



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σχεδιασμός για Προσθετική Κατασκευή, τρισδιάστατη εκτύπωση πολυσυνθέτων εξαρτημάτων ναυτιλίας από πολυμερή υλικά και στατική ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Design for Additive Manufacturing, 3D printing of multi-component marine spare parts from polymeric materials and finite element static analysis.

Συγγραφέας:

Γιαννούλης Πέτρος

A.M.: 51115015

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Δημητρέλλου Σωτηρία

Αιγάλεω, 2024



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Διπλωματική εργασία

“Σχεδιασμός για Προσθετική Κατασκευή, τρισδιάστατη εκτύπωση πολυσυνθέτων εξαρτημάτων ναυτιλίας από πολυμερή υλικά και στατική ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων”

Συγγραφέας

Γιαννούλης Πέτρος - Α.Μ.: 51115015

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Δρ. Δημητρέλλου Σωτηρία

Ημερομηνία εξέτασης

13.06.2024

Εξεταστική Επιτροπή

Δημητρέλλου Σωτηρία,

Αναπλ. Καθηγήτρια ΠΑ.Δ.Α.

Παγώνης Δημήτριος-Νικόλαος,

Αναπλ. Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

Ιακωβίδης Ισίδωρος,

Λέκτορας ΠΑ.Δ.Α.

Δήλωση Συγγραφέα Διπλωματικής Εργασίας

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Γιαννούλης Πέτρος του Στυλιανού, με αριθμό μητρώου 51115015 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

Ο Δηλών



Γιαννούλης Πέτρος

Ευχαριστίες

Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια κυρία Δημητρέλλου Σωτηρία, για τη βοήθειά της καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας, την καθοδήγηση και τις συμβουλές της από τη σχεδίαση των εξαρτημάτων μέχρι και τη συγγραφή της εργασίας. Επίσης θα ήθελα να την ευχαριστήσω γιατί η επιλογή της διπλωματικής εργασίας έγινε καθώς είχα παρακολουθήσει το μάθημα «Τρισδιάστατος Σχεδιασμός με την βοήθεια Η/Υ», το οποίο μου έδωσε την ευκαιρία να διδαχθώ για τον τρισδιάστατο σχεδιασμό και την τρισδιάστατη εκτύπωση αλλά και να εξοικειωθώ στη χρήση του προγράμματος Fusion360, και μου παρείχε ένα ακόμα σημαντικό εφόδιο για την ένταξη μου στην αγορά εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ την οικογένεια μου, από την πιο άμεση με τους γονείς μου και τον αδερφό μου, αλλά και την έμμεση, με κοντινά ξαδέρφια και θείες/θείους μου, να με αγαπάνε και να τους αγαπάω, να με στηρίζουν καθ' όλη τη διάρκεια της φοίτησης μου και των επιλογών μου και με τη βαθιά πίστη τους και εμπιστοσύνης τους σε εμένα και στις ικανότητες μου, να μου δίνουν δύναμη και σιγουριά για το πως θέλω να πορευτεί η ζωή μου.

Περίληψη

Η Προσθετική Κατασκευή (Additive Manufacturing) είναι μια τεχνολογία που βασίζεται στη δημιουργία ενός αντικειμένου προσθέτοντας διαδοχικά υλικό ανά στρώσεις και αποτελεί σημαντική εξέλιξη των παραδοσιακών μεθόδων παραγωγής. Προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία και ελευθερία στο σχεδιασμό, νέες δυνατότητες για την ταχεία δημιουργία πολύπλοκων και καινοτόμων προϊόντων, ενώ επιφέρει σχεδόν μηδενική σπατάλη υλικού. Ο Σχεδιασμός για Προσθετική Κατασκευή (Design for Additive Manufacturing - DfAM) είναι μια στρατηγική προσέγγιση που βελτιστοποιεί τη διαδικασία σχεδιασμού για να αξιοποιήσει πλήρως τις δυνατότητες που προσφέρει η προσθετική κατασκευή. Η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας της προσθετικής κατασκευής και η υιοθέτηση του DfAM παράλληλα με την ανάπτυξη νέων υλικών αναμένεται να φέρουν επανάσταση στην παραγωγή νέων καινοτόμων προϊόντων σε βιομηχανίες όπως η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία και η ιατρική.

Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι αρχικά να αναλυθούν οι βασικές αρχές του Σχεδιασμού για Προσθετική Κατασκευή (DfAM) με βάση σύγχρονες επιστημονικές δημοσιεύσεις, και στη συνέχεια να υιοθετηθεί η προσέγγιση του DfAM για το σχεδιασμό και την τρισδιάστατη εκτύπωση τριών πολυσύνθετων εξαρτημάτων-ανταλλακτικών της ναυτιλίας. Επιπλέον, θα πραγματοποιηθεί αξιολόγηση της διαδικασίας εκτύπωσης και ορισμένων ιδιοτήτων των εκτυπωμένων πρωτοτύπων όπως ποιότητα και λειτουργικότητα, και θα υπολογιστεί η μηχανική αντοχή τους με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Συγκεκριμένα, το πρώτο κεφάλαιο περιλαμβάνει την ιστορική αναδρομή της προσθετικής κατασκευής, τις γενικές εφαρμογές της και κυρίως στη ναυτιλία και στη ναυπηγική, καθώς και τις τεχνολογίες και τα υλικά που χρησιμοποιούνται. Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η προσέγγιση του Σχεδιασμού για Προσθετική Κατασκευή (DfAM), οι βασικές αρχές, οι τεχνικές, οι μέθοδοι και τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται. Το τρίτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τον σχεδιασμό των πολυσύνθετων εξαρτημάτων-ανταλλακτικών. Αναφέρονται τα χαρακτηριστικά τους γνωρίσματα και οι εφαρμογές τους, και περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία τρισδιάστατης σχεδίασης στο πρόγραμμα Fusion360. Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης των εξαρτημάτων-ανταλλακτικών, τα υλικά και ο καθορισμός των παραμέτρων εκτύπωσης. Αναφέρονται επίσης τα προβλήματα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης, οι τροποποιήσεις στο σχεδιασμό και αξιολογείται η 3D εκτύπωση. Στο πέμπτο κεφάλαιο πραγματοποιείται η στατική ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για τα εξαρτήματα-ανταλλακτικά για οριακές συνθήκες φόρτισης. Τέλος στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι μελλοντικές προτάσεις έρευνας.

Λέξεις κλειδιά: Προσθετική Κατασκευή, Σχεδιασμός για Προσθετική Κατασκευή, Τρισδιάστατη Εκτύπωση, Εξαρτήματα ναυτιλίας, PLA, PVA, Στατική ανάλυση.

Abstract

Additive Manufacturing is a technology based on creating an object by successively adding material in layers and constitutes a significant advancement of traditional production methods. AM offers greater flexibility and design freedom, new possibilities for rapidly creating complex and innovative products, and also results in minimal material waste. Design for Additive Manufacturing (DfAM) is a strategic approach that optimizes the design process to fully utilize the capabilities offered by additive manufacturing. The continuous evolution of additive manufacturing technology and the adoption of DfAM alongside the development of new materials are expected to revolutionize the production of innovative products in industries such as aerospace, automotive, and medical.

The aim of the thesis is to analyze the basic principles of DfAM based on contemporary scientific publications and adopt the DfAM approach for the design and three-dimensional printing of three complex maritime components - spare parts. Additionally, an evaluation of the printing process, certain properties of the printed prototypes such as quality and functionality, and the calculation of their mechanical strength using the finite element method will be conducted.

Specifically, the first chapter includes a historical overview of additive manufacturing, its applications, especially in shipping and shipbuilding, and the technologies and materials used. The second chapter describes in detail the Design for Additive Manufacturing (DfAM) approach, the basic principles, techniques, methods, and tools used. The third chapter includes the design of the complex components - spare parts. Their characteristics, features, and applications are mentioned, and the three-dimensional design process in the Fusion360 program is described in detail. The fourth chapter describes the process of three-dimensional printing of the components - spare parts, the materials used, and the determination of the printing parameters. Problems encountered during printing, modifications to the design, and the evaluation of the 3D printing are also mentioned. In the fifth chapter, a static analysis using the finite element method is conducted for the components - spare parts for boundary loading conditions. Finally, in the sixth chapter, conclusions and future research proposals are presented.

Key Words: Additive Manufacturing, Design for Additive Manufacturing, 3D Printing, Marine spare parts, PLA, PVA, Stress analysis.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 - Προσθετική Κατασκευή	8
1.1 Εισαγωγή.....	8
1.1.1 Ιστορική Αναδρομή	8
1.1.2 Γενική Περιγραφή.....	10
1.1.3 Γενικές Εφαρμογές.....	12
1.2 Εφαρμογές σε Ναυπηγική και Ναυτιλία	17
1.3 Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής	19
1.4 Υλικά Προσθετικής Κατασκευής.....	27
Κεφάλαιο 2 - Σχεδιασμός για Προσθετική Κατασκευή (DfAM)	32
2.1 Εισαγωγή.....	32
2.2 Γενική Περιγραφή DfAM	33
2.3 Βασικές Αρχές του DfAM.....	34
2.4 Τεχνικές, Μέθοδοι και Εργαλεία DfAM	37
Κεφάλαιο 3 - Σχεδιασμός Πολυσυνθέτων Εξαρτημάτων Ναυτιλίας	44
3.1 Εισαγωγή.....	44
3.2 Pillow Block Bearing with Spherical Ball	44
3.3 Clevis Joint with Pin and Circlip	49
3.4 Rod End Bearing with Female Thread	52
3.5 Διαδικασία Τρισδιάστατου Σχεδιασμού	56
Κεφάλαιο 4 – Τρισδιάστατη Εκτύπωση Πολυσυνθέτων Εξαρτημάτων Ναυτιλίας.....	66
4.1 Επιλογή Υλικών 3D Εκτύπωσης	66
4.2 Καθορισμός Παραμέτρων Εκτύπωσης	68
4.3 Προσομοίωση της Διαδικασίας Εκτύπωσης	74
4.4 Περιγραφή του 3D Εκτυπωτή.....	80
4.5 Διαδικασία Τρισδιάστατης Εκτύπωσης	81
Κεφάλαιο 5 – Μελέτη Αντοχής Πολυσύνθετων Εξαρτημάτων	88
5.1 Pillow Block Bearing with Spherical Ball	88
5.2 Clevis Joint with Pin and Circlip	94
5.3 Rod End Bearing with Female Thread	99
Κεφάλαιο 6 - Επίλογος	105
6.1 Συμπεράσματα και Προτάσεις Μελλοντικής Έρευνας.....	105
6.2 Το μέλλον της Προσθετικής Κατασκευής	106
Βιβλιογραφία.....	108

Κεφάλαιο 1 - Προσθετική Κατασκευή

1.1 Εισαγωγή

Η Προσθετική Κατασκευή (Additive Manufacturing - AM), γνωστή και ως τρισδιάστατη εκτύπωση (3D Printing), είναι μια επαναστατική τεχνολογία παραγωγής προϊόντων που περιλαμβάνει τη δημιουργία τρισδιάστατων αντικειμένων προσθέτοντας υλικό στρώμα προς στρώμα. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους αφαιρετικής κατασκευής, όπου το υλικό αφαιρείται από ένα συμπαγές δοκίμιο για να επιτευχθεί το επιθυμητό σχήμα, η προσθετική κατασκευή δημιουργεί το αντικείμενο χρησιμοποιώντας ακριβώς την ποσότητα του υλικού που απαιτείται. Η τρισδιάστατη εκτύπωση αντιπροσωπεύει μια μεταμορφωτική αλλαγή στον τομέα της παραγωγής προϊόντων, προσφέροντας νέες δυνατότητες για σχεδιασμό, κατασκευή και προσαρμογή στις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής. Καθώς η επιστήμη και η τεχνολογία συνεχίζει να εξελίσσεται, η προσθετική κατασκευή είναι πιθανό να διαδραματίσει ολοένα και πιο σημαντικό ρόλο σε διάφορες βιομηχανίες.

1.1.1 Ιστορική Αναδρομή

Η ιστορία της τεχνολογίας της προσθετικής κατασκευής εντοπίζεται στη δεκαετία του 1980, όταν δημιουργήθηκαν οι πρώτοι τρισδιάστατοι εκτυπωτές. Από τότε, η τεχνολογία αυτή έχει υποστεί τεράστια εξέλιξη, με νέες τεχνολογίες και διαδικασίες παραγωγής να αναπτύσσονται και να διατίθενται στην αγορά. Σήμερα, οι τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές σε διαφορετικούς κλάδους. Από την αυτοκινητοβιομηχανία και την αεροδιαστημική μέχρι την υγειονομική περίθαλψη και τα καταναλωτικά αγαθά, η προσθετική κατασκευή μεταμορφώνει τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται και κατασκευάζονται τα προϊόντα.

Τα θεμέλια για την προσθετική κατασκευή τέθηκαν το 1980 όταν ο Hideo Kodama, ερευνητής στο Δημοτικό Ινστιτούτο Βιομηχανικών Ερευνών της Nagoya, κατέθεσε το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας προσθετικής κατασκευής. Η ιδέα του Kodama ήταν να χρησιμοποιήσει ένα δοχείο με υλικό φωτοπολυμερούς και να το εκθέσει στο φως για να δημιουργήσει πρωτότυπα. Ωστόσο, η ιδέα του δεν έγινε ποτέ πραγματικότητα λόγω έλλειψης χρηματοδότησης. Λίγα χρόνια αργότερα, το 1986, ο Chuck Hull, ο συνιδρυτής της 3D Systems, εφηύρε τη στερεολιθογραφία (SLA), που θεωρείται το πρώτο σύστημα ταχείας δημιουργίας πρωτοτύπων. Με τη στερεολιθογραφία, ο Hull ανακάλυψε έναν τρόπο για να στερεοποιήσει την υγρή ρητίνη χρησιμοποιώντας ένα λέιζερ UV, και δημιούργησε το πρώτο αντικείμενο που εκτυπώθηκε σε 3D. Την ίδια χρονιά, ο Hull κατέθεσε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για την εφεύρεσή του και ίδρυσε την 3D Systems για την εμπορευματοποίηση της στερεολιθογραφίας [1, 3].

Ένα χρόνο μετά την εφεύρεση του Hull το 1988, ο Carl Deckard του Πανεπιστημίου του Texas στο Austin ανέπτυξε την επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (SLS), μια άλλη τεχνολογία προσθετικής κατασκευής καθώς και δημιουργήθηκε ο πρώτος τρισδιάστατος

εκτυπωτής SLA-1 (**Εικόνα 1**). Η SLS χρησιμοποιεί ένα λέιζερ για τη σύντηξη μικρών σωματιδίων πλαστικών, μεταλλικών ή κεραμικών, για τη δημιουργία τρισδιάστατων αντικειμένων. Το 1989, ο Scott Crump, ο ιδρυτής της Stratasys, εφηύρε την εναπόθεση συντηγμένου υλικού (FDM), μια άλλη δημοφιλή τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης. Η FDM λειτουργεί με την εξώθηση ενός νήματος από λιωμένο πλαστικό υλικό, το οποίο στερεοποιείται για να δημιουργήσει το τρισδιάστατο αντικείμενο [1, 2].

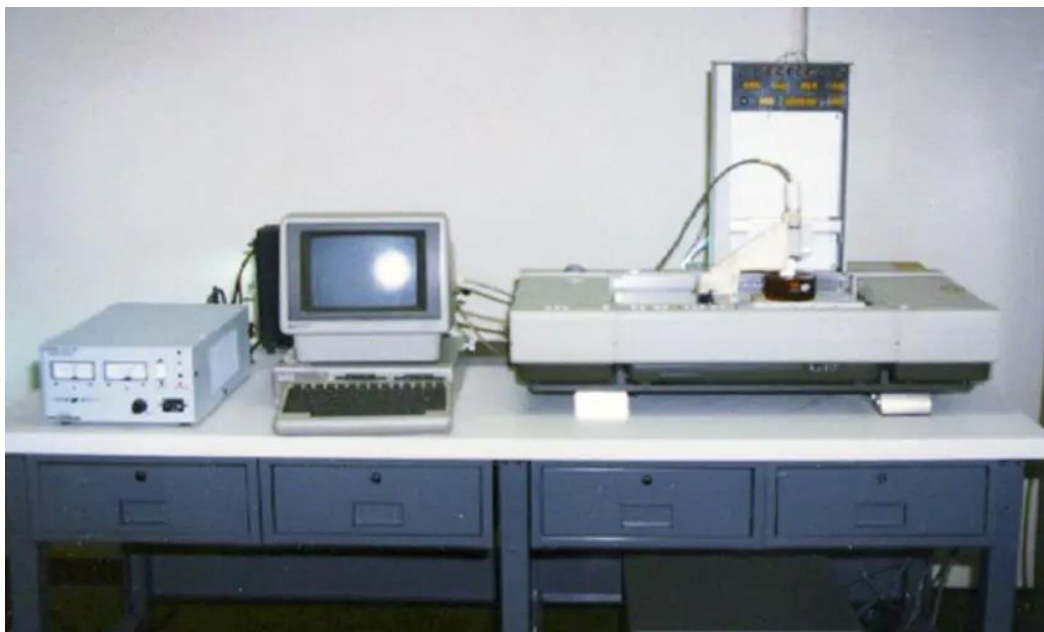
Η δεκαετία του 1990 ήταν μια δεκαετία ταχείας ανάπτυξης για την τεχνολογία προσθετικής κατασκευής. Το 1991, μια εταιρεία που ονομάζεται Cubital εφηύρε το Solid Ground Curing (SGC το οποίο αποτελεί μια τεχνολογία που χρησιμοποιεί το υπεριώδες φως για τη στερεοποίηση υγρών φωτοπολυμερών ρητινών. Την ίδια χρονιά, η κατασκευή πολύστρωτων αντικειμένων (LOM) εφευρέθηκε από μια εταιρεία που ονομάζεται Helisys. Η LOM είναι μια τεχνολογία προσθετικής κατασκευής που χρησιμοποιεί φύλλα χαρτιού, πλαστικού ή μετάλλου κολλημένα μεταξύ τους και κομμένα σε σχήματα χρησιμοποιώντας λέιζερ ή μαχαίρι. Το 1999, ερευνητές στο Ινστιτούτο Αναγεννητικής Ιατρικής Wake Forest δημιούργησαν τον πρώτο τρισδιάστατο εκτυπωμένο ιστό. Αυτή η ανακάλυψη στον ιατρικό τομέα άνοιξε τη δυνατότητα χρήσης της τρισδιάστατης εκτύπωσης για τη δημιουργία μεταμοσχεύσιμων οργάνων.

Ο 21ος αιώνας αποτελεί μια περίοδο τεράστιας ανάπτυξης για την τεχνολογία προσθετικής κατασκευής. Περισσότερες εταιρείες έχουν εισέλθει στην αγορά και η τεχνολογία έχει γίνει πιο προσβάσιμη. Ο καθηγητής Adrian Bowyer του Πανεπιστημίου του Bath εφηύρε τον πρώτο επιτραπέζιο εκτυπωτή 3D, που ονομάζεται RepRap, το 2005. Ο RepRap ήταν ανοιχτού κώδικα, που σημαίνει ότι οποιοσδήποτε μπορούσε να δημιουργήσει έναν εκτυπωτή για προσωπική χρήση, γεγονός που έκανε την 3D εκτύπωση πιο προσιτή στο ευρύ κοινό. Η Objet, ένας κατασκευαστής τρισδιάστατων εκτυπωτών, κυκλοφόρησε τον πρώτο 3D εκτυπωτή πολλαπλών υλικών το 2007. Αυτή η ανακάλυψη επέτρεψε στους χρήστες να εκτυπώνουν αντικείμενα με πολλαπλά υλικά, ως εκ τούτου, μέρη με πολλαπλές ιδιότητες υλικού [1, 3].

Στην αλλαγή της δεκαετίας κυκλοφόρησε ο MakerBot, ο πρώτος τρισδιάστατος εκτυπωτής ευρείας χρήσης. Η MakerBot ιδρύθηκε το 2009 από τους Bre Pettis, Adam Mayer και Zach Smith. Η εταιρεία είχε στόχο να κάνει την τρισδιάστατη εκτύπωση προσβάσιμη στους ερασιτέχνες χρήστες, οι οποίοι θα μπορούσαν να αγοράσουν έναν 3D εκτυπωτή για το σπίτι ή το γραφείο τους. Μια άλλη εταιρεία που ιδρύθηκε το 2011 είναι η Prusa Research, η οποία ανέπτυξε τον Prusa i3, έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή που βασίζεται στον εκτυπωτή RepRap, ο οποίος θεωρείται ένας από τους πιο δημοφιλείς εκτυπωτές 3D λόγω της χαμηλής τιμής και του εύχρηστου σχεδιασμού του. Μετά την επιτυχία του Prusa i3, η MakerBot κυκλοφόρησε τον Replicator 2, έναν 3D εκτυπωτή που σχεδιάστηκε για πιο προχωρημένους χρήστες και έγινε ο πιο δημοφιλής επιτραπέζιος 3D εκτυπωτής στην αγορά [2].

Το 2012, η Stratasys και η Objet συγχωνεύτηκαν για να σχηματίσουν την Stratasys Ltd., η οποία αποτελεί τον μεγαλύτερο κατασκευαστή τρισδιάστατων εκτυπωτών στον κόσμο. Η συγχώνευση αυτών των δύο εταιρειών δημιούργησε ένα μεγαθήριο στον κλάδο της

τρισεπίστας εκτύπωσης. Το 2013, η Stratasys Ltd. εξαγόρασε τη MakerBot σε μια συμφωνία αξίας 403 εκατομμυρίων δολαρίων. Αυτή η εξαγορά βοήθησε τη Stratasys να υπερσχύσει στην καταναλωτική αγορά τρισεπίστας εκτυπώσεων σε μια εποχή όπου οι πιο οικονομικοί 3D εκτυπωτές δεν εξασφάλιζαν τις μηχανικές ιδιότητες και την ακρίβεια που απαιτούνταν για πιο απαιτητικές εφαρμογές προσθετικής κατασκευής [1].



Εικόνα 1: Ο πρώτος τρισεπίστας εκτυπωτής SLA-1 [4].

Το 2013, η Markforged, ένας κατασκευαστής τρισεπίστας εκτυπώσεων, έφερε επανάσταση στη βιομηχανία της τρισεπίστας εκτύπωσης με την κυκλοφορία του Mark One. Ο Mark One ήταν ο πρώτος τρισεπίστας εκτυπωτής που μπορούσε να εκτυπώσει μεταλλικά αντικείμενα. Αυτή η τεχνολογία υποστηρίζει μια εντελώς νέα σειρά εφαρμογών για την εκτύπωση 3D, καθώς τα μεταλλικά αντικείμενα μπορούν πλέον να εκτυπωθούν με την ίδια ευκολία όπως τα πλαστικά [1, 2, 3].

1.1.2 Γενική Περιγραφή

Η προσθετική κατασκευή είναι η διαδικασία δημιουργίας ενός αντικειμένου με την κατασκευή του να γίνεται διαδοχικά ανά στρώσεις υλικού. Είναι το αντίθετο της αφαιρετικής κατασκευής, στην οποία ένα αντικείμενο δημιουργείται αφαιρώντας με κοπή ένα συμπαγές κομμάτι υλικού μέχρι να παραμείνει το τελικό προϊόν. Για να δημιουργηθεί ένα αντικείμενο χρησιμοποιώντας την προσθετική κατασκευή, αρχικά πρέπει να δημιουργηθεί το ψηφιακό μοντέλο του αντικειμένου. Αυτό γίνεται συνήθως με σχεδιασμό με τη βοήθεια υπολογιστή (Computer-Aided Design - CAD) σε κατάλληλο πρόγραμμα 3D σχεδίασης, ή με την τεχνολογία του αντίστροφου σχεδιασμού, δηλαδή με τη σάρωση του φυσικού αντικειμένου ώστε να δημιουργηθεί το ψηφιακό μοντέλο. Στη συνέχεια, το λογισμικό διαιρεί το 3D ψηφιακό μοντέλο

σε στρώσεις ανάλογα με τις παραμέτρους που θέτει ο χρήστης, και η ψηφιακή πληροφορία αποστέλλεται στον τρισδιάστατο εκτυπωτή, ο οποίος αρχίζει να δημιουργεί αμέσως το αντικείμενο. Στη συνέχεια, οι διατομές του 3D μοντέλου εκτυπώνονται στρώμα προς στρώμα μέχρι να παραχθεί το τελικό αντικείμενο. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία και πολυπλοκότητα σχεδιασμού, καθώς οι περίπλοκες και γεωμετρικά πολύπλοκες κατασκευές μπορούν να κατασκευαστούν πιο εύκολα από ό,τι με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής [5].

Η προσθετική κατασκευή έχει ορισμένα σημαντικά πλεονεκτήματα. Με την παραδοσιακή κατασκευή, ολόκληρη η αλυσίδα εφοδιασμού μπορεί να διαρκέσει μήνες και να απαιτήσει μια πολύ μεγάλη επένδυση η οποία μπορεί να ανακτηθεί μόνο με παραγωγή μεγάλου όγκου. Με την προσθετική κατασκευή, μεγάλο μέρος των ενδιάμεσων σταδίων της εφοδιαστικής αλυσίδας αφαιρούνται. Η ταχύτητα με την οποία μπορεί να παραχθεί ένα εξάρτημα είναι πολύ πιο γρήγορη, καθώς πλέον οι χρήστες μπορούν να στείλουν ένα σχέδιο απευθείας από τον υπολογιστή τους στον τρισδιάστατο εκτυπωτή.

Η κατασκευή ενός αντικειμένου με προσθετική κατασκευή καθιστά επίσης δυνατή τη δημιουργία αντικειμένων με διαφορετικά υλικά στο εσωτερικό και στο εξωτερικό τμήμα τους, όπως κεραμικά υλικά ανθεκτικά στην τριβή στο εξωτερικό και αγωγίμα μεταλλικά υλικά στο εσωτερικό. Ένα βασικό χαρακτηριστικό της προσθετικής κατασκευής είναι η δημιουργία σύνθετων γεωμετριών και η παραγωγή πολύ μικρού μεγέθους εξαρτημάτων. Επίσης πολύ σημαντική είναι η βελτιστοποίηση τοπολογίας (optimization topology) η οποία αφορά την αφαίρεση υλικού από το εσωτερικό του αντικειμένου, το οποίο δεν επηρεάζει τις κρίσιμες ιδιότητες του. Επίσης, ορισμένα αντικείμενα που είναι πολύ μικρά ή έχουν πολύ δύσκολες εσοχές από τις οποίες πρέπει να αφαιρεθεί υλικό, δεν μπορούν να κατασκευαστούν εύκολα με τις μεθόδους αφαιρετικής κατασκευής. Η προσθετική κατασκευή εξαλείφει αυτό το εμπόδιο. Επιπλέον αφαιρώντας υλικό από την εσωτερική δομή ενός αντικειμένου μειώνεται το βάρος ενός αντικειμένου, το οποίο είναι ιδιαίτερα επιθυμητό στην αεροδιαστημική και την αυτοκινητοβιομηχανία, όπου το βάρος μπορεί να επηρεάσει τη λειτουργικότητα ενός τελικού προϊόντος.

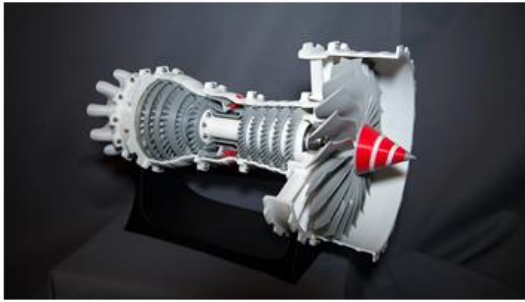
Η προσθετική κατασκευή επιτρέπει επίσης την εύκολη παραγωγή μικρών ποσοτήτων αντικειμένων ή εξαρτημάτων. Με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής, το υψηλό κόστος των εργαλείων, των μηχανών και των εγκαταστάσεων, έχει ως αποτέλεσμα γενικά την αύξηση του κόστους παραγωγής. Ωστόσο, με την προσθετική κατασκευή, το κόστος κατασκευής συνήθως είναι αρκετά μειωμένο, επομένως η δημιουργία μικρών ποσοτήτων αντικειμένων γίνεται πιο οικονομικά εφικτή. Αυτό καθιστά ευκολότερη την προσαρμογή προϊόντων στις απαιτήσεις του πελάτη, όπως προσθετικά ή εμφυτεύματα, και θα μπορούσε να οδηγήσει σε καλύτερα αποτελέσματα για τους ασθενείς. Τα ακουστικά βαρηκοΐας για παράδειγμα, τα οποία είναι προσαρμοσμένα για κάθε άτομο, κατασκευάζονται σχεδόν εξ ολοκλήρου με προσθετική κατασκευή.

Η προσθετική κατασκευή έχει επίσης προκλήσεις καθώς, οι μηχανές προσθετικής κατασκευής είναι ακριβές, μερικές φορές στοιχίζοντας εκατοντάδες χιλιάδες δολάρια. Η χρήση τους για τη δημιουργία μεγάλων ποσοτήτων εξαρτημάτων επίσης διαρκεί περισσότερο από ό,τι με την παραδοσιακή κατασκευή. Πολλά αντικείμενα που κατασκευάζονται με προσθετική κατασκευή απαιτούν επίσης επεξεργασία μετά από την εκτύπωσή τους, όπως για παράδειγμα για τον καθαρισμό και την εξομάλυνση των τραχιών επιφανειών. Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις, ωστόσο, είναι να διασφαλιστεί ότι το τελικό εξάρτημα έχει καλές ιδιότητες. Σύμφωνα με την επιστήμη των υλικών, αυτή είναι ίσως η μεγαλύτερη πρόκληση της προσθετικής κατασκευής, η εξάλειψη δηλαδή του αριθμού των ελαττωμάτων που θα μπορούσαν να προκύψουν. Γενικά, το υλικό που χρησιμοποιείται και οι ιδιότητές του, καθώς και η διαδικασία κατασκευής του αντικειμένου επηρεάζουν την ποιότητα και τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Για παράδειγμα, αν δεν επιλεγούν τα κατάλληλα υλικά και οι κατάλληλες παράμετροι εκτύπωσης, μπορεί να προκύψουν ελαττώματα που οδηγούν σε αστοχία. Ειδικά για τα μεταλλικά αντικείμενα, εάν η συσσωμάτωση δεν έχει γίνει σωστά, μπορεί να οδηγήσει σε εσωτερική καταπόνηση του υλικού, με αποτέλεσμα το εξάρτημα να κινδυνεύει να υποστεί θραύση. Τα ελαττώματα σε αντικείμενα που κατασκευάζονται με προσθετική κατασκευή δεν αφορούν μόνο τα μέταλλα, αλλά και τα πλαστικά υλικά. Δεδομένης της σχετικής καινοτομίας της προσθετικής κατασκευής, οι ερευνητές εξακολουθούν να προσπαθούν να κατανοήσουν τις πολλές διαφορετικές πτυχές της, δηλαδή τον τρόπο με τον οποίο συνεργάζονται τα υλικά και πώς μπορούν να μειώσουν την πιθανότητα ελαττωμάτων και αστοχιών στα τελικά προϊόντα [6].

1.1.3 Γενικές Εφαρμογές

Η προσθετική κατασκευή χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σε διάφορες βιομηχανίες λόγω της ευελιξίας, της ακρίβειας και της ικανότητάς της να παράγει πολύπλοκες δομές. Αυτές οι εφαρμογές αναδεικνύουν τον ποικίλο και διευρυμένο ρόλο της προσθετικής κατασκευής, η οποία φέρει πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής, όπως ευελιξία σχεδιασμού, μειωμένα απόβλητα και δυνατότητα παραγωγής σύνθετων γεωμετριών. Καθώς η τεχνολογία συνεχίζει να προοδεύει, νέες εφαρμογές αναδύονται συνεχώς σε διάφορους κλάδους της επιστήμης και τεχνολογίας.

Η προσθετική κατασκευή χρησιμοποιείται εκτενώς στην αεροδιαστημική για την κατασκευή ελαφρών και πολύπλοκων εξαρτημάτων, όπως ακροφύσια καυσίμου και πτερύγια τουρμπίνας (**Εικόνα 2**). Η αεροδιαστημική βιομηχανία αξιοποιεί την προσθετική κατασκευή για την άμεση κατασκευή πρωτοτύπων και την εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών εξασφαλίζοντας την ταχεία μετατροπή νέων σχεδίων και ιδεών σε προϊόντα. Άλλος ένας τομέας που χρησιμοποιείται η προσθετική κατασκευή είναι για την κατασκευή προσαρμοσμένων εξαρτημάτων για ενεργειακά συστήματα, όπως τουρμπίνες και εναλλάκτες θερμότητας. Η τρισδιάστατη εκτύπωση υποστηρίζει την ταχεία δημιουργία πρωτοτύπων εξαρτημάτων για συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.



Εικόνα 2: (Αριστερά) Τουρμπίνα αεροπλάνου τρισδιάστατα εκτυπωμένη [7], (Δεξιά) Η μηχανή πολλαπλή εισαγωγής DeltaWing τρισδιάστατα εκτυπωμένη από την CRP USA [8].

Η προσθετική κατασκευή χρησιμοποιείται επίσης την παραγωγή εξατομικευμένων εμφυτευμάτων προσαρμοσμένων σε μεμονωμένους ασθενείς, που κυμαίνονται από ορθοπεδικά εμφυτεύματα (π.χ. αντικαταστάσεις ισχίου ή γόνατος) έως κρανιακά εμφυτεύματα (Εικόνες 3,4), καθώς και στην οδοντιατρική για τη δημιουργία οδοντικών σφραγισμάτων, γεφυρών και μοντέλων (Εικόνα 5). Στον τομέα της αναγεννητικής ιατρικής, η βιοεκτύπωση αφορά τη δημιουργία ζωντανών ιστών και οργάνων για μεταμόσχευση [9].



Εικόνα 3: Εμφυτεύματα πιανίου για το κρανίο και τη λεκάνη που παράγονται με χρήση υλικού EOSINT M 280 [10].



Εικόνα 4: (Αριστερά) Προσαρμοσμένες ορθώσεις ποδιών με λέιζερ από το έργο A-Footprint της Materialise, (Δεξιά) Προσαρμοσμένος επιλεκτικός νάρθηκας καρπού με SLS που παράγεται από την Fraunhofer IPA [10].



Εικόνα 5: Οδηγοί διάτρησης για προσαρμοσμένα οδοντικά εμφυτεύματα που παράγονται με χρήση υλικού ObjetEden260TM και οδηγός κοπής για αρθροπλαστική γόνατος [10].

Οι αυτοκινητοβιομηχανίες χρησιμοποιούν την προσθετική κατασκευή για την ταχεία δημιουργία πρωτοτύπων εξαρτημάτων οχημάτων, προσαρμοσμένων στις απαιτήσεις και μικρού βάρους, από πλαστικά ή μεταλλικά υλικά, συμβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο σε βελτιωμένα οχήματα, μικρότερου βάρους, μεγαλύτερης απόδοσης και μειωμένης κατανάλωσης καυσίμου. Γενικά η χρήση της στην κατασκευή εξαρτημάτων και ανταλλακτικών (Εικόνες 6 και 7), επιφέρει μείωση στο κόστος και στο χρόνο παραγωγής. Η τρισδιάστατη εκτύπωση, επιπλέον, χρησιμοποιείται για την παραγωγή καλουπιών για χύτευση με έγχυση και άλλες διαδικασίες παραγωγής [11, 12].



Εικόνα 6: (Αριστερά) Εξάρτημα ανάρτησης εκτυπωμένο με υλικό PA12-GFX 2550 [9], (Δεξιά) Τρισδιάστατο εκτυπωμένο περίβλημα ηλεκτρικής μονάδας κίνησης της Porsche [13].



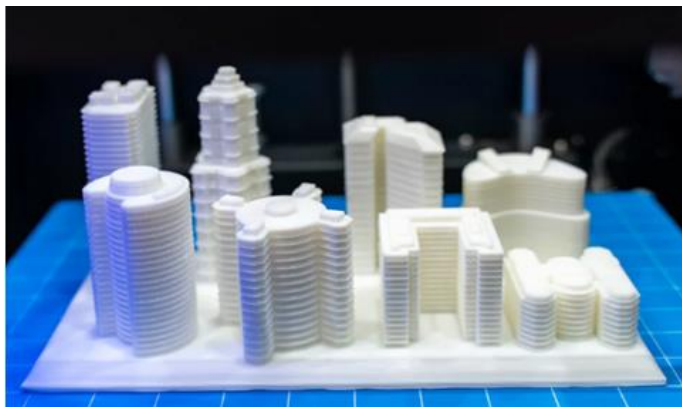
Εικόνα 7: Μηχανολογικά εξαρτήματα τρισδιάστατα εκτυπωμένα από μεταλλικό υλικό [14].

Η προσθετική κατασκευή είναι ζωτικής σημασίας για τον τομέα της άμυνας για τη γρήγορη δημιουργία πρωτοτύπων και δοκιμή διαφόρων εξοπλισμών και εξαρτημάτων. Η τρισδιάστατη εκτύπωση επιτρέπει την κατά απαίτηση παραγωγή προσαρμοσμένου και πολύπλοκου στρατιωτικού εξοπλισμού (**Εικόνα 8**).



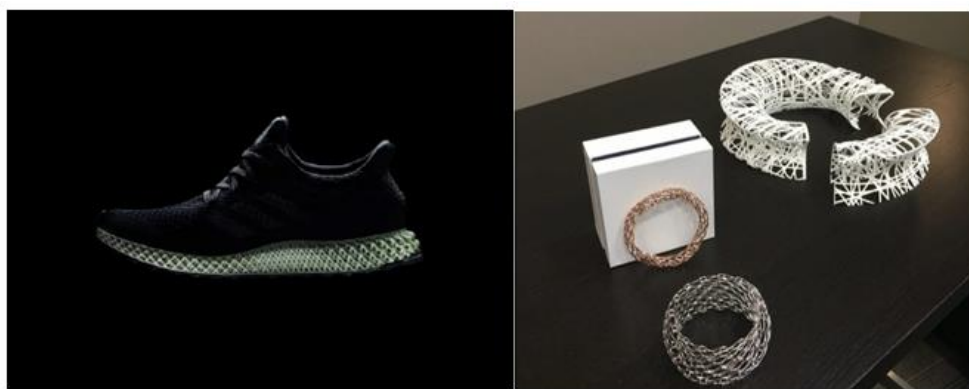
Εικόνα 8: Ο εκτοξευτής χειροβομβίδων RAMBO. Τα 50 ξεχωριστά μέρη που συνθέτουν το RAMBO, εκτός από τα ελατήρια και συνδετήρες, είναι τρισδιάστατα εκτυπωμένα [15].

Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία λεπτομερών και ακριβών μοντέλων κλίμακας κτιρίων και κατασκευαστικών έργων (**Εικόνα 9**). Η μεγάλης κλίμακας τρισδιάστατη εκτύπωση διερευνάται για την παραγωγή κατασκευαστικών στοιχείων, όπως τοίχους και αρχιτεκτονικά στοιχεία [11, 12].



Εικόνα 9: Μακέτα κτιρίων τρισδιάστατα εκτυπωμένη από υλικό PLA [16].

Στον τομέα ρουχισμού και γενικότερα της μόδας καθώς και στην κατασκευή επίπλων, οι σχεδιαστές χρησιμοποιούν την προσθετική κατασκευή για να δημιουργήσουν πρωτότυπα και εξατομικευμένα είδη μόδας, όπως παπούτσια, αξεσουάρ, ακόμη και ρούχα καθώς και έπιπλα και είδη σπιτιού με περίπλοκα μοτίβα και υφές (**Εικόνες 10 και 11**).



Εικόνα 10: (Αριστερά) Η Adidas χρησιμοποιεί τρισδιάστατη εκτύπωση για μαζική παραγωγή παπουτσιών Futurecraft 4D [8], (Δεξιά) Αξεσουάρ μόδας κατασκευασμένα με τη χρήση τρισδιάστατης εκτύπωσης [17].



Εικόνα 11: Έπιπλα, φωτιστικά και είδη σπιτιού τρισδιάστατα εκτυπωμένα [10].

1.2 Εφαρμογές σε Ναυπηγική και Ναυτιλία

Η ναυτιλιακή βιομηχανία, η οποία περιλαμβάνει τις ναυτιλιακές εταιρείες, τα ναυπηγεία και τις λιμενικές αρχές, έχει αρχίσει τα τελευταία χρόνια να υποβάλλεται σε ψηφιακό μετασχηματισμό. Ο τομέας της ναυτιλιακής βιομηχανίας περιλαμβάνει όλες τις εφαρμογές που σχετίζονται με τη πλωτές κατασκευές, συμπεριλαμβανομένων των ιστιοπλοϊκών σκαφών και γιοτ, των ποντοπόρων πλοίων, αλλά και των υποθαλάσσιων κατασκευών και υποβρυχίων. Ο αυτοματισμός των διαδικασιών αποκτά αυξανόμενο ενδιαφέρον στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Ο οργανισμός IMO έχει θέσει το θέμα των αυτόνομων πλοίων εντείνοντας τις προσπάθειες για την υιοθέτησή τους, ενώ συνεχώς, αναδύονται προηγμένες δυνατότητες λογισμικού και προσομοίωσης και βελτιώνεται η θαλάσσια συνδεσιμότητα.

Ωστόσο, μέχρι πολύ πρόσφατα, ο ψηφιακός μετασχηματισμός στη ναυτιλιακή βιομηχανία εφάρμοσε διαδικασίες προσθετικής κατασκευής. Γενικά, στη βιομηχανία των γιοτ, η προσθετική κατασκευή αποδεικνύεται ιδανική για μεγάλο αριθμό πλαστικών ανταλλακτικών ακόμα και για μικρά εξαρτήματα λόγω της μικρής ποσότητας απαιτούμενων παρτίδων. Πρόσφατα, και κατόπιν της μεγάλης ανάπτυξης των σύνθετων υλικών, οι κατασκευαστές της βιομηχανίας ιστιοπλοΐας άρχισαν να διερευνούν τις ευκαιρίες για παραγωγή καλουπιών σκαφών μεγάλου σχήματος χρησιμοποιώντας την προσθετική κατασκευή. Επίσης για κάποια σκάφη, όπως τα αγωνιστικά σκάφη και τα πολυτελή γιοτ, η προσθετική κατασκευή έχει αρχίσει να υιοθετείται για την παραγωγή μικρών παρτίδων ανταλλακτικών ή προσαρμοσμένων εξαρτημάτων. Πολυμερή υλικά ή σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα ή γυαλιού ήδη δοκιμάζονται για προσθετική κατασκευή λειτουργικών εξαρτημάτων καθώς τα υλικά αυτά παρέχουν επαρκή αντοχή στη διάβρωση στο σκληρό θαλάσσιο περιβάλλον.

Η προσθετική κατασκευή επιτρέπει επίσης την επιτόπια παραγωγή κρίσιμων ανταλλακτικών για τα πλοία [18]. Είναι γνωστό ότι τα πλοία στη θάλασσα ενδέχεται να αντιμετωπίσουν προκλήσεις όσον αφορά την έγκαιρη απόκτηση ανταλλακτικών. Αντί να μεταφέρουν μεγάλο απόθεμα ανταλλακτικών, τα πλοία που είναι εξοπλισμένα με τρισδιάστατους εκτυπωτές μπορούν να κατασκευάζουν εξαρτήματα κατά απαίτηση, μειώνοντας το κόστος αποθήκευσης. Με την ενσωμάτωση της προσθετικής κατασκευής, τα πλοία μπορούν να μειώσουν την εξάρτησή τους από τις παραδοσιακές αλυσίδες εφοδιασμού και να κατασκευάζουν τα κρίσιμα εξαρτήματα-ανταλλακτικά επιτόπου. Κατά ανάλογο τρόπο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επιτόπιες επισκευές κατεστραμμένων εξαρτημάτων – στοιχείων μηχανών, εξαλείφοντας την ανάγκη επιστροφής σε κοντινό λιμάνι για επισκευές, εξοικονομώντας χρόνο και πόρους. **(Εικόνα 12)**. Η παραπάνω διαδικασία βέβαια απαιτεί τη διάθεση των ψηφιακών αρχείων STL των διαφόρων ανταλλακτικών στο πλοίο, καθώς και πλήρωμα το οποίο να έχει εκπαιδευτεί στη χρήση των 3D εκτυπωτών.

Το Πολεμικό Ναυτικό των Η.Π.Α. έχει ήδη ξεκινήσει τη χρήση των τρισδιάστατων εκτυπωτών εν πλω, μειώνοντας την ανάγκη χρήσης μεγάλων αποθηκευτικών χώρων για εξαρτήματα αλλά και γενικότερά βοηθώντας στην αυτάρκεια των πλοίων του. Εδώ και αρκετά χρόνια χρησιμοποιούν 3D εκτυπωτές πολυμερών υλικών σε πλοία και υποβρύχια και κατασκευάζουν σχετικά μικρά πλαστικά μέρη. Τα τελευταία χρόνια έχουν εγκατασταθεί δύο διαφορετικά μοντέλα τρισδιάστατων εκτυπωτών μετάλλου σε πλοία του Πολεμικού Ναυτικού, για αλουμίνιο και για ανοξείδωτο χάλυβα, όπως ο τρισδιάστατος εκτυπωτής μετάλλου ElemX της Xerox Elem και το σύστημα προσθετικής κατασκευής της εταιρείας Phillips. Γενικά ενώ πολλοί βιομηχανικοί τρισδιάστατοι εκτυπωτές μετάλλων χρησιμοποιούν υλικό σε σκόνη, το οποίο μπορεί να είναι εύφλεκτο και όχι τόσο ασφαλές, η τεχνολογία Εναπόθεσης Συντηγμένου Υλικού είναι πολύ πιο ασφαλής για χρήση στο πλοίο. Η χρήση του τρισδιάστατου εκτυπωτή για την κατασκευή ανταλλακτικών δεν αντικαθιστά το παραδοσιακό σύστημα ανεφοδιασμού, αλλά παρέχει έναν γρήγορο τρόπο σε περίπτωση ανάγκης για να κατασκευαστεί το κατεστραμμένο εξάρτημα και για να τεθεί άμεσα σε λειτουργία ένα σύστημα [19].

Ένα βασικό πλεονέκτημα της προσθετικής κατασκευής, είναι η ικανότητά της να δημιουργεί σύνθετες γεωμετρίες, η οποία την καθιστά κατάλληλη για την κατασκευή περίπλοκων δομών που μπορεί να είναι αδύνατες με τις παραδοσιακές μεθόδους. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε καινοτόμα 3D σχέδια και στη συνέχεια σε ελαφριά, πολύπλοκα, προσαρμοσμένα και βελτιστοποιημένα εξαρτήματα που μπορούν να βελτιώσουν τη συνολική απόδοση του πλοίου. Αυτά τα εξαρτήματα περιλαμβάνουν στοιχεία μηχανών, όπως βραχίονες, έδρανα, καλύμματα, ακόμη και μικρές προπέλες που μπορούν να προσαρμοστούν για συγκεκριμένους τύπους πλοίων (**Εικόνα 12**), αλλά και ηλεκτρονικά εξαρτήματα για συστήματα πλοήγησης και άλλα συστήματα πλοίων. Με αυτόν τον τρόπο, οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές στα πλοία μπορεί να χρησιμεύσουν ως πολύτιμα εργαλεία εκπαίδευσης για τα μέλη του πληρώματος, παρέχοντας πρακτική εμπειρία σχετικά με την τεχνολογία προσθετικής κατασκευής και ενισχύοντας την καινοτομία και τις δεξιότητες επίλυσης προβλημάτων.

Επιπρόσθετα, η προσθετική κατασκευή επιτρέπει τη βελτιστοποίηση των κατασκευαστικών σχεδίων με στόχο τη μείωση της σπατάλης υλικών, συμβάλλοντας στις προσπάθειες βιωσιμότητας στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Τέλος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία λεπτομερών 3D μοντέλων υπό κλίμακα πλοίων για εκπαιδευτικούς σκοπούς. Αυτά τα 3D μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για δοκιμές σε πειραματικές δεξαμενές, ή ως καλούπια για πολυεστερικά μοντέλα σκαφών [20, 21].

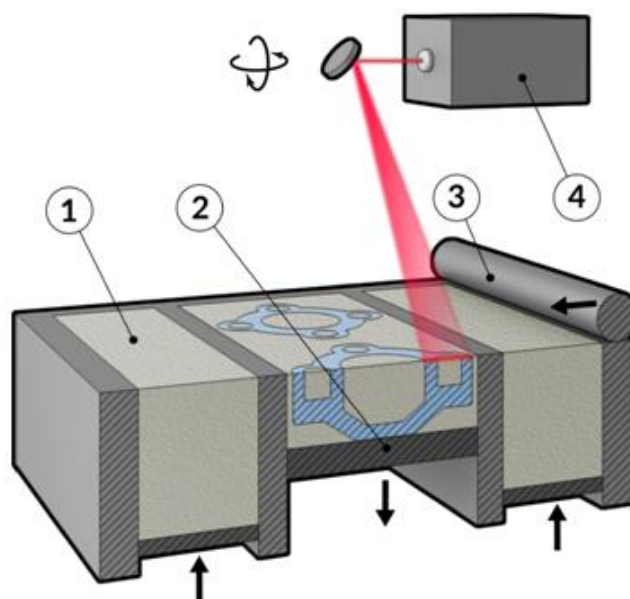


Εικόνα 12: (Αριστερά) Προπέλα πλοίου κατασκευασμένη από μεταλλικό υλικό με τη χρήση τρισδιάστατης εκτύπωσης. (Δεξιά) Τσοκ Panama παραγωγής WAAM με 20% υψηλότερες δυνατότητες φόρτισης και αντοχή διαρροής διπλάσια από αυτή της παραδοσιακής χύτευσης. (Κάτω) Βαλβίδα τρισδιάστατα εκτυπωμένη με μεταλλικό υλικό. [22].

1.3 Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής

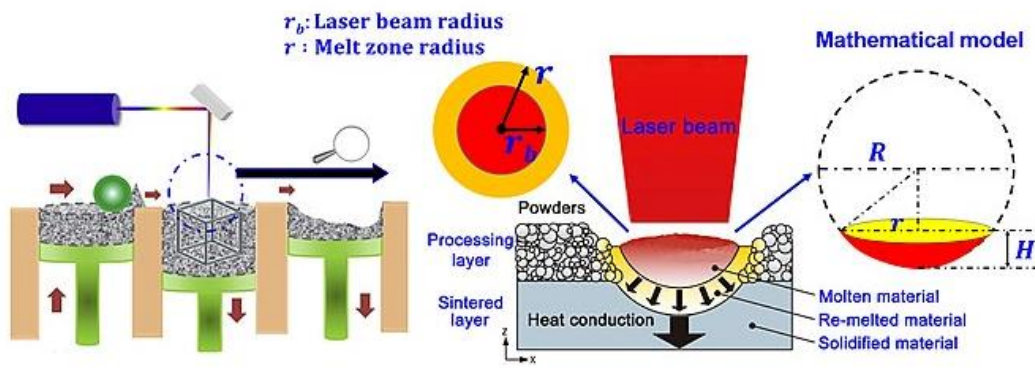
Η προσθετική κατασκευή αντικειμένων μπορεί να πραγματοποιηθεί εφαρμόζοντας διαφορετικές τεχνολογίες, η κάθε μια από τις οποίες χρησιμοποιεί διαφορετικά υλικά και διεργασίες.

Η πρώτη τεχνολογία που εφαρμόζεται ευρέως είναι η πυροσυσσωμάτωση (Sintering) κατά την οποία το υλικό θερμαίνεται χωρίς να υγροποιείται για να δημιουργηθούν πολύπλοκα αντικείμενα υψηλής ανάλυσης. Η άμεση πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ μετάλλων χρησιμοποιεί σκόνη μετάλλου, ενώ η επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (Selective Laser Sintering – SLS) χρησιμοποιεί θερμοπλαστικές σκόνες έτσι ώστε τα σωματίδια να κολλούν μεταξύ τους (**Εικόνα 13**). Η πυροσυσσωμάτωση αποτελεί μια καινοτόμα τεχνολογία προσθετικής κατασκευής, επειδή επιτρέπει τη μετατροπή της σκόνης υλικού σε μια στερεή, συνεκτική δομή. Τα συντηγμένα στρώματα σχηματίζουν έναν ισχυρό δεσμό, δημιουργώντας αντικείμενα με επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες. Το επίπεδο ελέγχου πυροσυσσωμάτωσης είναι απαραίτητο για την επίτευξη της επιθυμητής πυκνότητας, αντοχής και ακρίβειας διαστάσεων στα τελικά κατασκευασμένα εξαρτήματα [23].



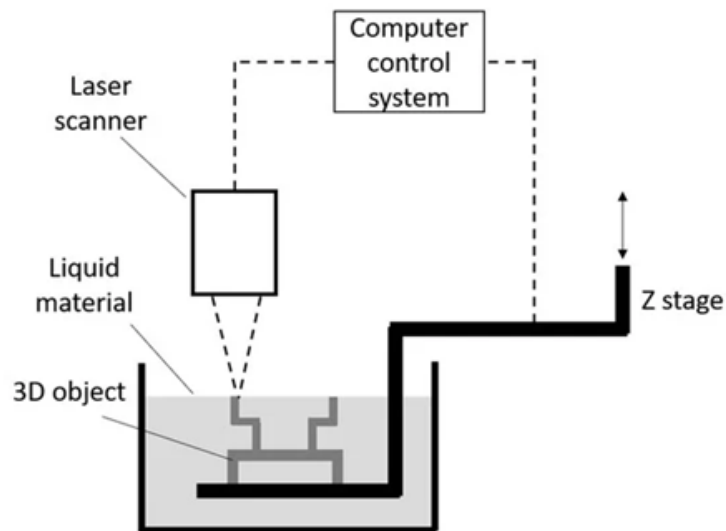
Εικόνα 13: Διάταξη της διαδικασίας πυροσυσσωμάτωσης με λέιζερ για τη δημιουργία πορωδών τρισδιάστατων αντικειμένων (Sintering) [23].

Μια διαφορετική προσέγγιση της πυροσυσσωμάτωσης είναι η διεργασία Melting, κατά την οποία το υλικό τήκεται τελείως. Η τεχνολογία αυτή περιλαμβάνει την άμεση πυροσυσσωμάτωση μετάλλων με λέιζερ η οποία χρησιμοποιεί το λέιζερ για να λιώσει τα στρώματα μεταλλικής σκόνης, και τήξη δέσμης ηλεκτρονίων η οποία χρησιμοποιεί δέσμες ηλεκτρονίων για να λιώσει τη σκόνη (**Εικόνα 14**). Στις διεργασίες προσθετικής κατασκευής με βάση τη τήξη, ο ακριβής έλεγχος της τήξης και της στερεοποίησης του μετάλλου είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη των επιθυμητών ιδιοτήτων του υλικού, της ακρίβειας διαστάσεων και της συνολικής ποιότητας του τελικού προϊόντος. Η δυνατότητα επιλεκτικής τήξης και τήξης μεταλλικών κόνων ή συρμάτων στρώμα προς στρώμα επιτρέπει τη δημιουργία περίπλοκων και πολύπλοκων γεωμετριών που θα ήταν σχεδόν αδύνατη με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής [24].



Εικόνα 14: Διάταξη της τεχνολογίας πυροσυσσωμάτωσης με λέιζερ (Melting) [24].

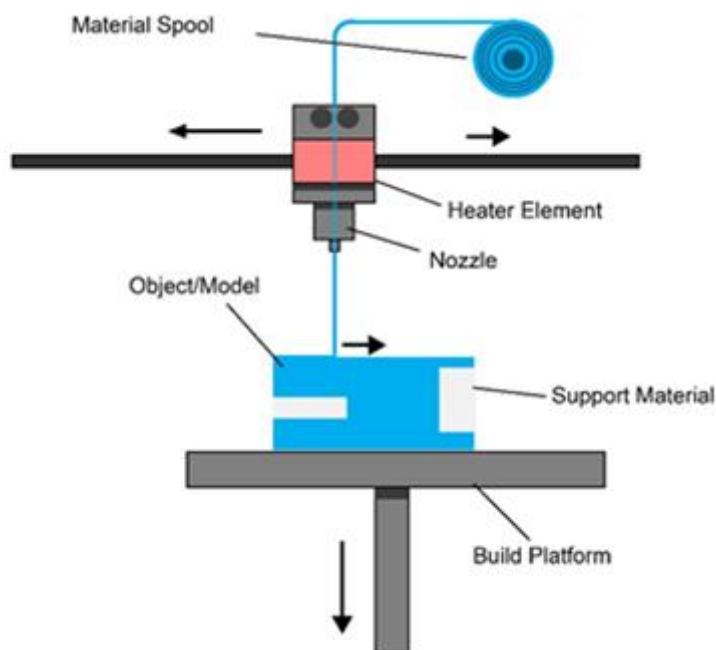
Μια αρκετά δημοφιλής τεχνολογία προσθετικής κατασκευής είναι η στερεολιθογραφία (Stereolithography - SLA), η οποία χρησιμοποιεί μια διαδικασία που ονομάζεται φωτοπολυμερισμός, κατά την οποία ένα υπεριώδες λέιζερ εκτοξεύεται σε μια δεξαμενή φωτοπολυμερούς ρητίνης για να την στερεοποιήσει στρώση ανά στρώση και να δημιουργήσει στερεά αντικείμενα (**Εικόνα 15**). Η στερεολιθογραφία έχει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής και εξακολουθεί να είναι μια πολύτιμη μέθοδος για την παραγωγή πρωτοτύπων και λειτουργικών εξαρτημάτων υψηλής ακρίβειας [25].



Εικόνα 15: Διάταξη της τεχνολογίας της στερεολιθογραφίας (Stereolithography) [25].

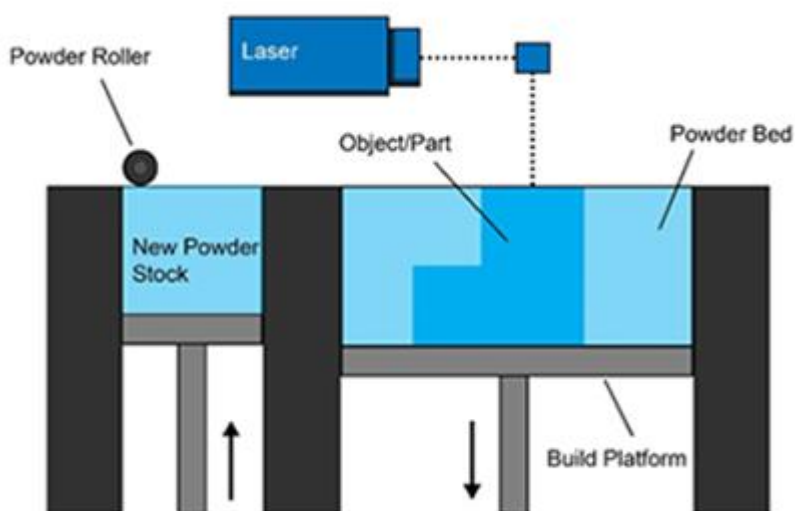
Η εξώθηση υλικού (Material Extrusion) είναι μια τεχνολογία προσθετικής κατασκευής κατά την οποία το θερμοπλαστικό υλικό ωθείται μέσα από ένα θερμαινόμενο ακροφύσιο εξώθησης και εναποτίθεται ανά στρώσεις για την κατασκευή του αντικειμένου. Η κατασκευή συντηγμένου νήματος (Fused Filament Fabrication - FFF), που αναφέρεται επίσης ως εναπόθεση συντηγμένου υλικού (Fused Deposition Modeling – FDM), είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη διεργασία εξώθησης υλικού.

Κατά τη διεργασία αυτή, μια θερμαινόμενη κεφαλή εξώθησης εναποθέτει με ακρίβεια το θερμοπλαστικό υλικό πάνω στη βάση εκτύπωσης σύμφωνα με το ψηφιακό 3D CAD μοντέλο και τις παραμέτρους εκτύπωσης. Η πλατφόρμα κατασκευής στη συνέχεια χαμηλώνει όσο είναι το πάχος της στρώσης και εφαρμόζεται το επόμενο στρώμα υλικού. Τα στρώματα του υλικού στερεοποιούνται και συγχωνεύονται καθώς κρύνουν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, δημιουργώντας το αντικείμενο. Το εκτυπωμένο αντικείμενο αφαιρείται από την βάση εκτύπωσης και τα υλικά στήριξης αφαιρούνται. Στην περίπτωση που τα εκτυπωμένα αντικείμενα έχουν ορατές γραμμές στρώσης, περνάνε από ειδική επεξεργασία για να δημιουργηθεί λεία επιφάνεια. Πολυμερή υλικά όπως το ABS, PC, PA, PLA αλλά και σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα ή γυαλιού, χρησιμοποιούνται στη τεχνική FFF. (Εικόνα 16). Η τεχνολογία FFF χρησιμοποιείται συνήθως για την παραγωγή λειτουργικών και ανθεκτικών πρωτοτύπων και ανταλλακτικών σε βιομηχανίες, συμπεριλαμβανομένης της αεροδιαστημικής, της αυτοκινητοβιομηχανίας και της ιατρικής [26].



Εικόνα 16: Διάταξη της τεχνολογίας εξώθησης υλικού (Material Extrusion) [26].

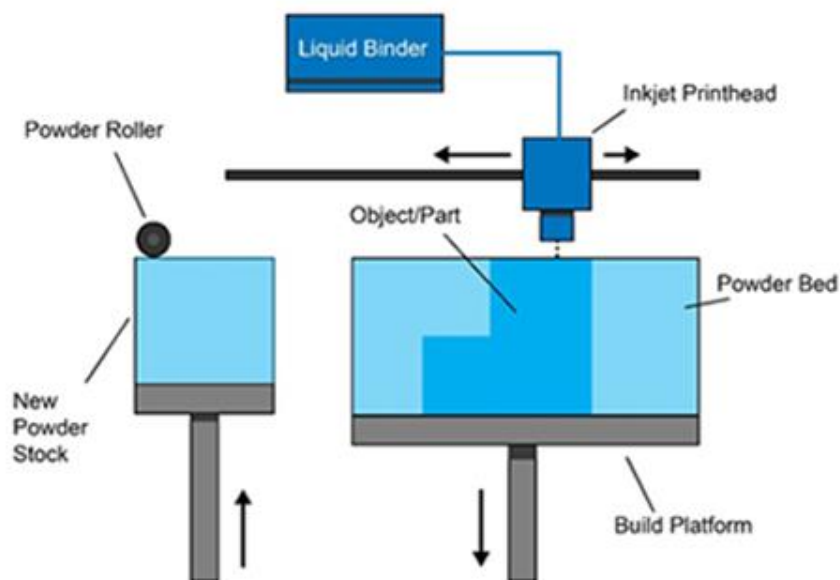
Η διαστρωμάτωση (Sheet Lamination), που ονομάζεται επίσης κατασκευή πολύστρωτου αντικειμένου (LOM), είναι μια ταχεία διαδικασία δημιουργίας πρωτοτύπων κατά την οποία φύλλα υλικού ενώνονται μεταξύ τους για να δημιουργήσουν το αντικείμενο. Χρησιμοποιείται συνήθως για την κατασκευή ανθεκτικών τρισδιάστατων αντικειμένων με πολύπλοκες γεωμετρίες. Σε αυτή τη διαδικασία, ένα ρολό δομικού υλικού, συνήθως χαρτί, τοποθετείται στην πλατφόρμα κατασκευής. Εφαρμόζεται μια κόλλα συγκόλλησης στο υλικό και ένας θερμαινόμενος κύλινδρος κινείται πάνω από την επιφάνεια του υλικού, δεσμεύοντας έτσι το υλικό. Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται μια ακτίνα λέιζερ ή ένα κοπτικό εργαλείο, όπως μαχαίρι, καθοδηγούμενη από υπολογιστή για την κοπή του φύλλου σύμφωνα με τα δεδομένα του τρισδιάστατου CAD μοντέλου, αφαιρώντας την περίσσεια υλικού. Το επόμενο στρώμα του υλικού τοποθετείται στη βάση εκτύπωσης και αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί το αντικείμενο (**Εικόνα 17**) [27].



Εικόνα 17: Διάταξη της διεργασίας πλαστικοποίησης φύλλων (Sheet Lamination) [27].

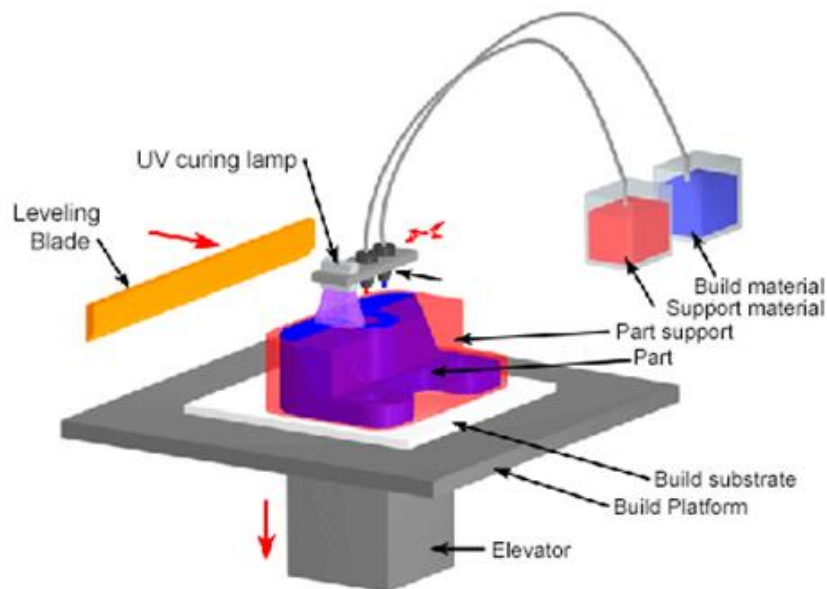
Η διαδικασία εκτόξευσης συνδετικού υλικού (Binder Jetting) ή αλλιώς Inkjet χρησιμοποιεί υλικά σε σκόνη όπως μέταλλα, σύνθετα υλικά, άμμο και κεραμικά που απλώνονται στην πλατφόρμα κατασκευής για να δημιουργήσουν μια λεπτή στρώση σκόνης με μια τεχνολογία παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιείται στην επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (SLS). Αντίθετα από τη SLS που χρησιμοποιεί λέιζερ για τη συγκόλληση των διαδοχικών στρωμάτων σκόνης, η εκτόξευση συνδετικού υλικού χρησιμοποιεί μια βιομηχανική κεφαλή εκτύπωσης που επιλεκτικά εναποθέτει έναν υγρό συνδετικό παράγοντα πάνω στη σκόνη. Με αυτόν τον τρόπο, οι στρώσεις του υλικού που δημιουργούνται με βάση ένα αρχείο CAD, συνενώνονται μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό πάχος στρώσης και να ολοκληρωθεί το τελικό αντικείμενο 3D. Μετά την εκτύπωση, τα αντικείμενα πρέπει να σκληρυνθούν εάν είναι κατασκευασμένα από πλαστικό ή να πυροσυσσωματωθούν εάν είναι κατασκευασμένα από μέταλλο για αύξηση της αντοχής τους (**Εικόνα 18**).

Η εκτόξευση συνδετικού υλικού είναι μια αποδοτική οικονομικά και χαμηλής ενέργειας διεργασία για την κατασκευή αντικειμένων από σκόνη υλικού. Η κατανάλωση λιγότερης ενέργειας εξ αιτίας της μη χρήσης λέιζερ στη διαδικασία στερεοποίησης, η χρήση οικονομικά προσιτών υλικών, και οι γρήγοροι χρόνοι παραγωγής έχουν ως αποτέλεσμα το χαμηλό λειτουργικό κόστος ανά παραγόμενο τεμάχιο, καθιστώντας την τεχνολογία αυτή ιδανική για μαζική παραγωγή μικρών σε μέγεθος αντικειμένων με καλή ακρίβεια κατασκευής [29].



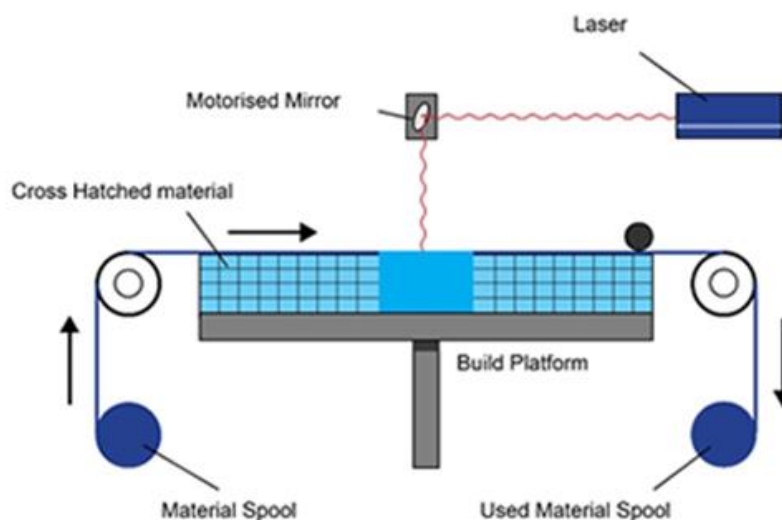
Εικόνα 18: Διάταξη της τεχνολογίας εκτόξευσης συνδετικού υλικού (Binder Jetting) [29].

Η εκτόξευση υλικού (Material Jetting) είναι μια τεχνολογία προσθετικής κατασκευής στην οποία σταγονίδια θερμοπλαστικού υλικού εναποτίθενται επιλεκτικά χρησιμοποιώντας την τεχνολογία drop on demand (DOD), παρόμοια με τον τρόπο που ένας εκτυπωτής inkjet διανέμει μεμονωμένες σταγόνες μελανιού μόνο όπου χρειάζεται. Κατά τη διαδικασία εκτόξευσης υλικού αρχικά η κεφαλή εκτύπωσης εναποθέτει ένα στρώμα υγρής φωτοπολυμερούς ρητίνης στην επιφάνεια εκτύπωσης. Μια πηγή υπεριώδους ακτινοβολίας (UV) κινείται πάνω από το εναποτιθέμενο στρώμα, πολυμερίζοντας το υλικό και δημιουργώντας ένα στέρεο στρώμα. Στη συνέχεια, η πλατφόρμα κατασκευής μετακινείται προς τα κάτω κατά το πάχος ενός στρώματος και ένα άλλο στρώμα υλικού προστίθεται πάνω από το προηγούμενο στρώμα. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί ολόκληρο το τρισδιάστατο αντικείμενο (**Εικόνα 19**) [30].



Εικόνα 19: Διάταξη της τεχνολογίας εκτόξευσης υλικού (Material Jetting) [30].

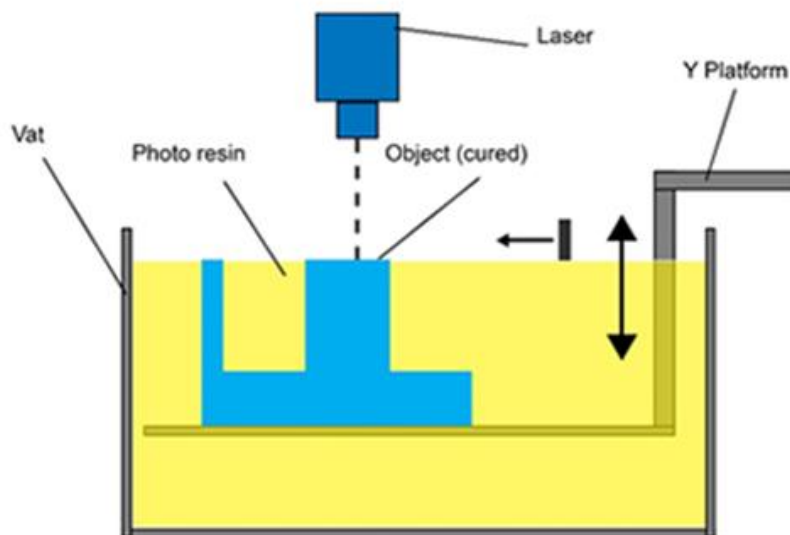
Η κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας (Directed Energy Deposition - DED) είναι μια τεχνολογία προσθετικής κατασκευής που χρησιμοποιεί μια πηγή θερμότητας, όπως μια δέσμη λέιζερ ή δέσμη ηλεκτρονίων, για να λιώσει σκόνη ή σύρμα μετάλλου. Η DED χρησιμοποιείται συνήθως για την επισκευή ή την προσθήκη πρόσθετων γεωμετρικών λεπτομερειών σε υπάρχοντα εξαρτήματα. Στην κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας, η μεταλλική σκόνη ή το μεταλλικό σύρμα τροφοδοτείται μέσω ενός ακροφυσίου και μια πηγή ενέργειας χρησιμοποιείται για την τήξη της μεταλλικής πρώτης ύλης εστιασμένη στην καθορισμένη επιφάνεια και για τη δημιουργία της σκληρυσμένης συμπαγούς δομής (Εικόνα 20) [31, 33].



Εικόνα 20: Διάταξη της τεχνολογίας κατευθυνόμενης εναπόθεση ενέργειας (Directed Energy Deposition) [31].

Η σύντηξη σκόνης σε κλίνη (Powder Bed Fusion - PBF) αποτελεί μια τεχνολογία προσθετικής κατασκευής που χρησιμοποιεί μια πηγή θερμότητας, όπως μια δέσμη ηλεκτρονίων ή δέσμη λέιζερ, για να λιώσει και να ενώσει τη σκόνη υλικού για να δημιουργήσει τρισδιάστατα αντικείμενα. Αυτή η τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία πλαστικών και μεταλλικών εξαρτημάτων. Υπάρχουν τέσσερις τύποι διεργασιών PBF ανάλογα με την πηγή θερμότητας που χρησιμοποιείται. Η άμεση πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ μετάλλων (Direct Metal Laser Sintering - DMLS), η επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (SLS) και η επιλεκτική τήξη με λέιζερ (Selective Laser Melting - SLM) εφαρμόζουν σύντηξη του υλικού με τη χρήση λέιζερ. Η τήξη δέσμης ηλεκτρονίων (Electron Beam Melting - EBM) εφαρμόζει σύντηξη με τη χρήση δέσμης ηλεκτρονίων, και η επιλεκτική θερμοσυσσωμάτωση (Selective Heat Sintering - SHS) εφαρμόζει σύντηξη με τη χρήση θερμαινόμενης κεφαλής εκτύπωσης.

Στην PBF ένα λεπτό στρώμα κονιοποιημένου υλικού απλώνεται πάνω στην πλατφόρμα κατασκευής. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται μια πηγή θερμότητας για να σαρώσει επιλεκτικά και να συγχωνεύσει τη σκόνη σε μια πρώτη επιφάνεια διατομής χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του 3D CAD μοντέλου. Η πλατφόρμα κατασκευής στη συνέχεια χαμηλώνει κατά το πάχος μιας στρώσης και ένα νέο στρώμα σκόνης απλώνεται. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να δημιουργηθεί ολόκληρο το αντικείμενο. Στην τεχνολογία PDF δεν απαιτούνται δομές υποστήριξης ενώ το εκτυπωμένο αντικείμενο αφαιρείται από την πλατφόρμα κατασκευής και καθαρίζεται για να υποβληθεί σε μετ' επεξεργασία (**Εικόνα 21**) [32].

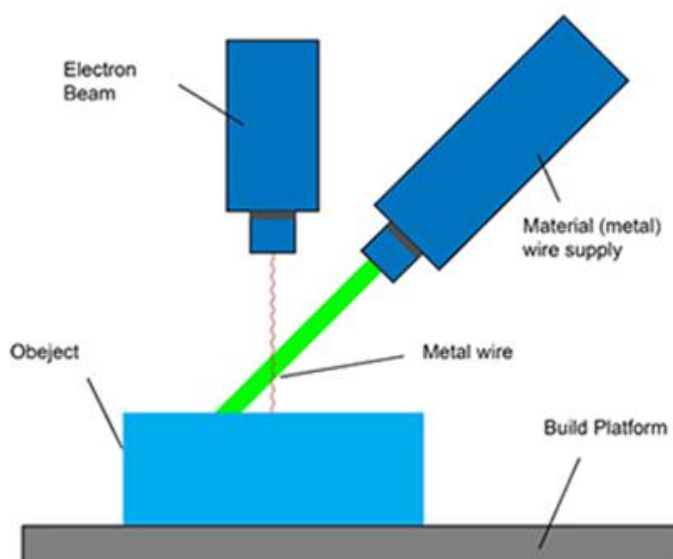


Εικόνα 21: Διάταξη της τεχνολογίας σύντηξης σκόνης σε κλίνη (Powder Bed Fusion) [32].

Ο πολυμερισμός σε δοχείο (Vat Polymerization) είναι μια τεχνολογία προσθετικής κατασκευής η οποία χρησιμοποιεί ένα δοχείο με φωτοευαίσθητη υγρή ρητίνη και μια πηγή φωτός για τη δημιουργία στερεών αντικειμένων. Περιλαμβάνει μια σειρά από διεργασίες τρισδιάστατης

εκτύπωσης, συμπεριλαμβανομένης της στερεολιθογραφίας (SLA), της ψηφιακής επεξεργασίας φωτός (Digital Light Processing - DLP) και της εκτύπωσης συνεχούς υγρής διεπαφής (Continuous Liquid Interface Production - CLIP).

Στην συγκεκριμένη τεχνολογία, μια πηγή υπεριώδους φωτός σκληραίνει επιλεκτικά την υγρή ρητίνη σύμφωνα με την επιφάνεια που ορίζεται στο 3D CAD μοντέλο. Κατά την επαφή με την πηγή φωτός, το φωτοπολυμερές υλικό υφίσταται χημική αντίδραση και στερεοποιείται. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή ως φωτοπολυμερισμός. Στη συνέχεια, η πλατφόρμα κατασκευής χαμηλώνει όσο είναι το πάχος της καθορισμένης στρώσης και περισσότερη ρητίνη ρέει στο πάνω μέρος της πλατφόρμας. Μια λεπίδα σάρωσης κινείται πάνω από το προηγούμενο στρώμα για να διασφαλίσει ότι μια λεπτή στρώση υγρής ρητίνης απλώνεται ομοιόμορφα στην επιφάνεια (**Εικόνα 22**). Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται στρώμα-στρώμα μέχρι να ολοκληρωθεί το πρωτότυπο. Στη συνέχεια, το αντικείμενο αφαιρείται από την πλατφόρμα κατασκευής, αφαιρούνται τα υποστηρικτικά και σκληραίνεται σε φούρνο UV για την αύξηση της αντοχής του [33, 34].



Εικόνα 22: Διάταξη της τεχνολογίας πολυμερισμού σε δοχείο (Vat Polymerization) [35].

1.4 Υλικά Προσθετικής Κατασκευής

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην προσθετική κατασκευή διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο για την ποιότητα και την απόδοση των τελικών εκτυπωμένων προϊόντων. Ένα ευρύ φάσμα πρώτων υλών χρησιμοποιείται επί του παρόντος για διαφορετικές διεργασίες και σημαντική έρευνα βρίσκεται σε εξέλιξη προς την ανάπτυξη νεότερων και καινοτόμων υλικών που προορίζονται για συγκεκριμένες εφαρμογές. Τα πολυμερή υλικά, τα ελάσματα χαρτιού και τα κεριά είναι μεταξύ των αρχικών πρώτων υλών που χρησιμοποιήθηκαν στα πρώιμα στάδια της προσθετικής κατασκευής. Τα πλαστικά είναι μια άλλη σημαντική ομάδα υλικών, τα οποία εξακολουθούν να αποτελούν τη βασική πρώτη ύλη για την προσθετική κατασκευή. Με την

πάροδο του χρόνου και τις εξελίξεις στην τεχνολογία, μια ποικιλία άλλων υλικών όπως μέταλλα, σύνθετα υλικά, κεραμικά και άλλα έχουν βρει χρήση για διάφορες εφαρμογές [36].

Γενικά, στην προσθετική κατασκευή, οι επιθυμητές ιδιότητες του τελικού αντικειμένου θα πρέπει καθορίζονται παράλληλα με τη γεωμετρία του. Η πρώτη ύλη έχει αντίκτυπο στην εκτύπωση, για παράδειγμα η χημική σύνθεση του πολυμερούς υλικού, και το μέγεθος και η κατανομή των σωματιδίων της μεταλλικής σκόνης, αλλά και οι παράμετροι της διαδικασίας εκτύπωσης (printing parameters), διαδραματίζουν επίσης ρόλο σε ιδιότητες όπως η αντοχή, η ολκιμότητα, το πορώδες και η ποιότητα επιφάνειας του τελικού αντικειμένου. Η φυσική κατάσταση της πρώτης ύλης είναι ένας καθοριστικός παράγοντας για την καταλληλότητά τους για χρήση στις διαδικασίες προσθετικής κατασκευής. Η συμβατότητα οποιασδήποτε μορφής πρώτης ύλης που μπορεί να είναι υγρή ή σε σκόνη ή σύρμα ή φύλλο για οποιαδήποτε διαδικασία προσθετικής κατασκευής πρέπει να είναι σαφώς κατανοητή για να υπάρχει επιτυχία στην εκτύπωση. Μια ομάδα διεργασιών προσθετικής κατασκευής, όπως η στερεολιθογραφία, βασίζεται στη σκλήρυνση υγρών ρητινών. Μια άλλη ομάδα όπως η κατασκευή πλαστικοποιημένων αντικειμένων κατασκευάζει εξαρτήματα ενώνοντας λεπτά ελάσματα χαρτιού. Άλλες τεχνολογίες χρησιμοποιούν υλικά σε σκόνη, όπως η επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ ή βασίζονται στην τήξη ενσύρματων υλικών όπως η εναπόθεση συντηγμένου υλικού. Γενικά, το υλικό σε υγρή μορφή έχει ως αποτέλεσμα καλύτερη εναπόθεση που σημαίνει ότι τα πολυμερή και τα παράγωγά τους προσφέρουν ευκολίες όπως χαμηλότερες θερμοκρασίες επεξεργασίας ή τήξης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκτύπωσης.

Τα μέταλλα καθώς και τα κεραμικά έχουν υψηλό σημείο τήξης σε σύγκριση με τα πολυμερή υλικά. Η ευκολία επεξεργασίας είναι συνήθως μεγαλύτερη για τα πολυμερή και ακολουθούν τα μέταλλα και τα κεραμικά. Στην περίπτωση μετάλλων και κεραμικών, η συγκόλληση είναι αρκετά δύσκολη σε σύγκριση με τα πολυμερή λόγω των υψηλότερων σημείων τήξης. Πρέπει να γίνει κατανοητό ότι κάθε διαδικασία προσθετικής κατασκευής προσφέρει μοναδικά πλεονεκτήματα καθώς και περιορισμούς και έχει συμβατότητα με διαφορετικές φυσικές μορφές πρώτων υλών [36, 37].

Πολυμερή Υλικά

Τα πολυμερή αποτελούν τα πιο συνηθισμένα χρησιμοποιούμενα υλικά της προσθετικής κατασκευής. Η ευρεία χρήση τους μπορεί να αποδοθεί στις μικρότερες θερμοκρασίες τήξης ή σκλήρυνσης από τα μέταλλα και τα κεραμικά, τη χημική σταθερότητα καθώς και την ομαλή ρευστοποίηση και στερεοποίησή τους. Τα πολυμερή υλικά μπορεί να είναι σε οποιαδήποτε φυσική κατάσταση, σε υγρή μορφή, σε σκόνη, σε φύλλα ή και σύρμα. Οι βασικές τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής που χρησιμοποιούν πολυμερή υλικά συνήθως περιλαμβάνουν φωτοπολυμερισμό σε κάδο (υγρή μορφή), εξώθηση υλικού (μορφή σε σύρμα), πυροσυσσωμάτωση (μορφή σε σκόνη) και εκτόξευση υλικού (υγρή μορφή). Τα

θερμοπλαστικά πολυμερή καθώς και τα πολυμερή που σκληρύνονται με υπεριώδη ακτινοβολία αποτελούν τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά αυτής της κατηγορίας [36].

Το πολυαμίδιο ή νάιλον (PA), το πολυγαλακτικό οξύ (PLA), το συμπολυμερές ακρυλονιτριλίου-βουταδιενίου-στυρενίου (ABS) και οι πολυκαρβονικοί εστέρες (PC) είναι συνήθη θερμοπλαστικά πολυμερή συμβατά με την προσθετική κατασκευή. Όλα εμφανίζουν χαρακτηριστική σκληρότητα σε θερμοκρασία δωματίου. Η τεχνολογία εξώθησης υλικού βασίζεται στην αρχή τήξης με θέρμανση και την επακόλουθη στερεοποίηση κατά την εναπόθεση. Η τεχνολογία PBF χρησιμοποιεί πολυμερή σκληρυνόμενα με υπεριώδη ακτινοβολία όπου το υλικό πολυμερίζεται επιλεκτικά με τη βοήθεια μιας πηγής φωτός. Εκτός από τα θερμοπλαστικά πολυμερή υλικά που σκληρύνονται με υπεριώδη ακτινοβολία, η προσθετική κατασκευή ελαστομερών ή μαλακών πολυμερών, ιδίως θερμοσκληρυνμένων, μπορεί επίσης να πραγματοποιηθεί. Ωστόσο, θεωρείται μια δύσκολη διαδικασία και γενικά απαιτεί τη χρήση συμπολυμερών υλικών, π.χ., συνδυασμό ελαστομερών με θερμοπλαστικά, καθώς αυτά υφίστανται ερπυσμό και ως εκ τούτου διευκολύνουν την επεξεργασία [36, 37].

Μεταλλικά Υλικά

Η προσθετική κατασκευή προσφέρει ευελιξία για την κατασκευή απλών αλλά και περίπλοκων μεταλλικών αντικειμένων σχεδόν κάθε πολυπλοκότητας. Έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής μεταλλικών προϊόντων. Τα τελευταία είκοσι πέντε χρόνια σημειώθηκε τεράστια ανάπτυξη στην προσθετική κατασκευή μετάλλων σε σύγκριση με την περιορισμένη έρευνα που πραγματοποιήθηκε στον τομέα αυτό κατά τα πρώιμα χρόνια της εμφάνισης της προσθετικής κατασκευής. Στις μέρες μας, οι τεχνικές προσθετικής κατασκευής μετάλλων αποτελούν το επίκεντρο του ενδιαφέροντος τόσο για τους ερευνητές όσο και για τη βιομηχανία. Τα μεταλλικά εξαρτήματα που κατασκευάζονται μέσω της προσθετικής κατασκευής καλύπτουν όλο και περισσότερο τη ζήτηση κρίσιμων λειτουργικών εξαρτημάτων σε διάφορες βιομηχανίες, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η άμυνα, η αεροδιαστημική, η κατασκευαστική, η ηλεκτρονική βιομηχανία και η ναυτιλιακή βιομηχανία.

Η PBF και η DED είναι δύο κύριες εμπορικές τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής μετάλλων. Αυτές οι τεχνολογίες γενικά χρησιμοποιούν ως πρώτη ύλη τη μεταλλική σκόνη αλλά και σύρματα μετάλλου. Άλλες νεότερες τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής με βάση την τριβή, ψυχρού ψεκασμού, εκτόξευση συνδετικού υλικού, με βάση τη συγκόλληση, και υβριδικές τεχνικές κατασκευής, κερδίζουν τεράστια δημοτικότητα μεταξύ των ερευνητών ενώ η βιομηχανική χρήση τους αυξάνεται επίσης με τον καιρό. Μεταλλικά υλικά όπως το τιτάνιο, ο χάλυβας και τα κράματά του, ορισμένες ποιότητες ελαφρών κραμάτων μετάλλων όπως αλουμίνιο και μαγνήσιο (Al και Mg), και κράματα με βάση το νικέλιο (Ni), είναι εξαιρετικά συμβατά με τις τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής [37, 40].

Κεραμικά Υλικά

Οι πρώτες ύλες όπως τα κεραμικά έχουν περιορισμένη χρησιμότητα στην προσθετική κατασκευή λόγω του γεγονότος ότι τα διακριτά σωματίδια τους δεν είναι σε θέση να συγχωνευτούν εντελώς μεταξύ τους θερμαίνοντάς τα μέχρι τα σημεία τήξης τους, καθώς έχουν σημαντικά υψηλότερα σημεία τήξης σε σύγκριση με τα πολυμερή και τα μέταλλα. Από την άλλη πλευρά, τα πολυμερή και τα μέταλλα συγχωνεύονται επαρκώς στα σημεία τήξης τους.

Οι διεργασίες προσθετικής κατασκευής με βάση τη σύντηξη πούδρας σε κλίνη (Powder Bed Fusion – PBF) είναι ιδιαίτερα κατάλληλες και οικονομικές μέθοδοι για την ανάπτυξη κεραμικών αντικείμενων, αλλά ο περιορισμός στη διαθεσιμότητα των αρχικών πρώτων υλών για την απόκτηση των κεραμικών εξακολουθεί να αποτελεί πρόκληση στην προσθετική κατασκευή κεραμικών. Κεραμικά υλικά όπως το φωσφορικό ασβέστιο, το καρβίδιο του πυριτίου και το πυρίτιο, συνήθως επεξεργάζονται με την τεχνολογία PBF. Τα κεραμικά υλικά έχουν πολλές εφαρμογές σε διάφορους τομείς όπως η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία, η ανάπτυξη εξαρτημάτων κινητήρα και πρόωσης, ηλεκτρονικά εξαρτήματα, και μικροσίπ.

Μία από τις πιο υποσχόμενες εφαρμογές της προσθετικής κατασκευής κεραμικών είναι στη μηχανική ιστών και στα βιοϋλικά. Η πυροσυσσωμάτωση και η μετα-επεξεργασία των κεραμικών αντικειμένων απαιτεί επιπλέον χρόνο και καθιστά τη διαδικασία αρκετά δαπανηρή. Ωστόσο, αυτό δεν μειώνει την ελκυστικότητα αυτών των διαδικασιών προσθετικής κατασκευής για την κατασκευή εξαρτημάτων περίπλοκου σχήματος από κεραμικά. Ένα πολύ ιδιαίτερο παράδειγμα είναι η κατασκευή γεφυρών από κεραμικά για οστά και δόντια, χαρακτηρίζεται ως μία σχετικά γρήγορη διαδικασία σε σύγκριση με τις παραδοσιακές διαδικασίες όπως η χύτευση ή η πυροσυσσωμάτωση [8].









Εκτός από την PBF, τα κεραμικά υλικά χρησιμοποιούνται επίσης σε τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής όπως η στερεολιθογραφία, η εξώθηση υλικού, και η επιλεκτική συσσωμάτωση με λέιζερ (SLS). Αναφορικά με τη τελευταία, σε πολλές περιπτώσεις τα εκτυπωμένα αντικείμενα από κεραμικά υλικά μπορεί να εμφανίσουν ράγισμα, το οποίο μπορεί να αποδοθεί σε κραδασμούς λόγω θέρμανσης και ψύξης κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης. Η μέτρια ποιότητα επιφάνειας και η εμφάνιση των στρώσεων στα τυπωμένα αντικείμενα προσθετικής κατασκευής είναι μια άλλη ανησυχία. Σε εφαρμογές όπως η βιοϊατρική ή η μηχανική ιστών, αυτό μπορεί να μην είναι πολύ κρίσιμο. Ωστόσο, η καλή ποιότητα επιφάνειας είναι σημαντική σε εφαρμογές όπως η αεροδιαστημική, η κατασκευαστική, όπου οι επίπεδες εξωτερικές επιφάνειες απαιτείται να είναι στιβαρές, διαφορετικά μπορεί να ξεκινήσει η συσσωρευση τάσεων στα σημεία των ρωγμών [37, 40].

Σύνθετα Υλικά

Τα σύνθετα υλικά είναι μια ιδιαίτερη κατηγορία υλικών προσθετικής κατασκευής και είναι νεότερα από τα πολυμερή ή τα μέταλλα. Τα σύνθετα υλικά μπορούν να θεωρηθούν ως ένας συνδυασμός περισσότερων από δύο συστατικών με τελικές ιδιότητες διαφορετικές από τις μεμονωμένες ιδιότητες των συστατικών. Μερικές τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής έχουν την ικανότητα κατασκευής εξαρτημάτων από σύνθετα υλικά που έχουν ουσιαστικά βελτιωμένες ιδιότητες σε σύγκριση με τα συστατικά της βάσης τους. Κάθε τεχνολογία είναι συμβατή με διαφορετικού τύπου σύνθετο υλικό, ανάλογα με τη μήτρα (matrix) η οποία μπορεί να είναι από μέταλλο, πολυμερές ή κεραμικά. Μερικά ζητήματα στην 3D εκτύπωση σύνθετων υλικών, ιδιαίτερα των σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας, είναι η παγίδευση αερίου, η ανάπτυξη τάσεων, καθώς και τα κενά μεταξύ της μήτρας και των ενισχυτικών σωματιδίων [8].

Πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα και ίνες γυαλιού χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές, όπως καλούπια έγχυσης βραχείας διάρκειας, σύνθετα εργαλεία, κλπ., προσφέροντας μια επιλογή για αντικείμενα με καλή αντοχή ανάμεσα σε πλαστικό και πιο ακριβά μέταλλα. Ορισμένοι τρισδιάστατοι εκτυπωτές έχουν τη δυνατότητα τοποθέτησης διάσπαρτων ή συνεχόμενων ινών ενίσχυσης. Άλλα χρησιμοποιούν ανεξάρτητες στρώσεις υλικού ενίσχυσης συντηγμένου με στρώματα πολυμερούς. Αυτά τα πολυμερή σύνθετα υλικά μπορούν να γίνουν αρκετά ισχυρά ώστε να αποτελέσουν την εναλλακτική επιλογή του μετάλλου σε ορισμένες περιπτώσεις, συχνά με σημαντική μείωση του βάρους. Τα σύνθετα υλικά μεταλλικής βάσης (MMCs) που αναμειγνύουν ένα κράμα μετάλλων με ένα άλλο υλικό όπως το κεραμικό είναι μια άλλη κατηγορία υλικών που αναμένεται να χρησιμοποιηθούν σε νέες εφαρμογές μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης [39, 40].

Στην **Εικόνα 23** παρουσιάζονται οι βασικές κατηγορίες υλικών και η συμβατότητά τους σε διάφορες τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής. Ο πλήρης κύκλος σημαίνει ότι οι εμπορικά διαθέσιμες μηχανές που χρησιμοποιούν τη συγκεκριμένη διεργασία είναι ικανές να επεξεργαστούν το σημειωμένο υλικό. Οι κύκλοι με μαύρη σκίαση αντιπροσωπεύουν άμεσες διεργασίες, δηλαδή η διεργασία εκτύπωσης μπορεί να παράγει το αντικείμενο την επιθυμητή τελική πυκνότητα και διαστάσεις. Οι κύκλοι με μπλε σκίαση είναι έμμεσες διεργασίες, δηλαδή απαιτείται ένα στάδιο συσσωμάτωσης (sintering), όπως η πυροσυσσωμάτωση, για να αποκτήσει το αντικείμενο την τελική πυκνότητα και διαστάσεις. Οι κύκλοι με άσπρη σκίαση σημαίνει ότι η καταλληλόλητα διεργασίας-υλικού έχει αποδειχθεί σε ερευνητικές δημοσιεύσεις, αλλά δεν υπάρχουν ακόμα εμπορικά διαθέσιμες μηχανές.

Process	Acronyms	Feedstock	Thermoplastics	Photopolymers	Metals	Ceramics	Composites	Biomaterials	Multimaterial	Other
 Extrusion	FFF, FDM, BMD	Filament, rod, pellets	●	● ¹	●	○	●	●	●	Food, Concrete
 Photopolymerization	SLA, DLP, CLIP	Liquid		●	● ²	● ³	●	●		
 Selective Laser Sintering	SLS, HSS, MJF	Powder	●			●	●			
 Selective Laser Melting	SLM, DMLS, EBM	Powder			●					
 Binder Jetting	BJ, 3DP	Powder			●	●		●		Sugar, Sand, Plaster, Pharmaceuticals
 Material Jetting	MJ, Polyjet, Multijet	Liquid	●	●	● ⁴	●		●	●	
 Directed Energy Deposition	DED, LENS, EBAM	Wire, powder			●	○			●	
 Sheet Lamination	LOM, UAM	Sheet	● ⁵		●	○	● ⁶		●	Paper

Εικόνα 23: Συμβατότητα υλικών τρισδιάστατης εκτύπωσης με διάφορες τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής [41].

Κεφάλαιο 2 - Σχεδιασμός για Προσθετική Κατασκευή (DfAM)

2.1 Εισαγωγή

Ο Σχεδιασμός για Προσθετική Κατασκευή (Design for Additive Manufacturing - DfAM) είναι μια στρατηγική προσέγγιση που βελτιστοποιεί τη διαδικασία σχεδιασμού για να αξιοποιήσει πλήρως τις δυνατότητες που προσφέρουν οι τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής (AM). Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής, οι οποίες μπορεί να έχουν σχεδιαστικούς περιορισμούς, η AM παρέχει απaráμιλλη ελευθερία στη δημιουργία πολύπλοκων γεωμετριών, στη μείωση της σπατάλης υλικού και στην ταχεία δημιουργία πρωτοτύπων. Η υιοθέτηση του DfAM θεωρείται ότι μπορεί να μεγιστοποιήσει αυτά τα πλεονεκτήματα, επιτρέποντας στους σχεδιαστές να ξεπεράσουν τα όρια του δυνατού.

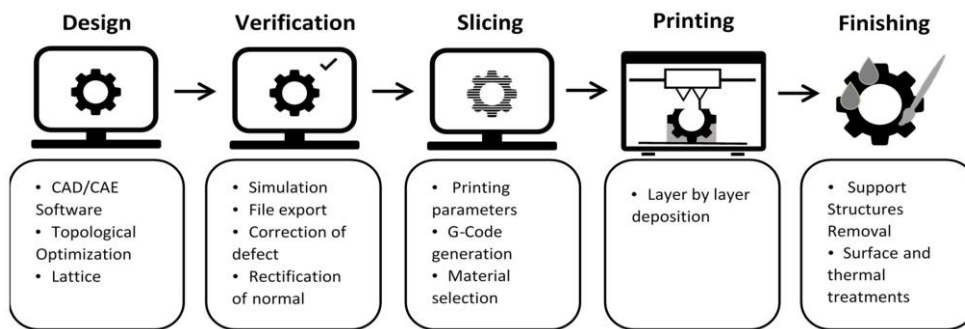
Ο σχεδιασμός για προσθετική κατασκευή DfAM αντιπροσωπεύει μια αλλαγή στον τρόπο με τον οποίο συλλαμβάνονται ως ιδέες και αναπτύσσονται τα προϊόντα. Είναι μια ολιστική προσέγγιση που λαμβάνει υπόψη τις μοναδικές δυνατότητες των τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής από τα αρχικά στάδια σχεδιασμού. Αξιοποιώντας την ελευθερία σχεδιασμού, βελτιστοποιώντας τη χρήση υλικού και χρησιμοποιώντας τα πλεονεκτήματα της AM, ο σχεδιασμός DfAM δίνει τη δυνατότητα στους σχεδιαστές να δημιουργούν προϊόντα που δεν είναι μόνο καινοτόμα και αποτελεσματικά, αλλά και πιο βιώσιμα και προσαρμόσιμα στις απαιτήσεις του χρήστη. Καθώς η προσθετική κατασκευή συνεχίζει να εξελίσσεται, οι αρχές του DfAM διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στο ξεκλείδωμα της πλήρους δυνατότητας αυτής της καινοτόμου μεθοδολογίας [42].

2.2 Γενική Περιγραφή DfAM

Για μεγάλο χρονικό διάστημα στην ιστορία της διαδικασίας ανάπτυξης προϊόντων, οι δύο γενικές έννοιες σχεδιασμός και κατασκευή θεωρούνταν ξεχωριστές. Ως αποτέλεσμα, πιθανές αστοχίες που μπορεί να παρουσιάζονταν μετά την κατασκευή είχαν σαν αποτέλεσμα την επανασχεδίαση του προϊόντος και την εκ νέου κατασκευή του, με αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους αλλά και του χρόνου παραγωγής. Ωστόσο, με την εισαγωγή τεχνολογιών που βασίζονται σε υπολογιστές ο σχεδιασμός και η κατασκευή δεν είναι πλέον ξεχωριστές αλλά αλληλένδετες διαδικασίες στο κύκλο ανάπτυξης προϊόντων. Προκειμένου να διευκολυνθεί και να καταστεί βιώσιμη η παραγωγική διαδικασία, η γνώση και η εμπειρία από διαφορετικές τεχνικές και παραμέτρους προσθετικής κατασκευής θα πρέπει να ενσωματωθούν στη διαδικασία ανάπτυξης προϊόντος και αυτό γίνεται με την προσέγγιση DfAM [43].

Για το μέγιστο όφελος από την υιοθέτηση του DfAM, έχουν αναπτυχθεί γενικές οδηγίες με βάση τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής από προηγούμενες εμπειρίες και πρακτικές. Εκτός από αυτές τις γενικές οδηγίες σχεδιασμού, υπάρχουν επίσης συγκεκριμένες κατευθυντήριες γραμμές που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όταν πρόκειται για τις τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής. Ο ρόλος του DfAM στην ανάπτυξη προϊόντων θεωρείται πλέον πολύ σημαντικός στην επιστημονική και βιομηχανική κοινότητα για αρκετούς λόγους, όπως το γεγονός ότι τα προϊόντα γίνονται πιο πολύπλοκα, ο ανταγωνισμός στην αγορά παρόμοιου προϊόντος είναι πολύ υψηλός, υπάρχουν πολλές διαφορετικές απαιτήσεις χρηστών για ένα προϊόν, ανάγκη για γρήγορη παραγωγή προϊόντων, και προσδοκίες υψηλής ποιότητας τελικών προϊόντων (**Εικόνα 24**).

Για να ικανοποιηθούν οι παραπάνω απαιτήσεις, η έννοια του DfAM θα πρέπει να εφαρμοστεί σε κάθε βιομηχανική κατασκευαστική εταιρεία. Λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς της κατασκευής νωρίς στη διαδικασία ανάπτυξης του προϊόντος για τη μείωση των κατασκευαστικών δυσκολιών βελτιώνεται η απόδοση του τελικού προϊόντος και μειώνεται δραστικά το κόστος, καθώς τα κατασκευαστικά λάθη αποφεύγονται εκ των προτέρων. Ως επίτευγμα του σχεδιασμού DfAM, όταν συγκρίνονται τα συμβατικά προϊόντα με τα προϊόντα που προκύπτουν με προσθετική κατασκευή, τα τελευταία αποτελούνται από λιγότερα εξαρτήματα, νέα υλικά βελτιωμένης απόδοσης, προσαρμοσμένα εξαρτήματα στις απαιτήσεις του χρήστη, συμπαγή τυποποιημένα εξαρτήματα και υποσυστήματα και απλούστερες διαδικασίες συναρμολόγησης. Η επίτευξη των παραπάνω χαρακτηριστικών εξαρτάται άμεσα από τη στενή σχέση μεταξύ της κατασκευής και του σχεδιασμού, ενισχύοντας έτσι τον ρόλο του DfAM στη διαδικασία ανάπτυξης προϊόντων [43, 44].



Εικόνα 24: Ποή εργασιών του DfAM [45].

2.3 Βασικές Αρχές του DfAM

Αν και ο αρχικός της στόχος ήταν η οπτικοποίηση του σχεδιασμού και η ταχεία δημιουργία πρωτοτύπων, η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης εξελίχθηκε σταδιακά σε μια εμπορική μέθοδο κατασκευής με δυνατότητα εκτύπωσης προϊόντων τελικής χρήσης από διάφορα υλικά, συμπεριλαμβανομένων των μεταλλικών. Πρόκειται για μια καινοτομία στον τομέα βιομηχανικής κατασκευής και παρουσιάζει πολλά οφέλη που δεν αποκομίζονται με τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής.

Ένα από τα χαρακτηριστικά της προσθετικής κατασκευής είναι η ικανότητά της να παράγει περίπλοκες και σύνθετες γεωμετρίες που αποτελούν πρόκληση ή είναι αδύνατες με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής. Ο σχεδιασμός για προσθετική κατασκευή (DfAM) ενθαρρύνει τους σχεδιαστές να σκεφτούν πέρα από τα συμβατικά γεωμετρικά σχήματα και να εξερευνήσουν καινοτόμες δομές που βελτιώνουν την απόδοση του τελικού προϊόντος. Αυτό περιλαμβάνει το σχεδιασμό εξαρτημάτων με εσωτερικές δομές πλέγματος για τη βελτιστοποίηση του βάρους, της ακαμψίας και άλλων μηχανικών ιδιοτήτων. Ο σχεδιασμός DfAM ενσωματώνει τη βελτιστοποίηση τοπολογίας, μια υπολογιστική μέθοδο που βελτιστοποιεί την κατανομή υλικού μέσα σε έναν δεδομένο τμήμα του μοντέλου. Βελτιώνοντας επαναληπτικά τη γεωμετρία βάσει των καθορισμένων συνθηκών φόρτισης και των ιδιοτήτων υλικού, οι σχεδιαστές μπορούν να δημιουργήσουν δομές που είναι εξαιρετικά αποδοτικές όσον αφορά τη χρήση και την λειτουργική απόδοση του τελικού προϊόντος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ελαφρών αλλά ισχυρών εξαρτημάτων, που απαιτούνται σε βιομηχανίες όπως η αεροδιαστημική και η αυτοκινητοβιομηχανία [46].

Στην παραδοσιακή κατασκευή, τα πολύπλοκα προϊόντα απαιτούν τη μετέπειτα συναρμολόγηση των επιμέρους τμημάτων, καθώς μπορεί να περιλαμβάνουν πολλά μέρη και αρμούς. Ο σχεδιασμός DfAM ενθαρρύνει την ενοποίηση αυτών των επιμέρους τμημάτων σε ένα αντικείμενο που θα μπορεί να εκτυπωθεί εξ αρχής ως ένα κομμάτι. Αυτό όχι μόνο μειώνει τον χρόνο συναρμολόγησης αλλά και εξαλείφει πιθανές αστοχίες, οδηγώντας σε ισχυρότερα και πιο αξιόπιστα τελικά προϊόντα. Η προσθετική κατασκευή επίσης υποστηρίζει ένα ευρύ φάσμα υλικών, το καθένα με μοναδικές ιδιότητες. Η υιοθέτηση του DfAM περιλαμβάνει την επιλογή του καταλληλότερου υλικού για την προβλεπόμενη εφαρμογή και την προσαρμογή

των ιδιοτήτων του υλικού για την κάλυψη συγκεκριμένων απαιτήσεων. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη χρήση σύνθετων υλικών ή προηγμένων κραμάτων που βελτιώνουν τη συνολική απόδοση του εκτυπωμένου εξαρτήματος. Πολλές διεργασίες AM απαιτούν δομές υποστήριξης για τη στερέωση των χαρακτηριστικών προεξοχής του αντικειμένου κατά την εκτύπωση. Ο σχεδιασμός DfAM περιλαμβάνει επιπλέον τη σχεδίαση εξαρτημάτων με τρόπο που ελαχιστοποιεί την ανάγκη για στήριξη, όπως για παράδειγμα βελτιστοποιώντας τον προσανατολισμό του μοντέλου στην πλατφόρμα κατασκευής. Αυτό, όχι μόνο βελτιώνει την απόδοση της διαδικασίας μειώνοντας το χρόνο αφαίρεσης του υποστηρικτικού υλικού, αλλά επίσης βελτιώνει την ποιότητα επιφάνειας του εκτυπωμένου αντικειμένου. Στόχος του DfAM είναι η κατάλληλη σύνθεση σχημάτων, μεγεθών, και γεωμετρικών οντοτήτων και συνθέσεων υλικών και μικρών δομών τους για την καλύτερη αξιοποίηση των δυνατοτήτων της παραγωγικής διαδικασίας και για την επίτευξη της επιθυμητής απόδοσης και άλλων στόχων του κύκλου ζωής [43, 46].

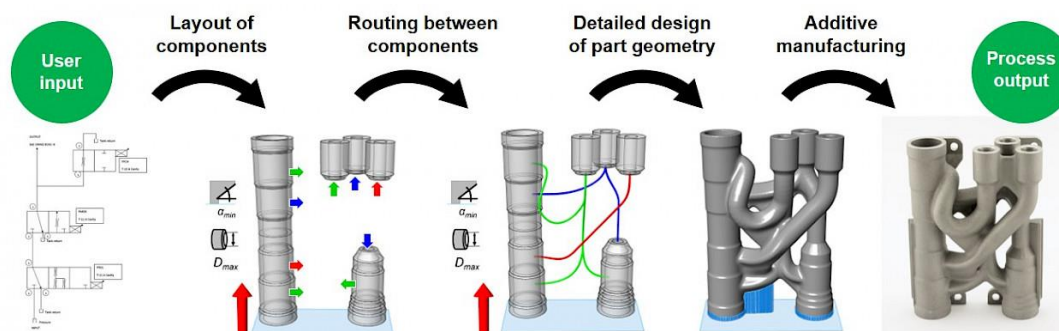
Ο σχεδιασμός για κατασκευή και συναρμολόγηση (Design for Manufacturing and Assembly - DfMA) είναι μια ακόμη μεθοδολογία σχετική με το σχεδιασμό, τη βελτιστοποίηση ενός προϊόντος και την κατασκευή του, με σκοπό τη μείωση του χρόνου και του κόστους ανάπτυξης και την αύξηση της απόδοσης, της ποιότητας και της κερδοφορίας. Αυτό επιτυγχάνεται με την ταυτόχρονη εξέταση των στόχων σχεδιασμού και των περιορισμών κατασκευής, όπως οι ανάγκες χρήστη και αγοράς, τα υλικά, οι διαδικασίες, οι μέθοδοι συναρμολόγησης και αποσυναρμολόγησης και οι απαιτήσεις συντήρησης. Η υιοθέτηση του DfMA περιλαμβάνει τρία επίπεδα. Σε πρώτο επίπεδο, χρησιμοποιούνται συγκεκριμένα εργαλεία, τεχνικές και κατευθυντήριες γραμμές για την προσαρμογή ενός σχεδίου σε ένα δεδομένο σύνολο περιορισμών. Αυτά συνήθως αναφέρονται σε μια συγκεκριμένη διαδικασία για παράδειγμα σε χύτευση με έγχυση, για συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όπως ο τρόπος με τον οποίο το μέγεθος, το βάρος και η συμμετρία του εξαρτήματος επηρεάζουν τον χρόνο συναρμολόγησης ή για συγκεκριμένη δραστηριότητα, όπως ο τρόπος υπολογισμού του θεωρητικού ελάχιστου χρόνου συναρμολόγησης. Στο επόμενο επίπεδο, ο σχεδιασμός DfMA στοχεύει να κατανοήσει και να ποσοτικοποιήσει την επίδραση της διαδικασίας σχεδιασμού στην κατασκευή και το αντίστροφο. Αυτό το επίπεδο απαιτείται για τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης της κατασκευής, που περιλαμβάνει το κόστος, τη λειτουργικότητα, την ικανοποίηση του πελάτη, την ποιότητα του προϊόντος, την ασφάλεια, την αξιοπιστία, το κόστος εξυπηρέτησης και επισκευής και διάφορες μακροπρόθεσμες επιχειρηματικές δυνατότητες όπως η ικανότητα ανταπόκρισης σε απροσδόκητες αυξήσεις της ζήτησης προϊόντων. Στο υψηλότερο επίπεδο, το DfMA διερευνά τη σχέση μεταξύ σχεδιασμού και κατασκευής και τον αντίκτυπο της στον σχεδιαστή, τη διαδικασία σχεδιασμού και την πρακτική σχεδιασμού. Αυτό το επίπεδο περιλαμβάνει θέματα όπως η επιλογή κατάλληλου υλικού και μεθόδου κατασκευής, η παράλληλη μηχανική (concurrent engineering) και ο τρόπος βελτίωσης των συστημάτων CAD για την υποστήριξη του DfMA [9].

Ο σχεδιασμός για κατασκευή και συναρμολόγηση (DfMA) δεν αναφέρεται μόνο στις συμβατικές μεθόδους παραγωγής αλλά ισχύει για όλες τις διεργασίες και αλυσίδες διεργασιών

που περιλαμβάνουν προσθετική κατασκευή. Ωστόσο, στην πράξη και ανάλογα με το εάν θα υιοθετηθεί ο παραδοσιακός DfMA ή η προσέγγιση DfAM, υπάρχει ουσιαστική διαφοροποίηση στο σχεδιασμό, τα εργαλεία, τους κανόνες, και τις διαδικασίες κατασκευής. Για παράδειγμα, η προσθετική κατασκευή μπορεί να δημιουργήσει ποικίλα και σύνθετα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και να επιβάλλει διαφορετικούς τύπους περιορισμών από τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής. Ως εκ τούτου, απαιτεί διαφορετικούς κανόνες και εργαλεία σχεδιασμού. Ταυτόχρονα, η ελευθερία στο σχεδιασμό που παρέχει η DfAM μειώνει την ανάγκη για συναρμολόγηση, το οποίο αποτελεί ένα βασικό στάδιο της DfMA. Οι διεργασίες της προσθετικής κατασκευής έχουν επίσης διαφορετικά μεγέθη παρτίδας (lot size), χρόνους και κόστος παραγωγής και απαιτούν διαφορετικές προσεγγίσεις στη μετρολογία και τον ποιοτικό έλεγχο των τελικών προϊόντων (Εικόνα 25).

Τέλος, αξιοποιώντας τη σχεδιαστική ελευθερία που προσφέρει η AM, ο σχεδιασμός DfAM επιτρέπει τη δημιουργία προϊόντων με καινοτόμες λειτουργίες. Αυτό περιλαμβάνει την ενσωμάτωση γεωμετρικών χαρακτηριστικών που προηγουμένως ήταν ανέφικτο να κατασκευαστούν, οδηγώντας σε προηγμένα προϊόντα. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη δημιουργία δομών με μεταβλητή πυκνότητα, τη βελτίωση της επαγωγής θερμότητας μέσω πολύπλοκων γεωμετριών ή τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων μέσω της βελτιστοποίησης του σχεδιασμού [42, 48].

Η ανάπτυξη της γνώσης, των εργαλείων, των κανόνων, των διαδικασιών και των μεθοδολογιών του DfAM έχει αναφερθεί ως μία από τις βασικές προκλήσεις της AM. Αναφέρεται επίσης ότι η ανεπαρκής κατανόηση και εφαρμογή του DfAM περιορίζει τη συνολική διείσδυση της AM στη βιομηχανία, εμποδίζει τη χρήση της AM για την παραγωγή ανταλλακτικών τελικής χρήσης, εμποδίζει τους σχεδιαστές να επωφεληθούν πλήρως από την AM και γενικώς εμποδίζει την AM να αξιοποιήσει πλήρως τις δυνατότητές της. Όταν αναπτυχθεί πλήρως η στρατηγική DfAM, θα πρέπει να διαδοθεί ευρέως στον τομέα της βιομηχανίας και στη συνέχεια να αξιοποιηθεί σε εφαρμογές προσθετικής κατασκευής [9].



Εικόνα 25: Βήματα διαδικασίας του αυτοματοποιημένου σχεδιασμού για την προσθετική κατασκευή (DfAM) [47].

2.4 Τεχνικές, Μέθοδοι και Εργαλεία DfAM

Γενικά ο σχεδιασμός για προσθετική κατασκευή (DfAM) περιλαμβάνει ένα σύνολο μεθόδων και τεχνικών που επιτρέπουν στους σχεδιαστές να δημιουργούν καινοτόμα, αποτελεσματικά και κατασκευαστικά προϊόντα. Ο σχεδιασμός DfAM δεν αφορά μόνο την προσαρμογή των παραδοσιακών μεθόδων σχεδίασης στην προσθετική κατασκευή, αλλά αποτελεί μια νέα προσέγγιση που λαμβάνει υπόψιν και αξιοποιεί τα μοναδικά χαρακτηριστικά και τις δυνατότητες της προσθετικής κατασκευής ενός αντικειμένου σε στρώσεις. Οι τεχνικές και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στο DfAM αντιπροσωπεύουν μια ολιστική προσέγγιση στην ανάπτυξη προϊόντων. Αξιοποιώντας τον γενετικό σχεδιασμό (generative design), τη βελτιστοποίηση τοπολογίας (topology optimization), τις δομές πλέγματος και τα προηγμένα εργαλεία προσομοίωσης, οι σχεδιαστές μπορούν να εκμεταλλευτούν το πλήρες δυναμικό των τεχνολογιών AM. Οι τεχνικές DfAM όχι μόνο διευκολύνουν τη δημιουργία καινοτόμων και αποτελεσματικών 3D μοντέλων, αλλά συμβάλλουν επίσης στη μείωση της σπατάλης υλικών, στη βελτίωση της βιωσιμότητας και στην επιτάχυνση του κύκλου ανάπτυξης προϊόντων. Καθώς ο τομέας της προσθετικής κατασκευής συνεχίζει να προοδεύει, αυτές οι τεχνικές θα διαδραματίσουν κρίσιμο ρόλο στη διαμόρφωση του μέλλοντος των διαδικασιών σχεδιασμού και κατασκευής [42].

Τεχνικές και Μέθοδοι

Ο γενετικός σχεδιασμός (generative design) είναι μια πολύ σημαντική τεχνική του DfAM, που δίνει έμφαση στην αλγοριθμική εξερεύνηση των δυνατοτήτων σχεδιασμού. Εφαρμόζεται συνήθως μέσω ενός αντίστοιχου εργαλείου σε προγράμματα (λογισμικά) τρισδιάστατου σχεδιασμού, όπου με την εισαγωγή περιορισμών και στόχων σχεδιασμού, οι αλγόριθμοι δημιουργούν ένα πλήθος εναλλακτικών λύσεων σχεδιασμού. Ο γενετικός σχεδιασμός γενικά διερευνά περίπλοκες γεωμετρίες που μπορεί να μην είναι άμεσα εμφανείς στους σχεδιαστές-μελετητές. Αυτή η τεχνική ενθαρρύνει την απόκλιση από τα συμβατικά σχήματα και ενθαρρύνει τη δημιουργία γεωμετρικών δομών που βελτιστοποιούν τη χρήση του υλικού και την απόδοση των αντικειμένων. Ο γενετικός σχεδιασμός είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός σε βιομηχανίες όπου το ελαφρύ βάρος και η μηχανική αντοχή είναι πρωταρχικής σημασίας.

Η βελτιστοποίηση τοπολογίας (topology optimization) είναι μια υπολογιστική μέθοδος που βελτιώνει τη διαδικασία σχεδιασμού, προτείνοντας την κατάλληλη κατανομή υλικού στο αντικείμενο η οποία οδηγεί σε ελαφριά αλλά στιβαρά προϊόντα. Ο στόχος είναι η επίτευξη βέλτιστης μηχανικής απόδοσης με βάση τις συνθήκες φόρτισης και τις ιδιότητες του υλικού. Αυτή η μέθοδος είναι κρίσιμης σημασίας στο σχεδιασμό DfAM, καθώς ευθυγραμμίζεται με την αρχή της προσθετικής κατασκευής που συνίσταται στη χρήση μόνο της απαραίτητης ποσότητας υλικού για την κάλυψη των λειτουργικών απαιτήσεων [49].

Ο σχεδιασμός DfAM συχνά περιλαμβάνει την ενσωμάτωση δομών πλέγματος (lattice structures) ή κυψελωτών σχεδίων (honeycomb patterns) στα υπό σχεδίαση αντικείμενα. Οι

δομές πλέγματος είναι περίπλοκα πλαίσια διασυνδεδεμένων δοκών (interconnected beams) και τα κυτταρικά σχέδια (cellular patterns) που μιμούνται βιολογικές δομές όπως ο οστικός ιστός (**Εικόνα 26**). Τα αντικείμενα που προκύπτουν είναι ελαφριά ενώ προσφέρουν υψηλή αντοχή και ακαμψία, καθιστώντας τα ιδανικά για εφαρμογές στην αεροδιαστημική, την αυτοκινητοβιομηχανία και την ιατρική βιομηχανία. Εξειδικευμένα εργαλεία λογισμικού όπως το nTopology διευκολύνουν το σχεδιασμό και την προσαρμογή των δομών πλέγματος για την επίτευξη βέλτιστης απόδοσης [42, 45].



Εικόνα 26: (Πάνω) Διάφορα σχηματικά πλέγματα με μεθόδους σχεδιασμού DfAM και (Κάτω) τυπωμένα δείγματα δοκιμασμένων μοτίβων πλήρωσης [39].

Τα εργαλεία προσομοίωσης και ανάλυσης (simulation and analysis tools) είναι αναπόσπαστα στοιχεία του DfAM για την πρόβλεψη και τον μετριάσμό πιθανών αστοχιών κατά τη διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης. Λογισμικά όπως το ANSYS, το SolidWorks, το Fusion360, παρέχουν ένα ολοκληρωμένο σύνολο εργαλείων για την προσομοίωση της στατικής και θερμικής συμπεριφοράς, της παραμόρφωσης και της τάσης του εκτυπωμένου αντικειμένου. Αυτές οι προσομοιώσεις επιτρέπουν στους σχεδιαστές να βελτιστοποιήσουν τη γεωμετρία, τον προσανατολισμό και τις δομές υποστήριξης των υπό εκτύπωση αντικειμένων, διασφαλίζοντας μια επιτυχημένη και προβλέψιμη διαδικασία κατασκευής [49].

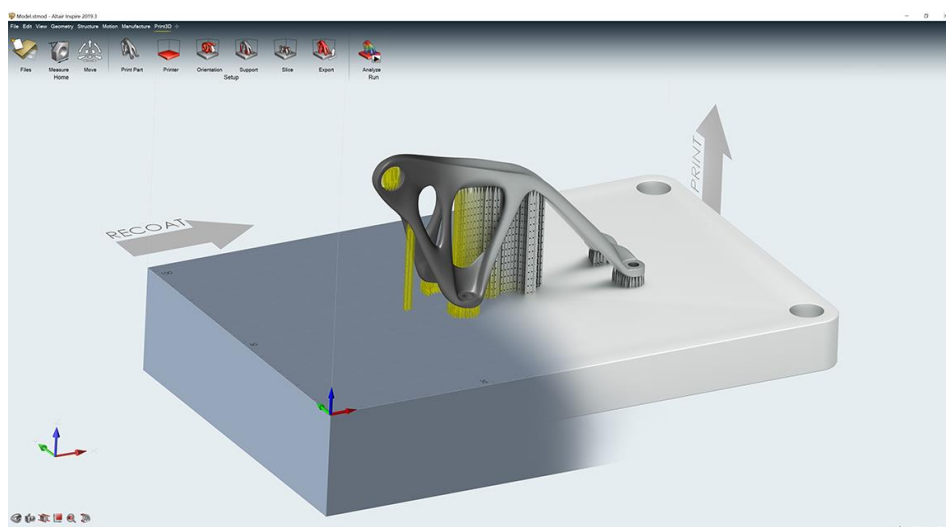
Οι δομές υποστήριξης (supports) είναι συχνά απαραίτητες κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση για να στερεώσουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που προεξέχουν. Ωστόσο, ο σχεδιασμός DfAM ενθαρρύνει τους σχεδιαστές να ελαχιστοποιήσουν την ανάγκη για υποστήριξη, βελτιστοποιώντας τον προσανατολισμό κατασκευής, κάτι που γίνεται αυτόματα σε όλα τα λογισμικά που χρησιμοποιούνται για καθορισμό των παραμέτρων εκτύπωσης. Ο σχεδιασμός εξαρτημάτων που μπορούν να εκτυπωθούν χωρίς στηρίγματα όχι μόνο βελτιώνει την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας εκτύπωσης, και μειώνει το χρόνο μετ' επεξεργασίας, αλλά επίσης βελτιώνει την ποιότητα επιφάνειας του εκτυπωμένου αντικειμένου. Ο καθορισμός του βέλτιστου προσανατολισμού του αντικειμένου στην πλατφόρμα κατασκευής είναι επίσης σημαντικός για το αποτέλεσμα της εκτύπωσης, καθώς επηρεάζει την αντοχή του εξαρτήματος, την ποιότητα της εκτυπωμένης επιφάνειας και την ανάγκη για στηρίγματα [50, 51].

Εργαλεία

Μια βασική πτυχή του DfAM είναι η χρήση εξειδικευμένων εργαλείων λογισμικού που επιτρέπουν στους χρήστες να βελτιστοποιούν τα σχέδια, να μελετούν πολύπλοκες γεωμετρίες και να αξιοποιούν στο έπακρο τις ελευθερίες που παρέχει η AM. Αυτά τα εργαλεία παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη αποτελεσματικών, ελαφριών και καινοτόμων προϊόντων προσθετικής κατασκευής.

Τα λογισμικά γενετικού σχεδιασμού ακολουθούν μια επαναστατική προσέγγιση χρησιμοποιώντας αλγόριθμους για την εξερεύνηση πρωτοποριακών σχεδιαστικών ιδεών με βάση κριτήρια που καθορίζονται από τον χρήστη. Ο σχεδιαστής-μελετητής εισάγει τους στόχους του σχεδιασμού μαζί με παραμέτρους όπως οι απαιτήσεις απόδοσης, τα υλικά, οι μέθοδοι κατασκευής και οι περιορισμοί κόστους. Το λογισμικό διερευνά όλες τις πιθανές παραλλαγές, δημιουργώντας γρήγορα εναλλακτικές λύσεις σχεδιασμού. Επίσης δοκιμάζει και μαθαίνει από κάθε επανάληψη τι μπορεί να είναι αποτελεσματικό και τι όχι. Το Autodesk Generative Design, για παράδειγμα, επιτρέπει στους σχεδιαστές να εισάγουν περιορισμούς και στόχους, επιτρέποντας στο λογισμικό να δημιουργήσει πολλές εναλλακτικές λύσεις σχεδιασμού. Το αποτέλεσμα του σχεδιασμού είναι συχνά αντισυμβατικά, οργανικά σχήματα, που δεν μπορούν να κατασκευαστούν με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής, όπως αντικείμενα με πολύπλοκες εσωτερικές γεωμετρίες, εσωτερικά πλέγματα (internal lattices) ή αντικείμενα με μέρη που περιπλέκονται μεταξύ τους [42, 51].

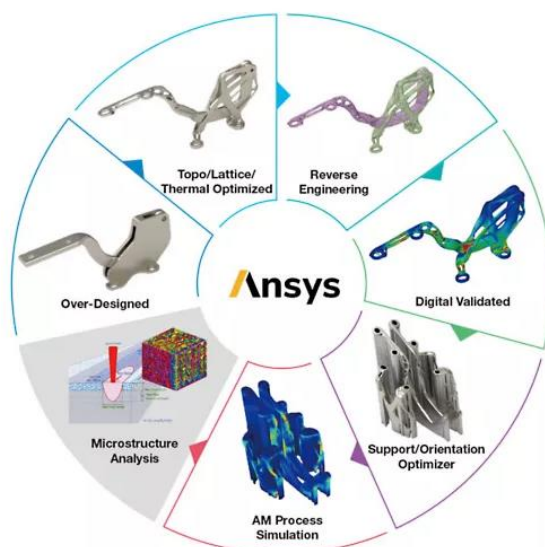
Εργαλεία όπως το Altair Inspire (**Εικόνα 27**) χρησιμοποιούν βελτιστοποίηση τοπολογίας για να προτείνουν τη βέλτιστη κατανομή υλικού εντός του αντικειμένου. Βελτιώνοντας επαναληπτικά τη γεωμετρία με βάση τις συνθήκες φόρτισης και τις ιδιότητες του υλικού, οι σχεδιαστές μπορούν να επιτύχουν ελαφριά αλλά στιβαρά αντικείμενα. Η βελτιστοποίηση τοπολογίας είναι αναπόσπαστο στοιχείο του DfAM, καθώς βοηθά στη δημιουργία σχεδίων με ελάχιστη χρήση υλικού, βελτιώνοντας την απόδοση και τη λειτουργικότητα, και μειώνοντας το βάρος του τελικού προϊόντος [57].



Εικόνα 27: Περιβάλλον του προγράμματος Altair Inspire [52].

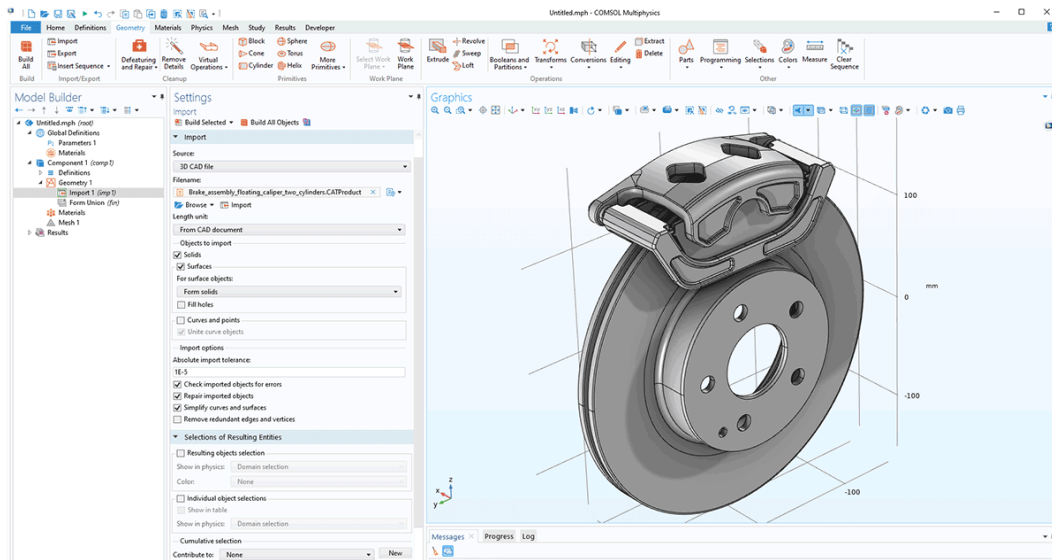
Το nTopology είναι ένα λογισμικό ειδικά σχεδιασμένο για τη δημιουργία δομών πλέγματος. Οι δομές πλέγματος, που χαρακτηρίζονται από επαναλαμβανόμενα, γεωμετρικά μοτίβα, αποτελούν χαρακτηριστικό γνώρισμα του DfAM. Χρησιμεύουν στη μείωση του βάρους διατηρώντας παράλληλα τη δομική ακεραιότητα. Το nTopology επιτρέπει στους σχεδιαστές να προσαρμόζουν τις δομές πλέγματος ανάλογα με την εφαρμογή, εξασφαλίζοντας βέλτιστη απόδοση και χρήση υλικού.

Το ANSYS Additive Suite (**Εικόνα 28**) παρέχει ένα ολοκληρωμένο σύνολο εργαλείων για την προσομοίωση και την ανάλυση της συμπεριφοράς των 3D μοντέλων με βάσει τις αρχές του DfAM. Περιλαμβάνει θερμική ανάλυση, στατική ανάλυση, μελέτη μικροδομής, προσομοίωση της διαδικασίας κατασκευής, βελτιστοποίηση τοπολογίας, κ.λπ. Τα εργαλεία προσομοίωσης είναι πολύ σημαντικά για την ανάπτυξη προϊόντων σε όλες τις βιομηχανίες, καθώς μπορούν να ανιχνεύσουν από το πρώιμο στάδιο του σχεδιασμού ζητήματα όπως η μη επιθυμητή παραμόρφωση, αστοχίες λόγω υψηλής τάσης, και αστοχίες κατασκευής [57].



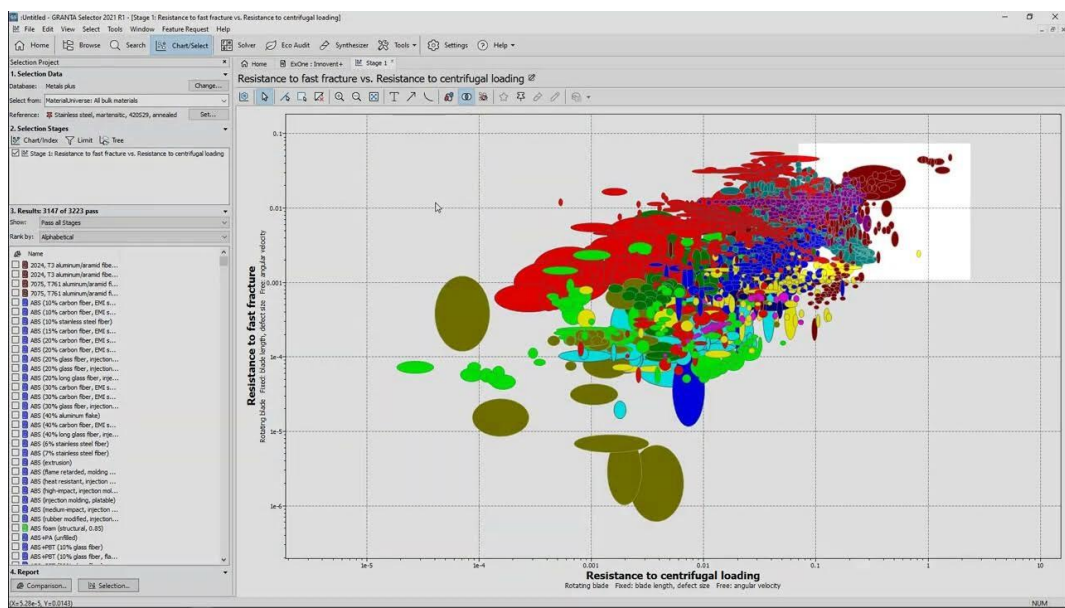
Εικόνα 28: Βήματα χρήσης του προγράμματος ANSYS Additive Suite [53].

Τα παραδοσιακά λογισμικά τρισδιάστατης σχεδίασης με τη βοήθεια υπολογιστή (3D CAD) έχουν εξελιχθεί ώστε να περιλαμβάνουν εργαλεία ειδικά προσαρμοσμένα για εφαρμογές προσθετικής κατασκευής. Προγράμματα όπως το SolidWorks (**Εικόνα 29**), το Fusion 360 και το Siemens NX ενσωματώνουν εργαλεία για το σχεδιασμό δομών υποστήριξης, τη βελτιστοποίηση του προσανατολισμού κατασκευής και τη διασφάλιση ότι η σχεδίαση ευθυγραμμίζεται με τις διαδικασίες AM. Αυτά τα εργαλεία είναι απαραίτητα στη ροή εργασιών του DfAM, παρέχοντας μια απρόσκοπτη ενοποίηση των παραμέτρων σχεδιασμού και προσθετικής κατασκευής.



Εικόνα 29: Περιβάλλον του προγράμματος SolidWorks [54].

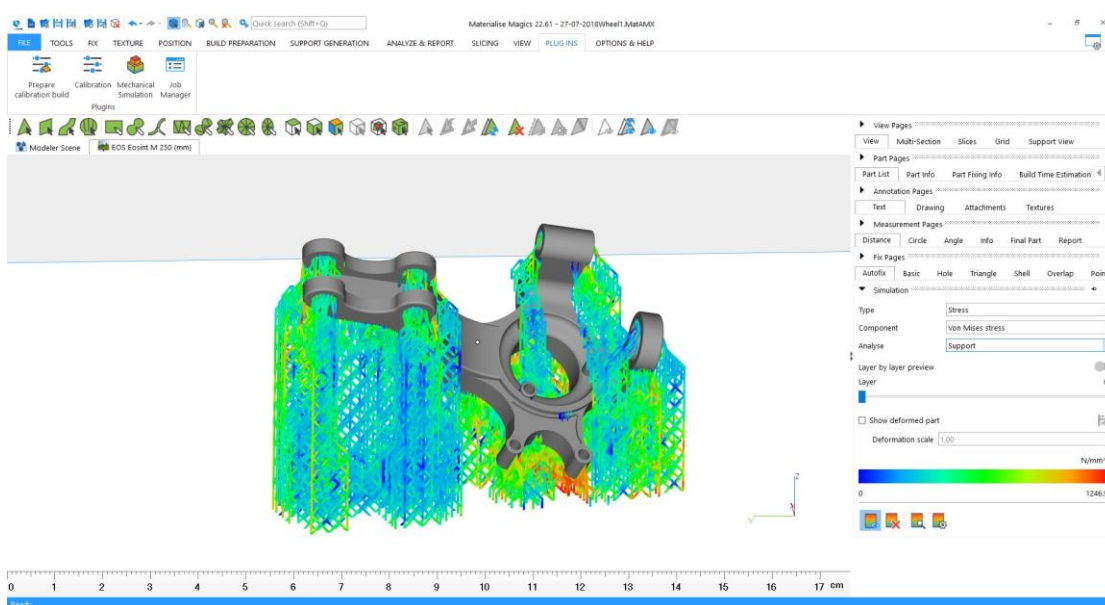
Το Granta CES Selector (Εικόνα 30) είναι ένα εργαλείο του λογισμικού Ansys, το οποίο υποστηρίζει τους σχεδιαστές στην επιλογή των καταλληλότερων υλικών για τις εφαρμογές τους. Λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες των υλικών, το κόστος και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αυτό το εργαλείο βοηθά στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων κατά τη φάση του σχεδιασμού. Η δυνατότητα προσαρμογής υλικών για προσθετική κατασκευή από μια μεγάλη ποικιλία διαθέσιμων εμπορικά υλικών, είναι πολύ σημαντική καθώς επιτρέπει τη δημιουργία εξαρτημάτων με προσαρμοσμένες ιδιότητες, βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση του τελικού προϊόντος [42, 57].



Εικόνα 30: Περιβάλλον του προγράμματος Granta CES Selector [55].

Εργαλεία όπως το PreForm (για την τεχνολογία SLA/DLP) και το Ultimaker Cura (για την τεχνολογία FDM) χρησιμοποιούνται για την προετοιμασία των τρισδιάστατων ψηφιακών μοντέλων που πρόκειται να εκτυπωθούν. Βάσει αυτών καθορίζεται ο προσανατολισμός του αντικειμένου, το υποστηρικτικό υλικό, ο αριθμός των στρώσεων, το ύψος στρώσης, το μοτίβο πλήρωσης, το υλικό και άλλες παράμετροι εκτύπωσης.

Το DfAM δεν αφορά μόνο τη διαδικασία της εκτύπωσης αλλά μπορεί να επεκταθεί και για τη μετ' επεξεργασία του εκτυπωμένου αντικειμένου. Το Magics by Materialize (**Εικόνα 31**) είναι ένα εργαλείο λογισμικού που υποστηρίζει την προετοιμασία 3D μοντέλων για εκτύπωση, τη δημιουργία δομών υποστήριξης και τη βελτιστοποίηση του προσανατολισμού των αντικειμένων. Η μετα-επεξεργασία είναι ένα κρίσιμο ζήτημα στο DfAM, διασφαλίζοντας ότι το τελικό μέρος πληροί τα πρότυπα ποιότητας και τις λειτουργικές απαιτήσεις [42].

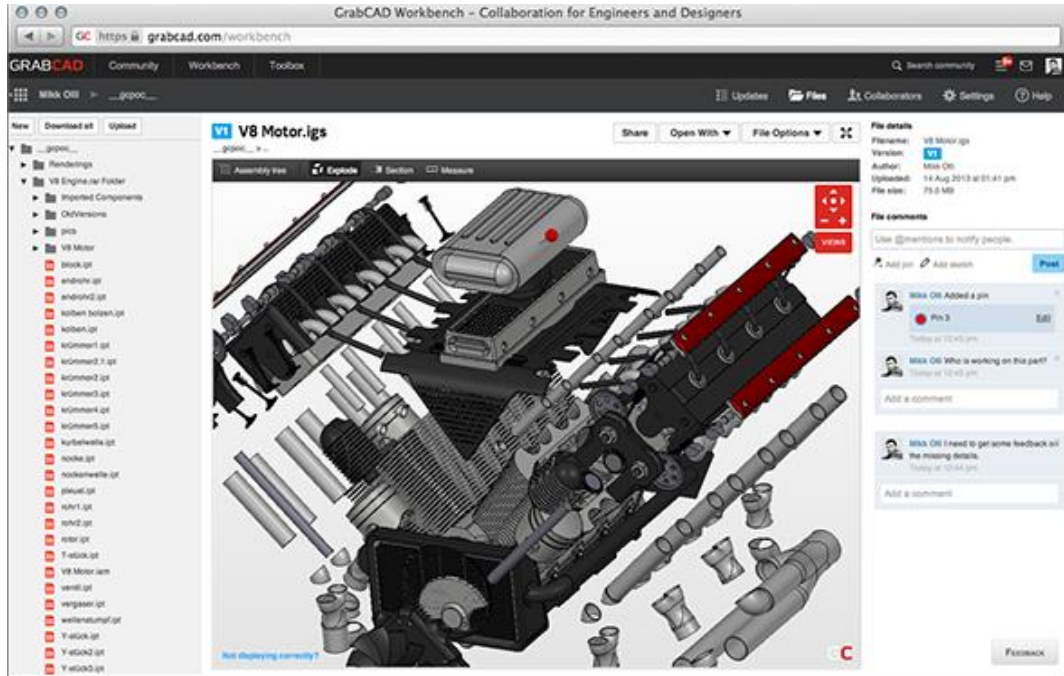


Εικόνα 31: Περιβάλλον του προγράμματος Magics by Materialize [56].

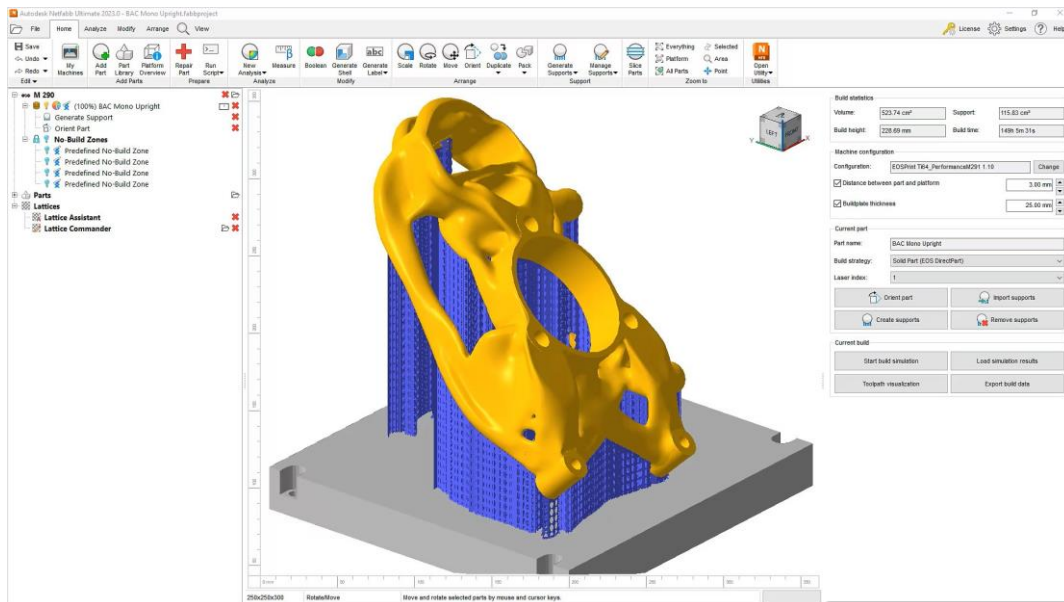
Λογισμικά όπως το GrabCAD Workbench (**Εικόνα 32**) διευκολύνουν τη συνεργασία μεταξύ των μελών μιας ομάδας και κυρίως την κοινή χρήση των CAD αρχείων. Αυτά τα εργαλεία είναι απαραίτητα για το σχεδιασμό DfAM σε περιπτώσεις που συμμετέχουν πολλοί ενδιαφερόμενοι στη διαδικασία του σχεδιασμού, της μελέτης και της κατασκευής. Επιτρέπουν την απρόσκοπτη επικοινωνία και διασφαλίζουν ότι όλοι οι εμπλεκόμενοι συνεργάζονται χρησιμοποιώντας την πιο πρόσφατη έκδοση του 3D μοντέλου [51].

Το Netfabb της Autodesk (**Εικόνα 33**) είναι επίσης ένα λογισμικό που υποστηρίζει την προετοιμασία και τη βελτιστοποίηση των τρισδιάστατων μοντέλων για προσθετική κατασκευή. Περιλαμβάνει λειτουργίες για επισκευή πλέγματος, βελτιστοποίηση προσανατολισμού και δημιουργία υποστήριξης.

Όλα τα παραπάνω λογισμικά είναι απαραίτητα για την επίτευξη των στόχων του DfAM και για την αντιμετώπιση προβλημάτων και αστοχιών που μπορεί να προκύψουν κατά τη διαδικασία κατασκευής, διασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο την τελική μορφή και ποιότητα του μοντέλου [51, 57].



Εικόνα 32: Περιβάλλον του προγράμματος GrabCAD Workbench [58].



Εικόνα 33: Περιβάλλον του προγράμματος Netfabb της Autodesk [59].

Κεφάλαιο 3 - Σχεδιασμός Πολυσυνθέτων Εξαρτημάτων Ναυτιλίας

3.1 Εισαγωγή

Όπως ήδη αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1 η προσθετική κατασκευή έχει αρχίσει να υιοθετείται για την παραγωγή μικρών σε μέγεθος ανταλλακτικών ή προσαρμοσμένων εξαρτημάτων σε διάφορα σκάφη, όπως αγωνιστικά, ιστιοφόρα, σκάφη αναψυχής, κ.λπ. Στο διαδίκτυο υπάρχουν ιστοσελίδες ηλεκτρονικού καταστήματος από αρκετές εταιρείες που κατασκευάζουν και παρέχουν μηχανολογικά ανταλλακτικά και εξαρτήματα για χρήση σε εμπορικά και επιβατηγά σκάφη μικρού έως μεσαίου μεγέθους.

Έχοντας μελετήσει αρχικά το είδος των ανταλλακτικών που χρησιμοποιούνται στις παραπάνω εφαρμογές, επιλέχθηκαν τρία συγκεκριμένα μηχανολογικά ανταλλακτικά για να σχεδιασθούν, να αναλυθούν ως προς τη μηχανική αντοχή τους και να κατασκευαστούν με τη μέθοδο της προσθετικής κατασκευής. Αυτά περιλαμβάνουν ένα έδρανο ολίσθησης με σφαιρικό τριβέα (Pillow Block Bearing with Spherical Ball), μια διχαλωτή άρθρωση με πείρο και κλιπ (Clevis Joint with Pin and Circlip) και ένα έδρανο άκρου ράβδου με θηλυκό σπείρωμα (Rod End Bearing with Female Thread). Κάθε ένα από αυτά τα ανταλλακτικά είναι πολυσύνθετο, δηλαδή αποτελείται από επιμέρους εξαρτήματα που συναρμολογούνται μεταξύ τους, ενώ κατά τη λειτουργία τους υπάρχει μια σχετική κινητικότητα μεταξύ τους. Η επιλογή των συγκεκριμένων τριών ανταλλακτικών έγινε με κύριο στόχο να διερευνηθεί η δυνατότητα ενοποίησης των επιμέρους εξαρτημάτων σε ένα ενιαίο εκτυπώσιμο αντικείμενο, ώστε να μην απαιτείται η εκ των υστέρων συναρμολόγηση. Βασική πρόκληση αυτής της ενοποίησης είναι ο καθορισμός των κατάλληλων διαστάσεων ώστε να επιτευχθούν τα απαραίτητα διάκενα μεταξύ των επιμέρους εξαρτημάτων κατά την εκτύπωση. Ωστόσο η επιτυχία της εκτύπωσης λειτουργικών ανταλλακτικών δεν εξαρτάται μόνο από τον καθορισμό των κατάλληλων διαστάσεων. Διάφοροι παράγοντες μπορεί να επηρεάσουν το αποτέλεσμα, όπως οι συνθήκες εκτύπωσης, οι παράμετροι εκτύπωσης, και οι ιδιότητες των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν.

3.2 Pillow Block Bearing with Spherical Ball

Το “Pillow Block Bearing with Spherical Ball”, μπορεί να αποδοθεί στα ελληνικά ως «Έδρανο ολίσθησης με σφαιρικό τριβέα», και αποτελείται από το κύριο σώμα και μια σφαίρα με οπή. Το κύριο σώμα μπορεί να στηριχθεί στο έδαφος ή σε άλλη κατασκευή/θεμέλιο με κοχλίες στερέωσης, ενώ η σφαίρα έχει το ρόλο του τριβέα και η οπή της είναι σε επαφή με τον στρόφειο της ατράκτου που περιστρέφεται. Ο συγκεκριμένος τύπος εδράνου ανήκει στη μεγάλη οικογένεια των εδράνων κύλισης και ολίσθησης, τα οποία είναι στοιχεία μηχανών και χρησιμοποιούνται κυρίως σε συστήματα μετάδοσης κίνησης για τη στήριξη και την ευθυγράμμιση ατράκτων και περιστρεφόμενων αξόνων, και τη μεταφορά των φορτίων που ασκούνται από τις ατράκτους στη βάση του εδράνου [60, 61].

Γενικά τα έδρανα, ανάλογα με τον τύπο της τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ του τριβέα του εδράνου και του στροφέα της ατράκτου κατατάσσονται σε έδρανα κύλισης (ρουλεμάν) και έδρανα ολίσθησης (κουζινέτα).

Στα έδρανα ολίσθησης (**Εικόνα 34**), ο τριβέας μπορεί να είναι σταθερός ή αυτορρυθμιζόμενος. Σταθερός τριβέας χρησιμοποιείται συνήθως σε περιπτώσεις όπου η άτρακτος δεν προβλέπεται να παραμορφωθεί κατά τη λειτουργίας της (ή παραμορφώνεται κατά ασήμαντο βαθμό), και αυτός ο τριβέας δεν ολισθαίνει αξονικά. Στα αυτορρυθμιζόμενα έδρανα, ο τριβέας έχει κατασκευαστεί με ένα ιδιαίτερο σχήμα ώστε να μπορεί να παρακολουθεί την παραμόρφωση της ατράκτου κατά τη φόρτιση αυτής. Συνήθως η εξωτερική του επιφάνεια είναι μερικώς σφαιρική, και έτσι μπορεί να στρέφεται ελαφριά γύρω από το κέντρο της σφαιρικής επιφάνειας που συμπίπτει με το κέντρο του εδράνου, όταν ο στροφέας της ατράκτου πάρει κάποια κλίση και δεν ευθυγραμμίζεται σωστά. Σε κάθε περίπτωση, η μείωση της τριβής στα έδρανα είναι πολύ σημαντική γιατί μειώνει την υπερθέρμανση, μειώνει τη φθορά, διευκολύνει τη συνεχή χρήση σε υψηλές ταχύτητες και γενικά επιδρά στη καλή λειτουργία και αποτελεσματικότητα του συστήματος. Οι τρεις βασικοί τρόποι να επιτευχθεί μείωση της τριβής είναι: (α) το κατάλληλο σχήμα του εδράνου, π.χ. εύκαμπτοι τριβείς, (β) η συστηματική και προσεκτική λίπανση του τριβέα και της ατράκτου, και (γ) η χρήση υλικών στον τριβέα με χαμηλό συντελεστή τριβής [61].



Εικόνα 34: Διαφορετικοί τύποι εδράνων ολίσθησης διαθέσιμα στην αγορά [64].

Τα υλικά που επιλέγονται για τα έδρανα και κυρίως για τον τριβέα είναι καθοριστικής σημασίας για την επίτευξη της αντοχής και της ανθεκτικότητάς τους σε διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες. Συνήθως οι τριβείς αποτελούνται από δύο μέταλλα, ένα για το βασικό κέλυφος και ένα για τη λεπτή επένδυση [62].

Ο χυτοσίδηρος είναι ένα παραδοσιακό και ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό για το βασικό κέλυφος του τριβέα το οποίο προσφέρει καλή μηχανική αντοχή και ανθεκτικότητα, και εξαιρετική αντοχή στη φθορά. Τα έδρανα από χυτοσίδηρο είναι γνωστά για τη σταθερότητα και την ικανότητά τους να απορροφούν τους κραδασμούς. Ο ανοξειδωτος χάλυβας επιλέγεται ως υλικό για την εξαιρετική του αντοχή στη διάβρωση. Αυτή η ιδιότητα καθιστά τα έδρανα από ανοξειδωτο χάλυβα κατάλληλα για εφαρμογές που εκτίθενται σε υγρασία, χημικές ουσίες ή σκληρές περιβαλλοντικές συνθήκες. Ο ανοξειδωτος χάλυβας παρέχει επίσης μεγάλη διάρκεια ζωής. Ο όλκιμος σίδηρος, επίσης γνωστός ως οζώδης ή σφαιροειδής σίδηρος γραφίτη, προσφέρει βελτιωμένη αντοχή και ολκιμότητα σε σύγκριση με τον παραδοσιακό χυτοσίδηρο, και επιπλέον ενισχυμένη αντοχή στους κραδασμούς.

Για την επένδυση του τριβέα, συνήθως χρησιμοποιούνται αντιτριβικά κράματα με βάση το χαλκό, τα οποία αντέχουν στα κρουστικά φορτία, αλλά παρουσιάζουν δυσκολία στο στρώσιμο, και αντιτριβικά κράματα με βάση το μόλυβδο (ονομάζονται και λευκά μέταλλα) τα οποία παρουσιάζουν αντοχή στη φθορά, είναι κατάλληλα για λειτουργία ανάγκης, έχουν μικρό συντελεστή τριβής, αλλά δεν αντέχουν στα κρουστικά φορτία [62].

Τα θερμοπλαστικά υλικά, όπως το πολυπροπυλένιο ή το πολυοξυμεθυλένιο (POM) ή το PEEK, είναι γνωστά για την αντοχή στη διάβρωση και την ικανότητά τους να αντέχουν σε ορισμένα χημικά περιβάλλοντα. Παρουσιάζουν επίσης μικρό συντελεστή τριβής και έχουν αναπτυχθεί ειδικά για εφαρμογές με οριακή λίπανση και μπορούν έτσι να λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα με ελάχιστη λίπανση [63]. Τα σύνθετα υλικά, που συνδυάζουν ενίσχυση από ίνες (γυαλιού, Kevlar ή νάιλον) και μήτρα από πολυμερές υλικό ή ρητίνη, μπορούν να προσφέρουν μια ισορροπία ιδιοτήτων, συμπεριλαμβανομένης της ικανοποιητικής αντοχής, του ελαφρού βάρους, της αντοχής στη διάβρωση και στη φθορά, ενώ μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς λίπανση για πολλές ώρες.

Στην **Εικόνα 35** απεικονίζεται ένα έδρανο ολίσθησης, κατασκευασμένο από σύνθετα υλικά [64]. Το κύριο σώμα είναι κατασκευασμένο από το υλικό Igmuid®G, το οποίο είναι, σύμφωνα με τον κατασκευαστή, ένα εξαιρετικά ανθεκτικό σε κρούση πολυμερές ενισχυμένο με μακριές ίνες (long-fibre-reinforced polymer), κατάλληλο για θερμοκρασίες από -30°C έως +80°C. Ο σφαιρικός τριβέας έχει κατασκευαστεί από το υλικό Iglidur®W300, το οποίο παρουσιάζει, σύμφωνα με τον κατασκευαστή, χαμηλό συντελεστή τριβής σε λειτουργία μη λίπανσης και εξαιρετικά χαμηλή τάση να «κολλάει» κατά την τριβή, ιδιαίτερα σημαντικό για χαμηλά φορτία και πολύ αργές κινήσεις. Άλλα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου εδράνου είναι η υψηλή ακαμψία, η υψηλή αντοχή σε διαφορετικά φορτία, η ανθεκτικότητα στη διάβρωση και στα χημικά, η υψηλή απόσβεση κραδασμών, και το μικρό βάρος. Το σχήμα του σφαιρικού τριβέα επίσης είναι κατάλληλο για περιστροφικές, ταλαντευόμενες και γραμμικές κινήσεις όπως επίσης για την αντιστάθμιση της κακής ευθυγράμμισης του άξονα. Διάφοροι συνδυασμοί σύνθετων με μεταλλικών υλικών, και διαφορετικών σχημάτων τριβέων, είναι διαθέσιμοι στο εμπόριο για βιομηχανικές εφαρμογές (μηχανολογίας, αυτοματισμών, γεωργικών μηχανημάτων, κ.α.).



Εικόνα 35: Igubal® Pillow block bearing από σύνθετα υλικά διαθέσιμο στην αγορά [64].

Τα έδρανα είναι στοιχεία μηχανών, δηλαδή σύνθετα εξαρτήματα που απαντώνται ως τμήματα στις μηχανές των οχημάτων, των πλοίων, των αεροσκαφών και των βιομηχανικών μηχανημάτων. Στα οχήματα, αποτελούν απαραίτητα στοιχεία στο σύστημα κίνησης, στο σύστημα μετάδοσης ισχύος, στο κιβώτιο ταχυτήτων, στον κινητήρα και σε άλλα υποσυστήματα, εξασφαλίζοντας τη στήριξη και την περιστροφή σε ατράκτους και περιστρεφόμενους άξονες. Επίσης, χρησιμοποιούνται ως εξαρτήματα σε βιομηχανικά μηχανήματα όπως αντλίες, ανεμιστήρες και συμπιεστές, και σε μηχανήματα του κατασκευαστικού τομέα όπως μπετονιέρες και γερανοί, παρέχοντας στήριξη και ευθυγράμμιση σε περιστρεφόμενους άξονες και εξασφαλίζοντας την ομαλή λειτουργία. Επίσης συναντώνται σε τρακτέρ, άροτρα και θεριζοαλωνιστικές μηχανές, όπου στηρίζουν τους περιστρεφόμενους άξονες συμβάλλοντας στην αξιόπιστη απόδοση του γεωργικού εξοπλισμού. Οι τυπογραφικές πρέσες και άλλα μηχανήματα εκτύπωσης χρησιμοποιούν τα έδρανα στήριξης σε κυλίνδρους και άλλα κινούμενα μέρη, ενώ βρίσκουν εφαρμογή επίσης σε μηχανήματα κλωστοϋφαντουργίας, στηρίζοντας ατράκτους και κυλίνδρους σε διάφορα στάδια της διαδικασίας παραγωγής υφασμάτων. Στις ανεμογεννήτριες, τα έδρανα χρησιμοποιούνται στο σύστημα περιστροφής των πτερυγίων και στην τουρμπίνα.

Στα πλοία, τα έδρανα κύλισης και ολίσθησης χρησιμοποιούνται συχνά για τη στήριξη και ευθυγράμμιση των αξόνων πρόωσης. Αυτοί οι άξονες συνδέουν τους κινητήρες του πλοίου με τις έλικες και τα έδρανα βοηθούν στη διατήρηση της σωστής ευθυγράμμισης και στήριξης των αξόνων, εξασφαλίζοντας αποτελεσματική και αξιόπιστη πρόωση. Επίσης, τα πλοία διαθέτουν διάφορα βοηθητικά μηχανήματα, όπως αντλίες, γεννήτριες και συμπιεστές, στα οποία τα έδρανα αποτελούν απαραίτητο εξοπλισμό για τη στήριξη των περιστρεφόμενων αξόνων επιτρέποντας την ομαλή και αποτελεσματική λειτουργία. Σε πλοία με μηχανικά ή υδραυλικά συστήματα πηδαλιουχίας, σκοπός των εδράνων είναι η στήριξη των αξόνων που συνδέουν το

τιμόνι ή το σύστημα ελέγχου με το πηδάλιο. Η σωστή ευθυγράμμιση και περιστροφή των συνδετικών ράβδων είναι απαραίτητες για την αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος διεύθυνσης. Τα έδρανα μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης στα μηχανήματα καταστρώματος, στα βαρούλκα, στους γερανούς, στις άγκυρες και σε εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για τη διακίνηση φορτίου. Μία ιδιαίτερη χρήση τους είναι στα σημεία που κατασκευάζονται ανοίγματα στο περίβλημα του πλοίου για τη στήριξη αξόνων που διέρχονται από τη δομή του πλοίου. Η σωστή ευθυγράμμιση και στήριξη των αξόνων είναι ζωτικής σημασίας για τη μείωση των κραδασμών και τη διασφάλιση της δομικής ακεραιότητας του πλοίου [65].

Σε μικρότερα σκάφη τα έδρανα από πολυμερή ή σύνθετα υλικά αποτελούν χαρακτηριστικά εξαρτήματα ναυτιλίας, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορα συστήματα που απαιτείται στήριξη ή/και περιστροφή αξόνων, ράβδων, και άλλων εξαρτημάτων. Στην **Εικόνα 36** απεικονίζεται το αγωνιστικό καταμαράν σκάφος iFLY15 της εταιρείας CEC Catamarans GmbH, στο οποίο απλά έδρανα ολίσθησης της εταιρείας Igus, κατασκευασμένα από πολυμερή υλικά, χαμηλού βάρους, με αντοχή στη διάβρωση και χωρίς απαίτηση λίπανσης, έχουν τοποθετηθεί στο αυτόματο σύστημα αιώρησης. Το συγκεκριμένο σκάφος είναι φιλικό προς το περιβάλλον και βιώσιμο, κινείται μόνο με αιολική ενέργεια, και φτάνει ταχύτητες πάνω από 50 km/h στο νερό, και βραβεύτηκε το 2019 με το βραβείο Silver Manus Award. Για να μπορέσει να επιτύχει αυτές τις ταχύτητες, απαιτήθηκαν ελαφριά αλλά και ανθεκτικά έδρανα ολίσθησης, τα οποία αντέχουν σε ένα ευρύ φάσμα περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως υγρασία, έντονες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, και φορτία πρόσκρουσης από πλωτά υλικά. Η απουσία λίπανσης είναι επίσης ιδιαίτερα σημαντική, αφενός γιατί τα έδρανα θα πρέπει να μην χρειάζονται συντήρηση, καθώς η συντήρηση είναι πρακτικά ανύπαρκτη στο σκάφος, και κατά δεύτερον, επειδή η λίπανση θα δέσμευε σκόνη και άμμο και θα προκαλούσε μακροπρόθεσμα ζημιά στον περιστρεφόμενο άξονα. Τα έδρανα της εταιρείας Igus από πολυμερή υλικά ενισχυμένα με ίνες κρίθηκαν κατάλληλα για τη συγκεκριμένη εφαρμογή [66].



Εικόνα 36: Χρήση πολυμερών εδράνων ολίσθησης της εταιρείας Igus στο αγωνιστικό καταμαράν σκάφος iFLY15 [66].

3.3 Clevis Joint with Pin and Circlip

Το “Clevis Joint with Pin and Circlip”, μπορεί να αποδοθεί στα ελληνικά ως «Διχαλωτή άρθρωση με πείρο και κλίπ», και είναι μια σύνθεση τριών επιμέρους εξαρτημάτων, η οποία αποτελείται από μια ράβδο με διχαλωτό άκρο, έναν πείρο και ένα κλιπ σύνδεσης (**Εικόνα 37**). Η ράβδος έχει ένα διχαλωτό άκρο σχήματος U με δύο οπές, για να δέχεται τον πείρο. Ο πείρος αποτελείται από το σώμα και τη κεφαλή, και τοποθετείται μέσα στις δύο οπές της ράβδου. Το κλιπ σύνδεσης τοποθετείται στο χώρο ενδιάμεσα στο άκρο της ράβδου και στην κεφαλή του πείρου συγκρατώντας τον πείρο στη θέση του. Ενώ οι περισσότεροι πείροι είναι χωρίς σπείρωμα, μερικοί μπορεί να έχουν σπείρωμα. Στην περίπτωση που δεν έχουν σπείρωμα τότε θα πρέπει να υπάρχει το ειδικό κλιπ σύνδεσης με τη ράβδο [67,68].

Ο βασικός σχεδιασμός των διχαλωτών αρθρώσεων Clevis Joints έχει ως σκοπό να παρέχει μια ευέλικτη και ασφαλή σύνδεση μεταξύ δύο εξαρτημάτων. Αρκετές βιομηχανίες χρησιμοποιούν τις διχαλωτές αρθρώσεις με πείρο σε διάφορες εφαρμογές, ενώ στις περισσότερες περιπτώσεις, οι διχαλωτές αρθρώσεις σχήματος U χρησιμοποιούνται για τη στερέωση μιας αλυσίδας, ενός σχοινιού ή ενός συρματόσχοινου για σκοπούς αρματωσιάς, ανύψωσης ή ρυμούλκησης. Επίσης χρησιμοποιούνται για στερέωση φορτίων σε εξοπλισμό κατασκευών, σε φορτηγά, ρυμουλκούμενα και γεωργικά μηχανήματα.

Γενικά οι διχαλωτές αρθρώσεις Clevis Joints σχεδιάζονται βάσει του απαιτούμενου φορτίου λειτουργίας, και είναι διαθέσιμες στην αγορά σε διάφορα μεγέθη. Το μέγεθός τους καθορίζεται κυρίως από την απόσταση μεταξύ των δύο διχαλωτών άκρων και τη διάμετρο του πείρου. Οι αρθρώσεις σχεδιάζονται συνήθως για να επιτρέπουν κατά ένα ποσοστό τις διάφορες κινήσεις της αλυσίδας ή του συρματόσχοινου (κάθετη, οριζόντια ή πλευρική κίνηση), στις σχετικές εφαρμογές, όπως για παράδειγμα στη ρυμούλκηση.

Στην **Εικόνα 37** απεικονίζονται διαφορετικοί τύποι Clevis Joints with Pin and Clip, που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία και είναι διαθέσιμοι στην αγορά.



Εικόνα 37: Clevis joints with pin and clip διαθέσιμοι στην αγορά [69,70].

Η επιλογή του υλικού για τις διχαλωτές αρθρώσεις Clevis Joints εξαρτάται από παράγοντες όπως οι απαιτήσεις φορτίου της εφαρμογής, οι περιβαλλοντικές συνθήκες και οι επιθυμητές ιδιότητες. Οι παράγοντες αυτοί εξετάζονται προσεκτικά για να επιλεγεί το καταλληλότερο υλικό, διασφαλίζοντας ότι οι διχαλωτές αρθρώσεις θα λειτουργούν αξιόπιστα και με ασφάλεια στις προβλεπόμενες εφαρμογές τους. Η τακτική επιθεώρηση και συντήρηση είναι επίσης απαραίτητες για την παράταση της διάρκειας ζωής τους και τη διατήρηση της βέλτιστης απόδοσης. Τα υλικά που επιλέγονται είναι σημαντικά για τη διασφάλιση της αντοχής και της λειτουργικότητας των διχαλωτών αρθρώσεων σε διαφορετικά περιβάλλοντα και εφαρμογές. Ακολουθεί μια περιγραφή των βασικών υλικών που χρησιμοποιούνται ανάλογα με την εφαρμογή.

Οι διχαλωτές αρθρώσεις από ανθρακούχο χάλυβα βρίσκουν εφαρμογές σε βιομηχανικά μηχανήματα, συνδέσεις αυτοκινήτων και άλλες περιπτώσεις, όπου η αντοχή και η αξιοπιστία είναι πρωταρχικής σημασίας. Οι διχαλωτές αρθρώσεις κατασκευασμένοι από ανοξείδωτο χάλυβα χρησιμοποιούνται συνήθως σε θαλάσσια περιβάλλοντα, εργοστάσια χημικής επεξεργασίας και σε οποιαδήποτε εφαρμογή είναι απαραίτητη η αντοχή στη διάβρωση. Οι διχαλωτές αρθρώσεις από αλουμίνιο χρησιμοποιούνται σε αεροδιαστημικές εφαρμογές, ελαφρά μηχανήματα και περιπτώσεις όπου η μείωση βάρους είναι προτεραιότητα. Οι διχαλωτές αρθρώσεις από μπρούτζο ή ορείχαλκο χρησιμοποιούνται σε θαλάσσια περιβάλλοντα, όπου η αντοχή στη διάβρωση του αλμυρού νερού είναι απαραίτητη, καθώς και σε εφαρμογές που απαιτούν χαμηλή τριβή, όπως σε συστήματα ελέγχου και μετάδοσης κίνησης. Οι διχαλωτές αρθρώσεις κατασκευασμένες από ειδικού τύπου χάλυβα χρησιμοποιούνται σε απαιτητικές εφαρμογές όπου απαιτείται αυξημένη μηχανική αντοχή και αντοχή στη φθορά, όπως σε βαριά μηχανήματα και βιομηχανικό εξοπλισμό.

Επίσης, κατασκευάζονται Clevis Joints από ενισχυμένα με ίνες πολυμερή υλικά, όπως το Igmid®G [71] και το CSB®M163 [72]. Τα πλαστικά Clevis Joints υπερισχύουν σε εφαρμογές που απαιτείται καλή αντοχή σε εφελκυσμό, ελαφριά κατασκευή, αντίσταση στη διάβρωση, και απόσβεση κραδασμών και θορύβων. Ένα εξάρτημα Clevis Joint with Pin συνδεδεμένο με ένα εξάρτημα Pod End Bearing απεικονίζεται στην **Εικόνα 38**.



Εικόνα 38: Συνδυασμός CSB-BAL® clevis joint και CSB-BAL® rod end από σύνθετα υλικά για τη βιομηχανία ποδηλάτων [73].

Οι διχαλωτές αρθρώσεις Clevis Joints βρίσκουν εφαρμογή σε διάφορες βιομηχανίες και συστήματα όπου η ελεγχόμενη κίνηση, η στερέωση και η ασφάλιση φορτίων είναι απαραίτητες. Η προσαρμοστικότητα, η αντοχή και η αξιοπιστία τους, τις καθιστούν απαραίτητα εξαρτήματα σε πολυάριθμες εφαρμογές, συμβάλλοντας στην αποτελεσματικότητα και τη λειτουργικότητα των διαφόρων μηχανικών συστημάτων.

Χρησιμοποιούνται ευρέως στα οχήματα και συγκεκριμένα στο σύστημα ελέγχου γκαζιού, στο σύστημα πέδησης και στο σύστημα ανάρτησης, συμβάλλοντας στον ακριβή έλεγχο της κίνησης και την απόκριση στις λειτουργίες του οχήματος. Επίσης αποτελούν εξαρτήματα σύνδεσης σε διάφορα τμήματα του συστήματος ελέγχου των αεροσκαφών, όπως πτερύγια, ανελκυστήρες και πηδάλια. Οι διχαλωτοί σύνδεσμοι βρίσκουν εφαρμογή σε διάφορα βιομηχανικά μηχανήματα του κατασκευαστικού τομέα όπως εκσκαφείς και φορτωτές, και σε γεωργικά μηχανήματα, όπως βραχίονες τρακτέρ, άροτρα και σβάρνες, επιτρέποντας τον έλεγχο της κίνησης και τη στερέωση του φορτίου. Χρησιμοποιούνται επίσης ως εξαρτήματα συνδέσεων σε σιδηροδρομικά συστήματα, συμβάλλοντας στον έλεγχο και τη λειτουργία του συστήματος πέδησης. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιούνται σε υδραυλικά συστήματα για τη σύνδεση ενεργοποιητών σε ελεγχόμενους μηχανισμούς, το οποίο είναι σύνηθες σε εφαρμογές όπου η ελεγχόμενη κίνηση είναι απαραίτητη, όπως στα ρομποτικά συστήματα.

Στα πλοία, οι διχαλωτές αρθρώσεις είναι απαραίτητα εξαρτήματα που συμβάλλουν στην ασφάλεια, την ικανότητα ελιγμών και την αποτελεσματικότητα των διαφόρων συστημάτων. Ο στιβαρός σχεδιασμός και η κατάλληλη επιλογή υλικών διασφαλίζουν την ομαλή λειτουργία του πλοίου. Χρησιμοποιούνται στα συστήματα πλοήγησης, που συνδέουν το τιμόνι ή το σύστημα ελέγχου με το πηδάλιο, επιτρέποντας τον ακριβή έλεγχο της κατεύθυνσης του σκάφους. Επίσης στα συστήματα που συνδέουν τα χειριστήρια της ταχύτητας, όπως για παράδειγμα τους μοχλούς γκαζιού, με το σύστημα πρόωσης του πλοίου, εξασφαλίζοντας τον ακριβή έλεγχο της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του σκάφους. Τέλος βρίσκουν εφαρμογή ως μέσα στερέωσης και ασφάλισης στα μηχανήματα καταστρώματος, όπως σε βαρούλκα, γεραμούς και σε άλλο εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για τη διακίνηση φορτίου και την εκτέλεση εργασιών στο κατάστρωμα του πλοίου. Επιπλέον, οι διχαλωτές αρθρώσεις εφαρμόζονται στα υδραυλικά συστήματα του πλοίου, σε συνδέσεις ενεργοποιητών σε ελεγχόμενους μηχανισμούς, διευκολύνοντας την ελεγχόμενη κίνηση σε συστήματα που είναι υπεύθυνα για λειτουργίες όπως σταθεροποίηση εξοπλισμού, έλεγχο βαλβίδων ή λειτουργία θυρών και καταπακτών.

3.4 Rod End Bearing with Female Thread

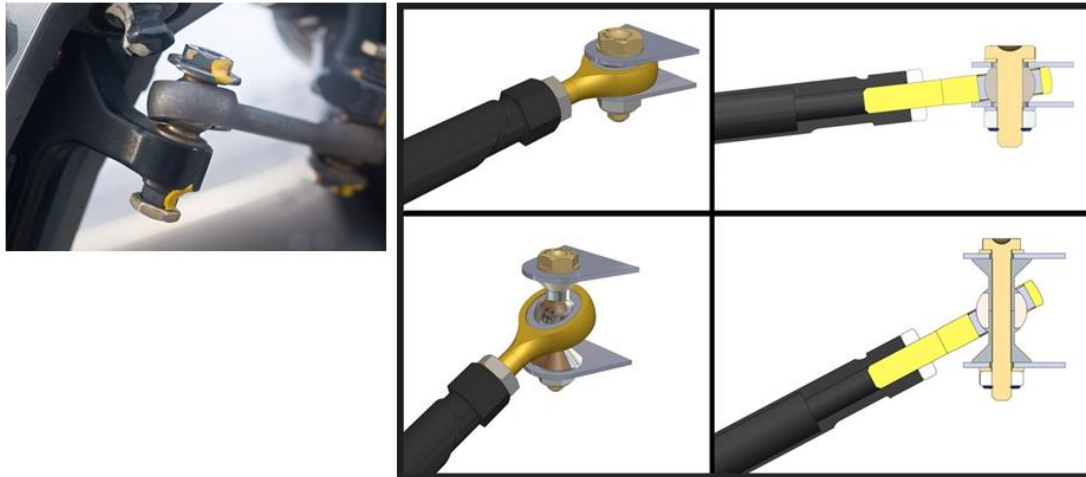
Το “Rod End Bearing with Female Thread”, μπορεί να αποδοθεί στα ελληνικά ως «Έδρανο Άκρου Ράβδου με Θηλυκό Σπείρωμα», και είναι ένα σύνθετο εξάρτημα που λειτουργεί ως μηχανική άρθρωση και χρησιμοποιείται σε πολλές βιομηχανίες. Αυτές οι αρθρώσεις χρησιμοποιούνται στα άκρα των ράβδων ελέγχου (control rods), των συνδέσμων διεύθυνσης (steering links), των συνδετικών ράβδων ή οπουδήποτε απαιτείται άρθρωση ακριβείας. Το Rod End Bearing αποτελείται από ένα στέλεχος (shank) με μια εσωτερική κοιλότητα κατάλληλου σφαιρικού σχήματος, και ένα έδρανο - σφαιρικό τριβέα (bearing) που τοποθετείται μέσα στην κοιλότητα (**Εικόνα 39**). Στο άλλο άκρο του στελέχους υπάρχει αριστερόστροφο ή δεξιόστροφο, θηλυκό (εσωτερικό) ή αρσενικό (εξωτερικό) σπείρωμα στο οποίο μπορεί να προσαρτηθεί ένας άξονας ή μια ράβδος σύνδεσης. Ο σφαιρικός τριβέας φέρει επίσης οπή μέσα στην οποία μπορεί να διέρχεται ένας πείρος ή άξονας ή άλλο στοιχείο σύνδεσης όπως ένα clevis joint (**Εικόνα 38**).



Εικόνα 39: Rod End Bearings με θηλυκό και αρσενικό σπείρωμα διαθέσιμα στην αγορά [74].

Το έδρανο άκρης ράβδου Rod End Bearing κατασκευάζεται συνήθως από χάλυβα, ανοξείδωτο χάλυβα, αλουμίνιο, υλικά υψηλής μηχανικής απόδοσης, αλλά και σύνθετα υλικά, ανάλογα την εφαρμογή. Γενικά λειτουργεί ως ένα αυτοευθυγραμμιζόμενο έδρανο που επιτρέπει τον έλεγχο της κίνησης δύο εξαρτημάτων. Επίσης επιτρέπει την αντιστάθμιση της κακής ευθυγράμμισης του εξαρτήματος (άξονας, συνδετική ράβδος, άλλο εξάρτημα) που διέρχεται μέσα από την οπή του σφαιρικού τριβέα σε οποιαδήποτε γωνία μικρότερη των ενενήντα μοιρών [75, 76].

Ο συνηθέστερος τρόπος χρήσης των Rod End Bearings είναι στο σύστημα διεύθυνσης των οχημάτων. Οι άξονες τιμονιού στα περισσότερα αυτοκίνητα, φορτηγά και άλλα οχήματα, φέρουν Rod End Bearings στα άκρα των συνδετικών ράβδων. Οι συνδετικές ράβδοι (μπάρες) είναι ράβδοι που συνδέουν τον άξονα του τιμονιού με τα ακρόμπαρα (tie rod ends), με σκοπό οι τελευταίες να περιστρέφονται σύμφωνα με την κατεύθυνση που στρίβει το τιμόνι και να μεταφέρουν αυτή την κίνηση στους τροχούς με ακριβή και ελεγχόμενο τρόπο. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές στις οποίες απαιτείται μηχανική άρθρωση για τον έλεγχο της περιστροφικής και ταλαντευόμενης κίνησης μεταξύ δύο συνδεδεμένων εξαρτημάτων. Αποτελούν απαραίτητα εξαρτήματα σε διάφορα βιομηχανικά και αυτοκινητιστικά συστήματα, σε συστήματα μεταφοράς κίνησης και φορτίου, σε συστήματα ελέγχου αεροσκάφους, σε συστήματα διεύθυνσης, σε ρομποτικούς βραχίονες, σε κυλίνδρους τροχών, κ.λπ., προσφέροντας υψηλή ακρίβεια και αποτελεσματικότητα σε απαιτητικά περιβάλλοντα (**Εικόνα 40**).



Εικόνα 40: Διαφορετικές εφαρμογές του Rod End Bearing για τον έλεγχο της ευθυγράμμισης σε FSAE αγωνιστικό μονοθέσιο [77].

Γενικά υπάρχουν διάφοροι τύποι σφαιρικών εδράνων άκρου ράβδου Spherical Rod End Bearings διαθέσιμα στην αγορά. Ο σχεδιασμός τους επιτρέπει τη λειτουργία σε χαμηλή ροπή, την αντοχή στη φθορά, την ταυτόχρονη διαχείριση ακτινικών φορτίων και αξονικών φορτίων σε δύο κατευθύνσεις, και την ικανότητα να αντέχουν υψηλά φορτία. Είναι επίσης ιδιαίτερα κατάλληλα για συνθήκες με εναλλασσόμενα και κρουστικά φορτία. Ανάλογα με το υλικό και την επιφάνεια ολίσθησης διακρίνονται σε αυτά που απαιτούν λίπανση και σε αυτά που μπορούν να λειτουργούν χωρίς λίπανση [78,79].

Η επιλογή του υλικού των Rod End Bearings εξαρτάται από την εφαρμογή και τις επιθυμητές ιδιότητες όπως το απαιτούμενο φορτίο, οι περιβαλλοντικές συνθήκες, η αντοχή στη διάβρωση, η λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες και η αυτολίπανση. Οι σχεδιαστές - μελετητές επιλέγουν προσεκτικά τα υλικά για να διασφαλίσουν ότι πληρούν τα κριτήρια απόδοσης που απαιτούνται από τις διάφορες βιομηχανίες.

Τα Rod End Bearings από χάλυβα χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές όπου η στιβαρότητα και η αξιοπιστία είναι απαραίτητες. Τα έδρανα κατασκευασμένα από ανοξείδωτο χάλυβα είναι κοινά σε θαλάσσια περιβάλλοντα, εξοπλισμό επεξεργασίας τροφίμων, υδραυλικές εγκαταστάσεις, και άλλες εφαρμογές όπου η αντοχή στη διάβρωση είναι πρωταρχικής σημασίας. Τα έδρανα αλουμινίου χρησιμοποιούνται σε ελαφριά μηχανήματα και εφαρμογές όπου η μείωση βάρους είναι αρκετά σημαντική. Τα έδρανα κατασκευασμένα από μπρούτζο χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές βαρέως τύπου, όπως μηχανήματα κατασκευών, όπου η αντοχή στη φθορά και τα υψηλά φορτία είναι κρίσιμης σημασίας.

Συνήθως, το στέλεχος κατασκευάζεται από ανθρακούχο χάλυβα, ο σφαιρικός τριβέας από χάλυβα ή χάλυβα υψηλής περιεκτικότητας σε χρώμιο, ή από μπρούτζο, και ενδιάμεσα τοποθετείται μια επίστρωση από ειδικό κράμα χαλκού. Μια μικρή οπή λίπανσης στο στέλεχος

επιτρέπει να εφαρμόζεται η λίπανση στην επιφάνεια ολίσθησης. Τέτοια μοντέλα είναι τα RBH, και PHS τα οποία υποστηρίζουν ακτινικά και αξονικά φορτία και είναι καταλληλότερο για μεγάλα φορτία και χαμηλές ταχύτητες. Ο συνδυασμός ανθρακούχου χάλυβα με χάλυβα και χάλυβα με μπρούτζο επιφέρει καλή λειτουργία ακόμη και με λίγη λίπανση, ωστόσο, υπό κανονικές συνθήκες, είναι απαραίτητη η περιοδική λίπανση. Τα συγκεκριμένα Rod End Bearings χρησιμοποιούνται στο τομέα παραγωγής, σε εργαλειομηχανές, βιομηχανικά μηχανήματα και αυτοματοποιημένο εξοπλισμό παραγωγής, καθώς μπορούν να χειριστούν λειτουργία σε υψηλή ταχύτητα, βαριά φορτία και ακριβείς απαιτήσεις τοποθέτησης. Επίσης χρησιμοποιούνται στο τομέα των κατασκευών, σε μηχανήματα όπως εκσκαφείς, γεραμούς, μπουλντόζες και μηχανήματα σκυροδέματος, καθώς μπορούν να αντέξουν σημαντικά φορτία και να λειτουργήσουν σε σκληρά περιβάλλοντα [78, 79].

Στα μοντέλα NHS και NOS το στέλεχος και ο σφαιρικό τριβέα κατασκευάζονται από ανθρακούχο ή κραματωμένο χάλυβα, που έχουν επεξεργαστεί με επίστρωση ψευδαργύρου (zinc coated) ή με σκληρή επιχρωμίωση (hard chrome plated) ή με θερμική επεξεργασία HRC. Μεταξύ των σφαιρικών επιφανειών του τριβέα και του στελέχους τοποθετείται μια λεπτή επίστρωση (liner) από πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE). Το PTFE έχει καλή αντοχή στη θερμότητα και υψηλές μονωτικές ιδιότητες, ενώ λειτουργεί με πολύ χαμηλό συντελεστή τριβής (0.03-0.1 στους 288° C) [80].

Κύριο χαρακτηριστικό των εδράνων με επίστρωση PTFE είναι ότι δεν απαιτούν καθόλου λίπανση με γράσο, δεδομένου ότι η ίδια η επίστρωση PTFE Liner είναι αυτολιπαινόμενη. Επίσης δεν χρειάζεται συντήρηση κατά τη λειτουργία, και είναι κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, αντοχή στη διάβρωση και αντοχή σε μεγάλα δυναμικά φορτία. Χρησιμοποιούνται ως εξαρτήματα σε αναρτήσεις αυτοκινήτων, βιομηχανικά μηχανήματα και άλλα συστήματα που απαιτούν χαμηλή τριβή και αντοχή στη φθορά. Ανάλογα με την ενίσχυση του PTFE μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εξειδικευμένες εφαρμογές όπου απαιτείται συγκεκριμένος συνδυασμός ιδιοτήτων, όπως σε αγωνιστικά οχήματα, σε κινητήρες αεριοθωμένων και σε εφαρμογές αεροδιαστημικής υψηλής απόδοσης [80, 81].

Γενικά τα έδρανα άκρου ράβδου Rod End Bearings είναι σύνθετα εξαρτήματα που βρίσκουν χρήση σε συστήματα διεύθυνσης και ανάρτησης αυτοκινήτου, συστήματα ελέγχου αεροδιαστημικής, βιομηχανικά μηχανήματα, κατασκευές, θαλάσσια συστήματα, χειρισμός υλικών, ιατρικές συσκευές, εκτός δρόμου οχήματα, σιδηροδρομικά συστήματα, ρομποτικά συστήματα, μηχανήματα κλωστοϋφαντουργίας, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, και άλλα. Στα πλοία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα διεύθυνσης πλοίου, χειριστήρια γκαζιού και κινητήρα, συστήματα στήριξη άξονα πρόωσης, συνδέσεις ελέγχου κίνησης, μηχανήματα καταστρώματος, ανοίγματα διαφραγμάτων, συστήματα σταθεροποίησης, υδραυλικά συστήματα, συστήματα βαρούλκου και γερανού, και άλλα.

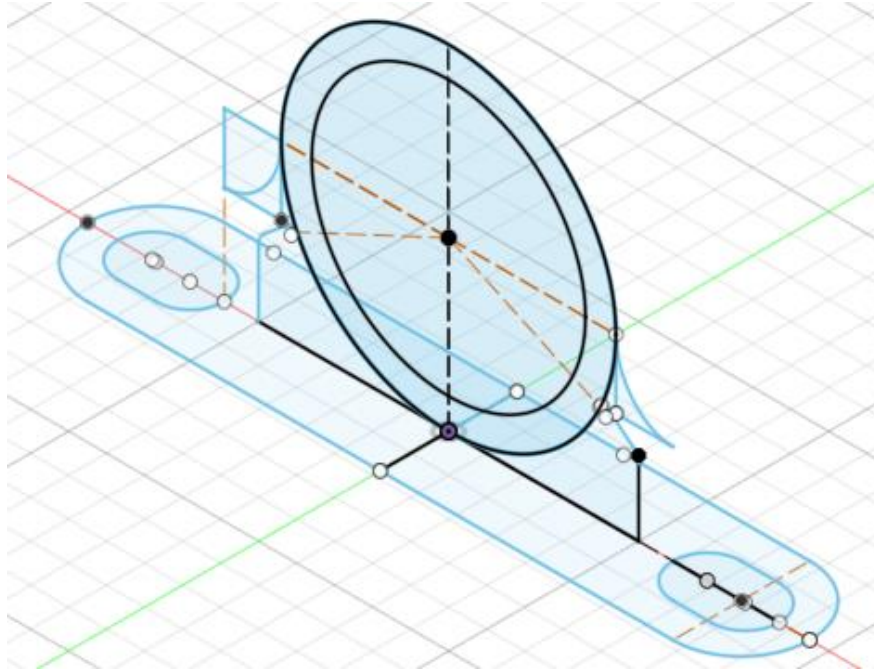
3.5 Διαδικασία Τρισδιάστατου Σχεδιασμού

Για τον τρισδιάστατο σχεδιασμό των πολυσύνθετων εξαρτημάτων-ανταλλακτικών χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Fusion 360 της Autodesk, το οποίο είναι ένα πρόγραμμα παραμετρικής σχεδίασης με φιλικό περιβάλλον διεπαφής με τον χρήστη και πολλές δυνατότητες σύνθετου σχεδιασμού και παρέχεται ως δωρεάν λογισμικό σε εκπαιδευτικά ιδρύματα.

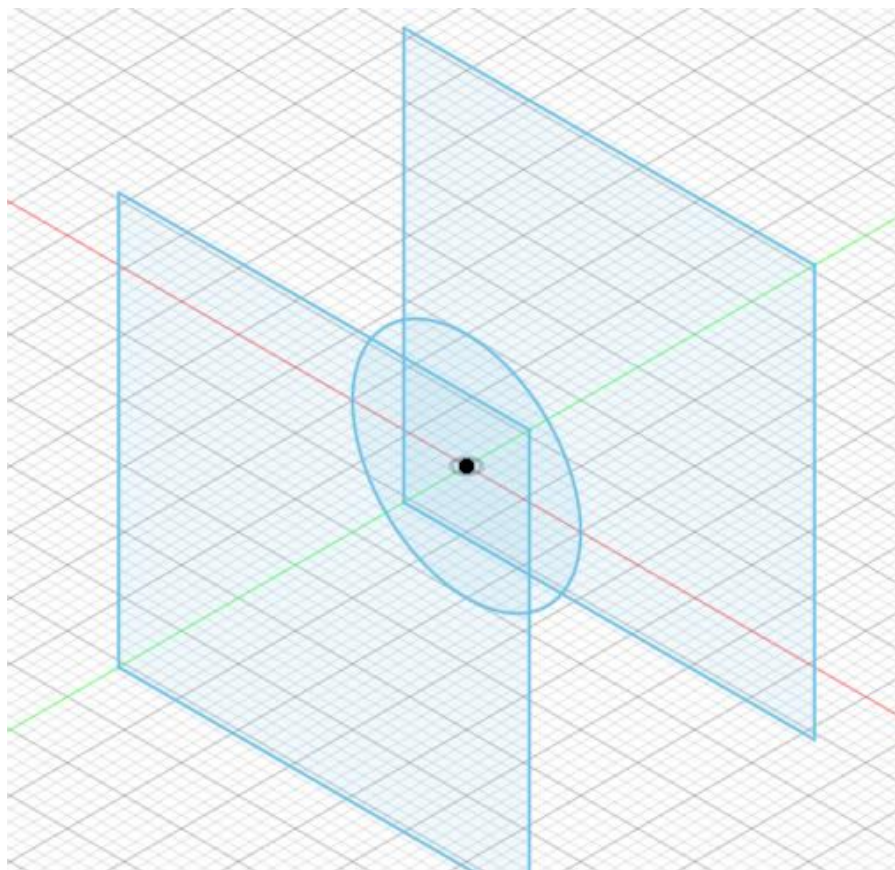
Pillow Block Bearing with Spherical Ball

Η σχεδίαση του Pillow Block Bearing ξεκίνησε από το κύριο σώμα του. Αρχικά σχεδιάστηκε η βάση του κύριου σώματος χρησιμοποιώντας την εντολή New Sketch για το σχεδιασμό του 2D προφίλ του δοκιμίου, την εντολή Line για τη χάραξη ευθείων γραμμών, την εντολή Tangent Arc για τη σχεδίαση γωνιών και τόξων καθώς και την εντολή Mirror, για τον αντικατοπτρισμό του 2D σχεδίου. Ύστερα με την εντολή Extrude και καθορίζοντας το επιθυμητό ύψος σχεδιάστηκε η βάση του εξαρτήματος στην τρίτη διάσταση και έτσι έγινε η μετατροπή του σχεδίου της βάσης από 2D σε 3D. Στην συνέχεια σχεδιάστηκαν με τις εντολές New Sketch, Line, Tangent Arc και Mirror τα δύο slot της βάσης, και δημιουργήθηκαν οι οπές με την επιλογή Cut του Extrude. Στη συνέχεια ακολούθησε ο σχεδιασμός της μεγαλύτερης οπής μέσα από την οποία μπορεί να περάσει ο περιστρεφόμενος άξονας. Οι εντολές που χρησιμοποιήθηκαν στο New Sketch, είναι η εντολή Center Diameter Circle για να σχεδιαστούν δύο ομόκεντροι κύκλοι με διαφορετική ακτίνα, με την επιλογή Join του Extrude για να δημιουργηθεί το 3D feature και με την επιλογή Cut της εντολής Sphere για να δημιουργηθεί ο εσωτερικός χώρος μέσα στον οποίο θα τοποθετηθεί ο σφαιρικός τριβέας. Μετά σχεδιάστηκαν με τις εντολές New Sketch, Line, Tangent Arc και Mirror οι καμπύλες που ενώνουν τη βάση με το στοιχείο της οπής και δημιουργήθηκε το 3D feature με την επιλογή Join του Extrude. Σχεδιάστηκε επίσης το κενό στο κάτω μέρος της βάσης του κύριου σώματος για μείωση του βάρους, με τις εντολές New Sketch, Line, Tangent Arc, Fillet και Mirror και την επιλογή Cut του Extrude. Τέλος με την εντολή Fillet ομαλοποιήθηκαν οι ακμές του κύριου σώματος (**Εικόνες 41-45**).

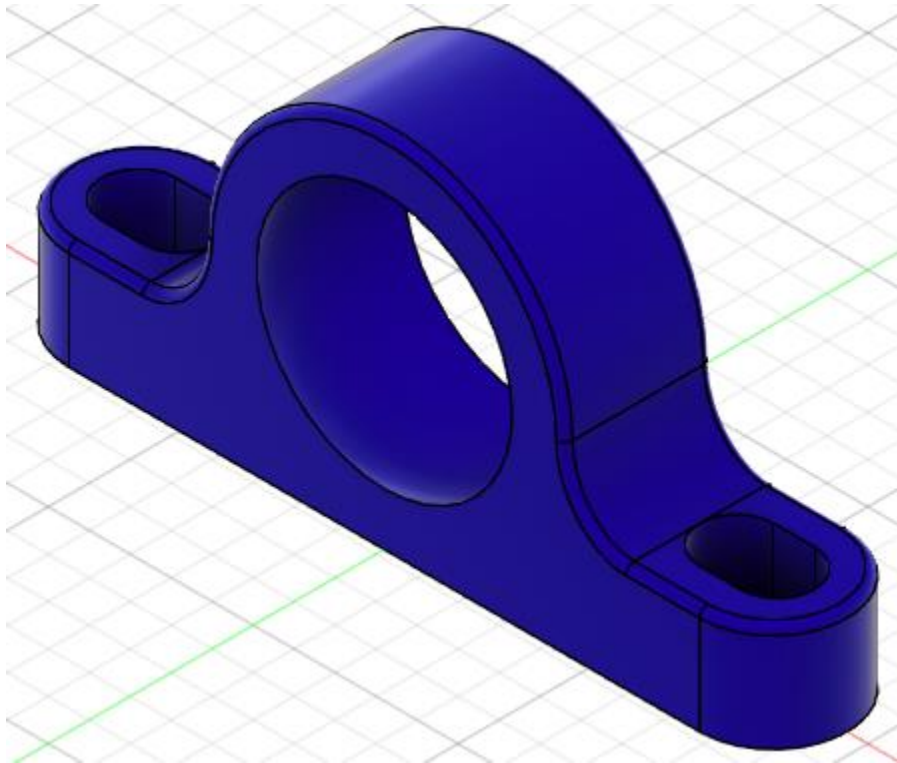
Ο σφαιρικός τριβέας (spherical ball) του Pillow Block Bearing αρχικά δημιουργήθηκε με την εντολή Sphere και στη συνέχεια σχεδιάστηκε η οπή της σφαίρας με τις εντολές New Sketch και Center Diameter Circle, ενώ δημιουργήθηκε με την επιλογή Cut του Extrude. Στην συνέχεια με την εντολή Offset Plane δημιουργήθηκαν δύο νέα επίπεδα στα οποία με τις εντολές New Sketch, και 2-Point Rectangle σχεδιαστήκαν οι δύο κάθετες επιφάνειες και με την επιλογή Cut του Extrude αφαιρέθηκαν τα δύο απέναντι άκρα της σφαίρας. Τέλος με την εντολή Fillet ομαλοποιήθηκαν οι ακμές της (**Εικόνες 41-45**).



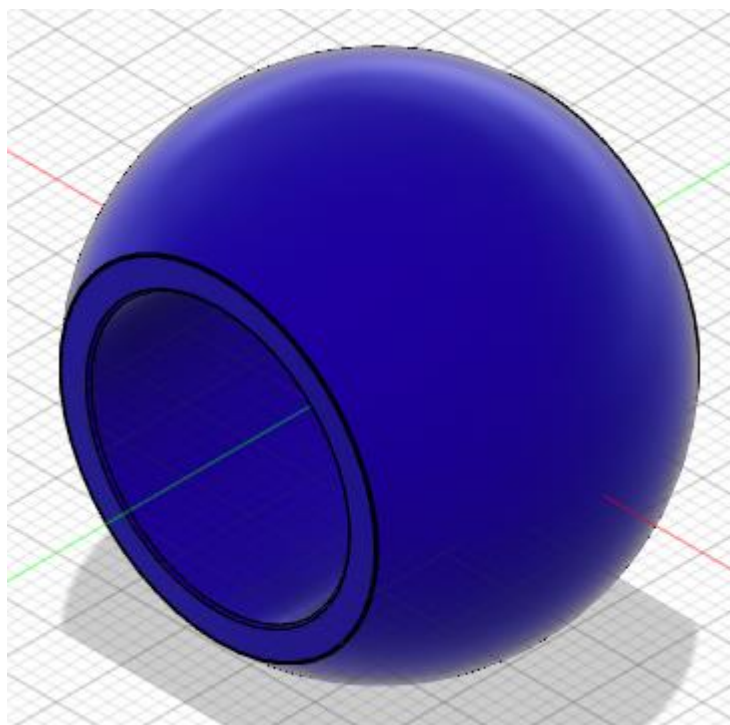
Εικόνα 41: Τα 2D Sketches του κύριου σώματος του Pillow Block Bearing στο Fusion 360.



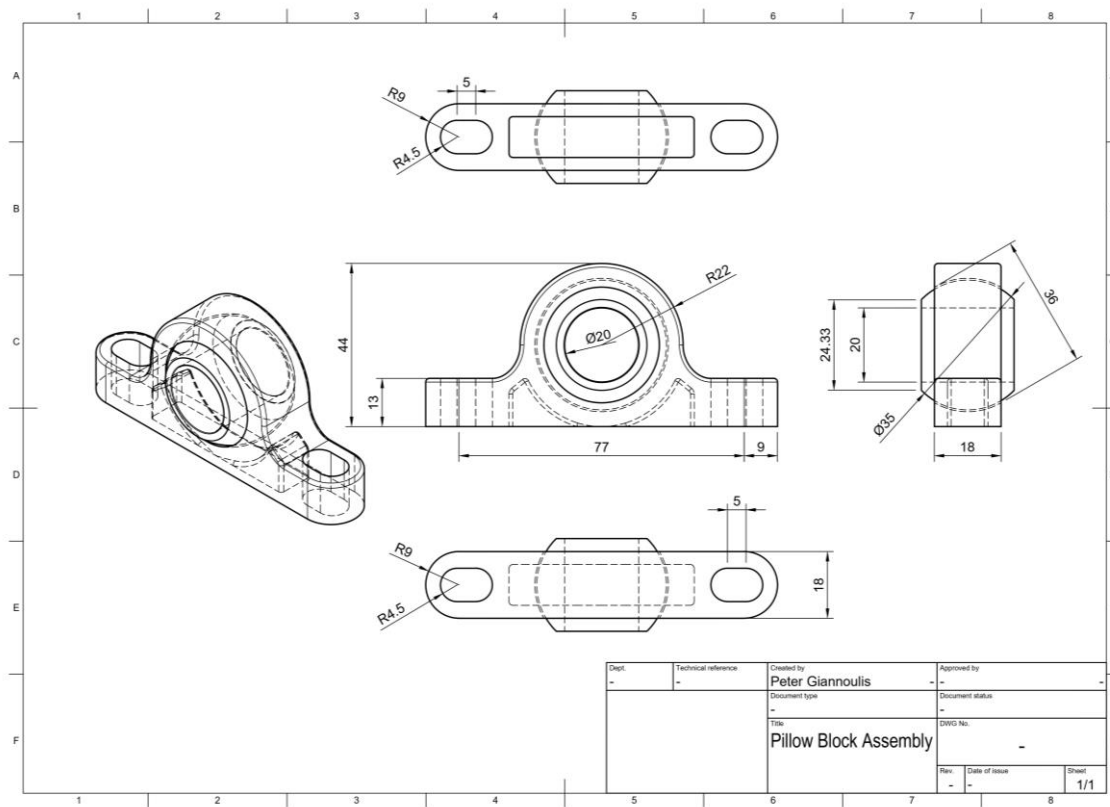
Εικόνα 42: Τα 2D Sketches του σφαιρικού τριβέα του Pillow Block Bearing στο Fusion 360.



Εικόνα 43: Το 3D μοντέλο του κυρίου σώματος του *Pillow Block Bearing* στο *Fusion 360*.



Εικόνα 44: Το 3D μοντέλο του σφαιρικού τριβέα του *Pillow Block Bearing* στο *Fusion 360*.



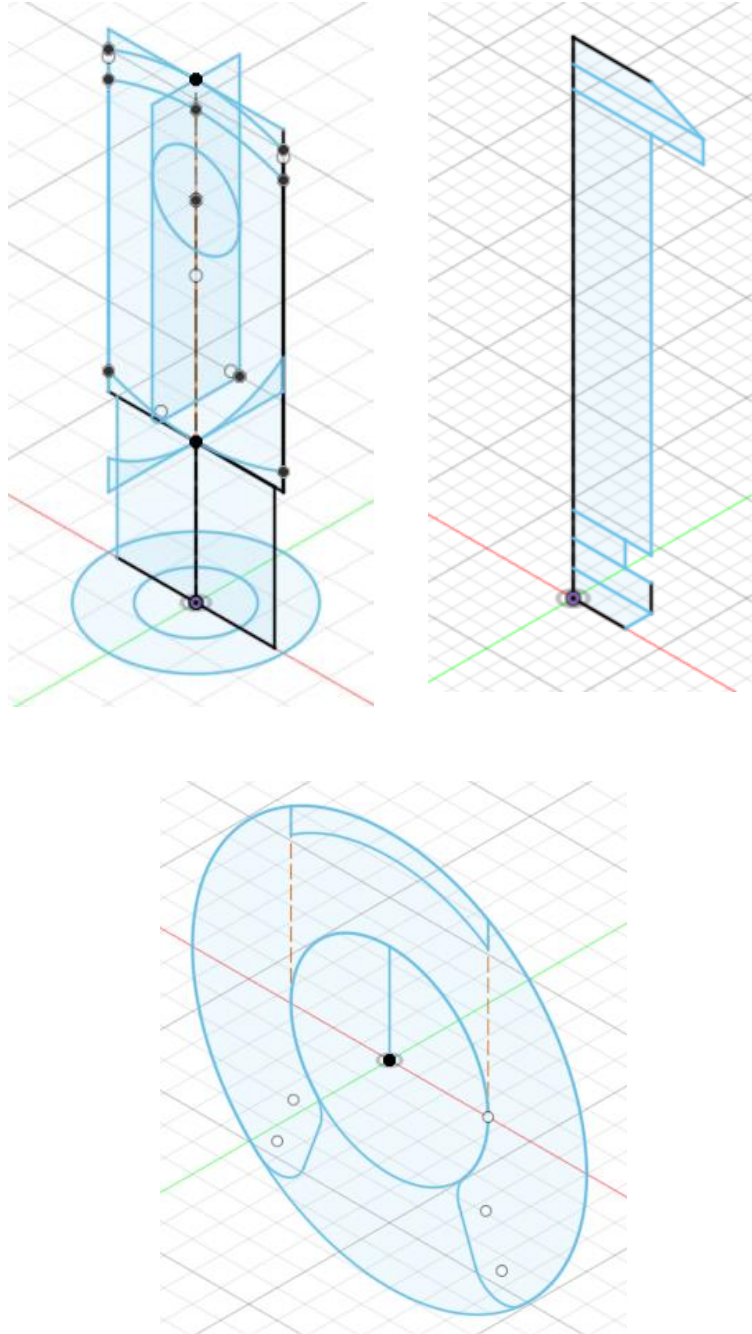
Εικόνα 45: To Drawing του Pillow Block Bearing with Spherical Ball.

Clevis Joint with Pin and Circlip

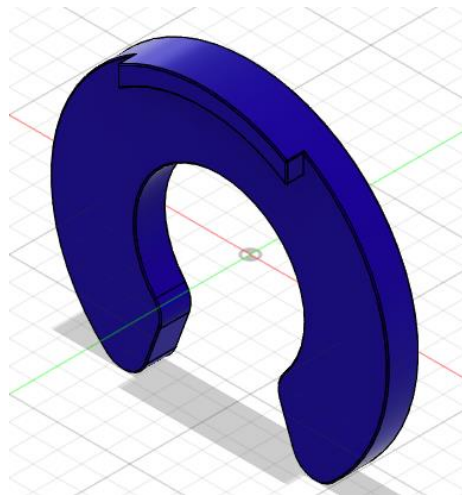
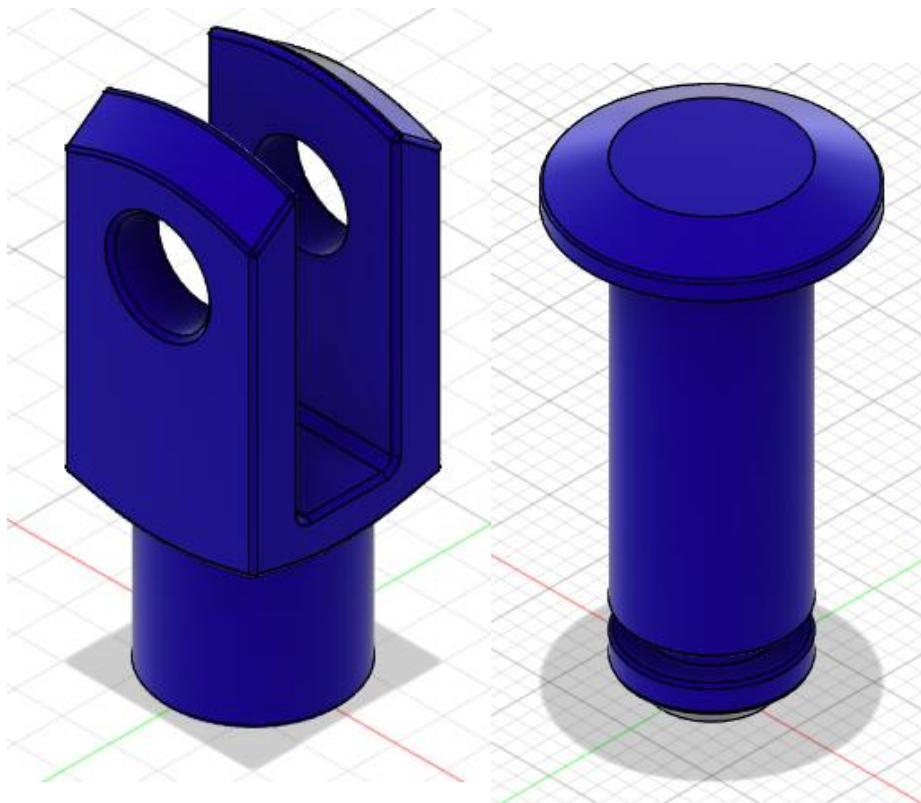
Η σχεδίαση του Clevis Joint with Pin and Circlip ξεκίνησε από το κύριο σώμα (τη ράβδο με το διχαλωτό άκρο) χρησιμοποιώντας τις εντολές New Sketch, Line, Tangent Arc, Mirror και Diameter Circle Center. Στην συνέχεια με την εντολή Revolve δημιουργήθηκε η βάση του κύριου σώματος και με την επιλογή Join του Extrude δημιουργήθηκε το πάνω τμήμα ως 3D feature. Ύστερα σχεδιάστηκε με τις εντολές New Sketch, Line, Tangent Arc και Mirror το διχαλωτό άκρο σε σχήμα U στο πάνω τμήμα του κύριου σώματος και δημιουργήθηκε με την επιλογή Cut του Extrude. Έχοντας επιλέξει στο πρώτο 2D σχέδιο το Diameter Circle Center με την επιλογή Cut του Extrude δημιουργήθηκε η οπή μέσα από την οποία περνάει ο πείρος (Pin). Έπειτα με την εντολή Chamfer σχηματίστηκαν τα καμπυλωτά άκρα του πάνω τμήματος του κύριου σώματος και με την εντολή Revolve και Delete Face εξομαλύνθηκε το κάτω άκρο του. Στην συνέχεια σχεδιάστηκε με New Sketch, και Center Diameter Circle η οπή της βάσης του κύριου σώματος, με την εντολή Chamfer καθορίστηκε το βάθος της και με την επιλογή Modeled της εντολής Thread δημιουργήθηκε το σπείρωμα. Τέλος με την εντολή Fillet ομαλοποιήθηκαν οι ακμές του κύριου σώματος (**Εικόνες 46-50**).

Ο πείρος (Pin) σχεδιάστηκε με τις εντολές New Sketch, Line, και Revolve ενώ με την εντολή Fillet ομαλοποιήθηκαν οι ακμές του (**Εικόνες 46-50**).

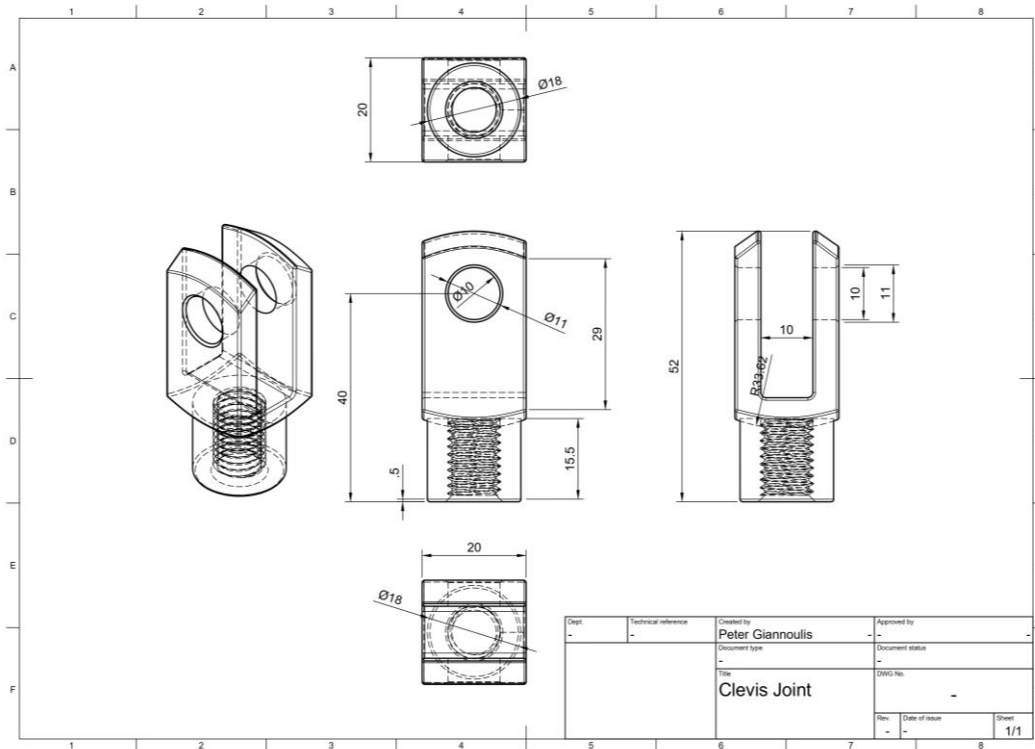
Το κλίπ σύνδεσης (Circlip) σχεδιάστηκε με τις εντολές New Sketch, Diameter Circle Center, Tangent Arc και Fillet, με την εντολή Extrude δημιουργήθηκε ξεχωριστά το 3D feature του κύριου τμήματος και της προεξοχής, και με την εντολή Fillet ομαλοποιήθηκαν οι ακμές του (Εικόνες 46-50).



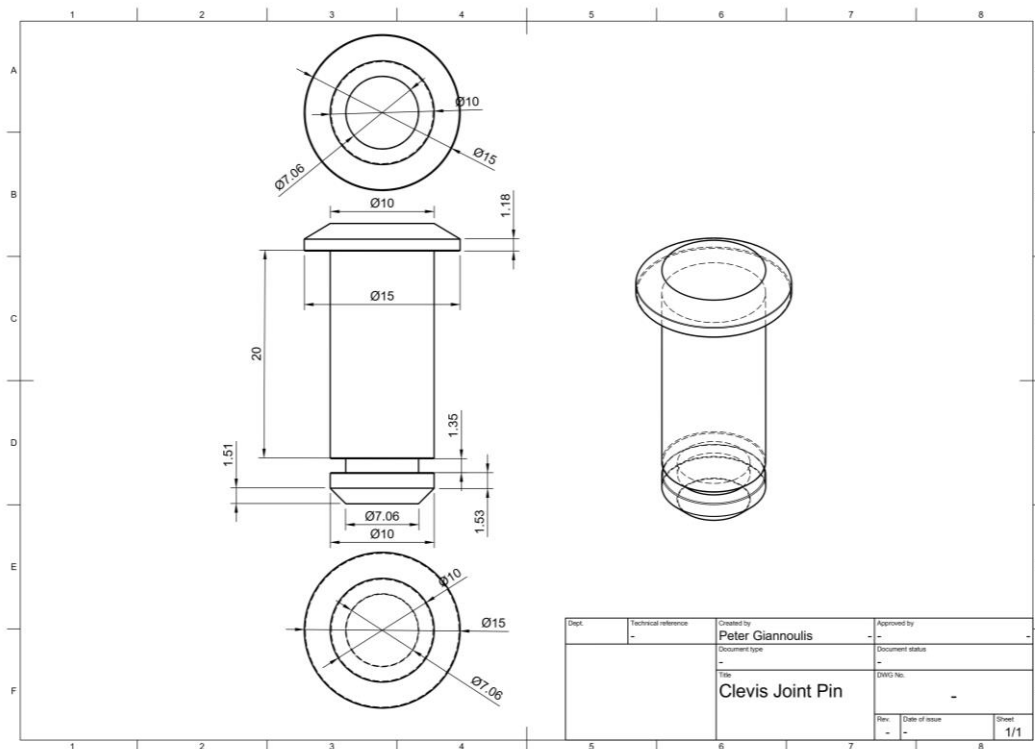
Εικόνα 46: Τα 2D Sketches (Αριστερά) του κύριου σώματος, (Δεξιά) του Pin και (Κάτω) του Circlip, του Clevis Joint στο Fusion 360.



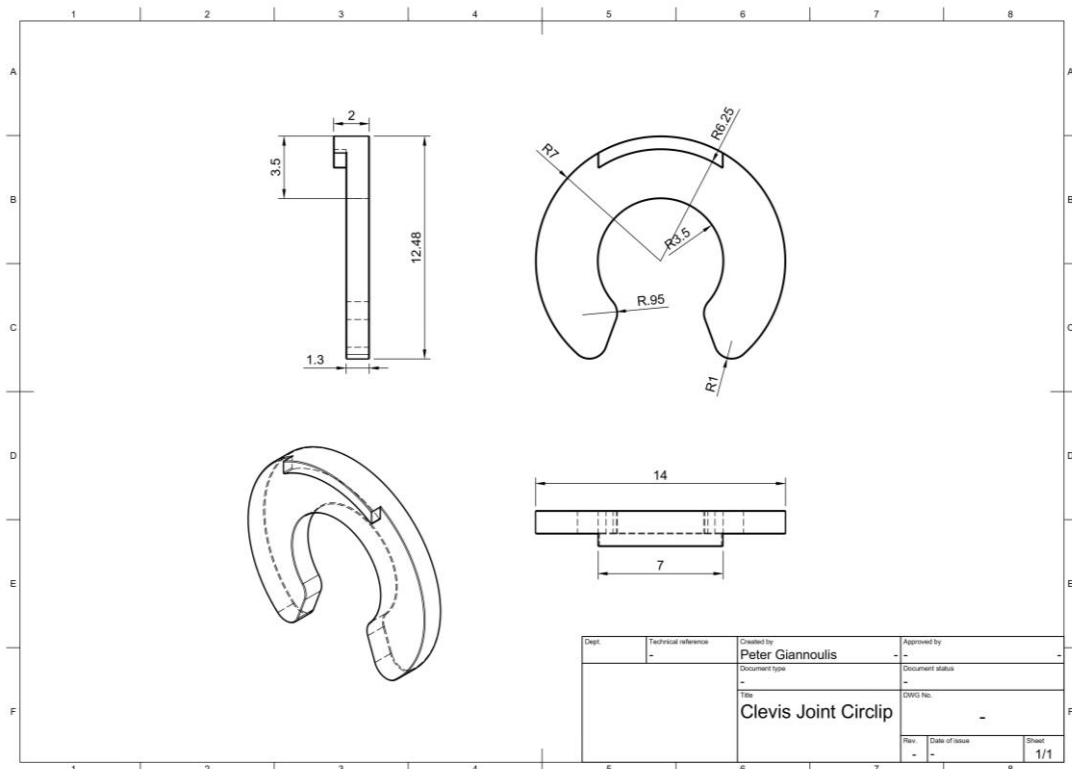
Εικόνα 47: Τα 3D μοντέλα (Αριστερά) του κύριου σώματος, (Δεξιά) του Pin και (Κάτω) Circlip, του Clevis Joint στο Fusion 360.



Εικόνα 48: Το Drawing για το κύριο σώμα του Clevis Joint.



Εικόνα 49: Το Drawing για το Pin του Clevis Joint.



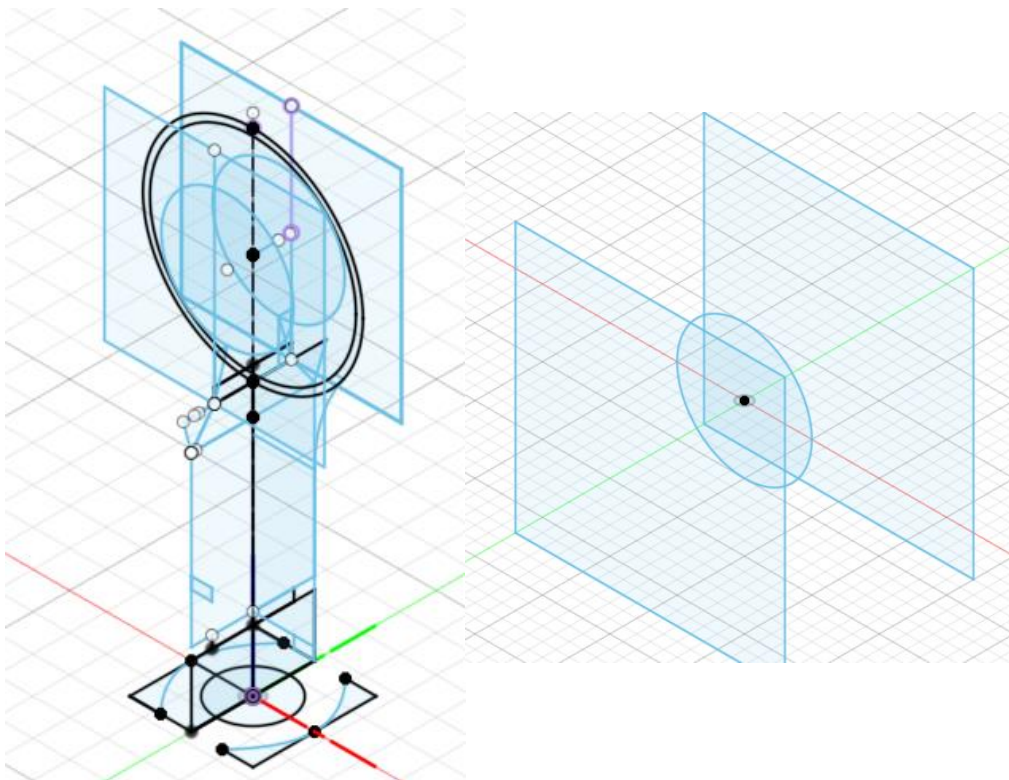
Εικόνα 50: Το Drawing για το Circlip του Clevis Joint.

Rod End Bearing with Female Thread

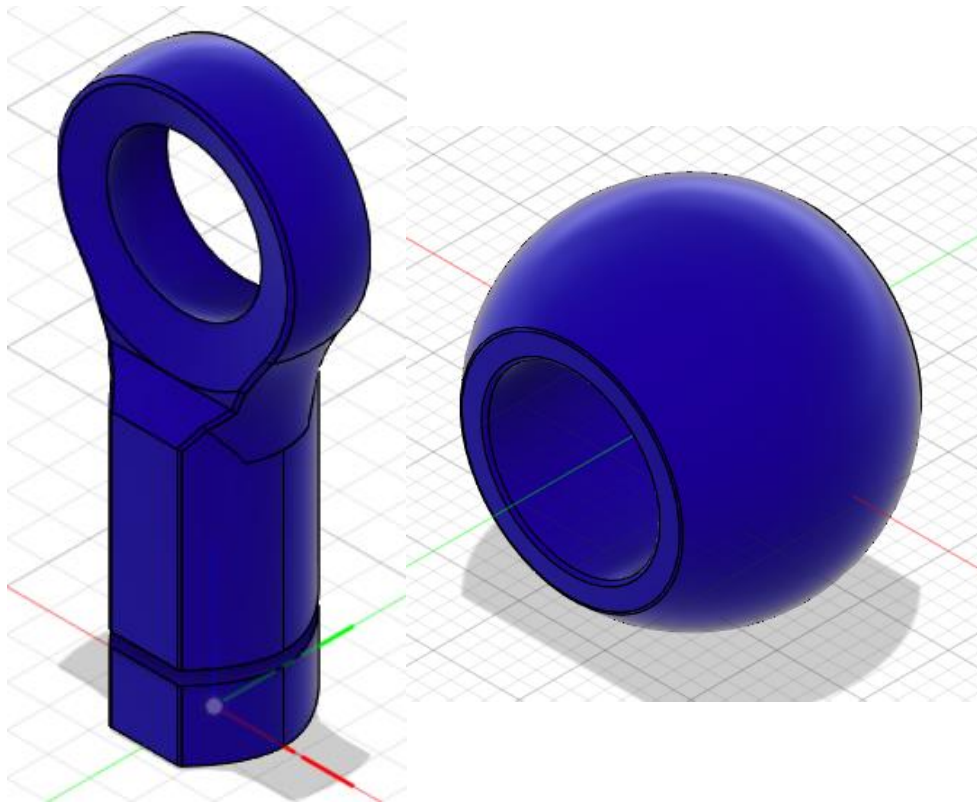
Η σχεδίαση του Rod End Bearing with Female Thread ξεκίνησε από το κύριο σώμα (στέλεχος). Με τις εντολές New Sketch, Line και Mirror σχεδιάστηκαν κάποια στοιχεία της πρώτης όψης και δημιουργήθηκε το 3D feature με την εντολή Extrude. Τα στοιχεία της δεύτερης όψης σχεδιάστηκαν με τις ίδιες εντολές με την προσθήκη των Diameter Circle Center, Tangent Arc και Revolve. Στην συνέχεια με την επιλογή Join της εντολής Sphere κατασκευάστηκε η σφαιρική επιφάνεια του κύριου σώματος και με την εντολή Offset Plane δημιουργήθηκαν δύο νέα επίπεδα, όπως και στο σφαιρικό τριβέα του Pillow Block, στα οποία με New Sketch, 2-Point Rectangle σχεδιάστηκαν δύο επιφάνειες και με την επιλογή Cut του Extrude αφαιρέθηκαν τα δύο απέναντι άκρα της σφαίρας. Στο κυκλικό μέρος σχεδιάστηκε με New Sketch, Line, Diameter Circle Center η οπή του κύριου σώματος καθώς και η καμπυλωτή εσοχή της και δημιουργήθηκε το 3D feature με την επιλογή Cut του Extrude και με την εντολή Revolve. Με την επιλογή Cut της εντολής Sphere δημιουργήθηκε η εσωτερική κοιλότητα μέσα στον οποίο θα τοποθετηθεί ο σφαιρικός τριβέας. Σχεδιάστηκε επίσης στην κάτοψη του κύριου σώματος το κυκλικό σχήμα της βάσης με τις εντολές New Sketch, Line, Tangent Arc και Mirror και δημιουργήθηκε με την επιλογή Cut του Extrude. Στην συνέχεια σχεδιάστηκε με New Sketch, και Center Diameter Circle η οπή της βάσης του κύριου σώματος, με την επιλογή Cut του Extrude καθορίστηκε το βάθος της και με την επιλογή

Μοδελωμένης της εντολής Thread δημιουργήθηκε το σπείρωμα. Τέλος με την εντολή Delete Face αφαιρέθηκαν τα πρόσθετα στοιχεία που εξείχαν και με την εντολή Fillet ομαλοποιήθηκαν οι ακμές του κύριου σώματος (**Εικόνες 51-53**).

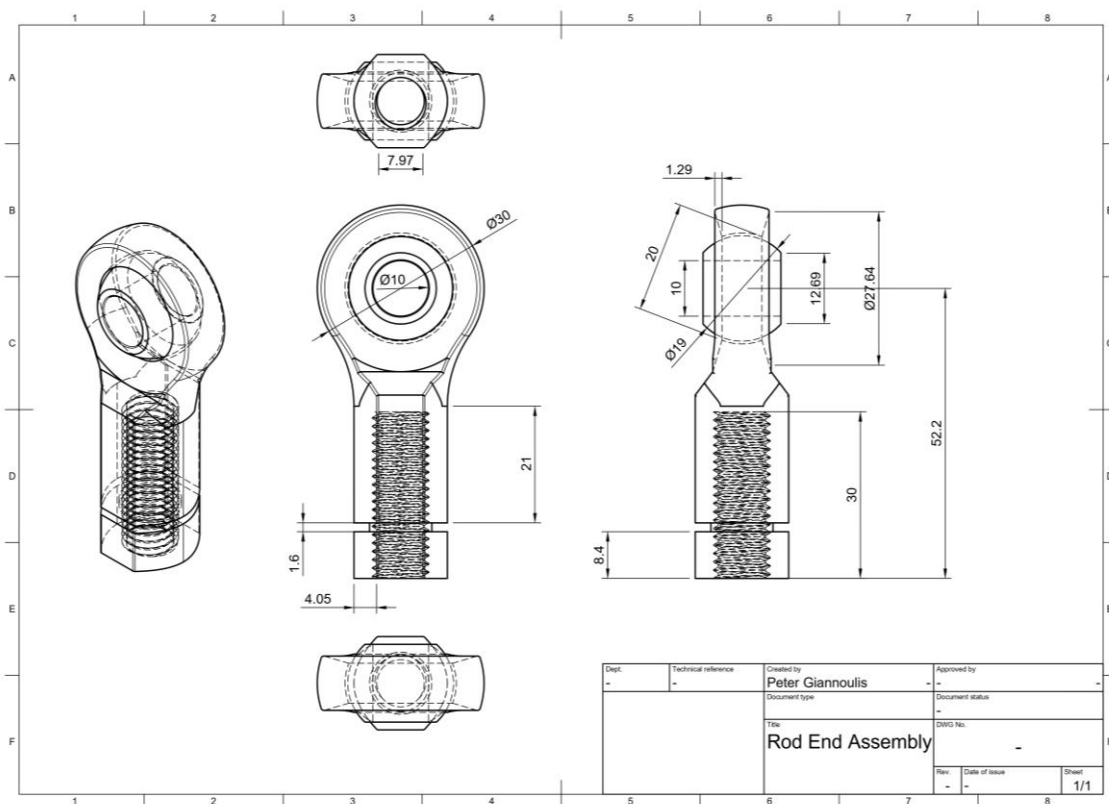
Για το σφαιρικό τριβέα του Rod End Bearing with Female Thread ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία, όπως και για το Pillow Block, καθορίζοντας διαφορετικές διαστάσεις (**Εικόνες 51-53**).



Εικόνα 51: Τα 2D Sketches (Αριστερά) του κύριου σώματος και (Δεξιά) του σφαιρικού τριβέα, του Rod End Bearing with Female Thread στο Fusion 360.



Εικόνα 52: Τα 3D μοντέλα (Αριστερά) του κύριου σώματος και (Δεξιά) του σφαιρικού τριβέα, του Rod End Bearing with Female Thread στο Fusion 360.



Εικόνα 53: Το Drawing για το Rod End Bearing with Female Thread.

Κεφάλαιο 4 – Τρισδιάστατη Εκτύπωση Πολυσυνθέτων Εξαρτημάτων Ναυτιλίας

4.1 Επιλογή Υλικών 3D Εκτύπωσης

Για την εκτύπωση της δομής των πολυσύνθετων εξαρτημάτων-ανταλλακτικών επιλέχθηκε το μπλε PLA (Πολυγαλακτικό Οξύ). Το διάφανο Natural PVA (Πολυβινυλική Αλκοόλη) επιλέχθηκε για τα στηρίγματα και την υποστηρικτική στρώση (Raft) πάνω στην οποία θα εδράσουν τα εκτυπωμένα εξαρτήματα.

Το πολυγαλακτικό οξύ (PLA) (**Εικόνα 54**) είναι ένα από τα πιο χρησιμοποιημένα πολυμερή υλικά για προσθετική κατασκευή καθώς χαρακτηρίζεται από καλή ποιότητα εκτύπωσης, χαμηλή θερμοκρασία τήξης και είναι εύκολο να διαχειριστεί. Το PLA είναι επίσης διαλυτό σε διαλύτες όπως διοξάνιο, θερμό βενζόλιο και τετραϋδροφουράνιο. Οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του PLA διαφέρουν ανάλογα με τον ακριβή τύπο του πολυμερούς, και κυμαίνονται από το άμορφο υαλώδες πολυμερές έως το εξαιρετικά κρυσταλλικό πολυμερές με θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης 60–65 °C, θερμοκρασία τήξης 130-180 °C και μέτρο εφελκυσμού 2,7–16 GPa. Το ανθεκτικό στη θερμότητα PLA μπορεί να αντέξει θερμοκρασίες έως 110 °C. Η θερμοκρασία τήξης μπορεί να αυξηθεί κατά 40–50 °C και η θερμοκρασία εκτροπής θερμότητας (heat deflection temperature) μπορεί να αυξηθεί από περίπου 60 °C έως και 190 °C με φυσική ανάμειξη του πολυμερούς PLA με PDLA (πολυ-D-λακτίδιο).

Η ανόπτηση, η προσθήκη παραγόντων πυρηνοποίησης και η παραγωγή σύνθετων υλικών μπορούν να αλλάξουν τις μηχανικές ιδιότητες του PLA. Ωστόσο, οι βασικές μηχανικές ιδιότητες του PLA κυμαίνονται μεταξύ αυτών του πολυστυρενίου και του PET, εμφανίζοντας κυρίως παρόμοιες ιδιότητες με το PET αλλά χαμηλότερη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας. Το PLA έχει καλή αντοχή στη κρούση, αντιστέκεται σε ξαφνικές δυνάμεις χωρίς να σπάσει και για αυτό το λόγο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υλικό συσκευασίας. Παρουσιάζει καλή αντοχή στην τριβή, και είναι κατάλληλο για εφαρμογές όπου το υλικό μπορεί να έρθει σε επαφή με τραχιές επιφάνειες, και επίσης εμφανίζει καλή αντοχή στην κόπωση.

Η υψηλή επιφανειακή ενέργεια του PLA το καθιστά ιδανικό για τρισδιάστατη εκτύπωση. Το PLA μπορεί επίσης να συγκολληθεί χρησιμοποιώντας διαλύτη διχλωρομεθάνιο, ενώ η ακετόνη μαλακώνει την επιφάνεια του υλικού, καθιστώντας το κολλώδες χωρίς να το διαλύει, ώστε να μπορεί να συγκολληθεί σε άλλη επιφάνεια από PLA. Ο οξικός αιθυλεστέρας μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως οργανικός διαλύτης, διαλύοντας το PLA και χρησιμοποιείται για την αφαίρεση των στηριγμάτων εκτύπωσης PLA ή τον καθαρισμό των κεφαλών (nozzles) τρισδιάστατης εκτύπωσης. Το ανθρακικό προπυλένιο και η πυριδίνη μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως διαλύτες, αλλά είναι λιγότερο αποτελεσματικά από το οξικό αιθυλεστέρα. Το ανθρακικό προπυλένιο είναι το λιγότερο ασφαλές ενώ η πυριδίνη εκπέμπει μια ευδιάκριτη άσχημη μυρωδιά [85, 86].



Εικόνα 54: Υλικό PLA (Blue PLA) για χρήση σε τρισδιάστατη εκτύπωση [87].

Η πολυβινυλική αλκοόλη (PVA) (**Εικόνα 55**) είναι ένα προσαρμόσιμο πολυμερές με διάφορες μηχανικές ιδιότητες που το καθιστούν κατάλληλο για μεγάλη σειρά εφαρμογών. Η βασική του χρήση είναι ως υλικό για υποστηρίγματα ή περίπλοκες γεωμετρίες με εσωτερικές κοιλότητες και λεπτομέρειες καθώς διαλύεται εύκολα στο νερό. Στην περίπτωση των πολυσύνθετων εξαρτημάτων θεωρήθηκε ως το καταλληλότερο υλικό για το γέμισμα των διάκενων μεταξύ των επιμέρους εξαρτημάτων, επιτρέποντας τη λειτουργία της άρθρωσης μετά τη διάλυσή του στο νερό.

Οι μηχανικές ιδιότητες του PVA μπορεί να ποικίλλουν με βάση παράγοντες όπως ο βαθμός πολυμερισμού του, το μοριακό βάρος και οι συνθήκες επεξεργασίας. Το PVA συνήθως παρουσιάζει καλή αντοχή σε εφελκυσμό, και είναι κατάλληλο για εφαρμογές όπου η αντοχή και η ανθεκτικότητα είναι σημαντικές, όπως σε ίνες και μεμβράνες. Έχει σχετικά μεγάλη ευαισθησία στη θραύση (high susceptibility to breakage), και για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου απαιτείται προσοχή στην λεπτομέρεια, όπως για παράδειγμα σε υφάσματα. Το PVA είναι ένα σχετικά μαλακό υλικό, ενώ η σκληρότητά του μπορεί να επηρεαστεί από παράγοντες όπως ο βαθμός πολυμερισμού και η παρουσία πλαστικοποιητών.

Επίσης έχει καλή αντοχή στον ερπυσμό, δηλαδή στη σταδιακή παραμόρφωση υπό σταθερό φορτίο με την πάροδο του χρόνου. Αυτή η ιδιότητα είναι απαραίτητη σε εφαρμογές όπου η σταθερότητα των διαστάσεων είναι σημαντική. Το PVA έχει συνήθως χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής, που σημαίνει ότι διαστέλλεται και συστέλλεται ελάχιστα με τις αλλαγές στη θερμοκρασία. Αυτή η ιδιότητα είναι επιθυμητή σε εφαρμογές όπου η σταθερότητα των διαστάσεων είναι σημαντική [88, 89].



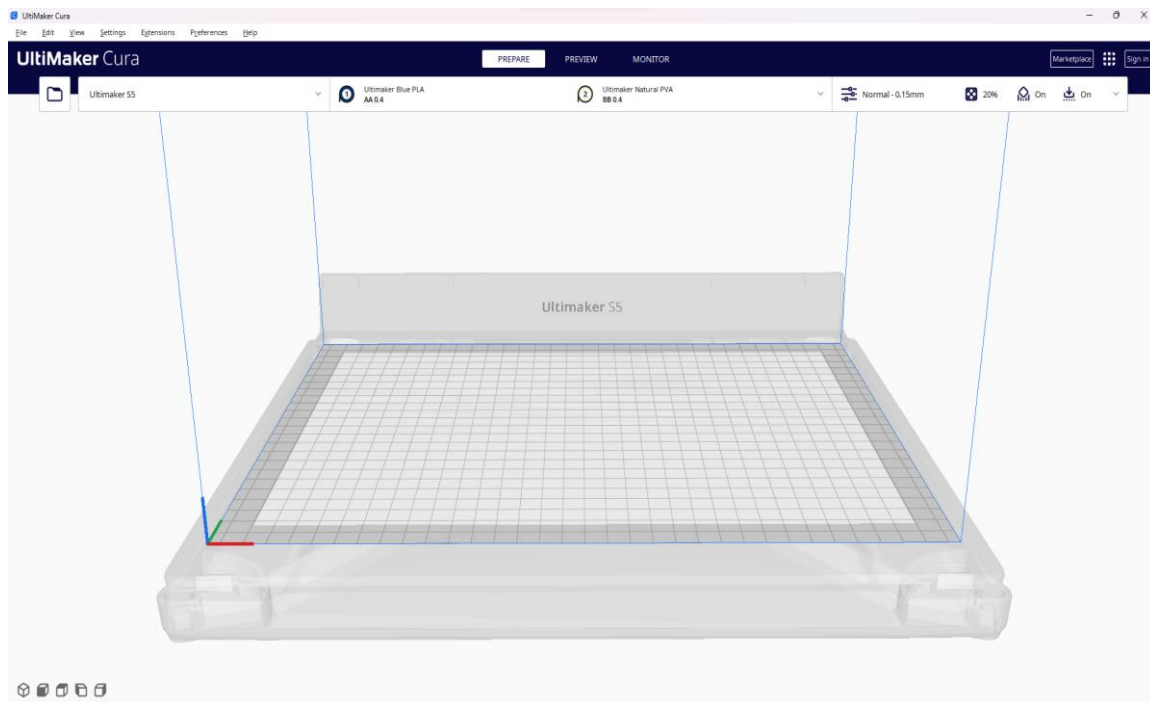
Εικόνα 55: Υλικό PVA (Natural PVA) για χρήση σε τρισδιάστατη εκτύπωση [90].

4.2 Καθορισμός Παραμέτρων Εκτύπωσης

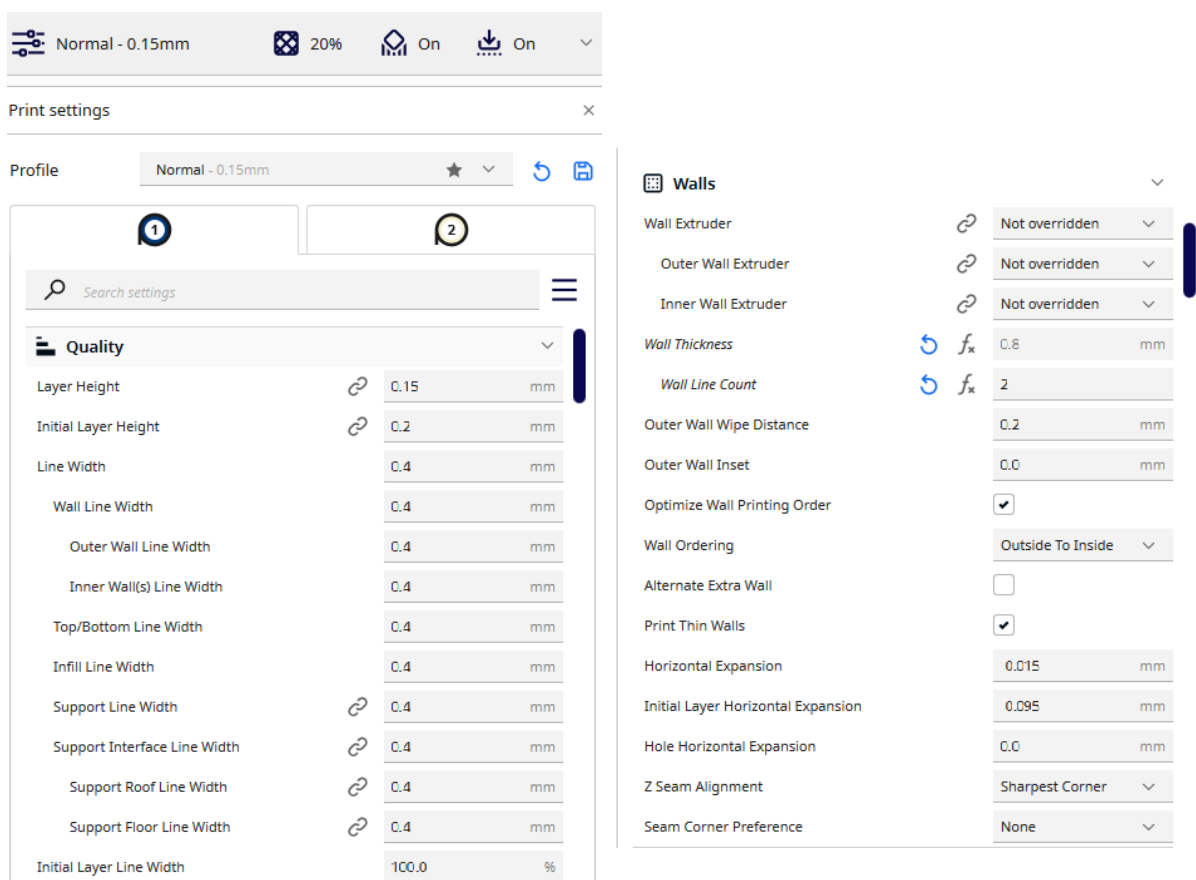
Για την προετοιμασία των εξαρτημάτων ώστε να γίνει σωστά η τρισδιάστατη εκτύπωση τους και να επιλεγθούν οι επιθυμητές παράμετροι εκτύπωσης, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Ultimaker Cura. Το συγκεκριμένο λογισμικό είναι φιλικό προς το χρήστη, κατάλληλο τόσο για αρχάριους χρήστες της τρισδιάστατης εκτύπωσης όσο και για επαγγελματίες, και παρέχεται ως δωρεάν λογισμικό σε εκπαιδευτικά ιδρύματα. Αναπτύχθηκε από την εταιρεία Ultimaker, και χρησιμεύει ως ένα ολοκληρωμένο εργαλείο για τη μετάφραση των ψηφιακών 3D μοντέλων με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να κατασκευαστούν από ένα 3D εκτυπωτή. Με το απλοποιημένο περιβάλλον διεπαφής (user interface), οι χρήστες μπορούν εύκολα να εισάγουν, να τοποθετήσουν, να αλλάξουν τη κλίμακα και να τεμαχίσουν τα τρισδιάστατα μοντέλα τους, δημιουργώντας τον κώδικα G ο οποίος είναι απαραίτητος για τη διαδικασία εκτύπωσης.

Το περιβάλλον του λογισμικού φαίνεται στην **Εικόνα 56**. Το Ultimaker Cura υποστηρίζει ένα ευρύ φάσμα 3D εκτυπωτών, παρέχοντας προδιαμορφωμένες ρυθμίσεις για διάφορα μοντέλα και επιτρέποντας στους χρήστες να προσαρμόζουν τις παραμέτρους για συγκεκριμένες απαιτήσεις εκτύπωσης. Παρέχει δυνατότητες όπως επιλογή υλικών, αυτόματη δημιουργία υποστηρικτικού υλικού, αυτόματη δημιουργία μοτίβων πλήρωσης και καθορισμό ύψους στρώματος, πάχους τοιχωμάτων, θερμοκρασιών υλικών και εκτύπωσης, δίνοντας τη δυνατότητα στους χρήστες να βελτιστοποιούν την ποιότητα και την ταχύτητα εκτύπωσης.

Στις παρακάτω **Εικόνες 57-60** παρουσιάζονται οι παράμετροι εκτύπωσης που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτύπωση των εξαρτημάτων. Κάποιες παράμετροι διαφοροποιούνται ανάλογα με το υλικό, όπως η θερμοκρασία εκτύπωσης, η πυκνότητα του μοτίβου πλήρωσης, κ.α.



Εικόνα 56: Το περιβάλλον του λογισμικού τρισδιάστατης εκτύπωσης Ultimaker Cura.



Εικόνα 57: Παράμετροι εκτύπωσης σχετικές με την ποιότητα εκτύπωσης και το πάχος τοιχωμάτων για το υλικό Blue PLA.

Top/Bottom	
Top Surface Skin Layers	1
Top Surface Skin Line Width	0.4 mm
Top Surface Skin Pattern	Lines
Monotonic Top Surface Order	<input checked="" type="checkbox"/>
Top Surface Skin Line Directions	□
Top/Bottom Extruder	Not overridden
Top/Bottom Thickness	1.0 mm
Top Thickness	1.0 mm
Top Layers	3 f_x
Bottom Thickness	1.0 mm
Bottom Layers	3 f_x
Top/Bottom Pattern	Lines
Bottom Pattern Initial Layer	Lines
Monotonic Top/Bottom Order	<input type="checkbox"/>
Top/Bottom Line Directions	□
No Skin in Z Gaps	<input type="checkbox"/>
Extra Skin Wall Count	1
Enable Ironing	<input type="checkbox"/>
Infill	
Infill Extruder	Not overridden
Infill Density	20.0 %
Infill Line Distance	6.0 mm
Infill Pattern	Triangles
Connect Infill Lines	<input checked="" type="checkbox"/>
Infill Line Directions	□
Infill X Offset	0.0 mm
Infill Y Offset	0.0 mm
Randomize Infill Start	<input type="checkbox"/>
Infill Line Multiplier	1
Infill Overlap Percentage	0.0 %
Infill Overlap	0.0 mm
Infill Wipe Distance	0.0 mm
Infill Layer Thickness	0.15 mm
Gradual Infill Steps	0
Infill Before Walls	<input checked="" type="checkbox"/>
Minimum Infill Area	0.0 mm ²
Infill Support	<input type="checkbox"/>

Skin Overlap Percentage	15.0 %
Skin Overlap	0.06 mm
Skin Removal Width	0.8 mm
Top Skin Removal Width	0.8 mm
Bottom Skin Removal Width	0.8 mm
Skin Expand Distance	0.8 mm
Top Skin Expand Distance	0.8 mm
Bottom Skin Expand Distance	0.8 mm
Maximum Skin Angle for Expansion	90.0 °
Minimum Skin Width for Expansion	0.0 mm

Skin Edge Support Thickness	0.6 mm
Skin Edge Support Layers	4

Εικόνα 58: Παράμετροι εκτύπωσης σχετικές με τον αριθμό των πάνω/κάτω στρώσεων και το μοτίβο πλήρωσης για το υλικό Blue PLA.

Support	
Generate Support	<input checked="" type="checkbox"/>
Support Extruder	Extruder 2
Support Infill Extruder	Extruder 2
First Layer Support Extruder	Extruder 2
Support Interface Extruder	Extruder 2
Support Roof Extruder	Extruder 2
Support Floor Extruder	Extruder 2
Support Structure	Normal
Support Placement	Everywhere
Support Overhang Angle	45.0 °
Support Pattern	Triangles
Support Wall Line Count	0
Support Interface Wall Line Count	0
Support Roof Wall Line Count	0
Support Bottom Wall Line Count	0
Connect Support Lines	<input checked="" type="checkbox"/>
Support Density	80.0 %
Support Line Distance	1.5 mm
Initial Layer Support Line Distance	1.5 mm
Support Z Distance	0.0 mm
Support Top Distance	0.0 mm
Support Bottom Distance	0.0 mm
Support X/Y Distance	0.7 mm
Support Distance Priority	Z overrides X/Y
Minimum Support X/Y Distance	0.2 mm
Support Stair Step Height	0.0 mm
Support Join Distance	2.0 mm
Support Horizontal Expansion	0.8 mm
Support Infill Layer Thickness	0.3 mm
Gradual Support Infill Steps	2
Gradual Support Infill Step Height	0.6 mm
Minimum Support Area	0.0 mm ²
Enable Support Interface	<input checked="" type="checkbox"/>
Enable Support Roof	<input checked="" type="checkbox"/>
Enable Support Floor	<input checked="" type="checkbox"/>
Support Interface Thickness	0.3 mm
Support Roof Thickness	0.3 mm

Support Floor Thickness	0.3 mm
Support Interface Resolution	0.15 mm
Support Interface Density	100.0 %
Support Roof Density	100.0 %
Support Floor Density	100.0 %
Support Interface Pattern	Triangles
Minimum Support Interface Area	1.0 mm ²
Use Towers	<input checked="" type="checkbox"/>
Tower Diameter	3.0 mm
Maximum Tower-Supported Diameter	3.0 mm
Tower Roof Angle	0 °

Εικόνα 59: Παράμετροι εκτύπωσης σχετικές με το υποστηρικτικό υλικό Natural PVA.

Material			
Printing Temperature	f_x	210.0	°C
Printing Temperature Initial Layer		210.0	°C
Initial Printing Temperature		200.0	°C
Final Printing Temperature	f_x	200.0	°C
Extrusion Cool Down Speed Modifier		0.7	°C/s
Build Plate Temperature		60	°C
Build Plate Temperature Initial Layer		60	°C
Scaling Factor Shrinkage Compensation		100.1	%
Horizontal Scaling Factor Shrinkage Compensation		100.1	%
Vertical Scaling Factor Shrinkage Compensation		100.1	%
Flow		100.0	%
Wall Flow		100.0	%
Outer Wall Flow		100.0	%
Inner Wall(s) Flow		100.0	%
Top/Bottom Flow		95.0	%
Top Surface Skin Flow		100.0	%
Infill Flow		100.0	%
Support Flow		100.0	%
Support Interface Flow		95.0	%
Support Roof Flow		95.0	%
Support Floor Flow		95.0	%
Prime Tower Flow		100.0	%
Initial Layer Flow		100.0	%
Initial Layer Inner Wall Flow		95.0	%
Initial Layer Outer Wall Flow		110.0	%
Initial Layer Bottom Flow		90.0	%
Standby Temperature	f_x	100.0	°C

Build Plate Adhesion			
Enable Prime Blob		<input type="checkbox"/>	
Build Plate Adhesion Type		Raft	
Build Plate Adhesion Extruder		Extruder 2	
Raft Top Extruder		Extruder 2	
Raft Extra Margin		15.0	mm
Raft Smoothing		5.0	mm
Raft Air Gap		0.0	mm
Raft Top Layers		1	
Raft Top Layer Thickness		0.15	mm
Raft Top Line Width		0.4	mm
Raft Top Spacing		0.4	mm
Raft Middle Layers		1	
Raft Middle Thickness		0.225	mm
Raft Middle Line Width		0.6	mm
Raft Middle Spacing		0.8	mm
Raft Base Thickness		0.3	mm
Raft Base Line Width		0.8	mm
Raft Base Line Spacing		1.6	mm
Raft Print Speed		15.0	mm/s
Raft Print Acceleration		3500.0	mm/s ²
Raft Print Jerk		20.0	mm/s
Raft Fan Speed		0.0	%

Εικόνα 60: Παράμετροι εκτύπωσης σχετικές με το υλικό Blue PLA και την υποστηρικτική στρώση εκτύπωσης (Raft).

Στην **Εικόνα 61** σημειώνονται με βελιάκια οι βασικές διαφορές στις παραμέτρους εκτύπωσης του υποστηρικτικού υλικού PVA σε σχέση με το κύριο υλικό Blue PLA.

Top/Bottom		Material	
Top Surface Skin Layers	1	Printing Temperature	220.0 °C
Top Surface Skin Line Width	0.4 mm	Printing Temperature Initial Layer	220.0 °C
Top Surface Skin Pattern	Lines	Initial Printing Temperature	215.0 °C
Monotonic Top Surface Order	<input checked="" type="checkbox"/>	Final Printing Temperature	215.0 °C
Top Surface Skin Line Directions	□	Extrusion Cool Down Speed Modifier	0.7 °C/s
Top/Bottom Extruder	Not overridden	Build Plate Temperature	60 °C
Top/Bottom Thickness	1.0 mm	Build Plate Temperature Initial Layer	60 °C
Top Thickness	1.0 mm	Scaling Factor Shrinkage Compensation	100.1 %
Top Layers	7	Horizontal Scaling Factor Shrinkage Compensation	100.1 %
Bottom Thickness	1.0 mm	Vertical Scaling Factor Shrinkage Compensation	100.1 %
Bottom Layers	7	Flow	100.0 %
Top/Bottom Pattern	Lines	Wall Flow	100.0 %
Bottom Pattern Initial Layer	Lines	Outer Wall Flow	100.0 %
Monotonic Top/Bottom Order	<input type="checkbox"/>	Inner Wall(s) Flow	100.0 %
Top/Bottom Line Directions	□	Top/Bottom Flow	95.0 %
No Skin in Z Gaps	<input type="checkbox"/>	Top Surface Skin Flow	100.0 %
Extra Skin Wall Count	1	Infill Flow	100.0 %
Enable Ironing	<input type="checkbox"/>	Support Flow	100.0 %

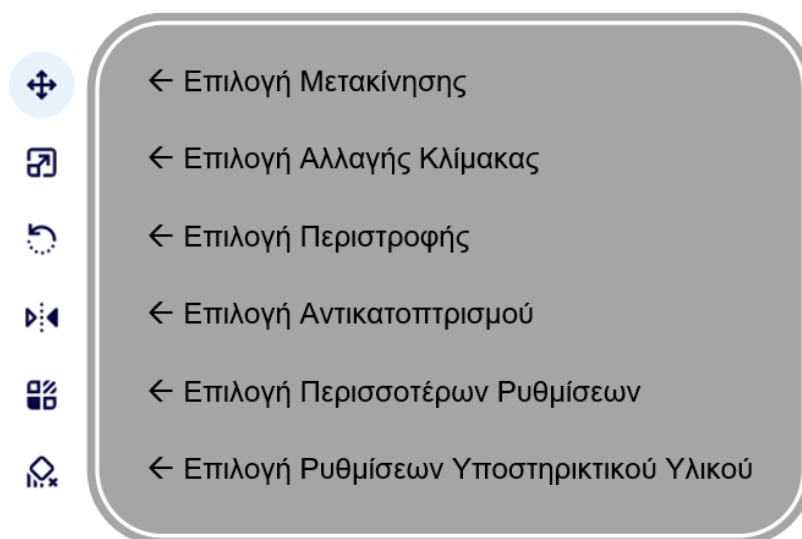
Support Interface Flow	95.0 %
Support Roof Flow	95.0 %
Support Floor Flow	95.0 %
Prime Tower Flow	100.0 %
Initial Layer Flow	100.0 %
Initial Layer Inner Wall Flow	95.0 %
Initial Layer Outer Wall Flow	110.0 %
Initial Layer Bottom Flow	90.0 %
Standby Temperature	115.0 °C

Εικόνα 61: Διαφοροποίηση παραμέτρων εκτύπωσης για το υλικό PVA

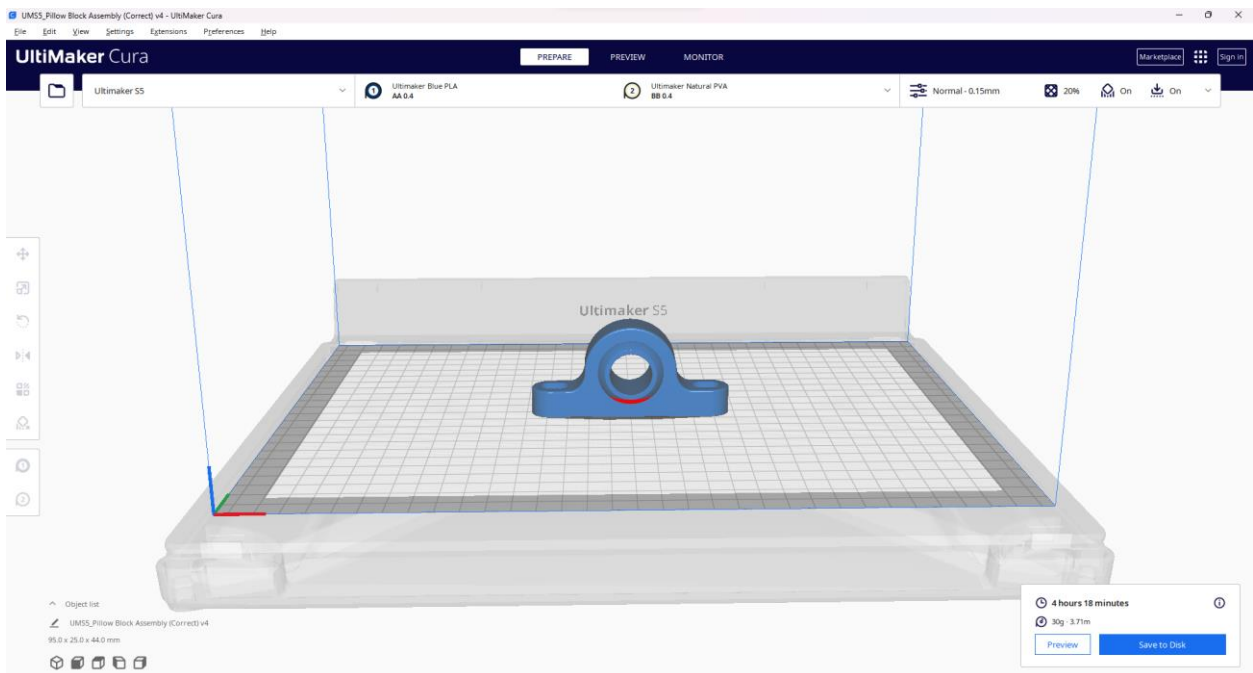
4.3 Προσομοίωση της Διαδικασίας Εκτύπωσης

Η διαδικασία που ακολουθεί ο χρήστης ξεκινάει με την εισαγωγή των αρχείων STL των εξαρτημάτων προς εκτύπωση τα οποία έχουν γίνει Export από το πρόγραμμα Fusion 360 της Autodesk. Η εισαγωγή των ψηφιακών μοντέλων πραγματοποιείται είτε επιλέγοντας το φάκελο αριστερά στο μενού, είτε με Drag-and-Drop του αρχείου στο χώρο εκτύπωσης του λογισμικού. Επισημαίνεται ότι τα αρχεία πρέπει να είναι σε μορφή STL, OBJ, X3D, 3MF, BMP, GIF, JPG, ή PNG.

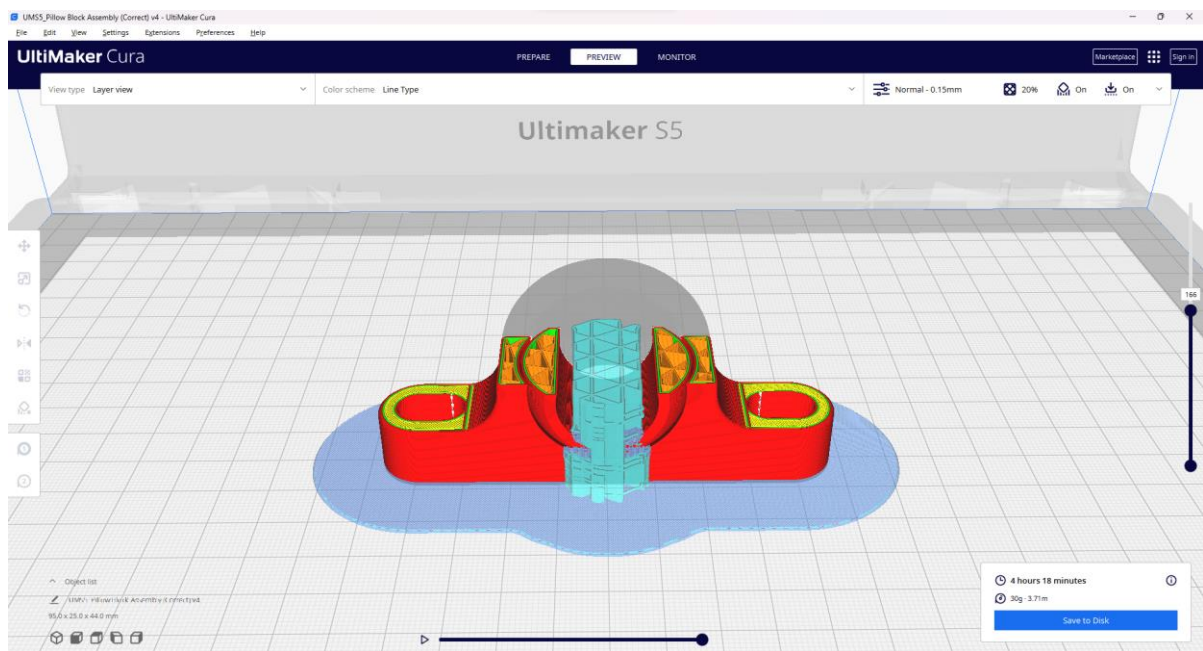
Στην συνέχεια επιλέγονται από τον χρήστη οι κατάλληλες εντολές (**Εικόνα 62**) για την προετοιμασία του 3D μοντέλου και τη βέλτιστη τοποθέτησή του στην πλατφόρμα εκτύπωσης. Στη συνέχεια γίνεται η επιλογή του κύριου υλικού και του υποστηρικτικού υλικού και καθορίζονται οι ρυθμίσεις εκτύπωσης (custom, normal, ή advanced). Επιλέγεται η εντολή Slice για την προσομοίωση και τον αυτόματο υπολογισμό του χρόνου εκτύπωσης και του υλικού που θα χρειαστεί και μετά η εντολή Preview με την οποία γίνεται προεπισκόπηση της διαδικασίας εκτύπωσης και έλεγχος της κίνησης της κεφαλής σε κάθε στρώση ξεχωριστά. Επιλέγεται Save to Disc ή Save to Removable Drive για την αποθήκευση του αρχείου εκτύπωσης σε μορφή κατανοητή από τον εκτυπωτή δίνοντας ονομασία στο αρχείο *.ufp και μεταφέρεται στο USB Stick του εκτυπωτή και στη συνέχεια στον 3D εκτυπωτή. Στις **Εικόνες 63-72** απεικονίζονται οι προσομοιώσεις τις εκτύπωσης στην οθόνη του Ultimaker Cura για τα 3 πολυσύνθετα εξαρτήματα – ανταλλακτικά.



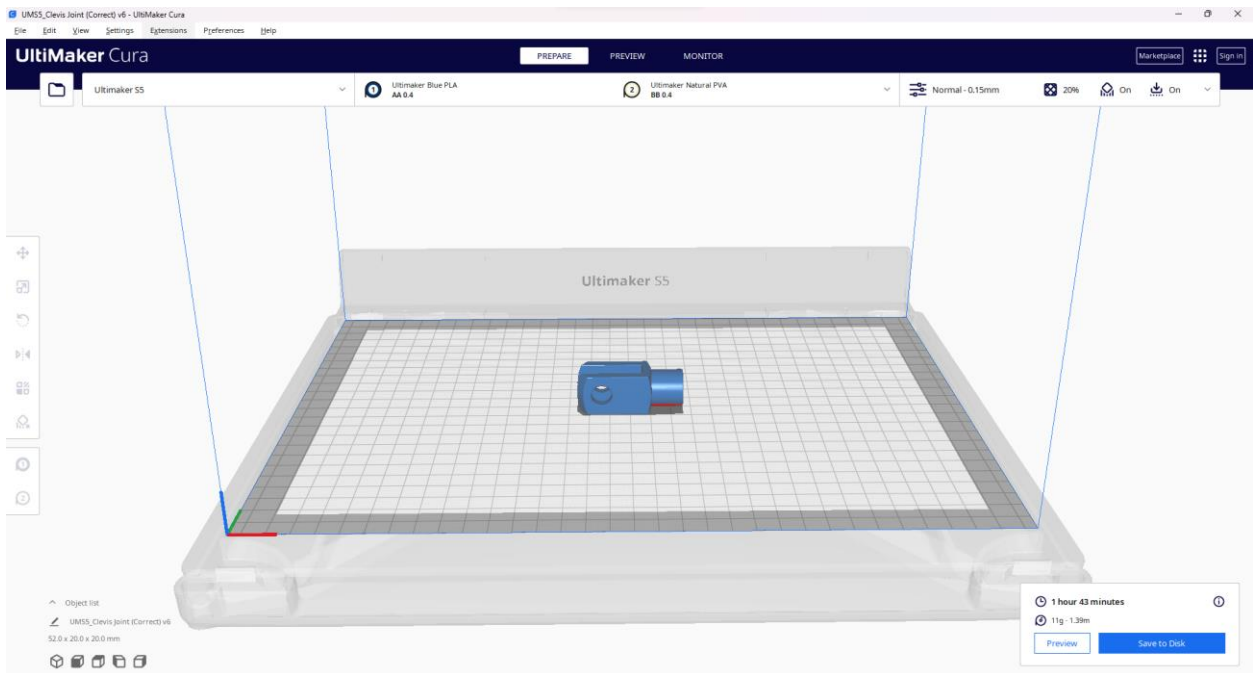
Εικόνα 62: Επιλογές για την προετοιμασία του 3D μοντέλου στο χώρο εκτύπωσης.



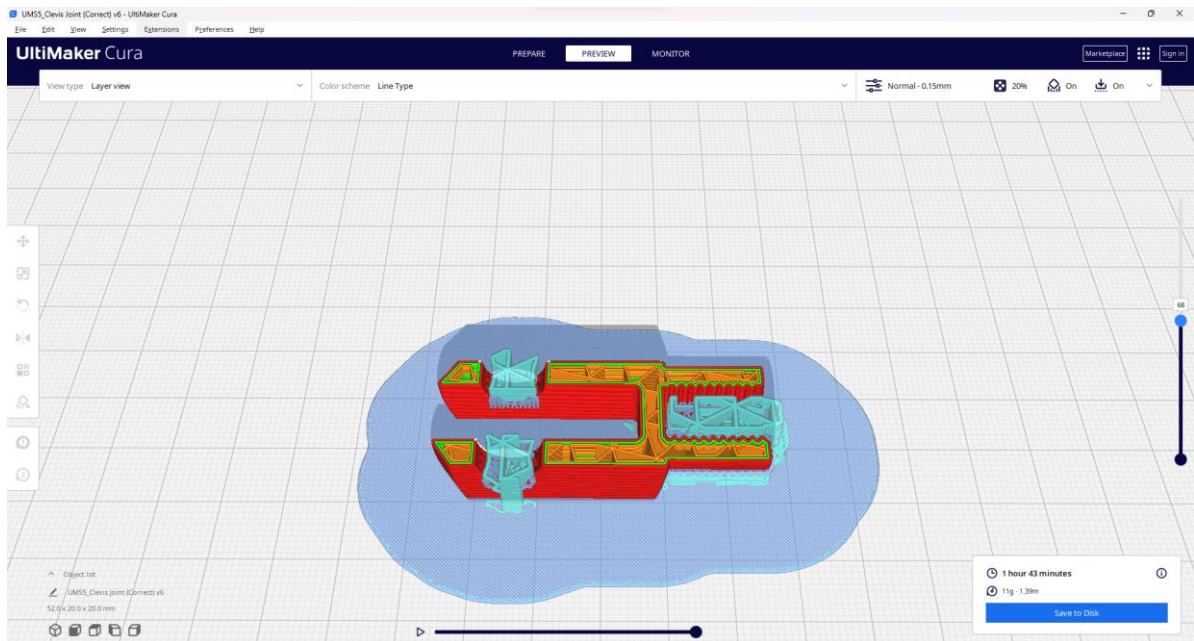
Εικόνα 63: Το Pillow Block Bearing with Spherical Ball με το χρόνο εκτύπωσης μετά από Slicing στο Ultimaker Cura.



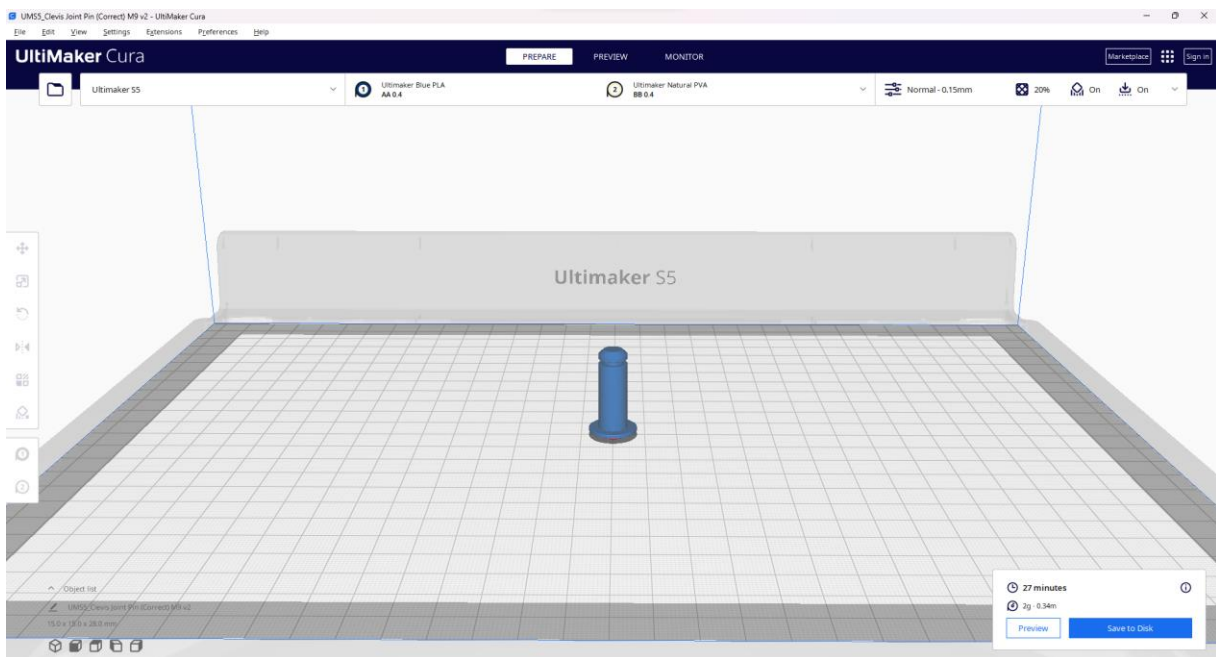
Εικόνα 64: Προσομοίωση της 3D εκτύπωσης του Pillow Block Bearing with Spherical Ball στο Ultimaker Cura.



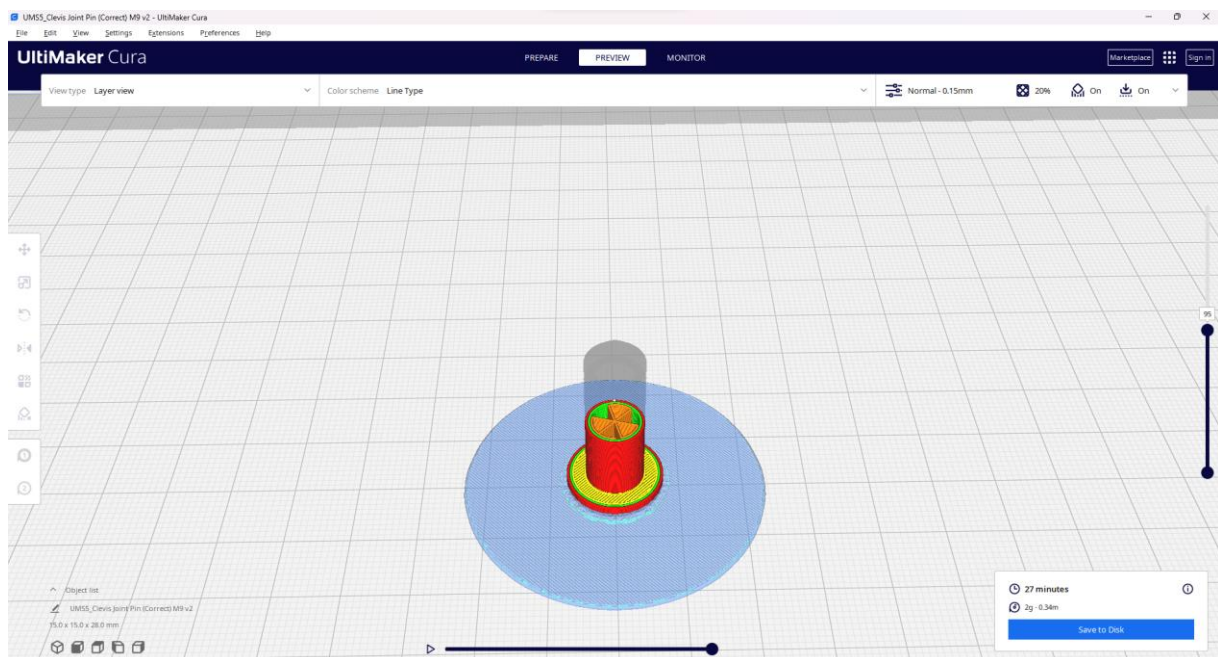
Εικόνα 65: Το Clevis Joint με το χρόνο εκτύπωσης μετά από Slicing στο Ultimaker Cura.



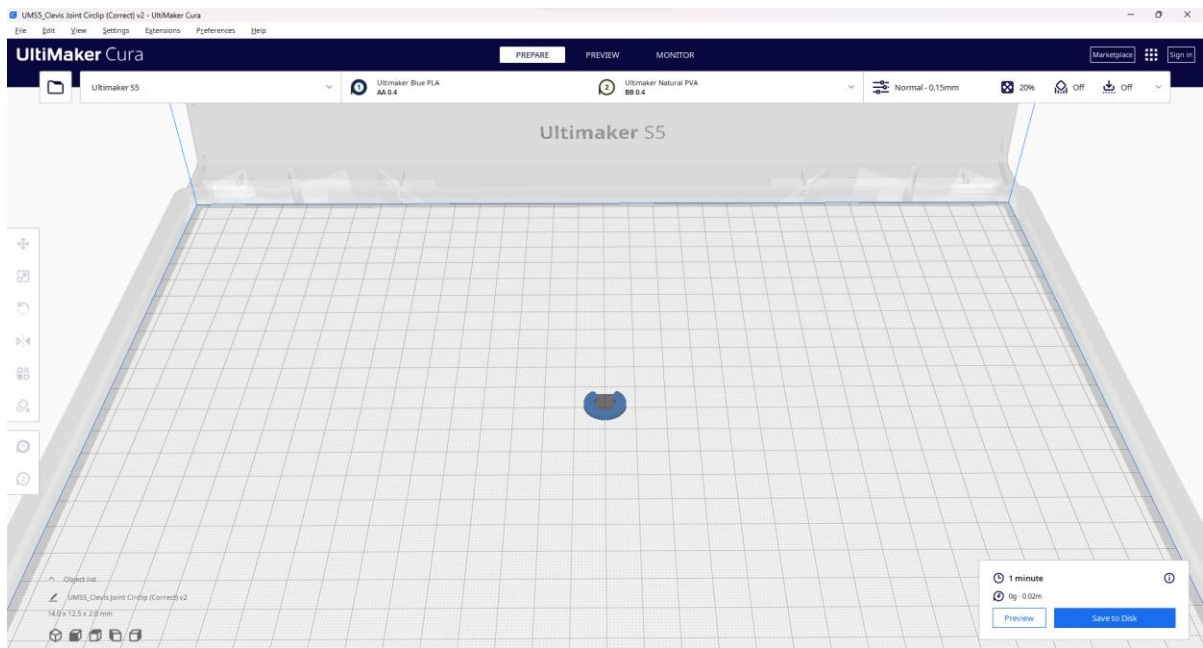
Εικόνα 66: Προσομοίωση της 3D εκτύπωσης του Clevis Joint στο Ultimaker Cura.



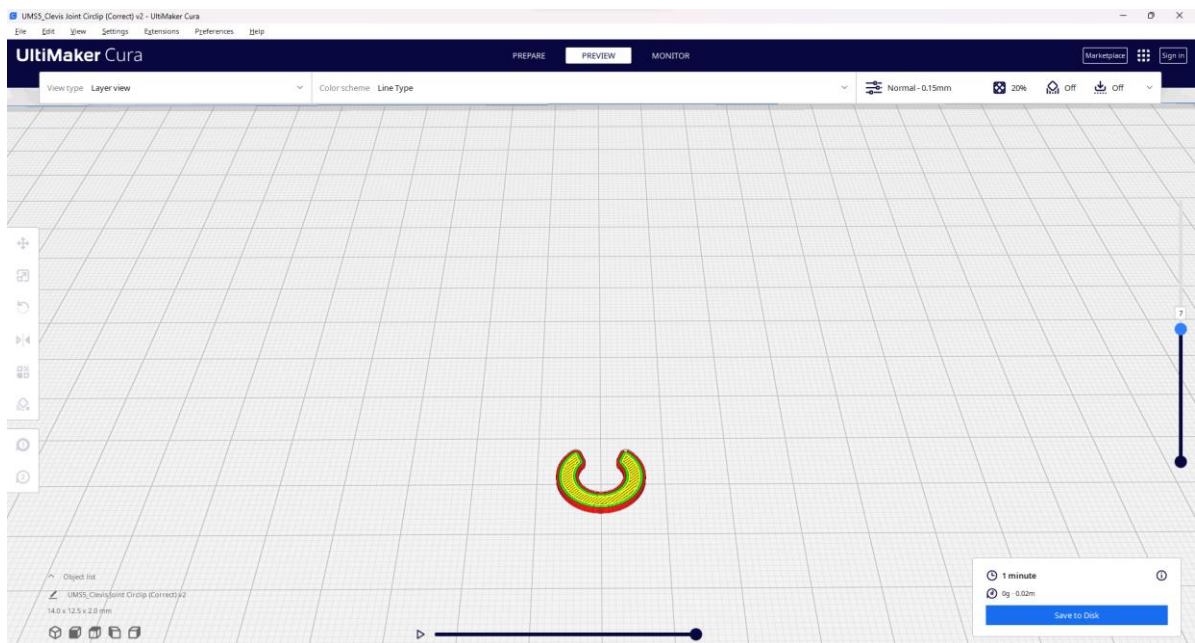
Εικόνα 67: Το Pin του Clevis Joint με το χρόνο εκτύπωσης μετά από Slicing στο Ultimaker Cura.



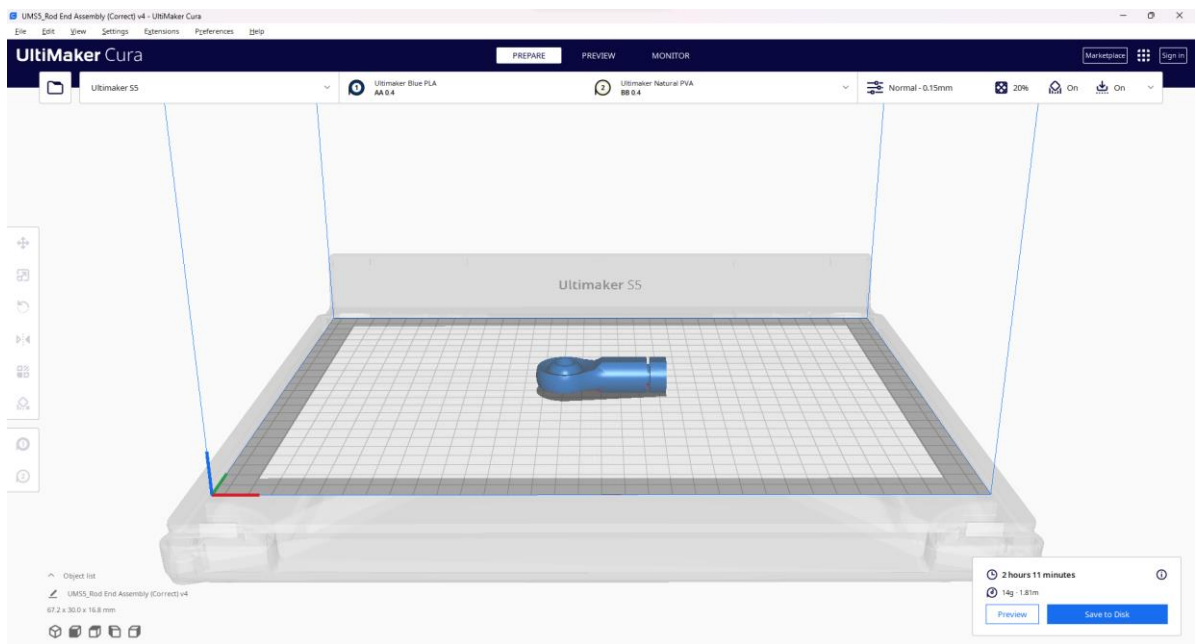
Εικόνα 68: Προσομοίωση της 3D εκτύπωσης του Pin του Clevis Joint στο Ultimaker Cura.



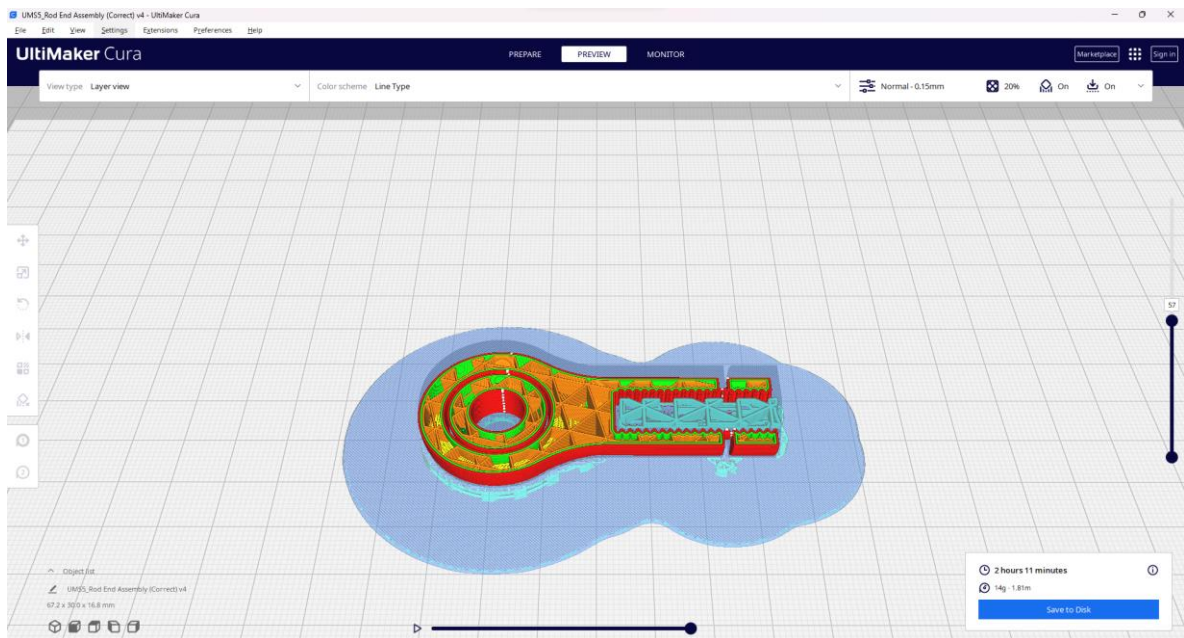
Εικόνα 69: Το Circlip του Clevis Joint με το χρόνο εκτύπωσης μετά από Slicing στο Ultimaker Cura.



Εικόνα 70: Προσομοίωση της 3D εκτύπωσης του Circlip του Clevis Joint στο Ultimaker Cura.



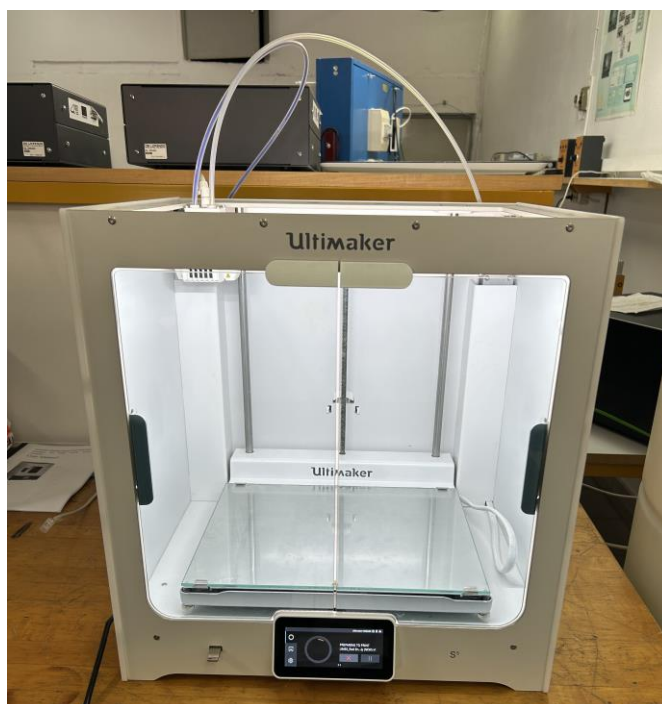
Εικόνα 71: Το Rod End Bearing with Female Thread με το χρόνο εκτύπωσης μετά από Slicing στο Ultimaker Cura.



Εικόνα 72: Προσομοίωση της 3D εκτύπωσης του Rod End Bearing with Female Thread στο Ultimaker Cura.

4.4 Περιγραφή του 3D Εκτυπωτή

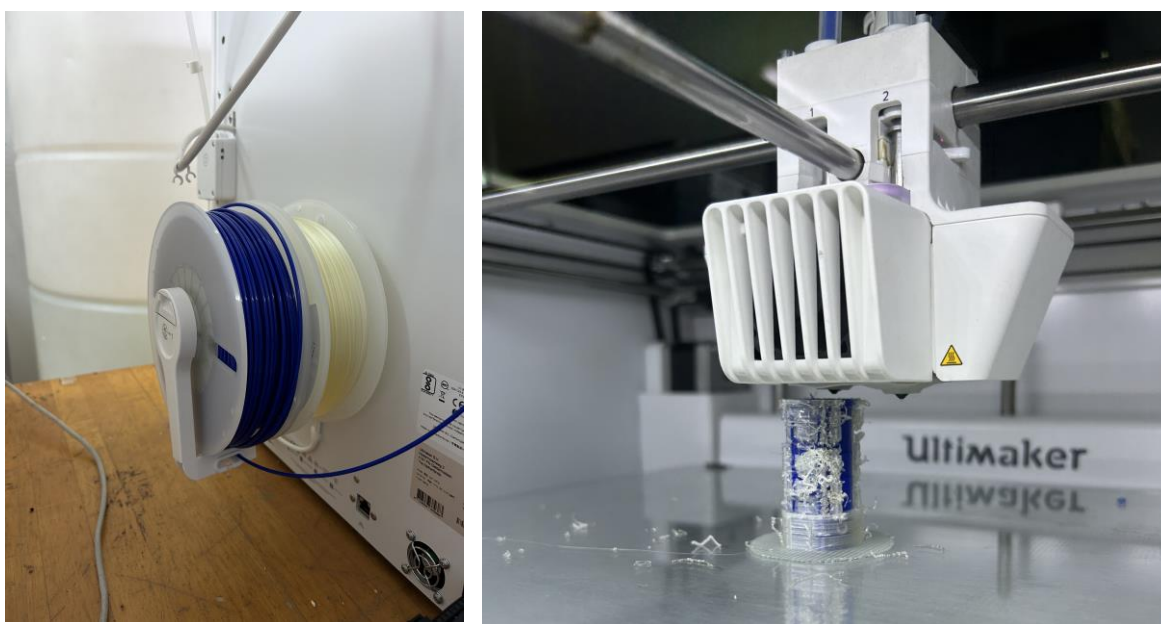
Για τη διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης, χρησιμοποιήθηκε ο 3D εκτυπωτής που διαθέτει το Τμήμα Ναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Ο συγκεκριμένος 3D εκτυπωτής είναι ο Ultimaker S5 της εταιρίας Ultimaker Original (**Εικόνα 73**). Ο εκτυπωτής διαθέτει κλειστή πρόσοψη με γυάλινες προστατευτικές πόρτες, διασφαλίζοντας ότι η εσωτερική θερμοκρασία και η ροή του αέρα είναι βέλτιστες. Είναι επίσης εξοπλισμένος με οθόνη αφής που καθοδηγεί τη λειτουργία του εκτυπωτή και εμφανίζει λεπτομερείς πληροφορίες για κάθε βήμα που πρέπει να ακολουθήσει ο χρήστης. Έχει μεγάλο όγκο κατασκευής 330 x 240 x 300 mm, ενώ διαθέτει δύο ανεξάρτητες κεφαλές εκτύπωσης για διπλή εξώθηση υλικού. Επιτυγχάνει διαφορετικά χαρακτηριστικά εκτύπωσης χρησιμοποιώντας διαφορετικά μεγέθη κεφαλών που κυμαίνονται από 0,8 mm για γρήγορες εκτυπώσεις έως 0,25 mm για την επίτευξη ποιοτικών εκτυπώσεων. Τέλος, έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύσει τη θέση της πλατφόρμας κατασκευής σε πολλές διαφορετικές θέσεις, δημιουργώντας έναν ακριβή λεπτομερή χάρτη ύψους της πλατφόρμας κατασκευής. Χρησιμοποιώντας αυτά τα δεδομένα, αντισταθμίζει τυχόν αποκλίσεις στην επιφάνεια σε πραγματικό χρόνο, καθ' όλη τη διάρκεια της εκτύπωσης [91].



Εικόνα 73: Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής Ultimaker S5.

4.5 Διαδικασία Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

Για τη διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης απαιτείται να γίνουν κάποια βήματα προετοιμασίας του εκτυπωτή και των υλικών. Αρχικά, τοποθετείται το υλικό PVA μέσα στον εκτυπωτή για περίπου μία ώρα στους 50°C ώστε να θερμανθεί και να μειωθεί η υγρασία του, αλλιώς είναι πολύ σκληρό και σπάει εύκολα κατά τη διαδικασία της τροφοδότησης. Στη συνέχεια τοποθετείται στην κατάλληλη θέση στο πίσω μέρος του εκτυπωτή, και τροφοδοτείται μέσα στην εσοχή της σωλήνας τροφοδοσίας. Ο χρήστης ακολουθεί τη σχετική διαδικασία στην οθόνη αφής και ο εκτυπωτής αναγνωρίζει αυτόματα το υλικό Natural PVA. Στη συνέχεια εξωθείται μια μικρή ποσότητα του υλικού από την κεφαλή εκτύπωσης, και το υλικό είναι έτοιμο για εκτύπωση. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για το υλικό PLA, εκτός από το βήμα της αφαίρεσης της υγρασίας. Στην **Εικόνα 74 (Αριστερά)** φαίνονται τα δύο υλικά (μπλε PLA και Natural PVA) τοποθετημένα στο πίσω μέρος του εκτυπωτή. Στην **Εικόνα 74 (Δεξιά)** φαίνονται οι δύο κεφαλές εξώθησης υλικού κατά τη διάρκεια μιας εκτύπωσης.



Εικόνα 74: (Αριστερά) Τα νήματα του διαφανές PVA και του Blue PLA τοποθετημένα στο πίσω μέρος του εκτυπωτή. (Δεξιά) Οι κεφαλές του εκτυπωτή κατά τη διαδικασία εκτύπωσης.

Και τα τρία πολυσύνθετα εξαρτήματα-ανταλλακτικά εκτυπώθηκαν με τις ίδιες παραμέτρους εκτύπωσης. Ωστόσο αν και στις προσομοιώσεις στο λογισμικό Cura δεν εμφανιζόταν κάποιο πρόβλημα, οι πρώτες εκτύπώσεις παρουσίασαν ορισμένες αστοχίες. Η πρώτη αστοχία αφορούσε την τελική μορφή των εκτυπωμένων εξαρτημάτων η οποία δεν ήταν η επιθυμητή και παρουσίασε μέτρια ποιότητα επιφάνειας (**Εικόνα 75**). Αυτή η αστοχία οφειλόταν σε μικρές κινήσεις της πλατφόρμας εκτύπωσης κατά τη διαδικασία της εκτύπωσης εξ αιτίας ενός προβλήματος στην στερέωσή της, το οποίο στη συνέχεια διορθώθηκε. Η δεύτερη αστοχία οφειλόταν στη μη σωστή εκτύπωση της υποστηρικτικής στρώσης του PVA (Raft), όπως φαίνεται στην **Εικόνα 76**, η οποία διορθώθηκε με αλλαγή στις παραμέτρους εκτύπωσης.



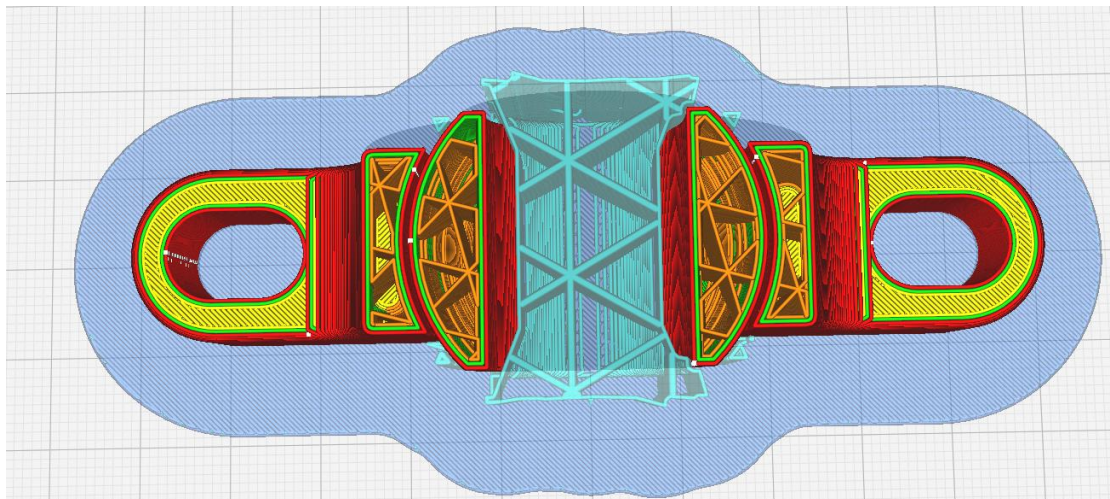
Εικόνα 75: Αστοχίες στις εκτυπώσεις των *Pillow Block Bearing with Spherical Ball* και *Rod End Bearing with Female Thread* λόγω μετακίνησης της πλατφόρμας του εκτυπωτή

Επίσης παρατηρήθηκε στα πρώτα εκτυπωμένα εξαρτήματα και συγκεκριμένα στο *Pillow Block Bearing with Spherical Ball* και στο *Rod End Bearing with Female Thread*, ότι οι σφαίρες δεν μπορούσαν να περιστραφούν όπως θα έπρεπε να συμβαίνει στο μηχανισμό της άρθρωσης. Αν και στα 3D μοντέλα που σχεδιάστηκαν στο Fusion 360 λήφθηκε υπόψη το κατάλληλο διάκενο μεταξύ των συνεργαζόμενων επιμέρους εξαρτημάτων ώστε να επιτρέπεται η σχετική κίνηση, αυτό δεν επιτεύχθηκε στην εκτύπωση και τα επιμέρους εξαρτήματα κόλλησαν μεταξύ τους.

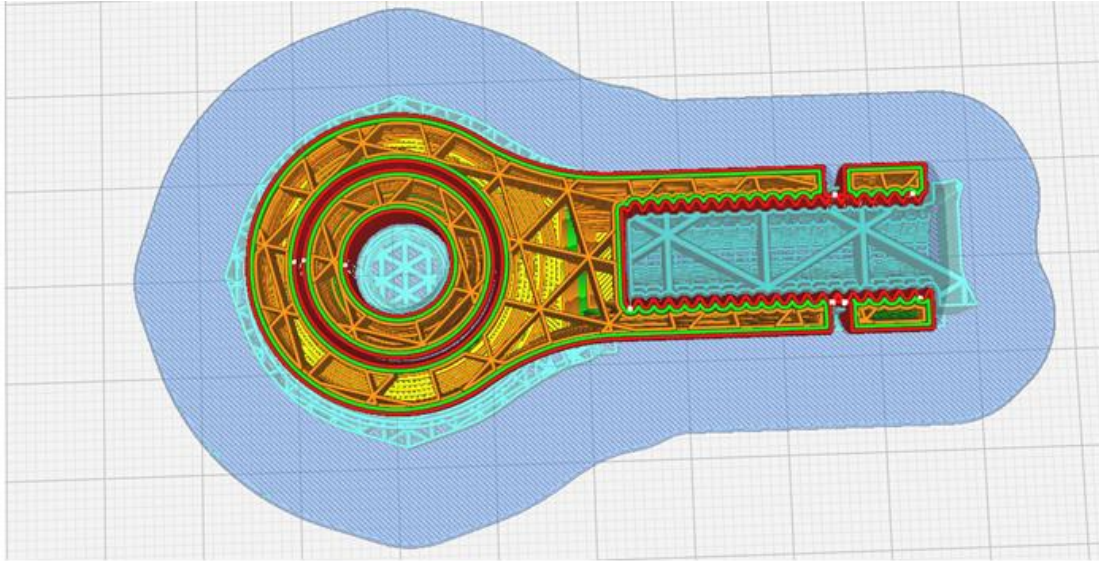
Για την αντιμετώπιση αυτής της αστοχίας, τροποποιήθηκαν σχεδιαστικά τα 3D μοντέλα και αυξήθηκε το διάκενο μεταξύ του κυρίου σώματος και της σφαίρας στα 0.5 mm. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε εκ νέου η προσομοίωση της εκτύπωσης στο λογισμικό Cura, και ελέγχθηκε το νέο διάκενο μεταξύ των επιμέρους εξαρτημάτων (**Εικόνες 77-78**)



Εικόνα 76: Αστοχία εκτύπωσης της υποστηρικτικής στρώσης του PVA (Raft).



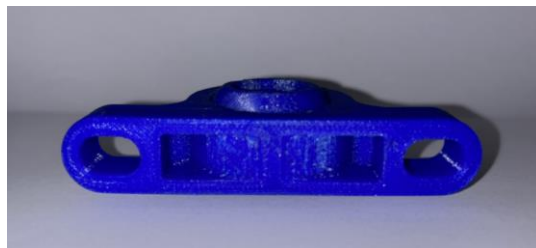
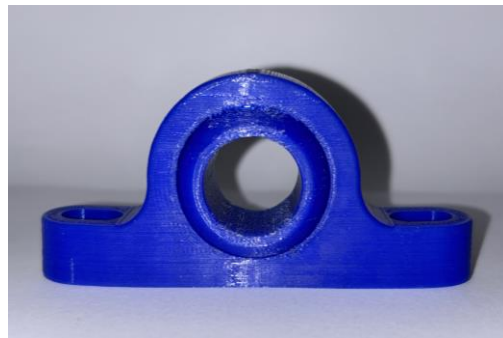
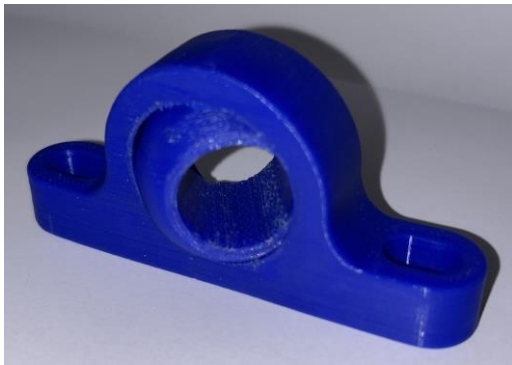
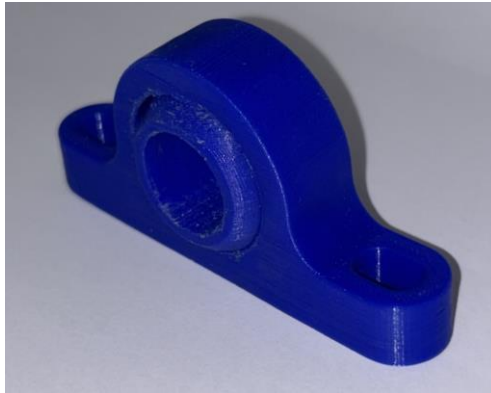
Εικόνα 77: Προσομοίωση εκτύπωσης στρώσης και εμφάνιση διάκενου μεταξύ κυρίου σώματος και σφαιρικού τριβέα στο Pillow Block Bearing with Spherical Ball.



Εικόνα 78: Προσομοίωση εκτύπωσης στρώσης και εμφάνιση διάκενου μεταξύ κυρίου σώματος και σφαιρικού τριβέα στο Rod End Bearing with Female Thread.

Οι νέες εκτυπώσεις μετά τις διάφορες σχεδιαστικές τροποποιήσεις και τις αλλαγές στις παραμέτρους εκτύπωσης ήταν αρκετά επιτυχημένες. Τα τελικά εκτυπωμένα πολυσύνθετα εξαρτήματα χρειάστηκε να τοποθετηθούν σε νερό για αρκετές ώρες ώστε να διαλυθεί το υδατοδιαλυτό Natural PVA και να αφαιρεθούν εξ ολοκλήρου τα υποστηρίγματα.

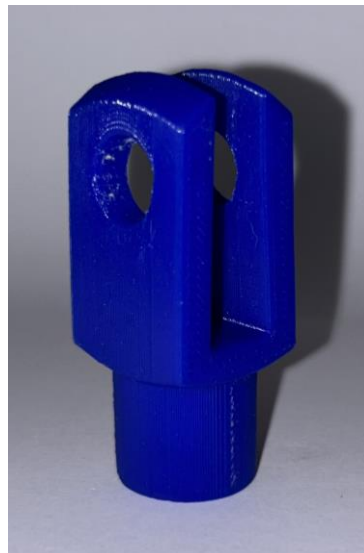
Όπως φαίνεται και στις **Εικόνες 79-81** και τα τρία εκτυπωμένα εξαρτήματα-ανταλλακτικά εμφάνισαν πολύ καλή ποιότητα εκτύπωσης, παρόλο που επιλέχθηκε πάχος στρώσης ίσο με 0.15 mm (normal layer thickness of 0.15 mm). Κάποιες πολύ μικρές αποκλίσεις από τις διαστάσεις σχεδιασμού παρατηρήθηκαν, οι οποίες αποδίδονται στην απορρόφηση υγρασίας του υλικού PLA κατά τη μετ' επεξεργασία ή/και τη θερμική διαστολή κατά τη διαδικασία εκτύπωσης. Επίσης όλα τα εκτυπωμένα εξαρτήματα-ανταλλακτικά ήταν λειτουργικά με τους σφαιρικούς τριβείς Pillow Block with Spherical Ball και του Rod End Bearing with Female Thread να μπορούν να περιστραφούν με σχετική ευκολία. Στο Clevis Joint with Pin and Circlip επίσης ο πείρος μπορούσε να περιστραφεί με ευκολία ενώ το σπείρωμα στο κάτω μέρος εκτυπώθηκε σωστά. Η ποιότητα επιφάνειας ήταν αρκετά καλή, εκτός από τις επιφάνειες που εδράζονταν στο Raft στις οποίες εμφανίστηκε μια μικρή τραχύτητα. Η βελτίωση της ποιότητας επιφάνειας αλλά και η επίτευξη διαστάσεων με περισσότερη ακρίβεια, θα μπορούσε να γίνει επιλέγοντας ακόμη μικρότερο πάχος στρώσης, για παράδειγμα fine layer thickness of 0.1 mm ή extra fine layer thickness of 0.06 mm.



Εικόνα 79: Τελικό 3D εκτυπωμένο πρωτότυπο Pillow Block Bearing with Spherical Ball.



Εικόνα 80: Τελικό 3D εκτυπωμένο πρωτότυπο Rod End Bearing with Female Thread.



Εικόνα 81: Τελικό 3D εκτυπωμένο πρωτότυπο Clevis Joint with Pin and Circlip.

Κεφάλαιο 5 – Μελέτη Αντοχής Πολυσύνθετων Εξαρτημάτων

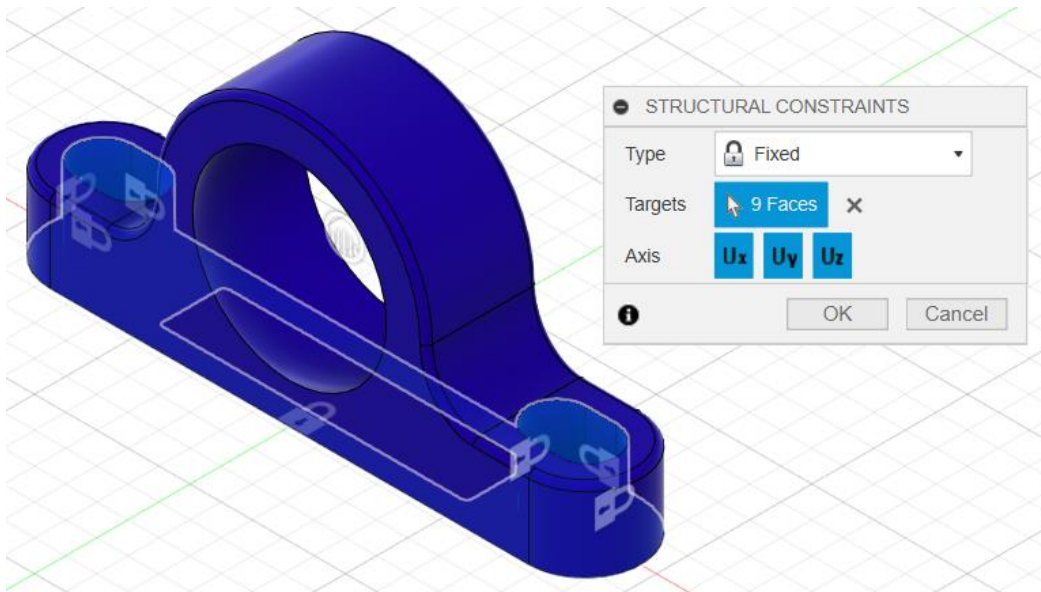
Ένας από τους στόχους της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι να μελετηθεί η αντοχή των πολυσύνθετων εξαρτημάτων μέσω του εργαλείου προσομοίωσης που διαθέτει το πρόγραμμα Fusion 360 της Autodesk. Για τη μελέτη της αντοχής προστέθηκε αρχικά το υλικό Blue PLA στην βιβλιοθήκη υλικών του Fusion 360, καθώς δεν ήταν διαθέσιμο. Για τον καθορισμό των ιδιοτήτων του υλικού Blue PLA έγινε έρευνα στο διαδίκτυο και στην ιστοσελίδα του κατασκευαστή του νήματος, Ultimaker [92], και έγινε η εισαγωγή των ιδιοτήτων που παρουσιάζονται στην **Εικόνα 82**.

Material	PLA (Blue)
Density	1.300E-06 kg / mm ³
Young's Modulus	3.50 GPa
Poisson's Ratio	0.39
Yield Strength	49.50 MPa
Ultimate Tensile Strength	50.00 MPa
Thermal Conductivity	1.300E-04 W / (mm C)
Thermal Expansion Coefficient	8.570E-05 / C
Specific Heat	1800.00 J / (kg C)

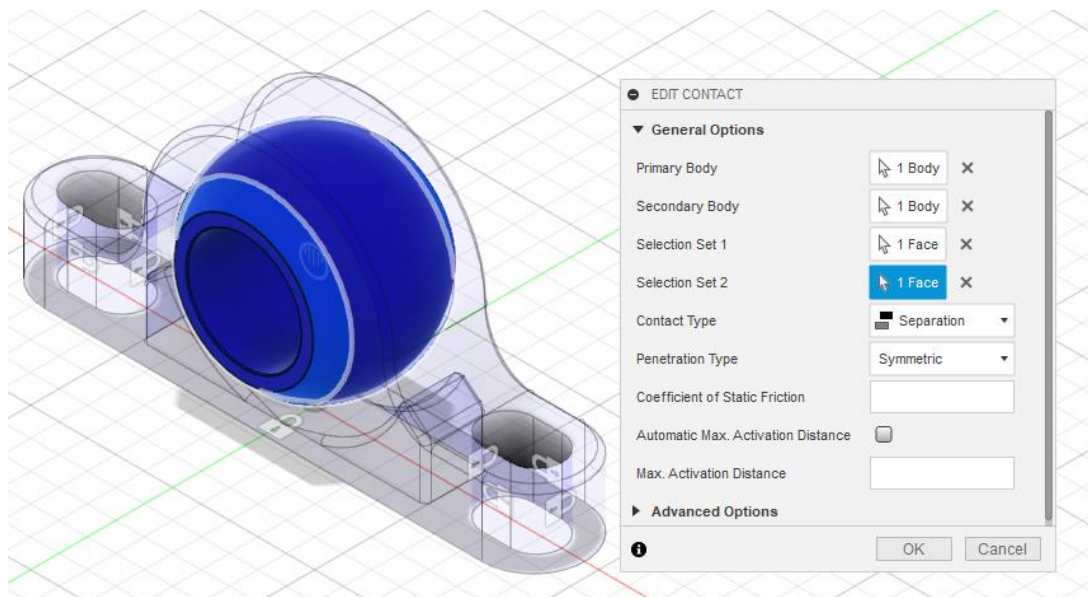
Εικόνα 82: Ιδιότητες του υλικού Blue PLA.

5.1 Pillow Block Bearing with Spherical Ball

Για τη μελέτη αντοχής του Pillow Block Bearing with Spherical Ball, αρχικά επιλέχθηκε από το μενού η καρτέλα Simulation και έπειτα η ανάλυση Static Stress. Στην συνέχεια καθορίστηκαν οι διάφοροι περιορισμοί στην κίνηση του Assembly Model. Με την εντολή Structural Constraints και την επιλογή Type Fixed επιλέχθηκαν οι επιφάνειες των δύο Slots καθώς και η κάτω επιφάνεια του κυρίου σώματος ως πακτωμένες (**Εικόνα 83**). Επίσης με την εντολή Manual Contact και την επιλογή Separation, και επιλέγοντας το κύριο σώμα και τη σφαίρα ως Primary και Secondary Body, καθορίστηκε το είδος της σύνδεσης των δύο Bodies και συνεπώς η ελευθερία στην κίνηση του σφαιρικού τριβέα. Συγκεκριμένα, οι σφαιρικές επιφάνειες των δύο Bodies που έρχονται σε επαφή δεν μπορούν να διαπεράσουν η μία την άλλη αλλά μπορούν να διαχωριστούν, και επίσης μπορούν να ολισθαίνουν ελεύθερα κατά την εφαπτομενική κατεύθυνση σε σχέση μεταξύ τους (**Εικόνα 84**).

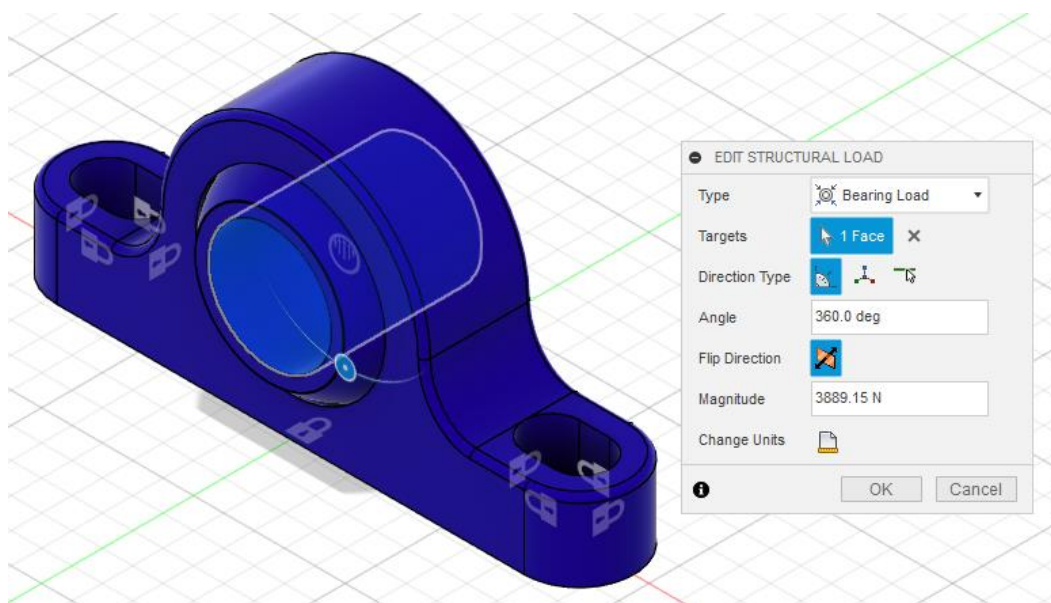


Εικόνα 83: Η εντολή *Structural Constraints* με την επιλογή *Type Fixed* ώστε πακτωθεί το κύριο σώμα του *Pillow Block*.



Εικόνα 84: Η εντολή *Manual Contacts* με την επιλογή *Separation* ώστε ο σφαιρικός τριβέας να έχει ελευθερία ολίσθησης και κίνησης μέσα στο έδρανο.

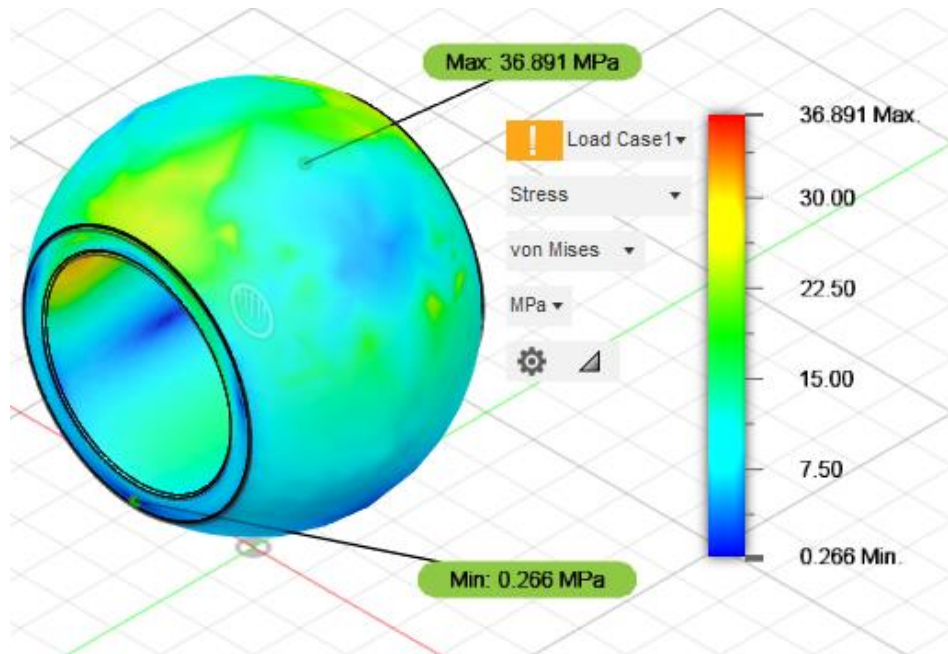
Κατόπιν με την εντολή Loads και την επιλογή Type Bearing Load, επιλέχθηκε η οπή του σφαιρικού τριβέα και ορίστηκε το φορτίο που θα ασκείται κάθετα στην επιφάνεια της οπής από τον περιστρεφόμενο άξονα (**Εικόνα 85**). Το φορτίο Bearing Load χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της επίδρασης κυλινδρικών επιφανειών ή σωμάτων που πιέζουν το ένα το άλλο. Το Bearing Load εφαρμόζεται στην επιλεγμένη επιφάνεια με παραβολική κατανομή, η οποία είναι χαρακτηριστική της φόρτισης που εμφανίζεται μεταξύ αξόνων και τριβέων ή μεταξύ τριβέων και εδράνων. Κατά την προσομοίωση, η κατανομή του φορτίου μπορεί να έχει φορά προς τα πάνω ή προς τα κάτω. Στη συγκεκριμένη ανάλυση, δοκιμάστηκαν και οι δύο κατανομές και επιλέχθηκε η κατανομή προς τα πάνω ως η πιο δυσμενής.



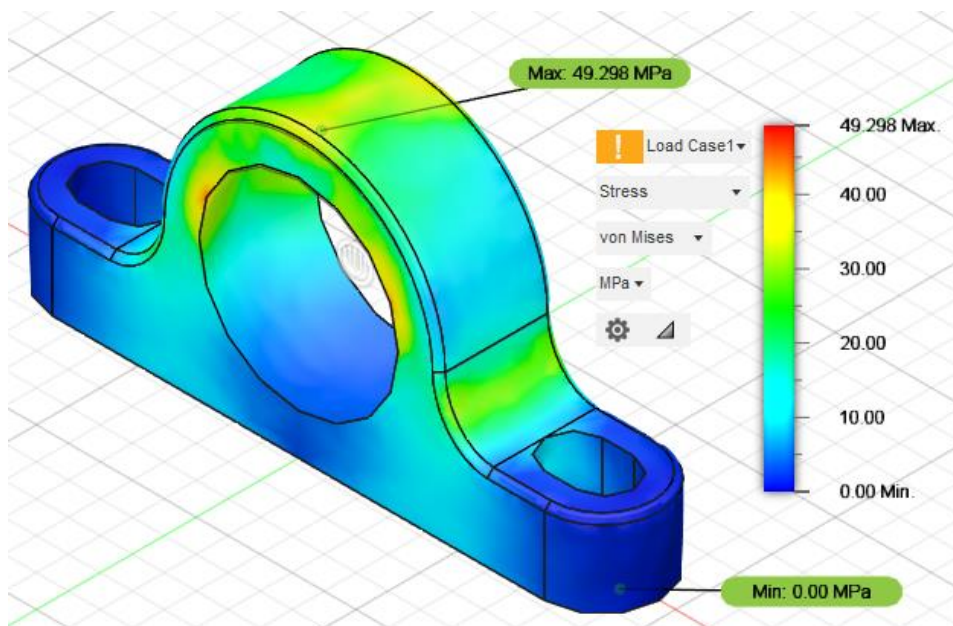
Εικόνα 85: Η εντολή Loads με την επιλογή Type Bearing Load ώστε στην οπή της σφαίρας να ασκείται κάθετα η φόρτιση από τον άξονα.

Για τον υπολογισμό της τάσης von Mises που αναπτύσσεται στο Assembly, αρχικά έγινε η εισαγωγή διαφόρων τιμών για το φορτίο Bearing Load, και η τιμή 3,889.15 N καθορίστηκε ως το μέγιστο φορτίο που ικανοποιεί την αντοχή σε εφελκυσμό του υλικού (49.298 MPa). Το σημείο που εμφανίζεται η μέγιστη τάση von Mises είναι στα πλαϊνά τοιχώματα του σφαιρικού τριβέα, και στα αντίστοιχα σημεία του κυρίου σώματος του εδράνου, όπως απεικονίζεται στις **Εικόνες 86-88**. Η μετατόπιση (Displacement) των επιμέρους εξαρτημάτων του assembly εμφανίζεται επίσης στις **Εικόνες 89-91**. Στις **Εικόνες 88** και **91** απεικονίζεται η παραμόρφωση του μοντέλου υπό κλίμακα μεγέθυνσης (Adjusted 0.5x - 2.5%). Αυτή η παραμόρφωση όπως απεικονίζεται δεν είναι η πραγματική (Actual) η οποία είναι τόσο μικρή που το σχήμα του μοντέλου δεν μεταβάλλεται, αλλά είναι σε μεγέθυνση ώστε να μπορεί να κατανοηθεί καλύτερα από τον μελετητή ο τρόπος που το μοντέλο τείνει να παραμορφωθεί. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή επιτυγχάνεται ένας ελάχιστος συντελεστής ασφάλειας ίσος με

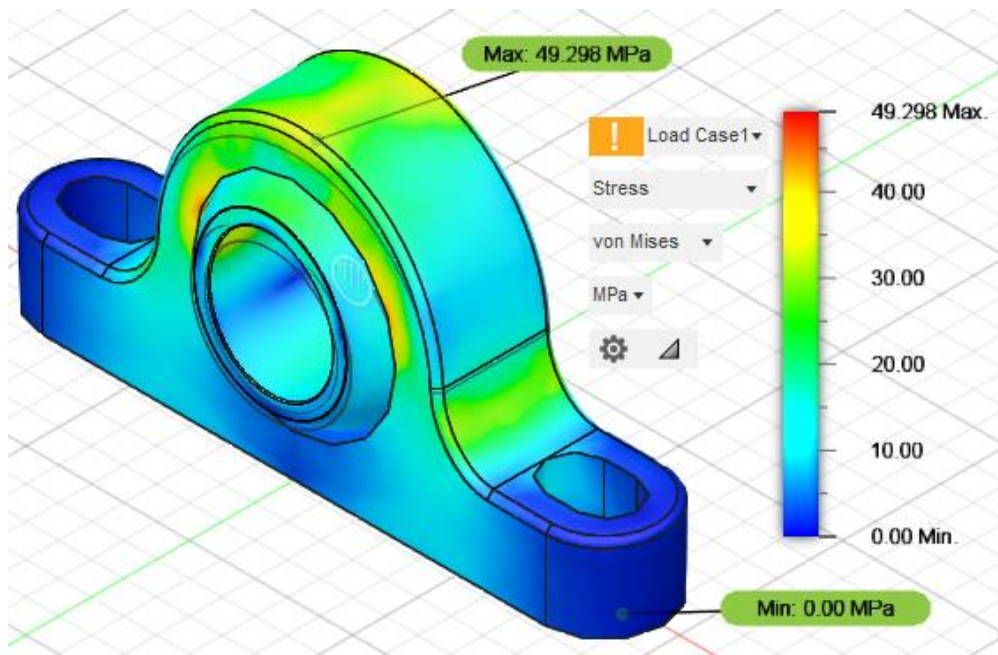
1.0. Γενικά σε τυπικές εφαρμογές σχεδιασμού, προτιμάται ένας ελάχιστος συντελεστής ασφάλειας ίσος με 3.0. Αυτό σημαίνει βασικά ότι για το συγκεκριμένο μοντέλο η συγκεκριμένη τιμή της δύναμης είναι οριακά ασφαλής, αλλά εξωτερικοί παράγοντες θα μπορούσαν να προκαλέσουν αστοχία λόγω θραύσης ή μόνιμες παραμορφώσεις όπως φαίνεται στην **Εικόνες 88 και 91**.



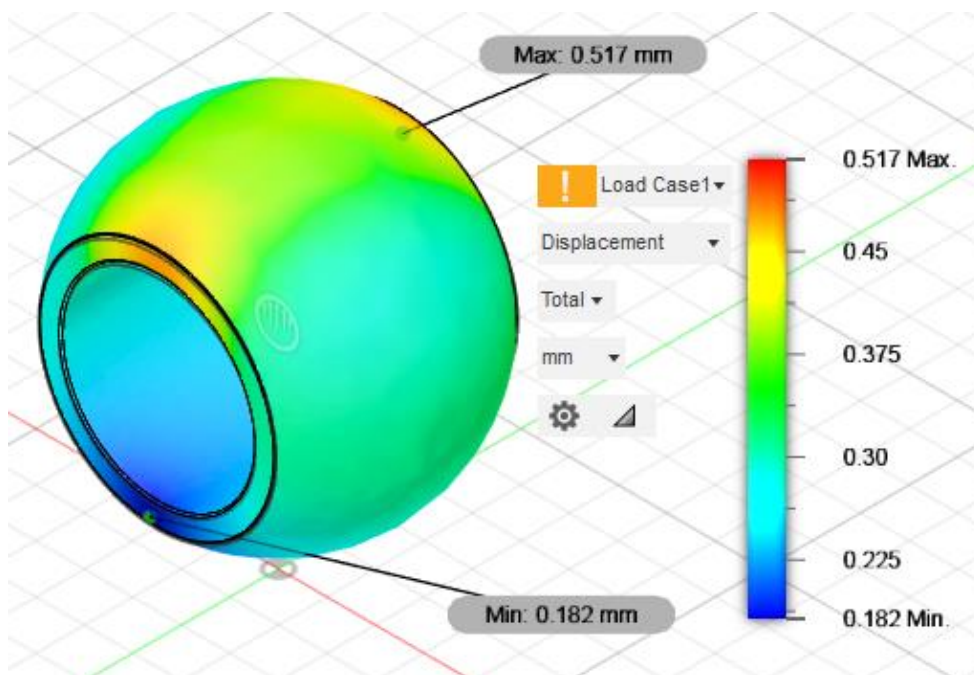
Εικόνα 86: Προσομοίωση von Mises stress στη σφαίρα του Pillow Block Bearing με οριακή δύναμη 3,889.15 N, Max von Mises stress: 36.891 MPa, Actual deformation.



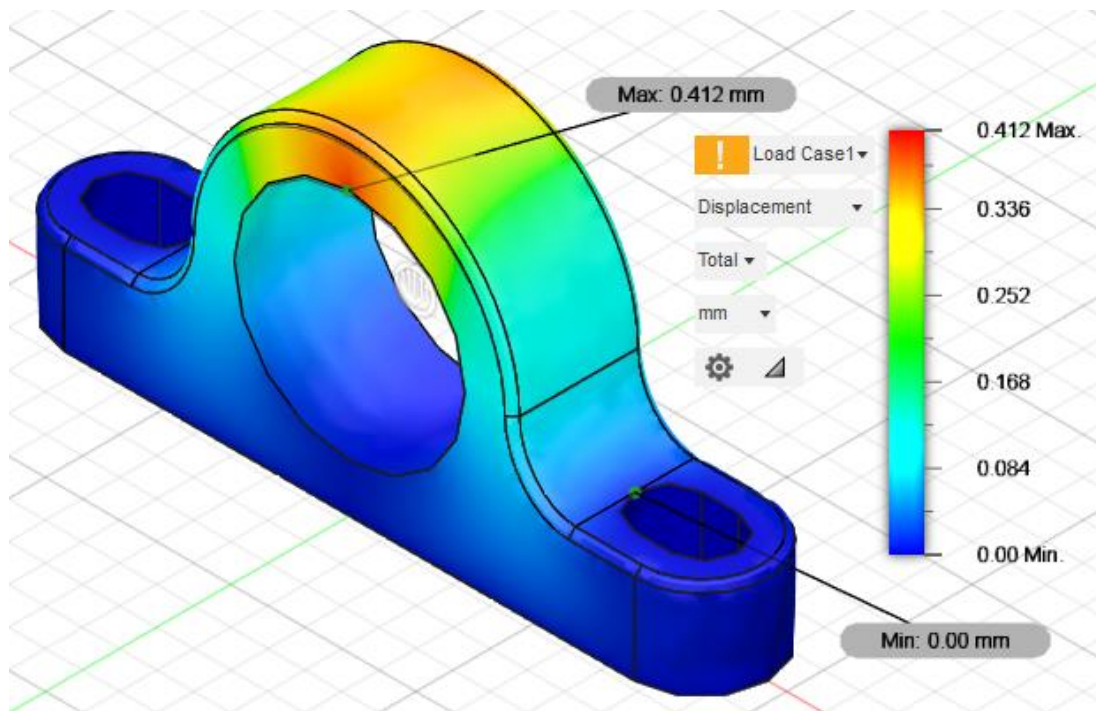
Εικόνα 87: Προσομοίωση von Mises stress στο κύριο σώμα Pillow Block με οριακή δύναμη 3,889.15 N, Max von Mises stress: 49.298 MPa, Actual deformation.



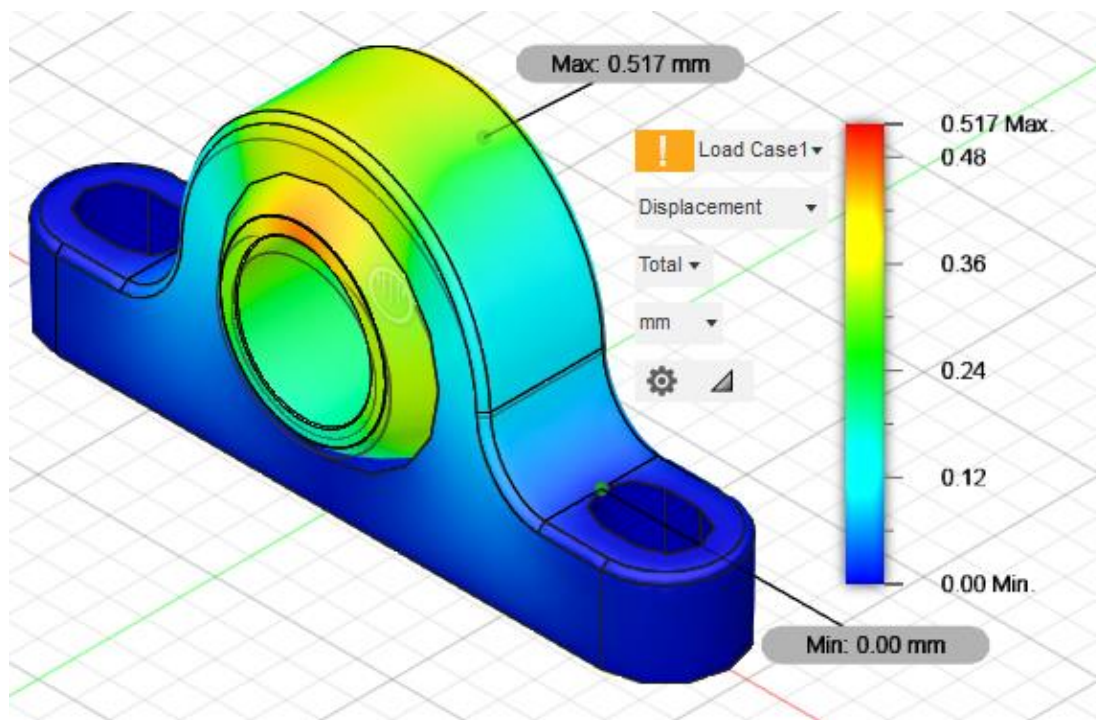
Εικόνα 88: Προσομοίωση von Mises stress Pillow Block Bearing with Spherical Ball. με οριακή δύναμη 3,889.15 N, Max von Mises stress: 49.298 MPa, Adjusted 0.5x - 2.5% deformation.



Εικόνα 89: Προσομοίωση Displacement στη σφαίρα του Pillow Block Bearing με οριακή δύναμη 3,889.15 N, Max Displacement: 0.517 mm, Actual deformation.



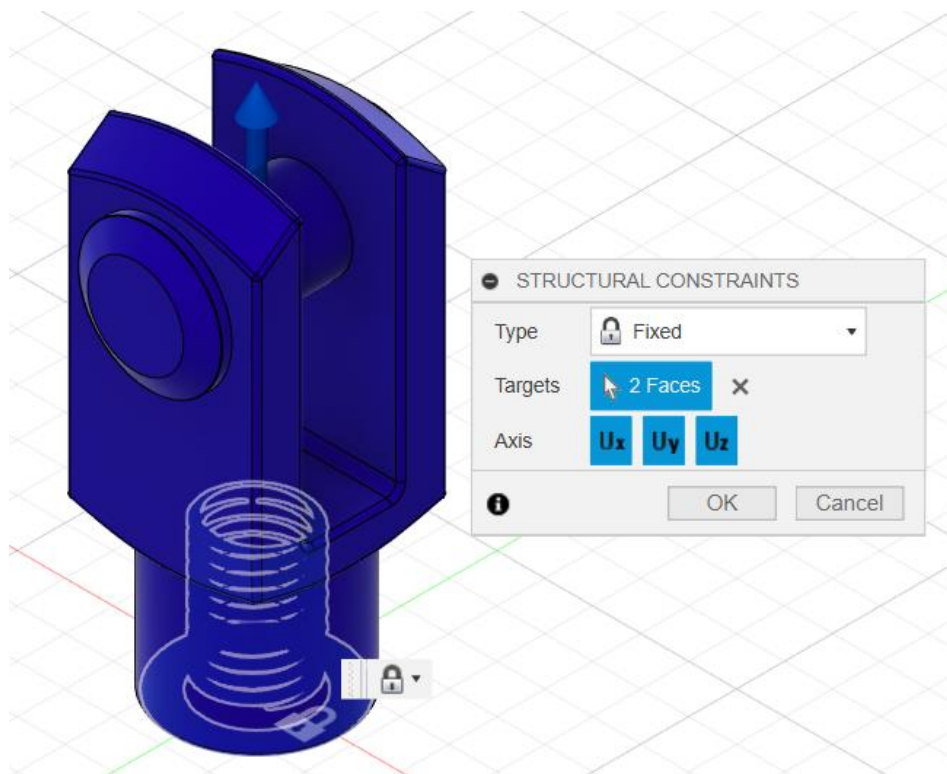
Εικόνα 90: Προσομοίωση Displacement στο κύριο σώμα Pillow Block με οριική δύναμη 3,889.15 N, Max Displacement: 0.412 mm, Actual deformation.



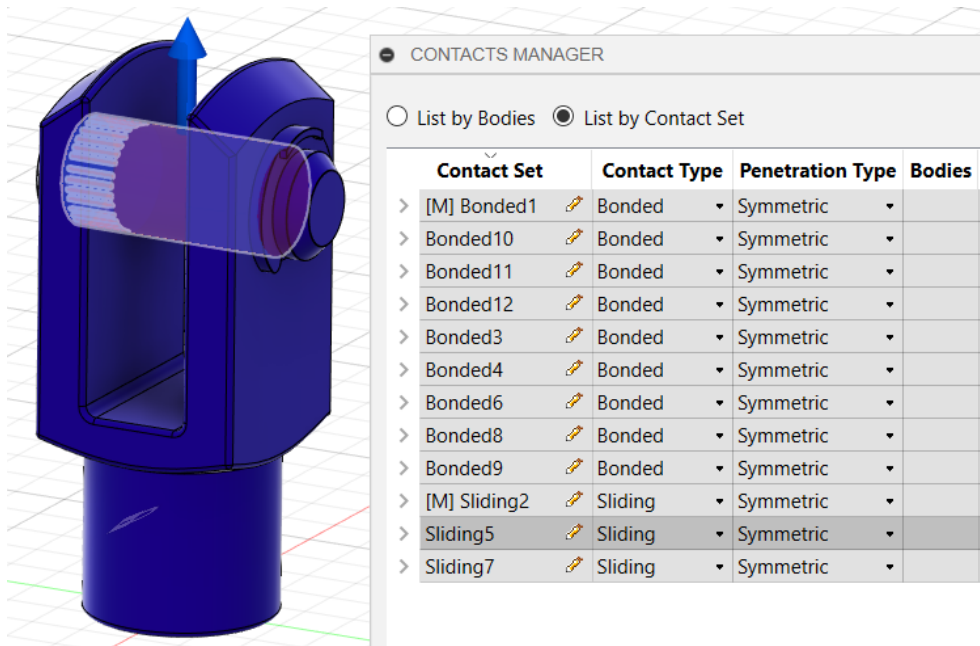
Εικόνα 91: Προσομοίωση Displacement στο Pillow Block Bearing with Spherical Ball με οριική δύναμη 3,889.15 N, Max Displacement: 0.517 mm. Adjusted 0.5x - 2.5% deformation.

5.2 Clevis Joint with Pin and Circlip

Για τη μελέτη αντοχής του Clevis Joint with Pin and Circlip, αρχικά επιλέχθηκαν οι περιορισμοί στην κίνηση των επιμέρους εξαρτημάτων του Assembly Model. Με την εντολή Structural Constraints και την επιλογή Fixed επιλέχθηκε η επιφάνεια του εσωτερικού σπειρώματος και η κάτω επιφάνεια του κυρίου σώματος ως πακτωμένη (**Εικόνα 92**). Επίσης, με την εντολή Automatic Contacts και Manual Contact καθορίστηκε το είδος της επαφής μεταξύ των τριών Bodies, όπως επίσης και μεταξύ διαφόρων Features, ως Bonded ή Sliding ανάλογα με την περίπτωση (**Εικόνα 93**).

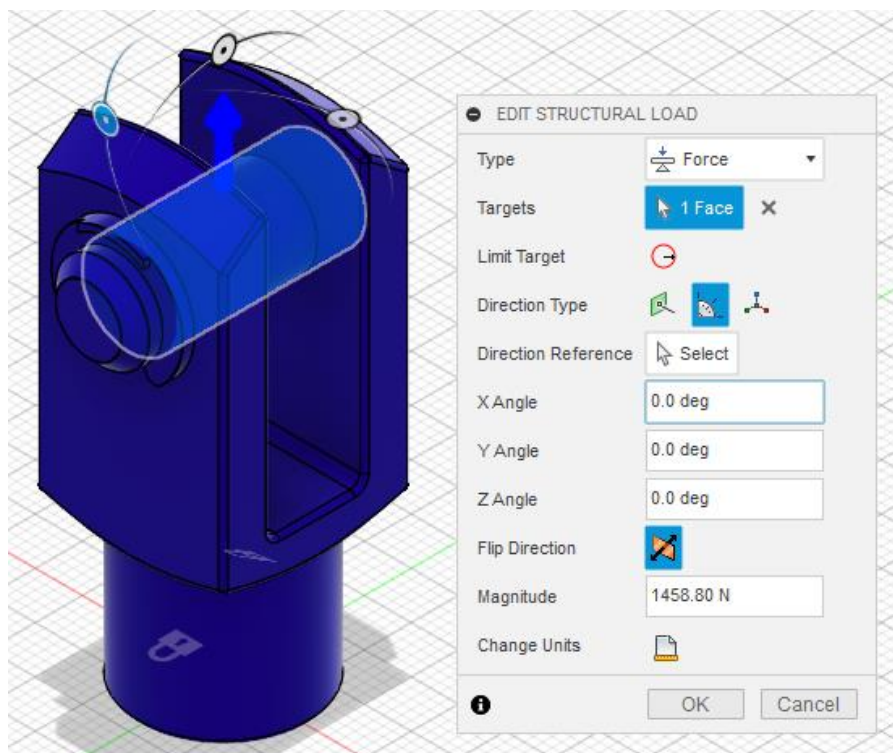


Εικόνα 92: Η εντολή *Structural Constraints* με την επιλογή *Type Fixed* ώστε πακτωθεί το κύριο σώμα του *Clevis Joint*.



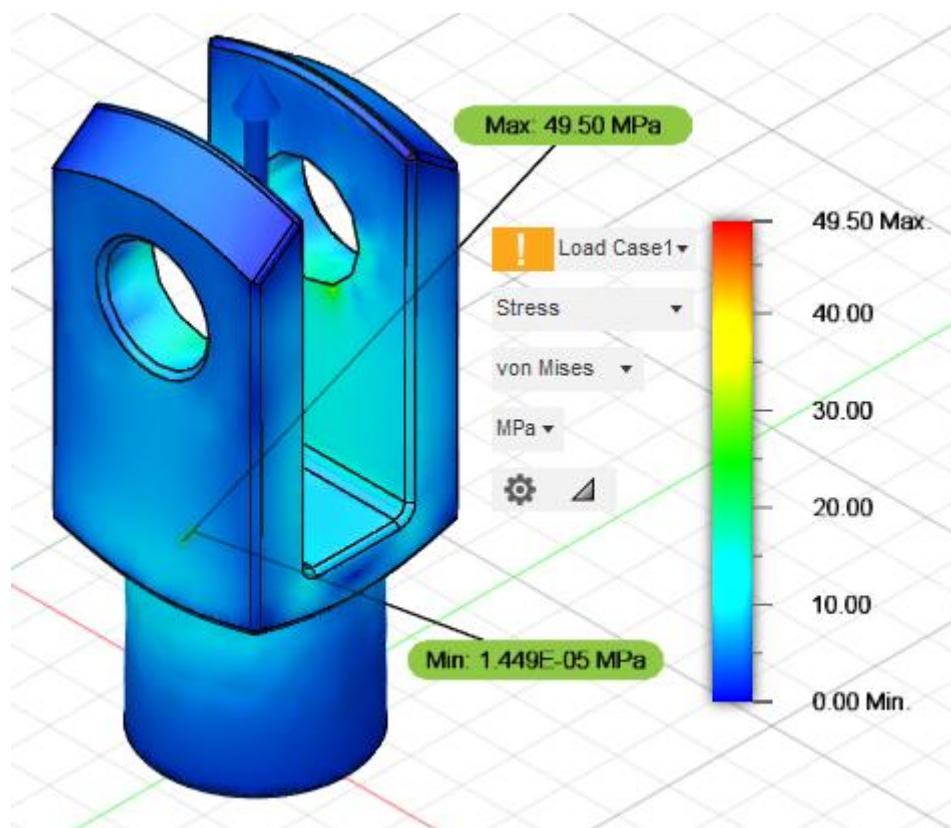
Εικόνα 93: Η εντολή Contacts με τα Automatic και Manual Contacts μεταξύ των διαφόρων σωμάτων και Features του μοντέλου.

Στη συνέχεια, με την εντολή Loads και την επιλογή Type Force καθορίστηκε η δύναμη που ασκείται στην εξωτερική διάμετρο του πείρου για να προσομοιώσει το φορτίο που ασκείται από τον σχοινί στον πείρο και ακολούθως στις δύο οπές του διχαλωτού άκρου (**Εικόνα 94**).

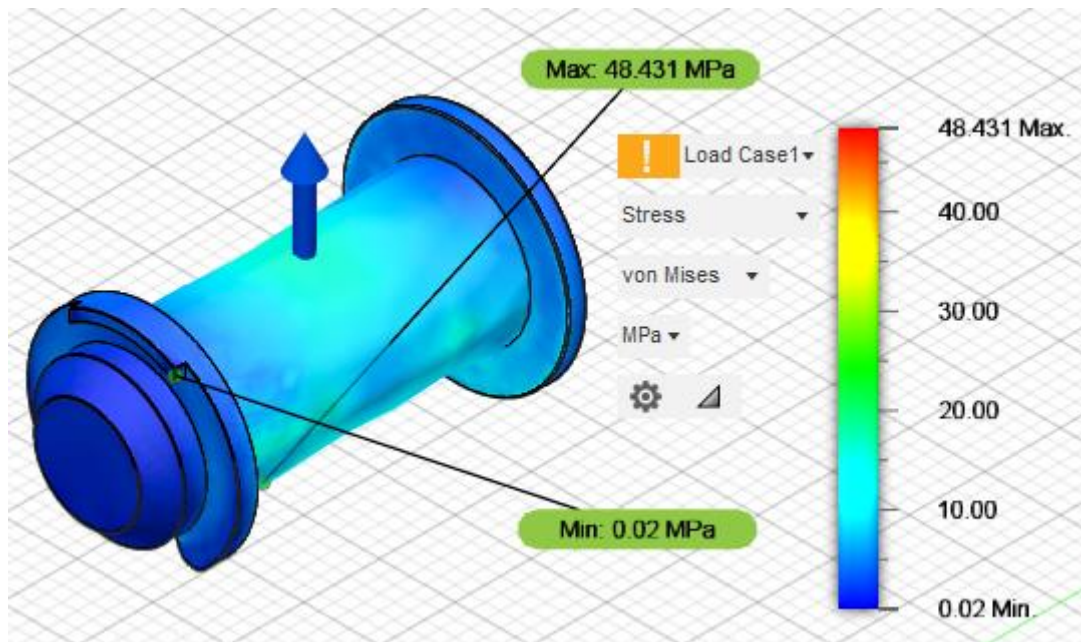


Εικόνα 94: Η εντολή Loads με την επιλογή Type Force ώστε να προσομοιωθεί η φόρτιση του σχοινιού στον πείρο και στις οπές του διχαλωτού άκρου.

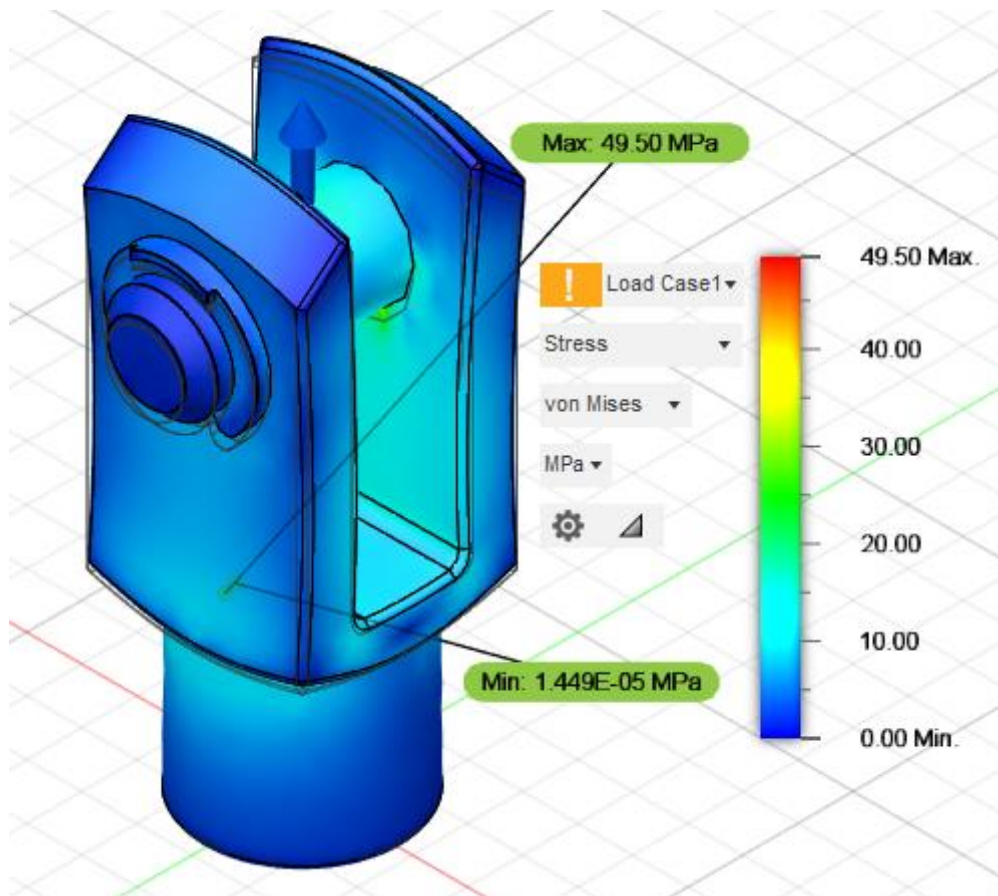
Για τον υπολογισμό της τάσης von Mises που αναπτύσσεται στο assembly, αρχικά έγινε η εισαγωγή διαφόρων τιμών για τη δύναμη, και η τιμή 1,458.80 N καθορίστηκε ως η μέγιστη που ικανοποιεί την αντοχή εφελκυσμού του υλικού (49.5 MPa). Το σημείο που εμφανίζεται η μέγιστη τάση von Mises είναι στην εξωτερική επιφάνεια του πείρου και στην εσωτερική επιφάνεια του διχαλωτού άκρου του κυρίου σώματος καθώς και σε κάποια σημεία της επιφάνειας του σπειρώματος, όπως απεικονίζεται στις **Εικόνες 95-97**. Στις **Εικόνες 98-100** παρουσιάζεται η μετατόπιση (Displacement) των επιμέρους εξαρτημάτων του assembly. Στις **Εικόνες 97** και **100** απεικονίζεται η παραμόρφωση του Clevis Joint με μεγέθυνση Adjusted 0.5x - 2.5%, ώστε να μπορεί να κατανοηθεί καλύτερα από τον μελετητή ο τρόπος που το μοντέλο τείνει να παραμορφωθεί. Στην συγκεκριμένη ανάλυση επιτυγχάνεται ελάχιστος συντελεστής ασφάλειας ίσος με 1.0. Αυτό σημαίνει ότι με το συγκεκριμένο φορτίο εξασφαλίζεται η αντοχή σε εφελκυσμό του υλικού, αλλά εξωτερικοί παράγοντες θα μπορούσαν να προκαλέσουν θραύση ή μόνιμες παραμορφώσεις, όπως φαίνεται στην **Εικόνες 97** και **100**.



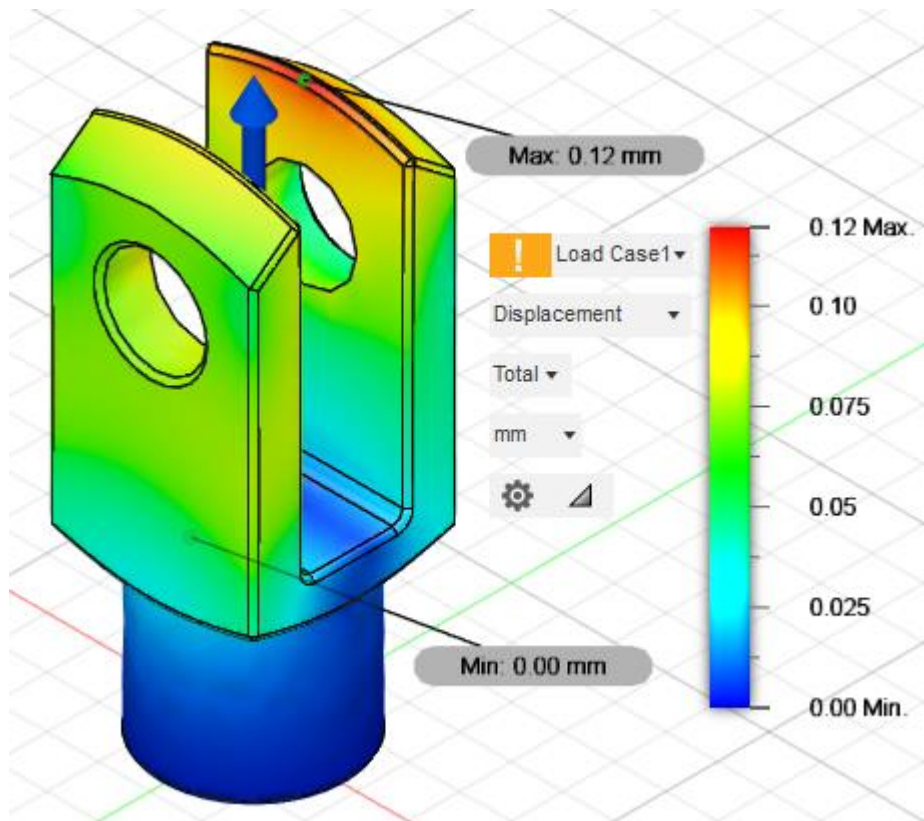
Εικόνα 95: Προσομοίωση von Mises stress στο κύριο σώμα του Clevis Joint με οριακή δύναμη 1,458.80 N, Max von Mises stress: 49.50 MPa, Actual deformation.



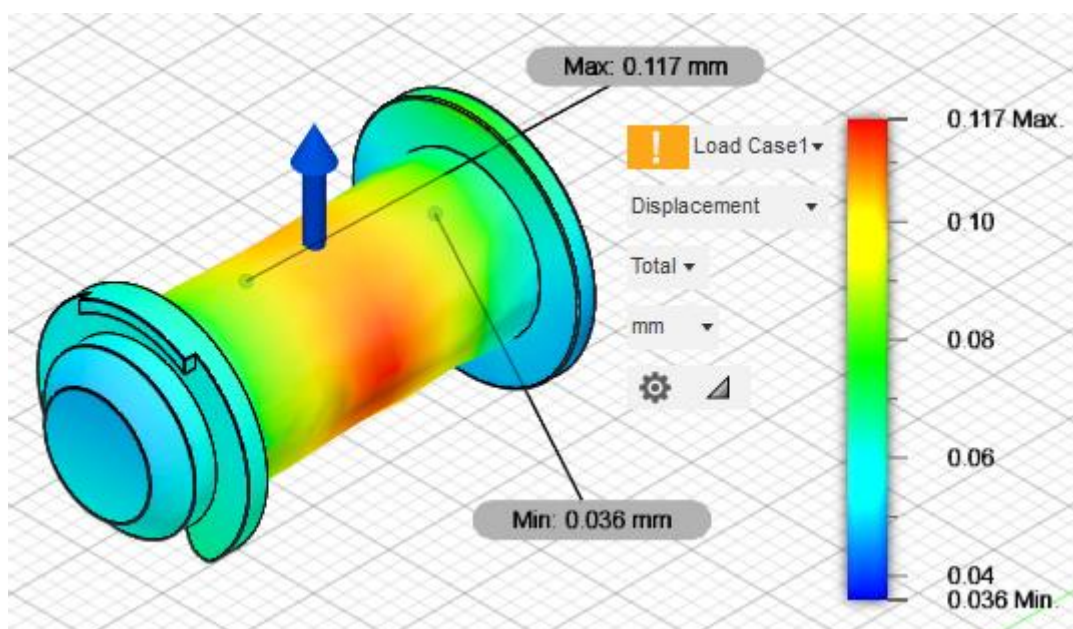
Εικόνα 96: Προσομοίωση von Mises stress στο Pin και στο Circlip του Clevis Joint με οριακή δύναμη 1,458.80 N, Max von Mises stress: 48.431 MPa, Actual deformation.



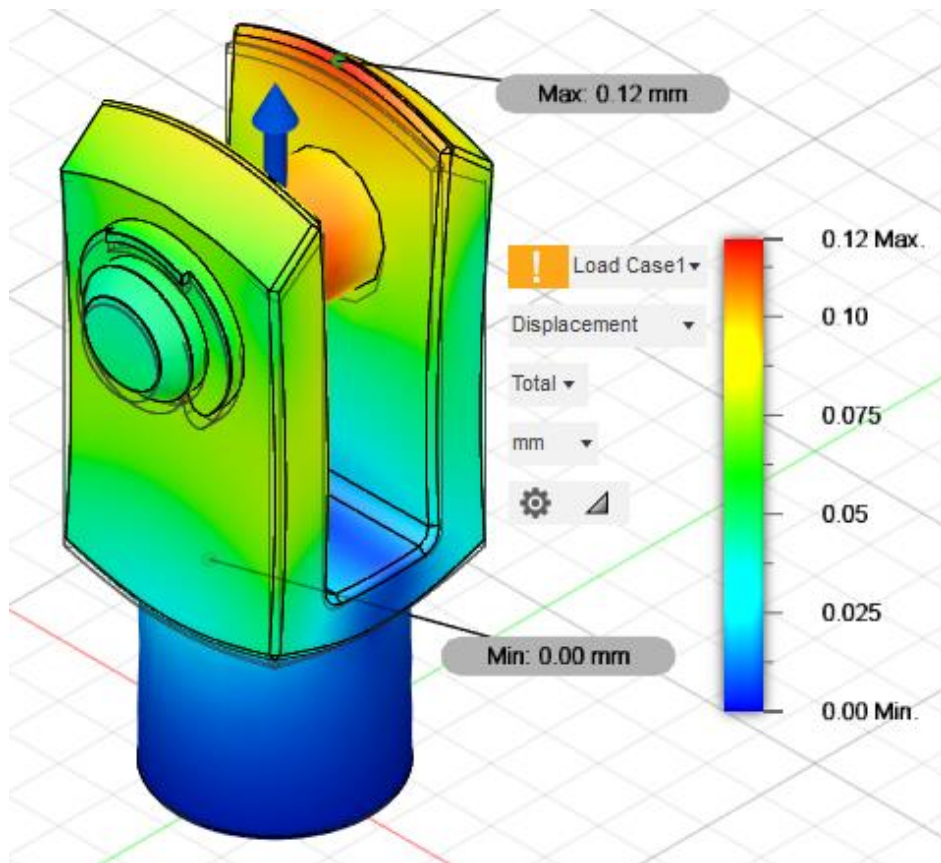
Εικόνα 97: Προσομοίωση von Mises stress Pillow Block Bearing with Spherical Ball. με οριακή δύναμη 1,458.80 N, Max von Mises stress: 49.50 MPa, Adjusted 0.5x - 2.5% deformation.



Εικόνα 98: Προσομοίωση Displacement στο κύριο σώμα του Clevis Joint με οριακή δύναμη 1,458.80 N, Max Displacement: 0.120 mm, Actual deformation.



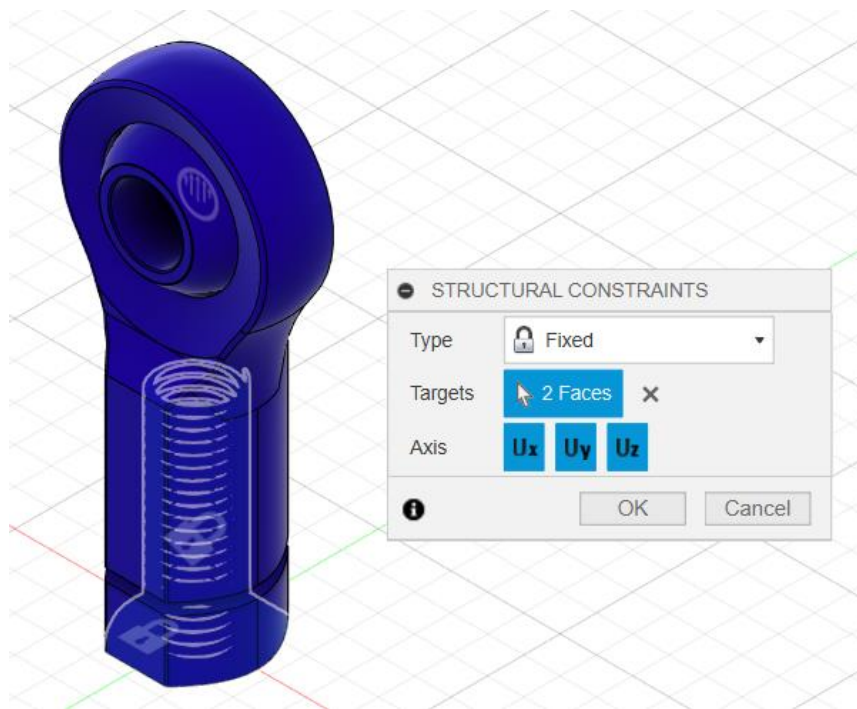
Εικόνα 99: Προσομοίωση Displacement στο Pin και στο Circlip του Clevis Joint με οριακή δύναμη 1,458.80 N, Max Displacement: 0.117 mm, Actual deformation.



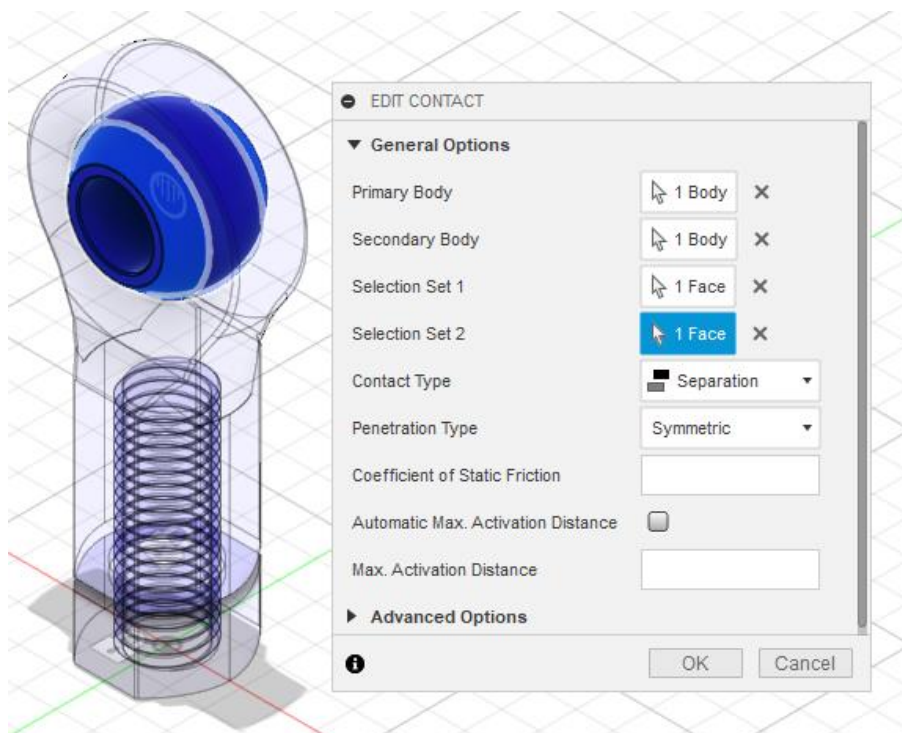
Εικόνα 100: Προσομοίωση Displacement στο Clevis Joint with Pin and Circlip με οριακή δύναμη 1,458.80 N, Max Displacement: 0.120 mm. Adjusted 0.5x - 2.5% deformation.

5.3 Rod End Bearing with Female Thread

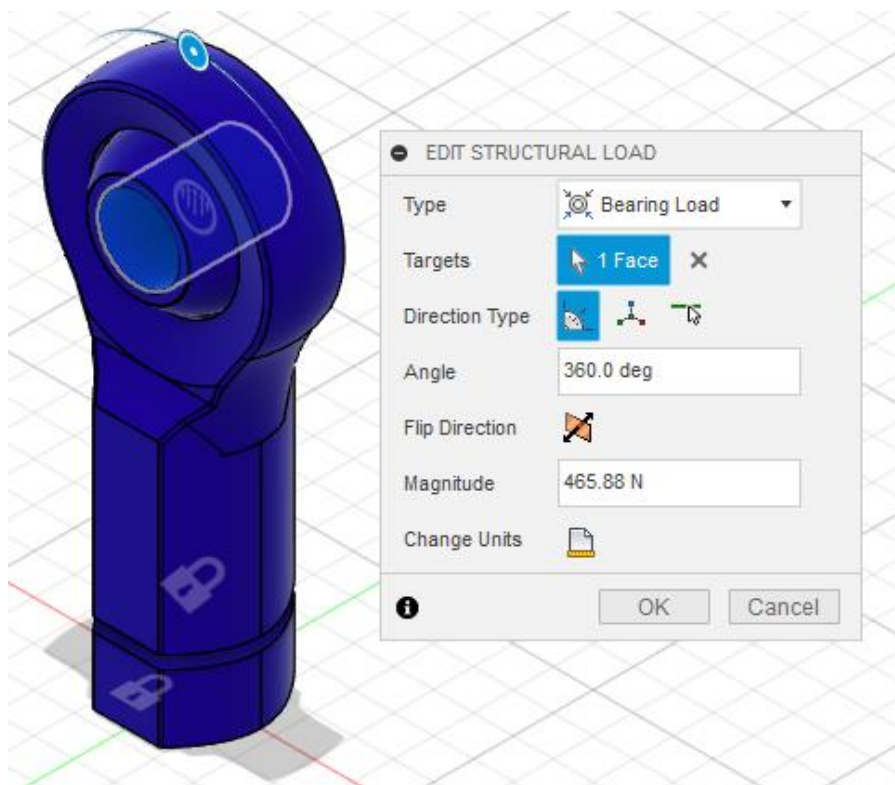
Για τη μελέτη της αντοχής του Rod End Bearing with Female Thread αρχικά καθορίστηκαν τα Constraints, δηλαδή οι περιορισμοί στην κίνηση του Assembly Model. Με την εντολή Structural Constraints και την επιλογή Type Fixed επιλέχθηκε η επιφάνεια του εσωτερικού σπειρώματος και η κάτω επιφάνεια του Rod ως πακτωμένες (**Εικόνα 101**). Επίσης με την εντολή Manual Contact και την επιλογή Separation, και επιλέγοντας το rod και τη σφαίρα ως Primary και Secondary Body, καθορίστηκε το είδος της σύνδεσης των δύο Bodies και συνεπώς η ελευθερία στην κίνηση του σφαιρικού τριβέα, κατά ανάλογο τρόπο με το Pillow Block Assembly (**Εικόνα 102**). Για τον καθορισμό του φορτίου, με την εντολή Loads και την επιλογή Type Bearing Load, επιλέχθηκε η οπή του σφαιρικού τριβέα για να οριστεί το φορτίο που θα ασκείται κάθετα στην επιφάνεια της οπής από τον άξονα που θα περιστρέφεται (**Εικόνα 103**).



Εικόνα 101: Η εντολή Structural Constraints με την επιλογή Type Fixed ώστε να πακτωθεί το κύριο σώμα του Rod End Bearing.

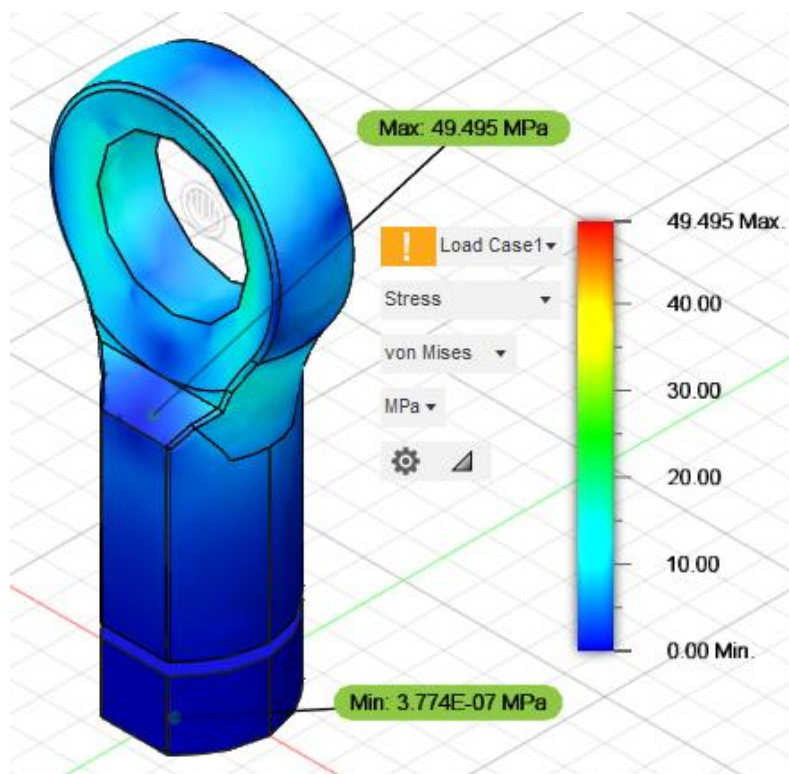


Εικόνα 102: Η εντολή Manual Contacts με την επιλογή Separation ώστε ο σφαιρικός τριβέας να έχει ελευθερία ολίσθησης και κίνησης μέσα στο έδρανο.

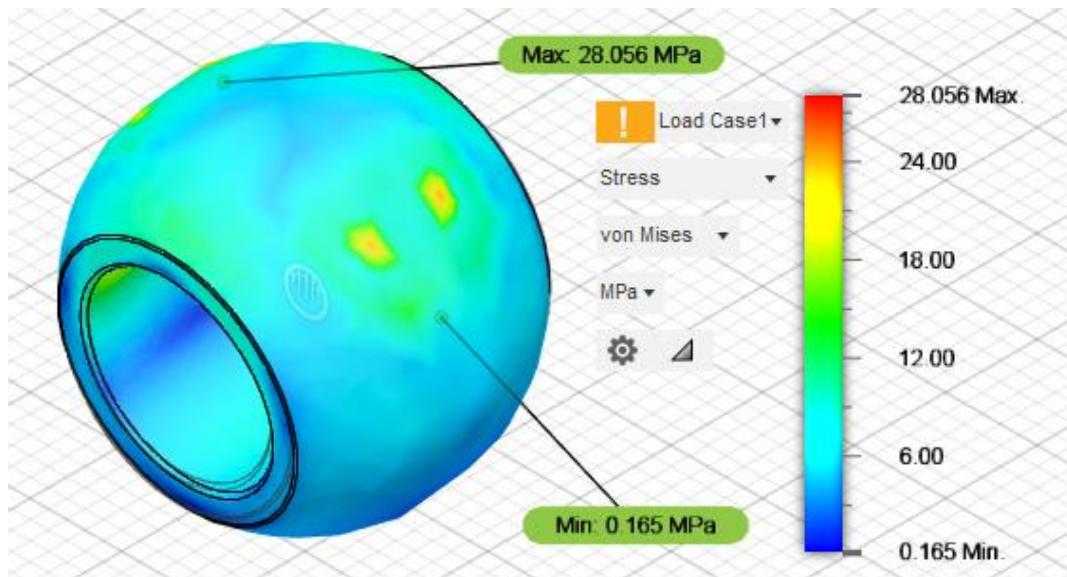


Εικόνα 103: Η εντολή Loads με την επιλογή Type Bearing Load ώστε στην οπή της σφαίρας να ασκείται το κάθετο φορτίο από τον άξονα.

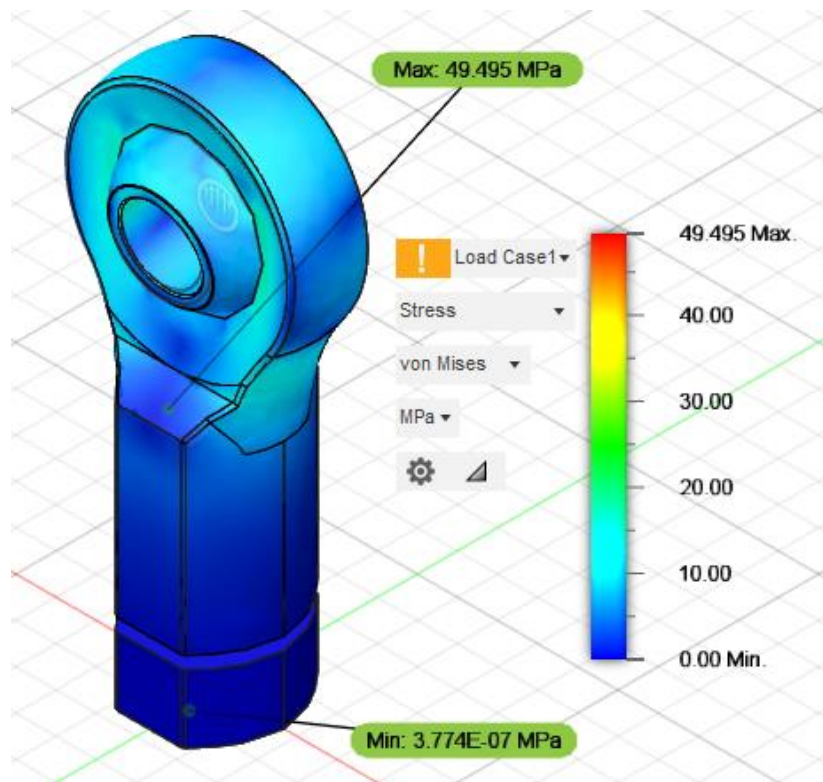
Για τον υπολογισμό της τάσης von mises που αναπτύσσεται, αρχικά έγινε η εισαγωγή διαφόρων τιμών για το φορτίο Bearing Load, και η τιμή 465.88 N καθορίστηκε ως το μέγιστο φορτίο που ικανοποιεί την αντοχή εφελκυσμού του υλικού (49.495 MPa). Το σημείο που εμφανίζεται η μέγιστη τάση von Mises είναι στα τοιχώματα του σφαιρικού τριβέα, στα τοιχώματα της σφαιρικής επιφάνειας του rod, καθώς και στις κορυφές του εσωτερικού σπειρώματος, όπως απεικονίζεται στις **Εικόνες 104-106**. Η μετατόπιση (Displacement) των επιμέρους εξαρτημάτων του assembly εμφανίζεται επίσης στις **Εικόνες 107-109**. Στις **Εικόνες 106** και **109** παρουσιάζεται η παραμόρφωση του μοντέλου υπό κλίμακα μεγέθυνσης (Adjusted 0.5x - 2.5%). Στην συγκεκριμένη ανάλυση επιτυγχάνεται ελάχιστος συντελεστής ασφάλειας ίσος με 1.0.



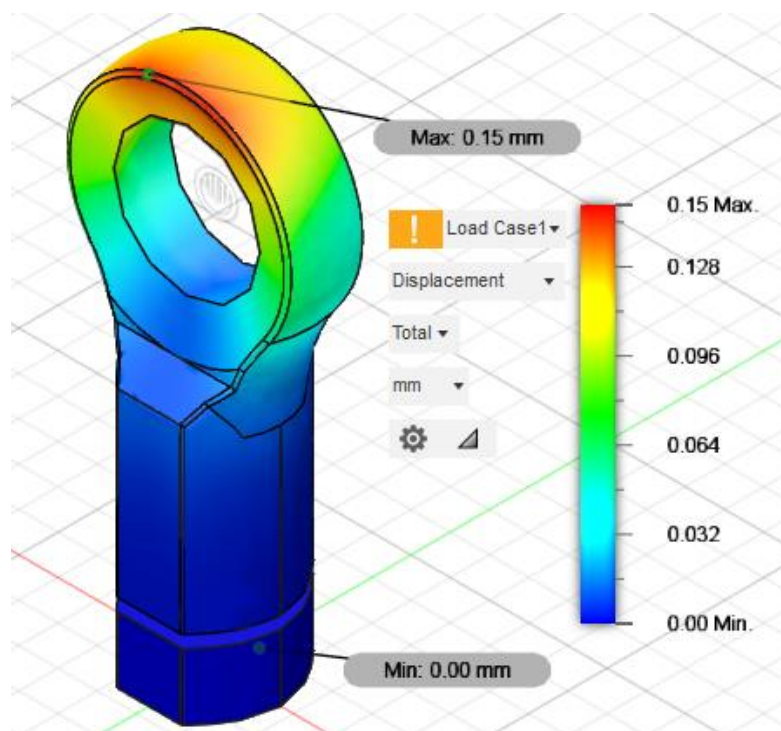
Εικόνα 104: Προσομοίωση von Mises stress στο κύριο σώμα του Rod End Bearing με οριακή δύναμη 465.88 N, Max von Mises stress: 49.495 MPa, Actual deformation.



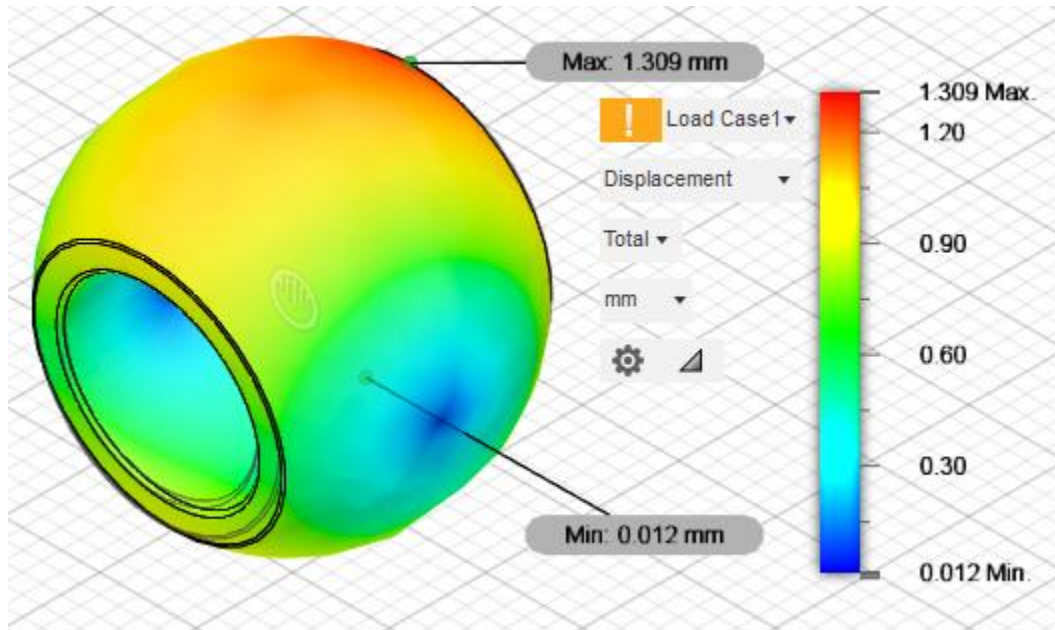
Εικόνα 105: Προσομοίωση von Mises stress στη σφαίρα του Rod End Bearing με οριακή δύναμη 465.88 N, Max von Mises stress: 28.056 MPa, Actual deformation.



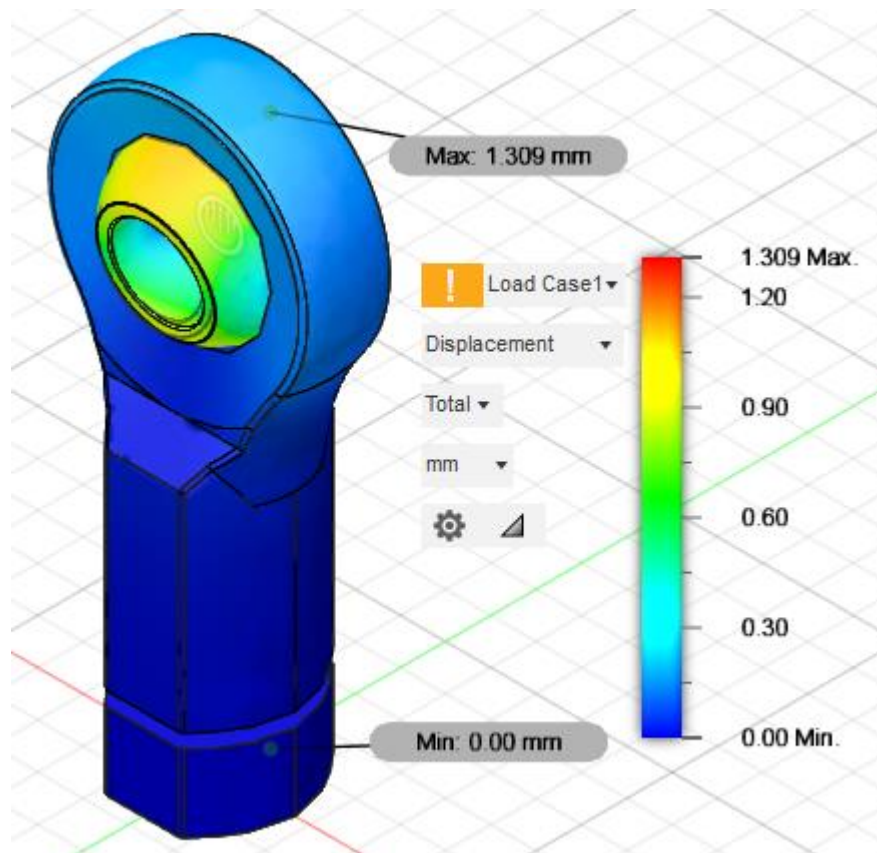
Εικόνα 106: Προσομοίωση von Mises stress στο Rod End Bearing with Female Thread με οριακή δύναμη 465.88 N, Max von Mises stress: 49.495 MPa, Adjusted 0.5x - 2.5% deformation.



Εικόνα 107: Προσομοίωση Displacement στο κύριο σώμα του Rod End Bearing με οριακή δύναμη 465.88 N, Max Displacement: 0.15 mm, Actual deformation.



Εικόνα 108: Προσομοίωση Displacement στη σφαίρα του Rod End Bearing με οριακή δύναμη 465.88 N, Max Displacement: 1.309 mm, Actual deformation.



Εικόνα 109: Προσομοίωση Displacement στο Rod End Bearing with Female Thread με οριακή δύναμη 465.88 N, Max Displacement: 1.309 mm. Adjusted 0.5x - 2.5% deformation.

Κεφάλαιο 6 - Επίλογος

6.1 Συμπεράσματα και Προτάσεις Μελλοντικής Έρευνας

Στόχος της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας ήταν η διερεύνηση των δυνατοτήτων της τρισδιάστατης εκτύπωσης για την κατασκευή πολυσύνθετων εξαρτημάτων μέσω του κατάλληλου Σχεδιασμού για Προσθετική Κατασκευή (DfAM).

Αξιοποιώντας τα εργαλεία και τις τεχνικές του DfAM, καθώς και τα εργαλεία παραμετρικής σχεδίασης CAD/CAE, ο σχεδιαστής μελετητής μπορεί να σχεδιάσει εύκολα πολυσύνθετα εξαρτήματα, να τα τροποποιήσει και να τα βελτιστοποιήσει, να μελετήσει την αντοχή τους, και να κατασκευάσει εν τέλει λειτουργικά μηχανολογικά προϊόντα. Ειδικά η κατασκευή ενός σύνθετου ανταλλακτικού που αποτελείται από επιμέρους εξαρτήματα που έχουν μια σχετική κίνηση μεταξύ τους, όπως οι αρθρωτοί μηχανισμοί της εργασίας, μπορεί να πραγματοποιηθεί εύκολα και γρήγορα με την προσθετική κατασκευή, καθώς με τον κατάλληλο σχεδιασμό και την επιλογή των κατάλληλων υλικών (π.χ. χρήση υδατοδιαλυτού υλικού στα διάκενα), η κατασκευή γίνεται εξ ολοκλήρου με μια εκτύπωση και δεν απαιτείται η συναρμολόγηση των επιμέρους εξαρτημάτων.

Κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση των μηχανολογικών εξαρτημάτων με τον εκτυπωτή Ultimaker S5 και την τεχνολογία FDM - Εναπόθεσης Συντηγμένου Υλικού, διαπιστώθηκε η ικανότητα των σύγχρονων τρισδιάστατων εκτυπωτών για κατασκευή ποιοτικών προϊόντων καλής ακρίβειας και ποιότητας επιφάνειας, σε γρήγορο χρόνο και χωρίς σπατάλη υλικού, που αποτελούν σημαντικά πλεονεκτήματα της προσθετικής κατασκευής σε σχέση με την παραδοσιακή κατασκευή. Επίσης, αναγνωρίστηκαν και καταγράφηκαν τα διάφορα προβλήματα που προέκυψαν κατά τη διαδικασία εκτύπωσης και σχετίζονται είτε με αστοχίες του εκτυπωμένου υλικού, είτε με την μη αποτελεσματική σχεδίαση, είτε με τις παραμέτρους εκτύπωσης. Το υλικό PLA αποδείχθηκε κατάλληλο για την εκτύπωση των δοκιμών, καθώς πρόκειται για ένα υλικό εύκολο στη χρήση, οικονομικό, που αποδίδει καλή ποιότητα επιφάνειας και διαστασιολογική σταθερότητα. Κάποιες μικρές αποκλίσεις από τις διαστάσεις σχεδιασμού προέκυψαν αλλά ήταν αναμενόμενες λόγω της απορρόφησης υγρασίας του υλικού PLA κατά τη μετ' επεξεργασία του ή/και τη θερμική διαστολή κατά τη διαδικασία εκτύπωσης. Τέλος η χρήση του προγράμματος 3D σχεδίασης Fusion 360 αξιολογήθηκε πολύ καλή, καθώς είναι κατάλληλο για παραμετρική σχεδίαση και εξαγωγή των αρχείων σε μορφή STL που απαιτείται για το λογισμικό του εκτυπωτή, και επίσης παρέχει τη δυνατότητα για προσομοίωση της μηχανικής αντοχής του μοντέλου λαμβάνοντας υπόψιν πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και υπολογίζοντας τα οριακά φορτία που επιτρέπεται να ασκηθούν ανάλογα με το υλικό κατασκευής.

Κύριες προτάσεις για συνέχιση της μελέτης που εκπονήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας είναι:

(α) Τρισδιάστατη εκτύπωση των τριών πολυσύνθετων εξαρτημάτων - ανταλλακτικών με τη χρήση διαφορετικών πολυμερών υλικών, όπως οι πολυκαρβονικοί εστέρες (Polycarbonate, PC) ή Tough PLA, αλλά και με πολυμερή υλικά ενισχυμένα με ίνες από άνθρακα ή γυαλιού. Συγκριτική αξιολόγηση των εκτυπωμένων πρωτοτύπων σχετικά με την ποιότητα επιφάνειας, τη διαστασιολογική σταθερότητα, την επίτευξη των κρίσιμων διαστάσεων (διάκενα μεταξύ των επιφανειών ολίσθησης), και τη λειτουργικότητα. Μελέτη της μηχανικής αντοχής (προσομοίωση) των τριών πολυσύνθετων εξαρτημάτων από τα παραπάνω υλικά.

(β) Τρισδιάστατη εκτύπωση των τριών πολυσύνθετων εξαρτημάτων - ανταλλακτικών με τη χρήση νήματος από ανοξείδωτο χάλυβα 17-4 PH, υλικό που μπορεί να εκτυπωθεί με προσθετική κατασκευή. Θα έχει προηγηθεί η κατάλληλη σχεδιαστική τροποποίηση των τριών 3D CAD μοντέλων λαμβάνοντας υπόψιν τη μείωση του μεγέθους (συρρίκνωση) που υφίστανται τα εκτυπωμένα πρωτότυπα μετά τη μετ' επεξεργασία που υφίστανται για να αποκτήσουν τις τελικές ιδιότητες.

(γ) Τρισδιάστατη εκτύπωση του πολυσύνθετου εξαρτήματος Pillow Block Bearing ή του Rod End Bearing με διαφορετικά υλικά, π.χ. Tough PLA για το κύριο σώμα, PAHT-CF για το σφαιρικό τριβέα, PVA για το διάκενο. Αυτή η εκτύπωση απαιτεί τη χρήση σύγχρονου 3D εκτυπωτή με τρεις κεφαλές, που μπορεί να χρησιμοποιήσει έως και τρία διαφορετικά νήματα ταυτόχρονα, μειώνοντας τη συνολική διάρκεια της διαδικασίας.

6.2 Το μέλλον της Προσθετικής Κατασκευής

Η τεχνολογία της Προσθετικής Κατασκευής (AM) παράλληλα με την εφαρμογή του Σχεδιασμού για Προσθετική Κατασκευή (DfAM), αλλά και την ανάπτυξη νέων υλικών για 3D εκτύπωση, αποτελούν συνεχώς εξελισσόμενους τομείς και στοχεύουν σε ένα ευρύ φάσμα πιθανών εφαρμογών στο μέλλον. Η προσθετική κατασκευή επιτρέπει τη δημιουργία ελαφρών, πολύπλοκων εξαρτημάτων αεροδιαστημικής που είναι δύσκολο ή αδύνατο να κατασκευαστούν με παραδοσιακές μεθόδους. Αυτά τα εξαρτήματα θα μπορούσαν να βελτιώσουν την κατανάλωση καυσίμου και την απόδοση στα αεροσκάφη. Παράλληλα, θα μπορούσε να φέρει επανάσταση στον κατασκευαστικό τομέα επιτρέποντας τη δημιουργία σύνθετων αλλά ελαφριών κατασκευών, όπως τρισδιάστατα εκτυπωμένα κτίρια, γέφυρες και λιμάνια, με βελτιστοποιημένα σχέδια και προηγμένα βιώσιμα υλικά. Η δυνατότητα της Προσθετικής Κατασκευής για κατασκευή προϊόντων πολύ μικρού μεγέθους θα μπορούσε να οδηγήσει σε προϊόντα νανοτεχνολογίας, συμπεριλαμβανομένων των βιοϊατρικών συσκευών, μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων (MEMS) και μικροσκοπικών αισθητήρων για εφαρμογές IoT. Η προσθετική κατασκευή ήδη επιτρέπει τη δημιουργία ιατρικών εμφυτευμάτων προσαρμοσμένων στην ανατομία του κάθε ασθενή, προσθετικών άκρων και άλλων μερών του σώματος. Στο μέλλον, αυτό θα μπορούσε να επεκταθεί σε εμφυτεύματα με

ενσωματωμένους αισθητήρες για παρακολούθηση της λειτουργίας τους σε πραγματικό χρόνο. Στον τομέα της αναγεννητικής ιατρικής, η βιοεκτύπωση υπόσχεται την εκτύπωση ιστών και οργάνων με τη χρήση βιο-μελάνης που αποτελεί ζωντανά κύτταρα, και στο μέλλον αυτή η τεχνολογία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία λειτουργικών οργάνων για μεταμόσχευση και εφαρμογές μηχανικής ιστών. Η κατασκευή πρόσθετων χρησιμοποιείται ήδη σε διαστημικές αποστολές για την επιτόπια παραγωγή ανταλλακτικών κατά παραγγελία. Στο μέλλον, θα μπορούσε να υποστηρίξει την κατασκευή δομών και εξαρτημάτων για διαστημόπλοια και οχήματα εξερεύνησης απευθείας στο διάστημα αξιοποιώντας τους τοπικούς πόρους [93, 94].

Στο ναυτιλιακό τομέα η χρήση των τρισδιάστατων εκτυπωτών στα πλοία επιτρέπει στο πλήρωμα να κατασκευάζει επιτόπου και εν πλω εξαρτήματα - ανταλλακτικά από διάφορα υλικά, όπως πλαστικά, σύνθετα και μεταλλικά υλικά. Κατασκευάζοντας ανταλλακτικά επί του σκάφους, τα πλοία μπορούν να μειώσουν την εξάρτησή τους από τους προμηθευτές από την ξηρά και τις παραδοσιακές αλυσίδες εφοδιασμού, και επίσης να ελαχιστοποιήσουν την ανάγκη για εκτεταμένη αποθήκευση ανταλλακτικών. Σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, όπως αστοχίες εξοπλισμού ή ζημιά σε κρίσιμα εξαρτήματα, η τρισδιάστατη εκτύπωση προσφέρει μια γρήγορη και αποτελεσματική λύση μέχρι το πλοίο να φτάσει στο κοντινότερο λιμάνι για επισκευή. Εκτός από τα ανταλλακτικά, οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές μπορούν να παράγουν εξοπλισμό και εργαλεία που είναι απαραίτητα για εργασίες επισκευής και συντήρησης επί του σκάφους, ενισχύοντας την αυτάρκεια του πλοίου και μειώνοντας την εξάρτηση από εξωτερικές εταιρείες [95].

Γενικά, αν και η υιοθέτησή της Προσθετικής Κατασκευής στη ναυτιλιακή βιομηχανία βρίσκεται ακόμη σε αρχικό στάδιο, οι συνεχιζόμενες εξελίξεις στην τεχνολογία και την επιστήμη των υλικών είναι πιθανό να οδηγήσουν στην ολοκληρωτική χρήση της για παραγωγή, προσφέροντας νέες δυνατότητες κατασκευής προϊόντων, ταχεία δημιουργία πρωτοτύπων, μειωμένο κόστος παραγωγής και ευελιξία στον σχεδιασμό καινοτόμων προϊόντων. Επιπλέον η Προσθετική Κατασκευή υποστηρίζει τη χρήση ανακυκλώσιμων και βιοαποικοδομήσιμων υλικών και με αυτόν τον τρόπο συνεισφέρει στην κυκλική οικονομία και στην εξοικονόμηση των πρώτων υλών. Αυτό συνάδει με τις προσπάθειες για την προώθηση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας και την ελαχιστοποίηση του οικολογικού αποτυπώματος της ναυτιλιακής βιομηχανίας.

Βιβλιογραφία

- [1] Vicki May, "The History of Additive Manufacturing: From The 1980s to Today," Oct. 2022, <https://prototaluk.com/blog/history-of-additive-manufacturing/>.
- [2] Markforged, "History of Additive Manufacturing and 3D Printing Technologies." <https://markforged.com/resources/blog/additive-manufacturing-history>.
- [3] Triditive, "What is additive manufacturing? History and benefits." <https://triditive.com/what-is-additive-manufacturing-history-and-benefits/>.
- [4] The History of 3D Printing: From the 80s to Today. <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/basics-of-3d-printing/the-history-of-3d-printing/>
- [5] GE Additive, "What is Additive Manufacturing." <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing>.
- [6] TWI, "What is Additive Manufacturing? Definition & Types." <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-additive-manufacturing>.
- [7] All3DP, "3D Printed Jet Engines: 10 Great Projects to DIY." <https://all3dp.com/2/3d-printed-engines-3d-models-diy/>
- [8] Michael Molitch, "An overview of plastics, metals and other feedstock for additive manufacturing. 3D Printing Materials."
- [9] LuxCreo, "Top Seven Industries for Additive Manufacturing Applications." <https://luxcreo.com/top-seven-industries-for-additive-manufacturing-applications/>.
- [10] M. K. Thompson *et al.*, "Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints," *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 65, no. 2, pp. 737–760, 2016.
- [11] B. P. Conner *et al.*, "Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services," *Addit Manuf*, vol. 1, pp. 64–76, Oct. 2014.
- [12] A. Al Rashid, S. A. Khan, S. G. Al-Ghamdi, and M. Koç, "Additive manufacturing: Technology, applications, markets, and opportunities for the built environment," *Autom Constr*, vol. 118, p. 103268, Oct. 2020.
- [13] "Automotive Industry Embraces Additive Manufacturing | Protolabs." <https://www.protolabs.com/en-gb/resources/blog/automotive-industry-embraces-additive-manufacturing/>
- [14] "3D Printing for Spare Part Industry- 3DIncredible." <https://3dinccredible.com/3d-printing-for-the-spare-part-industry-an-overview/>.
- [15] "Additive Manufacturing and 3D Printing is Military Game-Changer." <https://www.defensemecanetwork.com/stories/additive-manufacturing-department-of-defense-3d-printing-military-logistics/>.
- [16] A. Paolini, S. Kollmannsberger, and E. Rank, "Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods," *Addit Manuf*, vol. 30, Dec. 2019.
- [17] Michael Molitch, "From prototyping to end part manufacturing, everything you need to know. Applications of 3D Printing Contents."
- [18] D. Silva, J. Garrido, B. Lekube, and A. Arrillaga, "On-board and port 3D printing to promote a maritime plastic circular economy," *J Clean Prod*, vol. 407, p. 137151, Jun. 2023.
- [19] "3D Printing: Navy Builds Up Additive Manufacturing on Board." <https://www.marinelink.com/news/d-printing-navy-builds-additive-502465>.
- [20] Ş. Orçun, T. #1, and B. Şener, "The Use of Additive Manufacturing in Maritime Industry," *International Journal of Engineering Trends and Technology*, vol. 67, no. 6, 2019.

- [21] E. Gonzaga *et al.*, "Additive Manufacturing Applications in Maritime Education," *Diffusion Foundations and Materials Applications*, vol. 32, pp. 19–26, Feb. 2023.
- [22] "Additive Manufacturing enters the maritime mainstream - DNV." <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Additive-Manufacturing-enters-the-maritime-mainstream.html>.
- [23] "Selective Laser Sintering, SLS | Find suppliers, processes & material." <https://www.manufacturingguide.com/en/selective-laser-sintering-sls>.
- [24] "Selective laser melting - Wikipedia." https://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_melting
- [25] J. Huang, Q. Qin, and J. Wang, "A Review of Stereolithography: Processes and Systems," *Processes 2020, Vol. 8, Page 1138*, vol. 8, no. 9, p. 1138, Sep. 2020.
- [26] "Material Extrusion | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University." <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialextrusion/>.
- [27] "Sheet Lamination | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University." <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/sheetlamination/>.
- [28] "Ultrasonic Additive Manufacturing Explained." <https://blog.spatial.com/ultrasonic-additive-manufacturing>.
- [29] "Binder Jetting | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University." <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>.
- [30] "Material Jetting | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University." <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialjetting/>.
- [31] "Directed Energy Deposition | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University." <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/directedenergydeposition/>.
- [32] "Powder Bed Fusion | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University." <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion/>.
- [33] Carbon, "The 7 Types of Additive Manufacturing." <https://www.carbon3d.com/resources/blog/the-7-types-of-additive-manufacturing>.
- [34] L. U. Additive Manufacturing Research Group, "The 7 categories of Additive Manufacturing." <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/>.
- [35] "VAT Photopolymerisation | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University." <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/vatphotopolymerisation/>.
- [36] Additive Manufacturing, "Materials of Additive Manufacturing." <https://www.additivemanufacturing.media/kc/what-is-additive-manufacturing/am-materials>.
- [37] M. Srivastava, S. Rathee, V. Patel, A. Kumar, and P. G. Koppad, "A review of various materials for additive manufacturing: Recent trends and processing issues," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 21, pp. 2612–2641, Nov. 2022.
- [38] MaterialsZone, "A Comprehensive Guide to Additive Manufacturing Materials for Scientists and Industry Professionals." <https://www.materials.zone/blog/unlocking-the-future-a-comprehensive-guide-to-additive-manufacturing-materials-for-scientists-and-industry-professionals>.

- [39] D. Bourell *et al.*, “Materials for additive manufacturing,” *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 66, no. 2, pp. 659–681, 2017.
- [40] E. B. Caldon, J. R. C. Dizon, R. A. Viers, V. J. Garcia, Z. J. Smith, and R. C. Advincula, “Additively manufactured high-performance polymeric materials,” *MRS Communications*, vol. 11, no. 6. Springer Nature, pp. 701–715, Dec. 01, 2021.
- [41] “AM Process & Material Comparisons | Center for Additive and Digital Advanced Production Technologies.”
<http://apt.mit.edu/am-process-comparisons>.
- [42] nTop, “Design for additive manufacturing: 3 levels of DfAM.”
<https://www.ntop.com/resources/blog/what-is-design-for-additive-manufacturing/#what-is-dfam>.
- [43] A. W. Gebisa and H. G. Lemu, “Design for manufacturing to design for Additive Manufacturing: Analysis of implications for design optimality and product sustainability,” *Procedia Manuf*, vol. 13, pp. 724–731, 2017.
- [44] Markforged, “Design for Additive Manufacturing 3D Printing Strategies.”
<https://markforged.com/resources/blog/design-for-additive-manufacturing-dfam>.
- [45] M. Mandolini, P. Pradel, and P. Cicconi, “Design for Additive Manufacturing: Methods and Tools,” *Applied Sciences 2022, Vol. 12, Page 6548*, vol. 12, no. 13, p. 6548, Jun. 2022.
- [46] F. Laverne, F. Segonds, N. Anwer, and M. Le Coq, “DFAM In the Design Process: A Proposal Of Classification To Foster Early Design Stages,” 2014.
- [47] “Design for Additive Manufacturing | inspire AG.”
<https://www.inspire.ch/en/research-for-the-industry/additive-manufacturing-3d-print-design-for-am/design-for-am/>.
- [48] Jabil, “What is Design for Additive Manufacturing?”
<https://www.jabil.com/blog/design-for-additive-manufacturing.html>.
- [49] Carolyn Schwaar, “Top Design for Additive Manufacturing (DfAM) Software,” 2021,
<https://all3dp.com/1/top-design-for-additive-manufacturing-dfam-software/#fusion-360>.
- [50] A. Wiberg, J. Persson, and J. Ölvander, “Design for additive manufacturing – a review of available design methods and software,” *Rapid Prototyping Journal*, vol. 25, no. 6. Emerald Group Holdings Ltd., pp. 1080–1094, Aug. 21, 2019.
- [51] M. Niaki and F. Nonino, *The Management of Additive Manufacturing*, vol. 93, no. 2. 2018.
- [52] “Altair Launches Design and Simulation Solution for Additive Manufacturing.”
<https://altair.com/newsroom/news-releases/Altair-Launches-Design-and-Simulation-Solution-for-Additive-Manufacturing>.
- [53] “Additive Suite | Comprehensive Additive Manufacturing Solution.”
<https://www.ansys.com/products/additive/ansys-additive-suite>.
- [54] “LiveLink™ for SOLIDWORKS® Updates - COMSOL® 6.1 Release Highlights.”
<https://www.comsol.com/release/6.1/livelink-solidworks>.
- [55] “Demo Video Additive Manufacturing Pump Impeller Granta Selector 2021 R1.”
https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=7MZ7sjyREU0&ab_channel=Qfinsoft.
- [56] “Materialise Magics 24 - faster than ever, new release.”
<https://plmgroup.eu/articles/materialise-magics-faster-ever/>.
- [57] Anne Scrimshaw, Tomasz Taubert, Aric Donerkiel, and Gerard Shields, “What are the best design tools for additive manufacturing?”
<https://www.linkedin.com/advice/1/what-best-design-tools-additive-manufacturing-skills-3d-printing>.
- [58] “Introducing GrabCAD Workbench | 3D Print Ordering | Stratasys Direct.”
<https://www.stratasys.com/en/stratasysdirect/resources/articles/grabcad-workbench/>.

- [59] “Autodesk Fusion 360 with Netfabb | 2024, 2023 Features.”
<https://www.autodesk.com/products/netfabb/features>.
- [60] Λαζαρίδη Λ.Ε. Στοιχεία Μηχανών, Ίδρυμα Ευγενίδου, 1994.
https://www.eef.edu.gr/media/2106/e_a00015.pdf.
- [61] Βικιπαίδεια, «Έδρανο»,
<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%88%CE%B4%CF%81%CE%B1%CE%BD%CE%BF>.
- [62] Βελαώρου Ι. Χ., Στοιχεία Μηχανών, Δωδέκατη έκδοση, Εκδόσεις ΙΩΝ.
- [63] KMS “Plastic Bearing Materials”,
<https://www.kmsbearings.com/materials/plastic-bearing-materials.html>.
- [64] IGUS, “igubal® pillow block bearing, KSTM”,
https://www.igus.co.uk/product/igubal_KSTM?artnr=KSTM-05.
- [65] Engineering Product Design, “Pillow block bearing types and applications.”
<https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/pillow-block-bearing/>.
- [66] IGUS, “Lightweight and lubrication-free iglidur plain bearings make catamarans fly”,
<https://press.igus.eu/lightweight-and-lubrication-free-igidur-plain-bearings-make-catamarans-fly/>.
- [67] OneMonroe, “What Is a Clevis Fastener?”
<https://monroeengineering.com/blog/what-is-a-clevis-fastener/>.
- [68] Monroe Aerospace, “The Beginner’s Guide to Clevis Pins and How They Work.”
<https://monroeaerospace.com/blog/the-beginners-guide-to-clevis-pins-and-how-they-work/>.
- [69] “Fork Clevis Eye Bolt U Clevis Joint.”
<https://veerenterprise.com/fork-clevis-manufacturers>.
- [70] “Custom Male Female Threaded Clevis Joint - Rod Ends.”
<https://syzrodends.com/product/custom-male-female-threaded-clevis-joint/>.
- [71] IGUS, “Clevis joint, GERM / GELM, igubal®”,
https://www.igus.co.uk/product/igubal_GERM_GELM?artnr=GERM-10.
- [72] CSB, “Plastic Spherical Bearings”
<https://www.csb-ep.com/products/gc-clevis-joints-710.html>.
- [73] CSB, “CSB-BAL®. Plastic Clevis Joints”
<https://www.csb-ep.com/news/details-clevis-joints-news-817.html>.
- [74] Reid Supply, “What Are Clevis Bolts, And Where Are They Used?”
<https://www.reidsupply.com/en-us/industry-news/clevis-bolts-product-guide>.
- [75] “Aurora Rod Ends at The Chassis Shop”
<https://secure.chassisshop.com/categories/15342/>.
- [76] OneMonroe, “What Is a Rod End Bearing?”
<https://monroeengineering.com/blog/what-is-a-rod-end-bearing/>.
- [77] Azim Ismail, “An Introduction to Rod End Bearings”
<https://www.bearingcentre.net/blog/an-introduction-to-rod-end-bearings>.
- [78] Noah Dropkin, “Rod Ends and Sphericals: How to.”
<https://www.designjudges.com/articles/rod-ends-and-spherical-bearings>.
- [79] ISK Bearings, “Introduction to Rod End Bearings: Structure, Applications, and Common Models.”, <https://iskbearing.com/news/knowledge/introduction-to-rod-end-bearings-structure-applications-and-common-models>.
- [80] SK Bearings, “Reliable Rod End Bearings: Precision Performance for Industrial Machinery and Equipment.”, <https://iskbearing.com/products/rod-end-bearings>.

- [81] Minebeamitsumi Inc., “Rod End Bearings, Self-Lubricating Liners”,
https://product.minebeamitsumi.com/en/technology/bearing/rodend_sphericalbearings_cat-2_003.html.
- [82] Midland Bearings LTD, “Rod End and Plain Spherical Bearings”,
<https://www.midlandbearings.com/products-category/rod-end-and-plain-spherical-bearings/>.
- [83] OneMonroe, “Rod Ends.”
<https://catalog.monroeengineering.com/category/rod-ends>.
- [84] Emerson Bearing, “What Are Rod Ends and How Are They Used?”
<https://blog.emersonbearing.com/blog/what-are-rod-ends-and-how-are-they-used>.
- [85] TWI, “What is PLA? (Everything You Need to Know).”
<https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-pla#Properties>.
- [86] All3DP, “PLA Plastic/Material – The Ultimate Guide.”
<https://all3dp.com/2/what-is-pla-plastic-material-properties/>.
- [87] “Ultimaker PLA | Blue | 3D Prima | 3D-Printers and filaments.”
https://www.3dprima.com/filaments/ultimaker-pla-2-85-mm-750-g-blue_24686_5783.
- [88] F. Sharifi, Z. Bai, R. Montazami, and N. Hashemi, “Mechanical and physical properties of poly (vinyl alcohol) microfibers fabricated by a microfluidic approach,” *RSC Adv*, vol. 6, no. 60, pp. 55343–55353, Jun. 2016.
- [89] N. Jain, V. K. Singh, and S. Chauhan, “A review on mechanical and water absorption properties of polyvinyl alcohol-based composites/films,” *J Mech Behav Mater*, vol. 26, no. 5–6, pp. 213–222, Dec. 2017.
- [90] “Ultimaker PVA | 3D Prima | 3D-Printers and filaments.”
https://www.3dprima.com/filaments/ultimaker-pva-2-85-mm-750-g_24708_5805.
- [91] UltiMaker, “The Ultimaker S5 is here.”
<https://ultimaker.com/learn/the-ultimaker-s5-is-here/>.
- [92] “Ultimaker PLA for S series: Versatile, colorful, easy to 3D print.”
<https://ultimaker.com/materials/s-series-pla/>.
- [92] D. Silva, J. Garrido, B. Lekube, and A. Arrillaga, “On-board and port 3D printing to promote a maritime plastic circular economy,” *J Clean Prod*, vol. 407, p. 137151, Jun. 2023.
- [94] Scott Reese *et al.*, “Generative Design: Redefining What’s Possible in The Future of Manufacturing.”
- [95] Michael Molitch, “How the technology is transforming and how the technology is transforming the world. The Future of 3D Printing.”