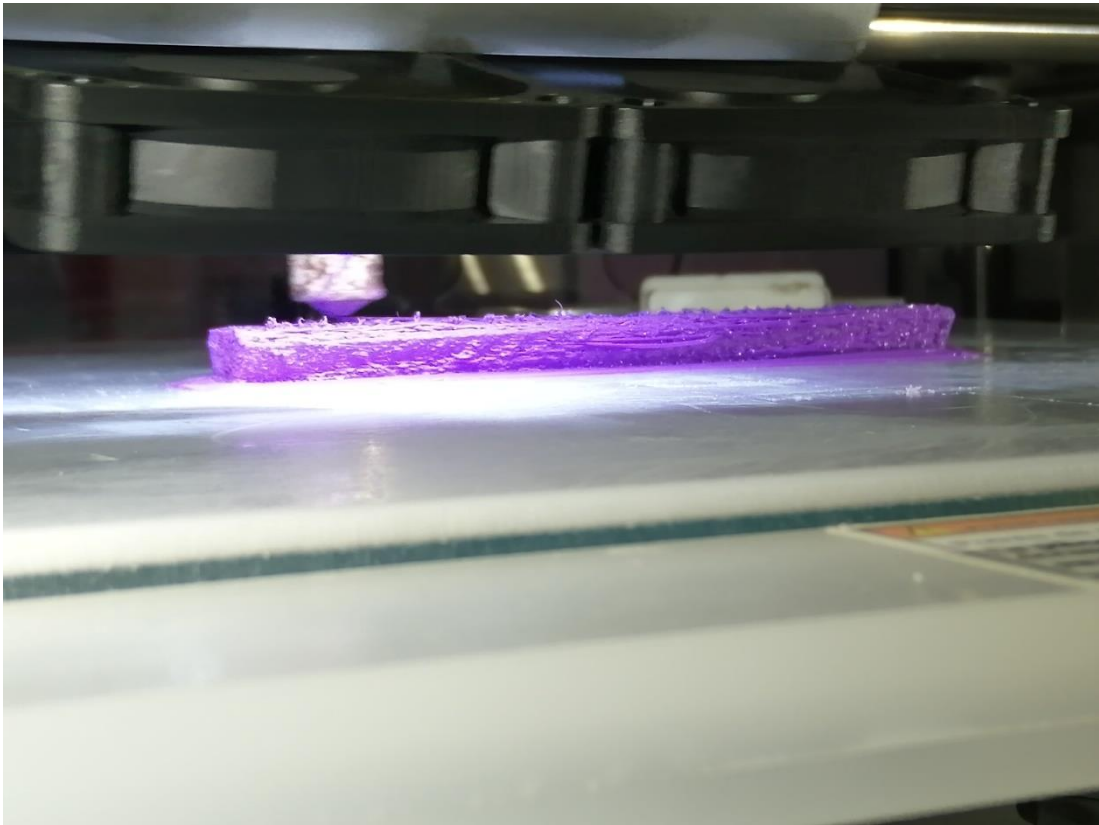
Έπειτα έγινε οπτικός έλεγχος, ο οποίος παρουσίασε απόλυτα ομαλές και λείες επιφάνειες χωρίς κενά ή εξογκώματα σε όλες τις επιφάνειες. Στην βάση της ράβδου, εκεί που συνδεόταν με το πλέγμα, παρουσιάζεται τραχύτητα στην επιφάνεια και το πλάτος της επιφάνειας είναι μεγαλύτερο από όσο πρέπει αλλά είναι ομοιόμορφο σε όλη τη βάση. Αντίστοιχα στην επιφάνεια της κορυφής, οι ακμές παρουσιάζουν παρόμοιο αποτέλεσμα με μικρότερο μέγεθος και χωρίς να υπάρχει τραχύτητα.

Τελευταία αντικείμενο ήταν η ράβδος που παράχθηκε από το πρόγραμμα Ultimaker Cura. Ακολουθήθηκε πάλι η ίδια διαδικασία. Τοποθετήθηκε το στικάκι μνήμης USB στη μηχανή CubePro Duo, η μηχανή αναγνώρισε το αρχείο .cubepro, το όνομα του, το υλικό και τον απαιτούμενο χρόνο κατασκευής αλλά δεν παρουσίασε στη οθόνη τη ράβδο που θα κατασκευαζόταν όπως έκανε και με το αρχείο που προετοιμάστηκε στο λογισμικό Simplify 3D. Έπειτα η μηχανή ξεκίνησε την αύξηση της θερμοκρασίας της κεφαλής εκτύπωσης και του θαλάμου. Η κατασκευή του κομματιού ξεκίνησε και η κεφαλή εκτύπωσης είχε απόσταση περίπου είκοσι χιλιοστά (20 mm) από την πλάκα κατασκευής με αποτέλεσμα η εναπόθεση του υλικού να γίνεται στον αέρα και η επίστρωση του να είναι ανομοιόμορφη. Αφού κατασκευάστηκε η βάση του κομματιού, της οποίας είχε επιλεγεί ο τύπος να είναι Brim, η απόσταση μεταξύ κεφαλή εκτύπωσης και πλάκα κατασκευής μειώθηκε.



Εικόνα 99: Κατασκευή ράβδου Ultimaker Cura 1

Ήδη από τις πρώτες στρώσεις που εναποτέθηκαν η μία πάνω στην άλλη παρατηρήθηκε η αστοχία της ράβδου. Η εναπόθεση γινόταν πολλές φορές στον αέρα και η κεφαλή εκτύπωσης μετακινούσε ήδη εναποτεθειμένο υλικό. Παρά την πιθανότητα της πρόκλησης προβλήματος στην μηχανή δεν έγινε η διακοπή της κατασκευαστικής διαδικασίας για να ελεγχθεί η τελική γεωμετρία της ράβδου και να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα.



Εικόνα 100: Κατασκευή ράβδου Ultimaker Cura 2

Η ράβδος κατασκευάστηκε σε μία ώρα και τρία λεπτά, ενώ ο εκτιμώμενος χρόνος ήταν πενήντα ένα λεπτά. Μετά το τέλος της διαδικασίας, απομακρύνθηκε η πλάκα κατασκευής από τη μηχανή και αφαιρέθηκε η ράβδος από πάνω της με τη βοήθεια σπάτουλας. Έπειτα απομακρύνθηκε η βάση που είχε δημιουργηθεί γύρω από το αντικείμενο χειρωνακτικά με τη χρήση ειδικού εργαλείου (μυτοσίμπιδο).



Εικόνα 101: Κατασκευή ράβδου Ultimaker Cura 3

Ακολούθησε διαστασιολογικός έλεγχος για να αποτυπωθούν οι διαφορές με το 3D πρότυπο μοντέλο.

Πίνακας 6: Διαστασιολογικός έλεγχος διαφορών ράβδου (πρότυπο μοντέλο - κατασκευασμένο από Ultimaker Cura)

	Πρότυπο 3D μοντέλο	Κατασκευασμένο προϊόν
Ύψος αντικειμένου	12,00 mm	12,65 mm
Μήκος αντικειμένου	120,00 mm	121,50 mm
Απέναντι πλευρές αντικειμένου 1	12,00 mm	14,10 mm
Απέναντι πλευρές αντικειμένου 2	12,00 mm	13,20 mm

Μετά από οπτικό έλεγχο που έγινε στο αντικείμενο βγήκε το συμπέρασμα ότι το αποτέλεσμα της κατασκευαστικής διαδικασίας ήταν εντελώς άστοχο. Όλες οι πλευρές του αντικειμένου είναι ανομοιόμορφες και τραχιές. Στρώσεις υλικού που έχουν εναποτεθεί είναι ασύνδετες στο αέρα και στις άκρες κάθε πλευράς υπάρχει μεγαλύτερη ποσότητα υλικού. Ειδικότερα στις επιφάνειες της βάσης και της

κορυφής υπάρχει στο κέντρο τους συνεχόμενη κενή επιφάνεια, η οποία δεν έχει καλυφθεί από υλικό. Κλείνοντας στην βάση του κομματιού δεν έχει απομακρυνθεί όλο το υλικό βάσης που δημιουργήθηκε για την συγκράτηση, διότι έχει συγκολληθεί με τη βάση της ράβδου.



Εικόνα 102: Μελέτη ράβδου Ultimaker Cura

Τελευταίο μοντέλο προς κατασκευή ήταν το καράβι που προετοιμάστηκε με το πρόγραμμα Ultimaker Cura. Ήδη από τις πρώτες στρώσεις κατασκευής της βάσης του αντικειμένου, η κεφαλή εκτύπωσης είχε απόσταση περίπου είκοσι χιλιοστά (20 mm) από την πλάκα κατασκευής με αποτέλεσμα η εναπόθεση του υλικού να γίνεται στον αέρα και η επίστρωση του να είναι ανομοιόμορφη. Στην συνέχεια της κατασκευής παρατηρήθηκε η ολική αστοχία του αντικειμένου ως επακόλουθο της δημιουργίας αποτυχημένων στρώσεων. Η κάθε στρώση δεν κατασκευαζόταν ακριβώς πάνω από την προηγούμενη και πολλές φορές εναποτίθεται υλικό στο κενό. Εξαιτίας της αστοχίας του προϊόντος αλλά και της πιθανότητας πρόκλησης βλάβης στην μηχανή AM αποφασίστηκε η διακοπή της κατασκευαστικής διαδικασίας. Το αποτέλεσμα που προέκυψε μέχρι την διακοπή της διαδικασίας ήταν μια ανομοιόμορφη μάζα υλικού, που τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δεν έμοιαζαν με την πολύπλοκη γεωμετρία του 3D μοντέλου.

4.3.7 Πειραματικός έλεγχος στρέψης

Έπειτα από την κατασκευή και τον οπτικό και διαστασιολογικό έλεγχο που έγινε στα αντικείμενα, αποφασίστηκε να διεξαχθεί έλεγχος στρέψης στις ράβδους για να αποτυπωθούν οι διατμητικές τάσεις που αντέχει η κάθε ράβδος. Αφού έχει προηγηθεί διαστασιολογικός έλεγχος των ράβδων, ακολουθούμε κατευθείαν η πειραματική διαδικασία. Τοποθετούμε εντός της μηχανής στρέψης την πρώτη

ράβδο που είχε προετοιμαστεί από το πρόγραμμα Simplify 3D. Κατά τη διάρκεια του πειράματος μετριούνται η ροπή στρέψης (Mt) σε Nm και οι στροφές της μηχανής. Η ράβδος ξεκινάει να στρέφεται, η ροπή στρέψης αυξάνεται και έπειτα από κάποιες στροφές ξεκινάει η αστοχία της ράβδου. Αρχικά μειώνεται η ροπή στρέψης απότομα και έπειτα αρχίζει ξανά να αυξάνεται. Η ίδια παρατήρηση έγινε άλλες δύο φορές. Την τέταρτη συνολικά φορά, η ράβδος αστόχησε εντελώς, άνοιξε ολόκληρη η μία της πλευρά, τότε η ροπή στρέψης μηδενίστηκε για ελάχιστο χρόνο και έπειτα ξεκίνησε πάλι να αυξάνεται. Λόγω της αστοχίας της ράβδου το πείραμα διακόπηκε. Ακολουθεί πίνακα με τις μετρήσεις

Πίνακας 7: Μετρήσεις πειράματος στρέψης ράβδου

Ροπή στρέψης (Nm)	Στροφές Μηχανής	Μοίρες	Γωνία Στροφής θ (rad/m)
0	0	0	0
0,18	11	3,3	0,057595865
0,34	29	8,7	0,151843645
0,4	54	16,2	0,282743339
0,41	72	21,6	0,376991118
0,4	96	28,8	0,502654825
0,37	121	36,3	0,633554518
0,33	159	47,7	0,832522053
0,3	187	56,1	0,97912971
0,29	221	66,3	1,157153294
0,3	266	79,8	1,392772743
0,18	296	88,8	1,549852376
0,22	345	103,5	1,806415776
0,2	384	115,2	2,010619298
0,15	491	147,3	2,570869988
0,2	579	173,7	3,031636911
0,19	641	192,3	3,356268152
0,19	726	217,8	3,801327111
0,18	865	259,5	4,529129409
0,15	952	285,6	4,984660344
0,07	1071	321,3	5,607742887
0,16	1135	340,5	5,942846103
0,04	1173	351,9	6,141813638
0	1226	367,8	6,419320989
0,13	1314	394,2	6,880087911

Οι μετρήσεις που πήραμε από την μηχανή απεικονίζονται στις πρώτες δύο στήλες. Οι στροφές της μηχανής πρέπει να μετατραπούν σε γωνίες στροφής θ σε rad/m. Για να γίνει αυτό πρέπει πρώτα οι στροφές να πολλαπλασιαστούν επί μηδέν κόμμα τρία για να πάρουμε τη κάθε γωνία σε μοίρες και έπειτα να

πολλαπλασιάσουμε το αποτέλεσμα επί την αριθμητική σταθερά π διά 180 μοίρες. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η γωνία στροφής θ σε rad/m.

Μετά το πείραμα στρέψης το τελικό μήκος της ράβδου ήταν 121,20 mm.



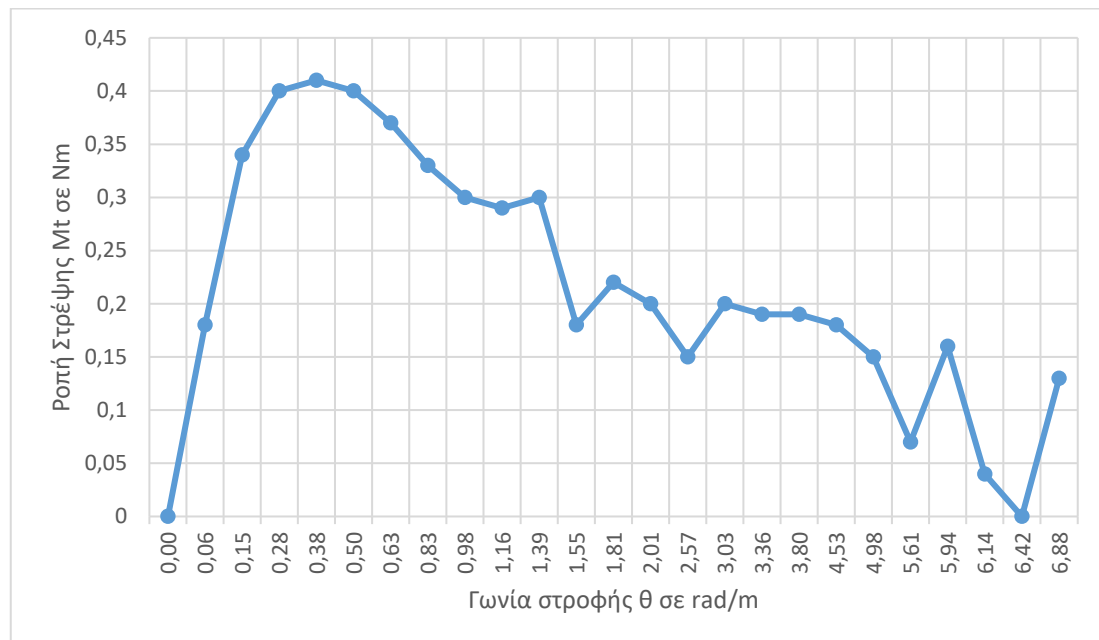
Εικόνα 103: Αποτέλεσμα πειράματος στρέψης σε ράβδο Simplify 3D

Ακολούθησε η ράβδος που είχε προετοιμαστεί στο πρόγραμμα CubePro. Τοποθετήθηκε εντός των εργαλείων συγκράτησης και ενεργοποιήθηκε η μηχανή στρέψης. Η ράβδος αρχίζει να στρέφεται και η ροπή στρέψης να αυξάνεται, όμως μερικά δευτερόλεπτα μετά και ενώ έχει ξεκινήσει η στρέψη της ράβδου, η ράβδος στρέφεται εντός του εργαλείου συγκράτησης. Έπειτα από αυτό διακόπηκε η λειτουργία της μηχανής και αφαιρέθηκε η ράβδος από τα εργαλεία συγκράτησης. Παρατηρήθηκε ότι στην μία πλευρά που είχε γίνει η συγκράτηση όλες οι ακμές του εξάγωνου φαγώθηκαν για αυτό τη ράβδος μετακινήθηκε εντός του εργαλείου συγκράτησης. Δυστυχώς δεν γίνεται να επαναληφθεί το πείραμα, όμως έχουν παρθεί κάποια συμπεράσματα που θα συζητηθούν αργότερα.

Τελευταία ράβδος που θα ελεγχθεί σε στρέψη είναι αυτή που προετοιμάστηκε με το πρόγραμμα Ultimaker Cura. Έγινε προσπάθεια να τοποθετηθεί η ράβδος εντός της μηχανής και να συγκρατηθεί από τα εργαλεία, όμως αυτό δεν ήταν δυνατόν. Η

τελική διάμετρος της ράβδου είναι μεγαλύτερη από αυτή που μπορούν να συγκρατήσουν τα εργαλεία συγκράτησης της μηχανής. Επίσης οι ακμές και οι πλευρές της δεν είναι κατασκευασμένες ομοιόμορφα ώστε να μπορεί το εργαλείο συγκράτησης να έρθει σε επαφή με όλη την επιφάνεια. Το πείραμα στρέψης για τη ράβδο αυτή ήταν αδύναμο να πραγματοποιηθεί.

Παρόλο που έχουμε τα στοιχεία μόνο από την μία ράβδο θα παρουσιαστεί το διάγραμμα ροπής στρέψης – γωνίας στροφής που αναπαριστά τη συμπεριφορά της ράβδου κατά τη στρέψη.



Σχήμα 2: Διάγραμμα Ροπής Στρέψης συναρτήσει Γωνίας Στροφής

Έχοντας όλα τα αποτελέσματα από τους ελέγχους και τα πειράματα μπορεί να γίνει ανάλυση σε βάθος και σύγκριση των τριών αυτών λογισμικών, του Simplify 3D, του CubePro και του Ultimaker Cura.

Το λογισμικό Simplify 3D όπως παρουσιάστηκε παραπάνω παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα ρύθμισης πολλών παραμέτρων του τεμαχισμού και της κατασκευαστικής διαδικασίας. Ο χρήστης ακόμα μπορεί να επιβλέψει την διαδικασία παραγωγής του κάθε στρώματος του τεμαχίου πριν την έναρξη της. Το αρχείο που εξάγεται από το λογισμικό δεν είναι άμεσα αναγνωρίσιμο από την μηχανή CubePro Duo, όμως γίνεται η μετατροπή του αρχείου εξαγωγής .bfb σε αρχείο .cubepro με τη χρήση ενός κωδικοποιητή. Τα αποτελέσματα της παραγωγής και των δύο μοντέλων που προετοιμάστηκαν με αυτό το λογισμικό ως προς τον

διαστασιολογικό έλεγχο παρουσίασαν ιδανικά αποτελέσματα. Ο έλεγχος της ράβδου έδειξε ότι το κατασκευασμένο αντικείμενο έχει ακριβώς τις ίδιες διαστάσεις με το 3D μοντέλο που είχε σχεδιαστεί στο CAD πρόγραμμα. Επίσης ο έλεγχος του караβιού έδειξε αντίστοιχα θετικά αποτελέσματα, οι διαστάσεις όλες ήταν ίδιες με το πρότυπο παρά την δύσκολη γεωμετρία του αντικειμένου. Η μόνη παρέκκλιση υπήρχε στη διάσταση του ύψους. Αυτή η διαστασιολογική παρέκκλιση λογικά οφείλεται στο πάχος στρώματος που ρυθμίστηκε στο πρόγραμμα κατά την προετοιμασία. Οι επιφάνειες των δύο αντικειμένων είναι εξίσου λείες και ομαλές τόσο στην απλή γεωμετρία της ράβδου όσο και στην πολύπλοκη του караβιού, αντίστοιχα πρόβλημα που παρουσιάζουν και τα δύο αντικείμενα είναι τα επιφανειακά κενά κατά κύριο λόγο στις ανώτερες επιφάνειες. Δυστυχώς με το πείραμα στρέψης δεν μπορούμε να συγκρίνουμε τα λογισμικά. Γενικά όμως η εντύπωση που δημιουργούν τα αποτελέσματα του λογισμικού είναι ότι σε σχέση με τα υπόλοιπα δύο λογισμικά είναι σίγουρα το καταλληλότερο για την ακριβεί δημιουργία οποιονδήποτε γεωμετριών.

Το λογισμικό CubePro αποτελεί μια λύση για την κατασκευή αντικειμένων που παρέχεται από την εταιρεία κατασκευής του εκτυπωτή που χρησιμοποιήθηκε. Η δυνατότητες ρύθμισης που παρέχει το πρόγραμμα είναι μόνο οι πολύ βασικές και οι υπόλοιπες ρυθμίσεις είναι προγραμματισμένες από την εταιρεία. Μετά από το τέλος της προετοιμασίας, το πρόγραμμα εξάγει αρχείο της μορφής .cubeprg που αναγνωρίζει η μηχανή προσθετικής κατασκευής. Τα αποτελέσματα των δύο αντικειμένων που κατασκευάστηκαν ήταν διαφορετικά. Στην εύκολης γεωμετρίας ράβδο, ο διαστασιολογικός έλεγχος έδειξε πολύ μικρές αποκλίσεις ως προς όλους τους άξονες και ο οπτικός έλεγχος έδειξε ομοιόμορφες, ομαλές και λείες επιφάνειες και γενικά ιδανικό αποτέλεσμα κατασκευής. Στο πείραμα στρέψης, η καταστροφή των ακμών της ράβδου οφειλόταν πρώτον στις ελάχιστες αποκλίσεις και δεύτερον στην μη συμπαγή σύνδεση των εξωτερικών τοιχών με την εσωτερική πλήρωση της ράβδου. Αντίθετα το περίπλοκης γεωμετρίας караβι παρουσίασε διαστασιολογικές αποκλίσεις κυρίως όμως το αποτέλεσμα της κατασκευής αστόχησε εντελώς στην δημιουργία της καμπίνας, της καμινάδας και την πλήρωσης του κενού μεταξύ κοντινών εσωτερικών και εξωτερικών τοιχών. Το λογισμικό CubePro αποδείχθηκε κατάλληλο για την κατασκευή εύκολων γεωμετρικών αντικειμένων όμως η κατασκευή πολύπλοκων αντικειμένων απαιτεί πολύ έλεγχο ή την χρησιμοποίηση άλλου λογισμικού.

Το λογισμικό Ultimaker Cura παρόλο που διαθέτει αντίστοιχες ρυθμίσεις και δυνατότητες με το λογισμικό Simplify 3D δεν μας επέτρεψε την παραγωγή πολλών συμπερασμάτων, πέρα από την ακαταλληλότητα χρήση του με την μηχανή προσθετικής κατασκευής CubePro Duo. Η προσπάθεια μετατροπής του αρχείου μορφής .gcode που εξάγεται από το πρόγραμμα σε αναγνωρίσιμο από την μηχανή πρόγραμμα με την πρόσθεση εντολών προγραμματισμού στο αρχείο τελικώς επιτεύχθηκε. Όμως το αποτέλεσμα των κατασκευαστικών διαδικασιών ήταν μία

ράβδος που έμοιαζε με τη απαραίτητη γεωμετρία αλλά οι επιφάνειες της ήταν εντελώς ανομοιόμορφες και με κενά και μία αποτυχημένη προσπάθεια κατασκευής караβιού, η οποία διακόπηκε λίγη ώρα μετά την έναρξη της. Το λογισμικό Ultimaker Cura αποδείχθηκε ότι δεν είναι κατάλληλο για να προετοιμάσει αντικείμενα ώστε να κατασκευαστούν στην μηχανή προσθετικής κατασκευής CubePro Duo.

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία, παρουσιάστηκε η έννοια της τεχνολογίας Προσθετικής Κατασκευής (Additive Manufacturing) και η κάθε διεργασία της ξεχωριστά. Έπειτα αναφέρθηκαν οι εφαρμογές της τεχνολογίας. Ακολούθησε η αναφορά των ειδών των λογισμικών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή αντικειμένων και παρουσιάστηκαν κάποια προγράμματα από κάθε είδος. Στην συνέχεια έγινε επιλογή της μηχανής προσθετικής κατασκευής CubePro Duo, βάσει των χαρακτηριστικών της. Σκοπός της επιλογής ήταν να πραγματοποιηθεί κατασκευή κάποιων αντικειμένων. Πρώτα πραγματοποιήθηκε η μοντελοποίηση τους σε πρόγραμμα 3D CAD και έπειτα ο έλεγχος των STL αρχείων. Λόγω της επιλογής της μηχανής εκτύπωσης, αποφασίστηκε η χρήση τριών λογισμικών για την προετοιμασία των αρχείων πριν την κατασκευή τους. Αυτά τα λογισμικά ήταν το Simplify 3D, το CubePro και το Ultimaker Cura. Τα μοντέλα προετοιμάστηκαν με τη βοήθεια των λογισμικών και κάποιων άλλων προγραμμάτων και στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε η κατασκευαστική διαδικασία. Ακολούθησε διαστασιολογικός και οπτικός έλεγχος σε όλα τα αντικείμενα, καθώς και πειράματα στρέψης σε κάποια από αυτά για να καταγραφούν τα χαρακτηριστικά τους. Από την διαδικασία αυτή επιτεύχθηκε ο σκοπός της εξαγωγής συμπερασμάτων.

Προτού αναφερθούν τα συμπεράσματα θα αναλυθούν τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Κατά τα πρώτα στάδια της εργασίας δεν εμφανίστηκε κάποιο πρόβλημα που έπρεπε να λυθεί, όλα τα προβλήματα παρουσιάστηκαν μετά την επιλογή της μηχανής AM. Η γλώσσα προγραμματισμού (Firmware) με την οποία λειτουργεί η μηχανή CubePro Duo είναι η Bits from Bytes και αναγνωρίζει μόνο προγράμματα της μορφής .cubepro, οπότε έγινε έρευνα για λογισμικά που εκτελούσαν την διαδικασία slicing και δημιουργούσαν αρχεία .cubepro. Η έρευνα δεκάδων λογισμικών δεν είχε κανένα αποτέλεσμα γιατί δεν υπάρχει κανένα λογισμικό που να εξάγει αρχεία .cubepro, πέρα από το λογισμικό της κατασκευάστριας εταιρείας φυσικά. Τα λογισμικά διέθεταν ποικιλία μηχανών AM που υποστήριζαν με την παροχή προφίλ της μηχανής αλλά κανένα δεν διέθετε στη λίστα του την μηχανή CubePro Duo. Έπειτα έγινε έρευνα για εφαρμογή μετατροπής άλλης μορφής αρχείου σε .cubepro και πάλι τα αποτελέσματα ήταν τα ίδια. Ακολούθησε η προσπάθεια ανάγνωσης και επεξεργασίας ενός ήδη έτοιμου αρχείου .cubepro όμως το αποτέλεσμα ήταν μία συνεχής γραμμή ακατανόητων χαρακτήρων, οπότε έγινε η σκέψη ότι το αρχείο είναι κρυπτογραφημένο. Ακολούθησε πάλι έρευνα στο διαδίκτυο μέχρι που βρέθηκε σε συζητήσεις χρηστών (forum) ότι το αρχείο .cubepro αποτελείται από μια γλώσσα προγραμματισμού των μηχανών AM που έχει αναπτυχθεί για την επικοινωνία με μηχανές που διαθέτουν Firmware Bits from Bytes και δημιουργεί αρχεία της μορφής bfb και μια κρυπτογράφηση Blowfish ECB που έχει επιβληθεί στο αρχείο. Αφού έγινε ένα πρώτο βήμα επίλυσης του προβλήματος και έγινε γνωστό ότι υπήρχε κρυπτογράφηση, ακολούθησε έρευνα για τον τρόπο με τον οποίο θα μπορούσαμε

να αφαιρέσουμε την κρυπτογράφηση από ήδη έτοιμο αρχείο ή να προσθέσουμε κρυπτογράφηση σε αρχείο bfb. Ευτυχώς παλαιότερα είχε αναπτυχθεί εφαρμογή που να κωδικοποιεί τα αρχεία bfb με την κρυπτογράφηση Blowfish ECB. Η αντίθετη ενέργεια εδώ παρεχόταν από την εφαρμογή δεν απέδιδε σωστά αποτελέσματα. Αφού βρέθηκε ο τρόπος της κωδικοποίησης των αρχείων bfb έπρεπε να βρεθούν λογισμικά που να εξάγουν αυτήν την μορφή αρχείου. Έγινε πάλι έρευνα στα ίδια λογισμικά αν εξάγουν αρχεία της μορφής bfb αλλά κανένα αποτέλεσμα. Κάποια λογισμικά παρείχαν προφίλ για άλλες μηχανές AM που χρησιμοποιούσαν Firmware Bits from Bytes αλλά τα αρχεία που εξάγονταν ήταν αρχεία μορφής .gcode. Εν τέλει το λογισμικό Simplify 3D ήταν το μόνο που παρείχε την δυνατότητα εξαγωγής αρχείων bfb. Αφού έγινε η αγορά του λογισμικού και η προετοιμασία και εξαγωγή ενός αρχείου bfb, ακολούθησε η κωδικοποίηση του αρχείου και η παραγωγή αρχείου .cube pro από άλλο πρόγραμμα εκτός από το λογισμικό της κατασκευάστριας εταιρείας. Ως τρίτο πρόγραμμα για την σύγκριση λογισμικών, εκτός από το CubePro και το Simplify 3D, αποφασίστηκε να επιλεγεί ένα που προσφέρει την δυνατότητα προετοιμασίας και εξαγωγής αρχείων για μηχανές AM με Firmware Bits from Bytes. Το λογισμικό δημιουργούσε αρχείο μορφή gcode που αποτελεί τροποποιημένο αρχείο bfb. Η κωδικοποίηση αυτού του αρχείου παρήγαγε πάλι αρχείο για την μηχανή AM που δεν μπορούσε να αναγνωρίσει. Τότε έγινε προσθήκη εντολών προγραμματισμού από άλλο bfb πρόγραμμα στη αρχή και το τέλος του αρχείου gcode, ώστε τουλάχιστον οι εντολές αυτές να είναι ίδιες με τις εντολές ενός αρχείου bfb. Η μετατροπή του αρχείου παρήγαγε αρχείο που μπορούσε να αναγνωριστεί από τη μηχανή AM και να πραγματοποιήσει την κατασκευαστική διαδικασία.

- Η τεχνολογία Προσθετικής Κατασκευής χωρίζεται σε πολλές διεργασίες όπου η κάθε μία έχει διαφορές σε όλα τα στάδια της κατασκευαστικής διαδικασίας.
- Τα περισσότερα λογισμικά εκτελούν περισσότερες από μία λειτουργίες για την κατασκευή του αντικειμένου.
- Η αρχιτεκτονική Bits from Bytes της μηχανής προσθετικής κατασκευής CubePro Duo χρησιμοποιείται σε λίγες μηχανές οπότε είναι λιγοστά τα λογισμικά που μπορούν να επικοινωνήσουν απευθείας μαζί της.
- Το λογισμικό Simplify 3D παρέχει τις περισσότερες δυνατότητες προετοιμασίας της παραγωγικής διαδικασίας, συνεργάζεται με την μηχανή CubePro Duo και το εκάστοτε κατασκευασμένο αντικείμενο του είναι ιδανικό, τόσο στις διαστάσεις όσο και στις επιφάνειες του.
- Το λογισμικό CubePro αποτελεί ένα εργαλείο για την προετοιμασία των αντικειμένων για παραγωγή με την χρήση μόνο βασικών ρυθμίσεων. Η ποιότητα των κατασκευασμένων τεμαχίων εξαρτάται από την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας του αντικειμένου.

- Το λογισμικό Ultimaker Cura παρέχει εξίσου πολλές δυνατότητες με το λογισμικό Simplify 3D, όμως δεν είναι δυνατή η σωστή κατασκευή αντικειμένων, λόγω της μη υποστήριξης της αρχιτεκτονικής Bits from Bytes.

Ως επιβεβαίωση των παραπάνω συμπερασμάτων παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των διαστασιολογικών ελέγχων.

Πίνακας 8: Διαστασιολογικός έλεγχος

	Πρότυπο 3D μοντέλο	Simplify 3D	CubePro	Ultimaker Cura
Ύψος αντικειμένου	48,00 mm	48,40 mm	47,70 mm	Η κατασκευαστική διαδικασία διακόπηκε λόγω πλήρους αστοχίας του αντικειμένου
Μήκος αντικειμένου	60,00 mm	60,00 mm	59,70 mm	
Πλάτος αντικειμένου	31,00 mm	31,00 mm	31,00 mm	
Μήκος οροφής	23,00 mm	23,00 mm	22,90 mm	
Εξωτερική διάμετρος Καμινάδας	7,00mm	7,80 mm	7,10 mm	
Εσωτερική διάμετρος τρύπας καμινάδας	3,00 mm	Δεν υπάρχει	1,60 mm	
Ύψος από βάση μέχρι το κουτί	15,50 mm	15,70 mm	15,10 mm	
Εσωτερικές διαστάσεις κουτιού	8,00 mm x 7,00 mm	8,00 mm x 7,00 mm	8,00 mm x 7,15 mm	
Εξωτερικές διαστάσεις κουτιού	12,00 mm x 10,81 mm	12,00 mm 10,90 mm	11,80 mm 8,00 mm	
Διαστάσεις μπροστινού παραθύρου	10,50 mm x 9,50 mm	10,50 mm x 9,50 mm	Δεν υπάρχει	
Διάμετρος πίσω παραθύρου	9,00 mm	9,00 mm	Δεν υπάρχει	

	Πρότυπο 3D μοντέλο	Simplify 3D	CubePro	Ultimaker Cura
Ύψος αντικειμένου	12,00 mm	12,00 mm	11,90 mm	12,65 mm
Μήκος αντικειμένου	120,00 mm	120,00 mm	119,90 mm	121,50 mm
Απέναντι πλευρές αντικειμένου 1	12,00 mm	12,00 mm	12,30 mm	14,10 mm
Απέναντι πλευρές αντικειμένου 2	12,00 mm	12,00 mm	12,10 mm	13,20 mm

Όπως φαίνεται και από τους παραπάνω πίνακες οι διαστάσεις των μοντέλων που είχαν προετοιμαστεί από το λογισμικό Simplify 3D αγγίζουν τις απαιτήσεις βάσει των 3D μοντέλων τόσο για ένα μοντέλο δύσκολης γεωμετρίας όσο και για απλούστερης γεωμετρίας. Επίσης παρατηρείται η αδυναμία χρήση του λογισμικού Ultimaker Cura με την μηχανή CubePro Duo, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Η εκπόνηση αυτής της πτυχιακής εργασίας μου προσέφερε την δυνατότητα να κατανοήσω σε βάθος την τεχνολογία της Προσθετικής Κατασκευής και να δημιουργήσω και εγώ από την αρχή ακολουθώντας όλα τα στάδια της κατασκευαστικής διαδικασίας ένα δικό μου αντικείμενο. Έγινε προσπάθεια από εμένα να συγκρίνω ακόμα και την πιο μικρή λεπτομέρεια για να παρέχω στην εκπαιδευτική και εμπορική κοινότητα την εμπειρία που απέκτησα με την χρήση των λογισμικών αυτών. Ως μια εξέλιξη της παρούσας εργασία θα μπορούσε να ήταν είτε η σύγκριση όλων των λογισμικών που παρέχουν την δυνατότητα συνεργασίας με μηχανές AM που λειτουργούν βάσει Firmware Bits from Bytes ακόμα και εάν παρέχουν αρχεία μορφής .cubepro., είτε η δημιουργία ενός λογισμικού και ο προγραμματισμός της γλώσσας προγραμματισμού για να παράγεται απευθείας αρχείο της μορφής .cubepro.

Βιβλιογραφία

3D Printing Industry, n.d. *3D Printing Industry*. [Online]

Available at: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide#02-history>

[Accessed 9 Μάιος 2019].

3D Systems, n.d. *3D Systems*. [Online]

Available at: <https://www.3dsystems.com/resources/information-guides/stereolithography/sla>

[Accessed 14 Ιούνιος 2019].

Aldridge, W., n.d. [Online]

Available at: <http://personal.psu.edu/wra5025/Assignment6-ExtendedEssayWithImage.html>

[Accessed 12 Ιούνιος 2019].

ALL3DP, 2018. *ALL3DP*. [Online]

Available at: <https://all3dp.com/2/stereolithography-3d-printing-simply-explained/>

[Accessed 18 Μάιος 2019].

ALL3DP, n.d. *ALL3DP*. [Online]

Available at: <https://all3dp.com/1/best-free-3d-printing-software-3d-printer-program/#3d-builder>

[Accessed 15 Ιούνιος 2019].

ALL3DP, n.d. *ALL3DP*. [Online]

Available at: <https://all3dp.com/1/best-free-3d-printing-software-3d-printer-program/#kisslicer>

[Accessed 18 Ιούνιος 2019].

Bensoussan, H., 2016. *Sculpteo*. [Online]

Available at: <https://www.sculpteo.com/blog/2016/12/14/the-history-of-3d-printing-3d-printing-technologies-from-the-80s-to-today/>

[Accessed 12 Ιούνιος 2019].

BMW Group, 2018. *BMW Group*. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

<https://www.press.bmwgroup.com/greece/article/detail/T0280289EL/%CF%84%CE%BF-bmw-group-%CF%83%CF%87%CE%B5%CE%B4%CE%B9%CE%AC%CE%B6%CE%B5%CE%B9-%CE%BC%CE%BF%CE%BD%CE%AC%CE%B4%CE%B1-%CF%80%CF%81%CE%BF%CF%83%CE%B8%CE%B5%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE%CF%82-%CE%BA%CE>

[Πρόσβαση 3 Ιούνιος 2019].

Bournias Varotsis, A., n.d. *3D HUBS*. [Online]

Available at: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing>

[Accessed 2 Μάιος 2019].

- Bournias Varotsis, A., n.d. *3D HUBS*. [Online]
Available at: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing>
[Accessed 3 Μάιος 2019].
- Bournias Varotsis, A., n.d. *3D HUBS*. [Online]
Available at: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sls-3d-printing>
[Accessed 3 Μάιος 2019].
- Bournias Varotsis, A., n.d. *3D HUBS*. [Online]
Available at: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-material-jetting-3d-printing>
[Accessed 4 Μάιος 2019].
- Bournias Varotsis, A., n.d. *3D HUBS*. [Online]
Available at: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing>
[Accessed 4 Μάιος 2019].
- EOS, n.d. *EOS*. [Online]
Available at: https://www.eos.info/about_eos/history
[Accessed 12 Μάιος 2019].
- Formlabs, 2019. *Formlabs*. [Online]
Available at: <https://formlabs.com/blog/introducing-form-3-form-3l-low-force-stereolithography/>
[Accessed 4 Ιούνιος 2019].
- Formlabs, 2019. *Formlabs*. [Online]
Available at: <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/>
[Accessed 18 Μάιος 2019].
- Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B., 2017. *Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής*. 2η Έκδοση επιμ. Αθήνα: Εκδόσεις Κριτική.
- Goehrke, S., 2018. *Forbes*. [Online]
Available at: <https://www.forbes.com/sites/sarahgoehrke/2018/12/05/additive-manufacturing-is-driving-the-future-of-the-automotive-industry/#45598e8975cc>
[Accessed 1 Ιούνιος 2019].
- Greguric, L., 2019. *ALL3DP*. [Online]
Available at: <https://all3dp.com/2/what-is-material-jetting-3d-printing-simply-explained/>
[Accessed 24 Μάιος 2019].
- Greguric, L., 2019. *ALL3DP*. [Online]
Available at: <https://all3dp.com/2/what-is-binder-jetting-3d-printing-simply-explained/>
[Accessed 24 Μάιος 2019].
- Griffiths, L., 2019. *tct MAG*. [Online]
Available at: <https://www.tctmagazine.com/3d-printing-news/formlabs-low-force->

[stereolithography-3d-printers/](#)

[Accessed 4 Ιούνιος 2019].

Kocovic, P., 2017. History of Additive Manufacturing. In: *3D Printing and Its Impact on the Production of Fully Functional Components: Emerging Research and Opportunities*. s.l.:IGI Global DISSEMINATOR OF KNOWLEDGE.

Koslow, T., 2019. *ALL3DP*. [Online]

Available at: <https://all3dp.com/1/best-sls-3d-printer-desktop-industrial/>

[Accessed 18 Μάιος 2019].

Kumar, J., Pandey, P. & Wimpenny, D., 2019. *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*. 1η Έκδοση ed. Singapore: Springer.

Lighting, 3., n.d. *3DP Lighting*. [Online]

Available at: <http://www.3dprinting.lighting/3d-printing-technologies/stereolithography/>

[Accessed 12 Ιούνιος 2019].

LLP, T. T., n.d. *Trikolaa Tech LLP*. [Online]

Available at: <https://www.indiamart.com/proddetail/fdm-rapid-prototyping-19472742212.html>

[Accessed 12 Ιούνιος 2019].

Lonjon, C., n.d. *Sculpteo*. [Online]

Available at: <https://www.sculpteo.com/blog/2017/03/01/whos-behind-the-three-main-3d-printing-technologies/>

[Accessed 12 Ιούλιος 2019].

MakePrintable, n.d. *MakePrintable*. [Online]

Available at: <https://makeprintable.com/>

[Accessed 16 Ιούνιος 2019].

Marc, n.d. *BITS INTO ATOMS*. [Online]

Available at: <https://www.bintoa.com/binder-jetting/>

[Accessed 12 Ιούνιος 2019].

Michelin, 2019. *Michelin*. [Online]

Available at: <https://michelinmedia.com/michelin-uptis>

[Accessed 10 Ιούνιος 2019].

Nike, 2018. *Nike*. [Online]

Available at: <https://news.nike.com/news/nike-flyprint-3d-printed-textile>

[Accessed 3 Ιούνιος 2019].

Palermo, E., 2013. *LIVESCIENCE*. [Online]

Available at: <https://www.livescience.com/40310-laminated-object-manufacturing.html>

[Accessed 14 Ιούνιος 2019].

PrintSpace3D, n.d. *PrintSpace3D*. [Online]

Available at: <https://www.printspace3d.com/what-is-3d-printing/3d-printing-processes/>

[Accessed 12 Ιούνιος 2019].

Sculpteo, n.d. *Sculpteo*. [Online]

Available at: <https://www.sculpteo.com/en/glossary/lom-definition/>

[Accessed 14 Ιούνιος 2019].

Slic3r, n.d. *Slic3r*. [Online]

Available at: <https://slic3r.org/about/>

[Accessed 18 Ιούνιος 2019].

SpecialChem, 2016. *Omnexus*. [Online]

Available at: <https://omnexus.specialchem.com/news/industry-news/tools-made-of-dsm-somos-perform-via-3d-printing-offer-best-results-000182913>

[Accessed 12 Ιούνιος 2019].

Stevenson, K., 2018. *Fabbaloo*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.fabbaloo.com/blog/2018/4/30/nikes-flyprint-is-it-really-3d-printed>

[Πρόσβαση 12 Ιούνιος 2019].

SYS, n.d. *SYS*. [Online]

Available at: <https://www.sys-uk.com/news/a-history-of-3d-printing-with-stratasys/>

[Accessed 12 Μάιος 2019].

Techopedia, n.d. *Techopedia*. [Online]

Available at: <https://www.techopedia.com/definition/24055/autodesk-inventor>

[Accessed 15 Ιούνιος 2019].

Thingiverse, n.d. *Thingiverse*. [Online]

Available at: <https://www.thingiverse.com/jumpstart/tinkercad>

[Accessed 15 Ιούνιος 2019].

Ultimaker, n.d. *Ultimaker*. [Online]

Available at: <https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-cura-software>

[Accessed 18 Ιούνιος 2019].

WikiPops, n.d. *WikiPops*. [Online]

Available at: https://wikipops.com/?wiki=Selective_laser_melting

[Accessed 12 Ιούνιος 2019].

BIO-ΔΙΑΣΤΑΣΗ, 2017. *BIO-ΔΙΑΣΤΑΣΗ*. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

<https://mde.biologia.gr/xriza/2017/04/29/%CF%84%CF%81%CE%B9%CF%83%CE%B4%CE%B9%CE%AC%CF%83%CF%84%CE%B1%CF%84%CE%B7-%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%8D%CF%80%CF%89%CF%83%CE%B7-%CE%B1%CE%BD%CE%B8%CF%81%CF%8E%CF%80%CE%B9%CE%BD%CF%89%CE%BD-%C>

[Πρόσβαση 30 Μάιος 2019].

Γιαννατσής, Ι., Δεδούσης, Β. & Κανελλίδης, Β., 2015. *Σύγχρονες Τεχνολογίες Κατασκευής με τη βοήθεια Η/Υ*. 1η Έκδοση επιμ. Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών.