



Εφαρμογή αντίστροφης μηχανικής και ταχείας
προτυποποίησης για την κατασκευή βύσματος
πολυουρεθανικής ρητίνης

από

Ευάγγελος Μάσχας

Διατριβή για λήψη Βασικού Διπλώματος

Τμήμα Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής
Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

Επιβλέπων Καθηγητής

Φίλιππος Αζαριάδης

Ιούνιος 2023

Μέλη εξεταστικής επιτροπής:

Φίλιππος Αζαριάδης

Μιχαήλ Παπουτσιδάκης

Χρήστος Δρόσος

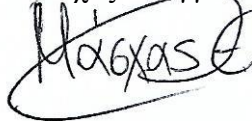
Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Ευάγγελος Μάσχας του Σωτηρίου, με αριθμό μητρώου 222017046 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

Ο Δηλών

Μάσχας Ευάγγελος



Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 – Αντίστροφη μηχανική.....	13
1.1 Περίληψη κεφαλαίου.....	13
1.2 Νέες τεχνολογίες	13
1.3 Εισαγωγή στην αντίστροφη μηχανική.....	14
1.4 Λόγοι εφαρμογής της αντίστροφης μηχανικής.....	15
1.5 Στρατηγική και διαδικασίες εκτέλεσης αντίστροφης μηχανικής	16
1.6 Είδη σαρωτών.....	18
1.6.1 Σαρωτές επαφής	19
1.6.2 Σαρωτές αποστάσεως	20
1.6.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα	22
1.7 Μέθοδος επιλογής συστήματος αντίστροφης μηχανικής.....	23
Κεφάλαιο 2 – Ταχεία Προτυποποίηση	25
2.1 – Περίληψη κεφαλαίου.....	25
2.2 – Εισαγωγή στην ταχεία προτυποποίηση.....	25
2.3 – Διαδικασία εφαρμογής ταχείας προτυποποίησης.....	26
2.4 - Εφαρμογές ταχείας προτυποποίησης	28
2.5 – Τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής	29
2.5.1 – Φωτοπολυμερισμός (Vat Photopolymerization).....	29
2.5.2 – Σύντηξη πούδρας (Powder Bed Fusion).....	31
2.5.3 – Εξώθηση υλικού (Material Extrusion)	32
2.5.3 – Binder Jetting.....	33
2.5.4 – Material Jetting.....	34
2.5.5 Sheet Lamination.....	35

2.5.6 Directed Energy Deposition	36
2.6 Το μέλλον της ταχείας προτυποποίησης.....	37
Κεφάλαιο 3 – Εργασίες πεδίου	40
3.1 – Περίληψη εφαρμογής	40
3.2 – Λόγος κατασκευής.....	40
3.3 – Εργαλεία	41
3.4 - Υλικά.....	43
3.5 - Διαδικασία κατασκευής.....	45
3.5.1 – Εφαρμογή αντίστροφης μηχανικής	46
3.5.2 – Ταχεία προτυποποίηση	50
3.5.3 - Δημιουργία καλουπιών.....	54
3.5.4 – Διαδικασία χύτευσης πλαστικού υλικού.....	56
Συμπεράσματα εφαρμογής	60
Συμπεράσματα	62
Βιβλιογραφία.....	63

Κατάλογος εύρεσης Εικόνων

Εικόνα 1.1: Ο κύκλος ανάπτυξης ενός προϊόντος	13
Εικόνα 1.2: Διαφορά μεταξύ «προοδευτικής μηχανικής» και «αντίστροφης μηχανικής»	14
Εικόνα 1.3: Μετατροπή φυσικού αντικειμένου σε ψηφιακό	15
Εικόνα 1.4: Η διαδικασία της αντίστροφης μηχανικής	18
Εικόνα 1.5: CMM σαρωτής επαφής τύπου bridge	19
Εικόνα 1.6: Όργανα μέτρησης	20
Εικόνα 1.7: Απεικόνιση Time-of-flight και Phase shift scanners	21
Εικόνα 1.8: Απεικόνιση triangulation scanners	21
Εικόνα 2.1: Η ιδέα της ταχείας προτυποποίησης	26
Εικόνα 2.2: Εικόνα σύγκρισης αρχείου CAD με .stl	27
Εικόνα 2.3: Διαδικασία τεμαχισμού αντικειμένου μέσω του slicer	28
Εικόνα 2.4: Η τεχνολογία εκτυπωτών SLA	30
Εικόνα 2.5: Η τεχνολογία εκτυπωτών SLS	32
Εικόνα 2.6: Η τεχνολογία εκτυπωτών FDM	33
Εικόνα 2.7: Η τεχνολογία εκτύπωσης Binder Jetting	34
Εικόνα 2.8: Η τεχνολογία εκτύπωσης Material Jetting	35
Εικόνα 2.9: Η τεχνολογία εκτύπωσης Laminated Object Manufacturing	36
Εικόνα 2.10: Η τεχνολογία εκτύπωσης Directed Energy Deposition	37
Εικόνα 2.11: Τα υλικά που τείνουν να χρησιμοποιηθούν έως το 2031	38
Εικόνα 3.1: Παχύμετρο Mitutoyo	41
Εικόνα 3.2: Ψηφιακός ζυγός	41
Εικόνα 3.3: Τρισδιάστατος εκτυπωτής Creality Ender 3 V2	42
Εικόνα 3.4: Βύσμα προς αντιγραφή	47
Εικόνες 3.5α, 3.5β, 3.5γ: Διαδικασία μέτρησης βύσματος	48

Εικόνα 3.6: Δημιουργία κορμού στο Inventor	49
Εικόνα 3.7: Δημιουργία οπών στο Inventor	49
Εικόνα 3.8: Τελικό σχήμα στο Inventor	50
Εικόνα 3.9: Μηχανολογικό σχέδιο	50
Εικόνα 3.10: Δημιουργία νέου πρωτότυπου αντικειμένου μέσω της εφαρμογής ULTIMAKER CURA 4.12.1	52
Εικόνα 3.11: Φωτογραφία κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης	53
Εικόνα 3.12: Φωτογραφία στο τέλος της εκτύπωσης	53
Εικόνα 3.13: Σύγκριση εκτυπωμένου και πρωτότυπου βύσματος	54
Εικόνα 3.14: Δημιουργία καλουπιών σιλικόνης	56
Εικόνα 3.15: Χύτευση πολυουρεθανικής ρητίνης	57
Εικόνα 3.16: Δείκτης σκληρότητας πλαστικών	58
Εικόνα 3.17: Περιττό υλικό λόγω χύτευσης	58
Εικόνα 3.18: Τελικό βύσμα	59
Εικόνα 4.1: Η επιφάνεια στήριξης των supports	61

Κατάλογος εύρεσης Πινάκων

Πίνακας 3.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά Creality Ender 3 V2.	42
Πίνακας 3.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά Esun Pla+ 1.75mm.	43
Πίνακας 3.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά σιλικόνης καλουπιών.	44
Πίνακας 3.4: Τεχνικά χαρακτηριστικά πολυουρεθανικής ρητίνης.	45
Πίνακας 3.5: Σύγκριση διαστάσεων πρωτότυπου με εκτυπωμένου βύσματος.	55

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ερευνάται η διαδικασία παραγωγής ενός βύσματος πολυουρεθανικής ρητίνης, με στόχο τη δημιουργία ενός νέου ίδιων ή καλύτερων προδιαγραφών το οποίο θα είναι ικανό να αντέξει στη διάβρωση που προκαλεί το θαλάσσιο περιβάλλον. Λόγω της μη διαθεσιμότητας των τεχνικών στοιχείων και αρχείων CAD, η χρήση της αντίστροφης μηχανικής είναι απαραίτητη. Η μέθοδος που έχει επιλεγεί για την κατασκευή του πρωτότυπου βύσματος είναι η ταχεία προτυποποίηση αξιοποιώντας την τεχνολογία εκτύπωσης εξώθησης υλικού. Εφόσον το αντικείμενο έχει εκτυπωθεί και έχει επαληθευτεί η διαστασιακή ομοιότητά του με το πρωτότυπο μέσω μετρήσεων, ξεκινάει η φάση της παραγωγής καλουπιών σιλικόνης στα οποία θα χυτευτεί η πολυουρεθανική ρητίνη. Καθ' όλη τη διάρκεια του κειμένου, έχει γίνει εκτενής ανάλυση στην αντίστροφη μηχανική και στα εργαλεία της, στην ταχεία προτυποποίηση και στις τεχνολογίες της καθώς και σε όλα τα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας κατασκευής του βύσματος.

Λέξεις κλειδιά

Αντίστροφη μηχανική, Ταχεία Προτυποποίηση, Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων, Σαρωτές Laser, Προσθετική κατασκευή

Abstract

This dissertation explores the production process of a polyurethane resin connector, aiming to develop a replacement that meets or exceeds the current standards, considering the corrosive nature of the sea environment. Due to the unavailability of technical data and CAD drawings for the connector, reverse engineering becomes essential. The chosen manufacturing method for the prototype connector involves rapid prototyping, specifically utilizing the Fused Deposition Modeling 3D-printer technology. After successful verification of the 3D-printed prototype against the required measurements, the production phase begins, using silicone molds for casting the polyurethane resin. Throughout this study, extensive analysis has been conducted, including Reverse Engineering, Rapid Prototyping, as well as all stages of the production process.

Keywords

Reverse engineering, Rapid Prototyping, CAD/CAM/CAE (Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing, Computer Aided Engineering), Co-ordinate Measuring Machine (CMM), Laser Scanners, Additive Manufacturing.

Αναγνωρίσεις

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον κύριο επιβλέποντα Καθηγητή Φίλιππο Αζαριάδη για τη συνεχή υποστήριξη της διπλωματικής μου διατριβής και για την υπομονή καθώς και για τα κίνητρα και τις ιδέες που μου έδωσε. Από τις πρώτες συζητήσεις, ο Καθηγητής Φίλιππος Αζαριάδης με βοήθησε να καταλάβω ποια βήματα έπρεπε να ακολουθήσω για να ολοκληρώσω με επιτυχία τη διατριβή μου.

Εκτός από τον κύριο επιβλέποντα μου, θα ήθελα να ευχαριστήσω, τον κύριο Χρήστο Δρόσο και κύριο Μιχαήλ Παπουτσιδάκη, μέλη της επιτροπής παρακολούθησης της διατριβής μου. Η ουσιαστική γνώση στο ερευνητικό θέμα της διατριβής μου ήταν πολύ σημαντική.

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τη βαθύτατη εκτίμηση μου στους συναδέλφους μου που διάβασαν και σχολίασαν τη διατριβή μου.

Ευχαριστώ την οικογένεια μου για την υπομονή και την ενθάρρυνση που έδειξε όλο αυτό το διάστημα σε όσες δυσκολίες αντιμετώπισα.

Κεφάλαιο 1 – Αντίστροφη μηχανική

1.1 Περίληψη κεφαλαίου

Αυτό το κεφάλαιο εισάγει τους αναγνώστες στον όρο της αντίστροφης μηχανικής (reverse engineering). Στόχος του κεφαλαίου είναι ο ορισμός, η ανάλυση της στρατηγικής, οι τεχνικές που ακολουθούνται καθώς και τα διαθέσιμα εργαλεία για να εφαρμοστεί η αντίστροφη μηχανική.

1.2 Νέες τεχνολογίες

Οι συνεχείς και εξειδικευμένες ανάγκες του ανθρώπινου πληθυσμού με το πέρασ των χρόνων αυξάνονται. Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1.1**, ο κύκλος ανάπτυξης ενός προϊόντος περιλαμβάνει τα στάδια της ιδέας, του προσδιορισμού, της σχεδίασης και των δοκιμών μέχρι την εισαγωγή του στην αγορά, τα οποία απαιτούν πολύτιμο χρόνο. Αυτό ωθεί τις βιομηχανίες παραγωγής προϊόντων και υπηρεσιών, στην ελαχιστοποίηση του τελικού χρόνου παράδοσης. Οι βιομηχανίες πλέον αναζητούν καινοτόμες μεθόδους παραγωγής και υλοποίησης των προϊόντων τους. Κάποιες από τις νέες τεχνολογίες οι οποίες έχουν εισαχθεί στις βιομηχανίες και είναι ικανές να καλύψουν τις παραπάνω ανάγκες σε σύντομο χρονικό διάστημα είναι η χρήση αντίστροφης μηχανικής (Reverse Engineering), CAD/CAM/CAE (Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing/Computer Aided Engineering) και η ταχεία προτυποποίηση (rapid prototyping).

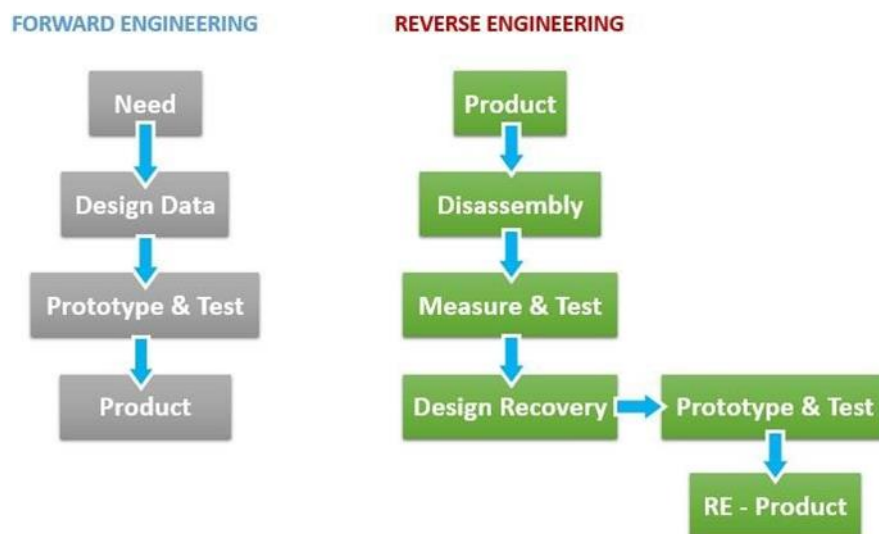


Εικόνα 1.1. Ο κύκλος ανάπτυξης ενός προϊόντος.

Πηγή: Google's Product Development Life Cycle

1.3 Εισαγωγή στην αντίστροφη μηχανική

Ο όρος μηχανική ορίζεται ως η διαδικασία σχεδίασης, κατασκευής, συναρμολόγησης και συντήρησης των αντικειμένων ή και ολόκληρου συστήματος. Η μηχανική χωρίζεται σε δύο κατηγορίες: την προοδευτική μηχανική (forward engineering) και την αντίστροφη μηχανική (reverse engineering). Η προοδευτική μηχανική ορίζεται ως, η διαδικασία δημιουργίας ενός αντικειμένου από το μηδέν. Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1.2**, η σειρά ακολουθείται ως εξής: με τη δημιουργία της ανάγκης ενός αντικειμένου, θα πρέπει το σχεδιαστικό τμήμα της επιχείρησης να σχεδιάσει το νέο προϊόν. Ακολουθούν τα πρώτα πρωτότυπα κομμάτια και οι απαραίτητες μετρήσεις ώστε το τελικό προϊόν να ανταποκρίνεται στους στόχους των μηχανικών πριν βγει στην αγορά [1]. Αντίθετα, η αντίστροφη μηχανική ασχολείται με το ήδη υπάρχον υλικό αντικείμενο. Σε πολλές περιπτώσεις οι μηχανικοί κάνουν αντίστροφη μηχανική διότι έχουν ελλιπείς πληροφορίες για το αντικείμενο μελέτης τους. Συγκεκριμένα, μπορεί να λείπουν μηχανολογικά σχέδια, αρχεία CAD, τεχνικές οδηγίες και λεπτομέρειες. Η διαδικασία αποσυναρμολόγησης και ψηφιοποίησης ενός φυσικού αντικειμένου ή συστήματος μέσω σάρωσης αυτού ονομάζεται επίσης αντίστροφη μηχανική [2].



Εικόνα 1.2. Διαφορά μεταξύ «προοδευτικής μηχανικής» και «αντίστροφης μηχανικής».

(Πηγή: [1])

Η αντίστροφη μηχανική είναι ευρέως γνωστή λόγω της συχνής χρήσης της σε διάφορες εφαρμογές της μηχανικής. Συναντάται σε παντός τύπου βιομηχανίες σχεδιασμού και κατασκευής αντικειμένων. Τα ελλιπή στοιχεία του αντικειμένου όπως αναφέρθηκε παραπάνω είναι ένας λόγος για να εφαρμοστεί η αντίστροφη μηχανική.

Επίσης ένας λόγος που εφαρμόζεται η αντίστροφη μηχανική είναι η πολυπλοκότητα του αντικειμένου. Σε κάποιες περιπτώσεις ορισμένων αυτοκινητοβιομηχανιών λόγω της πολυπλοκότητας του πρωτοτύπου, οι σχεδιαστές δεν αποτυπώνουν τις ιδέες τους σε μορφή CAD, αλλά δημιουργούν ένα φυσικό αντικείμενο από κάποιο υλικό το οποίο είναι εύκολα διαχειρίσιμο π.χ ξύλο ή πηλός. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι διότι, ο σχεδιαστής ίσως να μην καταφέρει να αποτυπώσει απόλυτα την ιδέα του σε ψηφιακή μορφή CAD. Συνεπώς, δημιουργείται ένα πρωτότυπο στο οποίο θα εφαρμοστεί αντίστροφη μηχανική κάνοντας χρήση ειδικών σαρωτών ακριβείας οι οποίοι είναι ικανοί να αποτυπώσουν οποιαδήποτε λεπτομέρεια του περίπλοκου μοντέλου. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται μετατροπή του φυσικού αντικειμένου σε ψηφιακό όπως φαίνεται αναλυτικά στην **Εικόνα 1.3**.



Εικόνα 1.3. Μετατροπή φυσικού αντικειμένου σε ψηφιακό.
(Πηγή: [3])

1.4 Λόγοι εφαρμογής της αντίστροφης μηχανικής

Παρακάτω αναφέρονται οι λόγοι που μια επιχείρηση ή βιομηχανία εφαρμόζει την αντίστροφη μηχανική [4]:

- Δημιουργία σχεδίων και αρχείων του αντικειμένου που έχουν χαθεί, καταστραφεί ή δεν υπήρξαν ποτέ. Σε περιπτώσεις που έχουν ακολουθηθεί οι παραπάνω λόγοι, η αντίστροφη μηχανική μπορεί να βοηθήσει στην επαναδημιουργία αυτών των σχεδίων για τροποποίηση ή συντήρηση των αντικειμένων.
- Δημιουργία αρχείων CAD που έχουν χαθεί ή δεν υπήρξαν ποτέ. Στη σημερινή εποχή τα περισσότερα αρχεία συναντώνται σε μορφή CAD. Αν κάποιο

αντικείμενο είναι χρονολογικά παλαιό, τότε μέσω της αντίστροφης μηχανικής αυτό το αντικείμενο μπορεί να αποτυπωθεί ψηφιακά. Η ίδια φιλοσοφία ακολουθείται και για αντικείμενα που δεν έχουν σχεδιαστεί ποτέ μέσω CAD.

- *Ο κατασκευαστής του αντικειμένου δεν υπάρχει πλέον στην αγορά.* Πολλές επιχειρήσεις κλείνουν οριστικά και έτσι ανταλλακτικά και αναλώσιμα που παρήγαγαν παύουν να κυκλοφορούν στην αγορά.
- *Ο κατασκευαστής δεν παράγει πλέον το προϊόν.* Π.χ μια αυτοκινητοβιομηχανία σταμάτησε την παραγωγή ενός συγκεκριμένου ανταλλακτικού επειδή έκρινε κοστοβόρα αυτή τη διαδικασία.
- *Η βελτιστοποίηση της ποιότητας και η καινοτομία του αντικειμένου.* Κατανοώντας το σχεδιασμό και τις λειτουργίες, οι μηχανικοί είναι σε θέση να προτείνουν καινοτόμες ιδέες σχετικά με την απόδοση, την ποιότητα αλλά και το κόστος του αντικειμένου.
- *Συμμόρφωση με κανονισμούς και πρότυπα.* Η εξέταση των προϊόντων για πιθανές παραβιάσεις νομικών ζητημάτων και κανονισμών ασφάλειας.
- *Εξάλειψη των ανεπιθύμητων χαρακτηριστικών ενός αντικειμένου.* Μέσω της αντίστροφης μηχανικής και με τη βοήθεια μετρήσεων και δεικτών, οι μηχανικοί μπορούν να αναγνωρίσουν το πρόβλημα που έχει προκύψει ώστε να κάνουν διορθωτικές κινήσεις.
- *Εκπαίδευση των μηχανικών για μεγαλύτερη εμβάθυνση στο αντικείμενο μελέτης τους.* Εφαρμόζοντας αντίστροφη μηχανική, δίνεται η δυνατότητα στα άτομα που εκπονούν τη μελέτη να καταλάβουν σε βάθος τη λειτουργία του αντικειμένου.
- *Ανάλυση των ανταγωνιστών με σκοπό το πλεονέκτημα.* Με την αγορά ενός προϊόντος από μια ανταγωνιστική εταιρεία, οι επιχειρήσεις μπορούν να έρθουν σε επαφή με τις τεχνολογίες και τις στρατηγικές που ακολουθούνται ώστε να αποκτήσουν ανταγωνιστικό πλεονέκτημα.

1.5 Στρατηγική και διαδικασίες εκτέλεσης αντίστροφης μηχανικής

Για να εφαρμοστεί σωστά η αντίστροφη μηχανική ενός αντικειμένου ή ενός συστήματος πρέπει να θεσπιστεί μια στρατηγική προσέγγιση. Η στρατηγική που θα

επιλεγθεί από την επιχείρηση πρέπει να καλύπτει τις παρακάτω ενότητες:

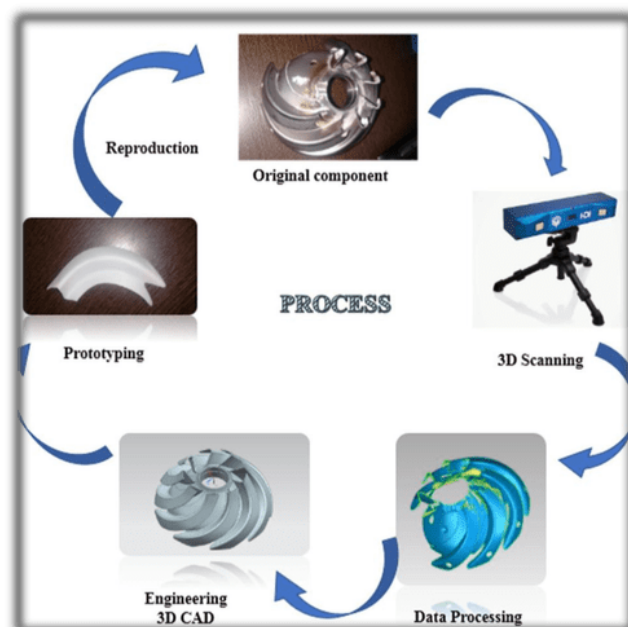
- *Λόγος εφαρμογής αντίστροφης μηχανικής.*
- *Αριθμός αντικειμένων που θα πρέπει να εφαρμοστεί η αντίστροφη μηχανική.*
- *Όγκος αντικειμένων.*
- *Πολυπλοκότητα αντικειμένου ή συστήματος.*
- *Τεχνικά χαρακτηριστικά αντικειμένου ή συστήματος.*
- *Επιθυμητή ακρίβεια ανάλυσης.*
- *Άτομα που θα εργαστούν στο αντικείμενο.*

Με την θέσπιση και κατανόηση της στρατηγικής, ακολουθούν οι τέσσερις διαδοχικές φάσεις της αντίστροφης μηχανικής όπως παρατηρούνται και στην **Εικόνα 1.4**.

1. Στο αρχικό στάδιο της αντίστροφης μηχανικής, ο μηχανικός οφείλει να προετοιμάσει το αντικείμενο προς ψηφιοποίηση. Η προετοιμασία μπορεί να περιλαμβάνει αποσυναρμολόγηση του αντικειμένου ή και καθάρισμα/απομάκρυνση τυχόν υπολειμμάτων που βρίσκονται πάνω στο αντικείμενο. Όσο πιο καθαρή είναι η επιφάνεια, τόσο ακριβέστερη θα είναι και η μέτρηση. Η μέτρηση μπορεί να γίνει με σαρωτές επαφής ή σαρωτές αποστάσεως ανάλογα τη στρατηγική που έχει επιλεγθεί από την ομάδα.
2. Η δεύτερη φάση της διαδικασίας που ακολουθείται σχετίζεται με την ψηφιοποίηση και την επεξεργασία δεδομένων. Η γεωμετρία του σκαναρισμένου αντικείμενου εμφανίζεται στο πρόγραμμα ως τρισδιάστατο νέφος ενός συνόλου από σημεία στο χώρο. Λόγω του θορύβου που φέρει το νέφος, θα πρέπει να εφαρμοστούν προκαθορισμένα φίλτρα απομάκρυνσής του. Πολλές φορές, ένα σκανάρισμα δεν είναι αρκετό. Οι επαναλαμβανόμενες μετρήσεις σε διαφορετικές όψεις του αντικειμένου αντιστοιχούν σε ακριβέστερες μετρήσεις.
3. Η τρίτη φάση είναι η πιο περίπλοκη. Ο μηχανικός θα πρέπει να συνδυάσει τις παραπάνω λειτουργίες του προγράμματος και με τη βοήθεια ενσωματωμένων αλγορίθμων του λογισμικού, να δημιουργηθεί σε μορφή CAD ένα ακριβές τρισδιάστατο αντίγραφο του πρωτότυπου δείγματος. Με το πέρας της

επεξεργασίας του ψηφιακού αντικειμένου, το αρχείο πλέον ως μοντέλο CAD συγκρίνεται με το πρωτότυπο. Σε αυτή τη φάση εξαρτάται από τους μηχανικούς πως θα χρειαστεί να προχωρήσουν για να λάβουν τα επιθυμητά αποτελέσματα της μελέτης τους. Μερικά από τα τρισδιάστατα αρχεία που μπορούν να αποθηκευτούν οι σαρώσεις είναι: .STL, .OBJ, .FBX, .DAE, 3DS, IGES, STEP, AMF, 3MF [5].

4. Στην τελική φάση, λαμβάνουν μέρος οι μετρήσεις με σκοπό τη διαπίστωση της ομοιότητάς του με το πρωτότυπο. Σε περίπτωση πολλών διαφορών μεταξύ του πρωτότυπου αντικειμένου και του ψηφιοποιημένου, η διαδικασία πρέπει να επαναληφθεί.



Εικόνα 1.4. Η διαδικασία της αντίστροφης μηχανικής.
(Πηγή: [6])

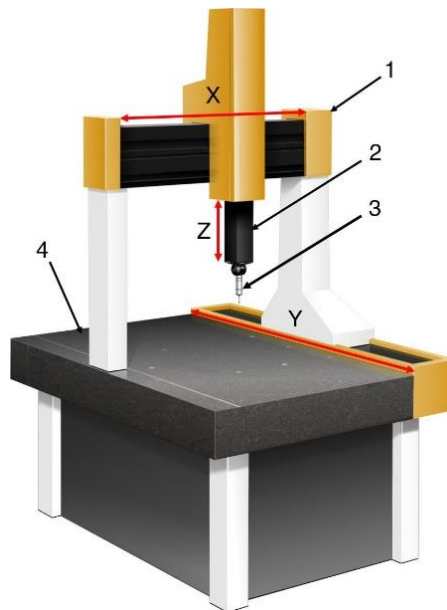
1.6 Είδη σαρωτών

Η σάρωση των αντικειμένων γίνεται αφού έχει επιλεγθεί η στρατηγική για το εκάστοτε αντικείμενο μελέτης. Οι σαρωτές που επιλέγονται για την αντίστροφη μηχανική είναι ικανοί να αποτυπώσουν ψηφιακά το αντικείμενο σε τρισδιάστατη μορφή με τη μορφή ενός νέφους σημείων. Υπάρχουν δύο τύποι σαρωτών: α) οι σαρωτές επαφής, β) οι σαρωτές αποστάσεως.

1.6.1 Σαρωτές επαφής

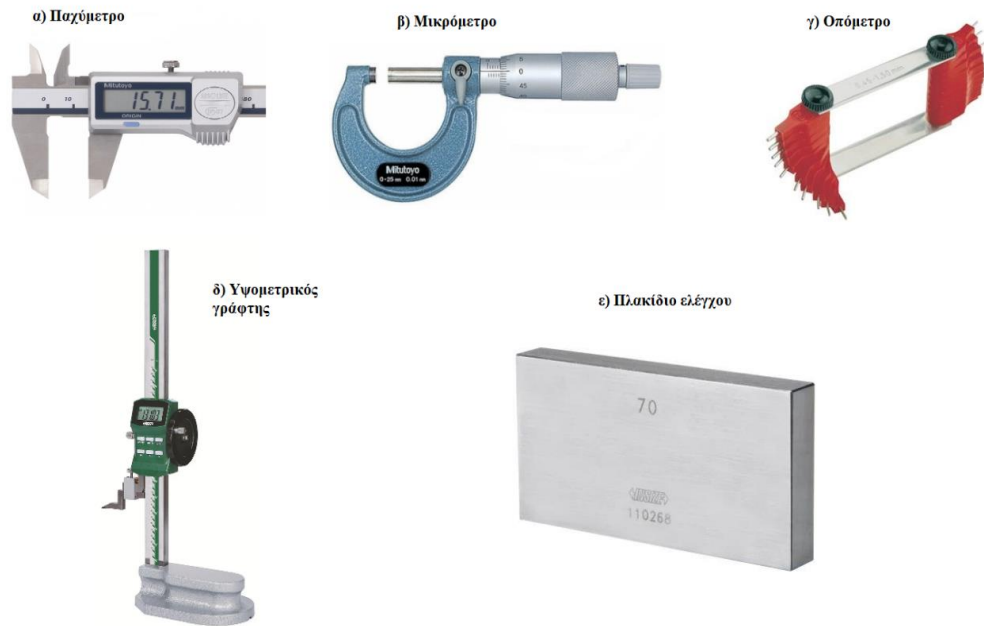
Οι σαρωτές επαφής λειτουργούν με τη μέθοδο της επαφής μεταξύ του αντικειμένου σάρωσης και του ανιχνευτή αφής. Τα πιο προχωρημένα συστήματα σάρωσης επαφής είναι τα CMM (Co-ordinate Measuring Machine) όπου βασίζονται στην τεχνολογία μέτρησης συντεταγμένων του καρτεσιανού συστήματος αξόνων. Η ακρίβεια τους ξεκινάει από χιλιοστά του χιλιοστού 0.001mm ενώ μπορεί να φτάσει σε ακόμη πιο ακριβή επίπεδα ανάλογα το σύστημα. Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1.5** ένα CMM αποτελείται από 1) τη γέφυρα που επιτρέπει τις κινήσεις στο X και Y επίπεδο, 2) το γράφτη που επιτρέπει την κίνηση στο Z επίπεδο, 3) τον αισθητήρα πίεσης και 4) τον παχύ γρανίτη ώστε να εξασφαλίσει το απόλυτα σκληρό και ομοιόμορφο επίπεδο.

Εργαλεία εξίσου διαδεδομένα στη βιομηχανία που δεν έχουν τόσο μεγάλη ακρίβεια όπως ένα CMM αλλά είναι πιο εύκολα στη χρήση και στη μετακίνησή τους είναι α) το παχύμετρο, β) το μικρόμετρο, γ) το οπόμετρο, δ) ο υψομετρικός γράφτης και ε) τα πλακίδια ελέγχου. Το μειονέκτημα αυτών των αντικειμένων είναι ότι η μέτρηση αφορά μόνο μια διάσταση [7].



Εικόνα 1.5. CMM σαρωτής επαφής τύπου bridge.

(Πηγή [8])



Εικόνα 1.6. Όργανα μέτρησης.

1.6.2 Σαρωτές αποστάσεως

Οι σαρωτές αποστάσεως είναι νεότερης τεχνολογίας από τους σαρωτές επαφής. Δεν υπάρχει αφή μεταξύ του σαρωτή και του αντικείμενου σάρωσης. Όπως και στους σαρωτές επαφής, έτσι και στους σαρωτές αποστάσεως υπάρχουν διαφορετικοί τρόποι μέτρησης του αντικείμενου ανάλογα την τεχνολογία που ακολουθούν. Κύρια αρχή λειτουργίας τους είναι η εκπομπή και η λήψη ακτινοβολίας. Οι σαρωτές αποστάσεως χωρίζονται σε ενεργούς και παθητικούς.

Ενεργοί σαρωτές: Ο τρόπος λειτουργίας τους βασίζεται στην εκπομπή και στη λήψη κάποιας μορφής ακτινοβολίας. Η ακτινοβολία μπορεί να περιλαμβάνει φως, υπερήχους ή ακτίνες-X. Οι ενεργοί σαρωτές κατηγοριοποιούνται σε τεχνολογίες:

α) *Time-of-flight*

Οι σαρωτές *Time-of-flight* εκπέμπουν ακτίνα laser για να αποτυπώσουν το αντικείμενο. Ο χρόνος μεταξύ εκπομπής της ακτίνας laser από το σαρωτή και λήψης της αντανακλώμενης από το αντικείμενο, δίνει την απόσταση.

β) *Phase Shift*.

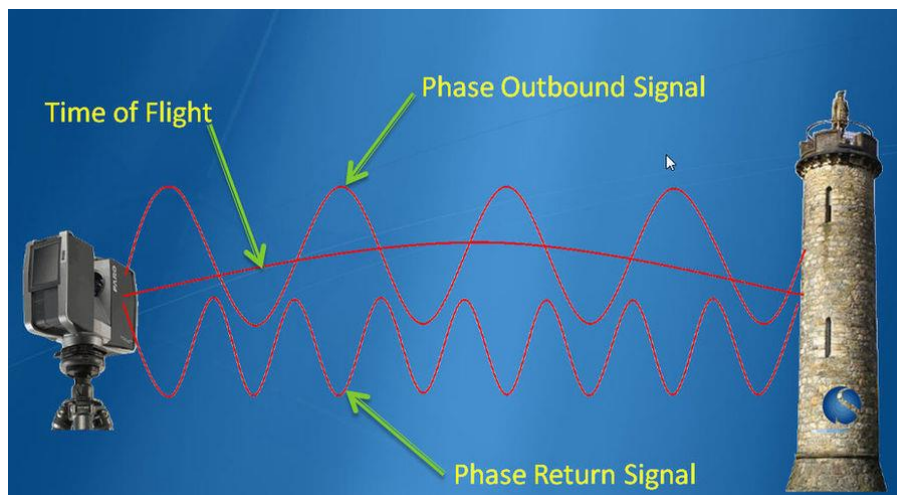
Οι σαρωτές *Phase Shift* εκπέμπουν ακτίνα laser σε συχνότητα. Η απόσταση υπολογίζεται συγκρίνοντας τη διαφορά φάσης μεταξύ της συχνότητας λήψης και της συχνότητας εκπομπής.

γ) Τριγωνισμού (Triangulation)

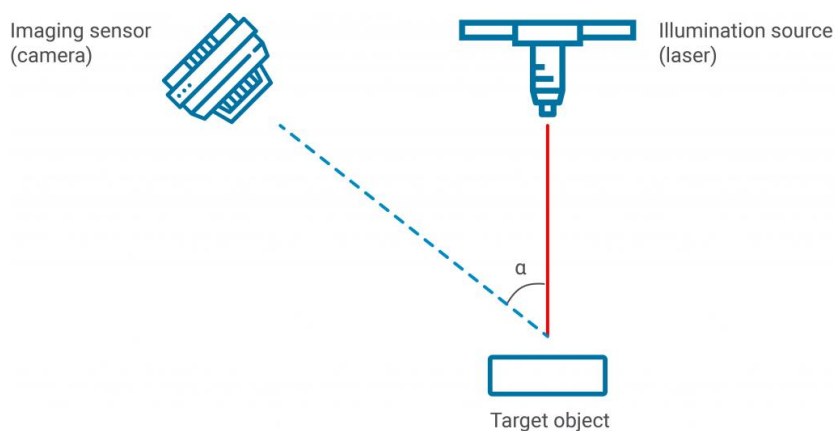
Οι σαρωτές τριγωνισμού εκπέμπουν ακτίνα laser για να φωτίσουν σημεία του αντικειμένου. Παράλληλα μια κάμερα εντοπίζει και αποτυπώνει το αντικείμενο σύμφωνα με τα φωτισμένα σημεία.

δ) Δομημένου φωτός/ακτίνας (Structured Light Scanners)

Οι σαρωτές δομημένου φωτός προβάλλουν πάνω στο αντικείμενο φως ή δεσμίδες laser με σκοπό τη δημιουργία φωτεινών λωρίδων. Η κάμερα εντοπίζει τις παραμορφώσεις στις φωτεινές λωρίδες και αποτυπώνει το σχήμα του αντικειμένου. Βασίζεται στην τεχνολογία του τριγωνισμού. Η διαφορά με τους υπόλοιπους τύπους σαρωτών είναι η ταυτόχρονη μέτρηση πολλών σημείων σε μια όψη και όχι μόνο ενός κάθε φορά.



Εικόνα 1.7. Απεικόνιση Time-of-flight και Phase shift scanners.
(Πηγή: [9])



Εικόνα 1.8: Απεικόνιση triangulation scanners.
(Πηγή: [21])

Παθητικοί σαρωτές: Οι παθητικοί σαρωτές συγκριτικά με τους ενεργούς, δεν εκπέμπουν κάποια μορφή ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της σάρωσης. Αντιθέτως, βασίζονται στο υπέρυθρο και στο ορατό φάσμα του περιβάλλοντος. Παράλληλα, είναι φθηνότεροι σε αγορά καθώς δεν απαιτούν κάποιο ειδικό εξάρτημα παρά μόνο ψηφιακές κάμερες. Οι μετρήσεις δεν έχουν μεγάλη ακρίβεια λόγω της απλής τεχνολογίας που φέρουν ως συστήματα. Οι παθητικοί σαρωτές κατηγοριοποιούνται σε:

- α) *Στερεοσκοπικά συστήματα.* Η τεχνική χρειάζεται δύο (2) κάμερες οι οποίες βρίσκονται η μια δίπλα στην άλλη εστιάζοντας στο ίδιο σημείο. Αναλύοντας τις μικρές διαφορές που προκύπτουν από την οπτική γωνία της κάθε κάμερας, είναι δυνατό να βρεθούν οι αποστάσεις των σημείων.
- β) *Φωτομετρικά συστήματα.* Η τεχνική χρειάζεται μία (1) κάμερα, φωτογραφίζοντας το αντικείμενο πολλές φορές με διαφορετικές συνθήκες φωτισμού με στόχο τον προσανατολισμό των κάθε pixel πάνω στην επιφάνεια [10].

1.6.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Οι τεχνικές σάρωσης όπως αναφέρθηκαν παραπάνω είναι πολλές και διαφορετικές. Ανάλογα με τη στρατηγική που ακολουθούν οι μηχανικοί, επιλέγεται η κατάλληλη τεχνική σάρωσης. Παρακάτω αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των σαρωτών επαφής και σαρωτών αποστάσεως.

Σαρωτές επαφής

Πλεονεκτήματα:

- Μέτρηση ακριβείας
- Ευκολία μετακίνησης
- Μικρό κόστος απόκτησης (εκτός CMM)
- Ανθεκτικότητα

Μειονεκτήματα:

- Σε περίπτωση μεγάλου όγκου και περίπλοκης γεωμετρίας του αντικειμένου, είναι αργή η μέτρηση των σημείων.
- Βασίζεται στην αφή, οπότε ένα μαλακό αντικείμενο κατά τη διάρκεια της αφής, λόγω της πίεσης τείνει να μετρηθεί λάθος. Επίσης είναι ακατάλληλοι για αντικείμενα πολιτισμικής αξίας τα οποία απαγορεύεται

να έχουν οποιαδήποτε επαφή με υλικά αντικείμενα.

- Στην περίπτωση κάποιων CMM η μετακίνησή τους στο χώρο είναι δύσκολη.

Σαρωτές αποστάσεως

Πλεονεκτήματα:

- Πληθώρα απόκτησης δεδομένων σε σύντομο χρονικό διάστημα.
- Ιδανικό για περίπλοκα γεωμετρικά αντικείμενα.
- Δεν υπάρχει αφή με το αντικείμενο σάρωσης.
- Παράγουν αυτόματα μέσω του λογισμικού τους το νέφος σημείων.
- Λεπτομερής απεικόνιση ενός μεγάλου χώρου.

Μειονεκτήματα:

- Μικρότερη ακρίβεια.
- Λανθασμένες μετρήσεις χωρίς ιδανικό φως.
- Απαγόρευση χρήσης όταν κάποιο αντικείμενο είναι ευαίσθητο στην ακτινοβολία.

1.7 Μέθοδος επιλογής συστήματος αντίστροφης μηχανικής

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας έχει επηρεάσει σημαντικά και την αντίστροφη μηχανική με όλο και πιο πολλές καινοτόμες μεθόδους να αναπτύσσονται. Πλέον οποιοδήποτε άτομο μπορεί ακόμα και ερασιτεχνικά να ακολουθήσει την αντίστροφη μηχανική αφού τα συστήματα εκσυγχρονίζονται ενώ παράλληλα το κόστος απόκτησης τους γίνεται όλο και πιο δελεαστικό στο αγοραστικό κοινό.

Η λογική αυτών των συστημάτων, σχετίζεται με την απόκτηση σημείων από το x, y, z επίπεδο του περιβάλλοντος. Υπάρχει πληθώρα συσκευών και τεχνικών μετρήσεων που στοχεύουν στην αντίστροφη μηχανική. Οι συσκευές ανάλογα με τις τεχνολογίες που φέρουν είναι ικανές να σκανάρουν από απλά γεωμετρικά αντικείμενα μέχρι δόντια και αεροσκάφη. Οι εφαρμογές είναι απεριόριστες και δεν αφορούν μόνο μηχανολογικά ζητήματα. Μερικοί από τους τομείς που συναντάται η αντίστροφη μηχανική είναι η αρχαιολογία, η ιατρική κ.α [11].

Κανένα σύστημα δεν μπορεί να ικανοποιήσει όλα τα ζητήματα και τις ανάγκες. Η τεχνολογία προοδεύει και συνεχώς θα κυκλοφορούν στην αγορά πιο καινοτόμες συσκευές που θα υποστηρίζουν περισσότερες λειτουργίες. Σκοπός της επιχείρησης είναι να προμηθευτεί με την τεχνολογία της δεδομένης χρονικής στιγμής, ένα σαρωτή ο οποίος θα ικανοποιεί τις βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες ανάγκες.

Παρακάτω αναλύονται τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν για τη διαδικασία επιλογής ενός τέτοιου συστήματος [12]:

1. *Ορισμός των απαιτήσεων*

Η επιχείρηση ξεκινάει θέτοντας συγκεκριμένες προϋποθέσεις π.χ όγκος, ακρίβεια, υλικό σκαναρίσματος, ενσωματωμένο λογισμικό, κόστος κ.α.

2. *Εντοπισμός συστημάτων*

Στην αγορά κυκλοφορούν εκατοντάδες συστήματα. Για τον εντοπισμό τους πρέπει να έχει πραγματοποιηθεί έρευνα και επικοινωνία με τους προμηθευτές.

3. *Αξιολόγηση συστημάτων*

Μετά τον εντοπισμό των συστημάτων ακολουθεί η αξιολόγησή τους. Το ιδανικότερο σύστημα είναι αυτό που πληροί τις περισσότερες απαιτήσεις της επιχείρησης, π.χ ένα μοντέλο έχει καλύτερη υποστήριξη μετά την αγορά από ένα άλλο το οποίο είναι φθηνότερο.

4. *Επιλογή συστήματος*

Η επιχείρηση αποφασίζει να προχωρήσει σε αγορά εφόσον έχει ερευνήσει για το νέο σύστημα.

5. *Δοκιμή του συστήματος*

Αφού το σύστημα ανήκει πλέον στην επιχείρηση, οι μηχανικοί πρέπει να δοκιμάσουν αν ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις που είχαν δώσει εξ' αρχής.

Κεφάλαιο 2 – Ταχεία Προτυποποίηση

2.1 – Περίληψη κεφαλαίου

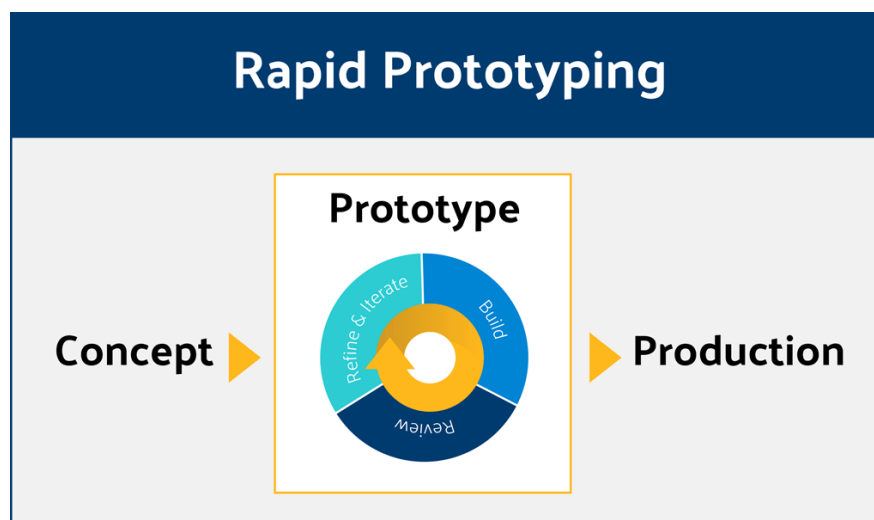
Αυτό το κεφάλαιο εισάγει τους αναγνώστες στον όρο της ταχείας προτυποποίησης (Rapid Prototyping) και της προσθετικής κατασκευής (Additive Manufacturing). Στόχος του κεφαλαίου είναι ο ορισμός, η ανάλυση των τεχνολογιών και των συστημάτων που αποτελούν την ταχεία προτυποποίηση καθώς και τις εφαρμογές που λαμβάνουν μέρος.

2.2 – Εισαγωγή στην ταχεία προτυποποίηση

Η ταχεία προτυποποίηση ορίζεται ως η γρήγορη διαδικασία δημιουργίας πρωτότυπων φυσικών αντικειμένων και προκύπτει από συνδυαστικές τεχνολογίες μεταξύ του προγράμματος σχεδίασης αρχείων μορφής CAD και της τεχνολογίας που θα αξιοποιηθεί για να κατασκευαστεί το αντικείμενο. Με τη χρήση της ταχείας προτυποποίησης, ο μηχανικός δεν μένει μόνο στις ψηφιακές εικόνες του αντικειμένου, αλλά μπορεί να υλοποιήσει την ιδέα του σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα χωρίς να εφαρμοστεί απαραίτητα επιπλέον μηχανική κατεργασία. Εκτός της δημιουργίας πρωτοτύπων, ο σχεδιαστής-μηχανικός μπορεί να κατασκευάσει ακόμη και καλούπια στα οποία αργότερα θα χυτευτούν υγρά υλικά. Παρ' όλ' αυτά, η ταχεία προτυποποίηση δεν είναι λύση για οποιοδήποτε κατασκευαστικό πρόβλημα, ωστόσο έχει εφαρμοστεί σε πληθώρα πεδίων. Ορισμένα από αυτά είναι οι αυτοκινητοβιομηχανίες, η αεροναυπηγική, η ιατρική κ.α.

Οι περισσότερες διαδικασίες κατασκευής αφορούν αφαιρετικές μεθόδους για την δημιουργία της γεωμετρίας του αντικειμένου π.χ τόρνοι, μηχανές CNC κ.α. Εν' αντιθέσει οι διαδικασίες που εφαρμόζονται κατά κύριο λόγο στην ταχεία προτυποποίηση αφορούν μεθόδους προσθετικής κατασκευής. Η προσθετική κατασκευή (ή η τρισδιάστατη εκτύπωση όπως συνηθίζεται) ορίζεται ως η μέθοδος παραγωγής αντικειμένων μέσω της πρόσθεσης πολλαπλών στρωμάτων υλικού. Η φιλοσοφία μιας τέτοιας μεθόδου είναι η δημιουργία ενός αντικειμένου μέσω στρωμάτων τα οποία χτίζονται το ένα πάνω στο άλλο με στόχο τη δημιουργία ενός όγκου. Κατά αυτόν τον τρόπο μπορούν να εξαλειφθούν δυσκολίες που παρουσιάζονται μέσω άλλων κατασκευαστικών μεθόδων.

Στο **Κεφάλαιο 2.5**, θα αναλυθούν οι διαφορετικές τεχνολογίες πρόσθεσης στρωμάτων υλικού. Η προσθετική κατασκευή είναι αποδεδειγμένο ότι έχει μειωμένο κόστος κατασκευής, μειωμένο χρόνο κατασκευής, μειωμένη ενέργεια και αναλώσιμα, καθώς και απαιτεί λιγότερο εργατικό δυναμικό εφόσον οι διαδικασίες είναι πιο αυτοματοποιημένες.



Εικόνα 2.1. Η ιδέα της ταχείας προτυποποίησης.

2.3 – Διαδικασία εφαρμογής ταχείας προτυποποίησης

Για την ταχεία προτυποποίηση χρειάζεται ένα αρχείο .stl και ένας τρισδιάστατος εκτυπωτής οποιασδήποτε τεχνολογίας φέρει. Παρακάτω αναλύεται βήμα-βήμα η διαδικασία της ταχείας προτυποποίησης:

- *Δημιουργία ενός αρχείου CAD ή ενός σκαναρισμένου αρχείου*

Το πρώτο βήμα αφορά το ψηφιακό αντικείμενο που έχει δημιουργηθεί ή σκαναριστεί με στόχο την κατασκευή του μέσω της προσθετικής κατεργασίας.

- *Αποθήκευση σε .stl αρχείο*

Λόγω των διαφορετικών τύπων αρχείων που αποθηκεύουν τα δεδομένα τους τα σχεδιαστικά προγράμματα και τα προγράμματα σκαναρίσματος δημιουργείται σύγχυση. Εξαιτίας αυτού έχει θεσπιστεί συγκεκριμένος τύπος αρχείου. Συνεπώς τα λογισμικά που παράγουν τον g-κώδικα του εκτυπωτή, αναγνωρίζουν μόνο αρχεία μορφής .stl. Το αρχείο .stl (Standard Triangulation Language) ψηφιοποιεί το αντικείμενο με τη μορφή πολλών τριγώνων όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2.2**. Από όσο περισσότερα τρίγωνα αποτελείται το αντικείμενο, τόσο πιο

λεπτομερής είναι απεικόνιση της επιφάνειάς του.

➤ *«Τεμαχισμός» αρχείου (slice)*

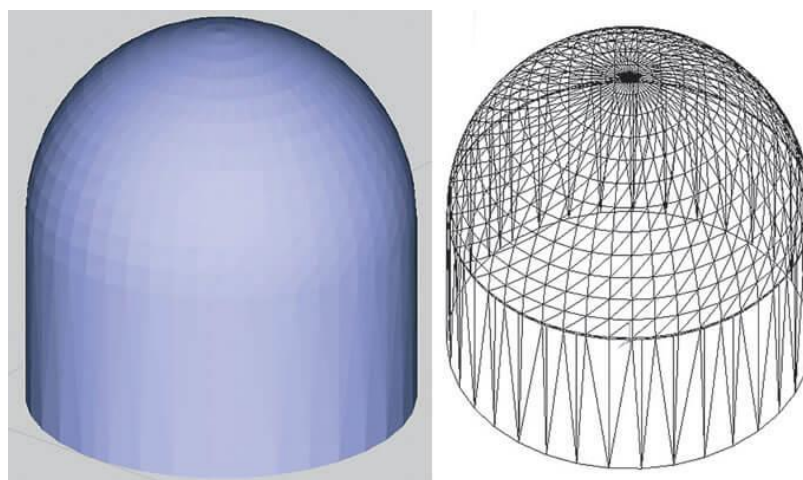
Με αυτόν τον όρο ορίζεται η διαδικασία «τεμαχισμού» του αρχείου σε παράλληλα στρώματα. Συγκεκριμένα, το λογισμικό αναπαράγει το αντικείμενο σε μορφή στρωμάτων, όπως ακριβώς κάνει ο τρισδιάστατος εκτυπωτής. Μέσω των απαραίτητων ρυθμίσεων του λογισμικού (slicer), ο μηχανικός μπορεί να δει πως θα συμπεριφερθεί ο εκτυπωτής κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης. Δηλαδή, το λογισμικό προσομοιάζει ψηφιακά την εκτύπωση. Η προσομοίωση είναι ένα πολύ σημαντικό βοήθημα για τον μηχανικό καθώς μπορεί να εντοπίσει σε ποια σημεία της εκτύπωσης, ο εκτυπωτής θα συναντήσει δυσκολίες και δεν θα εκτυπώσει το επιθυμητό αποτέλεσμα.

➤ *Αποθήκευση g-code*

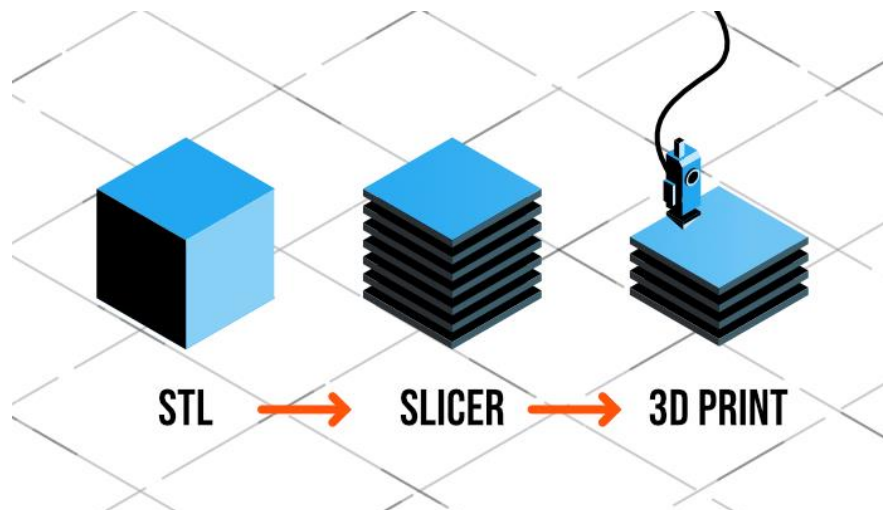
Αφού έχουν οριστεί οι ρυθμίσεις, το αρχείο αποθηκεύεται ως g-code σε κάποια μονάδα αποθηκευτικού χώρου όπου αργότερα θα συνδεθεί με τον εκτυπωτή για να ξεκινήσει η εκτύπωση του αντικειμένου.

➤ *Εκτύπωση και μετά-επεξεργασία*

Με το πέρας της εκτύπωσης, ο μηχανικός παρατηρεί, αφαιρεί τα στηρίγματα εφόσον υπήρχαν και μετράει το αντικείμενο. Εφόσον κριθεί ότι το εκτυπωμένο αντικείμενο βρίσκεται εντός των προδιαγραφών που έχουν τεθεί, ακολουθούν οι διαδικασίες παραγωγής ή δοκιμών.



Εικόνα 2.2. Εικόνα σύγκρισης αρχείου CAD με .stl.



Εικόνα 2.3. Διαδικασία τεμαχισμού αντικειμένου μέσω του slicer.

2.4 - Εφαρμογές ταχείας προτυποποίησης

Πολλοί οργανισμοί δεν γνωρίζουν την πληθώρα των δυνατοτήτων της ταχείας προτυποποίησης και πως μπορούν να επωφεληθούν από αυτή. Παρακάτω αναλύονται οι εφαρμογές οι οποίες βρίσκουν μέρος σε πολλές κατασκευαστικές βιομηχανίες που κάνουν χρήση αυτής της μεθόδου [13]:

– Πρωτότυπα μοντέλα

Οι τεχνικές της ταχείας προτυποποίησης είναι ικανές να παράξουν ταχύτατα περίπλοκα αντικείμενα, με ελάχιστο κόστος χωρίς να κάνουν χρήση παραδοσιακών τρόπων κατασκευής. Παράλληλα οι σχεδιαστές του αντικειμένου μπορούν να αξιολογήσουν το πρωτότυπο φυσικό αντικείμενο σε πρώιμο στάδιο ώστε να αναγνωρίσουν τις ατέλειες και τα σφάλματά του πριν το εισάγουν στη γραμμή παραγωγής.

Ένα αντικείμενο το οποίο έχει δημιουργηθεί με τη μέθοδο της ταχείας προτυποποίησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα αντικείμενο επικοινωνίας μεταξύ των σχεδιαστών και πελατών, όπως επίσης και μεταξύ του τμήματος σχεδιασμού και του τμήματος μάρκετινγκ. Συνεπώς οι πελάτες και το τμήμα μάρκετινγκ μπορούν μέσα από τις δικές τους ιδέες και ανάγκες να συνδιαμορφώσουν σε ορισμένο βαθμό το τελικό αντικείμενο.

– Λειτουργικά αντικείμενα

Ορισμένες διαδικασίες της ταχείας προτυποποίησης μπορούν να εφαρμοστούν για τη δημιουργία τελικών λειτουργικών αντικειμένων ή ακόμα και απλών

εξαρτημάτων που εφαρμόζονται σε ένα συνολικό σύστημα. Επίσης ένας λόγος κατασκευής τέτοιων αντικειμένων είναι για να εκτιμήσουν οι μηχανικοί αν τα αντικείμενα που πρόκειται να κατασκευαστούν εφαρμόζουν σωστά σε ένα σύστημα.

– *Δημιουργία καλουπιών*

Η δημιουργία καλουπιών είναι μια σημαντική κατεργασία στις κατασκευαστικές βιομηχανίες, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί και με την μέθοδο της ταχείας προτυποποίησης. Ο σχεδιαστής μπορεί μέσα από το πρόγραμμα CAD να δημιουργήσει ένα καλούπι για το αντικείμενο που έχει σχεδιάσει ή σκανάρει. Αυτή η διεργασία θέλει μεγάλη προσοχή και μελέτη καθώς στις εκτυπώσεις δημιουργούνται πόροι μεταξύ των στρωμάτων. Σε περίπτωση που κάτι τέτοιο δεν μπορεί να εφαρμοστεί για τον παραπάνω λόγο, ο σχεδιαστής μπορεί να σχεδιάσει το αντικείμενο, να το εκτυπώσει και να δημιουργήσει καλούπι για αυτό το αντικείμενο μέσω άλλων τεχνικών π.χ άμμο.

2.5 – Τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής

Η ταχεία προτυποποίηση ανήκει στις μεθόδους όπου η κατασκευή των αντικειμένων μέσω αυτής γίνεται με τη χρήση τρισδιάστατων εκτυπωτών. Η εξέλιξη των εκτυπωτών έχει αναπτυχθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια με αυτό να συνεπάγεται πως και το κόστος απόκτησής τους είναι σημαντικά μικρότερο συγκριτικά με κάποια χρόνια πριν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα όλο και πιο πολλά άτομα και επιχειρήσεις, ακόμη και σε ερασιτεχνικό επίπεδο να ασχολούνται με τέτοιου είδους τεχνολογίες. Οι τρόποι εκτύπωσης των διαφορετικών τεχνολογιών εκτυπωτών διαφέρουν αλλά βασίζονται σε ένα κοινό στοιχείο, την προσθετική κατασκευή όπου το αντικείμενο δημιουργείται σε παράλληλα στρώματα. Σε αυτή την υποενοότητα θα αναλυθούν οι διάφορες τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής.

2.5.1 – Φωτοπολυμερισμός (Vat Photopolymerization)

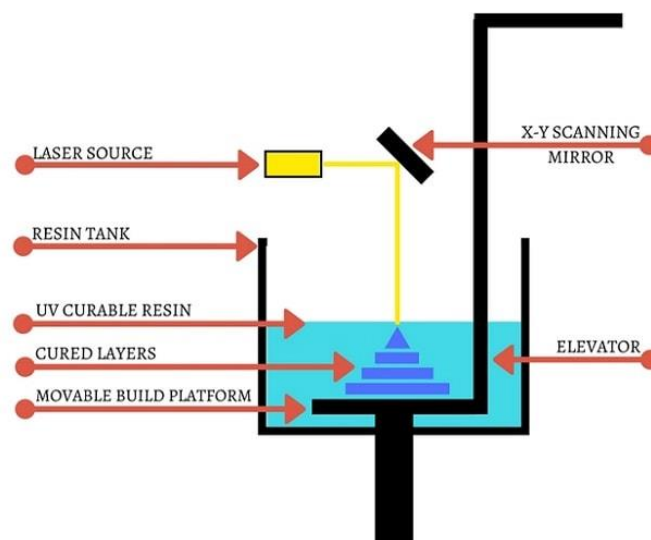
Η τεχνολογία των εκτυπωτών SLA (Stereolithography) βασίζεται στον φωτοπολυμερισμό του πολυμερούς (συνήθως υγρή ρητίνη) και εφαρμόστηκε για πρώτη φορά από την 3D Systems το 1987. Αποτελεί την πρώτη και πιο εμπορική τεχνολογία της ταχείας προτυποποίησης. Μια πλατφόρμα είναι τοποθετημένη μέσα στη δεξαμενή

που είναι γεμάτη από φωτοευαίσθητη υπεριώδη (UV) ρητίνη. Η πλατφόρμα κατεβαίνει τόσο ώστε να υπάρχει ένα πολύ λεπτό στρώμα ρητίνης μεταξύ πλατφόρμας και χώρου εκτύπωσης. Η διαδικασία στερεοποίησης του αντικειμένου γίνεται μέσω δέσμης laser καθώς η αντανάκλαση του από έναν καθρέφτη «χτυπάει» επιλεκτικά τα σημεία προς στερεοποίηση. Εφόσον τα σημεία έχουν στερεοποιηθεί πλήρως, η πλατφόρμα κατεβαίνει και μέσω ενός στρωτήρα το πάχος της ρητίνης παραμένει ευθύγραμμο και σταθερό σε όλη την επιφάνεια. Το τελικό εκτυπωμένο αντικείμενο πρέπει να τοποθετηθεί σε ειδικό φούρνο σκλήρυνσης της ρητίνης διότι μπορεί να υπάρχουν σημεία τα οποία δεν έχουν στερεοποιηθεί πλήρως.

Ο χρόνος και η ποιότητα της εκτύπωσης εξαρτάται από το ύψος του λεπτού στρώματος. Τα ύψη κυμαίνονται μεταξύ 0.05-0.50mm. Τα υλικά της εκτύπωσης βρίσκονται σε μεγάλη ποικιλία στην αγορά καθώς υπάρχει πληθώρα φωτοευαίσθητων ρητινών με διαφορετικές ιδιότητες [14].

Μερικά χαρακτηριστικά αυτής της τεχνολογίας είναι:

- Ιδανικό για μινιατούρες.
- Εκτύπωση πολύπλοκων αντικειμένων.
- Ο μεγάλος χρόνος στερεοποίησης μπορεί να προκαλέσει σμίκρυνση.
- Δεν είναι φιλικό προς το περιβάλλον.



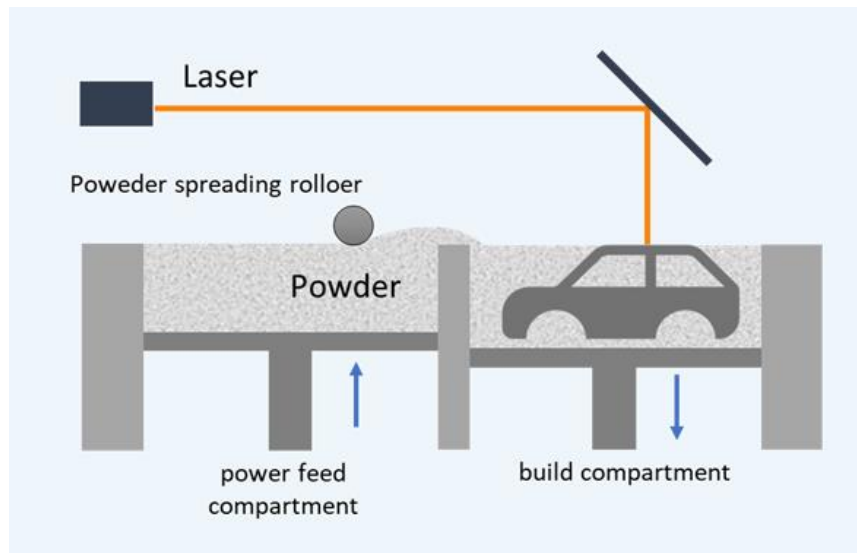
Εικόνα 2.4. Η τεχνολογία εκτυπωτών SLA.

2.5.2 – Σύντηξη πούδρας (Powder Bed Fusion)

Η τεχνολογία των εκτυπωτών SLS (Selective Layer Sintering) βασίζεται στη σύντηξη σκόνης όπου αναπτύχθηκε το 1989 στο Πανεπιστήμιο του Τέξας. Τα πρωτότυπα μοντέλα αυτής της τεχνολογίας είχαν σκοπό την κατασκευή αντικειμένων από πλαστικό, κάνοντας αυτή τη μέθοδο να παρουσιάζει ομοιότητες με τη στερεολιθογραφία όσον αφορά τη διαδικασία στερεοποίησης. Με την πρόοδο της τεχνολογίας και την εξέλιξη των συστημάτων, τα διαθέσιμα υλικά δεν παρέμειναν μόνο τα πλαστικά αλλά εδραιώθηκαν στην αγορά με μορφή πούδρας τα μέταλλα και τα κεραμικά κάνοντας χρήση θερμικών πηγών. Η διαδικασία κατασκευής του αντικειμένου έχει αρκετές ομοιότητες με την τεχνολογία της στερεολιθογραφίας. Μια θερμαινόμενη πλατφόρμα, θερμοκρασίας μικρότερης της θερμοκρασίας τήξης του υλικού, κατεβαίνει τόσο ώστε να υπάρχει ένα λεπτό στρώμα σκόνης μεταξύ πλατφόρμας και χώρου εκτύπωσης. Για την μορφοποίηση της γεωμετρίας του αντικειμένου, ένα laser διοξειδίου του άνθρακα «χτυπάει» τη σκόνη σε συγκεκριμένα σημεία με στόχο την τήξη. Εφόσον η διαδικασία του πρώτου στρώματος τελειώσει, η πλατφόρμα κατεβαίνει προς τα κάτω. Με τη βοήθεια ενός στρωτήρα η επιφάνεια γεμίζει και ευθυγραμμίζεται με τη νέα πούδρα. Μόλις η εκτύπωση λάβει τέλος, το αντικείμενο πρέπει να εξισορροπήσει τη θερμοκρασία του με αυτή του δωματίου ώστε να μπορέσει να υποστεί κατεργασία όπου χρειάζεται. Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως με αυτή τη μέθοδο δεν χρειάζεται να δημιουργηθούν στηρίγματα διότι η πούδρα από μόνη συγκρατεί οποιαδήποτε επιφάνεια. Η υπολειπόμενη σκόνη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ξανά προσθέτοντας λίγο ακόμη από την καθαρή σκόνη. Τα πιο διαδεδομένα υλικά για εκτυπώσεις SLS είναι τα θερμοπλαστικά όπως το nylon, το πολυστυρένιο ενώ επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέταλλα και κεραμικά.

Μερικά χαρακτηριστικά αυτής της τεχνολογίας είναι:

- Καλές μηχανικές ιδιότητες.
- Λεπτομέρεια κατασκευής.
- Υψηλό κόστος απόκτησης.
- Καλά εκπαιδευμένο προσωπικό.



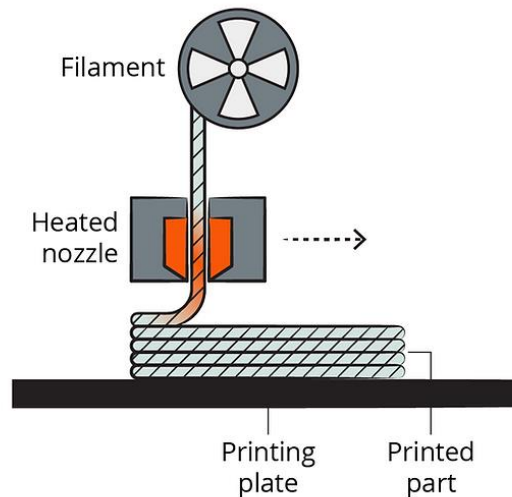
Εικόνα 2.5. Η τεχνολογία εκτυπωτών SLS.

2.5.3 – Εξώθηση υλικού (Material Extrusion)

Οι εκτυπωτές FDM (Fused Deposition Modeling) βασίζονται στην τεχνολογία εξώθησης υλικού. Δημιουργήθηκαν από την επιχείρηση Stratasys και είναι από τους πιο διαδεδομένους τύπους εκτυπωτών. Βρίσκουν θέση σε πολλές επιχειρήσεις καθώς και σε σπίτια διότι είναι φθηνοί και εύκολοι στη χρήση τους. Ο τρόπος λειτουργίας τους βασίζεται στο λιωμένο υλικό που εξωθείται από ένα ακροφύσιο (nozzle) υψηλής θερμοκρασίας, πολύ λεπτής διαμέτρου. Καθώς το υλικό εξωθείται, η κεφαλή στην οποία εδράζεται το ακροφύσιο εκτελεί συγκεκριμένες κινήσεις στο X,Y και Z επίπεδο. Κατά αυτόν τον τρόπο το υλικό δημιουργεί στρώματα επιφανειών ξεκινώντας από την θερμαινόμενη επιφάνεια εκτύπωσης και ανεβαίνει ανάλογα με την ανάλυση που έχει δοθεί από το λογισμικό (0.08-0.40mm). Σε περιπτώσεις μεγάλης γωνίας μεταξύ των επιφανειών (overhang) χρειάζεται να τοποθετηθούν στηρίγματα (supports). Για τη στερεοποίηση του υλικού χρησιμοποιείται ανεμιστήρας. Τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τέτοιους εκτυπωτές είναι το PLA, το ABS, το PETG, το TPU, το Nylon κ.α [15].

Μερικά χαρακτηριστικά αυτής της τεχνολογίας είναι:

- Εύκολος τρόπος λειτουργίας.
- Πληθώρα διαθέσιμων υλικών.
- Χαμηλή ανάλυση λεπτομέρειας μικρών αντικειμένων.
- Ενδεχόμενο βουλώματος ακροφύσιου.



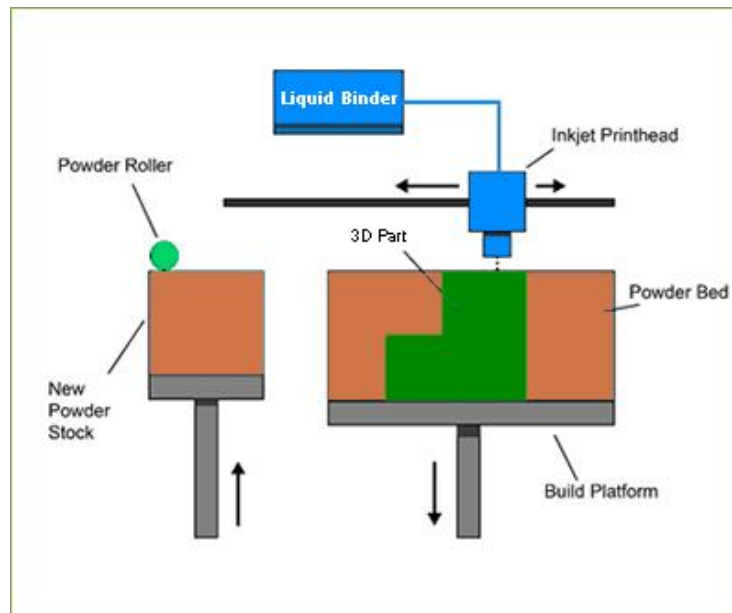
Εικόνα 2.6. Η τεχνολογία εκτυπωτών FDM.

2.5.3 – Binder Jetting

Η τεχνολογία Binder Jetting δημιουργήθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1990 από το Πανεπιστήμιο M.I.T και ανήκει στην κατηγορία προσθετικής κατασκευής μέσω πούδρας. Σε αντίθεση με τους εκτυπωτές τεχνολογίας SLS, η στερεοποίηση και η μορφοποίηση του αντικειμένου δεν γίνεται μέσω θερμότητας και laser αλλά μέσω μιας υγρής κολλητικής ουσίας. Η κολλητική ουσία λειτουργεί ως ένα μέσο στερεοποίησης και μορφοποίησης του αντικειμένου. Η διαδικασία της εκτύπωσης παραμένει η ίδια με τους εκτυπωτές SLS με τη μόνη διαφορά να παρουσιάζεται στην κεφαλή, η οποία πλέον ψεκάζει την υγρή κολλητική ουσία. Το τελικό αντικείμενο αφαιρείται από τη γεμάτη σκόνη δεξαμενή και ακολουθεί η περαιτέρω κατεργασία όπου χρειάζεται. Όπως και στους εκτυπωτές SLS, με αυτή τη μέθοδο δεν χρησιμοποιούνται στηρίγματα. Τα υλικά που εφαρμόζονται είναι τα πολυμερή, τα μέταλλα και τα κεραμικά [16].

Μερικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας είναι:

- Δεν χρησιμοποιεί τη θερμότητα ως μέσο μορφοποίησης.
- Έλλειψη στηριγμάτων.
- Αρκετά ακριβή τεχνολογία.
- Περιορισμένος αριθμός υλικών.



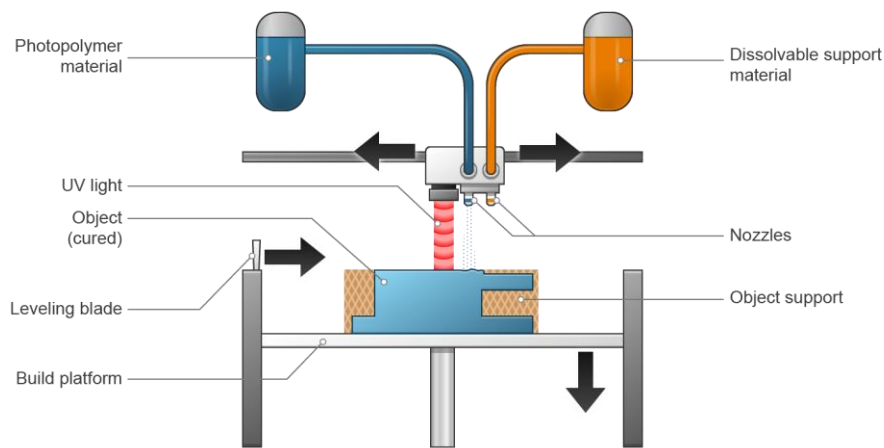
Εικόνα 2.7. Η τεχνολογία εκτύπωσης Binder Jetting.

2.5.4 – Material Jetting

Η τεχνολογία Material Jetting αναπτύχθηκε από την εταιρεία Stratasys και ανήκει στην κατηγορία των εκτυπωτών Polyjet. Ο τρόπος κατασκευής του αντικειμένου προέρχεται από πολλαπλές κεφαλές που ψεκάζουν υλικό σε συγκεκριμένα σημεία της επιφάνειας εκτύπωσης. Για την στερεοποίηση του ψεκασμένου υγρού συμβάλει το υπεριώδες φως που περνάει κατά μήκος της επιφάνειας. Η ιδέα πίσω από την ανάπτυξη ενός τέτοιου συστήματος, είναι η ενσωμάτωση πολλών υλικών ταυτόχρονα σε μία εκτύπωση, με αυτό να συνεπάγεται πως ο μηχανικός θα κάνει χρήση συγκεκριμένων υλικών σε συγκεκριμένα σημεία της εκτύπωσης ώστε να επωφεληθεί από τις θετικές ιδιότητές τους. Τα υλικά εφαρμογής είναι κυρίως φωτοπολυμερή, εύκαμπτα πλαστικά αλλά και υλικά βιοσυμβατότητας [17].

Μερικά χαρακτηριστικά είναι:

- Εφαρμογή παραπάνω από ενός υλικού στην ίδιο αντικείμενο.
- Ομαλές επιφάνειες.
- Μεγάλο κόστος απόκτησης.
- Ορισμένες φορές το αντικείμενο πρέπει να υποστεί παραπάνω έκθεση σε υπεριώδες φως.



2018 © Dassault Systèmes

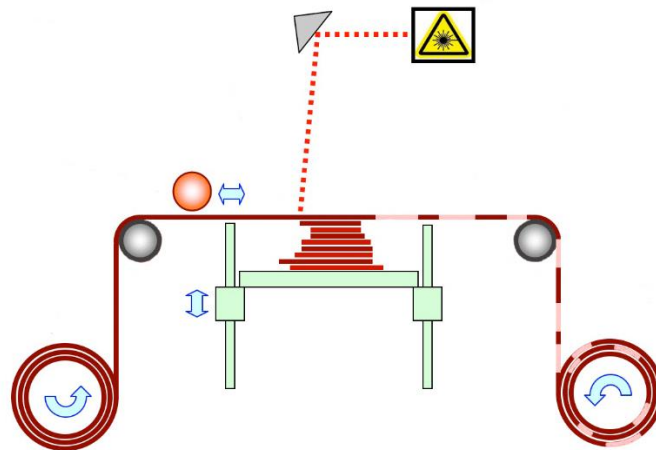
Εικόνα 2.8. Η τεχνολογία εκτύπωσης Material Jetting.

2.5.5 Sheet Lamination

Η τεχνολογία Sheet Lamination χρησιμοποιείται από τους εκτυπωτές LOM (Laminated Object Manufacturing) οι οποίοι αναπτύχθηκαν το 1991 από την εταιρεία Helisys. Η μέθοδος κατά την οποία εκτυπώνεται το αντικείμενο βασίζεται στην συγκόλληση με μορφή στρωμάτων πολύ λεπτών φύλλων πάχους 0.07-0.2mm. Μέσω της κίνησης θερμών κυλίνδρων το φύλλο μετατοπίζεται προς την επιφάνεια εκτύπωσης όπου μέσω ενός laser διοξειδίου του άνθρακα κόβεται σε συγκεκριμένη γεωμετρία. Η επιφάνεια στην οποία είναι τοποθετημένο το κομμένο αντικείμενο κατεβαίνει και ακολουθεί το επόμενο ρολάρισμα του υλικού. Για τη συγκόλληση των στρωμάτων χρησιμοποιούνται τέσσερις διαφορετικοί τρόποι α) κόλληση μέσω κολλητικής ουσίας που βρίσκεται στην επιφάνεια των φύλλων, β) μέσω της θερμότητας, γ) μέσω εφαρμογής πίεσης και δ) μέσω υπερηχητικών κολλήσεων. Τα υλικά εφαρμογής είναι τα χαρτιά που φέρουν κολλητική ουσία στην επιφάνειά τους, τα μέταλλα και τα πλαστικά [18].

Μερικά χαρακτηριστικά είναι:

- Μεγάλη επιφάνεια εκτύπωσης.
- Γρήγορη μέθοδος κατασκευής.
- Αδυναμία δημιουργίας πολύπλοκων γεωμετριών.
- Μειωμένες μηχανικές αντοχές.



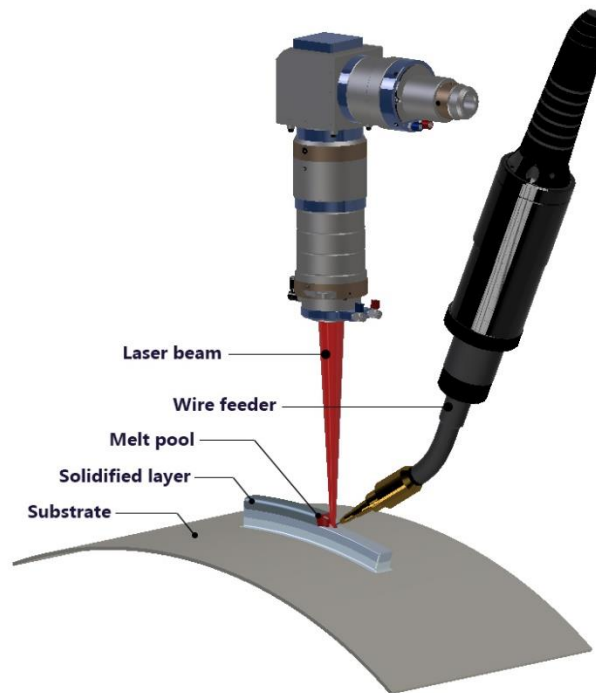
Εικόνα 2.9. Η τεχνολογία εκτύπωσης Laminated Object Manufacturing.

2.5.6 Directed Energy Deposition

Η τεχνολογία της επανόθεσης υλικού μέσω άμεσης ενέργειας αφορά ως επί το πλείστον μεταλλικές κατασκευές. Αντίθετα με τη μέθοδο σύμπτυξης σκόνης (Powder Bed Fusion), οι εκτυπωτές τεχνολογίας DED λιώνουν το υλικό και το εναποθέτουν μέσω μιας κεφαλής όπως γίνεται με παρόμοιο τρόπο κατά την εξώθηση υλικού εκτυπωτών FDM. Εντούτοις, η μικροδομή εκτυπώσεων σύμπτυξης σκόνης και εναπόθεσης υλικού μέσω άμεσης ενέργειας έχει σημαντικές ομοιότητες. Στην κεφαλή βρίσκονται ενσωματωμένα το ακροφύσιο που εναποθέτει το υλικό, το laser και οι αγωγοί εξαγωγής ευγενούς αερίου που βοηθάει στην εκτύπωση του υλικού. Η στερεοποίηση του αντικειμένου γίνεται αφού απομακρυνθεί το laser από το σημείο. Στην αγορά υπάρχουν πλέον εκτυπωτές έως 5 άξονες κίνησης οι οποίοι είναι ικανοί να κατασκευάσουν το αντικείμενο γρηγορότερα και με μεγαλύτερη λεπτομέρεια. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι κυρίως μέταλλα ή κράματα μετάλλων σε μορφή σκόνης ή σύρματος [19].

Μερικά χαρακτηριστικά είναι:

- Εκτύπωση μετάλλου.
- Περιπλοκότητα εκτύπωσης.
- Ανάπτυξη υψηλής θερμοκρασίας κατά την εκτύπωση.
- Ακριβός εξοπλισμός.



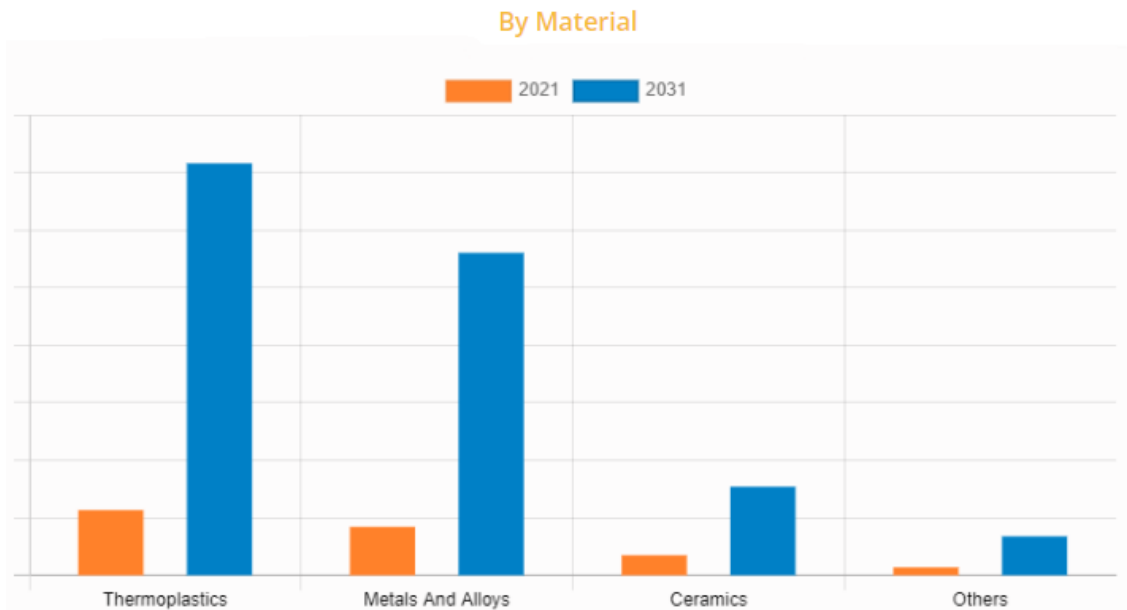
Εικόνα 2.10. Η τεχνολογία εκτύπωσης Directed Energy Deposition

2.6 Το μέλλον της ταχείας προτυποποίησης

Σύμφωνα με το άρθρο [20], η αξία της ταχείας προτυποποίησης στην παγκόσμια αγορά ανέρχεται στα 2.5 δισεκατομμύρια δολάρια (USD) για το έτος 2021 ενώ αναμένεται να αυξηθεί έως το 2031 στα 15 δισεκατομμύρια δολάρια (USD) αφού οι απαιτήσεις για πιο αποδοτικούς σχεδιασμούς και γραμμές παραγωγής πολλαπλασιάζονται συνεχώς από κάθε μορφή βιομηχανίας.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την τρισδιάστατη εκτύπωση περιλαμβάνουν τα θερμοπλαστικά, τα μέταλλα και τα κράματά τους, κεραμικά κ.α. Η επιλογή των υλικών γίνεται ανάλογα με τις προδιαγραφές που απαιτούνται για την υλοποίηση του αντικειμένου όπως οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού, τα χαρακτηριστικά του αντικειμένου προς κατασκευή, η εμφάνιση και το κόστος. Τα πιο γνωστά και χρησιμοποιημένα υλικά στην αγορά είναι η ποικιλία των θερμοπλαστικών. Λόγω του κόστους και της ευκολίας εκτύπωσης βρίσκεται στην πρώτη θέση των υλικών με τη μεγαλύτερη εμπορική αξία. Τα μέταλλα λόγω των ιδιοτήτων τους και της ακριβότερης εκτύπωσής τους συναντώνται σε πιο εξελιγμένες βιομηχανίες όπως είναι η αεροναυπηγική, οι αυτοκινητοβιομηχανίες και οι φαρμακοβιομηχανίες. Στο διάγραμμα της **Εικόνα 2.11**, φαίνεται η προτίμηση του αγοραστικού κοινού ως προς τα υλικά.

Παρατηρείται ότι στις δύο πρώτες θέσεις βρίσκονται τα θερμοπλαστικά και τα κράματα μετάλλων.



Εικόνα 2.11. Τα υλικά που τείνουν να χρησιμοποιηθούν έως το 2031.
(Πηγή: [20])

Η ταχεία προτυποποίηση αποτελεί πλέον ένα σημαντικό κομμάτι στις σύγχρονες βιομηχανίες. Μέχρι στιγμής τα τεχνολογικά επιτεύγματα αυξάνονται με ραγδαίους ρυθμούς ενώ αξιολογώντας την τεχνολογία του 2023, μπορεί να ειπωθεί με ασφάλεια πως τα επόμενα χρόνια θα υπάρξουν δυνατότες για ταχύτερες, ευέλικτες και λιγότερο κοστοβόρες τρισδιάστατες εκτυπώσεις. Μερικές από τις εξελίξεις που προβλέπονται στο μέλλον είναι:

- *Ταυτόχρονη εκτύπωση με διαφορετικά υλικά.* Αν και υπάρχουν εκτυπωτές οι οποίοι επιτυγχάνουν κάτι τέτοιο, δεν είναι ακόμη διαδεδομένη αυτή η τεχνολογία.
- *Ταχύτητα.* Στις σύγχρονες κοινωνίες που οι απαιτήσεις είναι πολλές και αλλάζουν πολύ γρήγορα, οι επιχειρήσεις πρέπει να έχουν την ικανότητα να τις ακολουθούν και να προσαρμόζονται στο σωστό χρονικό διάστημα.
- *Προχωρημένα υλικά.* Εκτός από την ανάπτυξη υλικών όπως τα πολυμερή και τα κράματα μετάλλων, σημαντική εξέλιξη αποτελούν και τα βιοϋλικά.
- *Υβριδική κατασκευή.* Ο συνδιασμός της προσθετικής κατασκευής με την αφαιρετική κατασκευή αποτελεί ένα είδος υβριδικής κατασκευής που θα είναι

ικανό να συνδιάσει τα πλεονεκτήματα των δύο μεθόδων.

- *Έλεγχος ποιότητας σε πραγματικό χρόνο.* Παράλληλα με την εκτύπωση του αντικειμένου, κάνοντας χρήση καμερών οι οποίες είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο μπορεί ο μηχανικός να παρακολουθεί σε πραγματικό χρόνο την πρόοδο της εκτύπωσης και να κρίνει την ποιότητά της.

Κεφάλαιο 3 – Εργασίες πεδίου

3.1 – Περίληψη εφαρμογής

Στόχος της παρούσας εφαρμογής είναι η δημιουργία ενός πλαστικού βύσματος το οποίο θα έχει ενσωματωμένα καλώδια με τοποθετημένους τους ακροδέκτες. Τα βύσματα αυτά ανήκουν σε ένα υποσύστημα του συστήματος Sonar ενός πολεμικού πλοίου. Η εφαρμογή αξιοποιεί μεθόδους όπως η αντίστροφη μηχανική (reverse engineering), η ταχεία προτυποποίηση (rapid prototyping) καθώς και πλαστική χύτευση. Για τη διαδικασία παραγωγής χρησιμοποιείται τρισδιάστατος εκτυπωτής ο οποίος θα παράξει το πρωτότυπο βύσμα από το οποίο στη συνέχεια θα παραχθούν ειδικά καλούπια σιλικόνης, με σκοπό τη χύτευση ρητίνης. Είναι αναγκαία η σημείωση πως, η σιλικόνη θα αντιγράψει με λεπτομέρεια το πρωτότυπο αντικείμενο και επομένως όλα τα στάδια παραγωγής θα πρέπει να αξιολογούνται. Θα αναλυθούν όλα τα στάδια από το πρωτότυπο βύσμα μέχρι και τη τελική μορφή που θα έχει το κατασκευασμένο αντικείμενο.

3.2 – Λόγος κατασκευής

Στην αντίστροφη μηχανική, οι μηχανικοί μελετούν ένα αντικείμενο για κάποιο σκοπό. Όπως αναφέρθηκε στο **Κεφάλαιο 1**, υπάρχουν πολλοί και διαφορετικοί λόγοι εφαρμογής της αντίστροφης μηχανικής. Σε αυτή την εφαρμογή, οι λόγοι εκτέλεσης της αντίστροφης μηχανικής είναι:

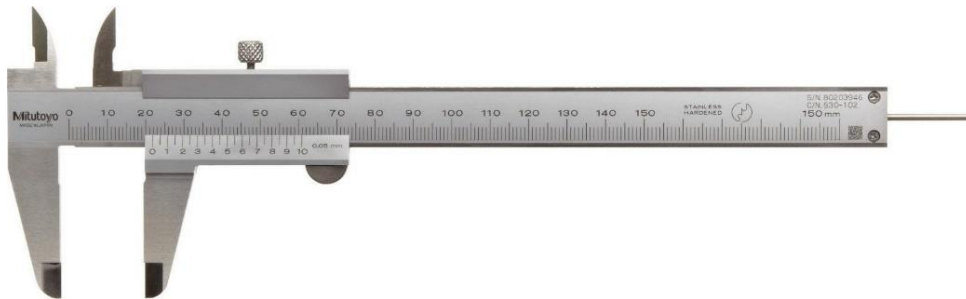
- α) *Ο κατασκευαστής του αντικειμένου δεν υπάρχει πλέον στην αγορά. Λόγω της παλαιότητας του συστήματος, δεν είναι δυνατή η εύρεση του βύσματος στην αγορά. Συνεπώς, ο μηχανικός πρέπει να κατασκευάσει από την αρχή ένα τέτοιο βύσμα όσο πιο πανομοιότυπο γίνεται με το πρωτότυπο.*
- β) *Δημιουργία σχεδίων και αρχείων του αντικειμένου που έχουν χαθεί, καταστραφεί ή δεν υπήρξαν ποτέ. Καθ' όλη τη διάρκεια, της αντίστροφης μηχανικής, υπήρχαν ελλιπή στοιχεία για τις διαστάσεις του βύσματος. Ο μηχανικός οφείλει να μελετήσει τη γεωμετρία του βύσματος, να καταγράψει τα εργαλεία-συστήματα που χρειάζεται για να μετρήσει τις διαστάσεις του πρωτότυπου καθώς και να εντοπίσει τα διαθέσιμα υλικά από τα οποία θα κατασκευαστεί το βύσμα.*

3.3 – Εργαλεία

Η λίστα των εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του βύσματος είναι:

1. Παχύμετρο

Το παχύμετρο Mitutoyo ακρίβειας 0.05mm χρησιμοποιήθηκε ως ένας σαρωτής επαφής. Η γεωμετρία του αντικειμένου δεν χρειαζόταν κάποιον ακριβό και εξειδικευμένο σαρωτή καθώς αποτελείται από κυλίνδρους και οπές. Η ανάλυση του παχύμετρου δίνει αρκετά καλή ακρίβεια μέτρησης καθώς ο εκτυπωτής που χρησιμοποιήθηκε δεν είναι ικανός να εκτυπώσει με ακρίβεια εκατοστών του χιλιοστού 0.01mm.



Εικόνα 3.1. Παχύμετρο Mitutoyo.

2. Ψηφιακός ζυγός

Ο ψηφιακός ζυγός ακρίβειας 0.1kg, χρησιμοποιήθηκε για να προστεθούν με ακρίβεια οι αναλογίες των υλικών. Ο κατασκευαστής της πολουρεθανικής ρητίνης, του σκληρυντή της καθώς και της σιλικόνης καλουπιών δίνει τις αναλογίες % κατά βάρος.



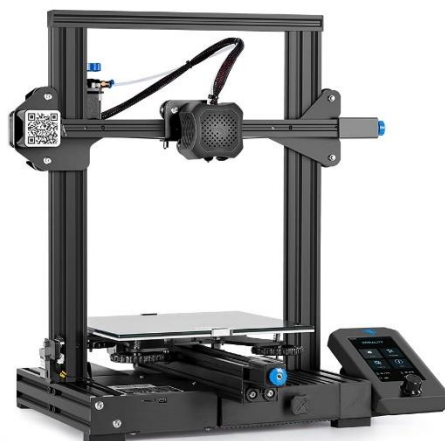
Εικόνα 3.2. Ψηφιακός ζυγός.

3. Τρισδιάστατος εκτυπωτής

Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής Creality Ender 3 V2, χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του πρωτότυπου αντικειμένου που προέκυψε εφαρμόζοντας τις μεθόδους της αντίστροφης μηχανικής και ταχείας προτυποποίησης.

Creality Ender 3 V2	
Διαστάσεις μηχανήματος	475*470*620mm
Διαστάσεις χώρου εκτύπωσης	220*220*250mm
Τεχνολογία εκτυπωτή	FDM
Θερμοκρασία επιφάνειας εκτύπωσης	≤ 100 °C
Υλικά εκτύπωσης	PLA/TPU/PETG
Διάμετρος νήματος	1.75mm
Ακρίβεια εκτύπωσης	± 0.1mm
Πάχος στρώσης υλικού	0.1-0.4mm

Πίνακας 3.1. Τεχνικά χαρακτηριστικά Creality Ender 3 V2.
Πηγή: Creality 3D Technology Co., Ltd



Εικόνα 3.3. Τρισδιάστατος εκτυπωτής Creality Ender 3 V2.

4. Σετ Λίμες

Οι λίμες χρησιμοποιήθηκαν στην επεξεργασία του τελικού αντικειμένου, λόγω

της τραχείας επιφάνειας που δημιουργείται από τα στηρίγματα της εκτύπωσης (supports). Σκοπός είναι η ομοιόμορφη και λεία επιφάνεια του τελικού αντικειμένου διότι θα αντιγραφεί απολύτως από τη σιλικόνη καλουπιών.

3.4 - Υλικά

Η λίστα των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του βύσματος είναι:

1. Νήμα τρισδιάστατου εκτυπωτή

Το νήμα του τρισδιάστατου εκτυπωτή που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του πρωτότυπου μέσω ταχείας προτυποποίησης είναι το Esun PLA+ 1.75mm. Πληροί όλες τις απαιτήσεις που δόθηκαν κατά τη διάρκεια της ταχείας προτυποποίησης.

Esun PLA+ 1.75mm	
Θερμοκρασία εκτύπωσης	210-230°C
Θερμοκρασία επιφάνειας εκτύπωσης	45-60°C
Πυκνότητα νήματος	1.3g/m ³
Αντοχή σε εφελκυστική καταπόνηση	63MPa
Αντοχή σε καμπτικές καταπονήσεις	74MPa
Διάμετρος νήματος	1.75mm

Πίνακας 3.2. Τεχνικά χαρακτηριστικά Esun Pla+ 1.75mm.
Πηγή: Esun Industrial Co., Ltd

2. Σιλικόνη καλουπιών και σκληρυντής

Για τη δημιουργία καλουπιών χρησιμοποιήθηκε η σιλικόνη δύο συστατικών SILASTIC RTV-3481. Σκοπός είναι να παραχθούν καλούπια το οποίο θα έχουν εύκολη αποκόλληση από το χυτευμένο αντικείμενο ενώ παράλληλα θα είναι ικανά να αντιγράψουν ακριβώς όλες τις λεπτομέρειες του πρωτότυπου αντικειμένου.

SILASTIC RTV - 3481	
Χρώμα	Άσπρο
Πυκνότητα στερεού	1.21 g/mL
Χρόνος επεξεργασίας υλικού	90-120 λεπτά
Συνδιαστικό ιξώδες	20000 MPa*s
Σκληρότητα	A24
Αντοχή σε εφελκυστική καταπόνηση	4.7 MPa
Αντίσταση στο σχίσιμο	26 kN/m
Συρρίκνωση	0.2-0.4%
Χρόνος πήξης υλικού	24 ώρες

Πίνακας 3.3. Τεχνικά χαρακτηριστικά σιλικόνης καλουπιών.
 Πηγή: Dow Inc.

3. Πολυουρεθανική ρητίνη και σκληρυντής

Για τη χύτευση της ρητίνης στο καλούπι σιλικόνης που δημιουργείται χρησιμοποιήθηκε η πολυουρεθανική ρητίνη δύο συστατικών Electrolube UR 5604. Ο λόγος εφαρμογής της είναι η υψηλή απόδοση που προσφέρει προς εμποτισμό και πάκτωση ηλεκτρονικών και ηλεκτρικών εξαρτημάτων.

Electrolube UR 5604	
Υγρή μορφή	
Κύριο συστατικό	Πολυουρεθάνη
Χρώμα ρητίνης	Μαύρο
Χρώμα σκληρυντή	Καφέ
Πυκνότητα ρητίνης	1.62 g/mL
Πυκνότητα σκληρυντή	1.21 g/mL
Ιξώδες ρητίνης	12500 MPa*s
Ιξώδες σκληρυντή	50 MPa*s

Ιξώδες συνδιαστικά	2000 MPa*s
Χρόνος επεξεργασίας υλικού	40 λεπτά - 20°C
Χρόνος στερεοποίησης	24ώρες - 23°C , 3ώρες - 60°C
Συρρίκνωση	< 1%
Στερεή μορφή	
Χρώμα	Μαύρο
Θερμική αγωγιμότητα	0.45 W/m*K
Πυκνότητα στερεού	1.54 g/mL
Εύρος θερμοκρασίας	-40 – 130 °C
Διηλεκτρική ισχύς	18 kV/mm
Απορρόφηση νερού	<0.5% - 20°C , <1% - 100°C
Σκληρότητα	A75/D25 - 23°C D80 - -60°C A92 - 155°C μετά από 600ώρες

Πίνακας 3.4. Τεχνικά χαρακτηριστικά πολυουρεθανικής ρητίνης.
Πηγή: Electrolube

3.5 - Διαδικασία κατασκευής

Η διαδικασία της κατασκευής του βύσματος χωρίζεται σε 4 διεργασίες:

1. Την αντίστροφη μηχανική που θα εφαρμοστεί στο αντικείμενο καθώς και όλες τις λεπτομέρειες μέτρησης του αντικειμένου με την αναλυτική σχεδίαση του στο παραμετρικό σχεδιαστικό πρόγραμμα Inventor Autodesk.
2. Την ταχεία προτυποποίηση μέσω του τρισδιάστατου εκτυπωτή καθώς και όλες τις ρυθμίσεις που απαιτεί.
3. Τον τρόπο δημιουργίας καλουπιών σιλικόνης από το εκτυπωμένο αντικείμενο.
4. Τη χύτευση της πολυουρεθανικής ρητίνης στο καλούπι σιλικόνης.

3.5.1 – Εφαρμογή αντίστροφης μηχανικής

Για να εφαρμοστεί αντίστροφη μηχανική στο αντικείμενο, θα πρέπει να εφαρμοστούν οι στρατηγικές και τα βήματα που αναφέρθηκαν στο **Κεφάλαιο 1.5**. Το αντικείμενο στο οποίο θα εφαρμοστεί η αντίστροφη μηχανική αποτελείται από ένα (1) τεμάχιο. Έπειτα, παρατηρείται πως ο όγκος του αντικειμένου είναι μικρός και η μορφολογία του αντικειμένου είναι γεωμετρικά απλή. Από αυτήν την παρατήρηση, ο μηχανικός δημιουργεί μια μεθοδολογία μέτρησης του αντικειμένου. Για το συγκεκριμένο εγχείρημα δεν κρίθηκε απαραίτητη η χρήση εξοπλισμού CMM ή σαρωτή laser, διότι με έναν σαρωτή επαφής, όπως το παχύμετρο ακρίβειας 0.05mm η μέτρηση γίνεται αρκετά ακριβής εφόσον ο εκτυπωτής που θα εφαρμοστεί η ταχεία προτυποποίηση δεν μπορεί να έχει μεγαλύτερη ακρίβεια από $\pm 0.1\text{mm}$.

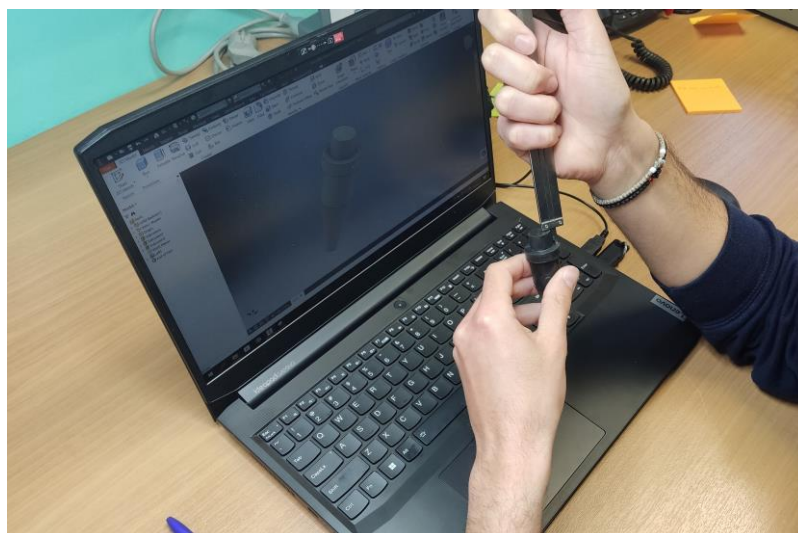
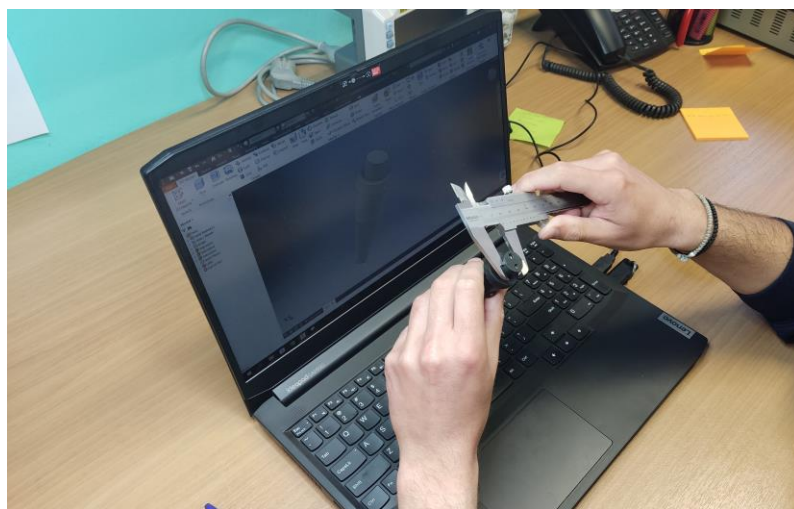
Συνεχίζοντας τα βήματα της αντίστροφης μηχανικής, ο μηχανικός πρέπει να παρατηρήσει το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένο το αντικείμενο καθώς δεν υπάρχουν τεχνικές οδηγίες. Το βύσμα είναι φτιαγμένο από κάποιας μορφής πλαστικό το οποίο έχει πολυμεριστεί κατά τη διάρκεια ζωής του στο θαλάσσιο περιβάλλον χάνοντας τις ιδιότητές του. Κατά την παραγωγή του αντικειμένου πρέπει να ληφθούν υπόψιν τα χαρακτηριστικά των υλικών του πρωτοτύπου. Λόγω της λαστιχένιας του μορφής, ο μηχανικός πρέπει να είναι αρκετά προσεκτικός ως προς τις μετρήσεις του, καθώς το λάστιχο κατά την πίεση από τις σιαγώνες του παχύμετρου αλλάζει μορφή. Οι μετρήσεις πρέπει να είναι παραπάνω από μια για την ορθότητα του αποτελέσματος.

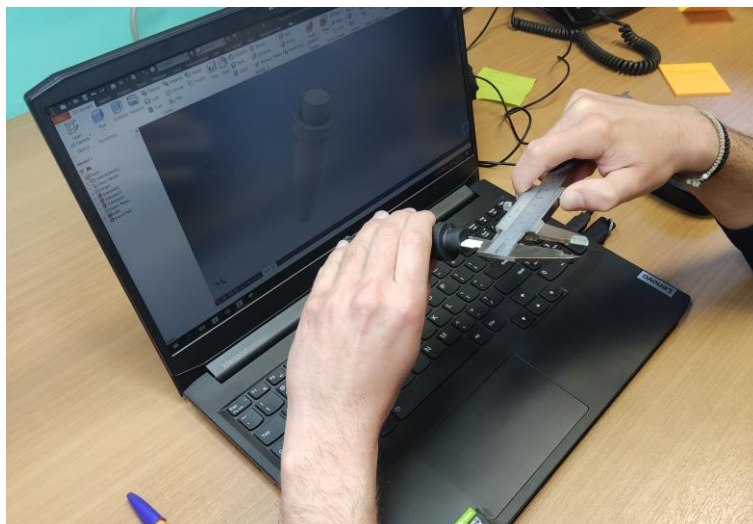


Εικόνα 3.4. Βύσμα προς αντιγραφή.

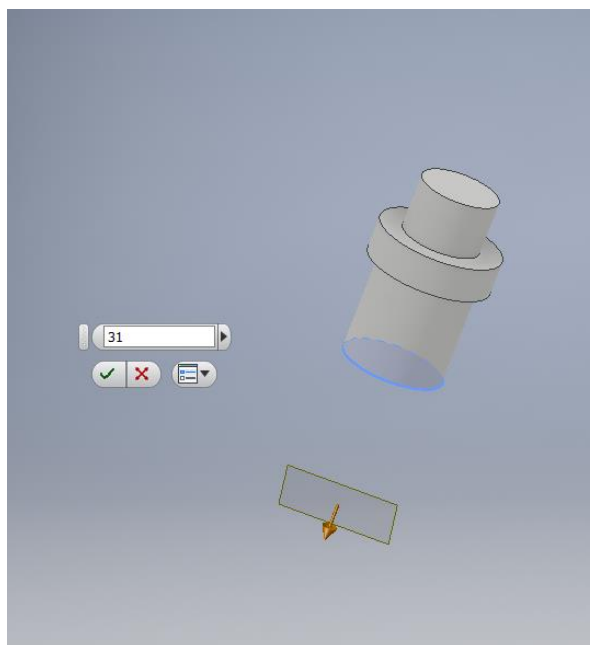
Αφού ολοκληρωθεί η διαστασιολόγηση του αντικειμένου, πρέπει η γεωμετρία και οι μετρήσεις να αποτυπωθούν στο σχεδιαστικό πρόγραμμα. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται το αρχείο μορφής CAD. Το παραμετρικό πρόγραμμα σχεδίασης για το σχεδιασμό του αρχείου σε ψηφιακή μορφή είναι το Inventor Autodesk 2017. Οι εντολές σχεδιασμού που ακολουθήθηκαν για την τρισδιάστατη μορφή και απεικόνιση του αντικειμένου είναι: α) Sketch, β) Circle, γ) Extrude, δ) Loft, ε) Dimension, στ) Offset from plane.

Παρακάτω ακολουθούν εικόνες από τη διαστασιολόγηση του αντικειμένου όπως επίσης και από τα στάδια σχεδίασης στο πρόγραμμα Inventor.

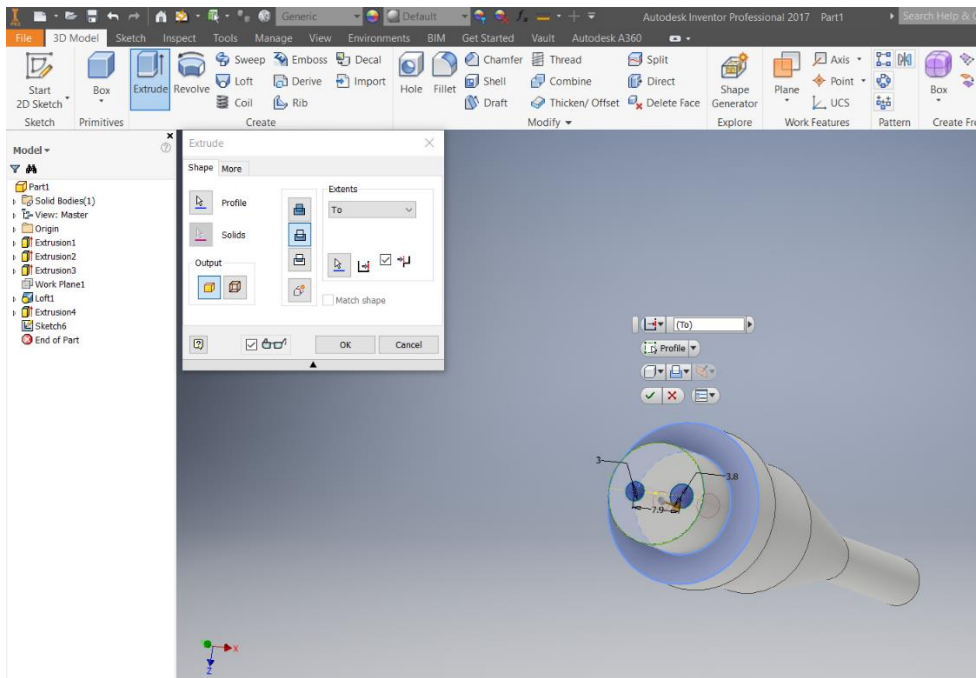




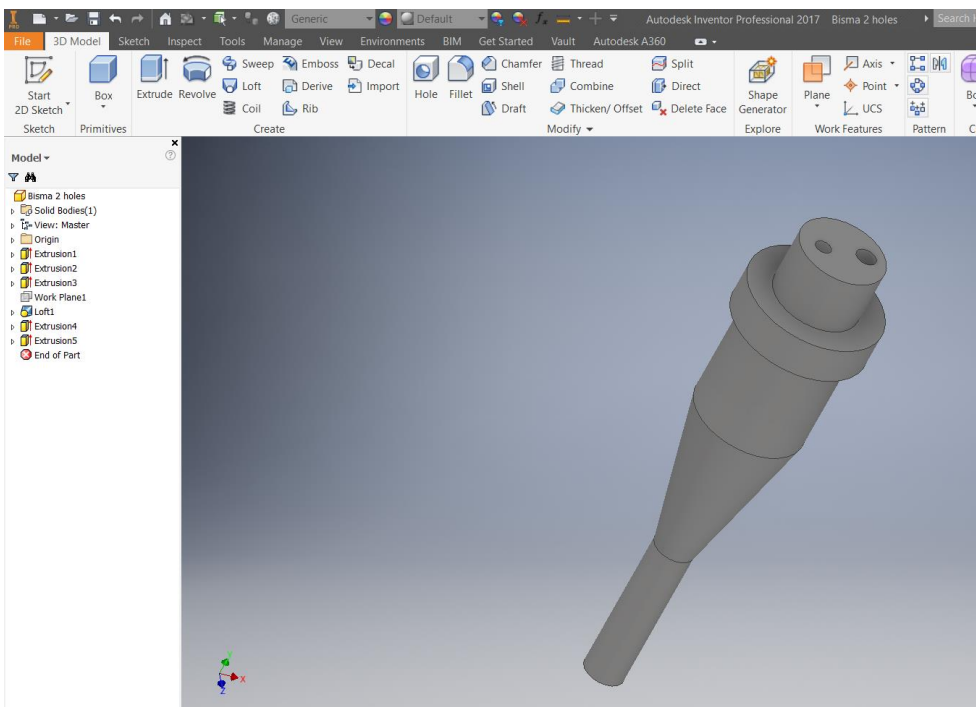
Εικόνες 3.5α, 3.5β, 3.5γ. Διαδικασία μέτρησης βύσματος.



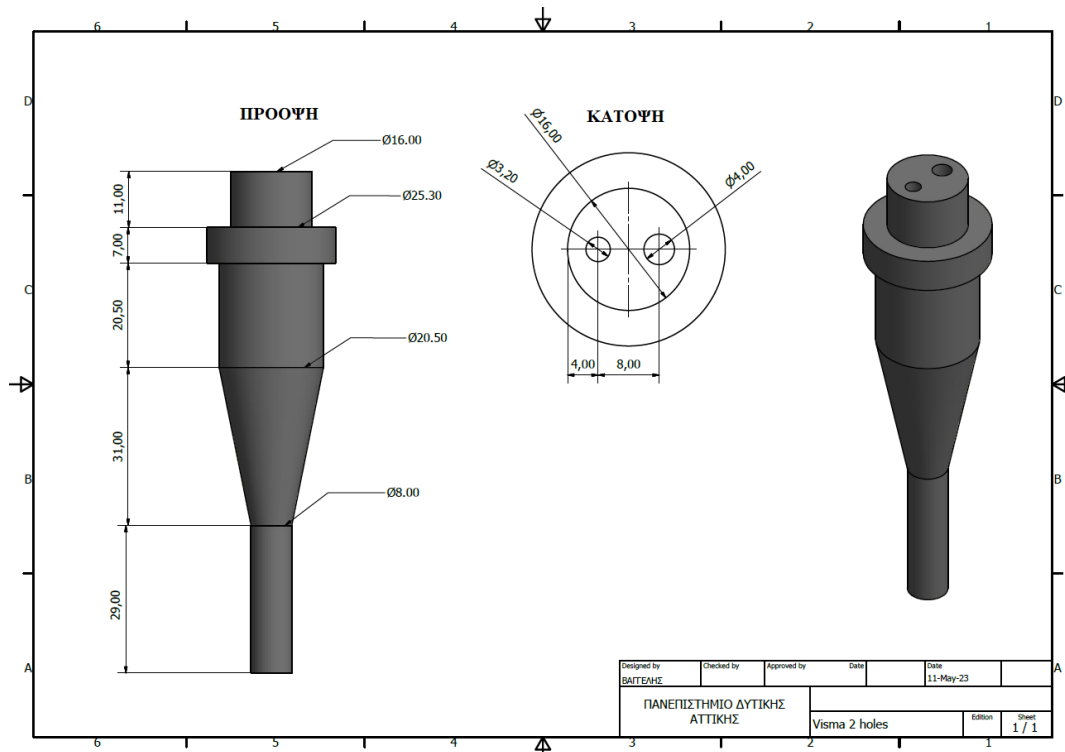
Εικόνα 3.6. Δημιουργία κορμού στο Inventor.



Εικόνα 3.7. Δημιουργία σπών στο Inventor.



Εικόνα 3.8. Τελικό σχήμα στο Inventor.



Εικόνα 3.9. Μηχανολογικό σχέδιο.

3.5.2 – Ταχεία προτυποποίηση

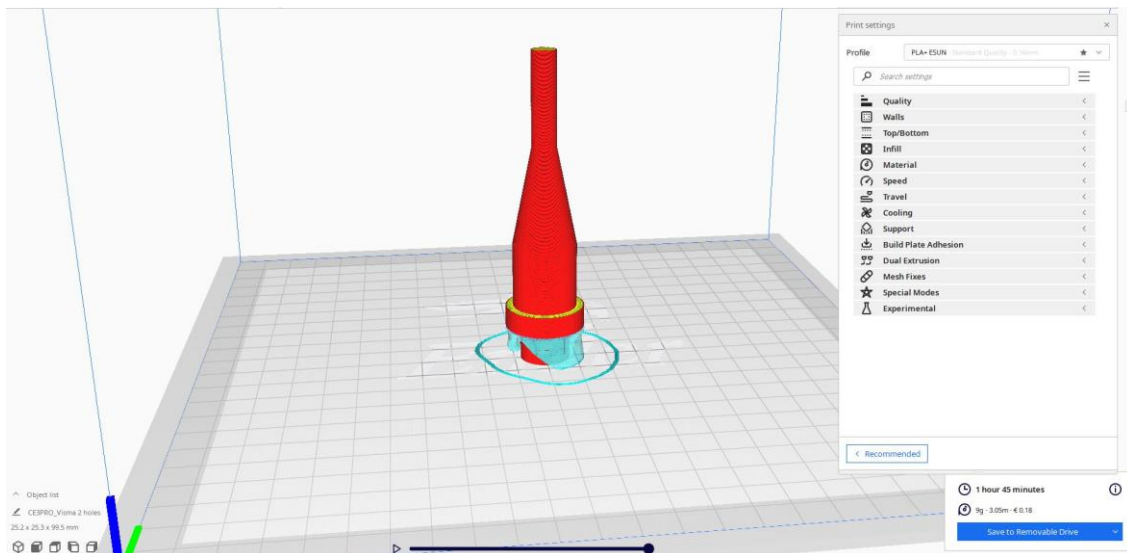
Για τη διαδικασία της ταχείας προτυποποίησης επιλέχθηκε η μέθοδος της τρισδιάστατης εκτύπωσης μέσω εκτυπωτή FDM. Ο λόγος επιλογής αυτής της τεχνολογίας είναι η ευκολία που προσφέρει στο χρήστη να δημιουργήσει ένα πρωτότυπο φυσικό αντικείμενο χωρίς μεγάλο κόστος. Εφόσον το αρχείο CAD έχει δημιουργηθεί σε οποιοδήποτε τρισδιάστατο σχεδιαστικό πρόγραμμα, τα δεδομένα πρέπει να αποθηκευτούν σε μορφή αρχείου .stl.

Για την εκτύπωση του αντικειμένου χρειάζεται η παραγωγή ενός κώδικα (g-code) ο οποίος ορίζει τις εντολές που θα ακολουθήσει ο εκτυπωτής. Το λογισμικό παραγωγής κώδικα κατανοεί μόνο αρχεία αποθηκευμένα ως .stl. Με την εισαγωγή του αρχείου στο πρόγραμμα, ο χρήστης μπορεί να κάνει τις απαιτούμενες παραμετροποιήσεις ώστε το εκτυπωμένο αντικείμενο να συμβαδίζει πλήρως με τις απαιτήσεις του. Μερικές από τις παραμέτρους που πρέπει να δηλώσει ο χρήστης είναι:

- *Προσανατολισμός αντικειμένου στο χώρο εκτύπωσης.* Ο προσανατολισμός ενός αντικειμένου στο χώρο εκτύπωσης επηρεάζει την ταχύτητα, την ποιότητα ακόμα και την αντοχή του σε εφελκυστικές και καμπτικές καταπονήσεις. Αυτό συμβαίνει διότι το αντικείμενο δεν είναι φτιαγμένο

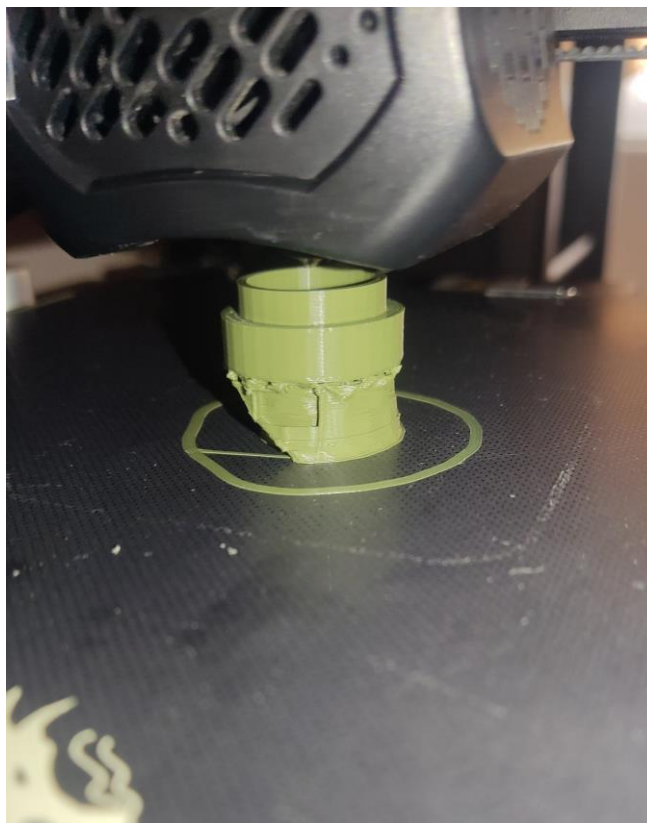
ομοιόμορφα αλλά αποτελείται από στρώματα υλικού.

- *Ποιότητα.* Με τον όρο ποιότητα ορίζεται το κάθετο διάστημα εναπόθεσης υλικού από το ένα στρώμα του εκτυπωτή στο επόμενο. Από αυτήν τη ρύθμιση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό η ταχύτητα της εκτύπωσης.
- *Ταχύτητα.* Ανάλογα τα όρια του κάθε εκτυπωτή που έχει ορίσει ο κατασκευαστής και την επιθυμητή ποιότητα κατασκευής του αντικείμενου, ορίζεται η ταχύτητα κίνησης της κεφαλής και εκ τούτου η ταχύτητα εξώθησης υλικού.
- *Πλήρωση υλικού (Infill %).* Με τη ρύθμιση της πλήρωσης του υλικού σε % ποσοστό, ορίζεται το πόσο άδειο ή πόσο γεμάτο είναι από υλικό το αντικείμενο προς εκτύπωση. Μεγαλύτερο ποσοστό δηλώνει πιο συμπαγές αντικείμενο.
- *Θερμοκρασίες.* Οι θερμοκρασίες κεφαλής και επιφάνειας εκτύπωσης ορίζονται αποκλειστικά και μόνο από τον κατασκευαστή του νήματος που χρησιμοποιείται για την εκάστοτε εκτύπωση. Δεν έχουν τη δυνατότητα όλοι οι εκτυπωτές να χρησιμοποιήσουν όλα τα υλικά της αγοράς λόγω των θερμικών αντοχών τους. Οι θερμοκρασίες αλλάζουν από υλικό σε υλικό. Στην περίπτωση του PLA+ οι θερμοκρασίες της κεφαλής κυμαίνονται μεταξύ 210-230°C ενώ για την επιφάνεια εκτύπωσης μεταξύ 55-60°C.
- *Στηρίγματα (Supports).* Εάν ένα αντικείμενο έχει κάθετες μεταξύ τους επιφάνειες και η μία είναι παράλληλη στο επίπεδο εκτύπωσης, τότε είναι αναγκαίο να μπουν στηρίγματα. Το λογισμικό έχει την ιδιότητα από μόνο του να ορίζει τα σημεία που θα χρειαστεί να τοποθετηθούν στηρίγματα. Ο μηχανικός πρέπει να επιλέξει το σωστό τύπο στηριγμάτων διότι κατά την αφαίρεσή τους η επιφάνεια που θα στηριχτεί πάνω σε αυτά γίνεται τραχεία. Στην περίπτωση της κατασκευής του πρωτότυπου βύσματος πολυουρεθάνης, είναι αναγκαίο να τοποθετηθούν στηρίγματα όπως φαίνονται με γαλάζιο χρώμα στην **Εικόνα 3.10**.



Εικόνα 3.10. Δημιουργία νέου πρωτότυπου αντικειμένου μέσω της εφαρμογής ULTIMAKER CURA 4.12.1.

Το υλικό που έχει ορισθεί για να κατασκευάσει το πρωτότυπο βύσμα είναι το PLA+. Παρά την πληθώρα υλικών που βρίσκονται στην αγορά, ο εκτυπωτής Creality Ender 3V2 που χρησιμοποιήθηκε για τη συγκεκριμένη εργασία μπορεί να εκτυπώσει σύμφωνα με τον κατασκευαστή PLA, ABS και PETG. Οι λόγοι που προτιμήθηκε το PLA+ εν αντιθέσει με τα υπόλοιπα δύο, είναι διότι είναι ευκολότερο υλικό ως προς την εκτύπωση, φιλικό προς το περιβάλλον και έχει πιο ωραίο τελικό φινίρισμα. Είναι σημαντικό πως και τα τρία υλικά δεν αντιδρούν με τη σιλικόνη καλουπιών.



Εικόνα 3.11. Φωτογραφία κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης.



Εικόνα 3.12. Φωτογραφία στο τέλος της εκτύπωσης.

3.5.3 - Δημιουργία καλουπιών

Αφού τελειώσει η εκτύπωση του αντικειμένου, το επόμενο στάδιο της διαδικασίας είναι η μέτρησή του. Αυτή η ενέργεια είναι αναγκαίας σημασίας καθώς ο μηχανικός πρέπει να γνωρίζει αν πρέπει να αλλάξει κάτι στο αντικείμενο που εκτυπώθηκε π.χ να αλλάξει μια διάσταση μέσω του προγράμματος δημιουργίας CAD αρχείων επειδή ο εκτυπωτής δεν κατάφερε να ακολουθήσει πιστά τις εντολές διαστασιολόγησης.



Εικόνα 3.13. Σύγκριση εκτυπωμένου και πρωτότυπου βύσματος.

Σύμφωνα με τις μετρήσεις, η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ του πρωτότυπου βύσματος και του νέου εκτυπωμένου βύσματος βρίσκεται εντός των αποδεκτών ορίων $\pm 0,1\text{mm}$. Τα αποδεκτά όρια έχουν οριστεί από τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ρητίνης.

	Πρωτότυπο βύσμα	Εκτυπωμένο βύσμα
Απόσταση μεταξύ οπών	8.00mm	7.90mm
Διάμετρος μεγάλης οπής	4.00mm	3.90mm
Διάμετρος μικρής οπής	3.20mm	3.10mm
Διάμετρος 1 ^{ου} κυλίνδρου	16.00mm	16.00mm
Ύψος 1 ^{ου} κυλίνδρου	11.00mm	11.20mm
Διάμετρος 2 ^{ου} κυλίνδρου	25.30mm	25.35mm

Ύψος 2 ^{ου} κυλίνδρου	7.00 mm	7.10mm
--------------------------------	---------	--------

Πίνακας 3.5. Σύγκριση διαστάσεων πρωτότυπου με εκτυπωμένου βύσματος.

Σε περίπτωση που η σύγκριση βρίσκεται εκτός των αποδεκτών ορίων, το αντικείμενο είτε διορθώνεται με επιπλέον κατεργασία όπως ξυλόστοκος για να παχύνει ή λίμα-υαλόχαρτο για να λεπτύνει στις επιφάνειες που χρειάζεται, είτε καταστρέφεται για να δημιουργηθεί καινούριο.

Με το πέρας των μετρήσεων και εφόσον το εκτυπωμένο αντικείμενο βρίσκεται εντός αποδεκτών ορίων, είναι κατάλληλο για τη χρησιμοποίηση του πλέον ως πρωτότυπο. Σε αυτό το σημείο ξεκινάει η διεργασία της δημιουργίας καλουπιών. Οι επιφάνειες που είχαν τραχεία επιφάνεια λόγω των στηριγμάτων κατά την εκτύπωση, πρέπει να λειανθούν και να σφραγιστούν με υλικό όπως η πλαστελίνη η οποία δεν αντιδράει με τη σιλικόνη. Κατά αυτόν τον τρόπο αποτρέπεται στη σιλικόνη να εισχωρήσει στους πόρους του αντικειμένου και να δημιουργήσει προβλήματα κατά την αποκόλληση της από το αντικείμενο. Στη συνέχεια, το νέο πρωτότυπο βύσμα, εισάγεται σε ένα δοχείο το οποίο γεμίζεται με σιλικόνη καλουπιών μέχρι το επάνω άκρο του βύσματος. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή της σιλικόνης, η διάρκεια πλήρης πήξης είναι 24 ώρες. Η σιλικόνη που επιλέχθηκε αντιγράφει πλήρως το αντικείμενο που καλύπτει και έτσι δημιουργεί ένα πιστό αντίγραφο.



Εικόνα 3.14. Δημιουργία καλουπιών σιλικόνης.

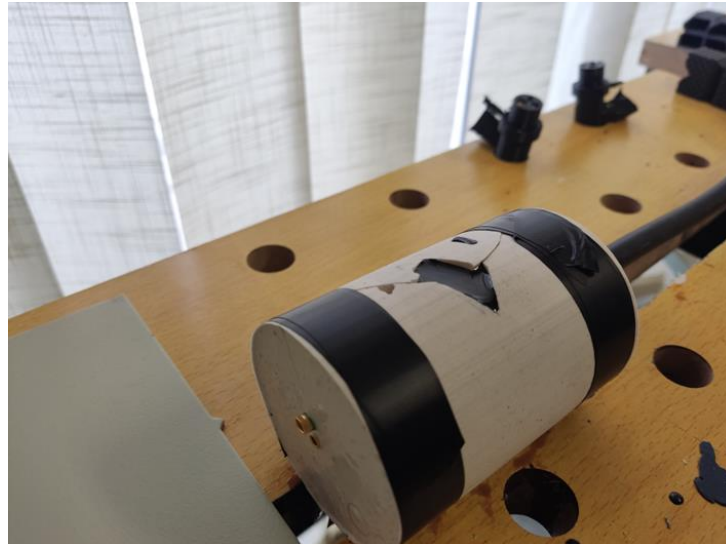
3.5.4 – Διαδικασία χύτευσης πλαστικού υλικού

Η διαδικασία αποκόλλησης της σιλικόνης από το δοχείο πρέπει να γίνεται με προσεκτικό τρόπο καθώς μπορεί να σκιστεί. Σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά που έχουν οριστεί από τον κατασκευαστή, το ποσό της δύναμης που πρέπει να ασκηθεί στη σιλικόνη για να σκιστεί είναι αρκετά μεγάλο. Ωστόσο, οποιαδήποτε μορφή απότομης και λανθασμένης κίνησης μπορεί να καταστρέψει το καλούπι και η διαδικασία να πρέπει να επαναληφθεί.

Για την αποκόλληση του βύσματος από το καλούπι σιλικόνης, ο μηχανικός πρέπει να προβεί σε ορισμένες ενέργειες οι οποίες πρέπει να είναι πιο προσεκτικές από την αποκόλληση του καλουπιού από το δοχείο. Το βύσμα βρίσκεται πακτωμένο στο εσωτερικό του καλουπιού δίχως ελευθερία μετακίνησης. Αυτό αποδεικνύει την πρώτη επιτυχία του καλουπιού. Για να αφαιρεθεί το αντικείμενο, πρέπει το καλούπι του να κοπεί κατά μήκος του κυλίνδρου από τη μία πλευρά. Ο λόγος που το καλούπι δεν κόβεται στα δύο, είναι διότι κατά την χύτευση της πολυουρεθανικής ρητίνης θα υπάρχει διαρροή υλικού από τα σημεία κοπής. Αυτές οι ρωγμές δεν μπορούν να κλείσουν εύκολα καθώς το υλικό έχει λιπαρή υφή και δεν επιτρέπει σε μια κολλητική ταινία να εφαρμόσει πάνω της.

Εφόσον όλα έχουν πάει σωστά και το καλούπι έχει ελεγχθεί για τυχόν διάτρητες οπές οι οποίες βρίσκονται στο χώρο χύτευσης, ακολουθεί η διαδικασία της χύτευσης πολυουρεθανικής ρητίνης.

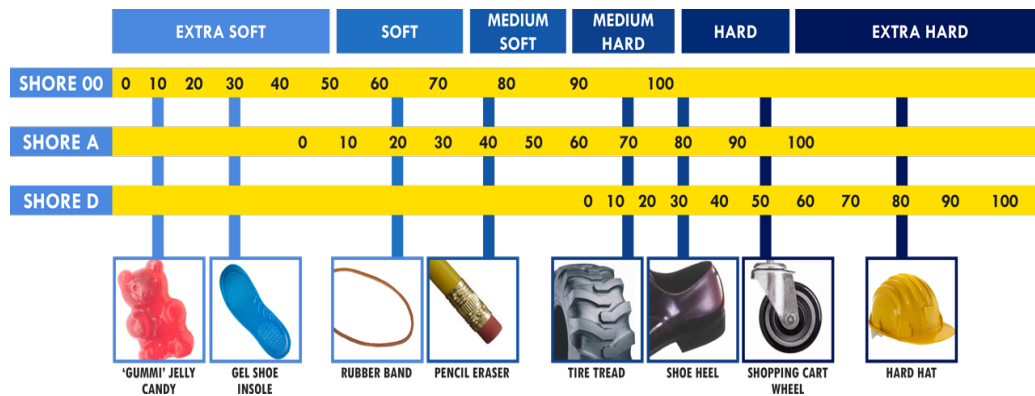
Η λειτουργία ενός βύσματος είναι να μπορεί να κουμπώσει στην αντίστοιχη υποδοχή που έχει η συσκευή. Το βύσμα που πρέπει να κατασκευαστεί φέρει στο εσωτερικό του καλώδια τα οποία καταλήγουν σε δύο (2) θηλυκούς ακροδέκτες. Λόγω αυτής της ιδιομορφίας, το καλώδιο μαζί με τους ακροδέκτες του θα πρέπει να εισαχθεί στο καλούπι και να μετακινηθεί εμπρός ή πίσω αναλόγως τη σωστή θέση που πρέπει να έχει μέσα στο καλούπι. Εφόσον η θέση έχει οριστεί και έχει κριθεί ως σωστή, μέσω μιας διάτρητης οπής από τη μια επιφάνεια του κυλίνδρου ως το εσωτερικό του καλουπιού που βρίσκονται τα καλώδια χυτεύεται η πολυουρεθανική ρητίνη.



Εικόνα 3.15. Χύτευση πολυουρεθανικής ρητίνης.

Το τελικό αντικείμενο θα πρέπει να αποκολληθεί από το καλούπι σιλικόνης προσεκτικά δίχως να σκιστεί. Εφόσον η διαδικασία έχει ολοκληρωθεί και το υλικό ανταποκρίνεται στις ιδιότητές του, πρέπει να αφαιρεθεί το επιπλέον κομμάτι που προκύπτει λόγω της διαδικασίας της χύτευσης όπως φαίνεται στην **Εικόνα 3.16**. Το καλούπι μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί εφόσον είναι αποθηκευμένο σε θερμοκρασία δωματίου, δίχως υγρασία. Ο λόγος επιλογής της συγκεκριμένης ρητίνης σκληρότητας A75/D25 - 23°C είναι η πολύ μεγάλη διηλεκτρική ισχύς με προδιαγραφές για ηλεκτρονικές και ηλεκτρικές κατασκευές καθώς και το μικρό ποσοστό απορρόφησης νερού εφόσον το βύσμα θα βρίσκεται κατά τη διάρκεια της ζωής του σε θαλασσινό νερό. Η **Εικόνα 3.17** παρουσιάζει τις διαφορετικές τιμές σκληρότητας του πλαστικού.

Θα πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι, οι ρητίνες και άλλα επιθετικά υλικά χύτευσης θα επιτεθούν σε καλούπια σιλικόνης, αλλάζοντας την δυνατότητα αποκόλλησης, την ελαστικότητα τους και πιθανώς τις διαστάσεις του καλουπιού. Ο περιοδικός έλεγχος των καλουπιών συνιστάται σε κάθε περίπτωση.



Εικόνα 3.16. Δείκτης σκληρότητας πλαστικών.



Εικόνα 3.17. Περιττό υλικό λόγω χύτευσης.



Εικόνα 3.18. Τελικό βύσμα.

Συμπεράσματα εφαρμογής

Ο στόχος της διπλωματικής όπως ορίστηκε από την αρχή της εργασίας ήταν η κατασκευή εξ' ολοκλήρου ενός βύσματος το οποίο βρίσκεται σε συνθήκες θαλάσσιου περιβάλλοντος. Η κατασκευή του, απαιτεί σωστή εφαρμογή των εξειδικευμένων υλικών τα οποία πρέπει να είναι ικανά να ανταπεξέλθουν στις συνθήκες του αλμυρού νερού καθώς και στους κραδασμούς του πλοίου που φέρει το σύστημα. Ξεκινώντας από την διαδικασία της αντίστροφης μηχανικής, ο μηχανικός ο οποίος μελετάει το αντικείμενο πρέπει να αναζητήσει τα εργαλεία-σαρωτές που χρειάζονται. Τροχοπέδη σε αυτό αποτελεί το γεγονός ότι το υλικό είναι μαλακό και καθώς πιέζει ο σαρωτής το αντικείμενο για να λάβει τις μετρήσεις, το υλικό λόγω των ιδιοτήτων του αλλάζει σχήμα, π.χ κατά το μέτρημα μιας οπής, η διάσταση έχει σφάλμα της τάξης του $\pm 0.1\text{mm}$ ανάλογα τη δύναμη που ασκεί ο χειριστής του εργαλείου. Μετά τις επαναλαμβανόμενες μετρήσεις των διαστάσεων του βύσματος, ο μηχανικός τις αποτυπώνει στο παραμετρικό σχεδιαστικό πρόγραμμα. Ύστερα το αρχείο CAD εξάγεται σε τύπο αρχείου .stl και εισάγεται στο πρόγραμμα παραγωγής g-code (Ultimaker Cura) όπου γίνονται οι απαραίτητες ρυθμίσεις, οι οποίες εξαρτώνται κυρίως από τις δυνατότητες του εκτυπωτή. Στην περίπτωση του συγκεκριμένου αντικείμενου, θα μπορούσε να είχε μειωθεί ο χρόνος εκτύπωσης εφόσον η ποιότητα ανάλυσης, δηλαδή το διάστημα από στρώμα σε στρώμα εναπόθεσης υλικού ήταν στο 0.20mm αντί 0.16mm . Με το πέρας της εκτύπωσης, παρατηρήθηκαν σημεία τα οποία ήθελαν επιπλέον κατεργασία. Η πρώτη κατεργασία αφορά τις οπές οι οποίες δεν είχαν την επιθυμητή διάμετρο ενώ τα κέντρα του βρίσκονταν εντός των επιθυμητών ορίων. Η λύση δόθηκε με τη χρήση στρογγυλής λίμας ώστε η απόκλιση να είναι εντός $\pm 0.1\text{mm}$ από το πρωτότυπο. Η δεύτερη κατεργασία αφορά την επιφάνεια η οποία πατάει πάνω στα στηρίγματα (supports) όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.1**. Δεν είναι λειτουργικό ζήτημα αλλά ζήτημα καλαισθησίας. Αυτή η επιφάνεια τρίφτηκε με ίσια λίμα. Αξίζει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο πως ο μηχανικός δεν είχε τη δυνατότητα να φτιάξει εκτυπωμένο καλούπι καθώς η πολυουρεθανική ρητίνη θα εισερχόταν στους πόρους του καλουπιού και έτσι η αποκόλληση του θα ήταν αρκετά δύσκολη έως και ακατόρθωτη. Συνεπώς η δημιουργία του καλουπιού έγινε από ειδικά καλούπια σιλικόνης τα οποία αποτύπωσαν πλήρως τις λεπτομέρειες του πρωτότυπου βύσματος. Όπως αναφέρθηκε, η δυσκολία με ένα πορώδες αντικείμενο όπως είναι τα εκτυπωμένα, είναι ότι η σιλικόνη λόγω της υγρής της μορφής μπορεί να εισχωρήσει σε

οποιαδήποτε τρύπα συναντήσει. Το σημείο που κρίθηκε επικίνδυνο προς εισχώρηση σιλικόνης ήταν η επιφάνεια που πατούσε στα στηρίγματα **Εικόνα 4.1**. Αυτή η επιφάνεια καλύφθηκε με πλαστελίνη καθώς δεν υπάρχει χημική αντίδραση με τη σιλικόνη. Τέλος κατά τη χύτευση της πολουρεθανικής ρητίνης, πρέπει οι ακροδέκτες να βρίσκονται στη σωστή θέση διότι με την πλήρη στερεοποίηση του υγρού υλικού θα πακτωθούν. Το υλικό ιδανικά πρέπει να βρίσκεται σε χώρο χωρίς υγρασία και σε θερμοκρασία δωματίου ώστε όλες οι ιδιότητές του να είναι όπως τις ορίζει ο κατασκευαστής.



Εικόνα 4.1. Η επιφάνεια στήριξης των supports.

Συμπεράσματα

Η μέθοδος της αντίστροφης μηχανικής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ένα απλό αντικείμενο ή λογισμικό μέχρι ολόκληρα συστήματα. Ο μηχανικός εκπαιδεύεται εις βάθος πάνω στο αντικείμενο μελέτης του ενώ εξοικειώνεται με νέες τεχνολογίες και εφαρμογές σάρωσης. Η ταχεία προτυποποίηση είναι το επόμενο βήμα της αντίστροφης μηχανικής εφόσον θέτονται ζητήματα κατασκευής διότι σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα ο μηχανικός μπορεί να υλοποιήσει την ιδέα του σε φυσικό αντικείμενο δίχως πολύπλοκες τεχνολογίες και εργατικό δυναμικό. Η ταχεία προτυποποίηση και η αντίστροφη μηχανική έχουν προοδεύσει πολύ κατά Τέταρτη Βιομηχανική επανάσταση με όλο και πιο πολλές επιχειρήσεις να εφαρμόζουν αυτές τις μεθόδους. Η μέθοδος της χύτευσης βρίσκει εφαρμογές σε πολλές κατασκευαστικές βιομηχανίες που δημιουργούν αντικείμενα αντιγραφής των πρωτοτύπων.

Βιβλιογραφία

- [1]. Budijono, A. P., Syah, S. R., Kurniawan, W. D., & Habib, B. N. (2021). Reverse engineering method to build automatic flouring gauge machine. IOP Conference Series, 1098(6), 062108.
- [2]. Motavalli, S. (1996). Object-oriented modelling of a feature-based reverse engineering system. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 9(5), 354–368.
- [3]. Reverse Engineering specialists in Brighton | SCAN HD. (2021, January 12). SCANHD. <https://www.scanhd.co.uk/reverse-engineering/>
- [4]. Raja, V. (2008). Introduction to Reverse Engineering. In Springer eBooks
- [5]. Kelly, R. (2022). The 10 Most Popular 3D File Formats. *All3DP*. <https://all3dp.com/2/most-common-3d-file-formats-model>
- [6]. Upputuri, R. S. (2022). What is Reverse Engineering and its Applications. *THINK3D*. <https://www.think3d.in/what-is-reverse-engineering-and-its-applications/>
- [7]. Knicker, M. (2020). Contact vs. Non-Contact Measurement. Q-PLUS Labs. <https://www.qpluslabs.com/blog/contact-vs-non-contact-measurement/>
- [8]. Plc, R. (n.d.). Renishaw: Application note: Substrate mastered scale on a CMM. Renishaw. <https://www.renishaw.es/es/substrate-mastered-scale-on-a-cmm--44379>
- [9]. How Does Laser Scanning Work? | SurvTech Solutions. (n.d.). SurvTech Solutions. <https://www.survtechsolutions.com/how-does-laser-scanning-work>
- [10]. Mostafa, A., & Ebrahim, M. A. (2015). 3D Laser Scanners' Techniques Overview. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/282753883_3D_Laser_Scanners%27_Techniques_Overview
- [11]. Keast, John. (2008). Selecting a Reverse Engineering System
- [12]. Mohapatra, S. K., & Koubek, R. J. (2010). A methodology for selecting reverse engineering technologies. International Journal of Computer Integrated Manufacturing
- [13]. Upcraft, S., & Fletcher, R. (2003). The rapid prototyping technologies. Assembly Automation, 23(4), 318-330.
- [14]. Huang, J., Qin, Q., & Wang, J. J. (2020). A Review of Stereolithography:

- Processes and Systems. *Processes*, 8(9), 1138. <https://doi.org/10.3390/pr8091138>
- [15]. Natarajan, J. (2021). *Advances in Additive Manufacturing Processes*. Bentham Science Publishers.
- [16]. Mirzababaei, S., & Pasebani, S. (2019). A Review on Binder Jet Additive Manufacturing of 316L Stainless Steel. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3(3), 82. <https://doi.org/10.3390/jmmp3030082>
- [17]. Tee, Y. L., Peng, C., Pille, P., Leary, M., & Tran, P. H. (2020). PolyJet 3D Printing of Composite Materials: Experimental and Modelling Approach. *JOM*, 72(3), 1105–1117. <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04014-w>
- [18]. Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2010). Sheet Lamination Processes. In *Springer eBooks* (pp. 223–252). https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9_8
- [19]. Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2015b). Directed Energy Deposition Processes. In *Springer eBooks* (pp. 245–268). https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3_10
- [20]. Rohit, B., & Vineet, K. (n.d.). Rapid Prototyping Market Share and Analysis | Forecast - 2031. Allied Market Research. <https://www.alliedmarketresearch.com/rapid-prototyping-market-A14783>
- [21]. Hermary. (2022b, May 25). Laser Triangulation Defined for Industry Professionals | Hermary. <https://hermary.com/glossary/laser-triangulation/>