



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΟΣ
ΙΣΤΙΟΠΛΟΪΑΣ, ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΥ ΚΑΙ
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΟΥ

OPTIMAL 3D DESIGN AND ANALYSIS OF A SAILBOAT ACCESSORY, 3D
PRINTING OF THE PROTOTYPE AND DETERMINATION OF ITS STRENGTH

Συγγραφέας:

Κρητικός Ιωάννης Ελευθέριος

A.M.: 16046

Επιβλέπουσα: Δημητρώλου Σωτηρία, Αναπλ. Καθηγήτρια ΠΑ.Δ.Α.

Αιγάλεω, 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΟΣ
ΙΣΤΙΟΠΛΟΪΑΣ, ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΥ ΚΑΙ
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΟΥ**

Συγγραφέας

Κρητικός Ιωάννης Ελευθέριος (Α.Μ.: 16046)

Επιβλέπουσα

Σωτηρία Δημητρέλλου

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΠΑ.Δ.Α.

Ημερομηνία εξέτασης

29/06/2023

Εξεταστική Επιτροπή

Δημητρέλλου Σωτηρία

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια
ΠΑ.Δ.Α.

Ιακωβίδης Ισίδωρος

Λέκτορας ΠΑ.Δ.Α.

Δημήτριος-Νικόλαος Παγώνης

Αναπληρωτής Καθηγητής
ΠΑ.Δ.Α.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Κρητικός Ιωάννης Ελευθέριος του Νικολάου με αριθμό μητρώου 51116046 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών δηλώνω υπεύθυνα ότι

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πραγματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια στην οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του ιδρύματος.

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

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι 10/01/2024 και έπειτα από αίτηση μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντα καθηγητή.

Ο δηλών



Κρητικός Ιωάννης Ελευθέριος

Η Επιβλέπουσα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτριά της Διπλωματικής Εργασίας κυρία Δημητρέλλου Σωτηρία, για την καθοδήγηση, τις συμβουλές και το χρόνο που διέθεσε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Επιπρόσθετα, ευχαριστώ την οικογένειά μου για τη στήριξη που μου πρόσφερε καθ' όλη την διάρκεια της φοίτησής μου στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της Διπλωματικής Εργασίας είναι η τρισδιάστατη σχεδίαση και η προσθετική κατασκευή ενός πρωτότυπου εξαρτήματος ιστιοπλοΐας snap shackle, το οποίο θα έχει βελτιωμένα χαρακτηριστικά συγκριτικά με αντίστοιχα προϊόντα της αγοράς, λαμβάνοντας υπόψιν απαιτήσεις που σχετίζονται με τη λειτουργικότητα, την αντοχή καθώς και τον τρόπο κατασκευής του προϊόντος.

Στο Κεφάλαιο 1 περιγράφεται το Snap Shackle και οι εφαρμογές του, και αναφέρονται αντίστοιχες κατοχυρωμένες παραπλήσιες πατέντες. Επεξηγείται αναλυτικά ο στόχος της Διπλωματικής Εργασίας σχετικά με το βελτιωμένο προϊόν snap shackle και οι απαιτήσεις που καλείται να ικανοποιήσει.

Το Κεφάλαιο 2 περιλαμβάνει την ιστορική αναδρομή και τα βασικά χαρακτηριστικά της τρισδιάστατης εκτύπωσης και της προσθετικής κατασκευής, καθώς και την περιγραφή των σύγχρονων τεχνικών προσθετικής κατασκευής και των μεθόδων δοκιμών που ακολουθούνται για τα τελικά εκτυπωμένα προϊόντα. Οι εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτύπωσης στη ναυτιλιακή βιομηχανία παρουσιάζονται στο ίδιο κεφάλαιο.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται αναλυτικά ορισμένα από τα συνηθέστερα υλικά της προσθετικής κατασκευής και γίνεται ειδική περιγραφή της μετεπεξεργασίας των πολυμερών και των μεταλλικών τελικών προϊόντων για την επίτευξη της απαραίτητης στεγανότητας και αντοχής αντίστοιχα.

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται αναφορά στα εργαλεία τρισδιάστατου σχεδιασμού και τρισδιάστατης εκτύπωσης που χρησιμοποιούνται σχεδόν σε όλες τις βιομηχανίες, για τη μοντελοποίηση σύνθετων 3D ψηφιακών μοντέλων τα οποία στη συνέχεια μπορούν να κατασκευαστούν σε φυσικά πρωτότυπα. Ειδικότερα, τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της Διπλωματικής Εργασίας είναι το λογισμικό Autodesk Fusion 360, το λογισμικό Cura και τρισδιάστατος εκτυπωτής Ultimaker S5.

Το Κεφάλαιο 5 περιλαμβάνει τη διαδικασία σχεδιασμού και βελτιστοποίησης της αρχικής ιδέας του πρωτότυπου προϊόντος snap shackle με το σχεδιασμό τριών 3D μοντέλων. Η διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης περιγράφεται αναλυτικά για κάθε μοντέλο, και αναφέρονται σφάλματα, σχεδιαστικές ή και κατασκευαστικές αδυναμίες που προέκυψαν και διορθώθηκαν κατά το σχεδιασμό του επόμενου κατά σειρά 3D μοντέλου.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται η τεχνική στατική ανάλυση του τελικού πρωτοτύπου snap shackle μέσω του προγράμματος προσομοίωσης. Η μελέτη γίνεται για το υλικό με το οποίο συνήθως κατασκευάζονται τα αντίστοιχα προϊόντα της αγοράς, και για τρία υλικά που μπορούν να εκτυπωθούν με προσθετική κατασκευή. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, το πρωτότυπο snap shackle παρουσιάζει πολύ καλή αντοχή συγκριτικά με το αντίστοιχο προϊόν της αγοράς εάν κατασκευαστεί από το υλικό Stainless Steel 17-4 PH.

Συνολικά, η Διπλωματική Εργασία αναδεικνύει τα οφέλη της προσθετικής κατασκευής για το τρισδιάστατο σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση σύνθετων συναρμολογημένων προϊόντων, όπως τα Snap Shackles, η οποία οδηγεί σε βελτίωση της απόδοσης και της λειτουργικότητας ενός προϊόντος, αλλά και σε μείωση του χρόνου και κόστους κατασκευής.

Λέξεις κλειδιά: Προσθετική κατασκευή, Τρισδιάστατη εκτύπωση, FDM, Snap shackle, Στατική ανάλυση, Προσομοίωση, Ναυτιλιακή βιομηχανία.

ABSTRACT

The aim of the Diploma Thesis is the 3D design and additive manufacturing of a prototype snap shackle sailing accessory, with better characteristics compared to corresponding products on the market, considering requirements related to functionality, durability, and the manufacturing process.

Chapter 1 describes the Snap Shackle and its applications and lists related patents. The objective of the Thesis regarding the optimal snap shackle design and the requirements it is expected to satisfy are explained in detail. Chapter 2 includes the historical overview of 3D printing and additive manufacturing technology and describes the modern additive manufacturing techniques and the testing methods followed for the final printed products. The applications of 3D printing in the shipping industry are presented in the same chapter.

In Chapter 3, some of the most common materials of additive manufacturing are presented in detail and a special description is made for the post-processing of the polymer and metal end products to achieve the necessary tightness and strength respectively. Chapter 4 covers the tools for 3D design and 3D printing used in almost all industries to model complex 3D digital models that can then be built into physical prototypes. The tools used in the Diploma Thesis are Autodesk Fusion 360 software, Cura software and Ultimaker S5 3D printer.

Chapter 5 includes the process of designing and optimizing the snap shackle prototype by designing three 3D models. The 3D printing process is described for each model, and any errors or manufacturing weaknesses that were encountered and corrected, are reported. In Chapter 6, the technical static analysis of the final prototype snap shackle is presented, through simulation software. According to the results, the prototype snap shackle shows very good strength compared to the corresponding product on the market, if it will be manufactured with stainless steel 17-4 PH.

Overall, the Thesis highlights the benefits of additive manufacturing for the 3D design and optimization of complex assemblies, such as Snap Shackles, which improve the product's performance and functionality, as well as the manufacturing time and cost.

Key words: Additive manufacturing, 3D printing, FDM, Snap shackle, Snap shackle, Stress simulation, Marine industry.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Περιγραφή Snap Shackle.....	1
1.1. Εισαγωγή.....	1
1.2. Κατοχυρωμένες Παραπλήσιες Πατέντες	3
1.3. Σχεδιασμός και Κατασκευή ενός Βελτιωμένου Μοντέλου Snap Shackle.....	8
Κεφάλαιο 2: Προσθετική Κατασκευή	11
2.1. Η ιστορία της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης.....	11
2.2. Προσθετική Κατασκευή.....	13
2.3. Σύγκριση Προσθετικής Κατασκευής και Αφαιρετικής Κατασκευής	14
2.4. Τεχνικές Προσθετικής Κατασκευής	15
2.4.1. Εναπόθεση συντηγμένου υλικού.....	16
2.4.2. Στερεολιθογραφία.....	17
2.4.3. Επιλεκτική συσσωμάτωση με λέιζερ	19
2.4.4. Επιλεκτική τήξη με λέιζερ	20
2.4.5. Άμεση πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ μετάλλων.....	21
2.4.6. PolyJet 3D Printing	22
2.5. Μέθοδοι Δοκιμών για Αντικείμενα Προσθετικής Κατασκευής	23
2.5.1. Μηχανικές Δοκιμές Ελέγχου Υλικών	23
2.5.2. Μη καταστροφικές Δοκιμές	26
2.5.3. Quasi - Μη Καταστροφικές Δοκιμές.....	28
2.6. Εφαρμογές Τρισδιάστατης Εκτύπωσης στη Ναυπηγική και τη Ναυτιλία.....	29
Κεφάλαιο 3: Υλικά Τρισδιάστατης Εκτύπωσης.....	32
3.1. Πολυγαλακτικό Οξύ - PLA.....	32
3.2. Ακρυλονιτρίλιο Βουταδιένιο Στυρένιο - ABS.....	32
3.3. Πολυβινυλική Αλκοόλη - PVA.....	33
3.4. Τερεφθαλικό Πολυαιθυλένιο τροποποιημένο με Γλυκόλη - PETG	33
3.5. Νάιλον - Nylon	34
3.6. Θερμοπλαστική Πολυουρεθάνη - TPU.....	35

3.7.	Poly-Ether-Ether-Ketone - PEKK.....	35
3.8.	Ανοξείδωτος Χάλυβας 304L.....	36
3.9.	Ανοξείδωτος Χάλυβας 17-4PH.....	37
3.10.	Μετεπεξεργασία Πολυμερών Υλικών για Ενίσχυση της Στεγανότητας.....	38
3.11.	Μετεπεξεργασία Μεταλλικών Υλικών για Ενίσχυση της Αντοχής.....	39
Κεφάλαιο 4: Εργαλεία Τρισδιάστατου Σχεδιασμού και Τρισδιάστατης Εκτύπωσης.....		41
4.1.	Συστήματα Τρισδιάστατης Μοντελοποίησης	41
4.2.	Τρισδιάστατος Εκτυπωτής Ultimaker S5.....	42
4.3.	Λογισμικό 3D Εκτύπωσης Ultimaker Cura	43
4.4.	Βασικές Παράμετροι Εκτύπωσης	44
Κεφάλαιο 5: Διαδικασία Τρισδιάστατου Σχεδιασμού και Εκτύπωσης των Πρωτότυπων Μοντέλων .		46
5.1.	Αρχική Ιδέα (concept design)	46
5.2.	Σχεδιασμός και Εκτύπωση 1ου μοντέλου.....	47
5.3.	Σχεδιασμός και Εκτύπωση Τροποποιημένου 2ου Μοντέλου	67
5.4.	Σχεδιασμός και Εκτύπωση Βελτιστοποιημένου 3ου Μοντέλου.....	79
Κεφάλαιο 6: Τεχνική Ανάλυση και Προσομοίωση Βελτιστοποιημένου Πρωτότυπου Μοντέλου		91
6.1.	Καθορισμός Οριακών Συνθηκών.....	91
6.2.	Αποτελέσματα Προσομοίωσης με Ανοξείδωτο Χάλυβα SS 304.....	94
6.3.	Αποτελέσματα Προσομοίωσης με PEKK ενισχυμένο με ίνες άνθρακα.....	97
6.4.	Αποτελέσματα Προσομοίωσης με Ανοξείδωτο Χάλυβα 17-4 PH (Markforged).....	99
6.5.	Αποτελέσματα Προσομοίωσης με Ανοξείδωτο Χάλυβα 17-4 PH UNS S17400	101
6.6.	Σύγκριση Πρωτότυπου Μοντέλου με Αντίστοιχο Προϊόν της Αγοράς.....	105
Κεφάλαιο 7: Γενετικός Σχεδιασμός για Προσθετική Κατασκευή		108
Κεφάλαιο 8: Επίλογος.....		110
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		112

Κεφάλαιο 1: Περιγραφή Snap Shackle

1.1. Εισαγωγή

Τα Snap shackles χρησιμοποιούνται κυρίως στην ιστιοπλοΐα και σε άλλες ναυτιλιακές δραστηριότητες και έχουν σχεδιαστεί για να επιτρέπουν τη γρήγορη και εύκολη σύνδεση και απόσπαση σχοινιών, πανιών και σχετικού εξοπλισμού.

Τα Snap Shackles αποτελούνται από τον κύριο κορμό στον οποίο συνήθως συγκρατείται ο μηχανισμός που ασφαρίζεται με τη χρήση μάνδαλου, πείρου ή ελατηρίου, και διατηρεί σε κλειστή θέση έναν στρεφόμενο βραχίονα (Εικόνα 1). Η διάταξη αυτή, λειτουργεί ως συγκρατητικό μέσον μεταξύ σχοινιών και διαφόρων άλλων εξαρτημάτων και δίνει την ευχέρεια στο χρήστη να το απασφαλίσει με μια γρήγορη κίνηση, ανοίγοντας το στρεφόμενο βραχίονα και ελευθερώνοντας το μηχανισμό.



Εικόνα 1 Αριστερά: Snap Shackle (Tylaska, n.d.) και Δεξιά: Snap Shackle (Wichard, n.d.).

Ορισμένες από τις πιο συνηθισμένες εφαρμογές των snap shackles είναι στη ναυσιπλοΐα και την ιστιοπλοΐα όπου χρησιμοποιούνται στις αρματωσιές των πανιών και των ξαρτιών (Εικόνα 2). Χρησιμοποιούνται επίσης και σε άλλους τομείς όπως η εξάρτηση βαρέως εξοπλισμού και μηχανημάτων στις βιομηχανίες και σε επιχειρήσεις διάσωσης όπου η ταχεία σύνδεση και αποσύνδεση σχοινιών είναι αναγκαία. Έχουν σχεδιαστεί για να αντέχουν τις δυνάμεις που ασκούνται σε αυτά στις προβλεπόμενες εφαρμογές τους. Είναι κατασκευασμένα από ισχυρά,

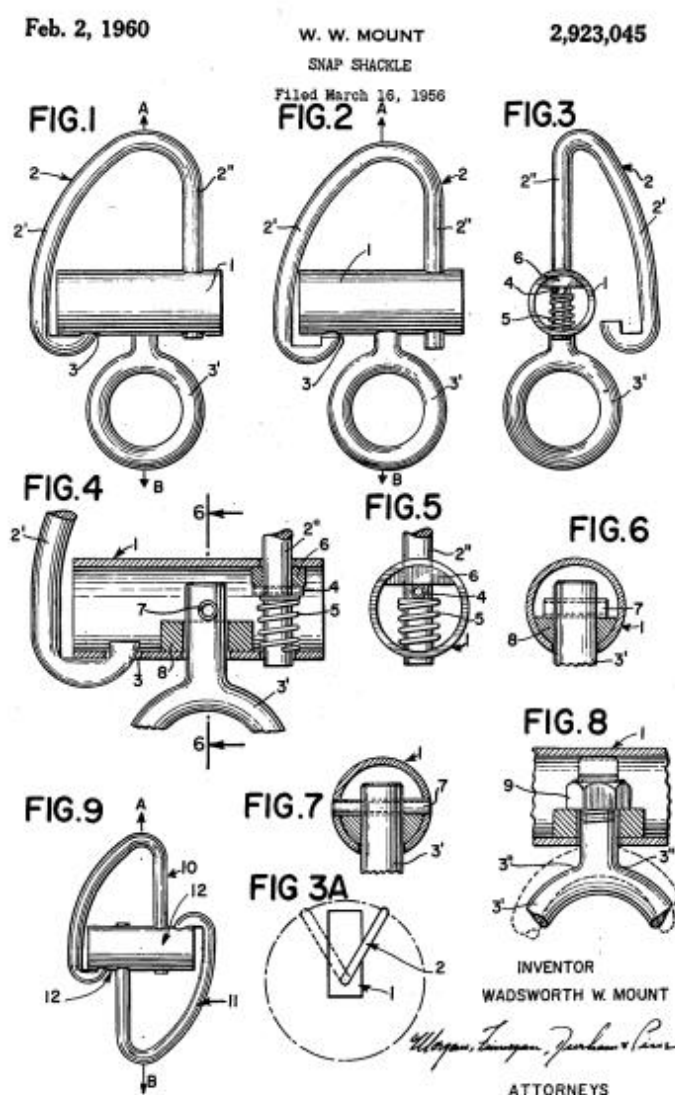
ανθεκτικά στη διάβρωση υλικά, όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας, και έχουν σχεδιαστεί για να είναι εύχρηστα ακόμη και σε δύσκολες συνθήκες, όπως σε περιβάλλον με υγρασία και αέρα ή όταν ο χρήστης φοράει γάντια προστασίας.



Εικόνα 2 Τοπικές εφαρμογές Snap Shackle στη ναυτιλία. Πηγή: <https://www.snowlhk.com/boat-accessories/marine-accessories/stainless-steel-jaw-swivel-snap-shackle.html>

1.2. Κατοχυρωμένες Παραπλήσιες Πατέντες

Η πρώτη πατέντα snap shackle χρονολογείται το 1956 και κατοχυρώθηκε από τον εφευρέτη Wadsworth W. Mount με αριθμό πατέντας US2923045A (Mount, 1956). Η λειτουργία της είναι παρόμοια με το μηχανισμό ενός λουκέτου. Πιο συγκεκριμένα ένα ελατήριο συγκρατεί το μηχανισμό κλειδωμένο ώστε να τον αποτρέψει να ανοίξει, έως ότου ασκηθεί μια συγκεκριμένη δύναμη. Μόλις το ελατήριο τραβηχτεί προς τα κάτω, απελευθερώνεται το άκρο του βραχίονα που ασφαλίζει στον κορμό και ο βραχίονας μπορεί να περιστραφεί, ελευθερώνοντας το μηχανισμό.

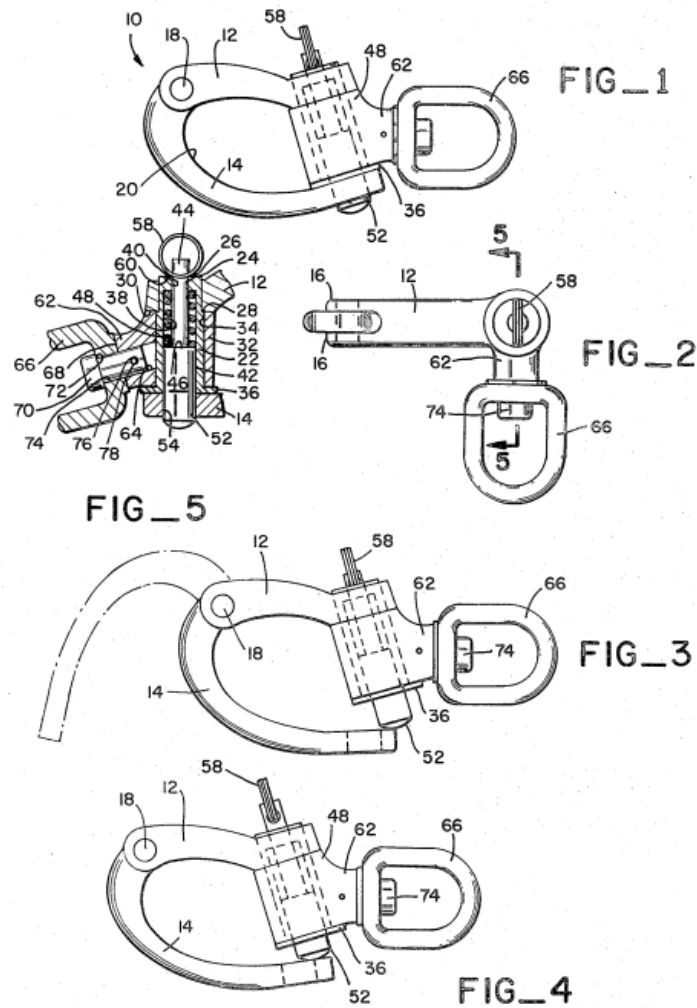


Εικόνα 3 Snap shackle Wadsworth W. Mount, (1956). US Patent No. 2923045A. United States Patent, 1960.

Πηγή: <https://patentimages.storage.googleapis.com/84/d3/65/9a8e3637c8be97/US2923045.pdf>

- FIG.1 Πλάγια όψη σε κλειστή και κλειδωμένη θέση.*
- FIG.2 Πλάγια όψη σε κλειστή και ξεκλειδωτη θέση.*
- FIG.3 Όψη που δείχνει το βραχίονα σε ανοιχτή θέση μετατοπισμένο σε θέση 90 μοιρών από την αρχική θέση, και λεπτομέρειες του εσωτερικού του κορμού.*
- FIG.4 Τμήμα όψης που παρουσιάζει αναλυτικά τη σχέση των εξαρτημάτων στο εσωτερικό του κορμού.*
- FIG.5 Λεπτομέρεια του ελατηρίου που απεικονίζεται και στη FIG.4.*
- FIG.6 Λεπτομέρεια κατά το επίπεδο τομής 6-6 της FIG.4, όπου φαίνονται οι λεπτομέρειες του τρόπου ασφάλισης του περιστρεφόμενου άκρου.*
- FIG.7 Λεπτομέρεια κατά το επίπεδο τομής 6-6 της FIG.4, που απεικονίζει έναν άλλο τρόπο ασφάλισης του περιστρεφόμενου άκρου.*
- FIG.8 Απεικόνιση εναλλακτικού τρόπου ασφάλισης του περιστρεφόμενου άκρου.*
- FIG.9 Πλάγια όψη που παρουσιάζει μια διπλή διάταξη βραχίονα.*

Η δεύτερη πατέντα snap shackle κατοχυρώθηκε από τον εφευρέτη S. Hultin το 1974 με αριθμό πατέντας US3850468A (Hultin, 1973). Στη συγκεκριμένη πατέντα παρατηρείται για πρώτη φορά η χρήση πείρου ο οποίος κλειδώνει το στρεφόμενο βραχίονα. Ο κύριος κορμός αποτελείται από το σταθερό μέρος, στο εσωτερικό του οποίου βρίσκεται ο πείρος ασφάλισης, και από το στρεφόμενο βραχίονα. Εκτός από την περιστροφική κίνηση κατά το ύψος λόγω του περιστρεφόμενου άκρου, ο κύριος κορμός μπορεί επίσης να “διπλώσει” και στη μέση, όπως φαίνεται στη FIG_2 της Εικόνας 4.



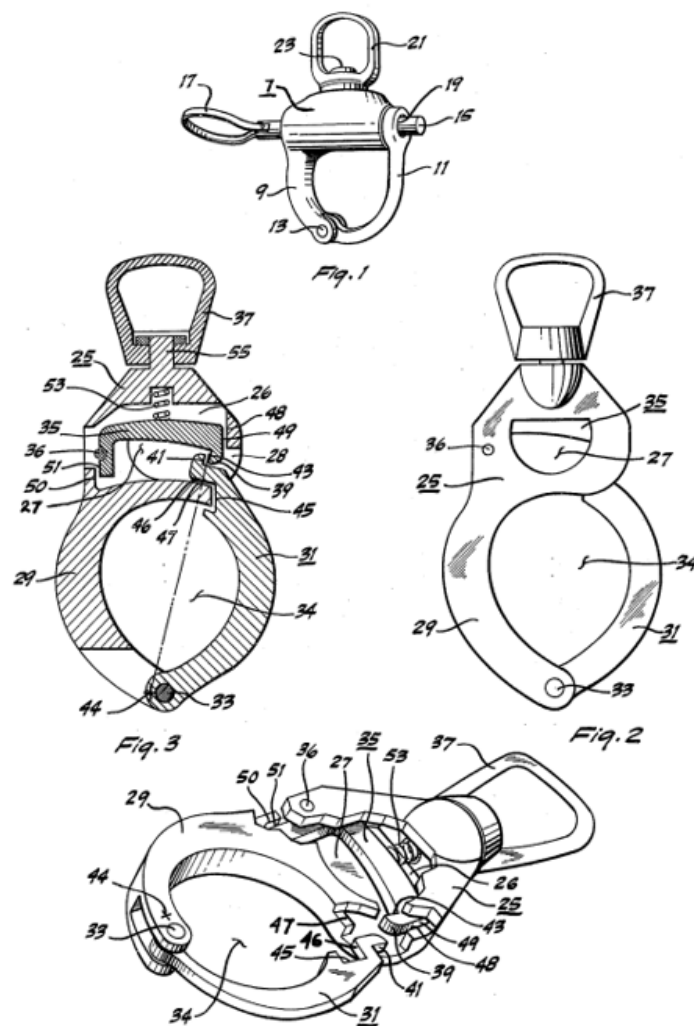
Εικόνα 4 Snap-shackle S. Hultin, (1973). US Patent No. 2923045A. United States Patent, 1974. Πηγή:
<https://patentimages.storage.googleapis.com/50/f6/56/90f22b4137ed7c/US3850468.pdf>

- FIG_1* Πλάγια όψη σε κλειδωμένη φάση.
- FIG_2* Κάτοψη με το περιστρεφόμενο μέρος του κορμού στραμμένο κατά 90 μοίρες.
- FIG_3* Πλάγια όψη σε ξεκλειδωτή φάση. Με διακεκομμένη γραμμή φαίνεται ο βραχίονας σε ανοιχτή θέση.
- FIG_4* Πλάγια όψη που δείχνει τον πείρο ασφαλείας μερικώς συμπιεσμένο προς τα πάνω λίγο πριν τη θέση απελευθέρωσης του βραχίονα.
- FIG_5* Τομή κατά το επίπεδο τομής 5-5 της FIG_2 κατά τον άξονα του πείρου προς την κατεύθυνση που δείχνουν τα βέλη.

Μετά από δύο χρόνια, το 1974, ο εφευρέτης Theodore F. Mangels κατοχύρωσε ένα διαφορετικό snap shackle με αριθμό πατέντας US3930290A (Mangels, 1974). Στη συγκεκριμένη πατέντα εμφανίζεται για πρώτη φορά η χρήση μάνδαλου για την ασφάλιση του στρεφόμενου βραχίονα. Το snap shackle αποτελείται από έναν μικρό πείρο που απεικονίζεται στο νούμερο 36 της Εικόνας 5, ένα ελατήριο που ασκεί την απαραίτητη δύναμη για να παραμείνει κλειστός ο μηχανισμός και απεικονίζεται στο νούμερο 53, και το μάνδαλο που απεικονίζεται στο νούμερο 35.

U.S. Patent Jan. 6, 1976

3,930,290



Εικόνα 5 Snap-shackle Theodore F. Mangels, (1974). US Patent No. 2923045A. United States Patent, 1976.

Πηγή: <https://patentimages.storage.googleapis.com/77/00/bd/81b8f7d87d3517/US3930290.pdf>

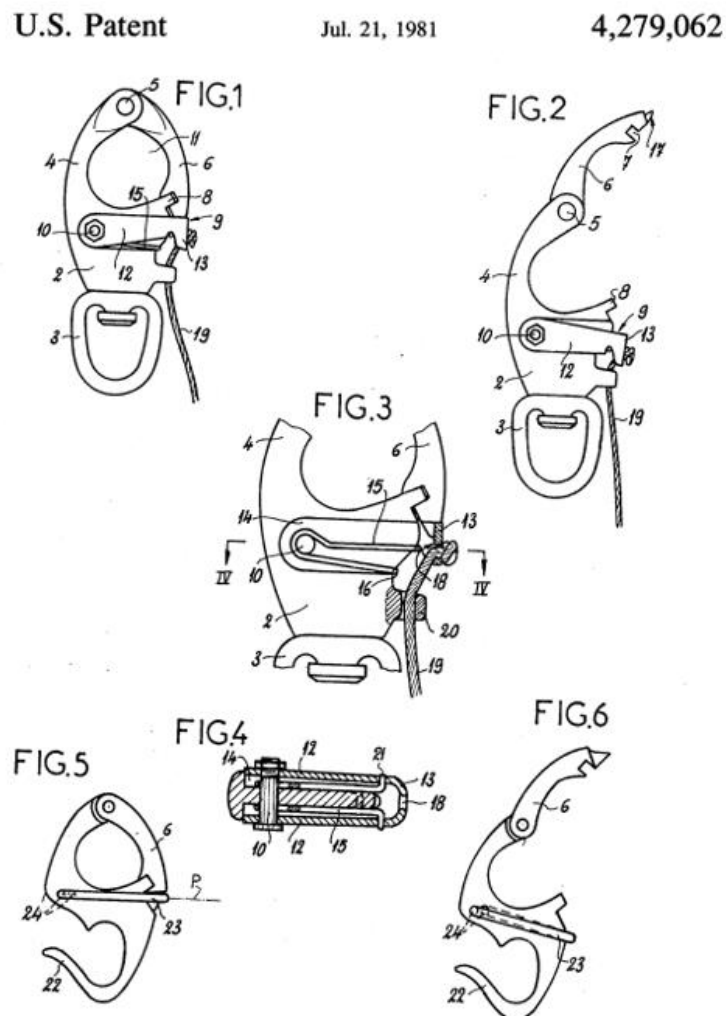
FIG.1 Προοπτική όψη ενός snap shackle απλοϊκού σχεδιασμού με απλό πείρο.

FIG.2 Πρόοψη snap shackle της πατέντας με το μάνδαλο (νούμερο 35).

FIG.3 Τομή της FIG.2, που απεικονίζει τα εσωτερικά χαρακτηριστικά (πείρο, ελατήριο, μάνδαλο).

FIG.4 Προοπτική όψη του snap shackle.

Το 1979 ο Michel Boissonnet εφηύρε την πατέντα με αριθμό US4279062 (Boissonnet, 1979). Σε αυτό το snap shackle ο Boissonnet εφάρμοσε την ίδια αρχή ασφάλισης του στρεφόμενου βραχίονα με την προαναφερθείσα πατέντα του Mangels. Η κύρια διαφορά είναι στο σχεδιασμό του μάνδαλου που επιτρέπει την απελευθέρωση του συστήματος από το χρήστη από μεγαλύτερη απόσταση. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός σχοινιού (νούμερο 19) που δένεται πάνω στο μάνδαλο (νούμερο 12) και στη συνέχεια περνάει από έναν σωλήνα (νούμερο 20) προσκολλημένο στον κύριο κορμό (νούμερο 2).



Εικόνα 6 Snap shackle Michel Boissonnet (1979). US Patent No.4279062A. United States Patent, 1981. Πηγή:

<https://patentimages.storage.googleapis.com/d0/1c/5d/9d78ec95b4418b/US4279062.pdf>

<i>FIG.1</i>	<i>Πλάγια όψη σε κλειδωμένη φάση.</i>
<i>FIG.2</i>	<i>Πλάγια όψη σε ξεκλειδωτη και ανοιχτή φάση.</i>
<i>FIG.3</i>	<i>Τομή στην οποία απεικονίζεται ο μηχανισμός ασφάλισης με το σχοινί.</i>
<i>FIG.4</i>	<i>Λεπτομέρεια του άξονα του μάνδαλου κατά το επίπεδο τομής IV-IV της FIG.3.</i>
<i>FIG.5</i>	<i>Πλάγια όψη απλοϊκού σχεδιασμού snap shackle με απλό γάντζο ασφαλισμένο.</i>
<i>FIG.6</i>	<i>Πλάγια όψη απλοϊκού σχεδιασμού snap shackle με απλό γάντζο απασφαλισμένο.</i>

1.3. Σχεδιασμός και Κατασκευή ενός Βελτιωμένου Μοντέλου Snap Shackle

Υπάρχουν πολλά διαφορετικά προϊόντα snap shackles στην αγορά τα οποία διαφοροποιούνται ως προς τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού όπως το σχήμα και το μέγεθος, ως προς το τρόπο συγκράτησης και απελευθέρωσης του μηχανισμού, αλλά και ως προς το υλικό κατασκευής.



Εικόνα 7 Αριστερά: Snap Shackle (Tylaska, n.d.) και Δεξιά: Snap Shackle (Wichard, n.d.).

Ωστόσο τα διαθέσιμα snap shackles της αγοράς παρουσιάζουν ορισμένα μειονεκτήματα όπως:

- 1) Μηχανισμός απελευθέρωσης: Για να επιτευχθεί η απελευθέρωση του συστήματος συνήθως είναι αναγκαίο είτε να εισχωρήσει το δάκτυλο του χεριού σε μια υποδοχή και να πιεστεί μια σκανδάλη προς τα κάτω για να ανοίξει ο μηχανισμός συγκράτησης όπως

στο αριστερό snap shackle της Εικόνας 7, είτε να τραβηχτεί με το δάκτυλο του χεριού ένας κρίκος όπως στο δεξιό snap shackle της Εικόνας 7.

- 2) Χρόνος απελευθέρωσης: Και οι δυο τύποι απαιτούν καταρχάς την εύρεση του μέσου απελευθέρωσης (σκανδάλη ή κρίκος) και στη συνέχεια την εξάσκηση μιας μικρής δύναμης με το δάκτυλο. Και στις δύο περιπτώσεις η διαδικασία απαιτεί επιδεξιότητα από το χρήστη ώστε να γίνει αποτελεσματικά και γρήγορα.
- 3) Πολυπλοκότητα κατασκευής: Το τελικό προϊόν αποτελείται από επιμέρους εξαρτήματα και ο τρόπος συναρμολόγησής τους απαιτεί ειδικό εξοπλισμό, εργαλεία και εκπαιδευμένο προσωπικό.

Στόχος της Διπλωματικής Εργασίας είναι να σχεδιαστεί και να κατασκευαστεί ένα νέο βελτιωμένο πρωτότυπο snap shackle, το οποίο θα μπορεί να εξαλείψει ορισμένα από τα παραπάνω μειονεκτήματα. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος θα ληφθούν υπόψιν απαιτήσεις που σχετίζονται με τη λειτουργικότητα και τον τρόπο κατασκευής που αναφέρονται στη συνέχεια.

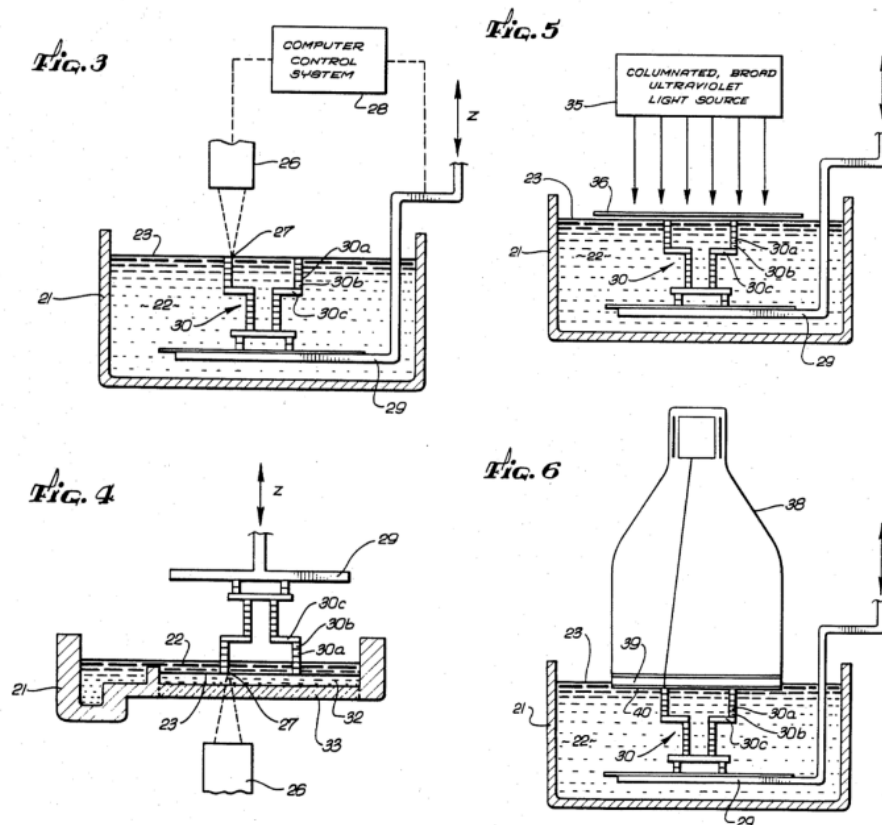
- 1) Υλικό. Στόχος του σχεδιασμού ενός νέου προϊόντος θα πρέπει να είναι η μείωση της ποσότητας του υλικού που απαιτείται για την κατασκευή, η χρήση ανακυκλώσιμων υλικών και η μείωση της κατανάλωσης ορυκτών και μετάλλων. Το νέο προϊόν θα πρέπει να αποτελεί μια ελαφριά σε βάρος κατασκευή που να έχει τις απαραίτητες επιθυμητές ιδιότητες.
- 2) Λειτουργία: Το νέο προϊόν θα πρέπει να είναι πλήρως λειτουργικό, εύκολο στη χρήση και να αντέχει στα ασκούμενα φορτία.
- 3) Μηχανισμός απελευθέρωσης: Στόχος του νέου σχεδιασμού είναι η ταχύτερη απελευθέρωση του συστήματος, και η μέγιστη ασφάλεια κατά τη συγκράτηση σε κλειστή θέση.
- 4) Διάθεση: Στόχος είναι η άμεση και επιτόπια κατασκευή του προϊόντος. Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορεί να υποστηρίξει αυτή την απαίτηση ακόμα και σε ένα σκάφος εν πλω, σε περίπτωση που το snap shackle πρέπει να αντικατασταθεί και δεν υπάρχει διαθέσιμο ανταλλακτικό στο σκάφος.
- 5) Κατασκευή: Στόχος είναι η εύκολη και ταχεία κατασκευή του νέου προϊόντος εξαλείφοντας την ανάγκη συναρμολόγησης των επιμέρους εξαρτημάτων.

Με βάση τις παραπάνω απαιτήσεις το νέο προϊόν snap shackle θα σχεδιαστεί κατά τέτοιον τρόπο ώστε να αποτελεί μια απλή στη χρήση και λειτουργική κατασκευή, να είναι από υλικό που να ικανοποιεί τις απαιτήσεις αντοχής, να μπορεί να κατασκευαστεί άμεσα με ένα τρισδιάστατο εκτυπωτή που θα υπάρχει στο σκάφος, και να εκτυπωθεί ως ένα ενιαίο αντικείμενο εξαλείφοντας την ανάγκη για ξεχωριστές εκτυπώσεις των επιμέρους εξαρτημάτων και συναρμολόγηση αυτών.

Κεφάλαιο 2: Προσθετική Κατασκευή

2.1. Η ιστορία της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

Η πρώτη αναφορά σχετικά με τη τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης για τη δημιουργία στερεών αντικειμένων εντοπίζεται στις αρχές της δεκαετίας του 1981 στην Ιαπωνία, όπου ο Dr. Hideo Kodama ανέπτυξε ένα σύστημα ταχείας κατασκευής πρωτοτύπου χρησιμοποιώντας μια φωτοευαίσθητη ρητίνη που πολυμεριζόταν από το υπεριώδες φως. Αυτή η τεχνική αποτελεί την πρόωμη έκδοση της Στερεολιθογραφίας (Stereolithography - SLA). Αξίζει να σημειωθεί πως λόγω της έλλειψης του λογότυπου κατά την υποβολή όλων των υποχρεωτικών εγγράφων για την ευρεσιτεχνία, η πατέντα του Dr. Hideo Kodama απορρίφθηκε. Η πρώτη επίσημη πατέντα (Εικόνα 8) κατατέθηκε περίπου έξι χρόνια μετά από τον Charles Hull, ο οποίος στη συνέχεια ίδρυσε την εταιρεία 3D Systems Corporation, η οποία είναι πλέον μια από τις μεγαλύτερες κατασκευαστικές εταιρείες 3D εκτυπωτών και υλικών εκτύπωσης (Charman, 2020).



Εικόνα 8 Πρώτη κατοχυρωμένη πατέντα 3D εκτύπωσης. Πηγή: <https://www.cdn-inc.com/the-advancements-of-3d-printing/>

Το 1988 ο Carl Deckard ανέπτυξε την τεχνική της Επιλεκτικής Πυροσυσσωμάτωσης με Λείζερ (Selective Laser Sintering - SLS) ενώ ήταν φοιτητής στο Πανεπιστήμιο του Τέξας. Πρόκειται για μια τεχνική τρισδιάστατης εκτύπωσης που χρησιμοποιεί λέιζερ για τη σύντηξη κονιοποιημένου υλικού σε στερεές δομές.

Το 1989 ο Scott Crump κατοχύρωσε επίσης με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας την τεχνική Εναπόθεση Συντηγμένου Υλικού (Fused Deposition Modeling) και ίδρυσε την εταιρεία Stratasys, μια κορυφαία εταιρεία στον κλάδο της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Η τεχνική FDM περιλαμβάνει την εξώθηση ενός θερμοπλαστικού υλικού μέσω ενός ακροφυσίου για τη δημιουργία στρωμάτων και τη δημιουργία του τρισδιάστατου αντικειμένου.

Την ίδια χρονιά, η εταιρεία του Charles Hull, 3D Systems Corporation, κυκλοφόρησε τον 3D εκτυπωτή SLA-1, ο οποίος ήταν ο πρώτος εμπορικός 3D εκτυπωτής που εφάρμοσε τη τεχνική της Στερεολιθογραφίας. Η τεχνική αυτή στηρίζεται στη χρήση λέιζερ για τη στερεοποίηση στρωμάτων φωτοπολυμερούς ρητίνης με σκοπό τη δημιουργία ενός τρισδιάστατου αντικειμένου. Αυτές οι τρεις τεχνικές - SLS, FDM και SLA - είναι οι πλέον χρησιμοποιούμενες και έχουν συμβάλει καθοριστικά στην ανάπτυξη της βιομηχανίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης (BCN3D, 2020).

Τη δεκαετία του 2000 παράλληλα με την ανάπτυξη της τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης, αναπτύχθηκαν λογισμικά ανοιχτού κώδικα, καθιστώντας έτσι την τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης προσβάσιμη σχεδόν σε οποιονδήποτε διαθέτει υπολογιστή. Το RepRap (συντομογραφία του Replicating Rapid-prototyper) ήταν ένα έργο που πραγματοποιήθηκε το 2005 με στόχο την κατασκευή ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή από τρισδιάστατα εκτυπωμένα εξαρτήματα. Η επιτυχία του έργου RepRap ήταν καταλύτης για την άνοδο των εμπορικών τρισδιάστατων εκτυπωτών. Πολλά διπλώματα ευρεσιτεχνίας κατατέθηκαν τη δεκαετία του 1980 σχετικά με εκτυπωτές τεχνολογίας FDM, ενώ υπήρξε μεγάλη αύξηση των κατασκευαστικών εταιρειών τρισδιάστατων εκτυπωτών, όπως για παράδειγμα η εταιρεία Makerbot η οποία ιδρύθηκε το 2009. Η Makerbot έκανε προσιτή την τρισδιάστατη εκτύπωση τόσο για επαγγελματίες όσο και για ερασιτέχνες «κατασκευαστές», μέσω της πώλησης λογισμικού ανοιχτού κώδικα Do It Yourself που επέτρεπε στους πελάτες να κατασκευάσουν τους δικούς τους τρισδιάστατους εκτυπωτές. Αξίζει να αναφερθεί πώς η εταιρεία στις 31 Αυγούστου 2022, συγχωνεύτηκε με την εταιρία Ultimaker όπου και κρατά και το πλειοψηφικό μερίδιο της νέας εταιρείας που δημιουργήθηκε (Makerbot, 2022).

Στις μέρες μας, η τρισδιάστατη εκτύπωση χρησιμοποιείται σχεδόν σε όλες τις βιομηχανίες, όπως η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία, οι κατασκευές, η αρχιτεκτονική, και ο τομέας υγείας (Charman, 2020). Η ανάπτυξη προγραμμάτων Η/Υ τρισδιάστατης σχεδίασης (Computer-Aided Design – CAD) επιτρέπει τη δημιουργία περίπλοκων και σύνθετων 3D ψηφιακών μοντέλων τα οποία στη συνέχεια μπορούν να κατασκευαστούν σε φυσικά πρωτότυπα σε 3D εκτυπωτές. Επιπλέον έχουν δημιουργηθεί διαδικτυακοί ιστότοποι οι οποίοι φιλοξενούν εκατοντάδες δωρεάν και επί πληρωμή αρχεία 3D ψηφιακών μοντέλων, όπως ο ιστότοπος Thingiverse, ο οποίος είναι από τις μεγαλύτερες διαδικτυακές κοινότητες για τρισδιάστατη εκτύπωση στον κόσμο.

2.2. Προσθετική Κατασκευή

Η Προσθετική Κατασκευή (Addictive Manufacturing – AM) είναι ένας όρος που αναφέρεται στη δημιουργία ενός αντικειμένου, εξαρτήματος ή συναρμολογημένου συνόλου, προσθέτοντας το υλικό σε στρώσεις. Επιτρέπει την κατασκευή στερεών αντικειμένων από τρισδιάστατα ψηφιακά μοντέλα και την υλοποίηση πολύπλοκων γεωμετρικών μορφών με σύνθετες εσωτερικές λεπτομέρειες. Διαφοροποιείται από τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής και τις κατεργασίες CNC (Computer Numerical Control) όπου τα τελικά εξαρτήματα κατασκευάζονται αφαιρώντας υλικό από μια προκατασκευασμένη μορφή (subtractive manufacturing). Σε ορισμένες περιπτώσεις, η προσθετική κατασκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συμπλήρωμα των παραπάνω μεθόδων κατασκευής. Σε άλλες περιπτώσεις, αποτελεί το μοναδικό μέσο με το οποίο μπορούν να κατασκευαστούν πολύπλοκα προϊόντα.

Αρχικά η τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής χρησιμοποιήθηκε για την Ταχεία Κατασκευή Πρωτοτύπων (Rapid Prototyping – RP) . Το Rapid Prototyping είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει μια ποικιλία τεχνικών και τεχνολογιών που επιτρέπουν στους σχεδιαστές και τους μηχανικούς να δημιουργούν γρήγορα τα φυσικά μοντέλα των σχεδίων τους. Αυτά τα μοντέλα, γνωστά ως πρωτότυπα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δοκιμή και αξιολόγηση του σχεδιασμού, τον εντοπισμό πιθανών προβλημάτων και την πραγματοποίηση απαραίτητων αλλαγών πριν από την παραγωγή του τελικού προϊόντος. Επιτρέπει επίσης στους σχεδιαστές να επαναλάβουν γρήγορα και να δημιουργούν πολλαπλές εκδόσεις ενός πρωτοτύπου σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Ενώ η προσθετική κατασκευή χρησιμοποιήθηκε αρχικά για την κατασκευή πρωτοτύπων, τώρα εφαρμόζεται όλο και περισσότερο για την κατασκευή τελικών προϊόντων. Καθώς η διαδικασία κατασκευής γίνεται σε στρώσεις, είναι πολύ πιο γρήγορη από τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής, όπως η χύτευση ή η μηχανική κατεργασία, και δύναται να μειώσει τον χρόνο που απαιτείται για την παραγωγή ενός προϊόντος από εβδομάδες σε λίγες μόνο ημέρες. Αυτή η δυνατότητα είναι ιδιαίτερα ελκυστική για βιομηχανίες που απαιτούν γρήγορους χρόνους παραγωγής, όπως η αεροδιαστημική και η ιατρική. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό γνώρισμα της AM είναι η επιτόπου και άμεση παραγωγή. Ενώ οι συμβατικές και CNC κατεργασίες πραγματοποιούνται κυρίως σε μια κεντρική εγκατάσταση όπως το μηχανουργείο, με τα παραγόμενα εξαρτήματα να διανέμονται στη συνέχεια στους τελικούς πελάτες, η AM έχει τη δυνατότητα κατασκευής προϊόντων στο χώρο χρήσης ή λειτουργίας τους.

Το φάσμα των διαθέσιμων υλικών που μπορούν σήμερα να εκτυπωθούν διευρύνεται συνεχώς και με ταχείς ρυθμούς. Υλικά όπως μέταλλα, πλαστικά, κεραμικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Νέα συμβατικά ή προηγμένα υλικά ελέγχονται ως προς τη δυνατότητα εκτύπωσής τους αλλά και τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Επιπλέον η μη αφαίρεση υλικού μπορεί να μειώσει δραστικά τη σπατάλη υλικού και την σχετική κατανάλωση ενέργειας, οδηγώντας σε μια πιο βιώσιμη παραγωγή (Gibson et al, 2010).

2.3. Σύγκριση Προσθετικής Κατασκευής και Αφαιρετικής Κατασκευής

Η Προσθετική Κατασκευή είναι μια νέα τεχνολογία κατασκευής τρισδιάστατων αντικειμένων εφαρμόζοντας το υλικό σε στρώσεις που έχει φέρει επανάσταση στον τομέα ανάπτυξης προϊόντων. Η σύγκριση αυτής της τεχνολογίας με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής (τόρνευση, φρεζάρισμα, χύτευση, κ.λπ.) αλλά και τις CNC κατεργασίες παρουσιάζει σημαντικές διαφορές. Αρχικά ο τρόπος κατασκευής κατά τον οποίο εφαρμόζεται το υλικό σε στρώσεις κατά ένα καθορισμένο 2D προφίλ, επιτρέπει την παραγωγή περίπλοκων σχημάτων που μπορεί να έχουν εσωτερικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά που είναι αδύνατο να επιτευχθούν με τις μεθόδους αφαιρετικής κατασκευής (subtractive manufacturing). Επίσης επιτυγχάνεται εξοικονόμηση υλικού καθώς χρησιμοποιείται μόνο η απαραίτητη ποσότητα υλικού σύμφωνα με το 3D ψηφιακό μοντέλο. Τέλος, διευκολύνεται η δημιουργία πρωτοτύπων προϊόντων στο χώρο του χρήστη εύκολα και γρήγορα με τη βοήθεια ενός απλού 3D εκτυπωτή, χωρίς να απαιτείται η γνώση χειρισμού συμβατικών και CNC εργαλειομηχανών.

Αντίθετα, οι μέθοδοι αφαιρετικής κατασκευής απαιτούν εργαλειομηχανές και εργαλεία βιομηχανικού τύπου και συνήθως μεγάλης αξίας. Επιπλέον, κατά την κατεργασία αφαιρείται υλικό από το αρχικό δοκίμιο, το οποίο εάν δεν μπορεί να ανακυκλωθεί ή να επαναχρησιμοποιηθεί, απορρίπτεται ως απόβλητο. Τέλος η διαδικασία δημιουργίας αντικειμένων με πολύπλοκες εσωτερικές κοιλότητες είναι πολύ δύσκολη και μερικές φορές αδύνατη λόγω της φύσης της κατεργασίας. Ωστόσο, για κατασκευή μεγάλης ποσότητας τελικών προϊόντων σε γραμμή παραγωγής (μαζική παραγωγή) οι μέθοδοι αφαιρετικής κατασκευής αποτελούν την πιο συμφέρουσα επιλογή.

Παρά τα πλεονεκτήματα της προσθετικής κατασκευής υπάρχουν και σημαντικά μειονεκτήματα, όπως η περιορισμένη γκάμα υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, ο περιορισμός στον όγκο του αντικειμένου που μπορεί να εκτυπωθεί, και η υψηλή τιμή των εκτυπωτών μετάλλου και των εκτυπωμένων μεταλλικών προϊόντων (καθώς αποτελεί μια αρκετά νέα τεχνολογία κατασκευής).

Συνοψίζοντας, παρόλο που η προσθετική κατασκευή έχει πολλά πλεονεκτήματα έναντι της αφαιρετικής κατασκευής, δεν αποτελεί ακόμη μια καθολικά εφαρμόσιμη λύση. Το μέγεθος και η πολυπλοκότητα του αντικειμένου που παράγεται, τα υλικά που χρησιμοποιούνται και ο απαιτούμενος όγκος παραγωγής είναι μερικές μόνο από τις μεταβλητές που επηρεάζουν την επιλογή μεταξύ των δύο διαφορετικών τεχνολογιών. Καθώς η τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής αναπτύσσεται και χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο, είναι πολύ πιθανό να υπάρξει αύξηση του αριθμού των προϊόντων που παράγονται με τη χρήση αυτής της τεχνολογίας. Ωστόσο, οι συμβατικές και CNC κατεργασίες θα εξακολουθήσουν να είναι ζωτικής σημασίας για πολλές βιομηχανίες και κυρίως σε κατασκευές που απαιτείται υψηλή διαστασιολογική και γεωμετρική ακρίβεια (Kumar et al, 2019).

2.4. Τεχνικές Προσθετικής Κατασκευής

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές προσθετικής κατασκευής, καθεμία από τις οποίες χρησιμοποιεί διαφορετική μέθοδο και υλικά για να δημιουργήσει το φυσικό αντικείμενο από το 3D ψηφιακό μοντέλο. Η επιλογή εξαρτάται από τη συγκεκριμένη εφαρμογή και τις απαιτήσεις – προδιαγραφές του τελικού προϊόντος, λαμβάνοντας υπόψιν τις δυνατότητες, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της έκαστης τεχνικής προσθετικής κατασκευής.

2.4.1. Εναπόθεση συντηγμένου υλικού

Η Εναπόθεση Συντηγμένου Υλικού (Fused Deposition Modelling – FDM) ή αλλιώς Κατασκευή Συντηγμένου Νήματος (Fused Filament Fabrication – FFF) είναι η πιο δημοφιλής τεχνική προσθετικής κατασκευής που χρησιμοποιεί νήμα από πολυμερές υλικό που εξωθείται μέσω ενός θερμαινόμενου ακροφυσίου σε τηγμένη μορφή και τοποθετείται σε στρώσεις για τη δημιουργία του τρισδιάστατου στερεού αντικειμένου (Εικόνα 9).

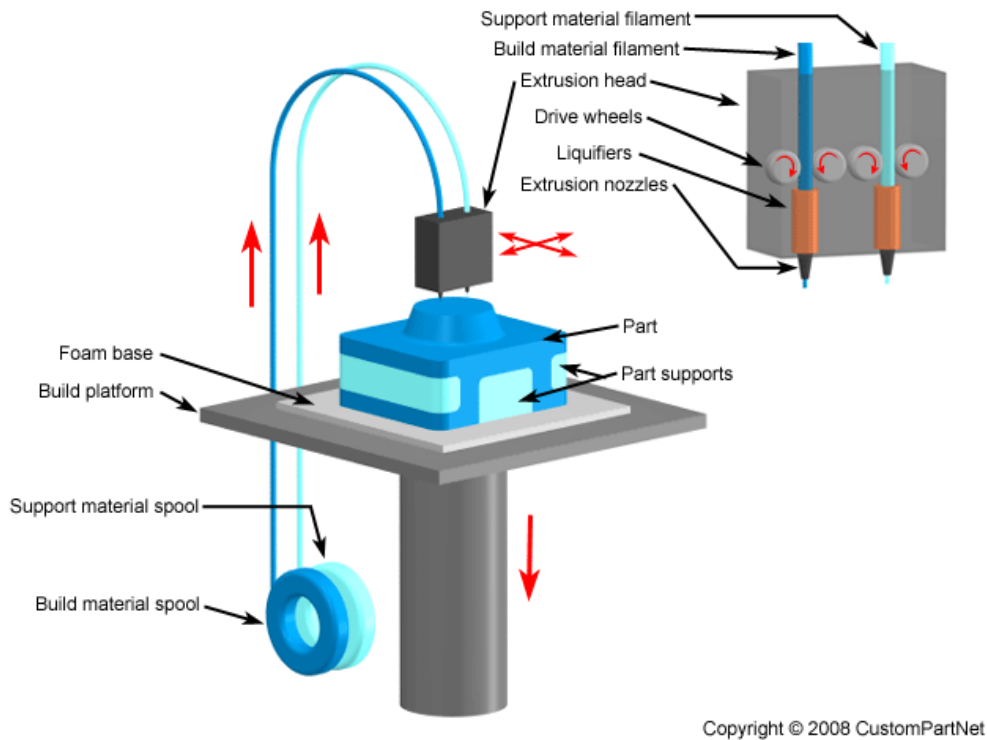
Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της FDM είναι η δυνατότητα ελέγχου του πάχους του στρώματος, το οποίο επιτρέπει υψηλό επίπεδο λεπτομέρειας στην τελική εκτύπωση. Το πάχος του στρώματος μπορεί συνήθως να ρυθμιστεί μεταξύ 0.05mm και 0.4mm, ανάλογα με τον εκτυπωτή και το νήμα που χρησιμοποιείται. Αυτό το επίπεδο ακρίβειας καθιστά το FDM κατάλληλο για τη δημιουργία λεπτομερειών γεωμετρίας και μικρών εξαρτημάτων με περίπλοκα χαρακτηριστικά (May, 2022).

Επιπλέον, το κόστος των εκτυπωτών FDM είναι σχετικά χαμηλό, καθιστώντας τους κατάλληλους για ατομική χρήση, για εκπαιδευτική χρήση σε σχολεία και πανεπιστήμια και για μικρές επιχειρήσεις. Η διαδικασία εγκατάστασης, συναρμολόγησης και συντήρησης είναι σχετικά απλή, ενώ η λειτουργία του πραγματοποιείται μέσω ενός user friendly περιβάλλοντος εκτυπωτή και λογισμικού, γεγονός που εξαλείφει την ανάγκη για εκπαίδευση του χρήστη.

Η τεχνική FDM χρησιμοποιεί μια ευρεία γκάμα υλικών, όπως Πολυγαλακτικό οξύ (Polylactic acid - PLA), Ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο (Acrylonitrile butadiene styrene - ABS), Πολυκαρβονικό (Polycarbonate - PC), Πολυαμίδιο (Nylon), Πολυαιθυλοτερεφθαλική γλυκόλη (Polyethylene terephthalate glycol - PETG), Θερμοπλαστικά ελαστομερή (Thermoplastic elastomer - TPE), Θερμοπλαστική πολουρεθάνη (Thermoplastic polyurethane - TPU) και Θερμοπλαστικό συμπολυεστέρα (Thermoplastic co-polyesters - TPC). Κάθε υλικό νήματος έχει τις δικές του ιδιότητες και πλεονεκτήματα, για παράδειγμα το PLA είναι φθινό και εύκολο στη χρήση, το PETG είναι ισχυρότερο και πιο ανθεκτικό, ενώ τα TPE, TPU και TPC προσφέρουν ευέλικτες και ελαστικές εκτυπώσεις για συγκεκριμένες απαιτήσεις όπως ελαστικότητα και αντοχή σε υψηλή θερμοκρασία.

Ένα από τα κύρια μειονεκτήματα της τεχνικής FDM είναι η χαμηλή ακρίβεια σε διαστάσεις και η μέτρια ποιότητα επιφάνειας, σε σύγκριση με άλλες τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης. Οι στρώσεις του υλικού είναι συνήθως ορατές και με γυμνό μάτι, δημιουργώντας τραχιά ή κοκκώδη εμφάνιση στις εξωτερικές επιφάνειες του εκτυπωμένου αντικειμένου. Ένα δεύτερο μειονέκτημα της FDM είναι η σχετικά χαμηλή αντοχή και ανθεκτικότητα του τελικού

προϊόντος σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης. Τα πλαστικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην εκτύπωση FDM δεν είναι έχουν υψηλές μηχανικές ιδιότητες όπως ορισμένα από τα μέταλλα και τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται σε άλλες τεχνικές, γεγονός που μπορεί να περιορίσει τις εφαρμογές των εκτυπωμένων εξαρτημάτων (Fast Radius, 2022).



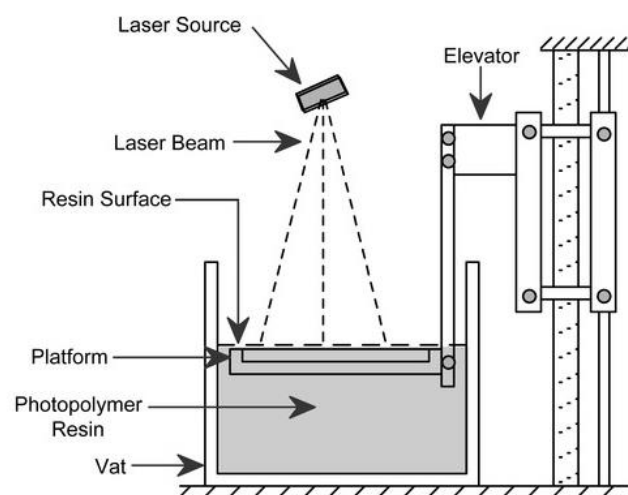
Εικόνα 9 Γενική διάταξη Fused Deposition Modelling. Πηγή: <https://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>

2.4.2. Στερεολιθογραφία

Η Στερεολιθογραφία (Stereolithography - SLA) είναι με τεχνική προσθετικής κατασκευής που χρησιμοποιεί λέιζερ για να μετατρέψει την υγρή ρητίνη σε στερεό αντικείμενο. Η διαδικασία ξεκινά με τη δημιουργία του 3D ψηφιακού μοντέλου σε έναν υπολογιστή, το οποίο στη συνέχεια διαχωρίζεται σε λεπτές στρώσεις. Μια δέσμη λέιζερ κατευθύνεται στην επιφάνεια μιας δεξαμενής με υγρή ρητίνη, και στερεοποιεί τη ρητίνη στο προφίλ του πρώτου στρώματος. Στη συνέχεια, η πλατφόρμα της διάταξης χαμηλώνει και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να κατασκευαστεί ολόκληρο το αντικείμενο (Εικόνα 10).

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της τεχνικής SLA είναι η υψηλή ακρίβεια κατασκευής και η δυνατότητα αποτύπωσης λεπτομερειών της γεωμετρίας, λόγω του μικρού μεγέθους της δέσμης λέιζερ που επιτρέπει την ακριβέστερη κατασκευή του προφίλ της κάθε στρώσης. Το πάχος της στρώσης μπορεί να κυμαίνεται από 25 μ m, το οποίο είναι πιο μικρό από το πάχος που επιτυγχάνεται με την τεχνική FDM. Αυτό καθιστά την τεχνική SLA κατάλληλη για την κατασκευή περίπλοκων και σύνθετων γεωμετρικών στοιχείων, καθώς και εξαιρετική επιλογή για την παραγωγή μικρών εξαρτημάτων με υψηλή ακρίβεια δηλαδή με επίτευξη αυστηρών ανοχών. Η SLA είναι επίσης ικανή να παράγει επιφάνειες με μεγάλη ποιότητα επιφάνειας, και βρίσκει εφαρμογή στη δημιουργία ρεαλιστικών πρωτοτύπων, κοσμημάτων και οδοντιατρικών μοντέλων.

Ωστόσο, η SLA έχει ορισμένους περιορισμούς, Ένας από αυτούς είναι ότι χρησιμοποιεί φωτοπολυμερή υλικά τα οποία είναι πιο ακριβά από τα νήματα FDM. Επιπλέον εξ αιτίας της ρητίνης, τα εξαρτήματα είναι συνήθως εύθραυστα και λειτουργούν σε περιορισμένο εύρος θερμοκρασίας, και δεν είναι κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούν αντοχή σε κάμψη ή σε υψηλές θερμοκρασίες. Για την καλύτερη στερεοποίηση του εκτυπωμένου αντικειμένου απαιτείται η τοποθέτησή του σε ειδική συσκευή υπεριώδους ακτινοβολίας, όπου μπορεί να επιτευχθεί στερεοποίηση κατά 100%. Τέλος, η τεχνική SLA είναι σχετικά αργή και μπορεί να χρειαστεί πολύς χρόνος για την παραγωγή μεγάλων ή πολύπλοκων εξαρτημάτων, καθιστώντας τη λιγότερο κατάλληλη για μαζική παραγωγή (Παπαθανασάκης, 2005).



Εικόνα 10 Γενική διάταξη Stereolithography. Πηγή:

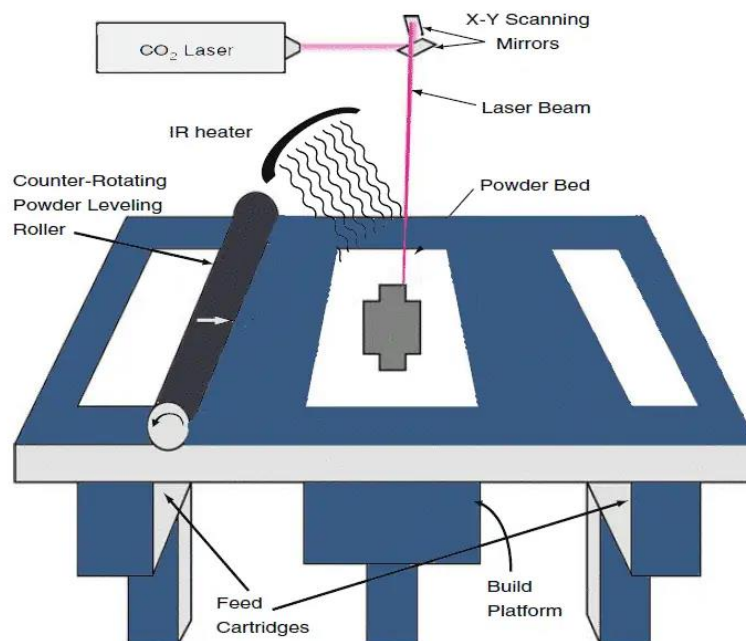
<https://prototechasia.com/en/stereolithography/photopolymerisation>

2.4.3. Επιλεκτική συσσωμάτωση με λέιζερ

Η Επιλεκτική συσσωμάτωση με λέιζερ (Selective Laser Sintering - SLS) είναι μια τεχνική προσθετικής κατασκευής που χρησιμοποιεί λέιζερ για τη σύντηξη μικρών σωματιδίων πλαστικών, μεταλλικών ή κεραμικών υλικών, σε μορφή πούδρας για να δημιουργήσει το τρισδιάστατο στερεό αντικείμενο σε στρώσεις (Εικόνα 11).

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της SLS είναι η ικανότητα να δημιουργεί εξαρτήματα με πολύπλοκες γεωμετρίες και εσωτερικές δομές. Καθώς το λέιζερ μπορεί να συντήξει επιλεκτικά το υλικό πούδρας μόνο όπου χρειάζεται, η εκτύπωση SLS μπορεί να δημιουργήσει περίπλοκες δομές που θα ήταν δύσκολο ή αδύνατο να παραχθούν χρησιμοποιώντας άλλες μεθόδους κατασκευής. Επιπλέον τα αντικείμενα που παράγονται με τη SLS έχουν συνήθως υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα, καθιστώντας τα κατάλληλα για εφαρμογές όπου θα υποστούν υψηλές καταπονήσεις ή φορτία.

Μερικά από τα μειονεκτήματα της SLS είναι το υψηλό κόστος των εκτυπωτών SLS γεγονός που μπορεί να τους κάνει λιγότερο προσβάσιμους σε ιδιώτες και μικρές επιχειρήσεις με περιορισμένο προϋπολογισμό. Επίσης προκύπτουν συνήθως τραχιές πορώδεις επιφάνειες οι οποίες μπορούν ωστόσο να βελτιωθούν με πρόσθετες εργασίες φινιρίσματος όπως αμμοβολή ή βαφή.



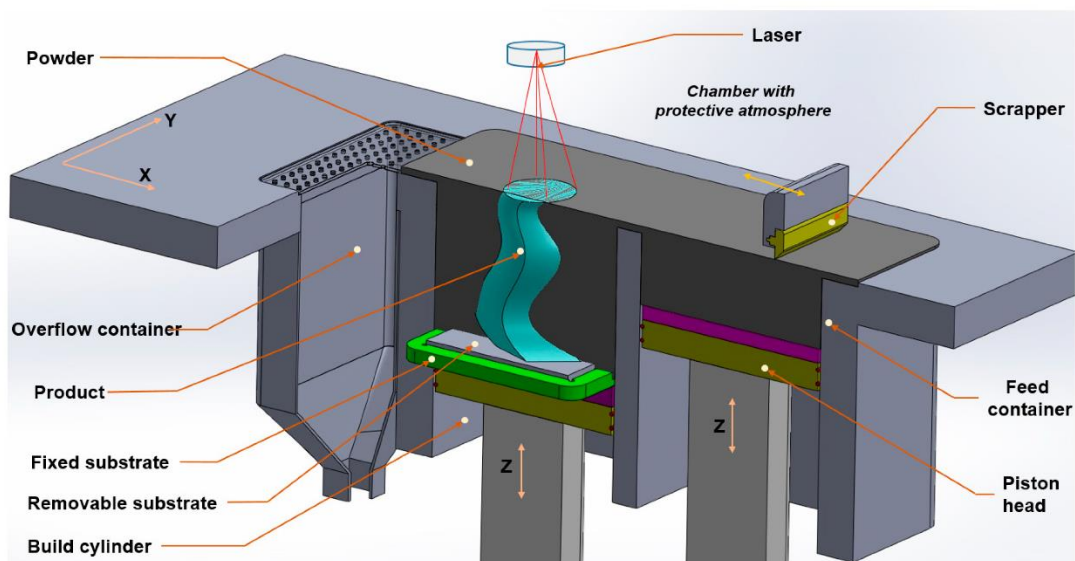
Εικόνα 11 Γενική διάταξη Selective Laser Sintering. Πηγή: <https://xometry.eu/en/selective-laser-sintering-sls-3d-printing-technology-overview/>

2.4.4. Επιλεκτική τήξη με λέιζερ

Η Επιλεκτική τήξη με λέιζερ (Selective Laser Melting - SLM ή Metal Powder Bed Fusion) είναι μια τεχνική προσθετικής κατασκευής που χρησιμοποιεί ένα λέιζερ υψηλής ισχύος για να λιώσει και να συντήξει μικρά σωματίδια μεταλλικής σκόνης σε ένα στερεό αντικείμενο. Το λέιζερ λιώνει επιλεκτικά τη σκόνη του υλικού με τη γνωστή διαδικασία της τήξης, με την κεφαλή να ακολουθεί ένα συγκεκριμένο 2D προφίλ. Στη συνέχεια η πλατφόρμα μετακινείται προς τα κάτω, ένα νέο λεπτό στρώμα σκόνης τροφοδοτείται και επαναλαμβάνεται η διαδικασία (Εικόνα 12).

Η τεχνολογία SLM έχει την ικανότητα να παράγει πολύπλοκες γεωμετρίες και εσωτερικές δομές με υψηλή ακρίβεια, που θα ήταν δύσκολο ή αδύνατο να παραχθούν χρησιμοποιώντας τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής. Αυτό επιτυγχάνεται με τη δημιουργία του αντικειμένου στρώμα προς στρώμα, το οποίο επιτρέπει υψηλό βαθμό σχεδιαστικής ελευθερίας. Η τεχνική SLM είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για την παραγωγή μεταλλικών δικτυωμάτων με μεγάλη αναλογία αντοχής προς βάρος. Επιπλέον, επιτρέπει την παραγωγή μεταλλικών εξαρτημάτων πλήρως λειτουργικών, με περιεκτικότητα υλικού 100%, και με υψηλές μηχανικές ιδιότητες.

Ωστόσο, ένας από τους κύριους περιορισμούς της SLM είναι το υψηλό κόστος των υλικών που χρησιμοποιούνται, όπως οι μεταλλικές σκόνες, γεγονός που οδηγεί σε μια ακριβή τεχνική κατασκευής σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης. Επιπλέον, τα εκτυπωμένα εξαρτήματα συνήθως απαιτούν μεταγενέστερη επεξεργασία κατά την οποία τα μεταλλικά σωματίδια συνενώνονται σε μια στερεή μάζα και αποκτούν ενισχυμένες ιδιότητες όπως σκληρότητα και αντοχή (Nguyen et. al., 2019).



Εικόνα 12 Γενική διάταξη Selective Laser Melting. Πηγή: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/15/3031>

2.4.5. Άμεση πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ μετάλλων

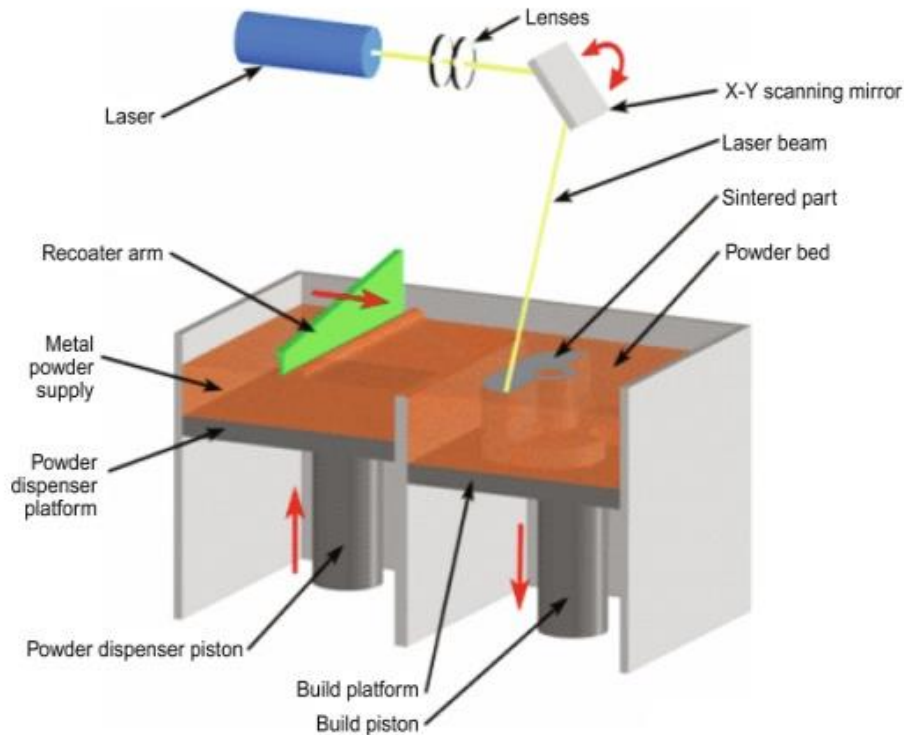
Η άμεση πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ μετάλλων (Direct Metal Laser Sintering - DMLS) είναι μια τεχνική παρόμοια με τη SLM, με τη διαφορά ότι η σκόνη του μετάλλου μόνο πυροσυσσωματώνεται και δεν τήκεται ταυτόχρονα.

Η κοίτη του εκτυπωτή γεμίζει με τη μεταλλική σκόνη η οποία θερμαίνεται με ειδικούς θερμαντήρες σε θερμοκρασία κοντά στο εύρος πυροσυσσωμάτωσης του υλικού. Ένας μηχανισμός (συνήθως ένας κύλινδρος) απλώνει την σκόνη επίπεδα πάνω στην πλάκα κατασκευής και το λέιζερ αποτυπώνει το συγκεκριμένο 2D προφίλ στο λεπτό στρώμα σκόνης. Στη συνέχεια η πλατφόρμα μετακινείται προς τα κάτω, ένα επόμενο στρώμα σκόνης εφαρμόζεται, και επαναλαμβάνεται η διαδικασία στρώση στρώση έως ότου κατασκευαστεί ολόκληρο το αντικείμενο (Εικόνα 13).

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της τεχνικής DMLS είναι το ευρύ φάσμα των διαθέσιμων μεταλλικών κόνεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Επίσης παρέχεται η δυνατότητα δημιουργίας πολύπλοκων σχημάτων ή εσωτερικών χαρακτηριστικών χωρίς την ανάγκη επιπρόσθετης στήριξης (η ίδια η σκόνη αποτελεί και το υποστηρικτικό), μειώνοντας τους χρόνους παραγωγής.

Ωστόσο η συγκεκριμένη τεχνική είναι αρκετά ακριβή και το κόστος ανά τεμάχιο προκύπτει γενικά υψηλότερο σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής. Επιπλέον τα

εκτυπωμένα αντικείμενα απαιτούν μεταγενέστερη επεξεργασία, όπως απομάκρυνση της σκόνης και λείανση της επιφάνειας, ενώ το μέγεθος των εξαρτημάτων περιορίζεται επί του παρόντος σε μικρές διαστάσεις (All3DP, 2021).



Εικόνα 13 Γενική διάταξη Direct Metal Laser Sintering . Πηγή: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/direct-metal-laser-sintering>

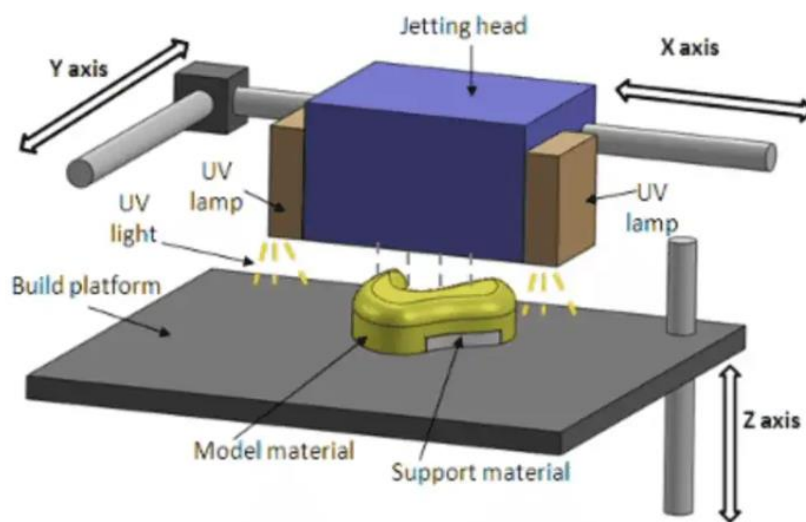
2.4.6. PolyJet 3D Printing

Η τεχνική τρισδιάστατης εκτύπωσης PolyJet 3D Printing περιλαμβάνει την εκτόξευση υλικού και τη χρήση φωτοπολυμερούς ρητίνης και υπεριώδους φωτός για τη δημιουργία των τρισδιάστατων αντικειμένων. Η διαδικασία περιλαμβάνει την απόθεση μικρών σταγονιδίων υγρής ρητίνης, τα οποία στη συνέχεια στερεοποιούνται από μια πηγή υπεριώδους φωτός. Το αντικείμενο δημιουργείται στρώμα προς στρώμα, με κάθε στρώμα να στερεοποιείται πριν προστεθεί το επόμενο (Εικόνα 14).

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της τεχνικής PolyJet είναι η υψηλή ανάλυση και η δημιουργία αντικειμένων με μικρές λεπτομέρειες και λείες επιφάνειες, καθιστώντας τη κατάλληλη για εφαρμογές σχετικές με οδοντιατρικά και ιατρικά μοντέλα. Ένα δεύτερο πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό είναι η ικανότητα των εκτυπωτών PolyJet να δημιουργήσουν ένα

αντικείμενο που αποτελείται από διαφορετικά υλικά, με αποτέλεσμα να υπάρχουν στο ίδιο αντικείμενο τμήματα με διαφορετικά χρώματα, δομή, υφή και μηχανικές ιδιότητες. Επιπλέον, με τη συγκεκριμένη τεχνική μπορεί να εκτυπωθεί με μεγάλη γκάμα υλικών, συμπεριλαμβανομένου διάφανων και εύκαμπτων υλικών.

Ένας από τους κύριους περιορισμούς της τεχνικής PolyJet 3D Printing είναι ο μικρός όγκος κατασκευής σε σχέση με άλλες τεχνικές όπως η FDM και η SLA, που αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για τη δημιουργία μεγαλύτερων αντικειμένων. Επίσης, η διαδικασία εκτύπωσης είναι σχετικά αργή σε σύγκριση με άλλες τεχνικές 3D εκτύπωσης, και κυρίως για μεγαλύτερα αντικείμενα ή πολύπλοκες γεωμετρίες. Τέλος, τα εξαρτήματα που παράγονται με την εκτύπωση PolyJet 3D δεν είναι συνήθως τόσο ισχυρά ή ανθεκτικά και τα εκτυπωμένα αντικείμενα έχουν σχετικά χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες (Al-Jumaili, 2020).



Εικόνα 14 Γενική διάταξη PolyJet 3D Printing . Πηγή: <https://xometry.eu/en/polyjet-3d-printing-technology-overview/>

2.5. Μέθοδοι Δοκιμών για Αντικείμενα Προσθετικής Κατασκευής

2.5.1. Μηχανικές Δοκιμές Ελέγχου Υλικών

Για τον έλεγχο των μηχανικών ιδιοτήτων των εκτυπωμένων αντικειμένων από μεταλλικά ή μη μεταλλικά υλικά εκτελούνται μηχανικές δοκιμές ελέγχου των υλικών. Οι δοκιμές αυτές είναι αναγκαίες για την πιστοποίηση των εκτυπωμένων δοκιμών ή εξαρτημάτων και την προώθησή τους στην αγορά με ασφάλεια. Οι κυριότερες δοκιμές περιλαμβάνουν δοκιμές σκληρότητας και δοκιμές αντοχής σε θραύση, κόπωση και θλίψη. Ένας οδηγός για υφιστάμενα πρότυπα ή

παραλλαγές υφιστάμενων προτύπων για τον προσδιορισμό συγκεκριμένων μηχανικών ιδιοτήτων υλικών που κατασκευάζονται με προσθετική κατασκευή παρουσιάζεται στο πρότυπο ASTM F3122-14 (ASTM, 2022).

Οι κυριότερες μηχανικές δοκιμές για εξαρτήματα προσθετικής κατασκευής συνοψίζονται στον Πίνακα 1 στα Αγγλικά, σύμφωνα με το πρότυπο Additive manufacturing - qualification and certification process for materials and components DNV-CG-0197 (DNV, 2021). Στον Πίνακα 2 έχει γίνει μια προσπάθεια απόδοσης των όρων στα Ελληνικά.

Πίνακας 1 Μηχανικές δοκιμές για εξαρτήματα προσθετικής κατασκευής - EN (DNV, 2021)

Brinell hardness test	hardness, 10~35 °C	ASTM E10, ISO 6506-1
Charpy and izod tests	fracture toughness	ASTM E23, ISO 148-1
Compact tension (CT) sample test	fracture toughness, plane-strain	ASTM E399, ISO 12737; ASTM 1820, ISO 12135
Compression test	cellular structure	ASTM E9, ISO 13314
Crack Growth test	(fatigue) crack growth rate	ASTM E647, ISO 12108
Cyclic-potentiodynamic polarization (CPP)	localized corrosion	ASTM G61, ASTM F2129
Fatigue bending test	fatigue	ASTM E466, EN 6072
Fatigue load increase or constant amplitude test	fatigue strength, S-N	ASTM F3122, ISO 14801
Fatigue test, strain controlled	fatigue, 10~35 °C	ASTM E606, ISO 1099
Fatigue test, thermomechanical	fatigue, strain controlled	ASTM 2368, ISO 12111
Potentiodynamic polarization (PDP)	corrosion behaviour	ASTM G5
Quasi-static tensile test	strength, modulus, 10~38 °C	ASTM E8/E8M, ISO 6892-1, EN 10002-1
Rockwell B, C hardness test	hardness	ASTM E18, ISO 6508
Static immersion test	uniform corrosion by weight loss or metal release	ASTM G31, ISO 10271
Tensile test at elevated temperature	strength, modulus, >38 °C	ASTM E21, ISO 6892-2

Tensile test at low temperature	strength, modulus, <-196 °C	ASTM E1450, ISO 19819
---------------------------------	-----------------------------	-----------------------

Πίνακας 2 Μηχανικές δοκιμές για εξαρτήματα προσθετικής κατασκευής - GR (DNV, 2021)

Δοκιμή σκληρότητας Brinell	σκληρότητα, 10~35 °C	ASTM E10, ISO 6506-1
Δοκιμές Charpy και izod	ανθεκτικότητα σε θραύση	ASTM E23, ISO 148-1
Δοκιμή δείγματος συμπαγούς τάσης (CT)	ανθεκτικότητα θραύσης, επίπεδη καταπόνηση	ASTM E399, ISO 12737; ASTM 1820, ISO 12135
Δοκιμή συμπίεσης	κυτταρική δομή	ASTM E9, ISO 13314
Δοκιμή ανάπτυξης ρωγμών	ρυθμός ανάπτυξης ρωγμών (κόπωσης)	ASTM E647, ISO 12108
Κυκλική-ποτενσιοδυναμική πόλωση (CPP)	τοπική διάβρωση	ASTM G61, ASTM F2129
Δοκιμή κάμψης κόπωσης	κόπωση	ASTM E466, EN 6072
Αύξηση του φορτίου κόπωσης ή δοκιμή σταθερού πλάτους	αντοχή σε κόπωση, S-N	ASTM F3122, ISO 14801
Δοκιμή κόπωσης, ελεγχόμενη τάση	κόπωση, 10~35 °C	ASTM E606, ISO 1099
Δοκιμή κόπωσης, θερμομηχανική	κόπωση, ελεγχόμενη καταπόνηση	ASTM 2368, ISO 12111
Ποτενσιοδυναμική πόλωση (PDP)	συμπεριφορά στη διάβρωση	ASTM G5
Quasi-static δοκιμή εφελκυσμού	αντοχή, μέτρο ελαστικότητας, 10~38 °C	ASTM E8/E8M, ISO 6892-1, EN 10002-1
Δοκιμή σκληρότητας Rockwell B, C	σκληρότητα	ASTM E18, ISO 6508
Δοκιμή στατικής εμβάπτισης	ομοιόμορφη διάβρωση με απώλεια βάρους ή απελευθέρωση μετάλλων	ASTM G31, ISO 10271
Δοκιμή εφελκυσμού σε αυξημένη θερμοκρασία	αντοχή, μέτρο ελαστικότητας, >38 °C	ASTM E21, ISO 6892-2
Δοκιμή εφελκυσμού σε χαμηλή θερμοκρασία	αντοχή, μέτρο ελαστικότητας, <-196 °C	ASTM E1450, ISO 19819

2.5.2. Μη καταστροφικές Δοκιμές

Οι Μη Καταστροφικές Δοκιμές (Non Destructive Testing), είναι έλεγχοι που γίνονται για την εξέταση και αξιολόγηση ενός αντικειμένου οι οποίοι δεν επηρεάζουν τη λειτουργικότητά του. Διάφορες Μη Καταστροφικές Δοκιμές έχουν χρησιμοποιηθεί όχι μόνο στα τελικά εκτυπωμένα εξαρτήματα, αλλά και κατά τη διάρκεια της προσθετικής κατασκευής με σκοπό τον άμεσο έλεγχο της διαδικασίας. Στόχος των δοκιμών αυτών είναι να προσδιοριστούν οι χαρακτηριστικές ιδιότητες των υλικών και να εντοπιστούν σφάλματα που μπορούν να προκαλέσουν αστοχία του υλικού. Οι κυριότερες μη καταστροφικές δοκιμές για εξαρτήματα προσθετικής κατασκευής συνοψίζονται στον Πίνακα 3 στα Αγγλικά σύμφωνα με το πρότυπο Additive manufacturing - qualification and certification process for materials and components DNV-CG-0197 (DNV, 2021). Στον Πίνακα 4 έχει γίνει μια προσπάθεια απόδοσης των όρων στα Ελληνικά.

Πίνακας 3 Μη καταστροφικές δοκιμές για εξαρτήματα προσθετικής κατασκευής - EN (DNV, 2021)

Eddy current testing (ET)	surface critical defects	ASTM E2884
Electrochemical impedance spectroscopy (EIS)	electrochemical impedance, corrosion behaviour	
Helium psychometry (HP)	density of particles	ASTM B923
Impulse excitation of vibration	elastic modulus	ASTM C1259
Inert gas fusion method	oxygen/nitrogen content	
Laser diffraction particle analyzer	size distribution of metal powder	ASTM B822, ISO 13320, MPIF Standard 1
Near infrared (NIR) thermal imaging	in situ process monitoring of melt pool	
Neutron diffraction (ND)	internal stress, residual stress	
Phased array ultrasonic testing (PAUT)	embedded voids or weak deposition layers	

Polarization resistance (Rp)	corrosion rate	ASTM G59
Profilometry	surface roughness, morphology	
Scanning auger electron microscopy (SAM)	elements variation due to corrosion	
Scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive x-ray (EDS) analysis	particle morphology, shape, size; elemental composition near surface, microstructure, phases	
Laser ultrasonic testing (LUT)	in-situ AM process monitoring	
Ultrasonic testing (UT)	surfaces embedded voids or weak deposition layers	
X-ray computed microtomography (μ -CT)	high resolution of porosity in 3D	
X-Ray computed tomography (CT or XCT)	particle size/shape, dimensional accuracy, internal flaws, porosity in 3D, volume fraction and inaccessible internal features	ASTM E1441, E1570
X-ray diffraction (XRD)	crystalline phase, microstructure	ASTM E1426, E2860
X-Ray photoelectron spectroscopy (XPS)	particle surface molecular/chemical composition	

Πίνακας 4 Μη καταστροφικές δοκιμές για εξαρτήματα προσθετικής κατασκευής -GR (DNV, 2021)

Δοκιμές δινορευμάτων (ET)	επιφανειακά κρίσιμα ελαττώματα	ASTM E2884
Φασματοσκοπία ηλεκτροχημικής εμπέδησης (EIS)	ηλεκτροχημική εμπέδηση, συμπεριφορά διάβρωσης	
Ψυχομετρία ηλίου (HP)	πυκνότητα των σωματιδίων	ASTM B923
Παλμική διέγερση των δονήσεων	μέτρο ελαστικότητας	ASTM C1259
Μέθοδος σύντηξης με αδρανές αέριο	περιεκτικότητα σε οξυγόνο/άζωτο	
Αναλυτής σωματιδίων περίθλασης λέιζερ	κατανομή μεγέθους μεταλλικής σκόνης	ASTM B822, ISO 13320, MPIF Standard 1

Εγγύς υπέρυθρη (NIR) θερμική απεικόνιση	επί τόπου παρακολούθηση της διεργασίας της λίμνης τήξης	
Περίθλαση νετρονίων (ND)	εσωτερική τάση, παραμένουσα τάση	
Δοκιμές υπερήχων φασικής συστοιχίας (PAUT)	ενσωματωμένα κενά ή αδύναμα στρώματα εναπόθεσης	
Αντίσταση πόλωσης (Rp)	ρυθμός διάβρωσης	ASTM G59
Προφίλομετρία	τραχύτητα επιφάνειας, μορφολογία	
Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SAM)	μεταβολή στοιχείων λόγω διάβρωσης	
Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM) και ανάλυση με ακτίνες X ενεργειακής διασποράς (EDS)	μορφολογία σωματιδίων, σχήμα, μέγεθος, στοιχειακή σύνθεση κοντά στην επιφάνεια, μικροδομή, φάσεις	
Δοκιμές υπερήχων με λέιζερ (LUT)	επί τόπου παρακολούθηση της διαδικασίας AM	
Δοκιμές υπερήχων (UT)	επιφάνειες με ενσωματωμένα κενά ή αδύναμα στρώματα εναπόθεσης	
Υπολογιστική μικροτομογραφία ακτίνων X (μ-CT)	υψηλή ανάλυση του πορώδους σε 3D	
Υπολογιστική τομογραφία ακτίνων X (CT ή XCT)	μέγεθος/σχήμα σωματιδίων, ακρίβεια διαστάσεων, εσωτερικές ατέλειες, πορώδες σε 3D, κλάσμα όγκου και δυσπρόσιτα εσωτερικά χαρακτηριστικά	ASTM E1441, E1570
Περίθλαση ακτίνων X (XRD)	κρυσταλλική φάση, μικροδομή	ASTM E1426, E2860
Φασματοσκοπία φωτοηλεκτρονίων ακτίνων X (XPS)	μοριακή/χημική σύνθεση της επιφάνειας των σωματιδίων	

2.5.3. Quasi - Μη Καταστροφικές Δοκιμές

Οι Quasi - Μη Καταστροφικές Δοκιμές (Quasi - Non Destructive Testing) αναφέρονται σε εκείνες τις δοκιμές που προκαλούν ελάχιστη ζημιά στο αντικείμενο. Η επίδραση των δοκιμών αυτών είναι τόσο μικρή που δεν επηρεάζει την ακεραιότητα ή τη λειτουργικότητα των εξαρτημάτων. Συνήθως αυτές οι τεχνικές αφήνουν ένα εξαιρετικά μικρό αποτόπωμα (μικρότερο από 100μm) στην επιφάνεια του δείγματος, το οποίο μπορεί στη συνέχεια να αφαιρεθεί εάν αποτελεί πρόβλημα για το τελικό προϊόν. Αυτές οι τεχνικές χρησιμοποιούνται επίσης στον προσδιορισμό της διακύμανσης των ιδιοτήτων στη δομή του αντικειμένου.

Οι κυριότερες Quasi - μη καταστροφικές δοκιμές για εξαρτήματα προσθετικής κατασκευής συνοψίζονται στον Πίνακα 5 στα Αγγλικά σύμφωνα με το πρότυπο Additive manufacturing - qualification and certification process for materials and components DNV-CG-0197 (DNV, 2021). Στον Πίνακα 6 έχει γίνει μια προσπάθεια απόδοσης των όρων στα Ελληνικά.

Πίνακας 5 Quasi - Μη Καταστροφικές Δοκιμές για εξαρτήματα προσθετικής κατασκευής - EN (DNV, 2021)

Micro cell	electrochemical properties	
Micro hardness	Vickers & Knoop hardness	ASTM E384, ISO 6507-1, ISO 4545-1
Nano-indentation	elastic modulus & hardness	
Optical microscopy (OM)	grain structure, defects	ASTM E3

Πίνακας 6 Quasi - Μη Καταστροφικές Δοκιμές για εξαρτήματα προσθετικής κατασκευής - GR (DNV, 2021)

Μικροκυτταρική	ηλεκτροχημικές ιδιότητες	
Μικροσκληρότητα	Σκληρότητα Vickers & Knoop	ASTM E384, ISO 6507-1, ISO 4545-1
Νανο-εγκοπή	Μέτρο ελαστικότητας & σκληρότητα	
Οπτική μικροσκοπία (OM)	δομή κόκκων, ελαττώματα	ASTM E3

2.6. Εφαρμογές Τρισδιάστατης Εκτύπωσης στη Ναυπηγική και τη Ναυτιλία

Τα τελευταία χρόνια, η προσθετική κατασκευή μεταλλικών και μη μεταλλικών ανταλλακτικών αλλά και πρωτότυπων εξαρτημάτων και προϊόντων χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο στη ναυπηγική και ναυτιλιακή βιομηχανία για διάφορες εφαρμογές. Το Σεπτέμβριο του 2017 κατασκευάστηκε μια έλικα πλοίου διαμέτρου 1.350mm από κράμα νικελίου - αλουμινίου - μπρούτζου, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM), στα πλαίσια ενός προγράμματος με συμμετέχοντες φορείς τους Damen Shipyards Group, RAMLAB, Promarin, Autodesk και Bureau Veritas. Η έλικα πλοίου κατασκευάστηκε στο εργαστήριο τρισδιάστατης εκτύπωσης Fiedlab (RAMLAB) στο Ρότερνταμ και στη συνέχεια επεξεργάστηκε με CNC κατεργασία για να αποκτήσει τις

επιθυμητές διαστάσεις και ποιότητα επιφανειών. Μετά από κατάλληλες μηχανικές δοκιμές η εταιρεία Bureau Veritas πιστοποίησε ολόκληρη τη διαδικασία ανάπτυξης, παραγωγής και δοκιμών για τη συγκεκριμένη έλικα πλοίου.

Στις αρχές του 2021 η γαλλική εταιρεία Naval Group κατασκεύασε με τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης μια έλικα για το πλοίο αναζήτησης ναρκών Andromeda, η οποία κατασκευάστηκε με λιγότερη ποσότητα υλικού και σε μικρότερο χρονικό διάστημα συγκριτικά με τις παραδοσιακές προπέλες. Προσφάτως, η канаδική εταιρεία International Submarine Engineering κατασκεύασε μια δεξαμενή έρματος από τιτάνιο χρησιμοποιώντας τεχνολογία AM, μειώνοντας το χρόνο παραγωγής κατά 50%, από 16 εβδομάδες σε 8 εβδομάδες. Αντίστοιχα, η εταιρεία Manufacturer 3D Systems σε συνεργασία με την εταιρεία Newport News Shipbuilding, αναπτύσσει νέα υλικά για ναυτιλιακές εφαρμογές ανθεκτικά στη διάβρωση, όπως κράματα χαλκού-νικελίου (CuNi) και νικελίου-χαλκού (NiCu), για προσθετική κατασκευή με σύντηξη κόνεως. Τα κράματα αυτά θα χρησιμοποιηθούν για ανταλλακτικά όπως βαλβίδες, καπάκια και μπλοκ κινητήρα και μπρακέτα, επιτρέποντας μείωση των χρόνων παράδοσης στην αλυσίδα εφοδιασμού κατά 75%. Η τρισδιάστατη εκτύπωση επίσης χρησιμοποιείται για ερευνητικούς σκοπούς και για την ανάπτυξη νέων βελτιωμένων προϊόντων, όπως στην περίπτωση του Thomas Dahmen, ερευνητή στο Τεχνικό Πανεπιστήμιο της Δανίας, ο οποίος ανέπτυξε ένα ακροφύσιο έγχυσης για κινητήρες πλοίων (μπέκ), που επιφέρει μειωμένη κατανάλωση καυσίμου και βελτιωμένη αντοχή του κινητήρα (Martel, 2022).

Ωστόσο υπάρχει ανάγκη για θέσπιση κανονισμών και προτύπων αναφορικά με τον τρόπο κατασκευής και λειτουργίας των προϊόντων τρισδιάστατης εκτύπωσης, αλλά και για τον καθορισμό προδιαγραφών για τα υλικά και τα τελικά εκτυπωμένα προϊόντα. Η θέσπιση κανονισμών και προτύπων διασφαλίζει την ασφάλεια, την αξιοπιστία και την ποιότητα των διαδικασιών και των προϊόντων. Ένα από τα σοβαρότερα εμπόδια για την ευρεία υιοθέτηση της προσθετικής κατασκευής στη βιομηχανία και συγκεκριμένα στη ναυπηγική και ναυτιλιακή βιομηχανία είναι η έλλειψη κατευθυντήριων γραμμών για την κατασκευή και την πιστοποίηση των εξαρτημάτων που κατασκευάζονται.

Αξίζει να σημειωθεί πως το 2018 η εταιρεία DNV δημιούργησε ένα Παγκόσμιο Κέντρο Additive Manufacturing στη Σιγκαπούρη για την παροχή τεχνικών προτύπων και κατευθυντήριων γραμμών για την πιστοποίηση εξοπλισμού, προϊόντων, υλικών και προσωπικού τρισδιάστατης εκτύπωσης, που θα εξυπηρετούν τη ναυτιλία και τις υπεράκτιες

κατασκευές. Στόχος της DNV είναι η επένδυση στην ανάπτυξη τεχνολογιών 3D εκτύπωσης, η εκπαίδευση προσωπικού, και η συνεργασία με τοπικά ερευνητικά ινστιτούτα και βιομηχανικούς εταίρους, ώστε να προωθήσει τη χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στις υπεράκτιες και ναυτιλιακές βιομηχανίες. Η ίδρυση του κέντρου έγινε σε μια χρονική περίοδο στην οποία η χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης αποκτά όλο και μεγαλύτερο ενδιαφέρον σε αυτές τις βιομηχανίες, εξ αιτίας της δυνατότητας της τεχνολογίας αυτής να μειώσει το κόστος και το χρόνο κατασκευής (Slater, 2018).

Επιπρόσθετα το 2021 εκδόθηκε το πρότυπο «DNV-SE-0568 Qualification of additive manufacturing service providers, manufacturers and parts», στο οποίο καθορίζεται η διαδικασία πιστοποίησης και έγκρισης των εγκαταστάσεων και των ψηφιακών προϊόντων/υπηρεσιών, των προσόντων των κατασκευαστών, των διαδικασιών κατασκευής, των εκτυπωμένων εξαρτημάτων, του εξοπλισμού AM καθώς και του προσωπικού. Το συγκεκριμένο πρότυπο είναι σε αντιστοιχία με το πρότυπο «DNV-ST-B203 Additive manufacturing of metallic parts», το οποίο περιλαμβάνει απαιτήσεις και οδηγίες σχετικά με την πιστοποίηση εκτυπωμένων εξαρτημάτων για τη βιομηχανία πετρελαίου και αερίου και άλλες σχετικές βιομηχανίες, καθώς και απαιτήσεις σχετικά με την κατασκευή, την πολιτική ποιότητας και την αγορά εκτυπωμένων εξαρτημάτων (Slater, 2021).

Αναμφισβήτητα, η τεχνολογία προσθετικής κατασκευής έχει τη δυνατότητα να καλύψει πολλές διαφορετικές εφαρμογές στη ναυτιλιακή βιομηχανία, συμπεριλαμβανομένου της παραγωγής προσαρμοσμένων ή εξειδικευμένων ανταλλακτικών και άλλων κρίσιμων εξαρτημάτων σε πλοία και υπεράκτιες κατασκευές, της γρήγορης δημιουργίας πρωτοτύπων, της παραγωγής εξειδικευμένων εργαλείων και εξοπλισμού για εργασίες συντήρησης και επισκευής, καθώς και την ανάπτυξη νέων περιβαλλοντικά κατάλληλων υλικών και τεχνικών προσθετικής κατασκευής. Η αμεσότητα στο χρόνο παράδοσης, η σχετική μείωση του κόστους του τελικού προϊόντος, η αύξηση της αποδοτικότητας, καθώς και η δυνατότητα ταχείας κατασκευής από το πλήρωμα του πλοίου στη μέση του ωκεανού αποτελούν ελκυστικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης τεχνολογίας.

Κεφάλαιο 3: Υλικά Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

Υπάρχουν πολλά διαφορετικά υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην Προσθετική Κατασκευή με τεχνολογία Εναπόθεσης Συντηγμένου Υλικού. Η επιλογή τους γίνεται λαμβάνοντας υπόψη κυρίως τις προδιαγραφές του τελικού προϊόντος αλλά και τον τύπο του τρισδιάστατου εκτυπωτή που χρησιμοποιείται. Στη συνέχεια περιγράφονται ορισμένα από τα συνηθέστερα υλικά που χρησιμοποιούνται και οι βασικές φυσικές και μηχανικές τους ιδιότητες.

3.1. Πολυγαλακτικό Οξύ - PLA

Το Πολυγαλακτικό οξύ (Polylactic acid - PLA) είναι ένα βιοδιασπώμενο πλαστικό που χρησιμοποιείται πολύ συχνά με τη μορφή νήματος. Κατασκευάζεται από φυτικές πρώτες ύλες όπως το άμυλο αραβοσίτου και το ζαχαροκάλαμο, και είναι φιλικό προς το περιβάλλον καθιστώντας το μια βιώσιμη επιλογή για τρισδιάστατη εκτύπωση. Είναι επίσης εύκολο να εκτυπωθεί, έχει καλή πρόσφυση στο τραπέζι του εκτυπωτή και όταν θερμαίνεται παράγει ελαφριά οσμή σε σχέση με άλλα υλικά, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για χρήση σε περιβάλλοντα όπου οι αναθυμιάσεις μπορεί να είναι ανησυχητικές. Επιπλέον, διατίθεται σε μεγάλη γκάμα χρωμάτων και τραχύτητας, επιτρέποντας στους χρήστες να δημιουργούν μια μεγάλη ποικιλία επιφανειών και χρωματικών εφέ.

Ένα μειονέκτημα του PLA είναι ότι δεν είναι τόσο ισχυρό ή ανθεκτικό όσο κάποια άλλα υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης, όπως το ABS ή το PETG. Επίσης, δεν είναι τόσο ανθεκτικό στη θερμότητα, επομένως μπορεί να μην είναι κατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν λειτουργία σε υψηλή θερμοκρασία. Τέλος, το PLA μπορεί να είναι πιο εύθραυστο από άλλα πλαστικά, επομένως μπορεί να είναι πιο ευαίσθητο σε ρωγμές ή θραύση υπό πίεση (Nordic3D, 2021).

3.2. Ακρυλονιτρίλιο Βουταδιένιο Στυρένιο - ABS

Το Ακρυλονιτρίλιο Βουταδιένιο Στυρένιο (Acrylonitrile Butadiene Styrene - ABS) είναι ένα θερμοπλαστικό πολυμερές που παράγεται με συμπολυμερισμό ακρυλονιτρίλιου, βουταδιενίου και στυρενίου. Είναι πολύ ανθεκτικό και εύκαμπτο, έχει χαμηλή θερμοκρασία τήξης και προσκολλάται εύκολα στο τραπέζι του εκτυπωτή, καθιστώντας το μια καλή επιλογή για τους χρήστες που δεν είναι αρκετά έμπειροι με την τρισδιάστατη εκτύπωση. Το ABS είναι επίσης

ανθεκτικό στη θερμότητα και τις χημικές ουσίες, καθιστώντας το ιδανικό για περιβάλλοντα εκτεθειμένα σε υψηλές θερμοκρασίες ή διαβρωτικά.

Ένα από τα μειονεκτήματα είναι ότι έχει βάση το πετρέλαιο, γεγονός που το καθιστά λιγότερο φιλικό προς το περιβάλλον από άλλα υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης. Επιπλέον, μπορεί να είναι επιρρεπές σε στρεβλώσεις ή ρωγμές, ιδίως κατά τη φάση ψύξης της διαδικασίας εκτύπωσης. Αυτό μπορεί να καταστήσει δύσκολη την επίτευξη ακρίβειας στις διαστάσεις και τη γεωμετρία του τελικού αντικειμένου. Τέλος, το ABS έχει έντονη οσμή και μπορεί να παράγει βλαβερές για την υγεία αναθυμιάσεις κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκτύπωσης, καθιστώντας απαραίτητη τη χρήση κατάλληλου εξαερισμού ή συστήματος φιλτραρίσματος (Shi & Yan, 2021).

3.3. Πολυβινυλική Αλκοόλη - PVA

Η Πολυβινυλική αλκοόλη (Polyvinyl Alcohol - PVA) είναι ένα συνθετικό πολυμερές που χρησιμοποιείται συνήθως στην τρισδιάστατη εκτύπωση ως υλικό υποστήριξης. Είναι υδατοδιαλυτό και αφαιρείται εύκολα από το εκτυπωμένο αντικείμενο βυθίζοντάς το σε νερό. Το PVA χρησιμοποιείται συχνά σε συνδυασμό με άλλο υλικό τρισδιάστατης εκτύπωσης, όπως το PLA ή το ABS, για τη δημιουργία σύνθετων γεωμετριών που διαφορετικά θα ήταν δύσκολο ή αδύνατο να εκτυπωθούν με ένα μόνο υλικό.

Το PVA Natural είναι ένας συγκεκριμένος τύπος PVA που κατασκευάζεται από φυτικές πρώτες ύλες όπως το άμυλο καλαμποκιού. Είναι βιοδιασπώμενο και παράγει ελαφριά οσμή όταν εκτυπώνεται, καθιστώντας το μια πιο φιλική προς το περιβάλλον επιλογή σε σύγκριση με άλλα υλικά υποστήριξης όπως το Πολυστυρένιο υψηλής πρόσκρουσης (High Impact Polystyrene - HIPS) ή το Τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (Polyethylene terephthalate - PET). Το PVA Natural είναι επίσης σχετικά εύκολο στην εκτύπωση και έχει καλή πρόσφυση στο τραπέζι αλλά και σε άλλα υλικά, καθιστώντας το μια δημοφιλή επιλογή για μοντέλα τρισδιάστατης εκτύπωσης που απαιτούν δομές υποστήριξης (All3DP, 2021).

3.4. Τερεφθαλικό Πολυαιθυλένιο τροποποιημένο με Γλυκόλη - PETG

Το Τερεφθαλικό Πολυαιθυλένιο τροποποιημένο με Γλυκόλη (Polyethylene terephthalate glycol - PETG ή glycol-modified - PET) είναι ένα θερμοπλαστικό πολυμερές που

χρησιμοποιείται συνήθως στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Πρόκειται για ένα συμπολυεστερικό υλικό που είναι γνωστό για τη διαφάνεια, την ανθεκτικότητα και την αντοχή του σε χημικά και νερό. Το PETG είναι εξαιρετικά διαφανές, γεγονός που το καθιστά εξαιρετική επιλογή για προϊόντα που απαιτούν διαφανή εμφάνιση, όπως κουτιά κοσμημάτων, βιτρίνες και θήκες τηλεφώνων. Είναι σκληρό και ιδιαίτερα ανθεκτικό στις κρούσεις, καθιστώντας το ιδανικό για εφαρμογές που απαιτούν ανθεκτικότητα και σκληρότητα. Είναι επίσης εξαιρετικά εύκαμπτο, με αντοχή σε εφελκυσμό 6,900 PSI και έχει χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής. Επιπλέον, το PETG αποτελεί ασφαλέστερη επιλογή σε σύγκριση με το ABS και άλλα υλικά με βάση το πετρέλαιο. Έχει ελαφριά οσμή, χαμηλή τοξικότητα και ανακυκλώνεται εύκολα, χαρακτηριστικά που το καθιστούν ως μια φιλική προς το περιβάλλον επιλογή για πολλές εφαρμογές τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Ωστόσο, υπάρχουν και μειονεκτήματα της χρήσης PETG στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Το PETG έχει σχετικά υψηλή θερμοκρασία τήξης, γεγονός που μπορεί να καταστήσει πιο δύσκολη την επεξεργασία του (θέρμανση, τήξη και εναπόθεση) σε σχέση με άλλα υλικά. Η επίτευξη λείας επιφάνειας στο τελικό αντικείμενο είναι αρκετά δύσκολη, ενώ μπορεί να εμφανιστούν στρεβλώσεις ή παραμορφώσεις κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης, ειδικά σε μεγάλα σε μέγεθος ή περίπλοκα αντικείμενα (All3DP, 2021).

3.5. Νάιλον - Nylon

Το Nylon είναι ένα συνθετικό θερμοπλαστικό πολυμερές, γνωστό για την ανθεκτικότητα και την αντοχή του στη φθορά και την τριβή. Έχει αντοχή σε εφελκυσμό 10,000 PSI, καθιστώντας το ένα από τα ισχυρότερα θερμοπλαστικά πολυμερή που διατίθενται στο εμπόριο. Επίσης μπορεί να αντέξει σε υψηλές καταπονήσεις και πιέσεις, για αντικείμενα που θα υποβληθούν σε βαριά χρήση. Καθώς είναι ανθεκτικό στην τριβή, χρησιμοποιείται για εκτύπωση αντικείμενων που θα υποστούν τριβή, όπως γρανάζια, ρουλεμάν και άλλα μηχανικά μέρη. Είναι ένα υλικό ανθεκτικό στη θερμότητα και την υγρασία, με χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής, και αποτελεί ιδανική επιλογή για αντικείμενα που θα χρησιμοποιηθούν σε σκληρά περιβάλλοντα (Shi & Yan, 2021).

3.6. Θερμοπλαστική Πολυουρεθάνη - TPU

Η Θερμοπλαστική Πολυουρεθάνη (thermoplastic polyurethane – TPU), είναι ένα εύκαμπτο υλικό που κατασκευάζεται με τη σύντηξη διυσοκυανικών και πολυολών και είναι περισσότερο γνωστό για την υψηλή ελαστικότητα, την ανθεκτικότητα και την αντοχή σε τριβή και κρούση. Ένα βασικό μειονέκτημα είναι η ακριβότερη τιμή αγοράς σε σύγκριση με άλλα εύκαμπτα νήματα. Επίσης η μεγάλη ευκαμψία του TPU προκαλεί δυσκολίες στην εκτύπωση, καθώς το υλικό μπορεί να λυγίσει ή να μετατοπιστεί κατά την εκτύπωση, καθιστώντας δύσκολη την επίτευξη διαστασιολογικής και γεωμετρικής ακρίβειας. Μπορεί επίσης να είναι πιο δύσκολη η μεταγενέστερη επεξεργασία του υλικού σε σχέση με άλλα υλικά, όπως το ABS ή το PLA (All3DP, 2021).

3.7. Poly-Ether-Ether-Ketone - PEKK

Το υλικό PEEK (Poly-Ether-Ether-Ketone) είναι ένα ημικρυσταλλικό θερμοπλαστικό πολυμερές που ανήκει στην οικογένεια των υλικών PEAK (Polyaryletherketone). Τα υλικά PEAK χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στην προσθετική κατασκευή ως νήματα, καθώς μπορούν να ανακυκλωθούν και θεωρούνται προηγμένα υλικά υψηλής απόδοσης γνωστά για τις ενισχυμένες μηχανικές και χημικές τους ιδιότητες. Στην οικογένεια των PAEK ανήκουν τα υλικά PEEK, PEKK και PEI γνωστά για την υψηλή μηχανική αντοχή, την αντίσταση στη διάβρωση και την αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες.

Το υλικό PEEK (Poly-Ether-Ether-Ketone) είναι το περισσότερο κρυσταλλικό από τα τρία και παρουσιάζει την υψηλότερη μηχανική αντοχή. Ωστόσο κατά την τήξη έχει μεγάλη ταχύτητα κρυστάλλωσης και παρουσιάζει μεγάλη δυσκολία στην τρισδιάστατη εκτύπωση ακόμα και για έμπειρους χρήστες ή προηγμένους εκτυπωτές. Το υλικό PEI (Polyetherimide) έχει την υψηλότερη θερμική αντίσταση σε σχέση με τα υπόλοιπα πολυμερή υλικά που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη εκτύπωση FDM/FFF, διατηρεί τις μηχανικές ιδιότητες σε υψηλές θερμοκρασίες, ενώ επίσης εμφανίζει μεγάλη σταθερότητα στις διαστάσεις και το σχήμα του εκτυπωμένου αντικειμένου. Χρησιμοποιείται κυρίως στη κατασκευή καλουπιών για υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες.

Το PEKK (Poly-Ether-Ketone-Ketone) εφευρέθηκε τη δεκαετία του 1960 στο πλαίσιο του προγράμματος Apollo. Στη συνέχεια αναπτύχθηκε και διατέθηκε για πρώτη φορά στην αγορά το 1988 από την εταιρεία Dupont για τον αεροδιαστημικό τομέα, ως υλικό σχεδιασμένο να

αντέχει σε ακραία περιβάλλοντα (Lynxter, 2021). Το υλικό αυτό είναι πιο εύκολα διαχειρίσιμο στην τρισδιάστατη εκτύπωση καθώς έχει περισσότερους δεσμούς κετόνης, ενώ έχει εξαιρετική αναλογία βάρους-αντοχής, αντίσταση στη φθορά και στην τριβή και έχει 80% μεγαλύτερη αντοχή στη θλίψη από το PEEK. Επιπλέον παρουσιάζει αντίσταση στη διάβρωση σε διάφορα ρευστά όπως ψυκτικά υγρά, θαλασσινό νερό και βενζόλιο.

Το PEKK όπως και το PEEK χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αντικειμένων για απαιτητικές εφαρμογές, όπως ρουλεμάν, εξαρτήματα εμβόλων, αντλίες, βαλβίδες κ.α. για την αεροδιαστημική, την αυτοκινητοβιομηχανία και τη χημική βιομηχανία, αλλά και για ιατρικά εμφυτεύματα. Η ενίσχυσή τους με ίνες άνθρακα ή γυαλιού, παρέχουν ακόμη πιο προηγμένες μηχανικές ιδιότητες.

Χαρακτηριστικές τιμές μηχανικών ιδιοτήτων (Lynxter, 2021):

- Αντοχή σε εφελκυσμό: 105 MPa
- Επιμήκυνση σε εφελκυσμό: 5%
- Αντοχή σε κάμψη: 95 MPa
- Μέτρο ελαστικότητας: 2680 MPa
- Πυκνότητα: 1.26 g/cm³

3.8. Ανοξείδωτος Χάλυβας 304L

Ο Ανοξείδωτος χάλυβας 304L (Stainless Steel 304L) είναι ένα αρκετά νέο υλικό που χρησιμοποιείται στην τρισδιάστατη εκτύπωση σε μορφή πούδρας ή πέλλετ. Είναι ένα ωστενιτικό κράμα ανοξείδωτου χάλυβα που περιέχει 18% χρώμιο, 8% νικέλιο και άλλες προσμίξεις που παρουσιάζονται στην Εικόνα 15. Έχει εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση, καλή διαμορφωσιμότητα και μπορεί εύκολα να κατεργαστεί και να συγκολληθεί. Γενικά ο ανοξείδωτος χάλυβας 304L είναι ένα ευπροσάρμοστο και υψηλής απόδοσης υλικό που χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών.

Element	Cr	Ni	Mn	Si	Cu	C	Fe
Content	18 - 22%	8,0 - 12%	2,0% max	1,0%	3,0 - 5,0%	0,03% max	Balance

Εικόνα 15 Συστατικά στοιχεία του Stainless steel 304L (Pollen AM, 2023)

Ορισμένες από τις βασικές ιδιότητες του ανοξείδωτου χάλυβα 304L είναι:

Αντοχή στη διάβρωση: Είναι εξαιρετικά ανθεκτικός στη διάβρωση και την οξείδωση, καθιστώντας τον κατάλληλο για χρήση σε σκληρά περιβάλλοντα και αντικείμενα που θα εκτεθούν σε διαβρωτικές ουσίες.

Αντοχή: Έχει καλή αντοχή σε εφελκυσμό και μπορεί να αντέξει σημαντικά φορτία χωρίς να σπάσει.

Ολκιμότητα: Είναι πολύ όλκιμος και μπορεί εύκολα να διαμορφωθεί χωρίς να ραγίσει ή να σπάσει.

Θερμική αγωγιμότητα: Έχει σχετικά χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, γεγονός που τον καθιστά κατάλληλο για χρήση σε περιβάλλοντα υψηλών θερμοκρασιών όπου η μεταφορά θερμότητας πρέπει να ελαχιστοποιηθεί.

Μαγνητικές ιδιότητες: Δεν είναι μαγνητικός στην ανοπτημένη του κατάσταση, αλλά μπορεί να γίνει ελαφρώς μαγνητικός όταν υφίσταται ψυχρή κατεργασία ή όταν εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες.

Χαρακτηριστικές ιδιότητες (Pollen AM, 2023):

- Όριο διαρροής: > 180 MPa
- Αντοχή σε θραύση: > 480 MPa
- Επιμήκυνση σε εφελκυσμό: > 25 %
- Σκληρότητα: > 120 HV
- Πυκνότητα: 7.8 g/cm³
- Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας: 800°C

3.9. Ανοξείδωτος Χάλυβας 17-4PH

Ο ανοξείδωτος χάλυβας 17-4PH (Stainless steel - 17-4PH) είναι ένας τύπος μαρτενσιτικού ανοξείδωτου χάλυβα που έχει υποστεί σκλήρυνση με κατακρήμνιση ώστε να γίνει πιο ισχυρός και να αυξηθεί η αντοχή του. Χρησιμοποιείται στην τρισδιάστατη εκτύπωση με τη μορφή νήματος ή πούδρας. Χαρακτηρίζεται από υψηλά επίπεδα αντοχής και σκληρότητας, αντοχή στη διάβρωση και πολύ καλή κατεργασιμότητα. Οι περισσότερες ιδιότητές του είναι παρόμοιες με τις ιδιότητες του ανοξείδωτου χάλυβα 304L. Τα συστατικά στοιχεία που τον αποτελούν παρουσιάζονται στην Εικόνα 16.

Element	Cr	Ni	Mn	Si	Cu	C	Fe
Content	15 - 17,5%	3,0 - 5,0%	1,0% max	1,0% max	3,0 - 5,0%	0,07% max	Balance

Εικόνα 16 Συστατικά στοιχεία του Stainless steel 17-4PH (Pollen AM, 2023)

Χαρακτηριστικές ιδιότητες (Pollen AM, 2023):

- Όριο διαρροής: > 660 MPa
- Αντοχή σε θραύση: > 800 MPa
- Επιμήκυνση σε εφελκυσμό: > 3 %
- Σκληρότητα: > 320 HV
- Πυκνότητα: 7.75 g/cm³
- Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας: 800°C

3.10. Μετεπεξεργασία Πολυμερών Υλικών για Ενίσχυση της Στεγανότητας

Η πλειονότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται για τρισδιάστατη εκτύπωση είναι θερμοπλαστικά. Τα πολυμερή υλικά γενικά είναι αδιάβροχα, δεν αποσυντίθενται και δεν καταστρέφονται από το νερό παρά μόνο μετά από πάρα πολλά χρόνια. Ωστόσο εάν ένα υλικό εκτεθεί σε νερό για μεγάλο χρονικό διάστημα, μπορεί να αρχίσει να διογκώνεται. Ορισμένα υλικά όπως τα PETG, Nylon και PLA, απορροφούν περισσότερο νερό, ενώ άλλα όπως το ABS και το πολυπροπυλένιο (Polypropylene – PP) απορροφούν λιγότερο. Συνήθως η διόγκωση είναι μικρή, αλλά μπορεί να παραμορφώσει το εξάρτημά και ίσως να προκαλέσει ρωγμές ή θραύση με τέτοιο τρόπο ώστε να μην είναι πλέον αδιάβροχο ή στεγανό. Η διόγκωση ωστόσο δεν θα διαρκέσει μόνιμα, θα συμβεί μέχρι ένα συγκεκριμένο ποσοστό και στη συνέχεια θα σταματήσει, ενώ δεν θα προκαλέσει την πλήρη αποσύνθεση του αντικειμένου.

Το PLA είναι ένα από τα πιο προσιτά και ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά εκτύπωσης. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή αδιάβροχων αντικειμένων, αλλά παρουσιάζει αρκετά μειονεκτήματα. Το PLA είναι επιρρεπές στην απορρόφηση νερού και στη διόγκωση, ενώ είναι επίσης βιοδιασπώμενο πλαστικό και μπορεί να διασπαστεί υπό τις κατάλληλες συνθήκες. Αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα αν απλώς εκτίθεται σε απολύτως καθαρό νερό, αλλά αν παραμείνει βυθισμένο για μεγάλο χρονικό διάστημα σε νερό που περιέχει μικροοργανισμούς, όπως μια

λίμνη, το αντικείμενο μπορεί να αρχίσει να υποβαθμίζεται με αργό ρυθμό σε διοξείδιο του άνθρακα, νερό και άλλες μοριακές ενώσεις.

Ένας απλός τρόπος για τη στεγανοποίηση ενός εκτυπωμένου αντικειμένου από πολυμερή υλικό είναι η εφαρμογή ενός στεγανωτικού σπρέι ή απλώς μιας διάφανης αδιάβροχης μπογιάς για την κάλυψη τυχόν μικροσκοπικών κενών. Ωστόσο ενδέχεται να χρειαστούν πολλές στρώσεις ανάλογα με το αντικείμενο και τον είδος της επίστρωσης. Μια διαφορετική προσέγγιση είναι η τήξη της εξωτερικής επιφάνειας του εκτυπωμένου αντικειμένου σε τέτοιο βαθμό ώστε να εξομαλυνθούν οι στρώσεις του αντικειμένου. Η εφαρμογή θερμότητας μπορεί να γίνει με θερμικό πιστόλι μέχρι η εξωτερική επιφάνεια να λιώσει αρκετά ώστε να συγχωνευθούν οι στρώσεις μεταξύ τους. Η διαδικασία αυτή κάνει το αντικείμενο πιο στεγανό και επίσης βελτιώνει την ποιότητα επιφάνειας, αλλά είναι αρκετά δύσκολη για αντικείμενα με σύνθετα γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπως εσωτερικές κοιλότητες, οπές, κλπ. Τέλος, το εκτυπωμένο αντικείμενο μπορεί να τοποθετηθεί σε φούρνο ή άλλο θερμαινόμενο θάλαμο, για παρατεταμένο χρονικό διάστημα και σε συγκεκριμένη θερμοκρασία, όπου και πραγματοποιείται ανόπτηση (annealing). Η ανόπτηση ενισχύει τη σύνδεση μεταξύ των στρωμάτων ολόκληρου του αντικειμένου, τόσο εξωτερικά όσο και εσωτερικά, βελτιώνοντας την αντοχή και την ανθεκτικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες (Chapman, 2022).

3.11. Μετεπεξεργασία Μεταλλικών Υλικών για Ενίσχυση της Αντοχής

Η τρισδιάστατη εκτύπωση αντικειμένων από μεταλλικό υλικό σε νήμα μειώνει δραματικά τους πιθανούς κινδύνους από το χειρισμό των μεταλλικών κόνεων κατά την Επιλεκτική τήξη με λέιζερ SLM ή την Άμεση πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ μετάλλων DMLS. Ωστόσο τα νήματα από μεταλλικά υλικά δεν αποτελούνται από 100% μέταλλο αλλά από ένα συνδυασμό μετάλλου με πολυμερές υλικό, για παράδειγμα το υλικό BASF Ultrafuse 316L αποτελείται από 80% ανοξείδωτο χάλυβα και 20% πολυμερές.

Αν και τα εκτυπωμένα αντικείμενα από πολυμερή υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν αμέσως μετά τη κατασκευή, τα εκτυπωμένα αντικείμενα από μεταλλικό υλικό θα πρέπει οπωσδήποτε να υποστούν μετεπεξεργασία, κατά την οποία αποκτούν τις τελικές τους ιδιότητες όπως σκληρότητα και αντοχή. Η μετεπεξεργασία διαχωρίζεται σε δύο στάδια, τη θερμική αποδέσμευση (debinding) και την πυροσυσσωμάτωση (sintering).

Κατά το στάδιο της θερμικής αποδέσμευσης, συνήθως στους 200-500 °C, αφαιρείται το συνδετικό πολυμερές από τα μεταλλικά σωματίδια. Στη συνέχεια, κατά το στάδιο της πυροσυσσωμάτωσης, το αντικείμενο θερμαίνεται σε κλίβανο σε θερμοκρασία ακριβώς κάτω από το σημείο τήξης του μετάλλου (έως 900 °C). Η διαδικασία αυτή συνενώνει τα μεταλλικά σωματίδια μεταξύ τους και δημιουργεί ένα πιο πυκνό συμπαγές αντικείμενο σχεδόν από 100% μέταλλο. Ωστόσο καθώς τα μεμονωμένα μεταλλικά σωματίδια συνενώνονται σε μια στερεή μάζα, εμφανίζεται μια μείωση στο μέγεθος του εξαρτήματος. Η συρρίκνωση αυτή θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό του 3D ψηφιακού μοντέλου για τον καθορισμό σωστών διαστάσεων.

Κεφάλαιο 4: Εργαλεία Τρισδιάστατου Σχεδιασμού και Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

4.1. Συστήματα Τρισδιάστατης Μοντελοποίησης

Η χρήση προγραμμάτων Τρισδιάστατου Σχεδιασμού με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή (3D Computer Aided Design – 3D CAD) έχει διευκολύνει σε μεγάλο βαθμό τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται και κατασκευάζονται τα διάφορα προϊόντα. Μέσω των λογισμικών 3D CAD, οι χρήστες μπορούν να σχεδιάζουν εξαιρετικά λεπτομερή και σύνθετα τρισδιάστατα μοντέλα των προϊόντων τους, τα οποία μπορούν στη συνέχεια να ελέγξουν ως προς τις επιθυμητές ιδιότητες και να τα τροποποιήσουν - βελτιστοποιήσουν πριν από την παραγωγή των φυσικών πρωτοτύπων. Με αυτή τη διαδικασία προφανώς μπορεί να μειωθεί ο χρόνος και το κόστος παραγωγής, καθώς και να βελτιωθεί η ποιότητα του τελικού προϊόντος. Η επιλογή του κατάλληλου λογισμικού καθορίζεται βάσει των απαιτήσεων του χρήστη για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, των χαρακτηριστικών και δυνατοτήτων που αυτό παρέχει, καθώς και του κόστους αγοράς και συντήρησης.

Τέσσερα από τα πιο δημοφιλή προηγμένα προγράμματα 3D CAD που χρησιμοποιούνται είναι το Autodesk Fusion 360, το SolidWorks, το PTC Creo και το Dassault Systemes CATIA. Καθένα από αυτά τα προγράμματα παρέχει ένα ευρύ φάσμα δυνατοτήτων σχεδιασμού, μοντελοποίησης, τεχνικής ανάλυσης (Computer Aided Engineering- CAE) και προσομοίωσης κατεργασίας (Computer Aided Manufacturing - CAM και Additive Manufacturing - AM), που μπορούν να βοηθήσουν τους σχεδιαστές προϊόντων και τους μηχανικούς να δώσουν μορφή στις ιδέες τους.

Autodesk Fusion 360: Το Autodesk Fusion 360 είναι ένα φιλικό προς το χρήστη λογισμικό 3D CAD που παρέχει ένα σύνολο εργαλείων για το σχεδιασμό και την ανάπτυξη προϊόντων και επιτρέπει στους χρήστες να περάσουν εύκολα και γρήγορα από την ιδέα στην κατασκευή. Διαθέτει εργαλεία παραμετρικής σχεδίασης, τεχνικής ανάλυσης και προσομοίωσης που βοηθούν τους σχεδιαστές να διασφαλίσουν την απόδοση και ποιότητα των σχεδίων τους, ενώ η χρήση του γίνεται μέσω του Διαδικτύου σε σύστημα cloud, το οποίο αντικαθιστά την ανάγκη υψηλής απόδοσης υπολογιστών, ακόμα για την επεξεργασία μοντέλων προϊόντων με εκατοντάδες εξαρτήματα.

SolidWorks: Το SolidWorks είναι ένα ισχυρό λογισμικό 3D CAD παραμετρικής σχεδίασης που χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορους κλάδους όπως η αεροδιαστημική και η αυτοκινητοβιομηχανία. Το λογισμικό προσφέρει ένα ευρύ φάσμα εργαλείων όπως τρισδιάστατη μοντελοποίηση, συναρμολόγηση, τεχνική ανάλυση, προσομοίωση λειτουργίας και κατεργασίας, κ.α. Είναι ένα φιλικό προς τον χρήστη λογισμικό και επιτρέπει στους χρήστες να προσαρμόσουν το λογισμικό στις συγκεκριμένες ανάγκες τους.

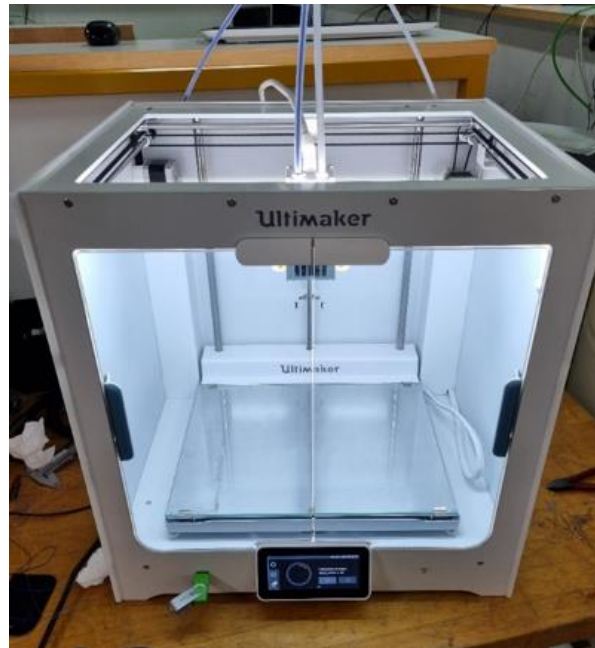
PTC Creo: Το PTC Creo είναι ένα τρισδιάστατο λογισμικό 3D CAD που παρέχει ισχυρές δυνατότητες σχεδιασμού και προσομοίωσης για διάφορους κλάδους όπως της αεροδιαστημικής και της αυτοκινητοβιομηχανίας. Διαθέτει πολυάριθμα εργαλεία σχεδιασμού, τρισδιάστατης μοντελοποίησης, ανάλυσης προσομοίωσης και οπτικοποίησης. Το λογισμικό διαθέτει ένα φιλικό προς το χρήστη και απλό στη χρήση περιβάλλον εργασίας και μια ευέλικτη, επεκτάσιμη πλατφόρμα όπου οι χρήστες μπορούν να την προσαρμόσουν στις ιδιαίτερες ανάγκες τους.

Dassault Systemes CATIA: Το CATIA είναι ένα κορυφαίο πρόγραμμα 3D CAD σχεδιασμού και ανάπτυξης προϊόντων που χρησιμοποιείται συχνά σε τομείς όπως η ναυπηγική βιομηχανία, η αυτοκινητοβιομηχανία και η αεροδιαστημική. Το λογισμικό αποτελεί δημοφιλή επιλογή για τους σχεδιαστές αυτών των κλάδων λόγω των προηγμένων δυνατοτήτων του σε τομείς όπως η μοντελοποίηση σύνθετων επιφανειών και η επεξεργασία μοντέλων προϊόντων χιλιάδων εξαρτημάτων. Επιπλέον, παρέχει επιλογές προσαρμογής και διαμόρφωσης του λογισμικού στις ιδιαίτερες ανάγκες του κάθε χρήστη, και έχει ένα φιλικό περιβάλλον διασύνδεσης με το χρήστη. Οι μεγαλύτερες εταιρείες στον τομέα της βιομηχανίας τείνουν να χρησιμοποιούν το CATIA εξ αιτίας των δυνατοτήτων του για υψηλού επιπέδου σχεδιασμό, παρόλο που το κόστος αγοράς και συντήρησης είναι αρκετά υψηλό.

4.2. Τρισδιάστατος Εκτυπωτής Ultimaker S5

Ο Ultimaker S5 είναι ένας τρισδιάστατος εκτυπωτής κατασκευασμένος από την ολλανδική εταιρεία Ultimaker. Είναι ένας εκτυπωτής επαγγελματικής ποιότητας που χαρακτηρίζεται για την αξιοπιστία, την ακρίβεια και την ευκολία χρήσης. Είναι κατάλληλος για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένου της γρήγορης δημιουργίας πρωτοτύπων και της παραγωγής προϊόντων με σύνθετη λεπτομέρεια και υψηλή ποιότητα κατασκευής. Ο Ultimaker S5 χρησιμοποιεί τεχνολογία Κατασκευής Συντηγμένου Νήματος (FFF), δύο κεφαλές ταυτόχρονης εκτύπωσης, και ρύθμιση θερμοκρασίας για τις κεφαλές και το τραπέζι

εκτύπωσης. Διαθέτει μεγάλο όγκο κατασκευής 330 x 240 x 300 mm, που του επιτρέπει να εκτυπώνει μεγαλύτερα σε μέγεθος αντικείμενα, ενώ μπορεί να εκτυπώσει διάφορα πολυμερή και σύνθετα υλικά.



Εικόνα 17 Εκτυπωτής Ultimaker S5, Εργαστήριο Εργαλειομηχανών, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανικών ΠΑΔΑ

4.3. Λογισμικό 3D Εκτύπωσης Ultimaker Cura

Το Ultimaker Cura είναι ένα δωρεάν και ανοικτού κώδικα λογισμικό που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία των 3D ψηφιακών μοντέλων και την εξαγωγή των κατάλληλων αρχείων στον τρισδιάστατο εκτυπωτή. Αναπτύχθηκε από την ολλανδική εταιρεία Ultimaker και είναι συμβατό με μια μεγάλη γκάμα τρισδιάστατων εκτυπωτών, που κατασκευάζονται από την Ultimaker καθώς και από άλλους κατασκευαστές. Το Ultimaker Cura επιτρέπει στους χρήστες να επιλέγουν και να διαμορφώνουν τις παραμέτρους εκτύπωσης, όπως τον τύπο του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί, το ύψος της στρώσης εκτύπωσης (layer), το μοτίβο και το ποσοστό της εσωτερικής πυκνότητας, ταχύτητες εκτύπωσης, θερμοκρασίες εκτύπωσης, ρυθμίσεις για το υποστηρικτικό υλικό, κ.α. Σύμφωνα με τις παραμέτρους αυτές, το μοντέλο διαχωρίζεται σε στρώσεις και δημιουργείται αυτόματα ένα αρχείο που περιέχει μια σειρά εντολών (γνωστές ως κώδικας G-code) για την κίνηση της κεφαλής του εκτυπωτή. Το αρχείο μεταφέρεται με usb ή δικτυακά στον τρισδιάστατο εκτυπωτή, ο οποίος εκτελεί τις εντολές για να δημιουργήσει το φυσικό αντικείμενο στρώση-στρώση.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του Ultimaker Cura είναι ότι αποτελεί ένα δωρεάν και ανοιχτού κώδικα λογισμικό, καθιστώντας το μια ελκυστική επιλογή για τους επαγγελματίες με χαμηλό προϋπολογισμό ή για τους ερασιτέχνες στην 3D εκτύπωση. Το Ultimaker Cura είναι επίσης φιλικό προς το χρήστη, εύκολο στην εκμάθηση και εξαιρετικά προσαρμόσιμο, επιτρέποντας στους χρήστες να δημιουργούν τα δικά τους προφίλ και ρυθμίσεις για συγκεκριμένους τρισδιάστατους εκτυπωτές και υλικά. Ωστόσο δεν είναι τόσο προηγμένο όσο κάποια άλλα προγράμματα 3D εκτύπωσης, γεγονός που μπορεί να περιορίσει τις δυνατότητές του για πιο σύνθετα 3D μοντέλα. Επιπλέον, επειδή είναι ανοιχτού κώδικα, δεν παρέχεται τεχνική υποστήριξη από την εταιρεία και ο χρήστης βασίζεται στη διαδικτυακή κοινότητα των χρηστών του για τον εντοπισμό και την επιδιόρθωση σφαλμάτων ή άλλων ζητημάτων. Τέλος, επειδή έχει αναπτυχθεί από την Ultimaker, έχει βελτιστοποιηθεί για χρήση με εκτυπωτές Ultimaker 3D και ενδέχεται να μην λειτουργεί το ίδιο καλά με άλλες μάρκες εκτυπωτών 3D.

4.4. Βασικές Παράμετροι Εκτύπωσης

Η επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων εκτύπωσης είναι καθοριστική για το τελικό αποτέλεσμα του εκτυπωμένου αντικειμένου αναφορικά με την ποιότητα και τη λειτουργία του. Η εκτύπωση FFF περιλαμβάνει αρχικά την τήξη του νήματος και στη συνέχεια την εναπόθεση του υλικού σε στρώσεις, αρχίζοντας από κάτω προς τα πάνω. Ένα σύνηθες πρόβλημα που εμφανίζεται είναι η ύπαρξη μικροσκοπικών κενών είτε μεταξύ των στρώσεων, είτε μεταξύ των περασμάτων του υλικού κατά τη δημιουργία των τοιχωμάτων του αντικειμένου, είτε σε πολύ μικρά διάκενα.

Στη συνέχεια αναφέρονται συνοπτικά ορισμένες από τις σημαντικότερες παραμέτρους εκτύπωσης και ο ρόλος τους στο τελικό αποτέλεσμα.

Ποιότητα εκτύπωσης (quality): Η ποιότητα της εκτύπωσης περιλαμβάνει το ύψος της στρώσης (layer height) όπου μικρότερο ύψος αντιστοιχεί σε μεγαλύτερο χρόνο εκτύπωσης αλλά καλύτερη ανάλυση, το ύψος της πρώτης στρώσης (first layer height) όπου μικρότερο ύψος αντιστοιχεί σε καλύτερη πρόσφυση στο τραπέζι, και το πάχος της γραμμής (line width) όπου μικρότερο πάχος αντιστοιχεί σε καλύτερη ανάλυση εκτύπωσης.

Αριθμός γραμμών τοιχώματος (wall line count): Ο αριθμός γραμμών τοιχώματος είναι μια παράμετρος που καθορίζει το πάχος του εξωτερικού τοιχώματος του αντικειμένου. Γενικά, όσο αυξάνεται ο αριθμός τόσο αυξάνεται και η πιθανότητα το αντικείμενο να είναι στιβαρό,

άκαμπτο και στεγανό. Επιπλέον, στην περίπτωση που η ελλειπής εξώθηση του υλικού είναι ελλειπής ή κάποιο άλλο πρόβλημα έχει προκαλέσει ένα μικρό κενό σε ένα τοίχωμα, το επόμενο τοίχωμα λειτουργεί ως εφεδρικό για να καλύψει αυτό το κενό.

Πυκνότητα και Μοτίβο στο εσωτερικό του μοντέλου (density and infill pattern): Η πυκνότητα είναι η ποσότητα υλικού που χρησιμοποιείται στο εσωτερικό του αντικειμένου και καθορίζει βασικά τις μηχανικές του ιδιότητες. Όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα, τόσο αυξάνεται η αντοχή του αντικειμένου σε κάμψη, εφελκυσμό, κρούση, κ.α., αλλά και ο χρόνος εκτύπωσης. Η επιλογή του μοτίβου επίσης επηρεάζει τη μηχανική συμπεριφορά του αντικειμένου αλλά και τον χρόνο εκτύπωσης. Ανάλογα με το επιλεγμένο μοτίβο μπορεί να επιτευχθεί αντίσταση σε διατμητικές τάσεις και στιβαρότητα σε κάθε διεύθυνση οριζοντίως (triangles), μέτρια αντοχή και μεγάλη στιβαρότητα στην κάθετη διεύθυνση (grid), υψηλή αντοχή σε όλες τις κατευθύνσεις (cubic), στιβαρότητα σε εσωτερικά λεπτά χαρακτηριστικά (octec), μεγάλη ακαμψία (tri-hexagon, cubic), ή μείωση του χρόνου εκτύπωσης για διακοσμητικά συνήθως πρωτότυπα (line and zig zag pattern).

Υποστηρικτική δομή (support): Σημαντικές παράμετροι είναι το υλικό του υποστηρικτικού που πρέπει να έχει καλή προσκόλληση στο κύριο υλικό και στο τραπέζι, το μοτίβο (infill pattern) το οποίο επηρεάζει τη σκληρότητα και την ευκολία αφαίρεσης, η πυκνότητα (density) όπου μεγαλύτερες τιμές αντιστοιχούν σε καλύτερη στήριξη αλλά και σε δυσκολία αφαίρεσης, και τέλος η γωνία στήριξης (angle overhand) που καθορίζει την ελάχιστη γωνία αρνητικής κλίσης της επιφάνειας στην οποία θα προστεθεί η υποστηρικτική δομή.

Θερμοκρασία (printing temperature): Όταν ένα στρώμα εκτύπωσης (layer) δεν συνδέεται σωστά με το αμέσως ανώτερο στρώμα, μπορεί να δημιουργηθούν κενά. Γενικά η θερμοκρασία πρέπει να ακολουθεί τις προδιαγραφές του κάθε υλικού, ώστε να επιτευχθεί η σωστή προσκόλληση των στρώσεων αλλά και η προσκόλληση του κυρίως υλικού με το υποστηρικτικό υλικό. Συνήθως η αύξηση της θερμοκρασίας εκτύπωσης βελτιώνει τη συγκόλληση των στρώσεων και προτείνεται γενικά να γίνεται η εκτύπωση στην υψηλότερη θερμοκρασία που προτείνεται από τον κατασκευαστή του υλικού. Ωστόσο όταν το υλικό εκτυπώνεται σε υψηλότερη θερμοκρασία από την ενδεικνυόμενη, το υλικό μπορεί να εξέρχεται καμένο από το ακροφύσιο, προκαλώντας προβλήματα όπως σταξίματα, υπερπλήρωση, και κακή ποιότητα εκτύπωσης. Η θερμοκρασία του τραπεζιού εκτύπωσης (build plate) είναι επίσης πολύ σημαντική καθώς επηρεάζει την ικανότητα προσκόλλησης της πρώτης στρώσης αλλά και την ευκολία αφαίρεσης του τελικού αντικειμένου.

Κεφάλαιο 5: Διαδικασία Τρισδιάστατου Σχεδιασμού και Εκτύπωσης των Πρωτότυπων Μοντέλων

5.1. Αρχική Ιδέα (concept design)

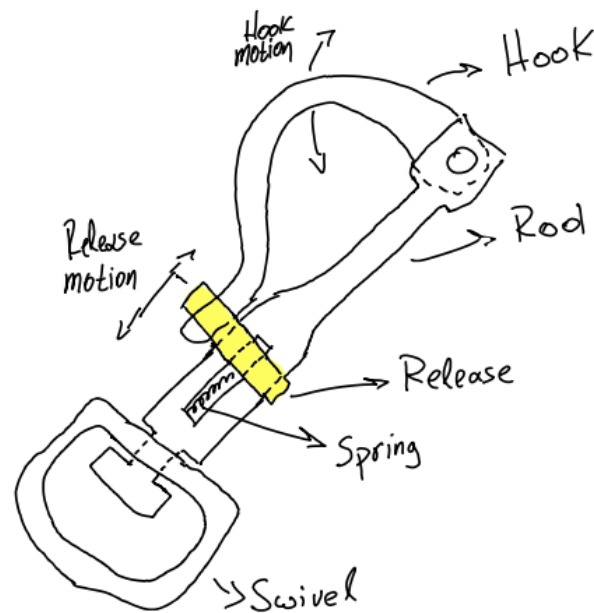
Η έμπνευση και η αρχική ιδέα για το πρωτότυπο εξάρτημα ιστιοπλοΐας snap shackle προήλθε από την ανάγκη σχεδίασης ενός νέου βελτιωμένου προϊόντος, το οποίο θα μπορεί να εξαλείψει ορισμένα από τα μειονεκτήματα των διαθέσιμων snap shackles της αγοράς, λαμβάνοντας υπόψιν απαιτήσεις που σχετίζονται με τη λειτουργικότητα και τον τρόπο κατασκευής, όπως αναλυτικά αναφέρονται στο υποκεφάλαιο 1.3.

Λαμβάνοντας υπόψιν λοιπόν την απαίτηση για απλούστερη κατασκευή, ταχύτερη απελευθέρωση του στρεφόμενου βραχίονα (hook) και ταυτόχρονα μέγιστη ασφάλεια κατά τη συγκράτηση σε κλειστή θέση, αλλά και με την επίγνωση ότι το νέο προϊόν θα κατασκευαστεί σε ένα τρισδιάστατο εκτυπωτή, ο οποίος παρέχει τη δυνατότητα απευθείας κατασκευής σε μια εκτύπωση ενός συναρμολογημένου συνόλου εξαρτημάτων, σχεδιάστηκε η αρχική ιδέα σε χαρτί. Στην Εικόνα 18 παρουσιάζεται το αρχικό σχέδιο του πρωτότυπου προϊόντος snap shackle και λειτουργεί ως εξής:

- Η άκρη ενός σχοινιού ή ενός σύρματος δένεται σταθερά στο περιστρεφόμενο εξάρτημα (swivel) το οποίο θα το προστατεύει από πιθανά βινιρίσματα (όταν περιστρέφεται το σχοινί ή σύρμα κατά το μήκος του με αποτέλεσμα να μειώνει την αντοχή του).
- Το εξάρτημα απελευθέρωσης (release) είναι υπεύθυνο να συγκρατεί το στρεφόμενο βραχίονα (hook) σε κλειστή θέση. Με τη βοήθεια της πίεσης του ελατηρίου (spring) αποτρέπεται η ανεπιθύμητη μετατόπισή του. Για την απελευθέρωση του hook αρκεί η μετακίνηση του release προς τα κάτω, η οποία μπορεί να γίνει εύκολα και γρήγορα με το χέρι, χωρίς να απαιτεί επιδεξιότητα.
- Ο στρεφόμενος βραχίονας (hook) είναι το εξάρτημα που θα συγκρατεί την άκρη ενός άλλου σχοινιού, σύρματος ή ακόμα και κάποιο άλλο εξάρτημα (π.χ.: άκρες ιστιοπλοϊκών πανιών). Ανάλογα με τη γωνία περιστροφής του μπορεί να ελευθερώσει γρήγορα το σύστημα.

Αναφορικά με την κατασκευή, ο κορμός (rod) μαζί με το εξάρτημα απελευθέρωσης (release) και το περιστρεφόμενο εξάρτημα (swivel) θα κατασκευαστούν ταυτόχρονα σε μια εκτύπωση, χρησιμοποιώντας υδατοδιαλυτικό υποστηρικτικό υλικό μεταξύ τους το οποίο θα αφαιρεθεί

μετά την κατασκευή, ενώ ο στρεφόμενος βραχίονας (hook) θα εκτυπωθεί ξεχωριστά. Το ελατήριο είναι τυποποιημένο στοιχείο που διατίθεται στο εμπόριο και θα προστεθεί στο τέλος.



Εικόνα 18 Σχέδιο στο χαρτί της αρχικής ιδέας του πρωτότυπου προϊόντος snap shackle

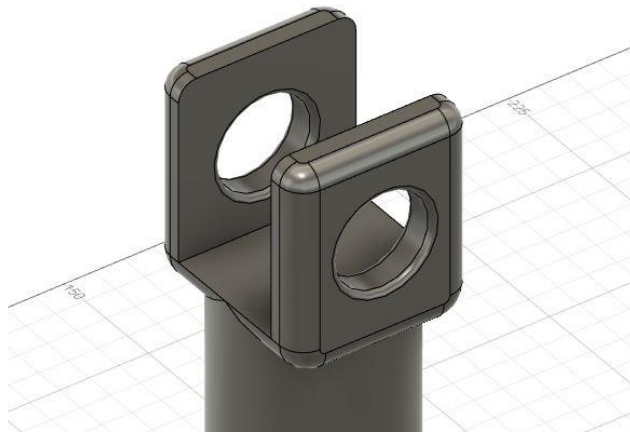
5.2. Σχεδιασμός και Εκτύπωση 1ου μοντέλου

Με τη χρήση του λογισμικού Autodesk Fusion 360 η αρχική ιδέα μεταφέρθηκε από το χαρτί σε τρισδιάστατη μορφή. Όλες οι διαστάσεις του μοντέλου καθορίστηκαν από το μηδέν, καθώς το σχέδιο είναι πρωτότυπο και δεν υπάρχουν κατασκευαστικά σχέδια.

Αρχικά σχεδιάστηκε ο κορμός (rod) με τα κατάλληλα εργαλεία του προγράμματος. Στο πάνω μέρος διαμορφώθηκε μια κεφαλή με δύο παράλληλες οπές, στην οποία θα συγκρατείται ο στρεφόμενος βραχίονας (hook) όταν βρίσκεται σε κλειστή κατάσταση.

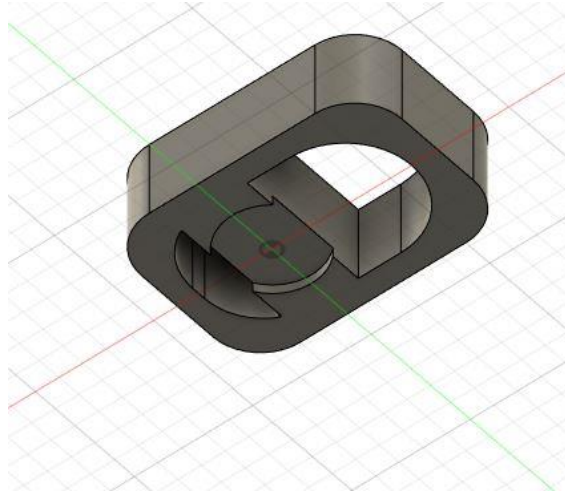


Εικόνα 19 Σχεδιασμός κορμού (rod) 1^{ου} μοντέλου



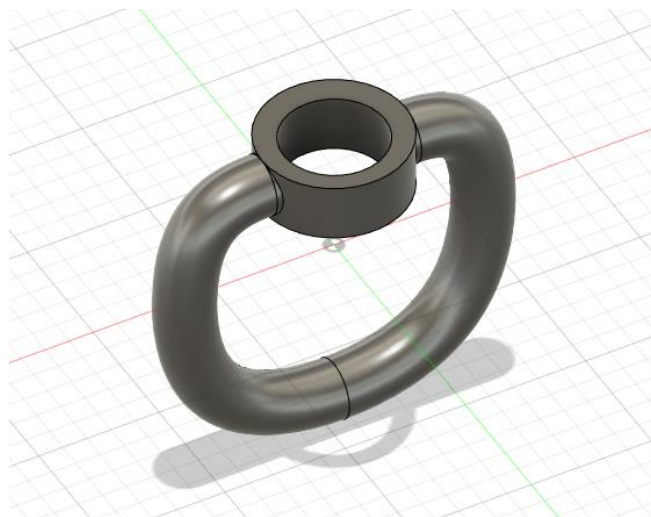
Εικόνα 20 Σχεδιασμός κεφαλής κορμού για συγκράτηση του στρεφόμενου βραχίονα (hook)

Στη συνέχεια σχεδιάστηκε το εξάρτημα απελευθέρωσης (release) λαμβάνοντας υπόψη τις διαστάσεις του κορμού, κατά τέτοιον τρόπο ώστε να υπάρχει χάρη κατά τη συναρμολόγηση, η οποία να επιτρέπει την κίνησή του κατά μήκος του κορμού. Στο σχέδιο επίσης διαμορφώθηκε μια κυκλική εσοχή, στην οποία θα στερεώνεται το ελατήριο το οποίο θα παρέχει την αντίσταση για να κρατάει κλειστό το release.



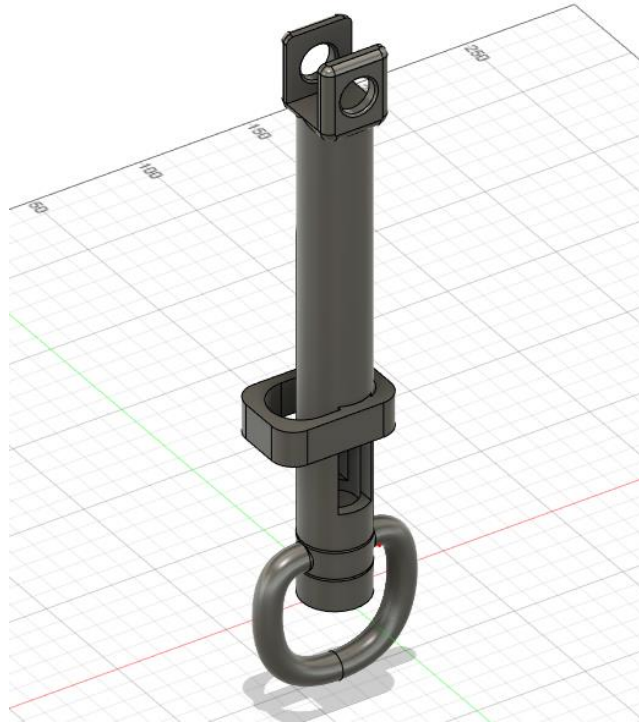
Εικόνα 21 Σχεδιασμός εξαρτήματος απελευθέρωσης (release) 1^ο μοντέλου

Έπειτα με βάση τις διαστάσεις του κορμού σχεδιάστηκε το περιστρεφόμενο εξάρτημα (swivel). Σκοπός του συγκεκριμένου εξαρτήματος είναι η αποφυγή του βινιρίσματος των σχοινιών κατά την περιστροφή τους.



Εικόνα 22 Σχεδιασμός περιστρεφόμενου εξαρτήματος (swivel) 1^ο μοντέλου

Στην Εικόνα 23 παρουσιάζονται τα τρία παραπάνω εξαρτήματα συναρμολογημένα. Αυτή είναι και η τελική διάταξη για την εκτύπωση στον τρισδιάστατο εκτυπωτή. Τα τρία εξαρτήματα θα εκτυπωθούν σε μια εκτύπωση ως ενιαίο υποσύνολο χρησιμοποιώντας υδατοδιαλυτό υποστηρικτικό υλικό μεταξύ τους και όχι το καθένα με διαφορετική εκτύπωση. Με αυτόν τον τρόπο απλουστεύεται η διαδικασία της εκτύπωσης, μειώνεται ο συνολικός χρόνος και εξαλείφεται η διαδικασία της συναρμολόγησης.

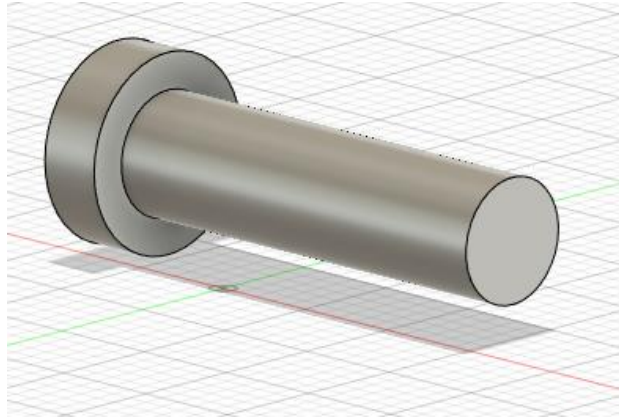


Εικόνα 23 Συναρμολογημένο υποσύνολο rod-release-swivel 1^{ου} μοντέλου

Στη συνέχεια σχεδιάστηκε ο στρεφόμενος βραχίονας (hook) υπολογίζοντας κατάλληλα τις διαστάσεις με σκοπό (α) να εφαρμόζει στην κεφαλή του κορμού με την κατάλληλη χάρη ώστε να επιτρέπεται η περιστροφή του και (β) να εφαρμόζει στο κενό χώρο εντός του εξαρτήματος απελευθέρωσης (release) δίπλα στο κορμό με την κατάλληλη χάρη ώστε να επιτρέπεται η κίνηση του release. Τέλος σχεδιάστηκε η βίδα (bolt) που θα συγκρατεί το hook με τον κορμό.

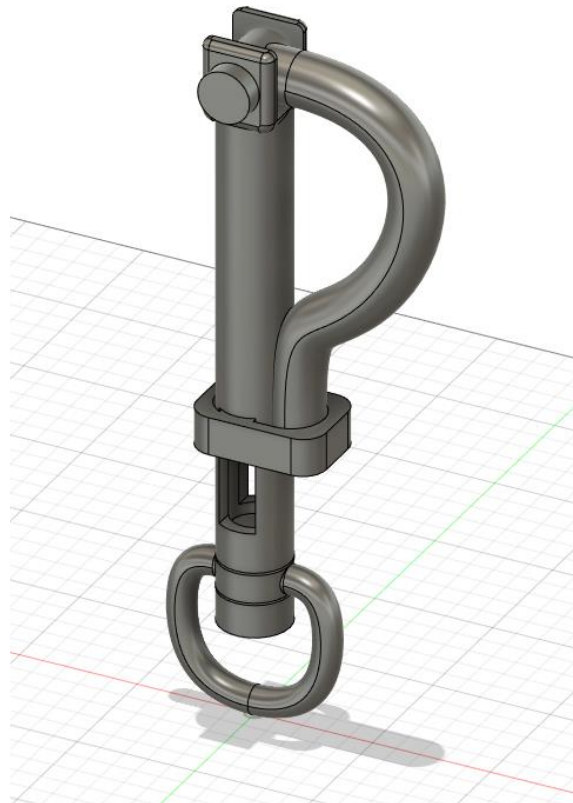


Εικόνα 24 Σχεδιασμός hook του 1^{ου} μοντέλου



Εικόνα 25 Σχεδιασμός βίδας (bolt)

Το 1^ο μοντέλο του πρωτότυπου προϊόντος όπως προέκυψε από την αρχική ιδέα απεικονίζεται ως συναρμολογημένο σύνολο στην Εικόνα 26 και οι συνολικές διαστάσεις είναι 295mm x 117mm x 51 mm.

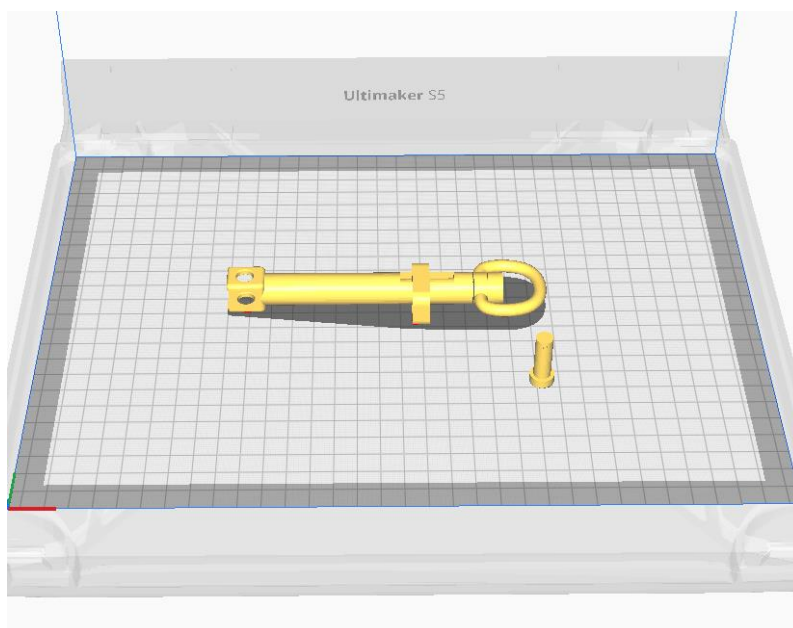


Εικόνα 26 Το συναρμολογημένο σύνολο - 1^ο μοντέλο

Αφού ολοκληρώθηκε η σχεδίαση, ακολούθησε η τρισδιάστατη εκτύπωσή του.

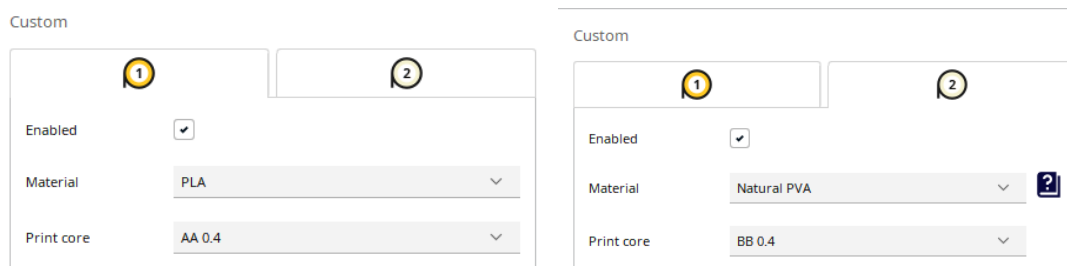
Για την τρισδιάστατη εκτύπωση του 1^{ου} μοντέλου έγινε αρχικά χρήση του προγράμματος Cura της Ultimaker, όπου ρυθμίστηκαν οι παράμετροι της εκτύπωσης και προσομοιώθηκε η διαδικασία.

Τα 3D μοντέλα εξήχθησαν από το Fusion 360 σε μορφή stl και στη συνέχεια έγινε η εισαγωγή τους στο λογισμικό Cura. Με τις κατάλληλα εντολές τοποθετήθηκαν στο τραπέζι του εκτυπωτή στην ακριβή θέση που θα γίνει η εκτύπωση (Εικόνα 27). Η πρώτη εκτύπωση περιλαμβάνει το συναρμολογημένο υποσύνολο rod-release-swivel και τη βίδα (bolt), και η δεύτερη εκτύπωση περιλαμβάνει το hook.



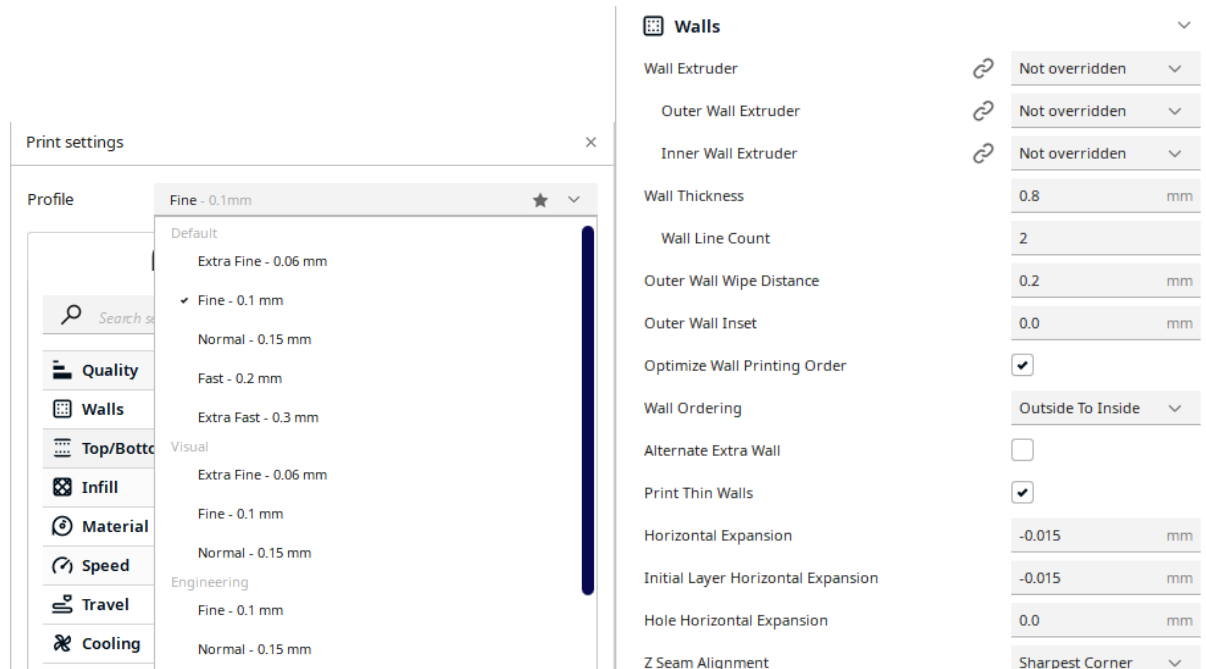
Εικόνα 27 Εξαρτήματα τοποθετημένα στο τραπέζι του εκτυπωτή

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι το PLA ως κυρίως υλικό και το υδατοδιαλυτό natural PVA ως υποστηρικτικό υλικό (Εικόνα 28).



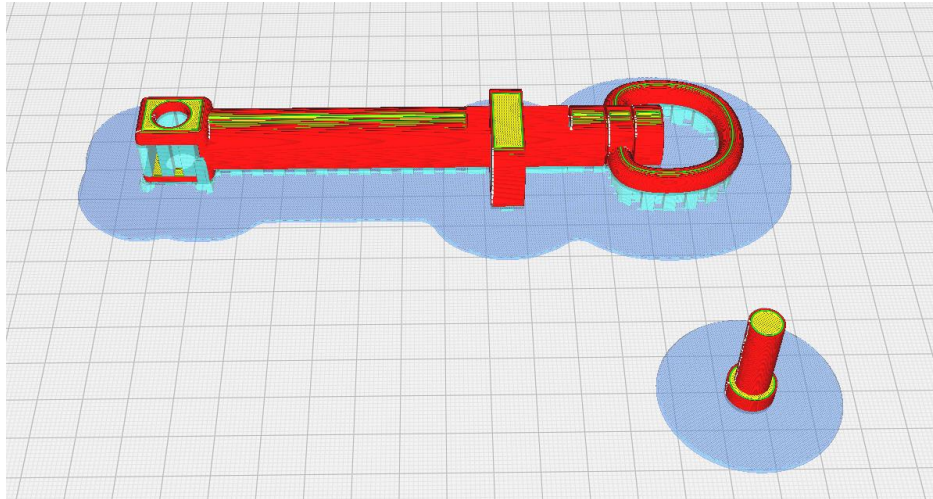
Εικόνα 28 Επιλογή υλικών στο Cura Ultimaker

Ως παράμετροι εκτύπωσης (Εικόνα 29) επιλέχθηκε ποιότητα εκτύπωσης Fine με ύψος στρώσης 0.1mm, 2 εξωτερικά τοιχώματα πάχους 0.8mm, μοτίβο triangles και πυκνότητα 40% για το κύριο υλικό (εσωτερικά του αντικειμένου), και μοτίβο triangles και πυκνότητα 50% για το υποστηρικτικό υλικό.

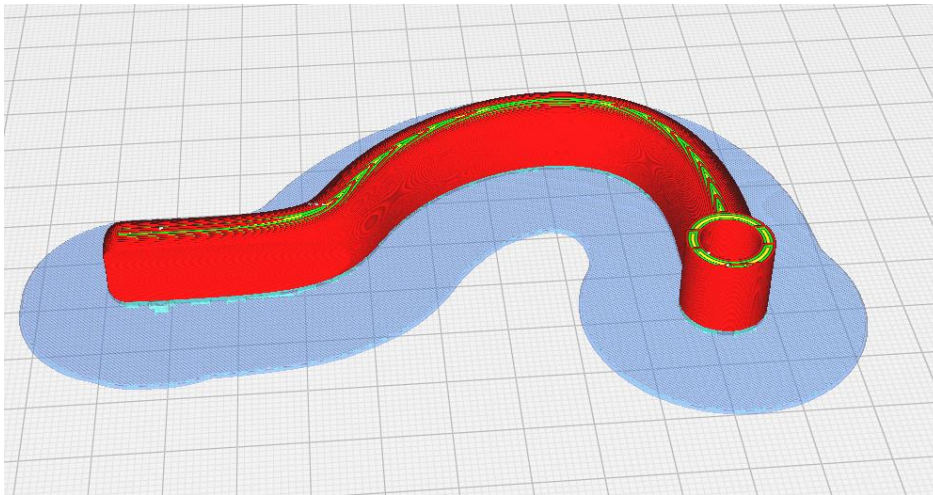


Εικόνα 29 Καθορισμός παραμέτρων ποιότητας εκτύπωσης στο Cura Ultimaker

Στη συνέχεια με την εντολή Slice, το λογισμικό δημιούργησε τις στρώσεις, οι οποίες μπορούν να ελεγχθούν από το χρήστη μέσω της προσομοίωσης της κίνησης της κεφαλής σε κάθε στρώση, και υπολόγισε αυτόματα το συνολικό χρόνο της εκτύπωσης και την απαιτούμενη ποσότητα των υλικών. Το αρχείο της εκτύπωσης αποθηκεύτηκε σε μορφή .nff που μπορεί να αναγνωρίσει και εκτελέσει ο τρισδιάστατος εκτυπωτής και μεταφέρθηκε σε αυτόν μέσω usb.



Εικόνα 30 Προσομοίωση εκτύπωσης rod-release-swivel 1^{ου} μοντέλου στο Cura



Εικόνα 31 Προσομοίωση εκτύπωσης hook του 1^{ου} μοντέλου στο Cura

Στη συνέχεια περιγράφονται τα βήματα της προετοιμασίας του τρισδιάστατου εκτυπωτή Ultimaker S5 του Εργαστηρίου Εργαλειομηχανών του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών ΠΑΔΑ.

Αρχικά έγινε η προθέρμανση του υδατοδιαλυτού υλικού PVA natural σε σταθερή θερμοκρασία ώστε να μειωθεί η υγρασία στο νήμα και να μαλακώσει, καθώς η ύπαρξη υγρασίας προκαλεί σπάσιμο του νήματος. Η διαδικασία που προτείνεται από την εταιρεία είναι να τοποθετηθεί το νήμα για 2 ώρες πάνω στο τραπέζι του εκτυπωτή, με ρύθμιση της θερμοκρασίας build plate temperature στους 50° C και μέσα στο χάρτινο κουτί για καλύτερη διάχυση τις θερμοκρασίας (Εικόνα 32).

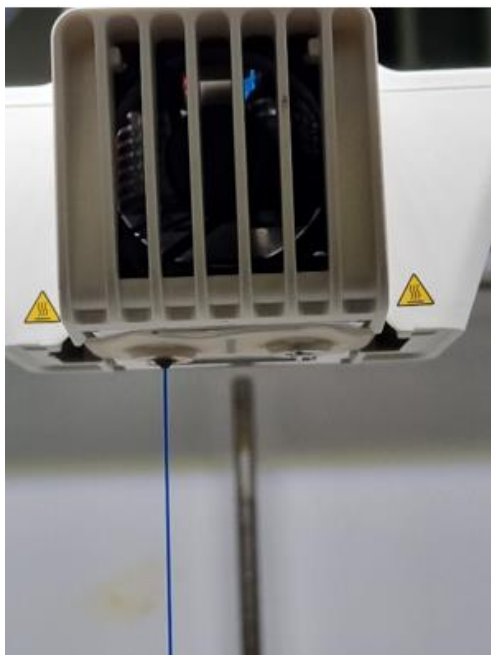
Εικόνα 32 Στάδιο προθέρμανσης του PVA natural

Έπειτα ακολουθήθηκε βήμα βήμα και με προσοχή η διαδικασία που απεικονίζεται στην οθόνη του εκτυπωτή. Αρχικά τα υλικά τοποθετήθηκαν στο πίσω μέρος του εκτυπωτή στις κατάλληλες θέσεις (Εικόνα 33). Μετά την τοποθέτηση των υλικών ακολούθησε η αναγνώριση τους από το λογισμικό του εκτυπωτή. Αυτή πραγματοποιείται είτε αυτόματα μέσω ενός αισθητήρα που σκανάρει την κουλούρα του νήματος και τα εμφανίζει στην οθόνη, είτε η επιλογή τους γίνεται χειροκίνητα από την οθόνη του εκτυπωτή.



Εικόνα 33 Τοποθέτηση υλικών στον εκτυπωτή

Με την έναρξη της εκτύπωσης ο εκτυπωτής ελέγχει την ευθυγράμμιση της πλατφόρμας ακουμπώντας εναλλάξ τα δύο ακροφύσια των κεφαλών στις τέσσερις γωνίες της. Στη συνέχεια ακολουθεί η θέρμανση των κεφαλών και όταν φτάσουν στην κατάλληλη θερμοκρασία το νήμα εξέρχεται από το ακροφύσιο και εκχέεται ομοιόμορφα προς τα κάτω (Εικόνες 34-35).

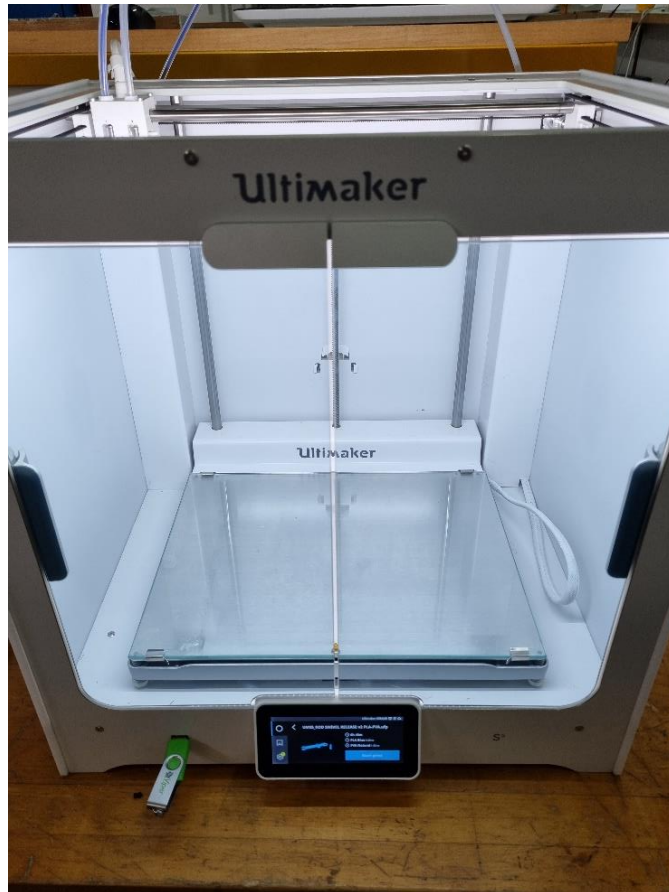


Εικόνα 34 Ομοιόμορφη έκχυση νήματος PLA

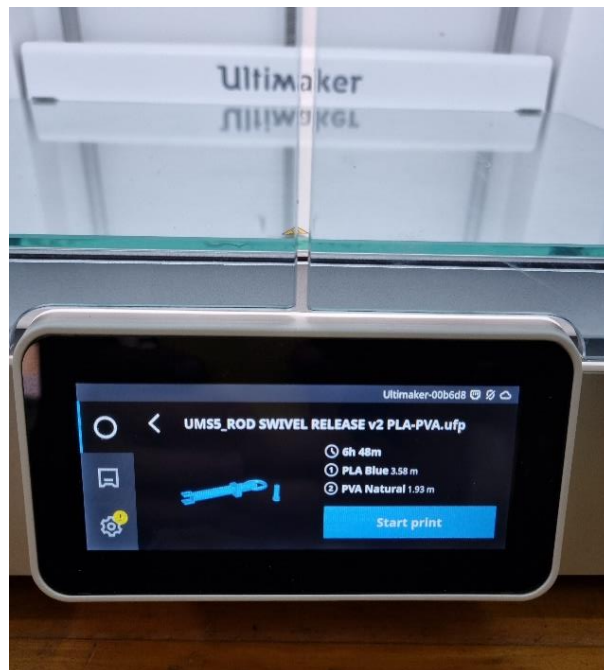


Εικόνα 35 Ομοιόμορφη έκχυση νήματος PVA natural

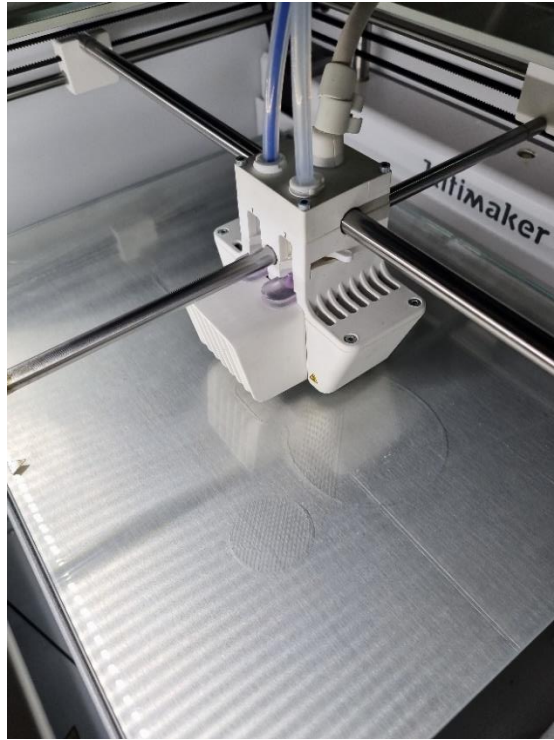
Η διαδικασία εκτύπωσης του συναρμολογημένου υποσύνολου rod-release-swivel του 1^{ου} μοντέλου απεικονίζεται στις παρακάτω Εικόνες.



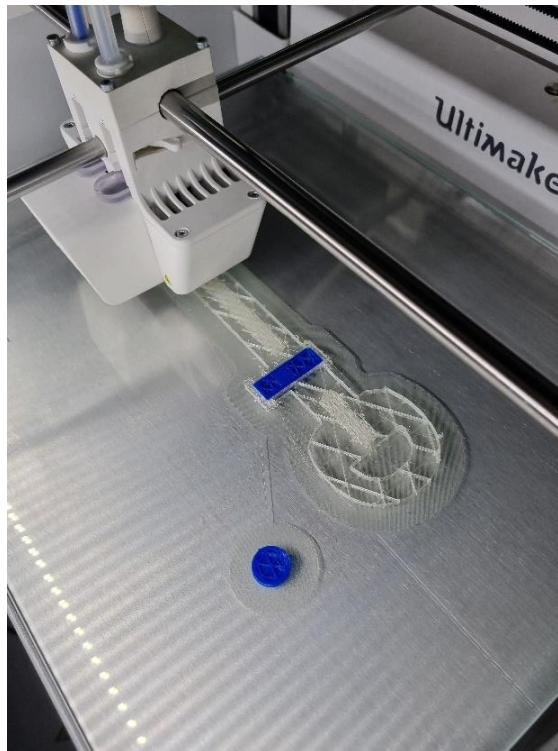
Εικόνα 36 Εισαγωγή αρχείου και αναγνώριση από τον εκτυπωτή



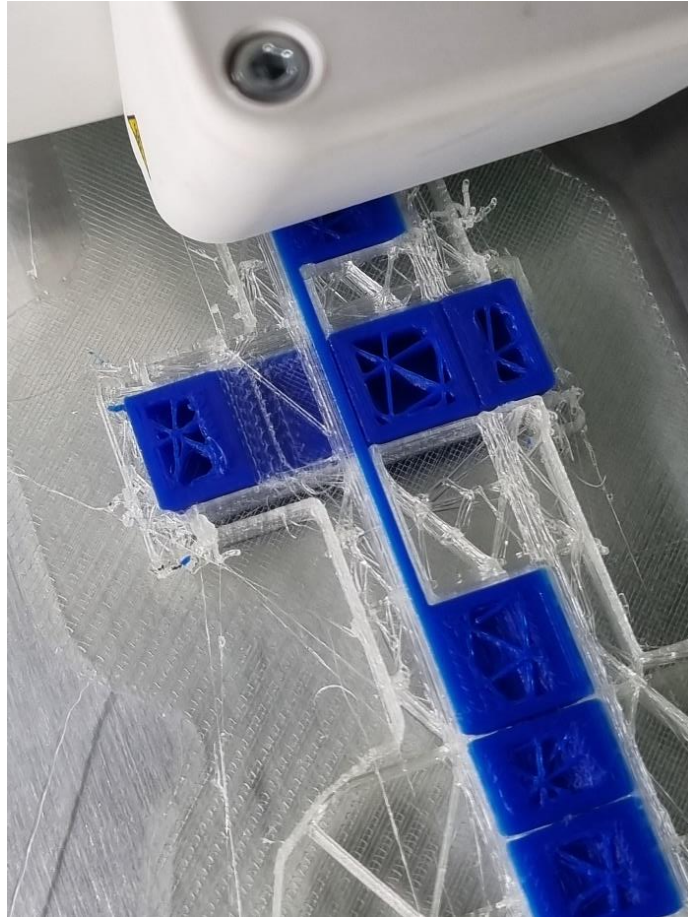
Εικόνα 37 Αναγνώριση του αρχείου, και εμφάνιση του χρόνου εκτύπωσης και της ποσότητας των υλικών



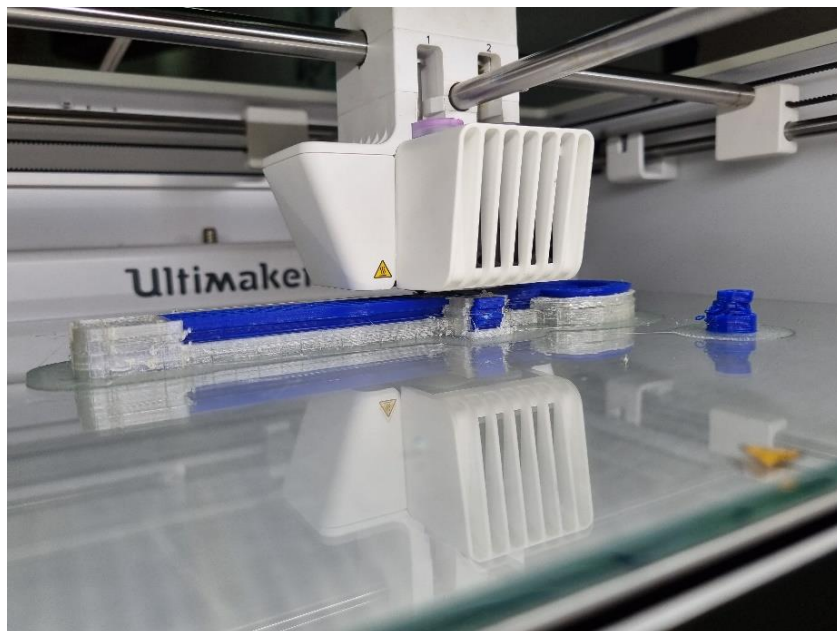
Εικόνα 38 Εναπόθεση της πρώτης στρώσης PVA Natural



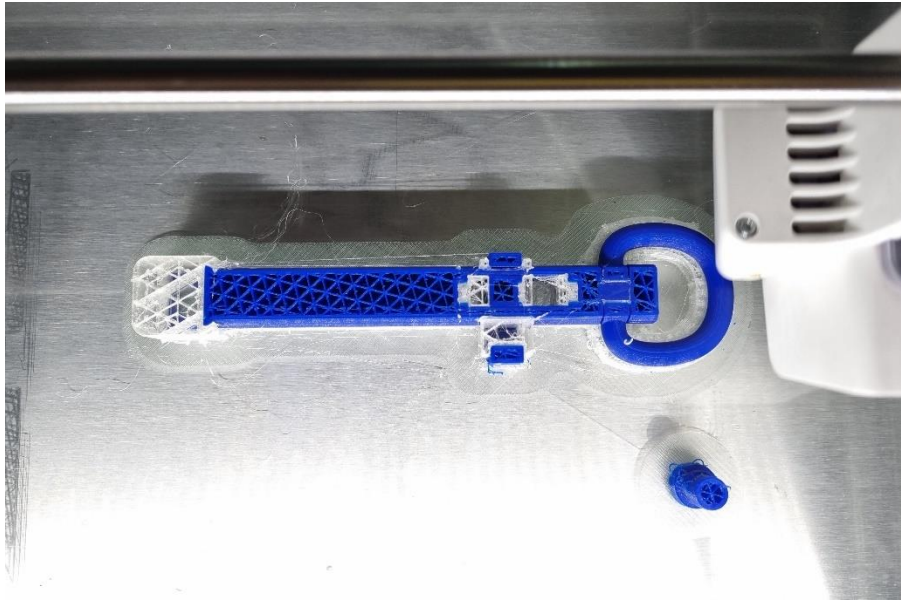
Εικόνα 39 Ενδιάμεσο στάδιο εκτύπωσης



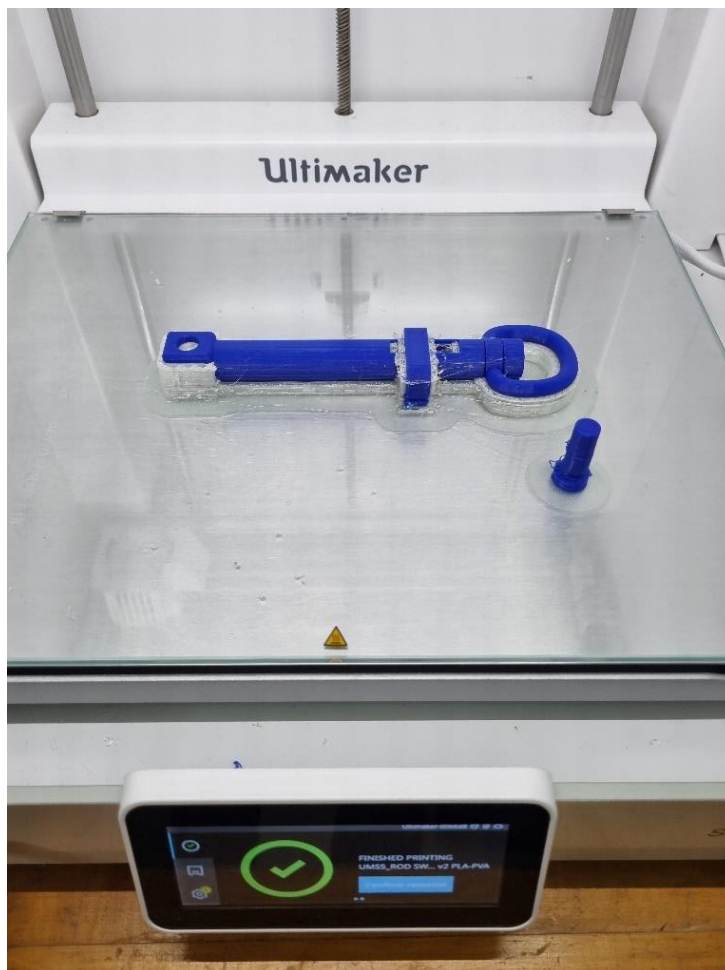
Εικόνα 40 Απεικόνιση εξωτερικών τοιχωμάτων και μοτίβου για το PLA και το PVA



Εικόνα 41 Ενδιάμεσο στάδιο εκτύπωσης



Εικόνα 42 Απεικόνιση μοτίβου στο rod και ολοκλήρωση του swivel



Εικόνα 43 Ολοκλήρωση εκτύπωσης



Εικόνα 44 Προσεκτική αφαίρεση εκτυπωμένου μοντέλου από το τραπέζι του εκτυπωτή

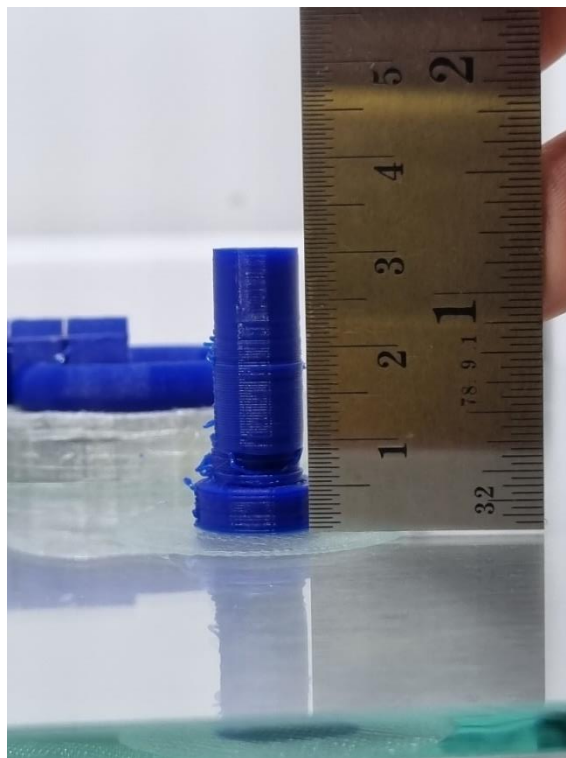


Εικόνα 45 Εμβάπτιση σε νερό για τη διάλυση του υποστηρικτικού υλικού



Εικόνα 46 Τελικό αποτέλεσμα εκτυπωμένου rod-release-swivel 1^{ου} μοντέλου

Η εκτύπωση δεν ήταν ιδιαίτερα επιτυχημένη καθώς κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης ο εκτυπωτής απορυθμίστηκε χωρίς προφανή αιτία και πιθανόν έχασε τις σωστές συντεταγμένες, με αποτέλεσμα κάποιες στρώσεις να μετακινηθούν περίπου 1 χιλιοστό κατά την οριζόντια διεύθυνση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 47.



Εικόνα 47 Μετατόπιση στρώσεων κατά την οριζόντια διεύθυνση

Το γεγονός αυτό επηρέασε τη λειτουργικότητα του συναρμολογημένου συνόλου και την κίνηση των επιμέρους εξαρτημάτων. Λόγω της μετατόπισης των στρώσεων, και επειδή τα διάκενα ανάμεσα στα rod-release και rod-swivel είχαν καθοριστεί αρκετά μικρά κατά το σχεδιασμό, δεν έγινε εναπόθεση του υδατοδιαλυτικού υλικού PVA στα διάκενα και τόσο η περιστροφή του swivel όσο και η μετακίνηση του release πάνω στον κορμό δεν ήταν εφικτή.



Εικόνα 48 Απεικόνιση ελαττωματικής εκτύπωσης

Στις παρακάτω Εικόνες απεικονίζεται η διαδικασία εκτύπωσης του στρεφόμενου βραχίονα (hook) του 1^{ου} μοντέλου.



Εικόνα 49 Ενδιάμεσο στάδιο εκτύπωσης του hook του 1^{ου} μοντέλου



Εικόνα 50 Απεικόνιση του μοτίβου του hook του 1^{ου} μοντέλου



Εικόνα 51 Απεικόνιση των εξωτερικών τοιχωμάτων του hook του 1^{ου} μοντέλου



Εικόνα 52 Ολοκλήρωση εκτύπωσης



Εικόνα 53 Εμβάπτιση σε νερό για τη διάλυση του υποστηρικτικού υλικού



Εικόνα 54 Τελικό αποτέλεσμα εκτυπωμένου hook του 1^{ου} μοντέλου



Εικόνα 55 Συναρμολόγηση 1^{ου} μοντέλου

Παρατηρήσεις σχετικά με το 1^ο μοντέλο:

Η εκτύπωση του 1^{ου} μοντέλου δεν ήταν επιτυχημένη, καθώς η μετατόπιση των στρώσεων κατά την οριζόντια διεύθυνση, δεν επέτρεψε τη δημιουργία των διάκενων μεταξύ των εξαρτημάτων και το τελικό προϊόν δεν ήταν λειτουργικό.

Πιθανή αιτία της απορρύθμισης του εκτυπωτή θεωρήθηκε το γεγονός ότι έγινε προσπάθεια να εκτυπωθεί το συναρμολογημένο υποσύνολο rod-release-swivel μαζί με τη βίδα (bolt) με αποτέλεσμα οι κεφαλές του εκτυπωτή να διανύουν μεγάλες αποστάσεις χωρίς εναπόθεση υλικού, όπως επίσης και οι πολλές εναλλαγές των κεφαλών για εναπόθεση PLA και PVA.

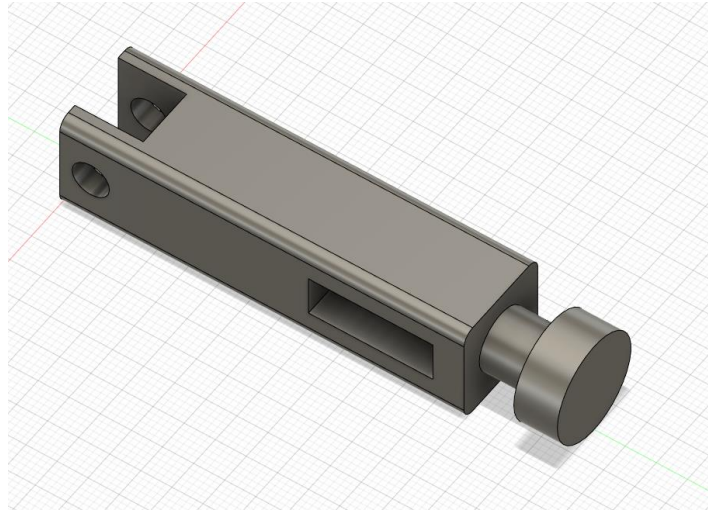
Για να αποφευχθεί αντίστοιχη δυσλειτουργία προτάθηκε ξεχωριστή εκτύπωση για κάθε αντικείμενο. Επίσης για να διευκολυνθεί η εναπόθεση του PVA και για να μην υπάρξουν δυσκολίες κατά τη συναρμολόγηση, θεωρήθηκε αναγκαία η αύξηση του διάκενου (clearance) μεταξύ των εξαρτημάτων σε 1 χιλιοστό (από 0.5mm στο προηγούμενο μοντέλο).

Το μέγεθος του τελικού εκτυπωμένου πρωτοτύπου επίσης κρίθηκε ότι είναι πολύ μεγάλο για το σκοπό που θα εξυπηρετεί και προτάθηκε η μείωσή του.

Τέλος για να μειωθεί ο αριθμός των εναλλαγών του υλικού από PLA σε PVA σε κάθε στρώση, προτάθηκε η τροποποίηση ορισμένων γεωμετρικών χαρακτηριστικών του 1^{ου} μοντέλου ώστε να γίνουν πιο τετραγωνισμένα και να μην απαιτείται εναπόθεση PVA υλικού για τη στήριξή τους. Αυτή η ενέργεια προβλέπεται να μειώσει τον σφάλμα που ενδέχεται να δημιουργηθεί από τη συνεχόμενη εναλλαγή των κεφαλών για εναπόθεση υλικού από τις δύο κεφαλές, η οποία πιθανώς επηρεάζει την ποιότητα του μοντέλου.

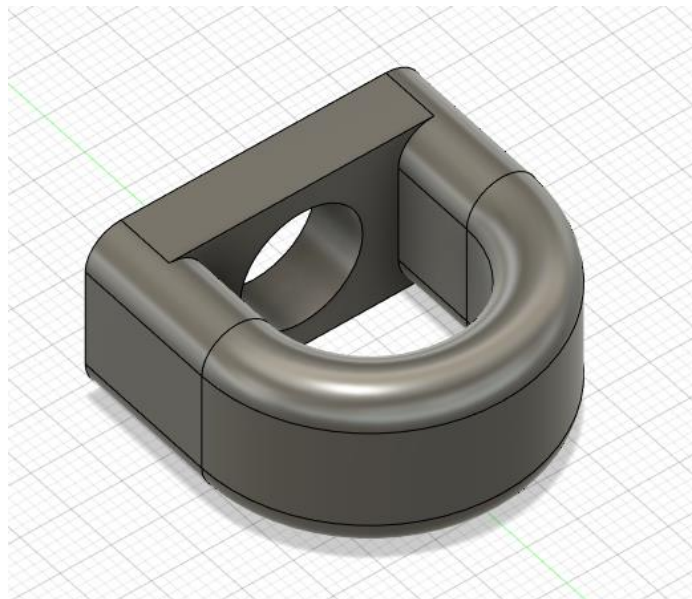
5.3. Σχεδιασμός και Εκτύπωση Τροποποιημένου 2ου Μοντέλου

Έχοντας υπόψιν τις παρατηρήσεις που προέκυψαν από την πρώτη εκτύπωση ακολούθησε ο σχεδιασμός του δεύτερου μοντέλου. Κατά το σχεδιασμό δόθηκε έμφαση στη σμίκρυνση του μοντέλου αλλά και στην τροποποίηση των κυλινδρικών επιφανειών με επιφάνειες με μικρότερες καμπυλότητες, με σκοπό τη χρησιμοποίηση μικρότερης ποσότητας υποστηρικτικού υλικού PVA, το οποίο τοποθετείται υποχρεωτικά για στήριξη στα πιο κυλινδρικά σχήματα. Η μείωση της χρήσης του PVA θα έχει ως αποτέλεσμα τόσο τη διευκόλυνση της διαδικασίας εκτύπωσης αλλά και τη μείωση του χρόνου εκτύπωσης, καθώς ο εκτυπωτής δεν θα εναλλάσσει τόσο συχνά τις δύο κεφαλές για την εναπόθεση των υλικών PLA και PVA.

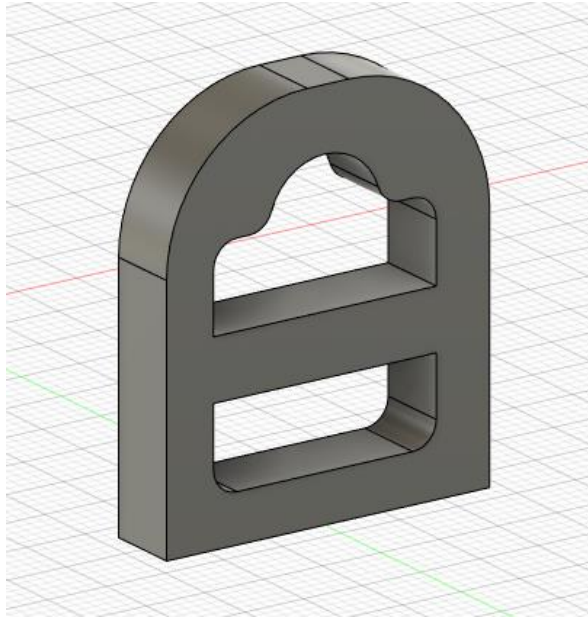


Εικόνα 56 Τροποποίηση σχεδιασμού κορμού (rod) 2^ο μοντέλου

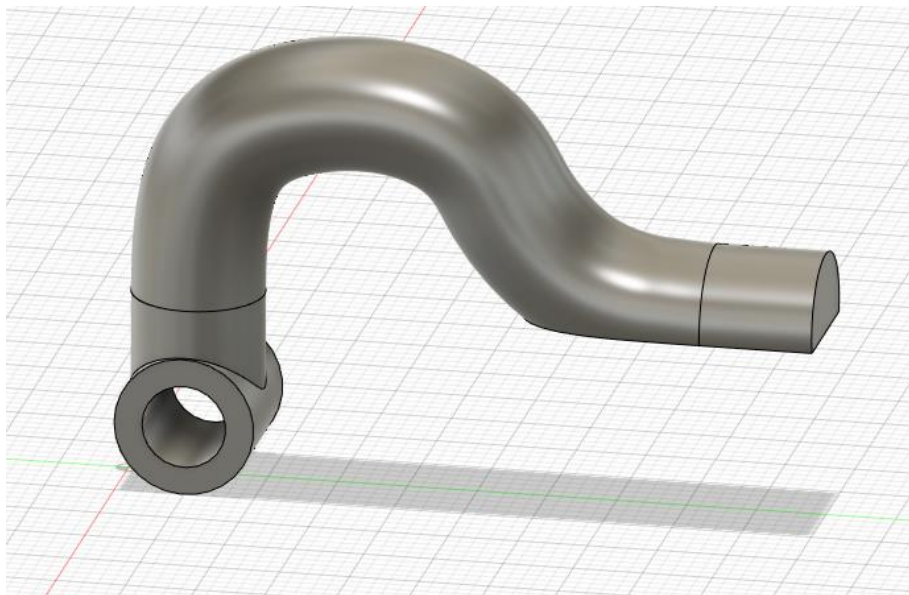
Όσον αφορά το περιστρεφόμενο εξάρτημα (swivel), προτιμήθηκε να ενισχυθεί με επιπλέον υλικό η περιοχή της οπής που συγκρατείται γύρω από τον κορμό ώστε να γίνει πιο στιβαρή η τελική κατασκευή. Αντίστοιχη λογική σχεδίασης χρησιμοποιήθηκε και για το εξάρτημα απελευθέρωσης (release), ενώ το βασικό σχέδιο του στρεφόμενου βραχίονα (hook) παραμένει ίδιο αλλά σε μικρότερο μέγεθος.



Εικόνα 57 Τροποποίηση σχεδιασμού περιστρεφόμενου εξαρτήματος (swivel) 2^ο μοντέλου



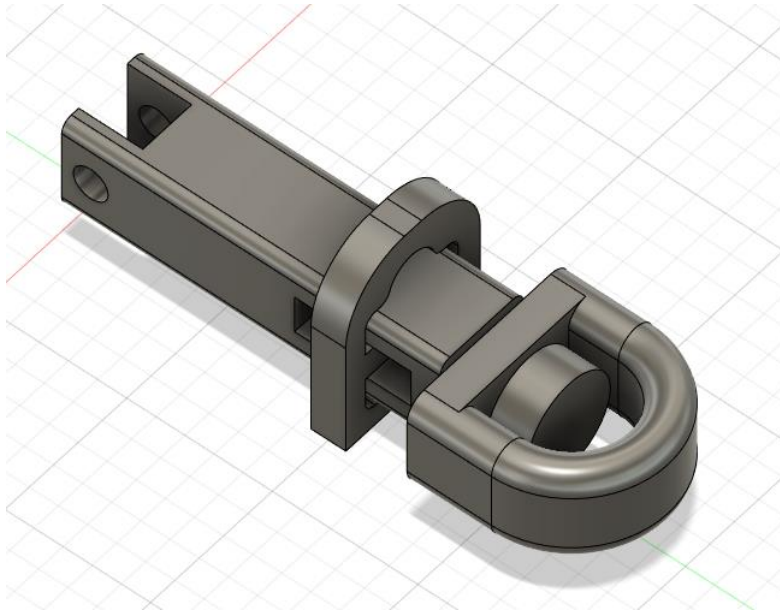
Εικόνα 58 Τροποποίηση σχεδιασμού εξαρτήματος απελευθέρωσης (release) 2^{ου} μοντέλου



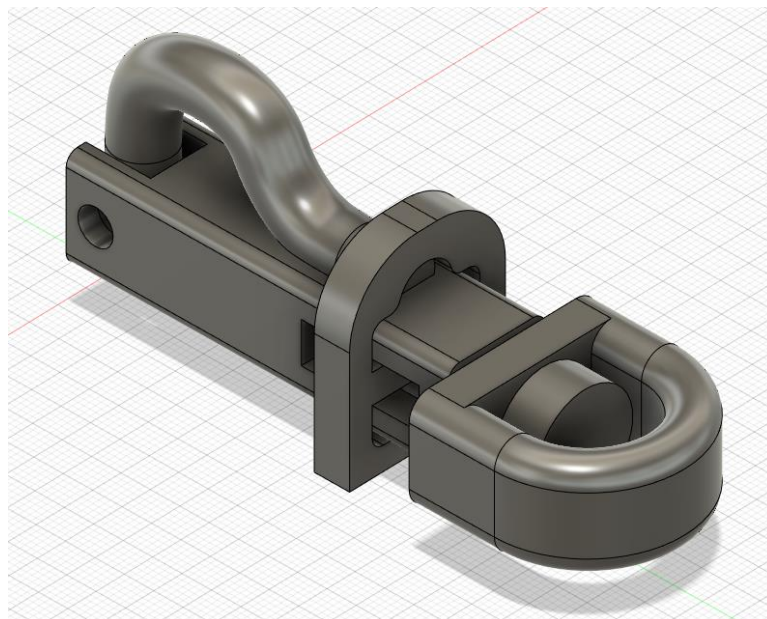
Εικόνα 59 Σχεδίαση hook του 2^{ου} μοντέλου

Στη συνέχεια ακολούθησε η τοποθέτηση των εξαρτημάτων στη σχετική τους θέση.

Το συναρμολογημένο υποσύνολο rod-release-swivel το οποίο επρόκειτο να κατασκευαστεί ενιαίο σε μία εκτύπωση απεικονίζεται στην Εικόνα 60. Αντίστοιχα στην Εικόνα 61 απεικονίζεται το 2^ο μοντέλο με όλα τα επιμέρους εξαρτήματα, με συνολικές διαστάσεις 97 mm x 41,5 mm x 33 mm.



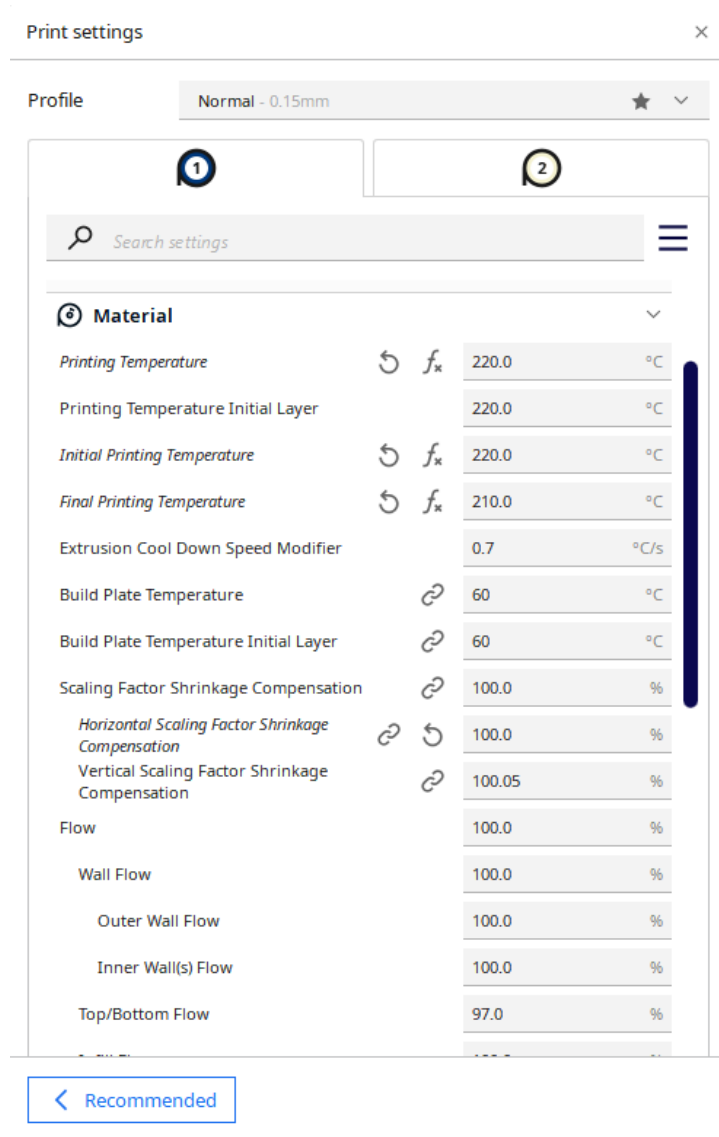
Εικόνα 60 Συναρμολογημένο υποσύνολο rod-release-swivel 2^{οο} μοντέλου



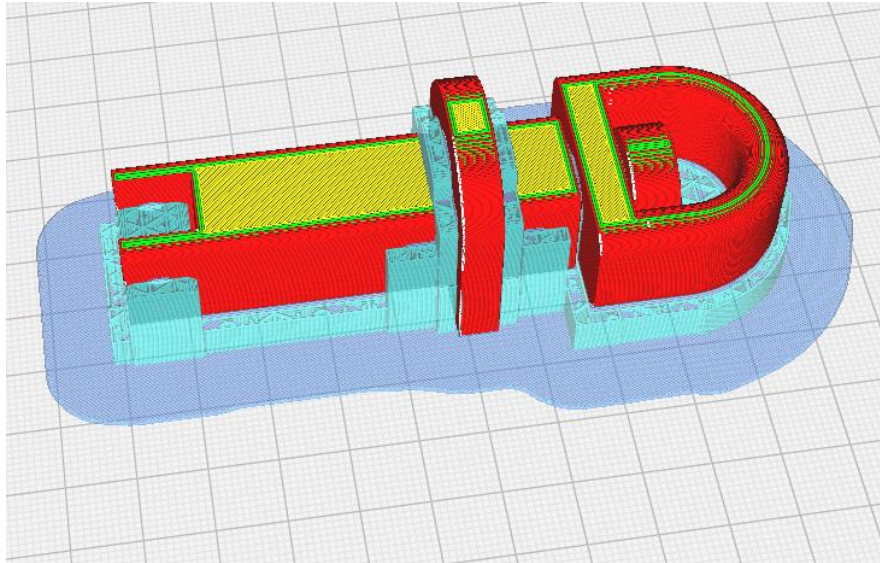
Εικόνα 61 Το συναρμολογημένο σύνολο - 2^ο μοντέλο

Στη συνέχεια με τη χρήση του προγράμματος Cura, καθορίζουμε τις κατάλληλες παραμέτρους για να πετύχουμε τη βέλτιστη εκτύπωση του μοντέλου. Η διαφοροποίηση σε σχέση με την εκτύπωση του 1^{οο} μοντέλου αφορά την αύξηση της θερμοκρασίας εκτύπωσης του υλικού PLA κατά 20° C, ώστε να προκύψει μια πιο ομαλή εναπόθεση του υλικού και καλύτερη συγκόλληση

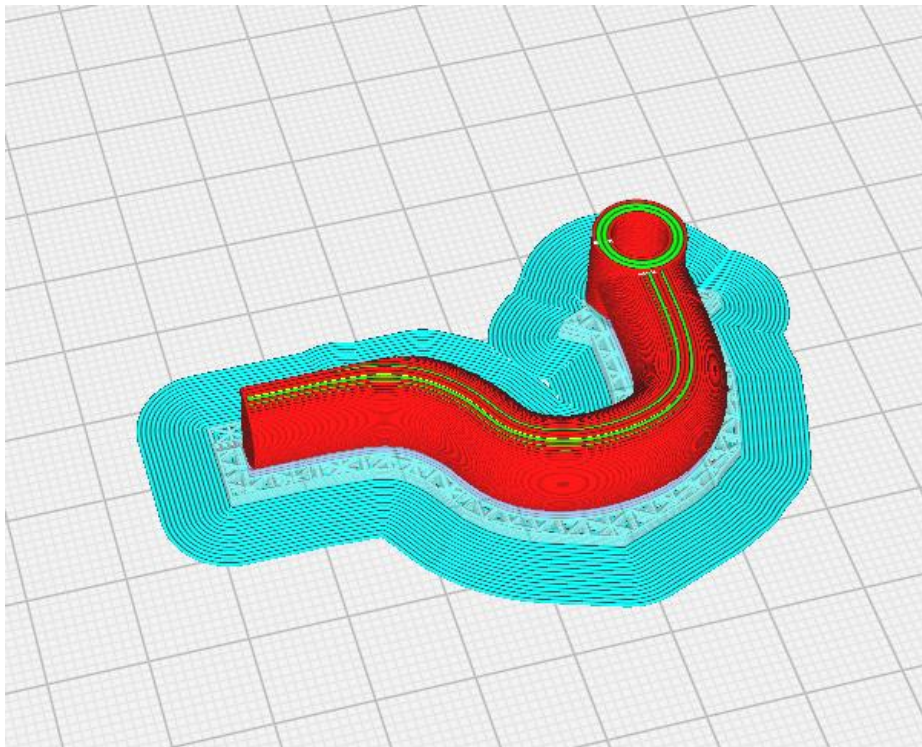
των στρώσεων (Εικόνα 62). Επιπλέον, εξ αιτίας της σμίκρυνσης του μοντέλου και των σχετικών τροποποιήσεων ο χρόνος εκτύπωσης μειώθηκε κατά 2 ώρες.



Εικόνα 62 Καθορισμός θερμοκρασίας εκτύπωσης υλικού PLA στο Cura

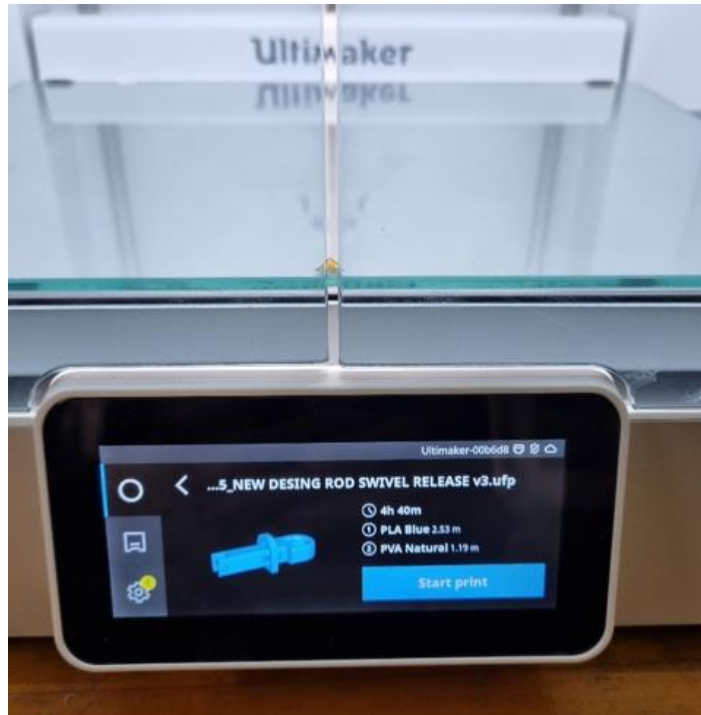


Εικόνα 63 Προσομοίωση εκτύπωσης rod-release-swivel 2^ο μοντέλου στο Cura

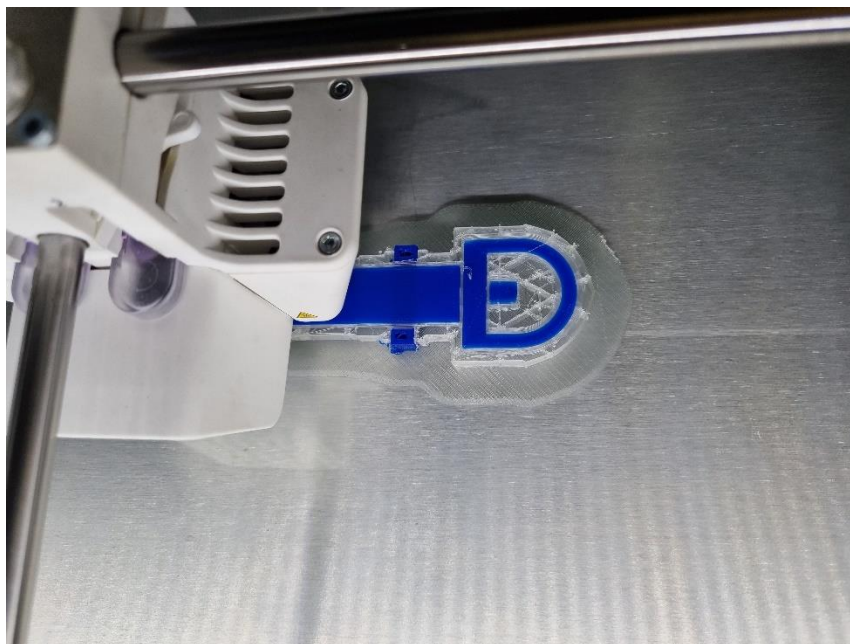


Εικόνα 64 Προσομοίωση εκτύπωσης hook του 2^ο μοντέλου στο Cura.

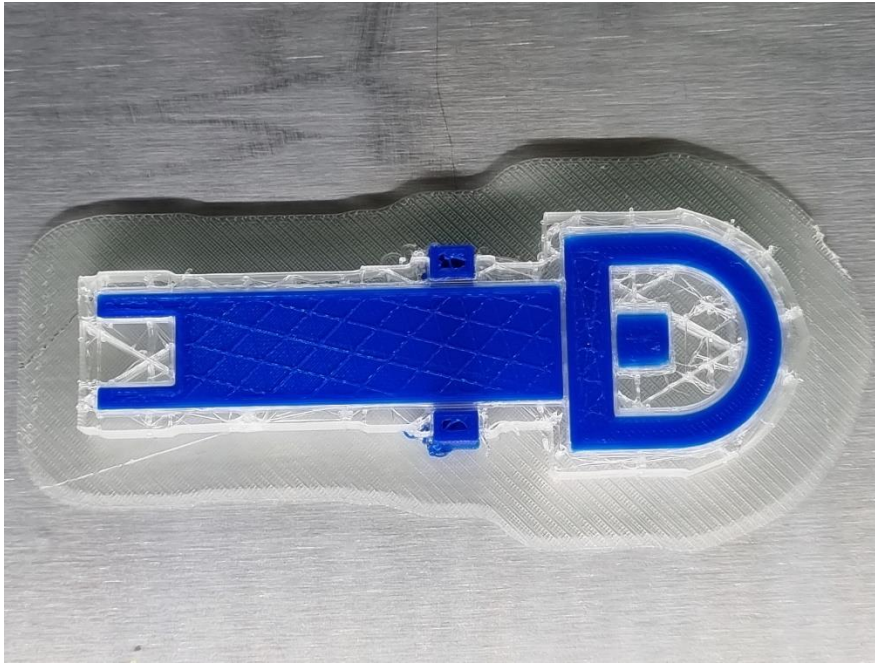
Η διαδικασία εκτύπωσης του 2^ο μοντέλου απεικονίζεται στις παρακάτω Εικόνες.



Εικόνα 65 Εκκίνηση εκτύπωσης rod-release-swivel 2^ο μοντέλου



Εικόνα 66 Ενδιάμεσο στάδιο εκτύπωσης



Εικόνα 67 Απεικόνιση των διάκενων με εναπόθεση υλικού PVA



Εικόνα 68 Τελικό αποτέλεσμα εκτυπωμένου rod-release-swivel 2^ο μοντέλου



Εικόνα 69 Εκκίνηση εκτύπωσης hook του 2^{ου} μοντέλου



Εικόνα 70 Τελικό στάδιο εκτύπωσης hook του 2^{ου} μοντέλου



Εικόνα 71 Τελικό αποτέλεσμα εκτυπωμένου hook του 2^{ου} μοντέλου



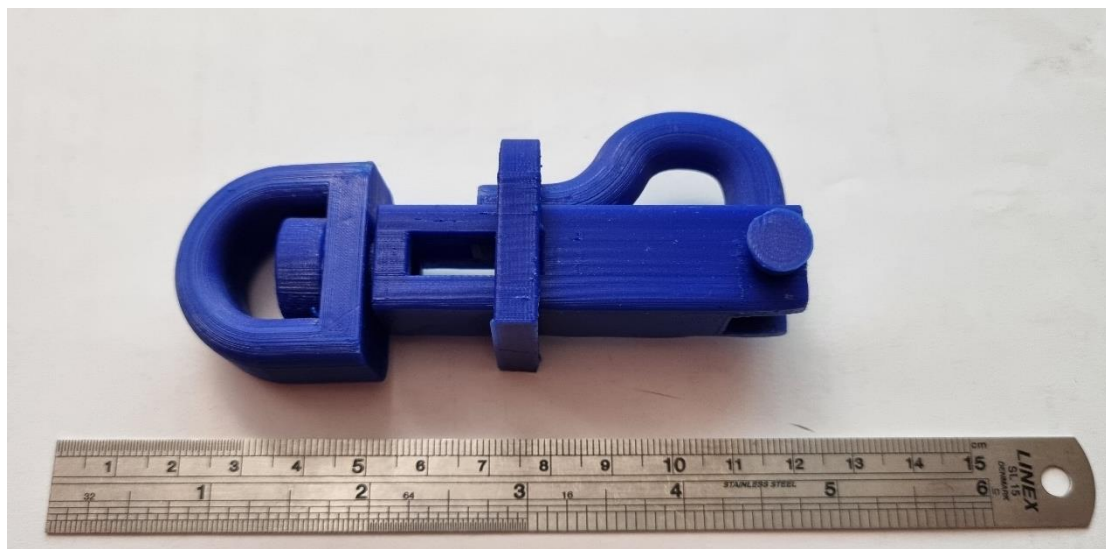
Εικόνα 72 Ενδιάμεσο στάδιο εκτύπωσης βίδας (bolt) 2^{ου} μοντέλου



Εικόνα 73 Τελικό αποτέλεσμα εκτυπωμένης βίδας (bolt) 2^ο μοντέλου

Παρατηρήσεις σχετικά με το 2^ο μοντέλο:

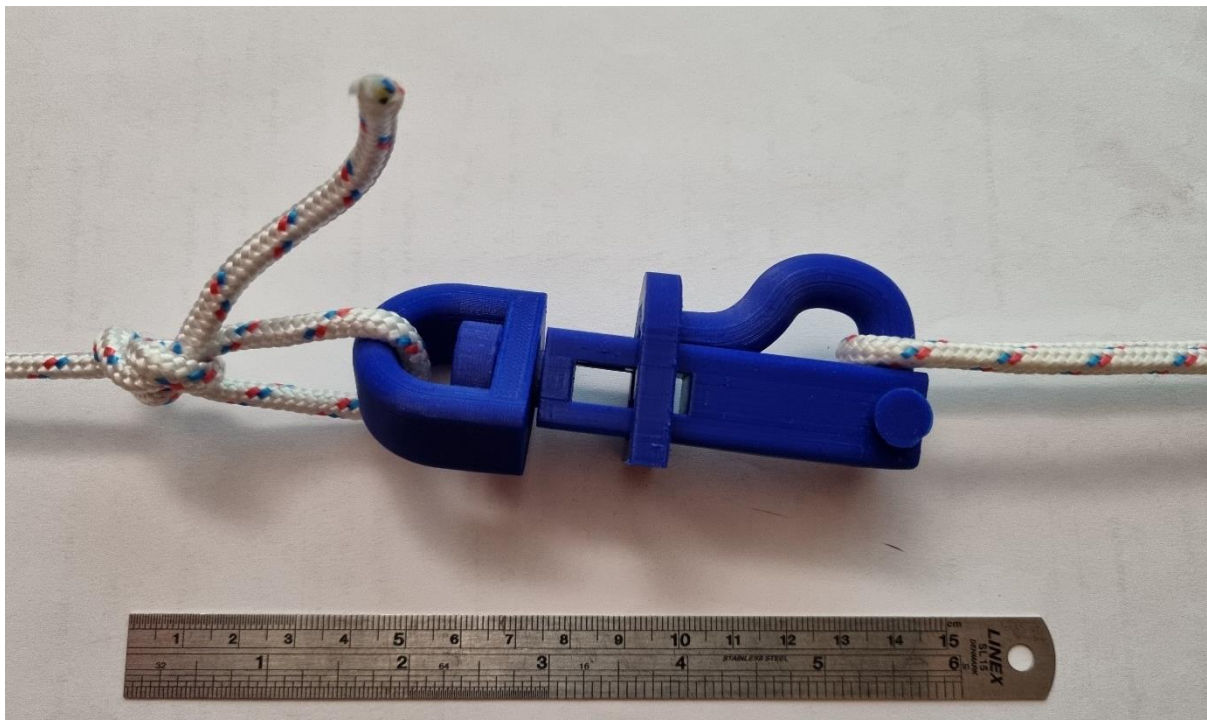
Η συναρμολόγηση του 2^ο μοντέλου ήταν αρκετά επιτυχημένη καθώς (α) δεν προέκυψαν προβλήματα κατά την εκτύπωση, και (β) η αύξηση των διάκενων μεταξύ των εξαρτημάτων κατά 1 χιλιοστό επέτρεψε την εναπόθεση του υδατοδιαλυτικού υλικού PVA σε αυτά. Η ποιότητα επιφάνειας ήταν αρκετά ικανοποιητική ενώ το εκτυπωμένο μοντέλο ήταν πλήρως λειτουργικό επιτρέποντας τη σχετική κίνηση μεταξύ των εξαρτημάτων.



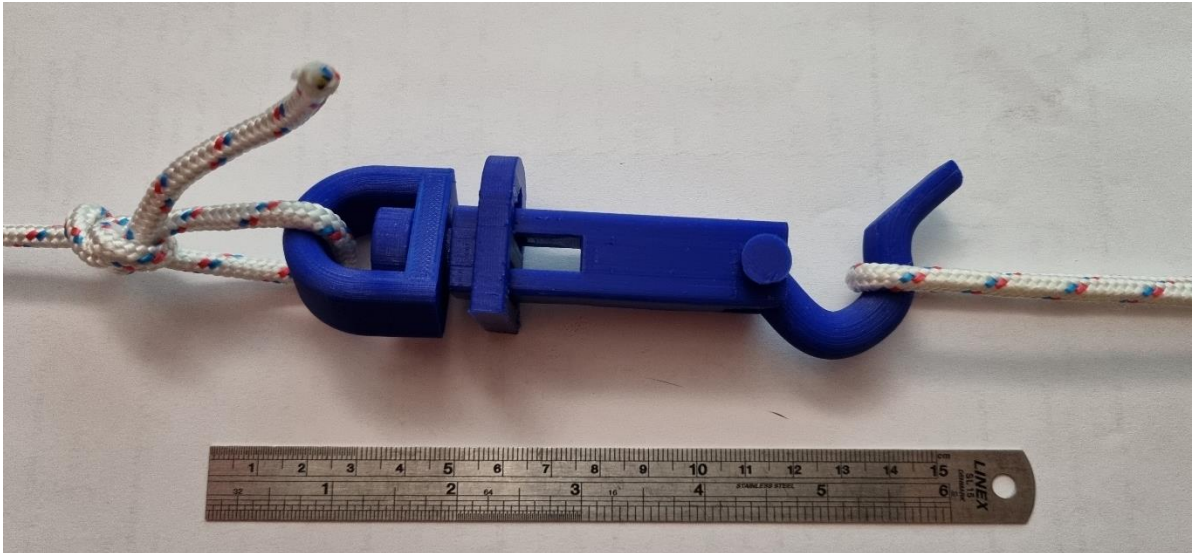
Εικόνα 74 Συναρμολόγηση 2^ο μοντέλου

Στη συνέχεια έγινε έλεγχος της λειτουργίας του εκτυπωμένου προϊόντος τοποθετώντας σχοινί στο περιστρεφόμενο εξάρτημα (swivel) και στο στρεφόμενο βραχίονα (hook), όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 75. Η περιστροφή του swivel πραγματοποιήθηκε επιτυχώς με τη δύναμη που εξασκήθηκε στο σχοινί με το χέρι. Η μετακίνηση επίσης με το χέρι του εξαρτήματος απελευθέρωσης (release) έγινε εύκολα και γρήγορα, ενώ ο στρεφόμενος βραχίονας (hook) απελευθερώθηκε αμέσως από τη θέση του. Ωστόσο ο σχεδιασμός του στρεφόμενου βραχίονα (hook) δεν επέτρεψε την πλήρη απελευθέρωση και απομάκρυνση του σχοινιού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 76. Το σχοινί παρέμεινε συγκρατημένο στο σημείο που αλλάζει η κλίση στο σώμα του στρεφόμενου βραχίονα (hook). Η κλίση αυτή θεωρήθηκε πολύ απότομη και προτάθηκε η τροποποίησή της στην επόμενη σχεδίαση.

Τέλος, προτάθηκε η περαιτέρω μείωση του μεγέθους ή/και του όγκου του προϊόντος στον κορμό (rod) αλλά και στο περιστρεφόμενο εξάρτημα (swivel), καθώς κρίθηκε ότι αυτό δεν θα επηρεάσει τη λειτουργικότητα και την κίνηση των εξαρτημάτων, ενώ θα έχει ως σημαντικό πλεονέκτημα τη μείωση του βάρους του προϊόντος, τη μείωση της κατανάλωσης υλικού και τη μείωση του χρόνου κατασκευής.



Εικόνα 75 Δοκιμή λειτουργίας στο εκτυπωμένο 2^ο μοντέλο – Ασφαλισμένο snap shackle

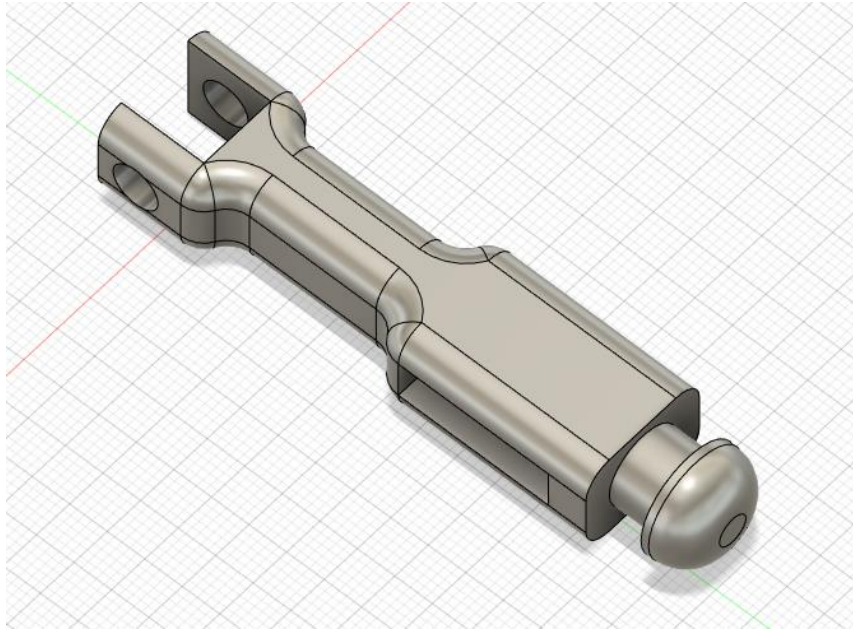


Εικόνα 76 Δοκιμή λειτουργίας στο εκτυπωμένο 2^ο μοντέλο – Απασφάλιση snap shackle

5.4. Σχεδιασμός και Εκτύπωση Βελτιστοποιημένου 3ου Μοντέλου

Η σχεδίαση του 3^{ου} μοντέλου έγινε με γνώμονα την επιπρόσθετη μείωση του μεγέθους και του όγκου και κατά συνέπεια του βάρους της κατασκευής, αλλά και τη βελτίωση της λειτουργικότητας σύμφωνα με τις παρατηρήσεις που προέκυψαν από τη δοκιμή του 2^{ου} μοντέλου.

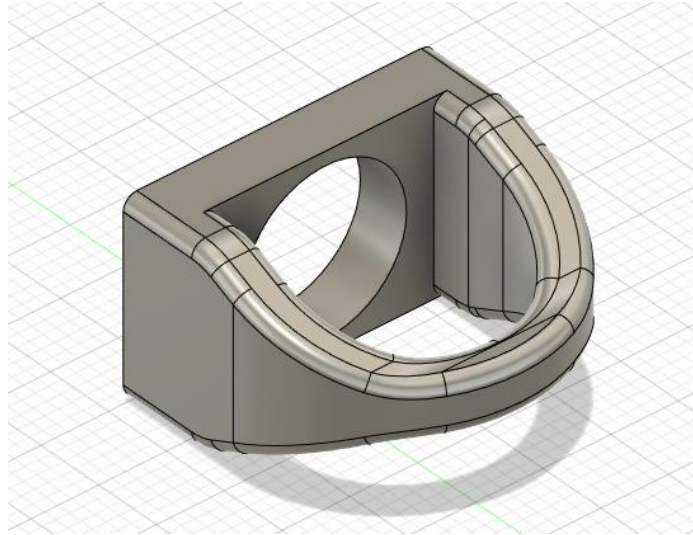
Αρχικά έγινε η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του κορμού (rod), αφαιρώντας τμήματα της γεωμετρίας του, τα οποία δεν επηρεάζουν τη στιβαρότητα και αντοχή του εξαρτήματος και επίσης μειώθηκε το μήκος του κατά 10 mm. Αντίστοιχη λογική σχεδίασης ακολουθήθηκε για το εξάρτημα απελευθέρωσης (release) αλλά και για το περιστρεφόμενο εξάρτημα (swivel).



Εικόνα 77 Βελτιστοποίηση σχεδιασμού κορμού (rod) 3^ο μοντέλου

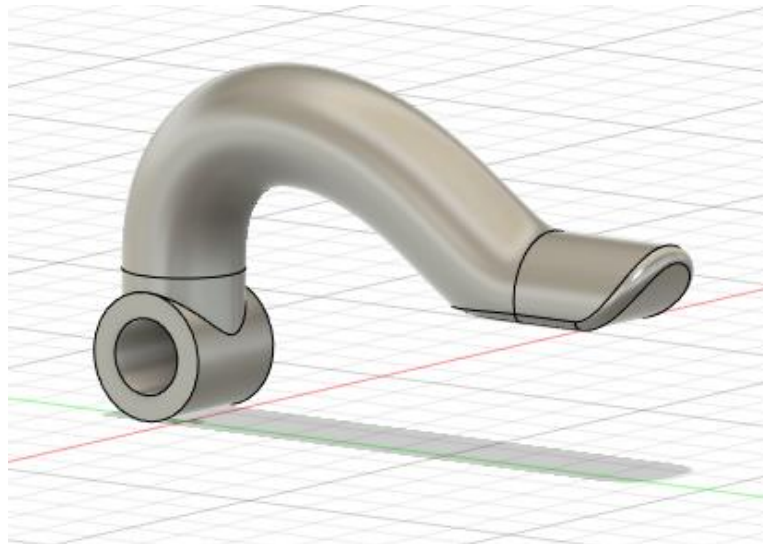


Εικόνα 78 Βελτιστοποίηση σχεδιασμού εξαρτήματος απελευθέρωσης (release) 3^ο μοντέλου



Εικόνα 79 Βελτιστοποίηση σχεδιασμού περιστρεφόμενου εξαρτήματος (swivel) 3^{ου} μοντέλου

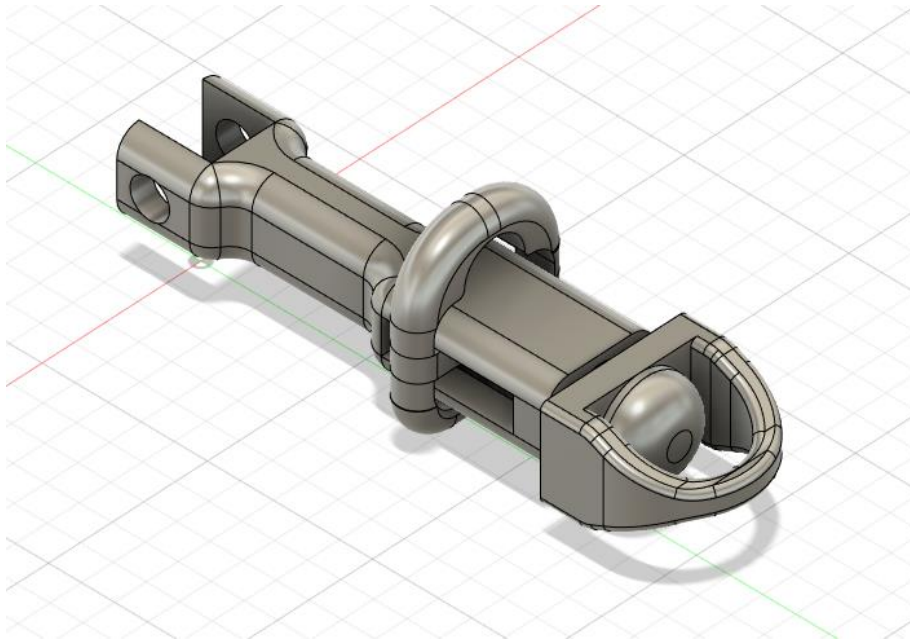
Στη σχεδίαση του στρεφόμενου βραχίονα (hook) μειώθηκε και εξομαλύνθηκε η γωνία κλίσης του σώματος του στρεφόμενου βραχίονα (hook), με σκοπό (α) να μειωθεί η ωφέλιμη διάμετρος που πιάνει το σχοινί, και (β) να μειωθεί ο κίνδυνος να μην απελευθερωθεί το σχοινί από το στρεφόμενο βραχίονα (hook) όταν αυτός απασφαλιστεί.



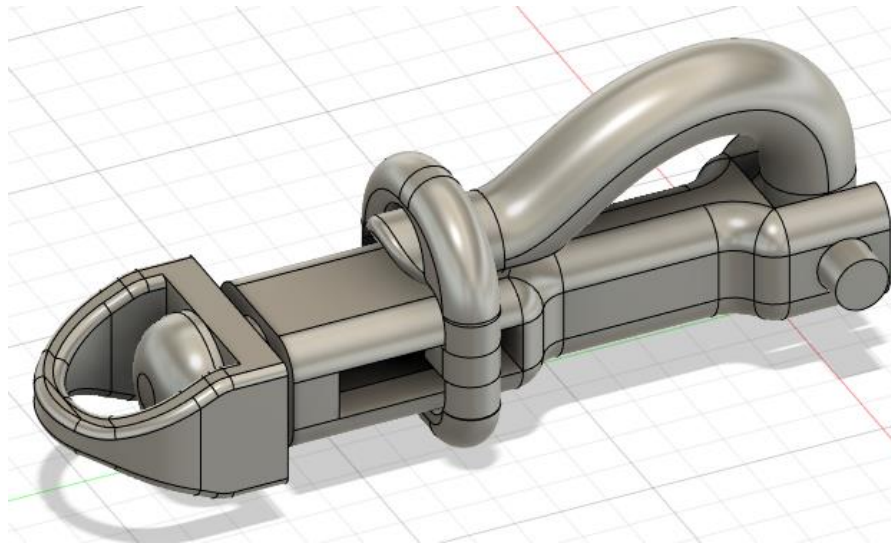
Εικόνα 80 Βελτιστοποίηση σχεδιασμού hook του 3^{ου} μοντέλου

Το συναρμολογημένο υποσύνολο rod-release-swivel το οποίο επρόκειτο να κατασκευαστεί ενιαίο σε μία εκτύπωση απεικονίζεται στην Εικόνα 81. Αντίστοιχα στην Εικόνα 82

απεικονίζεται το βελτιστοποιημένο 3^ο μοντέλο με τα επιμέρους εξαρτήματα με συνολικές διαστάσεις 88mm x 24.5mm x 33mm.



Εικόνα 81 Συναρμολογημένο υποσύνολο rod – release – swivel 3^{ου} μοντέλου

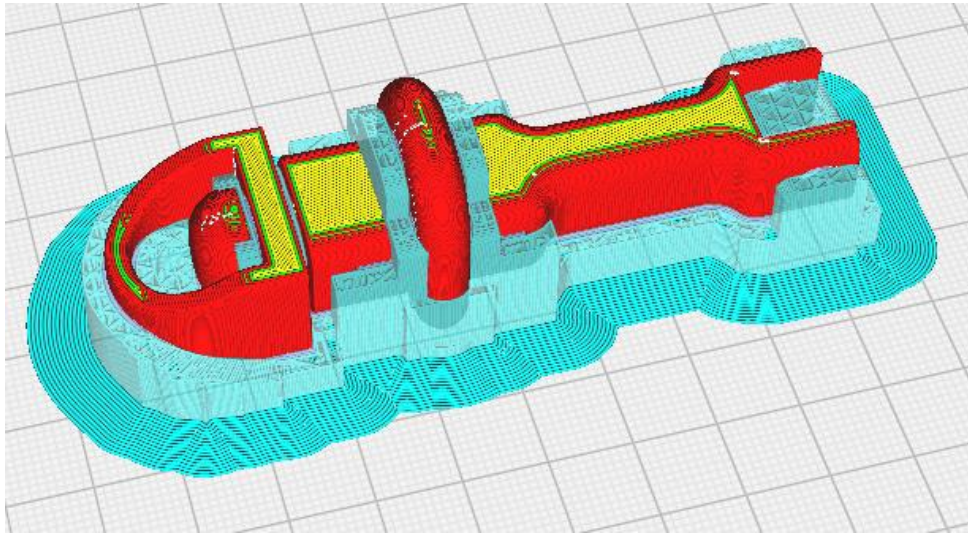


Εικόνα 82 Το συναρμολογημένο σύνολο - 3^ο μοντέλο

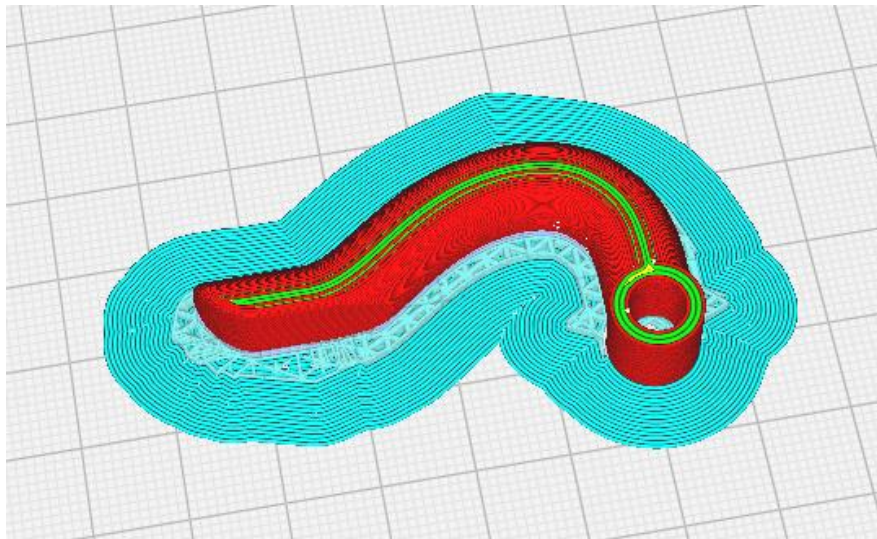
Για την τρισδιάστατη εκτύπωση του 3^{ου} μοντέλου καθορίστηκαν οι ίδιες παράμετροι εκτύπωσης καθώς η εκτύπωση του 2^{ου} μοντέλου ήταν αρκετά επιτυχημένη, τόσο από θέμα

ποιότητας των επιφανειών όσο και από θέμα λειτουργικότητας και κινητικότητας των εξαρτημάτων.

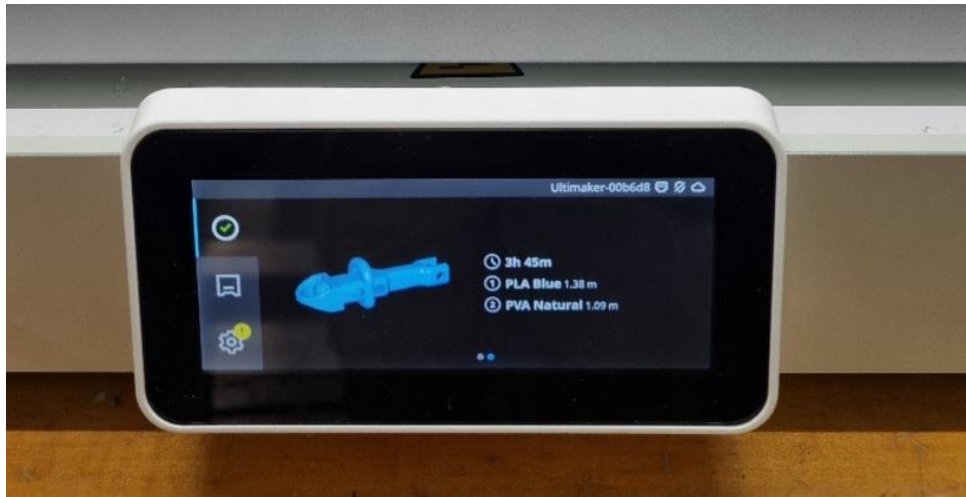
Η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού στο 3^ο μοντέλο μείωσε το χρόνο εκτύπωσης από 4 ώρες και 40 λεπτά σε 3 ώρες και 43 λεπτά, εξοικονομώντας σχεδόν 1 ώρα κατασκευής.



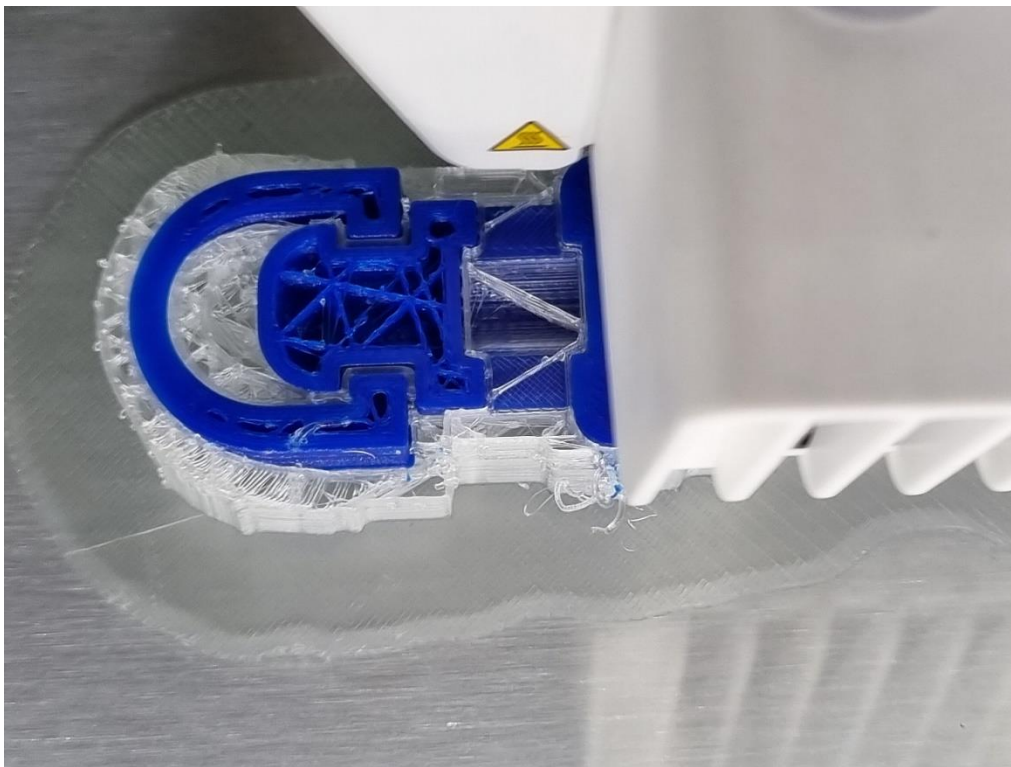
Εικόνα 83 Προσομοίωση εκτύπωσης rod-release-swivel 3^ο μοντέλου στο Cura



Εικόνα 84 Προσομοίωση εκτύπωσης hook του 3^ο μοντέλου στο Cura



Εικόνα 85 Εκκίνηση εκτύπωσης rod-release-swivel 3^{οδ} μοντέλου



Εικόνα 86 Απεικόνιση των διάκενων με εναπόθεση υλικού PVA



Εικόνα 87 Ενδιάμεσο στάδιο εκτύπωσης



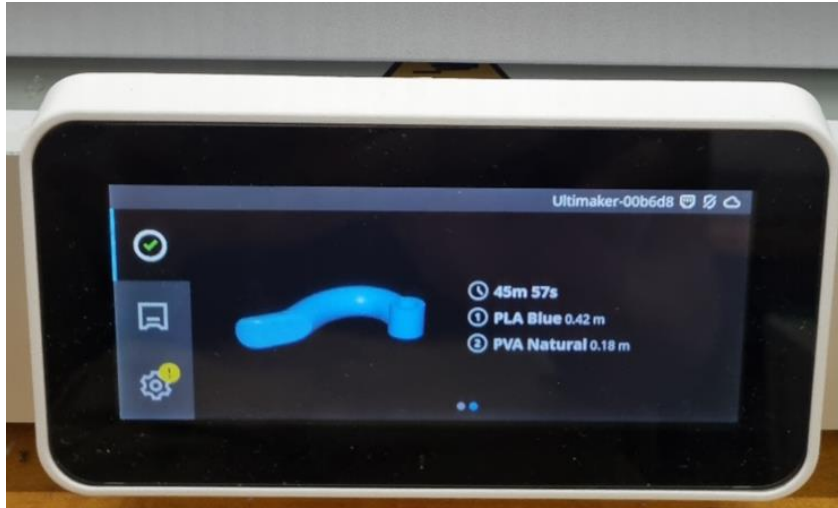
Εικόνα 88 Τελικό στάδιο εκτύπωσης



Εικόνα 89 Τελικό αποτέλεσμα εκτυπωμένου rod-release-swivel 3^{ov} μοντέλου 1^η όψη



Εικόνα 90 Τελικό αποτέλεσμα εκτυπωμένου rod-release-swivel 3^{ov} μοντέλου 2^η όψη



Εικόνα 91 Εκκίνηση εκτύπωσης hook του 3^{ου} μοντέλου



Εικόνα 92 Τελικό στάδιο εκτύπωσης hook του 3^{ου} μοντέλου



Εικόνα 93 Τελικό αποτέλεσμα εκτυπωμένου hook του 3^{ου} μοντέλου

Παρατηρήσεις σχετικά με το 3^ο μοντέλο:

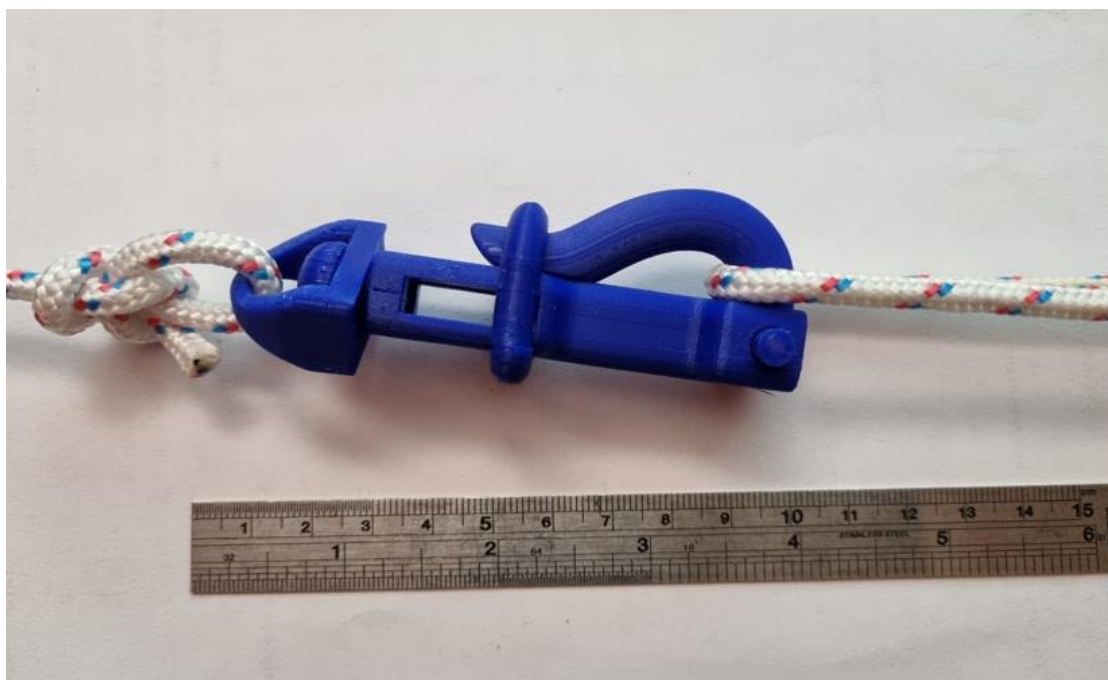
Η εκτύπωση του 3^{ου} μοντέλου ήταν άκρως επιτυχημένη με καλή ποιότητα επιφάνειας σε όλα τα γεωμετρικά στοιχεία του μοντέλου όπως φαίνεται και στις παρακάτω Εικόνες. Η συναρμολόγηση του rod-release-swivel με το hook και το bolt έγινε με ευκολία και η κίνηση μεταξύ των εξαρτημάτων ήταν επιτυχημένη. Κατά τη δοκιμή λειτουργίας, με τη μετακίνηση του release, ο στρεφόμενος βραχίονας (hook) απελευθερώθηκε γρήγορα και το σχοινί απομακρύνθηκε εύκολα.



Εικόνα 94 Συναρμολόγηση 3^{ου} μοντέλου 1^η όψη



Εικόνα 95 Συναρμολόγηση 3^{ου} μοντέλου 2^η όψη

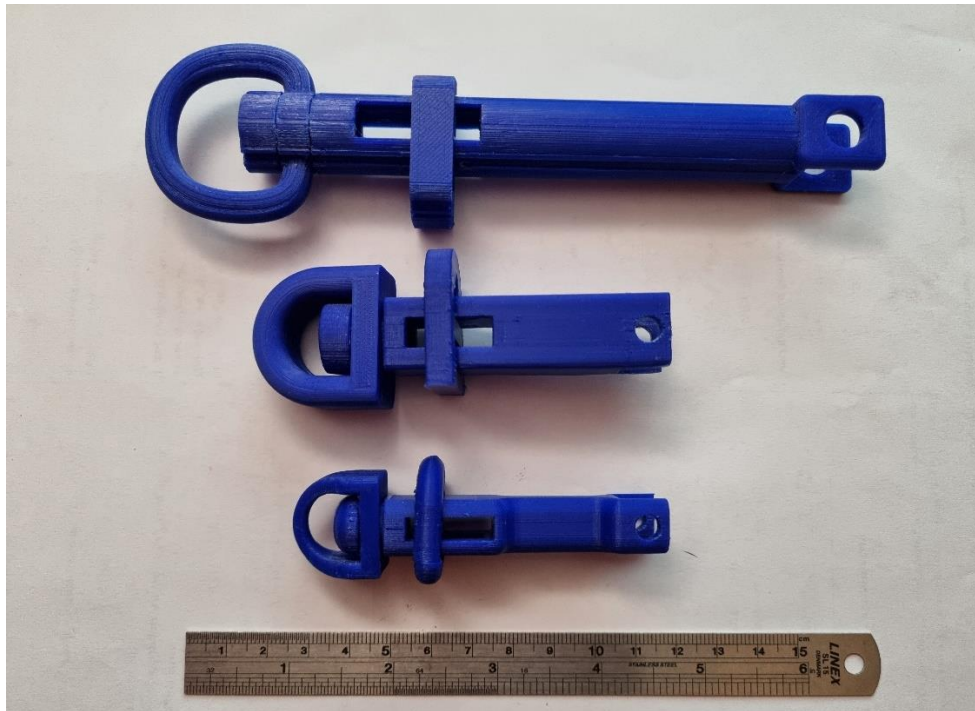


Εικόνα 96 Δοκιμή λειτουργίας 3^{ου} μοντέλου

Στις παρακάτω Εικόνες απεικονίζεται η εξέλιξη του σχεδιασμού των εξαρτημάτων αρχίζοντας από την αρχική ιδέα (1^ο μοντέλο), συνεχίζοντας στο τροποποιημένο 2^ο μοντέλο και καταλήγοντας στο βελτιστοποιημένο 3^ο μοντέλο.



Εικόνα 97 Σύγκριση εκτυπωμένων γάντζων (hook) 1^{ου}, 2^{ου}, 3^{ου} μοντέλου



Εικόνα 98 Σύγκριση εκτυπωμένων rod-release-swivel 1^{ου}, 2^{ου}, 3^{ου} μοντέλου



Εικόνα 99 Σύγκριση εκτυπωμένων μοντέλων

Κεφάλαιο 6: Τεχνική Ανάλυση και Προσομοίωση Βελτιστοποιημένου Πρωτότυπου Μοντέλου

6.1. Καθορισμός Οριακών Συνθηκών

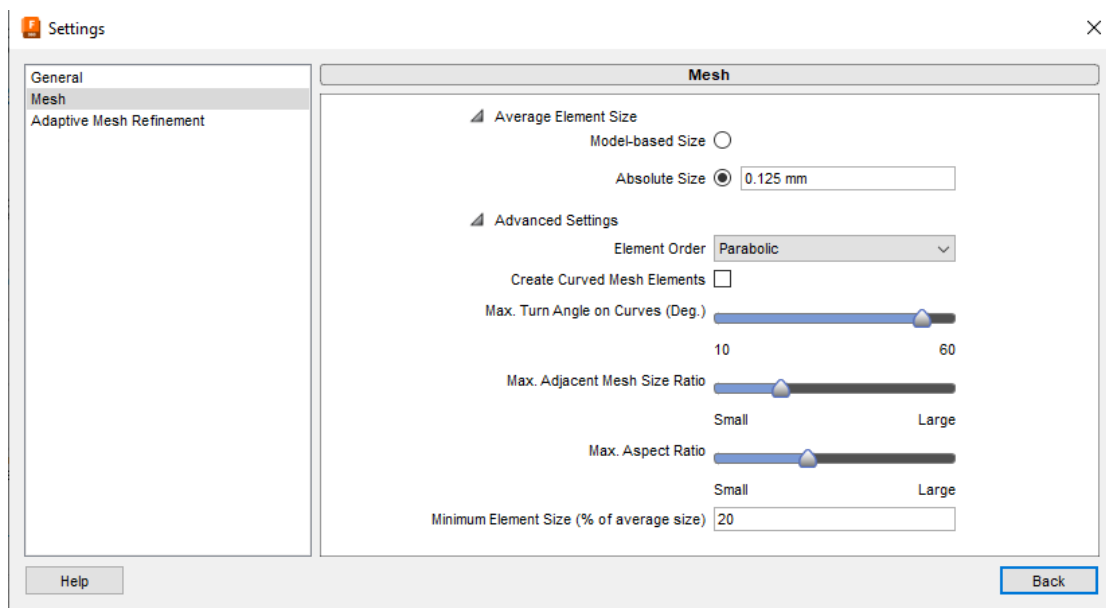
Στη διαδικασία ανάπτυξης ενός προϊόντος, το στάδιο του Σχεδιασμού ακολουθείται από το στάδιο της Τεχνικής ανάλυσης ή Τεχνικής μελέτης (Computer Aided Engineering) κατά το οποία εκπονείται η μελέτη και προσομοίωση της συμπεριφοράς του κατά τη λειτουργία του.

Για την τεχνική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Simulation του Autodesk Fusion 360, το οποίο επιλύει προβλήματα μηχανικής με την Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων, εφαρμόζοντας στατική ανάλυση (static stress), θερμική ανάλυση (thermal), ανάλυση θερμικών τάσεων (thermal stress), ανάλυση λυγισμού (structural buckling), ανάλυση ταλαντώσεων (modal frequencies), κ.α.

Το εργαλείο Simulation επιτρέπει την προσομοίωση της κίνησης και της συμπεριφοράς του τρισδιάστατου μοντέλου (είτε εξαρτήματος είτε συναρμολογημένου συνόλου) υπό την επίδραση φορτίων και περιορισμών και τον υπολογισμό των μηχανικών ιδιοτήτων. Στην περίπτωση που τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δεν είναι τα επιθυμητά σε σχέση με τις προδιαγραφές ή απαιτήσεις του προϊόντος, ο σχεδιαστής έχει τη δυνατότητα να τροποποιήσει εκ νέου το μοντέλο και να επαναλάβει την τεχνική ανάλυση.

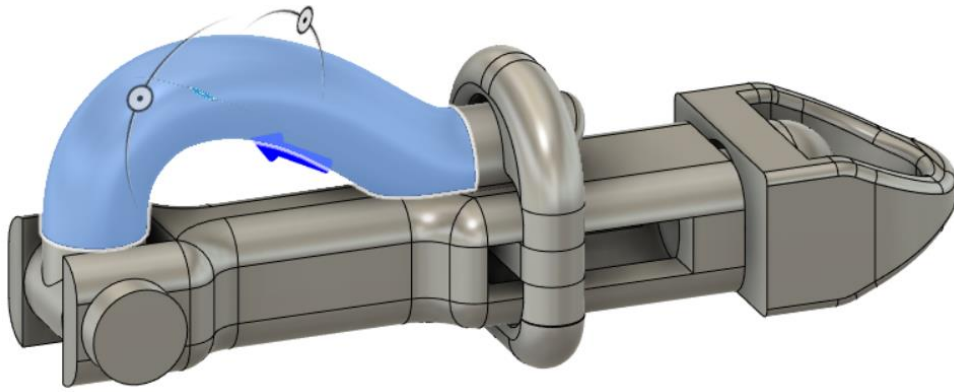
Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή μελετήθηκε το τελικό βελτιστοποιημένο 3^ο μοντέλο snap shackle εφαρμόζοντας δυνάμεις στο στρεφόμενο βραχίονα (hook), ακριβώς όπως θα συνέβαινε κατά τη λειτουργία του, και υπολογίστηκε η τάση Von Mises σε κάθε σημείο του συναρμολογημένου μοντέλου. Τα υλικά που μελετήθηκαν είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας SS 304, το υλικό PEKK ενισχυμένο με ίνες άνθρακα και ο ανοξείδωτος χάλυβας 17-4PH, τα οποία μπορούν να κατασκευαστούν με τρισδιάστατη εκτύπωση, και το υλικό 17-4 PH UNS S17400 με το οποίο κατασκευάζονται τα αντίστοιχα προϊόντα της αγοράς. Εδώ είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι κατά την τεχνική μελέτη – προσομοίωση η πυκνότητα του υλικού λαμβάνεται ίση με 100%.

Η διαδικασία απαιτεί αρχικά τον καθορισμό του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων. Ως στοιχείο επιλέχθηκε το παραβολικό τετραεδρικό στοιχείο (parabolic tetrahedron) χωρίς καμπύλες ακμές. Σε σχέση με το γραμμικό τετραεδρικό στοιχείο (linear tetrahedron) το οποίο αποτελείται από 4 κόμβους, στο παραβολικό έχει προστεθεί ένας επιπλέον κόμβος στη μέση κάθε ακμής, με αποτέλεσμα συνολικά να υπάρχουν δέκα κόμβοι ανά στοιχείο. Στα παραβολικά στοιχεία η συνάρτηση προσέγγισης είναι 2ου βαθμού και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη αποτύπωση των λεπτομερειών της επιφάνειας του μοντέλου, τον ακριβέστερο υπολογισμό σύνθετων τάσεων και την απαίτηση λιγότερης ισχύος κατά τους υπολογισμούς.



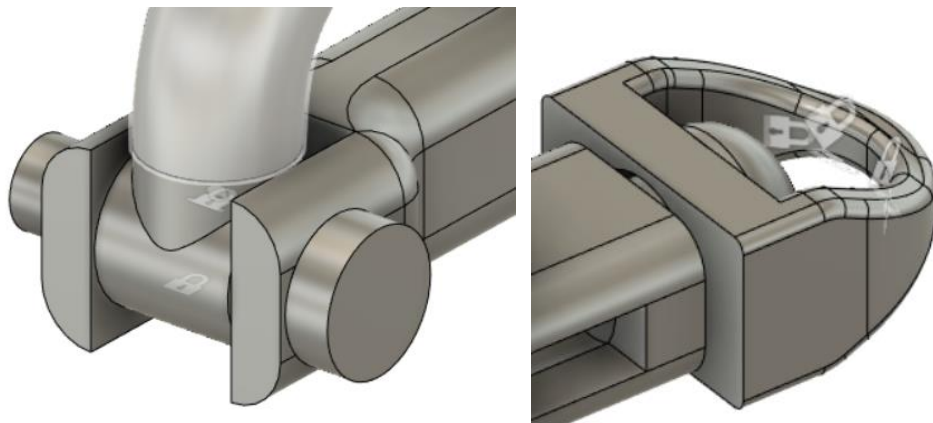
Εικόνα 100 Καθορισμός πλέγματος μοντέλου

Η δύναμη, η οποία προσομοιώνει τη δύναμη που ασκείται από το πανί μέσω του σχοινιού, ασκήθηκε στο στρεφόμενο βραχίονα (hook) στην εσωτερική επιφάνεια σε κατεύθυνση 100 μοίρες από το οριζόντιο επίπεδο, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 101. Η δύναμη ασκείται στο κέντρο του hook καθώς μετά από διάφορες δοκιμές παρατηρήθηκε πως τα αποτελέσματα κατόπριζαν σε μεγαλύτερο βαθμό τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.



Εικόνα 101 Η δύναμη που ασκείται στο στρεφόμενο βραχίονα (hook)

Στο Swivel εφαρμόστηκε πάκτωση η οποία αντιπροσωπεύει τη στήριξη από το δεύτερο σχοινί. Επιπλέον εφαρμόστηκε πάκτωση στην εσωτερική επιφάνεια του κυλίνδρου του hook και την εξωτερική επιφάνεια του κυλίνδρου του bolt, για να περιοριστεί η μεταξύ τους σύνδεση και να αποφευχθεί η ολίσθηση και η μετακίνηση κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων (Εικόνα 102).



Εικόνα 102 Περιορισμός fixed constraint σε hook-bolt και swivel

Για τον υπολογισμό της αναπτυσσόμενης τάσης και της κρίσιμης τιμής φορτίου που θα επιφέρει την αστοχία του μοντέλου λαμβάνεται υπόψιν ο συντελεστής ασφαλείας (safety factor). Το λογισμικό Autodesk Fusion 360 υπολογίζει τον συντελεστή ασφαλείας του υλικού χρησιμοποιώντας ένα από τα ακόλουθα δύο κριτήρια:

Αντοχή σε διαρροή (Yield Strength): Ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται ως ο λόγος της μέγιστης αντοχής του υλικού σε διαρροή προς την ισοδύναμη τάση (Von Mises equivalent

stress). Η τάση Von Mises είναι ένας καλός προγνωστικός δείκτης αστοχίας, ιδίως για όλκιμα υλικά όπως ο χάλυβας και το αλουμίνιο.

Μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό (Ultimate Tensile Strength): Ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται ως ο λόγος της μέγιστης αντοχής του υλικού σε εφελκυσμό προς τη μέγιστη κύρια τάση (maximum principal stress). Αυτή η μέθοδος συνήθως είναι πιο κατάλληλη για εύθραυστα υλικά που δεν υπόκεινται σε διαρροή και είναι λιγότερο ευαίσθητα σε κόπωση.

Γενικά η επιλογή της τιμής του συντελεστή ασφαλείας σχεδιασμού (design safety factor) εξαρτάται από την εφαρμογή. Για παράδειγμα, εξαρτήματα των οποίων η αστοχία θα μπορούσε να οδηγήσει σε σημαντική οικονομική απώλεια, ή σοβαρό τραυματισμό ή θάνατο, προτείνεται να χρησιμοποιούν συντελεστή ασφαλείας μεγαλύτερο ή ίσο του 4, ενώ εξαρτήματα που δεν είναι τόσο κρίσιμα μπορεί γενικά να έχουν συντελεστή ασφαλείας ίσο με 2. Συνήθως τα όλκιμα, μεταλλικά υλικά τείνουν να χρησιμοποιούν χαμηλότερη τιμή ενώ τα εύθραυστα υλικά χρησιμοποιούν υψηλότερη. Χαμηλότερη τιμή συντελεστή χρησιμοποιείται επίσης όταν το κόστος της κατασκευής είναι αρκετά υψηλό. Ωστόσο εάν επιλεγθεί χαμηλός συντελεστής θα πρέπει τα εξαρτήματα να υπόκεινται σε πολύ αυστηρό ποιοτικό έλεγχο και αυστηρή προληπτική συντήρηση για να διασφαλιστεί η αξιοπιστία.

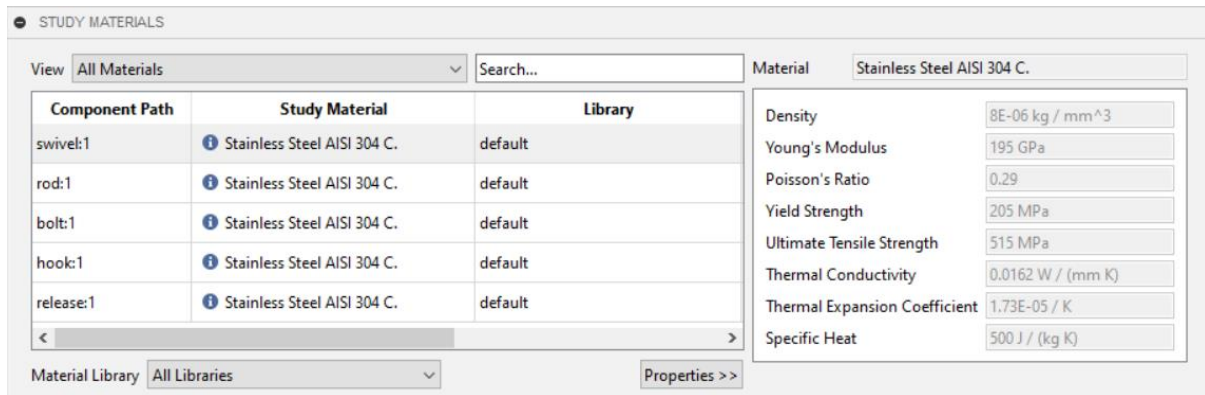
Γενικά προτείνονται οι παρακάτω τιμές (Bauto, 2023):

- για υλικά υψηλής αξιοπιστίας σε μη απαιτητικές περιβαλλοντικές συνθήκες και συνθήκες φόρτισης όπου το βάρος είναι σημαντικός παράγοντας προτείνεται συντελεστής ασφαλείας ίσος με 1.3-1.5
- για συνηθισμένα υλικά σε μη απαιτητικές περιβαλλοντικές συνθήκες και συνθήκες φόρτισης προτείνεται συντελεστής ασφαλείας ίσος με 2-2.5
- για υλικά λιγότερο δοκιμασμένα και εύθραυστα σε μη απαιτητικές περιβαλλοντικές συνθήκες και συνθήκες φόρτισης ή για αξιόπιστα υλικά σε απαιτητικές περιβαλλοντικές συνθήκες και συνθήκες φόρτισης προτείνεται συντελεστής ασφαλείας ίσος με 3-4.

6.2. Αποτελέσματα Προσομοίωσης με Ανοξείδωτο Χάλυβα SS 304

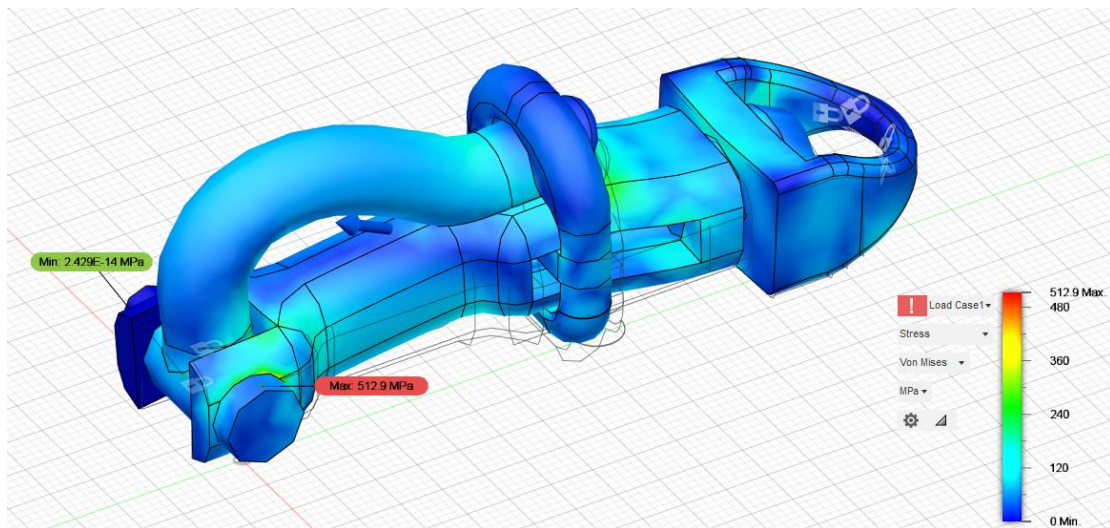
Στην πρώτη προσομοίωση μελετήθηκε ως υλικό ο ανοξείδωτος χάλυβας SS 304, ο οποίος είναι ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος ανοξείδωτος χάλυβας λόγω της υψηλής αντοχής και αντίστασης στη διάβρωση, και επίσης διατίθεται πλέον ως υλικό τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Στην Εικόνα 103 παρουσιάζονται οι ιδιότητες του υλικού, με αντοχή σε διαρροή ίση με 205 MPa και μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό ίση με 515 MPa (Metals4U, n.d.) όπως εισήχθησαν στο πρόγραμμα.

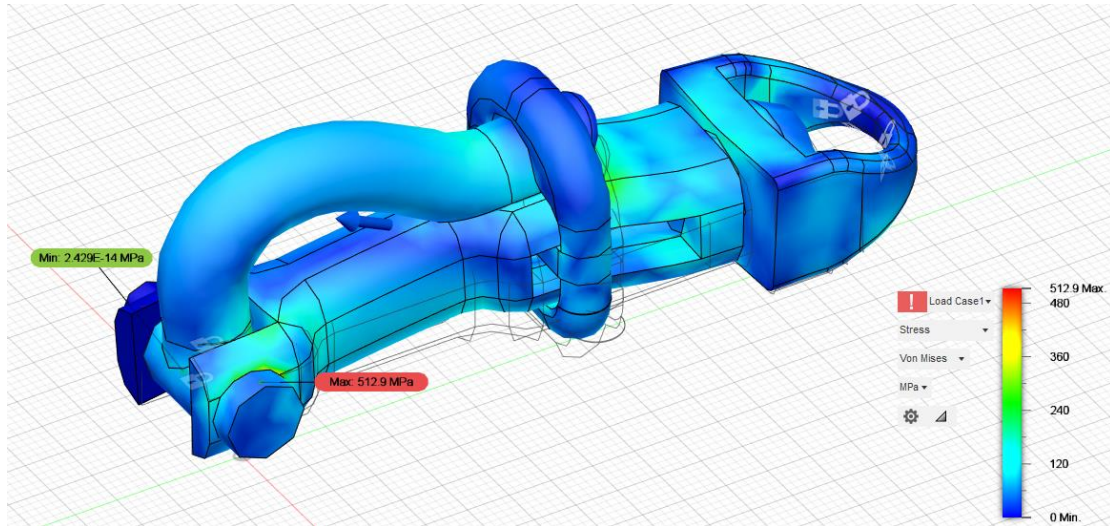


Εικόνα 103 Καθορισμός υλικού για το μοντέλο – Προσομοίωση 1

Στις προσομοιώσεις έγιναν δοκιμές με διαφορετικά φορτία ώστε να υπολογιστεί προσεγγιστικά το φορτίο που φέρνει το μοντέλο κοντά στο όριο θραύσης του υλικού. Μετά από δοκιμές για το αναφερόμενο υλικό προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα: Φορτίο κατώτερου του ορίου θραύσης του υλικού ίσο με 7600 N και φορτίο ανώτερου του ορίου θραύσης του υλικού ίσο με 7650 N. Το μέγιστο όριο φορτίου που μπορεί να ασκηθεί ώστε να μην υπάρξει θραύση του μοντέλου είναι 7600 N.



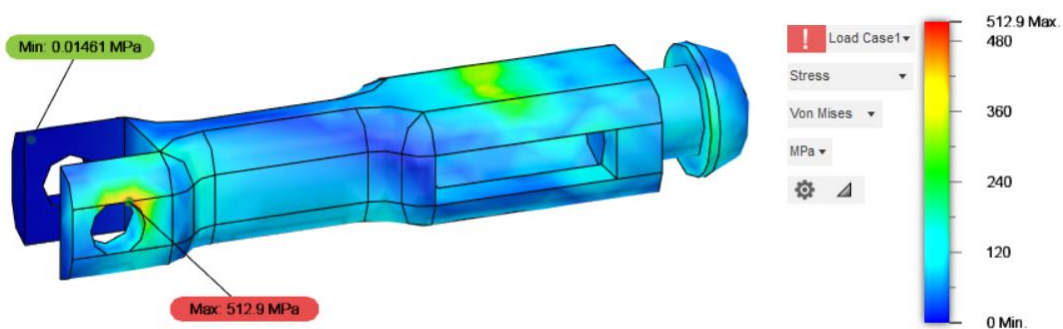
Εικόνα 104 Προσομοίωση με φορτίο 7600 N, Maximum von mises stress: 512.9 MPa



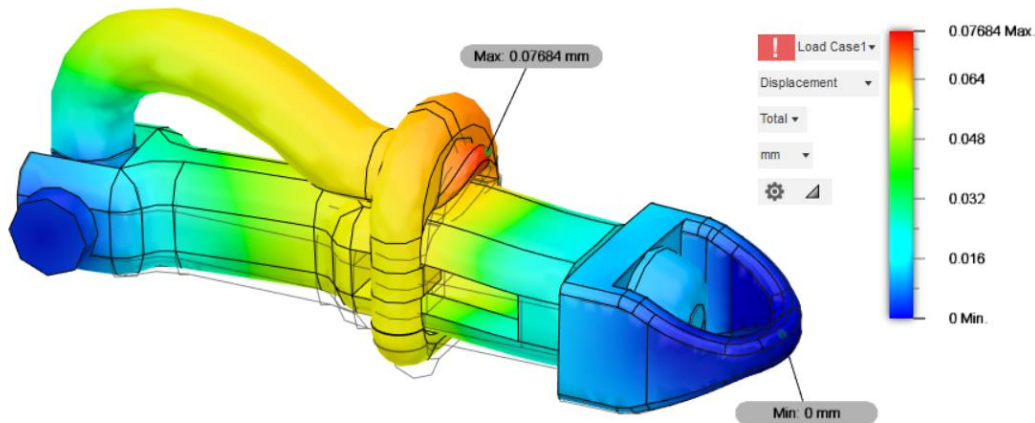
Εικόνα 105 Προσομοίωση με φορτίο 7650 N, Maximum von mises stress: 516.3 MPa

Το σημείο που εμφανίζεται η μέγιστη τάση είναι στις οπές του κορμού (rod) για τη σύνδεση με τον πείρο, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 106. Η κατανομή των τιμών μετατόπισης (displacement) στην προσομοίωση με φορτίο 7600 N απεικονίζεται στην Εικόνα 107.

Σε αυτό το σημείο είναι σκόπιμο να επισημανθεί ότι σε όλες τις κατανομές τιμών τάσης von mises και μετατόπισης (displacement) η παραμόρφωση που απεικονίζεται δεν είναι η πραγματική (actual) η οποία είναι τόσο μικρή που το σχήμα του μοντέλου δεν μεταβάλλεται, αλλά απεικονίζεται υπό κλίμακα μεγέθυνσης (Adjusted 0.5x:2.5%), ώστε ο αναγνώστης να μπορεί να κατανοήσει καλύτερα τον τρόπο που το μοντέλο τείνει να παραμορφωθεί.



Εικόνα 106 Αποτελέσματα προσομοίωσης Von Mises stress για το Rod (με φορτίο 7600 N)



Εικόνα 107 Αποτελέσματα προσομοίωσης Displacement για το μοντέλο (με φορτίο 7600 N)

6.3. Αποτελέσματα Προσομοίωσης με PEKK ενισχυμένο με ίνες άνθρακα

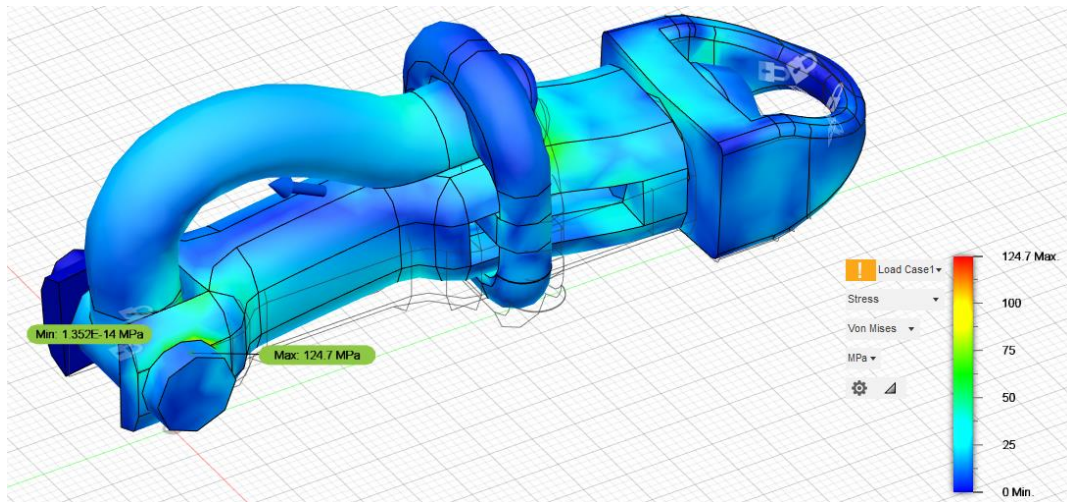
Το ενισχυμένο υλικό PEKK με ίνες άνθρακα θεωρείται ένα από τα ισχυρότερα σύνθετα νήματα υψηλής απόδοσης. Στην Εικόνα 108 παρουσιάζονται οι ιδιότητές του υλικού PEKK-A CF15 της CarbonX™ το οποίο αποτελείται από ρητίνη PEKK ενισχυμένη με 15% ίνες άνθρακα με μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό 126 MPa, όπως εισήχθησαν στο πρόγραμμα (3DXTECH, 2021).

STUDY MATERIALS			Material: Carbon Fibers - HT-23 (with EOS P 810 3D Printer)	
Component Path	Study Material	Lib	Property	Value
swivel:1	N:PEKK - Polyetherketoneketone Reinforced With Carbon Fibe...	default	Density	1.39E-06 kg / mm ³
rod:1	N:PEKK - Polyetherketoneketone Reinforced With Carbon Fibe...	default	Young's Modulus	5.8 GPa
bolt:1	N:PEKK - Polyetherketoneketone Reinforced With Carbon Fibe...	default	Poisson's Ratio	0.34
hook:1	N:PEKK - Polyetherketoneketone Reinforced With Carbon Fibe...	default	Yield Strength	126 MPa
release:1	N:PEKK - Polyetherketoneketone Reinforced With Carbon Fibe...	default	Ultimate Tensile Strength	126 MPa
			Thermal Conductivity	4.6E-04 W / (mm K)
			Thermal Expansion Coefficient	3.855E-05 / K
			Specific Heat	970 J / (kg K)

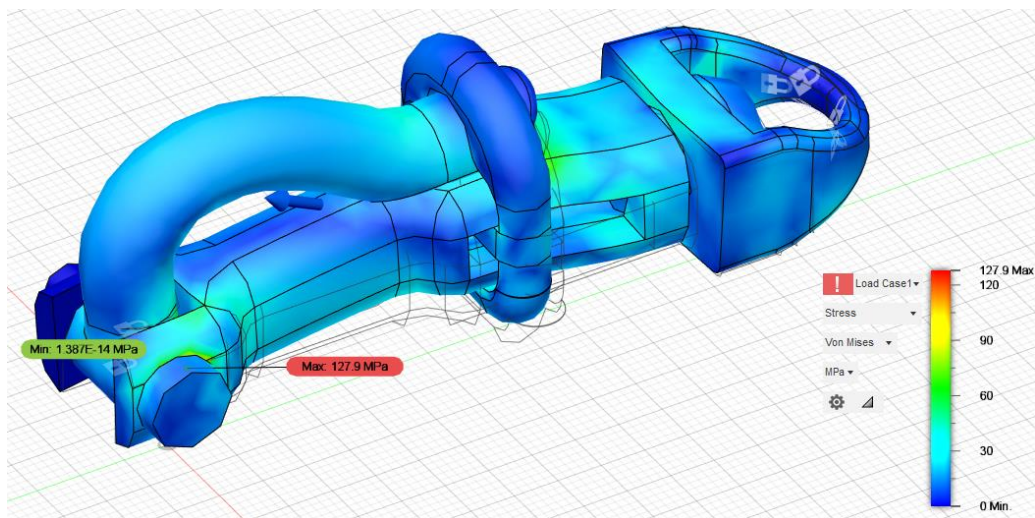
Εικόνα 108 Καθορισμός υλικού για το μοντέλο – Προσομοίωση 2

Στις προσομοιώσεις έγιναν δοκιμές με διαφορετικά φορτία ώστε να υπολογιστεί προσεγγιστικά το φορτίο που φέρνει το μοντέλο κοντά στο όριο θραύσης του υλικού. Μετά από δοκιμές για το αναφερόμενο υλικό προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα: Φορτίο κατώτερου

του ορίου θραύσης του υλικού ίσο με 1900 N και φορτίο ανώτερου του ορίου θραύσης του υλικού ίσο με 1950 N. Το μέγιστο όριο φορτίου που μπορεί να ασκηθεί ώστε να μην υπάρξει θραύση του μοντέλου είναι 1900 N.



Εικόνα 109 Προσομοίωση με φορτίο 1900 N, Maximum von mises stress: 124.7 MPa

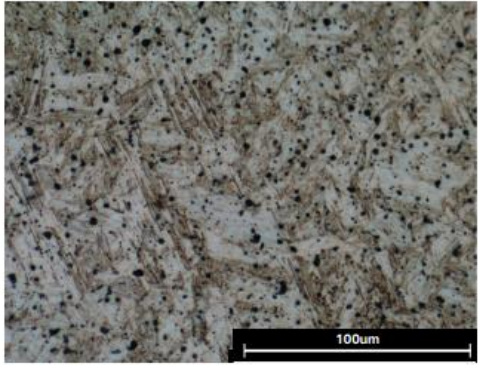


Εικόνα 110 Προσομοίωση με φορτίο 1950 N, Maximum von mises stress: 127.9 MPa

Το σημείο που εμφανίζεται η μέγιστη τάση είναι στις οπές του κορμού (rod) στη σύνδεση με τον πείρο, ενώ η κατανομή της μετατόπισης (displacement) είναι αντίστοιχη με την προηγούμενη προσομοίωση.

6.4. Αποτελέσματα Προσομοίωσης με Ανοξείδωτο Χάλυβα 17-4 PH (Markforged)

Στην τρίτη προσομοίωση μελετήθηκε ως υλικό ο ανοξείδωτος χάλυβας 17-4 PH Stainless Steel της εταιρείας Markforged (Markforged, n.d.). Το υλικό παρέχεται σε μεταλλική σκόνη από την εταιρεία και το εκτυπωμένο αντικείμενο υπόκειται στη συνέχεια σε θερμική κατεργασία σύμφωνα με το πρότυπο H900, για να αποκτήσει τις συγκεκριμένες ιδιότητες (Εικόνα 111). Στην Εικόνα 112 παρουσιάζονται οι ιδιότητες του υλικού, με αντοχή σε διαρροή ίση με 1050 MPa και μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό ίση με 1230 MPa όπως εισήχθησαν στο πρόγραμμα.

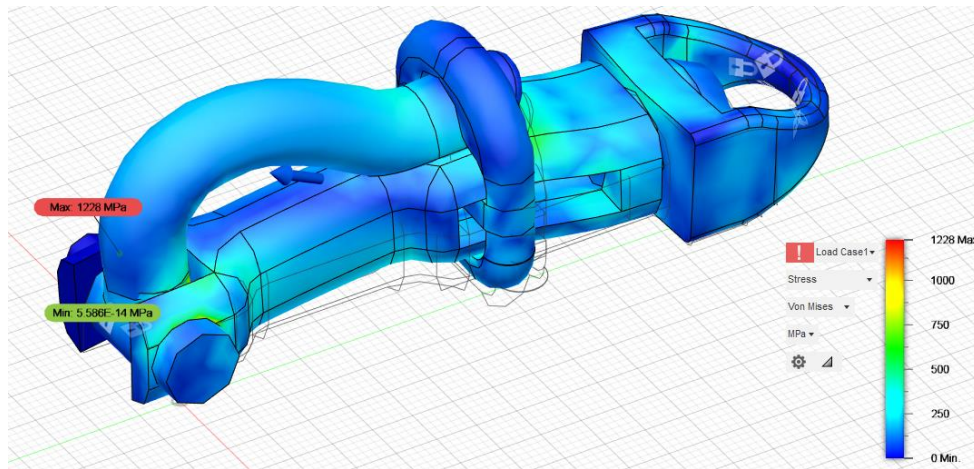
Composition	Amount	<p>● Markforged H900 Heat Treated</p> <p>17-4PH Stainless Steel v2 printed on the Metal X system heat treated to H900 specification.</p> 
Chromium	15-17.5%	
Nickel	3-5%	
Copper	3-5%	
Silicon	1% max	
Manganese	1% max	
Niobium	0.15-0.45%	
Carbon	0.07% max	
Phosphorous	0.04% max	
Sulfur	0.03% max	
Iron	bal	

Εικόνα 111 Ιδιότητες 17-4 PH Stainless Steel (Markforged, n.d.).

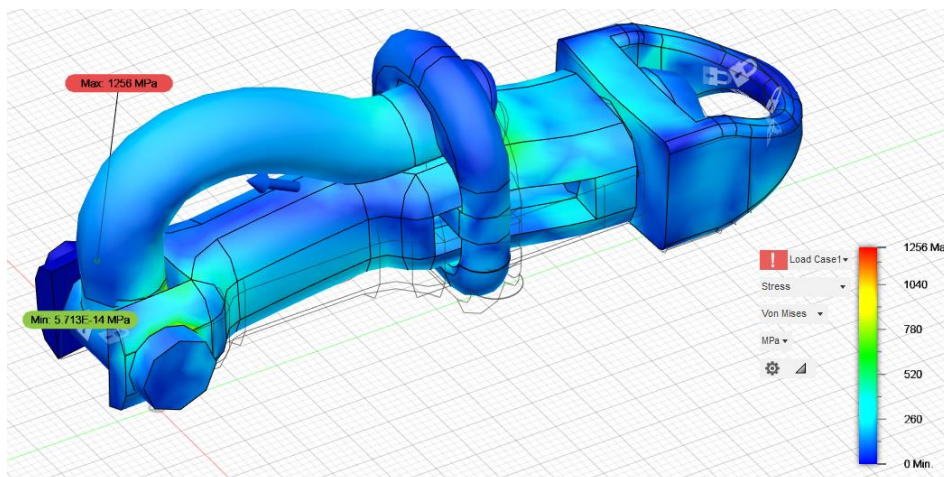
Component Path	Study Material	Library	Material: Stainless Steel 17-4 PH MARKFORGED H900	
swivel:1	Stainless Steel 17-4 PH MARKFORGED H900	default	Density	7.8E-06 kg / mm ³
rod:1	Stainless Steel 17-4 PH MARKFORGED H900	default	Young's Modulus	204.2 GPa
bolt:1	Stainless Steel 17-4 PH MARKFORGED H900	default	Poisson's Ratio	0.291
hook:1	Stainless Steel 17-4 PH MARKFORGED H900	default	Yield Strength	1050 MPa
release:1	Stainless Steel 17-4 PH MARKFORGED H900	default	Ultimate Tensile Strength	1230 MPa
			Thermal Conductivity	0.0152 W / (mm K)
			Thermal Expansion Coefficient	1.1E-05 / K
			Specific Heat	475 J / (kg K)

Εικόνα 112 Καθορισμός υλικού για το μοντέλο – Προσομοίωση 3

Στις προσομοιώσεις έγιναν δοκιμές με διαφορετικά φορτία ώστε να υπολογιστεί προσεγγιστικά το φορτίο που φέρνει το δοκίμιο κοντά στο όριο θραύσης του υλικού. Μετά από δοκιμές για το αναφερόμενο υλικό προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα: Φορτίο κατώτερου του ορίου θραύσης του υλικού ίσο με 1256 N και φορτίο ανώτερου του ορίου θραύσης του υλικού ίσο με 7650 N. Το μέγιστο όριο φορτίου που μπορεί να ασκηθεί ώστε να μην υπάρξει θραύση του μοντέλου είναι 1228 N. Το σημείο που εμφανίζεται η μέγιστη τάση είναι στις οπές του rod, σε αντιστοιχία με την προηγούμενη προσομοίωση.

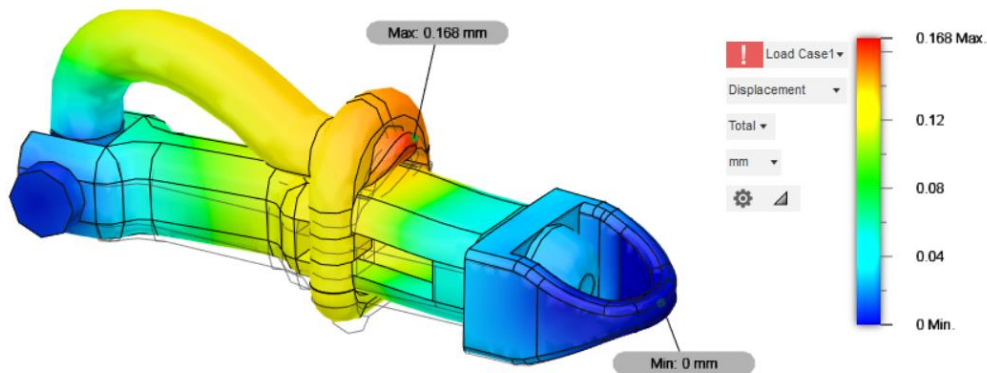


Εικόνα 113 Προσομοίωση με φορτίο 17600 N, Maximum von mises stress: 1228 MPa



Εικόνα 114 Προσομοίωση με φορτίο 18000 N, Maximum von mises stress: 1256 MPa

Στην Εικόνα 115 απεικονίζεται η κατανομή της μετατόπισης (displacement) στο μοντέλο στην προσομοίωση με φορτίο 18000 N.



Εικόνα 115 Αποτελέσματα προσομοίωσης Displacement για το μοντέλο (με φορτίο 18000 N)

6.5. Αποτελέσματα Προσομοίωσης με Ανοξείδωτο Χάλυβα 17-4 PH UNS S17400

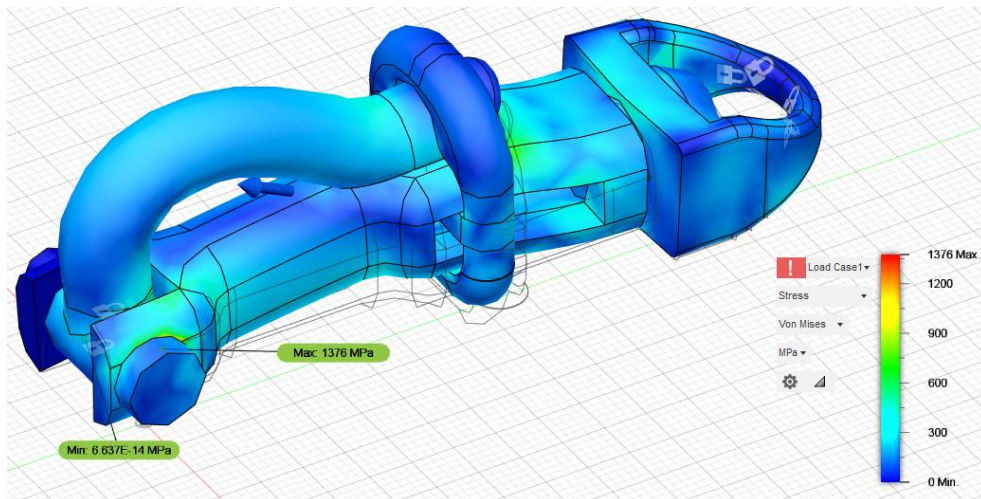
Στην τέταρτη προσομοίωση μελετήθηκε ως υλικό ο ανοξείδωτος χάλυβας 17-4 PH UNS S17400 (H900), ο οποίος έχει υποστεί θερμική κατεργασία σύμφωνα με το πρότυπο H900, και είναι το υλικό με το οποίο κατασκευάζονται τα αντίστοιχα προϊόντα της αγοράς. Στην Εικόνα 116 παρουσιάζονται οι ιδιότητες του υλικού, με αντοχή σε διαρροή ίση με 1378 MPa και μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό ίση με 1447MPa (KVA Stainless, n.d.), όπως εισήχθησαν στο πρόγραμμα.

Component Path	Study Material	Library
swivel:1	Stainless Steel 17-4 PH CNC MACHINING H900	default
rod:1	Stainless Steel 17-4 PH CNC MACHINING H900	default
bolt:1	Stainless Steel 17-4 PH CNC MACHINING H900	default
hook:1	Stainless Steel 17-4 PH CNC MACHINING H900	default
release:1	Stainless Steel 17-4 PH CNC MACHINING H900	default

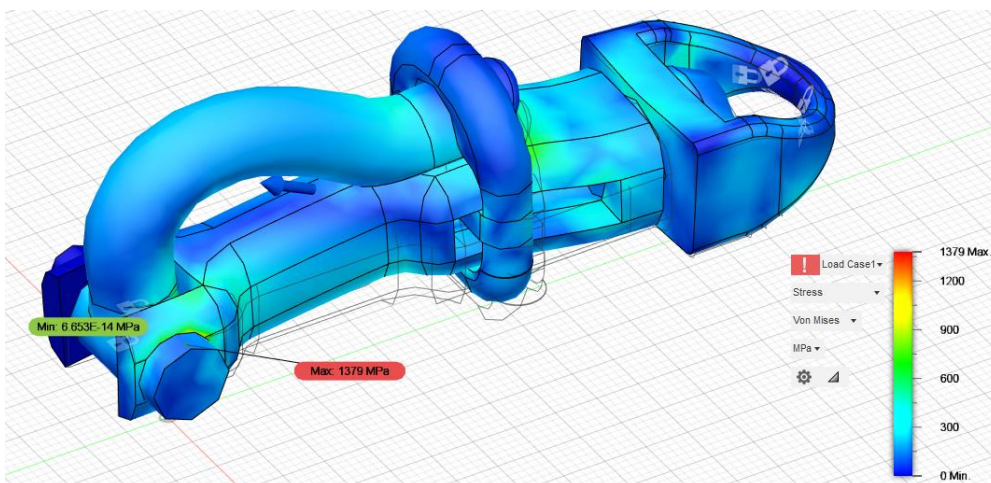
Material	Stainless Steel 17-4 PH CNC MACHINING H900
Density	7.8E-06 kg / mm ³
Young's Modulus	197 GPa
Poisson's Ratio	0.291
Yield Strength	1378 MPa
Ultimate Tensile Strength	1447 MPa
Thermal Conductivity	0.0152 W / (mm K)
Thermal Expansion Coefficient	1.1E-05 / K
Specific Heat	475 J / (kg K)

Εικόνα 116 Καθορισμός υλικού για το μοντέλο – Προσομοίωση 4

Στις προσομοιώσεις έγιναν δοκιμές με διαφορετικά φορτία ώστε να υπολογιστεί προσεγγιστικά το φορτίο που φέρνει το δοκίμιο κοντά στο όριο θραύσης του υλικού. Μετά από δοκιμές για το αναφερόμενο υλικό προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα: Φορτίο κατώτερου του ορίου θραύσης του υλικού ίσο με 20400 N και φορτίο ανώτερου του ορίου θραύσης του υλικού ίσο με 20450 N. Το μέγιστο όριο φορτίου που μπορεί να ασκηθεί ώστε να μην υπάρξει θραύση του μοντέλου είναι 20400 N.

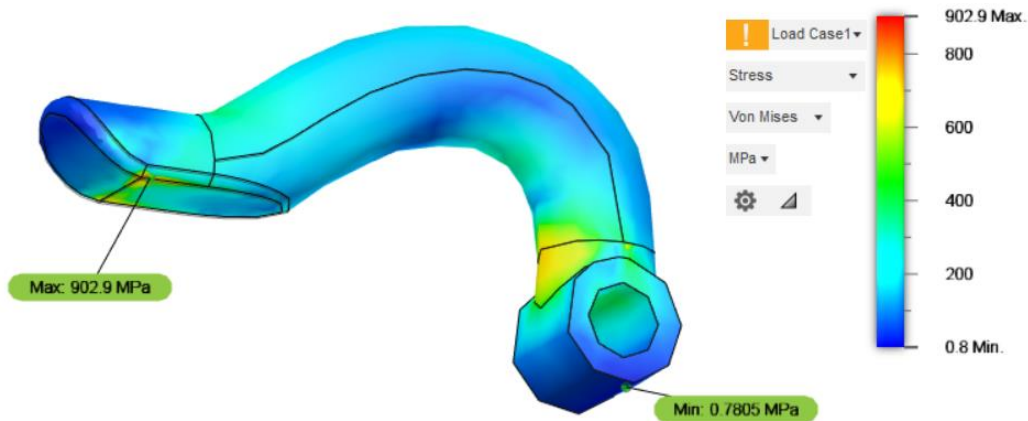


Εικόνα 117 Προσομοίωση με φορτίο 20400 N, Maximum von mises stress: 1376 MPa

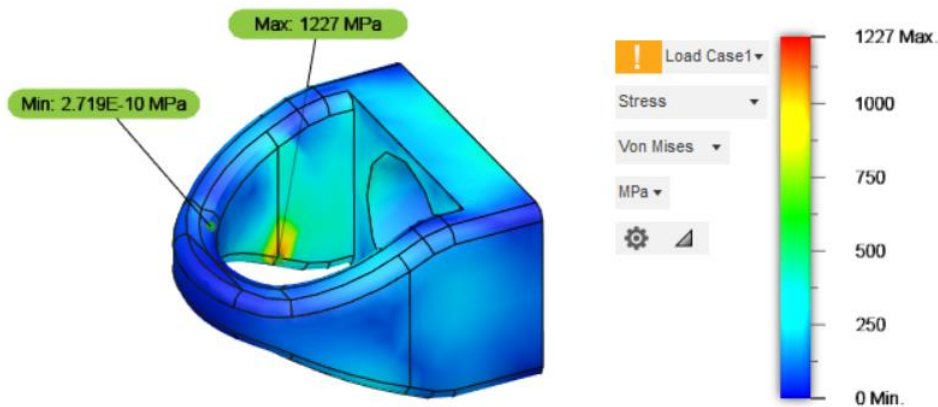


Εικόνα 118 Προσομοίωση με φορτίο 20450 N, Maximum von mises stress: 1379 MPa

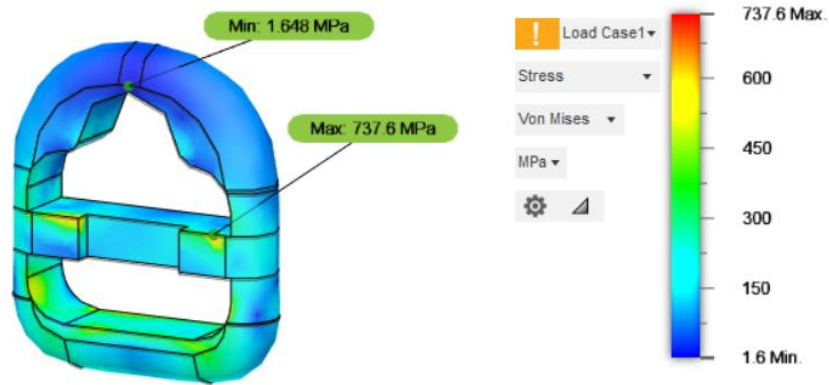
Στις Εικόνες 119 έως 122 απεικονίζεται η κατανομή της τάσης Von Mises σε κάθε εξάρτημα του snap shackle στην προσομοίωση με φορτίο 20400 N. Το σημείο που εμφανίζεται η μέγιστη τάση είναι στις οπές του rod για τη σύνδεση με τον πείρο. Τέλος η κατανομή των τιμών μετατόπισης (displacement) στην προσομοίωση με φορτίο 20400 N απεικονίζεται στην Εικόνα 123.



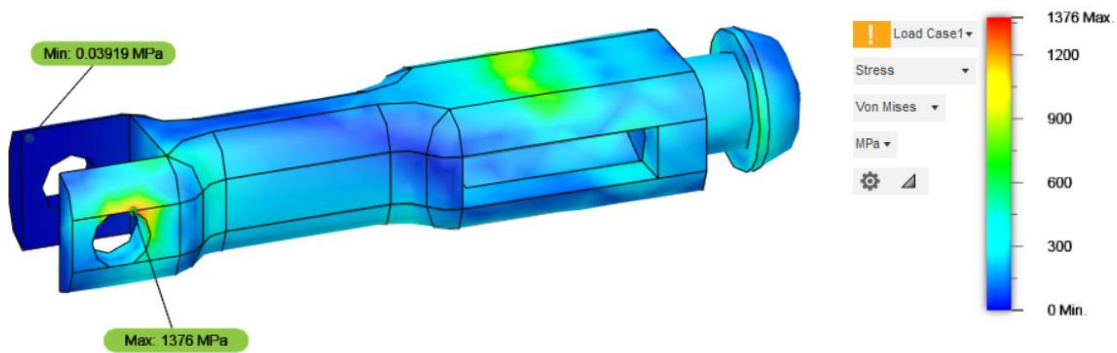
Εικόνα 119 Αποτελέσματα προσομοίωσης Von Mises stress για το Hook (με φορτίο 20400 N)



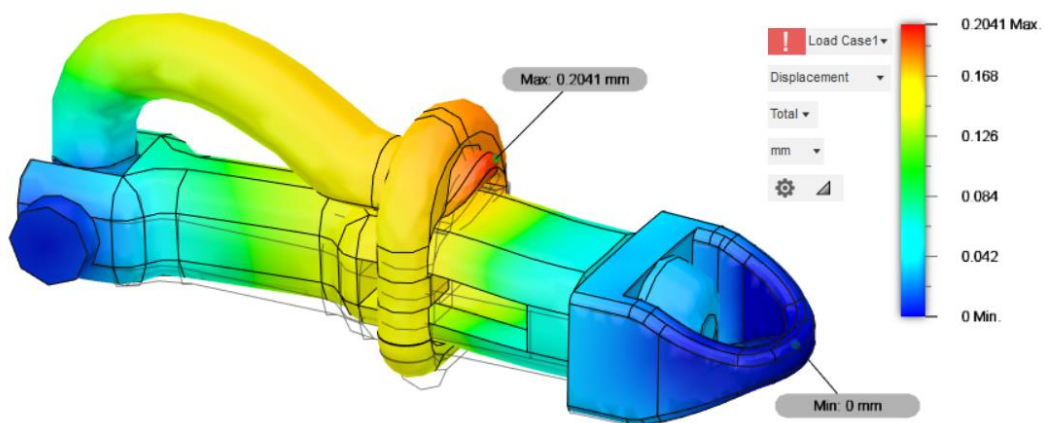
Εικόνα 120 Αποτελέσματα προσομοίωσης Von Mises stress για το Swivel (με φορτίο 20400 N)



Εικόνα 121 Αποτελέσματα προσομοίωσης Von Mises stress για το Release (με φορτίο 20400 N)



Εικόνα 122 Αποτελέσματα προσομοίωσης Von Mises stress για το Rod (με φορτίο 20400 N)



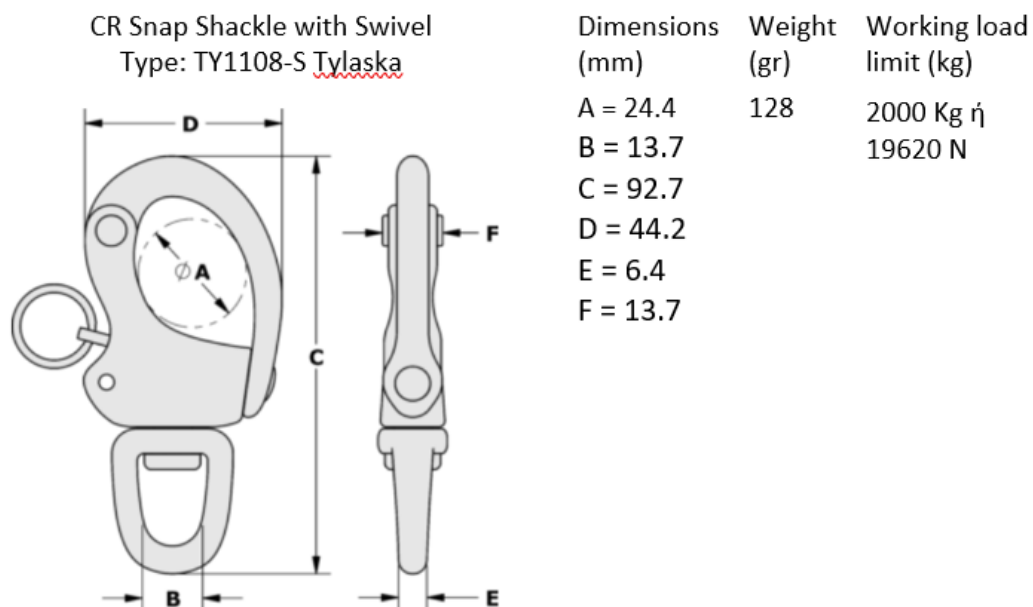
Εικόνα 123 Αποτελέσματα προσομοίωσης Displacement για το μοντέλο (με φορτίο 20400 N)

6.6. Σύγκριση Πρωτότυπου Μοντέλου με Αντίστοιχο Προϊόν της Αγοράς

Ένα αντίστοιχο προϊόν της αγοράς είναι το “CR Snap Shackle with Standard Swivel” της εταιρείας Tylaska που απεικονίζεται στην Εικόνα 124. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή, το υλικό που φτιάχνονται τα αντίστοιχα προϊόντα είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας τύπου 17-4 PH UNS S17400 και οι τεχνικές προδιαγραφές του προϊόντος παρουσιάζονται στην Εικόνα 125.



Εικόνα 124 CR Snap Shackle with Swivel, Tylaska (Tylaska, n.d)



Εικόνα 125 Χαρακτηριστικά CR Snap Shackle with Swivel, Πηγή: <https://www.tylaska.com/product/cr-snap-shackles/>

Στον Πίνακα 7 παρουσιάζεται η σύγκριση του CR Snap Shackle της αγοράς με τα πρωτότυπα μοντέλα από PEKK CF15, ανοξείδωτο χάλυβα SS 304, ανοξείδωτο χάλυβα 17-4 PH (Markforged) και ανοξείδωτο χάλυβα 17-4 PH UNS S17400, ως προς τα διάφορα χαρακτηριστικά.

Πίνακας 7 Σύγκριση CR Snap Shackle με τα πρωτότυπα από PEKK CF15, SS 304, και 17-4 PH

	Διαστάσεις (mm)	Βάρος (g)	Μέγιστο φορτίο (N)	Μέγιστη τάση θραύσης (MPa)	Κόστος τεμαχίου (\$)
CR Snap Shackle	92.7x14	128	19620		9,34
Πρωτότυπο PEKK CF15	87x23	23	1900	124.7	12,28
Πρωτότυπο S.S. 304	87x23	132	7600	512.9	9,11
Πρωτότυπο 17-4 PH Markforged	87x23	134	17600	1228	9,78
Πρωτότυπο 17-4 UNS	87x23	134	20400	1376	-

Η κατασκευή του πρωτότυπου μοντέλου από υλικό PEKK με ενίσχυση ινών άνθρακα αναμφισβήτητα πετυχαίνει μια δραστική μείωση του βάρους της κατασκευής από 128 gr σε μόλις 23 gr (ποσοστό περίπου 80%). Ωστόσο η αντοχή του και συνεπώς το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο λειτουργίας είναι πολύ μικρή σε σχέση με το προϊόν της αγοράς. Επιπλέον το κόστος αγοράς του υλικού PEKK με ενίσχυση ινών άνθρακα είναι 534 δολάρια ανά κιλό (3DXTECH, 2023), γεγονός που διαμορφώνει το κόστος του τεμαχίου σε 12,28 δολάρια.

Παρομοίως η κατασκευή του πρωτότυπου μοντέλου από ανοξείδωτο χάλυβα SS 304 δεν παρουσιάζει καλύτερες επιδόσεις συγκριτικά με εκείνο της αγοράς, ούτε στο βάρος ούτε στην αντοχή. Ωστόσο στην περίπτωση που το προϊόν θα λειτουργούσε σε μικρότερο φορτίο θα μπορούσε να προτιμηθεί το συγκεκριμένο υλικό, λαμβάνοντας επίσης υπόψιν ότι το κόστος του SS 304 σε μορφή πούδρας για τρισδιάστατη εκτύπωση είναι 68 δολάρια ανά κιλό, διαμορφώνοντας το κόστος του τεμαχίου σε 9,11 δολάρια.

Η κατασκευή του πρωτότυπου μοντέλου από ανοξείδωτο χάλυβα 17-4 PH και ανοξείδωτο χάλυβα 17-4 UNS S17400 παρουσιάζει πολύ καλή αντοχή σε θραύση, με τιμή μέγιστου επιτρεπόμενου φορτίου λειτουργίας πολύ κοντά στην τιμή που δίνει ο κατασκευαστής για το προϊόν της αγοράς.

Η προσομοίωση με το 17-4 UNS S17400 πραγματοποιήθηκε βασικά για να ελέγξουμε κατά πόσο ο σχεδιασμός του πρωτοτύπου snap shackle είναι σωστός και αποτελεσματικός για τη συγκεκριμένη χρήση του προϊόντος, συγκρίνοντας την απόδοσή του στο μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο λειτουργίας με το προϊόν CR Snap Shackle της αγοράς. Όπως φαίνεται και στον πίνακα 7, το νέο σχεδιαστικά πρωτότυπο snap shackle, πέτυχε 4% αύξηση του μέγιστου επιτρεπόμενου φορτίου εργασίας (20400N) με μια πολύ μικρή αύξηση του βάρους της τάξης του 5%.

Σχετικά με τον ανοξείδωτο χάλυβα 17-4 PH (Markforged), αν και παρουσιάζει μικρότερο επιτρεπόμενο φορτίο λειτουργίας (17600N) σε σχέση με το προϊόν της αγοράς (19620N), έχει το πλεονέκτημα ότι είναι ένα υλικό που μπορεί να εκτυπωθεί με τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης. Η διαφορά στο επιτρεπόμενο φορτίο λειτουργίας επίσης δεν είναι μεγάλη, και θα μπορούσε να επιλεγεί ως υλικό για όχι τόσο απαιτητικές εφαρμογές. Επιπλέον, το κόστος του 17-4PH σε μορφή πούδρας είναι 73 δολάρια ανά κιλό (3D Powder Hub, 2022), διαμορφώνοντας το κόστος του τεμαχίου στα 9,78 δολάρια.

Κεφάλαιο 7: Γενετικός Σχεδιασμός για Προσθετική Κατασκευή

Ο Γενετικός Σχεδιασμός (Generative Design) είναι μια καινοτόμος προσέγγιση του τρισδιάστατου σχεδιασμού που περιλαμβάνει τη χρήση αλγορίθμων υπολογιστών για τη δημιουργία πολλαπλών λύσεων σχεδιασμού με βάση ένα σύνολο καθορισμένων παραμέτρων και περιορισμών εισόδου. Η κύρια ιδέα είναι να δημιουργηθεί μια επαναληπτική διαδικασία κατά την οποία ο σχεδιαστής μπορεί να δημιουργήσει και να αξιολογήσει γρήγορα πολλαπλές λύσεις σχεδιασμού, μελετώντας και αναλύοντας τις νέες δυνατότητες, και να επιλέξει την καλύτερη λύση για την εκάστοτε εφαρμογή (Roback, 2020).

Η διαδικασία του Γενετικού Σχεδιασμού περιλαμβάνει συνήθως τα ακόλουθα στάδια:

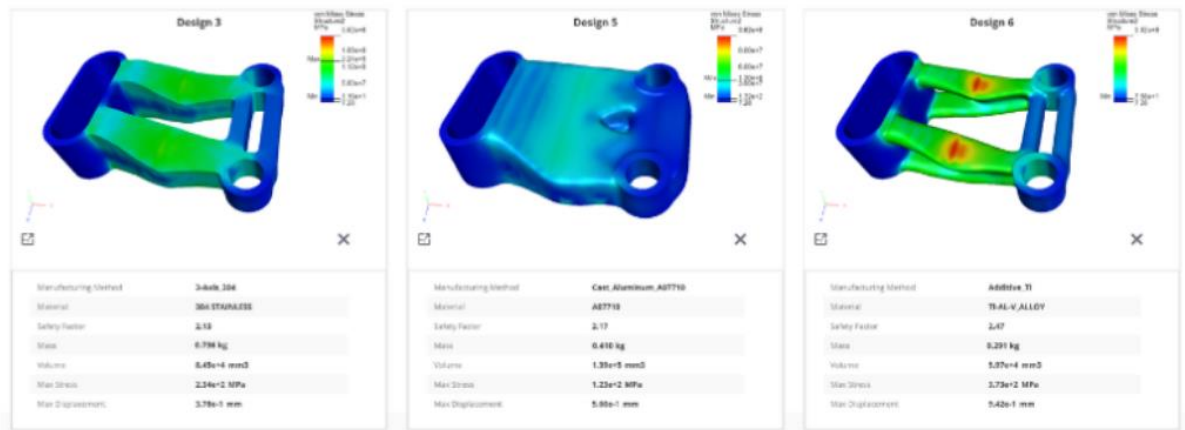
Καθορισμός του προβλήματος: Ο σχεδιαστής ορίζει το πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί, θέτοντας τις βασικές παραμέτρους καθώς και τυχόν περιορισμούς, όπως ιδιότητες υλικών, μεθόδους κατασκευής και απαιτήσεις βάρους και απόδοσης.

Δημιουργία λύσεις σχεδιασμού: Ένας αλγόριθμος υπολογιστή παράγει πολλαπλές λύσεις σχεδιασμού με βάση τις παραμέτρους και τους περιορισμούς εισόδου. Οι λύσεις αυτές μπορεί να διαφοροποιούνται σχεδιαστικά ως προς το μέγεθος, τα βασικά γεωμετρικά στοιχεία και μικρότερες γεωμετρικές λεπτομέρειες.

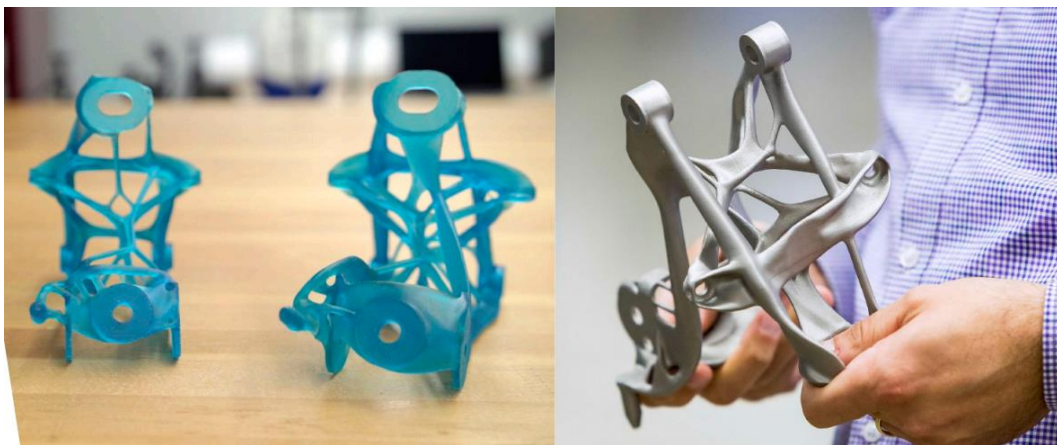
Αξιολόγηση και βελτιστοποίηση: Ο σχεδιαστής αξιολογεί τις λύσεις σχεδιασμού που παράγονται από τον αλγόριθμο και επιλέγει μία ή περισσότερες για περαιτέρω βελτίωση. Η διαδικασία μπορεί να περιλαμβάνει τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού για την κατασκευή (Εικόνα 126) ή/και την προσαρμογή των παραμέτρων και των περιορισμών για τη βελτίωση του βάρους ή της απόδοσης (Εικόνα 127).

Παραγωγή της τελικής λύσης: Μόλις οριστικοποιηθεί η βέλτιστη λύση σχεδιασμού, το νέο καινοτόμο προϊόν μπορεί να παραχθεί με τη χρήση συμβατικών μεθόδων κατασκευής ή με τεχνολογία προσθετικής κατασκευής.

Γενικά η προσθετική κατασκευή θεωρείται ιδανική τεχνολογία για μοντέλα γενετικά σχεδιασμένα, καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις αφαιρούνται τμήματα της ύλης εσωτερικά του μοντέλου, και η κατασκευή του τελικού μοντέλου γίνεται πιο εύκολα και οικονομικά με εναπόθεση υλικού σε στρώσεις, παρά με κατεργασίες αφαίρεσης υλικού.



Εικόνα 126 Γενετικός σχεδιασμός για κατεργασία CNC, χύτευση και προσθετική κατασκευή, Πηγή: <https://www.ptc.com/en/blogs/cad/beginner-guide-generative-design>



Εικόνα 127 Εξαρτήματα αυτοκινητοβιομηχανίας γενετικά σχεδιασμένα για προσθετική κατασκευή (Courtesy of General Motors), (Roback, 2020).

Ο Γενετικός Σχεδιασμός έχει πολλά πλεονεκτήματα, τα οποία περιλαμβάνουν τη δυνατότητα παραγωγής καινοτόμων σχεδίων, τη βελτιστοποίηση της απόδοσης της κατασκευής, τη μείωση της σπατάλης υλικών και τη βελτίωση της αποδοτικότητας της παραγωγής. Χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών, όπως η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία και η αρχιτεκτονική.

Κεφάλαιο 8: Επίλογος

Το αντικείμενο της μελέτης της Διπλωματικής Εργασίας είναι η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού ενός προϊόντος που χρησιμοποιείται κυρίως στην ιστιοπλοΐα, του snap shackle, λαμβάνοντας υπόψιν βασικές απαιτήσεις που σχετίζονται με τη λειτουργικότητα, τον τρόπο συγκράτησης και απελευθέρωσης του μηχανισμού, καθώς και τον τρόπο κατασκευής του προϊόντος.

Ο σχεδιασμός του πρωτοτύπου έγινε λαμβάνοντας υπόψιν ότι η κατασκευή του προϊόντος θα πραγματοποιηθεί σε τρισδιάστατο εκτυπωτή με τεχνολογία προσθετικής κατασκευής, η οποία παρέχει τη δυνατότητα απευθείας κατασκευής ενός συναρμολογημένου συνόλου εξαρτημάτων σε μια εκτύπωση. Τρία διαφορετικά 3D μοντέλα snap shackles σχεδιάστηκαν και εκτυπώθηκαν, καταλήγοντας σε αυτό που ικανοποιεί περισσότερο τις απαιτήσεις λειτουργικότητας. Η χρήση του τρισδιάστατου εκτυπωτή ήταν καθοριστική για τη γρήγορη πρωτοτυποποίηση (rapid prototyping) των τριών μοντέλων και αποτέλεσε καταλυτικό παράγοντα στη βελτιστοποίηση καθώς εντοπίστηκαν σφάλματα, σχεδιαστικές ή και κατασκευαστικές αδυναμίες, που στη συνέχεια αξιολογήθηκαν και διορθώθηκαν κατά το σχεδιασμό του επόμενου 3D μοντέλου.

Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκε τεχνική στατική ανάλυση (static analysis) χρησιμοποιώντας το εργαλείο Simulation του Autodesk Fusion 360, εφαρμόζοντας φορτία και περιορισμούς στο τελικό τρισδιάστατο μοντέλο και προσομοιώνοντας τη συμπεριφορά του σε λειτουργία. Η προσομοίωση έδωσε την ευκαιρία να εξεταστούν διάφορα υλικά κατασκευής, που μπορούν να εκτυπωθούν σε τρισδιάστατο εκτυπωτή, και να μελετηθεί η αντοχή του μοντέλου. Διαπιστώθηκε ότι κατασκευάζοντας το πρωτότυπο snap shackle από υλικό 17-4 UNS S17400 με το οποίο συνήθως κατασκευάζονται αντίστοιχα προϊόντα της αγοράς, η τιμή του μέγιστου επιτρεπόμενου φορτίου λειτουργίας είναι καλύτερη σε σχέση με την τιμή που δίνει ο κατασκευαστής για ένα αντίστοιχο προϊόν της αγοράς, επιβεβαιώνοντας ότι το πρωτότυπο snap shackle μπορεί να είναι ανταγωνιστικό. Δύο από τα υλικά που προσομοιώθηκαν και μπορούν να εκτυπωθούν σε τρισδιάστατο εκτυπωτή, παρουσίασαν μικρότερη αντοχή συγκριτικά με το αντίστοιχο προϊόν της αγοράς, συνεπάγοντας ότι το πρωτότυπο snap shackle θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικές εφαρμογές που απαιτούν μικρότερη αντοχή και ίσως προτεραιότητα στο βάρος ή στο κόστος της κατασκευής. Τέλος, η προσομοίωση με τον ανοξείδωτο χάλυβα 17-4 PH, υλικό που μπορεί να εκτυπωθεί με προσθετική κατασκευή,

κατέδειξε ελάχιστα μικρότερη μηχανική αντοχή συγκριτικά με το αντίστοιχο προϊόν της αγοράς.

Συνοψίζοντας, το πρωτότυπο snap shackle που σχεδιάστηκε και μελετήθηκε στα πλαίσια της Διπλωματικής Εργασίας παρουσιάζει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: βελτιωμένη λειτουργία που προκύπτει από την ευκολότερη και ταχύτερη απελευθέρωση του μηχανισμού συγκράτησης του στρεφόμενου βραχίονα, μέγιστη ασφάλεια κατά τη συγκράτηση σε κλειστή θέση, αρκετά καλή μηχανική αντοχή συγκριτικά με τα προϊόντα της αγοράς για αντίστοιχες εφαρμογές, καθώς και εύκολη και ταχεία κατασκευή εξαλείφοντας την ανάγκη συναρμολόγησης των επιμέρους εξαρτημάτων.

Κύριες προτάσεις για συνέχιση της μελέτης είναι:

(α) η τρισδιάστατη εκτύπωση του πρωτοτύπου snap shackle με υλικό ανοξείδωτο χάλυβα 17-4 PH και η αξιολόγηση της διαδικασίας εκτύπωσης (συνθήκες εκτύπωσης, διαστάσεις, λειτουργικότητα, συναρμογή, χρόνος κατασκευής, ποιότητα επιφάνειας, κ.α.) συγκριτικά με την εκτύπωση με το υλικό PLA.

(β) η εφαρμογή προγραμμάτων γενετικού σχεδιασμού που θα επιφέρει τη μείωση του βάρους των εξαρτημάτων μέσω της αφαίρεσης υλικού που δεν απαιτείται για την αντοχή του εξαρτήματος, αλλά και τη περαιτέρω βελτιστοποίηση του πρωτοτύπου snap shackle.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 3D Powder Hub (2022). 304L Stainless Steel Powder – SS304L. Ανακτήθηκε από <https://www.3dpowderhub.com/product/304l-stainless-steel-powder-ss304l/>
- 3D Powder Hub (2022). Stainless Steel Powder 17-4PH. Ανακτήθηκε από <https://www.3dpowderhub.com/product/stainless-steel-powder-17-4ph/>
- 3DXTECH (2023). CARBONX PEKK-A+CF [AEROSPACE]. Ανακτήθηκε από <https://www.3dxttech.com/product/carbonx-cf-pekk-a-aerospace/>
- 3DXTECH (2021). CF15_PEKK-A_v1 [PDF document]. Ανακτήθηκε από https://www.3dxttech.com/wp-content/uploads/2021/05/CF15_PEKK-A_v1.pdf
- All3DP (2021). Materials. Filaments. Ανακτήθηκε από <https://all3dp.com/materials/filaments/>
- Al-Jumaili M.W., Al-Jumaili A.A., & Al-Jumaili K.A. (2020). PolyJet 3D printing technology: A review. Journal of Advanced Manufacturing Technology.
- ASTM (2022), Standard Guide for Evaluating Mechanical Properties of Metal Materials Made via Additive Manufacturing Processes, ASTM F3122-14(2022). Ανακτήθηκε από <https://www.astm.org/f3122-14r22.html>
- Bauto L. (2023). Factor of Safety: Ratio for Safety in Design and Use. Ανακτήθηκε από <https://safetyculture.com/topics/factor-of-safety/>
- BCN3D (2020). The history of 3D printing: When was 3D printing invented? Ανακτήθηκε από <https://www.bcn3d.com/the-history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>
- Boissonnet M. (1979). Snap Shackle (US4279062A). Ανακτήθηκε από <https://patentimages.storage.googleapis.com/d0/1c/5d/9d78ec95b4418b/US4279062.pdf>
- Chapman A. (2020). The history of 3D printing. Ανακτήθηκε από <https://www.wevolver.com/article/the-complete-history-of-3d-printing>
- Chapman A. (2022). How to 3D print waterproof parts. Ανακτήθηκε από <https://www.wevolver.com/article/how-to-3d-print-waterproof-parts>
- DNV (2021). Additive manufacturing - qualification and certification process for materials and components DNV-CG-0197. Ανακτήθηκε από <https://standards.dnv.com/explorer/document/39FEF29457554BC6B5C610723BEABA10/2>

Fast Radius (2022). Fused deposition modeling advantages and disadvantages. Ανακτήθηκε από <https://www.fastradius.com/resources/fused-deposition-modeling-advantages-and-disadvantages/#:~:text=Advantages%20of%20fused%20deposition%20modeling&text=You%20can%203D%20print%20a,cost%2Dto%2Dsize%20ratio.>

Gibson I., Rosen D., Stucker B. (2010). e-book: Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. Springer. DOI 10.1007/978-1-4939-2113-3_1

Hultin S. (1973). Snap-shackle. Snap shackles (US2923045A). United States. Ανακτήθηκε από <https://patentimages.storage.googleapis.com/50/f6/56/90f22b4137ed7c/US3850468.pdf>

Kumar L.J., Pandey P.M., Wimpenny D.I. (2019). e-book: 3D Printing and Additive Manufacturing Technologies. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0305-0_1.

KVA Stainless (n.d.). 17-4 Stainless Steel. Ανακτήθηκε από <http://www.kvastainless.com/17-4.html>

Lynxter (2021). Material Data Sheet: PEKK. Ανακτήθηκε από https://lynxter.fr/en/blog/guide_en/material-data-sheet-pek/.

Makerbot (2022). Makerbot and Ultimaker Agree to Merge To Accelerate Global Adoption Of Additive Manufacturing. Ανακτήθηκε από <https://www.makerbot.com/stories/news/makerbot-and-ultimaker-agree-to-merge-to-accelerate-global-adoption-of-additive-manufacturing/>

Mangels T.F. (1974). Snap-shackle. (US2923045A). United States. Ανακτήθηκε από <https://patentimages.storage.googleapis.com/77/00/bd/81b8f7d87d3517/US3930290.pdf>

Markforged (n.d.). 17-4PH-v2-SS Datasheet [PDF document]. Ανακτήθηκε από <https://www-objects.markforged.com/craft/materials/17-4PH-v2-SS-Datasheet.pdf>

Martel A. (2022). Taking a Closer Look at 3D Printing Applications in the Maritime Sector Ανακτήθηκε από <https://www.3dnatives.com/en/3d-printing-maritime-applications230820174/#!>

May V. (2022) Fused Deposition Modeling: The Advantages and Disadvantages. Ανακτήθηκε από <https://prototaluk.com/blog/fused-deposition-modelling-advantages-and-disadvantages/>

Metals4U (n.d.). 304 Stainless Steel. Ανακτήθηκε από <https://www.metals4u.co.uk/blog/304-stainless-steel>

Mount W.W. (1956) Snap shackles (US 2923045). United States. Ανακτήθηκε από <https://patentimages.storage.googleapis.com/84/d3/65/9a8e3637c8be97/US2923045.pdf>

Nordic3D (2021). PLA Filament - Properties and Uses. Ανακτήθηκε από <https://nordic3d.com/pla-filament-properties-and-uses/>.

Nguyen D.-S., Park H.-S., Lee C.-M. (2019). Applying Selective Laser Melting to Join Al and Fe: An Investigation of Dissimilar Materials, Appl. Sci. 2019, 9(15), 3031. <https://doi.org/10.3390/app9153031>

Pollen AM (2023). Industrial sourcing - From low alloys to superalloys. Ανακτήθηκε από https://www.pollen.am/metal_general_introduction/

Roback M. (2020). ebook: Generative Design: Redefining What's Possible in The Future Of Manufacturing. Ανακτήθηκε από <https://redshift.autodesk.com/e-books/future-of-manufacturing>

Ronstan (n.d.). SASnap shackles. Ανακτήθηκε από <https://www.ronstan.com/marine/SASnapshackles.asp>.

Shi Y., Yan C. (2021). Materials for Additive Manufacturing. Ανακτήθηκε από <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/acrylonitrile-butadiene-styrene>

Slater N.J. (2018). DNV GL boosts investment in 3D printing with establishment of Global Additive Manufacturing Centre of Excellence in Singapore. Ανακτήθηκε από <https://www.dnv.com/news/dnv-gl-boosts-investment-in-3d-printing-with-establishment-of-global-additive-manufacturing-centre-of-excellence-in-singapore--111035>

Slater N.J. (2021). DNV unveils new Additive Manufacturing (3D printing) service specification to support digital transformation of the energy industry. Ανακτήθηκε από <https://www.dnv.com/news/dnv-unveils-new-additive-manufacturing-3d-printing-service-specification-to-support-digital-transformation-of-the-energy-industry-198707>.

Tylaska (n.d.). Trigger release shackles. Ανακτήθηκε από <https://www.tylaska.com/product-category/marine-hardware/trigger-release-shackles/>.

Wichard (n.d.). HR snap shackle - With swivel eye. Ανακτήθηκε από <https://marine.wichard.com/en>

Παπαθανασάκης Ηλίας (2005). Η Τεχνολογία της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης, Περισκόπιο της Επιστήμης. Τεύχος 297.

