



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΑΙΓΑΙΟΥ

UNIVERSITY OF THE
AEGEAN

Τμήμα Μηχανικών Σχεδίασης Προϊόντων και Συστημάτων
Department of Product and Systems Design Engineering

Διπλωματική Εργασία - Thesis

Ιωάννης Ξευγένης - Ioannis Xevgenis
AM: 5112016073

Τίτλος (στα Ελληνικά):

Βελτίωση της διαδικασίας και του συστήματος μετατροπής μπουκαλιών PET σε υλικό τροφοδοσίας 3Δ εκτύπωσης για εκτυπωτές τεχνολογίας εξώθησης και εναπόθεσης υλικού (FDM)

Title (in English):

Improving the process and the system for converting PET bottles into 3D printing feedstock for extrusion and material deposition (FDM) printing technologies

Επιβλέπων Καθηγητής:

Νικόλαος Ζαχαρόπουλος

Τριμελής Επιτροπή:

Νικόλαος Ζαχαρόπουλος

Παρασκευάς Παπανίκος

Γεώργιος Κορώνης

Σύρος, Φεβρουάριος 2024

Δηλώνω υπεύθυνα ότι η διπλωματική εργασία είναι εξ' ολοκλήρου δικό μου έργο και κανένα μέρος της δεν είναι αντιγραμμένο από έντυπες ή ηλεκτρονικές πηγές, μετάφραση από ξενόγλωσσες πηγές και αναπαραγωγή από εργασίες άλλων ερευνητών ή φοιτητών. Όπου έχω βασιστεί σε ιδέες ή κείμενα άλλων, έχω προσπαθήσει, όσο είναι δυνατόν, να το προσδιορίσω σαφώς μέσα από την χρήση αναφορών, ακολουθώντας την ακαδημαϊκή δεοντολογία.

Copyright © Ιωάννης Ξευγένης - Ioannis Xenigenis

Σύρος 2024

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ τους γονείς μου για την στήριξη τους καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου όλα αυτά τα χρόνια, γιατί χωρίς την συμβολή τους και τις προσπάθειες τους δεν θα έφτανα ως εδώ.

Ευχαριστώ τον αδερφό μου για την υποστήριξη του, τις συμβουλές του και την παροχή του εργαστηρίου του για τις ανάγκες της διπλωματικής μου εργασίας.

Ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή μου για την καθοδήγηση, την υποστήριξη και τις πολύτιμες συμβουλές του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας.

Ευχαριστώ τον γάτο μου Τόμπι για την συντροφιά του κατά την διάρκεια της διπλωματικής και γενικότερα κατά τα φοιτητικά μου χρόνια.

Εκφράζω τις ευχαριστίες μου σε οποιονδήποτε άλλον/άλλη που με βοήθησε άμεσα ή έμμεσα στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Τέλος, εκφράζω τις ευχαριστίες μου και στον εαυτό μου για την αφοσίωση και την υπομονή που έδειξα κατά τη διάρκεια αυτής της διαδρομής.

Θέμα

Στα πλαίσια της κουλτούρας των σχεδιαστών/δημιουργών (maker movement / maker culture) και της ανακύκλωσης υλικού από πεπερασμένους πόρους, προτείνεται η σχεδίαση ενός συστήματος και μιας διαδικασίας ως βελτίωση πάνω στα ήδη υπάρχουσα, τα οποία θα εξυπηρετούν στην μετατροπή πλαστικών μπουκαλιών PET σε νήμα υλικού για 3D εκτύπωση (για οικιακή χρήση ή μικρές επιχειρήσεις). Πρόκειται για υλικό που χρησιμοποιείται σε εκτυπωτές τεχνολογίας εξώθησης και εναπόθεσης υλικού (FDM ή FFF, που είναι ουσιαστικά η ίδια τεχνολογία προσθετικής κατασκευής).

Περιεχόμενα

| | |
|--|-----------|
| I. Περίληψη - Abstract..... | 6 |
| II. Εισαγωγή..... | 7 |
| Βασικές πληροφορίες για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των πλαστικών απορριμμάτων και τα πιθανά οφέλη της ανακύκλωσης και του recycling..... | 7 |
| Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των πλαστικών απορριμμάτων..... | 7 |
| Πιθανά οφέλη από την ανακύκλωση..... | 8 |
| Πιθανά οφέλη του recycling..... | 9 |
| Πιθανά μειονεκτήματα του recycling αλλά και της ανακύκλωσης γενικότερα..... | 9 |
| Το maker movement (το κίνημα των σχεδιαστών/δημιουργών)..... | 10 |
| Στόχοι της διπλωματικής..... | 11 |
| Εύρος και περιορισμοί της Διπλωματικής Εργασίας..... | 12 |
| III. Ανασκόπηση της βιβλιογραφίας..... | 12 |
| Επισκόπηση προηγούμενων μελετών για το υλικό PET και την ανακύκλωση του..... | 13 |
| Υλικό PET..... | 13 |
| Ανακύκλωση PET..... | 18 |
| Επισκόπηση προηγούμενων μελετών για την παραγωγή νημάτων τρισδιάστατης εκτύπωσης..... | 24 |
| Ανάλυση της τρέχουσας κατάστασης της ανακύκλωσης-μετατροπής φιαλών PET για την κατασκευή νημάτων τρισδιάστατης εκτύπωσης..... | 26 |
| Περιγραφή της διαδικασίας μετατροπής από μπουκάλι σε νήμα..... | 27 |
| Μετατροπή μπουκαλιών σε λωρίδες..... | 27 |
| Κατασκευή και λειτουργία ενός συστήματος μετατροπής (μετατροπή από λωρίδες σε νήμα)..... | 31 |
| Ανάλυση των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων του ανακυκλωμένου νήματος, συμπεριλαμβανομένης και της δυνατότητας εκτύπωσης..... | 37 |
| Συμπεράσματα από την έρευνα και εντοπισμός ερευνητικών κενών και ευκαιριών για περαιτέρω διερεύνηση..... | 44 |
| IV. Υλικά και μεθοδολογία πειραμάτων και σχεδίασης..... | 45 |
| Αναφορά των υλικών και εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη, συμπεριλαμβανομένων των φιαλών PET και του εξοπλισμού τρισδιάστατης εκτύπωσης..... | 45 |
| Περιγραφή των στόχων και της μεθοδολογίας σχεδίασης δοκιμαστικού πρωτοτύπου μετατροπής πλαστικών μπουκαλιών PET σε υλικό για 3D εκτύπωση..... | 52 |
| Περιγραφή των σταδίων σχεδίασης και υλοποίησης πρωτότυπου συστήματος κοπής μπουκαλιών PET..... | 53 |
| Περιγραφή των σταδίων υλοποίησης πρωτότυπου συστήματος μετατροπής μπουκαλιών PET σε νήμα 3D εκτύπωσης..... | 65 |
| Επισκόπηση της διαδικασίας μετατροπής για τους σκοπούς των πειραμάτων της διπλωματικής εργασίας..... | 88 |
| Περιγραφή των πειραμάτων για την βελτίωση της διαδικασίας μετατροπής μέσω της ένωσης των λωρίδων και μέθοδοι συλλογής δεδομένων..... | 90 |

| | |
|--|------------|
| Περιγραφή πειραμάτων εκτύπωσης με νήμα από ενωμένες λωρίδες..... | 100 |
| Περιγραφή της διαδικασίας σχεδίασης βελτιώσεων για το DIY σύστημα μετατροπής πλαστικών μπουκαλιών PET σε υλικό για 3D εκτύπωση..... | 103 |
| V. Αποτελέσματα..... | 110 |
| Παρουσίαση των αποτελεσμάτων που έχουν εξαχθεί από την πραγματοποίηση των πειραμάτων..... | 110 |
| Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της διαδικασίας σχεδίασης βελτιώσεων για το DIY σύστημα μετατροπής πλαστικών μπουκαλιών PET σε υλικό για 3D εκτύπωση..... | 112 |
| Ανάλυση της σημασίας των αποτελεσμάτων..... | 114 |
| Εντοπισμός πιθανών περιοχών για βελτίωση..... | 114 |
| VI. Συμπέρασμα..... | 116 |
| Περίληψη των κύριων ευρημάτων της μελέτης..... | 116 |
| Επιπτώσεις των αποτελεσμάτων για τους makers, τον τομέα της ανακύκλωσης πλαστικών και της παραγωγής νημάτων τρισδιάστατης εκτύπωσης..... | 116 |
| Συστάσεις για μελλοντική έρευνα και πρακτικές εφαρμογές..... | 117 |
| VII. Βιβλιογραφικές αναφορές..... | 117 |

I. Περίληψη - Abstract

Στις μέρες μας η διαχείριση των πλαστικών αποβλήτων εξακολουθεί να μην είναι αποτελεσματική και τα περισσότερα πλαστικά και πιο συγκεκριμένα τα περισσότερα πλαστικά μπουκάλια δεν ανακυκλώνονται. Η Διπλωματική Εργασία έχει στόχο την βελτίωση από την παρούσα κατάσταση της διαδικασίας και του συστήματος μετατροπής πλαστικών μπουκαλιών PET σε νήμα υλικού τροφοδοσίας για 3D εκτυπωτές τεχνολογίας FDM. Πιο συγκεκριμένα ο στόχος είναι να επινοηθούν βελτιώσεις που να γλιτώνουν στον χρήστη χρόνο και κόπο. Το βασικό μέσο επίτευξης αυτού του στόχου είναι η πρόταση ενός τρόπου ένωσης των λωρίδων που προκύπτουν από την κοπή των φιαλών ώστε το σύστημα μετατροπής να προετοιμάζεται και να ενεργοποιείται μια φορά από τον χρήστη και να έχει ως αποτέλεσμα ένα νήμα μεγάλου συνεχούς μήκους έτοιμο για εκτεταμένη εκτύπωση. Για να γίνει πραγματικότητα αυτή η βελτίωση αλλά και άλλες μικρότερες βελτιώσεις στο σύστημα και στην διαδικασία μετατροπής, έγινε εκτενής έρευνα πάνω στην τρέχουσα κατάσταση της ανακύκλωσης-μετατροπής φιαλών PET σε νήμα καθώς και στην συμβατική ανακύκλωση PET, την φύση του υλικού και την βιομηχανική παραγωγή νημάτων υλικού για 3D εκτύπωση. Στην συνέχεια σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ένα δοκιμαστικό πρωτότυπο σύστημα μετατροπής. Αυτό αποτελείται από κομμάτια που σχεδιάστηκαν στο παραμετρικό πρόγραμμα σχεδίασης Creo και εκτυπώθηκαν από 3D εκτυπωτές με υλικό PLA, εξαρτήματα 3D εκτυπωτών και διάφορα εξαρτήματα και εργαλεία που μπορούν να βρεθούν σε κάθε εργαστήριο. Αφού κατασκευάστηκε το δοκιμαστικό πρωτότυπο ήταν εφικτό να γίνουν πειράματα για την ένωση των λωρίδων. Παράλληλα έγινε παρατήρηση της διαδικασίας και του συστήματος μετατροπής μέσα από την χρήση του για την ανάδειξη προβληματικών σημείων στην διαδικασία και το σύστημα ώστε να σχεδιαστούν οι απαραίτητες περαιτέρω βελτιώσεις. Στο πειραματικό στάδιο δοκιμάστηκαν πολλές τεχνικές ένωσης λωρίδων σε λωρίδες από μπουκάλια αναψυκτικών και νερού που είναι πιο λεπτά. Μια από αυτές τις τεχνικές είχε επιτυχή αποτελέσματα σε λωρίδες από φιάλες νερού στο να περνάει από το σύστημα μετατροπής χωρίς να σπάει η ένωση. Όταν η τεχνική ένωσης εξερίχθη φάνηκε ότι αν εκτελεστεί σωστά τότε η ένωση περνάει πάντα με επιτυχία από το σύστημα μετατροπής. Το νήμα με της ενώσεις που προκύπτει μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συγκεκριμένο τύπο εκτυπωτή, δηλαδή εκτυπωτή που διαθέτει dual gear extruder, που είναι και η νέα τάση στους καινούργιους εκτυπωτές. Μετά από τα πειράματα σχεδιάστηκαν ακόμα μερικές βελτιώσεις για την διευκόλυνση των διεργασιών της μετατροπής μέσω τροποποιήσεων στο σύστημα μετατροπής. Τέλος γίνεται αναφορά περιοχών της εργασίας που θα μπορούσαν να βελτιωθούν ή να προστεθεί έργο ενώ γίνονται συστάσεις για μελλοντικές μελέτες και βγαίνουν συμπεράσματα για την σημασία των αποτελεσμάτων της ΔΕ τόσο για το κίνημα των makers όσο και για την προστασία του περιβάλλοντος.

Nowadays the management of plastic waste is still not effective and most plastics and more specifically most plastic bottles are not recycled. The Diploma Thesis aims to improve on the current state of the PET plastic bottle conversion process and system to filament feed material for FDM technology 3D printers. More specifically, the goal is to devise improvements that save the user time and effort. The key means of achieving this goal is to propose a way of joining the strips which result from the cutting of the bottles so that the conversion system is prepared and activated once by the user and results in a long continuous filament with proper length ready for extended printing. To make this improvement a reality and in addition other minor improvements to the conversion system and process, an extensive research took place on the current status of recycling-converting PET bottles into 3d printing filament as well as conventional PET recycling, the nature of the material and the industrial production of filaments for 3D printing. A prototype conversion system was then designed and built for the realization of the experiments that needed to be done. This prototype consists of pieces that were designed in the parametric computer aided design program Creo and printed by 3D printers with PLA filament, 3D printer parts, and various parts and tools that can be found in every laboratory. After the test prototype was built it was feasible to conduct experiments on joining the strips. At the same time, observations were made about the conversion process and the system through its use for the purpose of highlighting problematic points in the process and the system in order to design some desirable further improvements. In the experimental stage, several strip joining techniques were tried With both strips of soft drink bottles and water bottles which are thinner. One of these techniques had successful results but only with strips of water bottles. Only then the joined strips could go through the conversion system without breaking the joining. As the joining technique evolved it became apparent that if executed correctly then the join always passes successfully through the conversion system without failure. The resulting filament can be used in a specific type of printer, that is a printer that has a dual gear extruder, which is also the new trend among new budget printers. After the experiments some further improvements were designed and implemented for facilitating the conversion processes, through modifications to the conversion system. Finally, areas of the thesis that could be improved or have room for development are mentioned while recommendations are made for future studies, conclusions are drawn for the importance of the results of the thesis for both the maker culture and for the protection of the environment.

II. Εισαγωγή

Βασικές πληροφορίες για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των πλαστικών απορριμμάτων και τα πιθανά οφέλη της ανακύκλωσης και του recycling

Στην εποχή που ζούμε ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά προβλήματα που έχουμε να αντιμετωπίσουμε είναι αυτό της διαχείρισης των πλαστικών απορριμμάτων. Αυτή η διπλωματική εργασία δεν πρόκειται να δώσει λύση σε αυτό το θηριώδες πρόβλημα αλλά αποτελεί μια πρόταση προς την σωστή

κατεύθυνση. Μια από τις πιθανές λύσεις στο πρόβλημα της διαχείρισης των πλαστικών απορριμμάτων είναι η κυκλική οικονομία με εξαντλητική ανακύκλωση τροφοδοτούμενη με ηλεκτρικό ρεύμα από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Δυστυχώς όμως βρισκόμαστε πολύ μακριά από μια πραγματικότητα αληθινής κυκλικής οικονομίας και πόσο μάλλον στην χώρα μας. Ωστόσο, η ανακύκλωση από μόνη της δεν αρκεί για να λύσει το πρόβλημα των πλαστικών απορριμμάτων. Πρέπει επίσης να μειώσουμε την κατανάλωση πλαστικού, να καινοτομήσουμε νέα υλικά και να εφαρμόσουμε καλύτερα συστήματα διαχείρισης απορριμμάτων για να επιτύχουμε ένα βιώσιμο μέλλον.

Τα πλαστικά απόβλητα έχουν γίνει ένα σημαντικό περιβαλλοντικό ζήτημα τα τελευταία χρόνια, αποτελώντας σημαντική απειλή για την άγρια ζωή, την ανθρώπινη υγεία και τον πλανήτη συνολικά. Η παραγωγή και η κατανάλωση πλαστικών προϊόντων έχουν αυξηθεί εκθετικά τις τελευταίες δεκαετίες, οδηγώντας σε μεγάλη ποσότητα πλαστικών απορριμμάτων που καταλήγουν σε χωματερές και ωκεανούς. Σε αυτό το πλαίσιο, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των πλαστικών απορριμμάτων και τα πιθανά οφέλη της ανακύκλωσης.

Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των πλαστικών απορριμμάτων

Η μη βιοαποδομήσιμη φύση των πλαστικών απορριμμάτων τα καθιστά σημαντική περιβαλλοντική απειλή. Το πλαστικό μπορεί να πάρει εκατοντάδες χρόνια για να διασπαστεί και ακόμη και τότε δεν εξαφανίζεται ποτέ πραγματικά. Αντίθετα, διασπάται σε όλο και μικρότερα κομμάτια, γνωστά ως μικροπλαστικά, τα οποία μπορούν να καταποθούν από ζώα και ανθρώπους. Η κατάποση αυτών των μικροπλαστικών μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα υγείας, ακόμη και θάνατο.

Επιπλέον, τα πλαστικά απόβλητα συμβάλλουν στην κλιματική αλλαγή. Ακόμα και η παραγωγή πλαστικών συμβάλλει σημαντικά στις επιβλαβείς εκπομπές αερίων στο περιβάλλον. Η διαδικασία κατασκευής πλαστικού περιλαμβάνει τη χρήση ορυκτών καυσίμων όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, τα οποία απελευθερώνουν διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο και άλλα αέρια του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα. Επιπλέον, η μεταφορά πρώτων υλών και τελικών προϊόντων παράγει επίσης εκπομπές. Όταν τα πλαστικά απορρίπτονται σε χώρους υγειονομικής ταφής, μπορούν να απελευθερώσουν τοξικές χημικές ουσίες και αέρια θερμοκηπίου καθώς αποσυντίθενται. Η καύση πλαστικών απορριμμάτων εκπέμπει επίσης επιβλαβείς ρύπους, συμπεριλαμβανομένου του μονοξειδίου του άνθρακα, των οξειδίων του αζώτου, διοξίνες, φουράνια, bcr, υδράργυρο και των σωματιδίων (σωματιδιακή ρύπανση, που ονομάζεται επίσης σωματιδιακή ύλη ή particulate matter, αποτελείται από σωματίδια, μικροσκοπικά κομμάτια στερεών ή υγρών που βρίσκονται στον αέρα, τα οποία μπορεί να έχουν σοβαρές συνέπειες για την υγεία του ανθρώπου και της άγριας ζωής). Συνολικά, η παραγωγή και η απόρριψη πλαστικού έχει σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, συμπεριλαμβανομένης της συμβολής στην κλιματική αλλαγή και την ατμοσφαιρική ρύπανση.

Τα πλαστικά απόβλητα αποτελούν σημαντική απειλή για τη θαλάσσια ζωή, με εκτεταμένες και δυνητικά καταστροφικές συνέπειες. Όταν το πλαστικό εισέρχεται στον ωκεανό, μπορεί να θεωρηθεί εσφαλμένα ως τροφή από θαλάσσια ζώα, οδηγώντας σε κατάποση και δυνητικά θανατηφόρες συνέπειες. Επιπλέον, τα πλαστικά απόβλητα μπορούν να μπλέξουν και να πνίξουν ή να οδηγήσουν σε λιμοκτονία θαλάσσια πλάσματα όπως οι φάλαινες, τα δελφίνια και οι θαλάσσιες χελώνες. Η κατάποση πλαστικού μπορεί να

προκαλέσει βλάβη στη θαλάσσια ζωή σε κυτταρικό επίπεδο και να διαταράξει τα ορμονικά και αναπαραγωγικά συστήματα. Καθώς τα πλαστικά χρειάζονται εκατοντάδες χρόνια για να αποσυντεθούν, η συσσώρευση πλαστικών απορριμμάτων στον ωκεανό αυξάνεται ραγδαία, θέτοντας ακόμη μεγαλύτερη απειλή για τα θαλάσσια οικοσυστήματα. Οι συνέπειες των πλαστικών απορριμμάτων για τη θαλάσσια ζωή είναι σοβαρές και απαιτούν επείγουσα δράση για να αποτραπεί περαιτέρω ζημιά στους ωκεανούς μας και στα πλάσματα που τους κατοικούν. Πιο συγκεκριμένα τα μικροπλαστικά, τα οποία είναι μικροσκοπικά σωματίδια πλαστικού που έχουν μήκος μικρότερο από πέντε χιλιοστά, αποτελούν σημαντική απειλή για τη θαλάσσια ζωή. Αυτά τα μικρά πλαστικά σωματίδια μπορούν να προσληφθούν από ένα ευρύ φάσμα θαλάσσιων οργανισμών, από πλαγκτόν έως μεγαλύτερα ψάρια και θηλαστικά, προκαλώντας σωματική και τοξικολογική βλάβη. Τα μικροπλαστικά μπορούν να μπλοκάρουν την πεπτική οδό, προκαλώντας λιμοκτονία ή υποσιτισμό και μπορούν να συσσωρευτούν και να μεταφέρουν τοξικές χημικές ουσίες και ρύπους στην τροφική αλυσίδα που καταλήγει και στους ανθρώπους σε πολλές περιπτώσεις. Επιπλέον, τα μικροπλαστικά μπορούν να διαταράξουν το αναπαραγωγικό σύστημα των θαλάσσιων οργανισμών, οδηγώντας σε μειωμένα ποσοστά γονιμότητας και μείωση του πληθυσμού. Η ευρεία παρουσία μικροπλαστικών στους ωκεανούς του κόσμου αποτελεί μια αυξανόμενη ανησυχία και είναι απαραίτητο να αναλάβουμε δράση για να μειώσουμε την παραγωγή τους και να αποτρέψουμε την είσοδό τους στα θαλάσσια οικοσυστήματα.

Πιθανά οφέλη από την ανακύκλωση

Η ανακύκλωση είναι ένα ουσιαστικό βήμα για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των πλαστικών απορριμμάτων. Η ανακύκλωση συμβάλλει στη μείωση της ποσότητας των πλαστικών απορριμμάτων που καταλήγουν σε χωματερές και στους ωκεανούς, καθώς και στη μείωση της ζήτησης για νέα παραγόμενη πρώτη ύλη παρθένου πλαστικού. Η ανακύκλωση συμβάλλει επίσης στη διατήρηση των φυσικών πόρων, καθώς η παραγωγή νέου πλαστικού απαιτεί πετρέλαιο και φυσικό αέριο, που είναι μη ανανεώσιμοι πόροι.

Επιπλέον, η ανακύκλωση έχει πολλά οικονομικά πλεονεκτήματα που την καθιστούν κρίσιμη συνιστώσα της βιώσιμης διαχείρισης απορριμμάτων. Πρώτα και κύρια, η ανακύκλωση εξοικονομεί φυσικούς πόρους και μειώνει την ανάγκη για παρθένα υλικά, μειώνοντας έτσι το κόστος εξόρυξης και διατηρώντας το περιβάλλον. Η ανακύκλωση δημιουργεί επίσης θέσεις εργασίας και συμβάλλει στην ανάπτυξη της βιομηχανίας ανακύκλωσης, η οποία παράγει έσοδα για τις κυβερνήσεις και τις επιχειρήσεις. Με την εκτροπή των απορριμμάτων από χώρους ταφής και αποτεφρωτήρες, η ανακύκλωση συμβάλλει στη μείωση του κόστους διαχείρισης των απορριμμάτων και των συναφών περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Επιπλέον, τα ανακυκλωμένα υλικά είναι συχνά φθηνότερα από τα παρθένα υλικά, καθιστώντας τα ελκυστική επιλογή για τους κατασκευαστές και τους καταναλωτές. Συνολικά, η ανακύκλωση έχει σημαντικό θετικό αντίκτυπο στην οικονομία, προωθώντας τη βιώσιμη χρήση των πόρων, δημιουργώντας θέσεις εργασίας και μειώνοντας το κόστος διαχείρισης απορριμμάτων.

Η ανακύκλωση συμβάλλει επίσης στη μείωση της ποσότητας πλαστικών απορριμμάτων που καταλήγουν στον ωκεανό, μειώνοντας την απειλή για τη θαλάσσια ζωή. Επιπλέον, η ανακύκλωση μπορεί να συμβάλει στο κλείσιμο του κύκλου της οικονομίας των πλαστικών, δημιουργώντας μια κυκλική οικονομία όπου τα απόβλητα επαναχρησιμοποιούνται και ανακυκλώνονται αντί να απορρίπτονται. Αυτό μπορεί να συμβάλει

στη μείωση της ζήτησης για νέα πλαστικά προϊόντα, μειώνοντας τελικά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των πλαστικών απορριμμάτων.

Πιθανά οφέλη του upcycling

Το upcycling έχει πολλά οφέλη που το καθιστά ελκυστική επιλογή για όσους ενδιαφέρονται για τη βιωσιμότητα και τη δημιουργικότητα. Πρώτον, συμβάλλει στη μείωση της ποσότητας των απορριμμάτων που καταλήγουν στις χωματερές, μετριάζοντας έτσι τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της καταναλωτικής κουλτούρας. Με την επαναχρησιμοποίηση των υπαρχόντων υλικών, οι ανακυκλωτές μπορούν να δημιουργήσουν νέα προϊόντα χωρίς την ανάγκη πρόσθετων πόρων και της ενέργειας που απαιτείται για την κατασκευή τους. Δεύτερον, το upcycling μπορεί να είναι οικονομικά αποδοτικό, καθώς τα υπάρχοντα υλικά μπορούν να ληφθούν με ελάχιστο ή καθόλου κόστος, γεγονός που την καθιστά προσβάσιμη δραστηριότητα για πολλούς ανθρώπους. Επιπλέον, το upcycling επιτρέπει την κατασκευή μοναδικών και δημιουργικών προϊόντων, καθώς δεν παράγονται μαζικά, γεγονός που μπορεί να προσθέσει αξία και ελκυστικότητα στο τελικό προϊόν. Τέλος, το upcycling μπορεί να έχει θετικό κοινωνικό αντίκτυπο υποστηρίζοντας τις τοπικές οικονομίες χρησιμοποιώντας τοπικούς πόρους και μειώνοντας τη σπατάλη αλλά επίσης δημιουργώντας ευκαιρίες απασχόλησης ενώ προάγει τη βιωσιμότητα και την περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση.

Πιθανά μειονεκτήματα του upcycling αλλά και της ανακύκλωσης γενικότερα

Ενώ η ανακύκλωση θεωρείται γενικά ως μια φιλική προς το περιβάλλον πρακτική, έχει επίσης ορισμένα πιθανά περιβαλλοντικά μειονεκτήματα. Ένα ζήτημα είναι η ενέργεια και οι πόροι που απαιτούνται για τη μετατροπή των παλαιών υλικών σε νέα προϊόντα. Η ανακύκλωση συχνά περιλαμβάνει σημαντικές ποσότητες ενέργειας και χρήσης νερού, ιδιαίτερα σε διαδικασίες όπως το πλύσιμο, στέγνωμα και η τήξη-εξώθηση. Επιπλέον, η χρήση ορισμένων χημικών ουσιών και επεξεργασιών σε διαδικασίες ανακύκλωσης μπορεί να δημιουργήσει επιβλαβή απόβλητα και εκπομπές. Υπάρχει επίσης ο κίνδυνος ακούσιας εξάπλωσης της μόλυνσης, ιδιαίτερα κατά την ανακύκλωση ηλεκτρονικών απορριμμάτων ή άλλων επικίνδυνων υλικών. Τέλος, το αποτύπωμα άνθρακα από τη μεταφορά και τη συλλογή υλικών για ανακύκλωση μπορεί να είναι σημαντικό, ιδιαίτερα εάν τα υλικά πρέπει να αποσταλούν σε μεγάλες αποστάσεις. Ενώ η ανακύκλωση μπορεί σίγουρα να μειώσει τα απόβλητα και να προωθήσει τη βιωσιμότητα, είναι σημαντικό να σταθμίσουμε τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της και να διασφαλίσουμε ότι γίνεται με υπεύθυνο και προσεκτικό τρόπο. Τέλος, εάν η ανακύκλωση προωθηθεί ως λύση χωρίς να αντιμετωπιστούν οι βαθύτερες αιτίες της δημιουργίας απορριμμάτων, θα μπορούσε να οδηγήσει σε εφησυχασμό και συνεχή κατανάλωση, γεγονός που θα υπονόμευε τελικά τα περιβαλλοντικά οφέλη της ανακύκλωσης. Συνολικά, ενώ η ανακύκλωση μπορεί να είναι σημαντικό μέρος μιας πιο βιώσιμης προσέγγισης για τη διαχείριση των απορριμμάτων, είναι σημαντικό να εξετάζονται προσεκτικά οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις αυτής της διαδικασίας και να λαμβάνονται μέτρα για την ελαχιστοποίηση των αρνητικών επιπτώσεων.

Το maker movement (το κίνημα των σχεδιαστών/δημιουργών)

Το Maker Movement είναι ένα πολιτιστικό και κοινωνικό φαινόμενο που δίνει έμφαση στην κουλτούρα DIY (do-it-yourself), στην πρακτική μάθηση και στη δημιουργικότητα που βασίζεται στην τεχνολογία. Το κίνημα χαρακτηρίζεται από μια αυξανόμενη κοινότητα κατασκευαστών που ενδιαφέρονται να δημιουργήσουν, να εφεύρουν και να ασχοληθούν με όλα τα είδη υλικών και τεχνολογιών.

Το Maker Movement άρχισε να κερδίζει δυναμική στις αρχές της δεκαετίας του 2000, ως απάντηση στην αυξανόμενη διαθεσιμότητα προσιτών και προσβάσιμων εργαλείων, τεχνολογιών και υλικών για την κατασκευή πραγμάτων (όπως οι 3D εκτυπωτές). Το κίνημα καθοδηγείται από ένα ήθος DIY και upcycling, το οποίο δίνει έμφαση στην αυτάρκεια, τη δημιουργικότητα και την καινοτομία.

Το Maker Movement δεν περιορίζεται σε κάποια συγκεκριμένη ηλικιακή ομάδα, φύλο ή επάγγελμα. Περιλαμβάνει καλλιτέχνες, μηχανικούς, επιστήμονες, εκπαιδευτικούς, επιχειρηματίες και όποιον έχει την καλή διάθεση να μάθει έμπρακτα μέσα από την δημιουργία.

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του Maker Movement είναι η έμφαση που δίνει στην πρακτική μάθηση και στον πειραματισμό. Οι makers συχνά εργάζονται με φυσικά υλικά και εργαλεία, χρησιμοποιώντας τα για να δημιουργήσουν και να πρωτοτυπήσουν νέες ιδέες. Το κίνημα δεν περιορίζεται σε κάποιον συγκεκριμένο τομέα ή κλάδο και οι makers μπορούν να εργαστούν σε τομείς τόσο διαφορετικούς όπως τα ηλεκτρονικά, η τρισδιάστατη εκτύπωση, η ρομποτική, τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα, η ξυλουργική και πολλούς άλλους.

Μια άλλη σημαντική πτυχή του Maker Movement είναι η εστίασή του στη συνεργασία και την οικοδόμηση κοινότητας. Οι makers συχνά εργάζονται σε κοινόχρηστους χώρους κατασκευαστών-δημιουργών ή εργαστήρια fab, τα οποία παρέχουν πρόσβαση σε εργαλεία και πόρους που θα ήταν δύσκολο ή αδύνατο να αποκτηθούν μεμονωμένα. Αυτοί οι χώροι διευκολύνουν επίσης τη συνεργασία και την ανταλλαγή γνώσεων μεταξύ των κατασκευαστών, ενισχύοντας την αίσθηση της κοινότητας και της συλλογικής δημιουργικότητας.

Το Maker Movement έχει επίσης θεωρηθεί ως απάντηση στην αυξανόμενη επικράτηση των καταναλωτικών αγαθών μαζικής παραγωγής και μιας χρήσης. Δίνοντας έμφαση στην κουλτούρα DIY και κάνοντας πράγματα στο χέρι, οι makers συχνά αμφισβητούν τα παραδοσιακά μοντέλα κατανάλωσης. Εδώ κολλάει και η ανακύκλωση και πιο συγκεκριμένα το upcycling αφού η κουλτούρα του DIY απο τις απαρχές της χρησιμοποιεί προϊόντα που τέλεσαν τον αρχικό τους σκοπό και αντί να πεταχτούν στα σκουπίδια τα επαναχρησιμοποιεί για την δημιουργία κάτι νέου.

Η ανακύκλωση και το upcycling αποτελούν επίσης σημαντικό μέρος του ήθους του Maker Movement. Πολλοί makers ενδιαφέρονται να επαναχρησιμοποιήσουν και να ξανά επαναχρησιμοποιήσουν υλικά που διαφορετικά θα πετάγονταν, μειώνοντας τα απόβλητα και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Στην πραγματικότητα, ορισμένοι makers ειδικεύονται στη δημιουργία νέων προϊόντων από ανακυκλωμένα υλικά, όπως έπιπλα από ανακυκλωμένο ξύλο ή κοσμήματα από ανακυκλωμένο πλαστικό.

Το Maker Movement βοήθησε επίσης στη διάδοση της ιδέας της κυκλικής οικονομίας, η οποία δίνει έμφαση στη χρήση βιώσιμων υλικών και συστημάτων παραγωγής κλειστού βρόχου. Αυτή η προσέγγιση ενθαρρύνει τους makers να σκεφτούν τον πλήρη κύκλο ζωής των προϊόντων που δημιουργούν, από τις πρώτες ύλες έως την απόρριψη ή την επαναχρησιμοποίηση στο τέλος του κύκλου ζωής τους.

Ένας από τους τρόπους με τους οποίους το Maker Movement υποστήριξε την ανακύκλωση και το upcycling είναι η προώθηση του σχεδιασμού open-source και της ανταλλαγής γνώσεων. Οι makers συχνά μοιράζονται ελεύθερα σχέδια και μαθήματα στο διαδίκτυο, διευκολύνοντας τους άλλους να δημιουργήσουν τα δικά τους έργα και να τροποποιήσουν υπάρχοντα σχέδια. Αυτό οδήγησε στη δημιουργία διαδικτυακών κοινοτήτων αφιερωμένων στην ανακύκλωση και το upcycling, όπου οι makers μπορούν να μοιραστούν συμβουλές και ιδέες για την επαναχρησιμοποίηση υλικών με δημιουργικούς τρόπους.

Συνολικά, η ανακύκλωση και το upcycling αποτελούν σημαντικό μέρος της δέσμευσης του Maker Movement για βιωσιμότητα, αυτάρκεια και δημιουργικότητα. Ενθαρρύνοντας τους makers να βρουν νέες χρήσεις για παλιά υλικά, το κίνημα συμβάλλει στη μείωση των απορριμμάτων και στην προώθηση μιας πιο βιώσιμης προσέγγισης για την κατασκευή και την κατανάλωση.

Στόχοι της διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική εργασία δεν έχει σκοπό να εφεύρει μια καινούργια τεχνολογία μετατροπής πλαστικών μπουκαλιών PET σε νήμα υλικού για 3D εκτύπωση αλλά να γίνει μια διερεύνηση της τρέχουσας διαδικασίας και τεχνολογίας μετατροπής φιαλών PET σε νήμα τρισδιάστατης εκτύπωσης ώστε να γίνει εντοπισμός προβληματικών περιοχών για βελτίωση. Η ήδη υπάρχουσα διαδικασία και το σύστημα μετατροπής που χρησιμοποιείται και κατασκευάζεται από πολλούς makers είναι αρκετά πρόσφατο φαινόμενο και για αυτό έχει μεγάλα περιθώρια βελτίωσης.

Ένας ακόμα στόχος της Διπλωματικής Εργασίας είναι η σχεδίαση ενός συστήματος που θα χρησιμοποιεί την ήδη υπάρχουσα τεχνολογία για την μετατροπή του υλικού αλλά θα χρησιμοποιεί και όλες τις βελτιώσεις που θα παράξει ή απλά θα συγκεντρώσει η ΔΕ.

Οι βελτιώσεις θα έχουν στόχο την διευκόλυνση του χρήστη κάνοντας την διαδικασία όσο το δυνατόν ευκολότερη και αυτοματοποιημένη. Δηλαδή θα του γλιτώνουν πολύτιμο χρόνο και κόπο στην διαδικασία μετατροπής χωρίς να επηρεάζουν την ποιότητα και αξία του παραγόμενου νήματος αλλά αντίθετα να την αυξάνουν.

Τέλος, ο βασικός σκοπός της ΔΕ είναι η βελτίωση των διαδικασιών που παίρνουν μέρος πριν το αυτοματοποιημένο κομμάτι της διαδικασίας μετατροπής, ενώνοντας τις λωρίδες πλαστικού που προκύπτουν από τις φιάλες πριν περάσουν από το σύστημα μετασχηματισμού-μετατροπής. Έτσι το σύστημα δουλεύει περισσότερη ώρα μόνο του και με αποτέλεσμα το προϊόν νήμα που θα παράγεται να έχει μεγαλύτερο μήκος όπως και αυτά του εμπορίου ώστε να μην κάνουν δύσκολη την εκτύπωση ενός μεγάλου αντικειμένου. Επίσης με την ένωση των λωρίδων δεν θα χρειάζεται ο χρήστης να ετοιμάζει το

μηχάνημα για να δουλέψει ξανά και ξανά για κάθε λωρίδα πλαστικού που προέρχεται από ένα μόνο μπουκάλι.

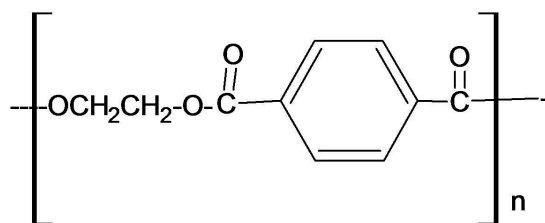
Εύρος και περιορισμοί της Διπλωματικής Εργασίας

Το εύρος της Διπλωματικής Εργασίας καλύπτει τη βελτίωση της διαδικασίας και του συστήματος μετατροπής πλαστικών μπουκαλιών PET σε νήμα υλικού τροφοδοσίας 3Δ εκτυπωτών. Η συγκεκριμένη διαδικασία επιτυγχάνεται με την κατασκευή ενός συστήματος το οποίο αποτελείται κυρίως από κομμάτια hardware και software 3Δ εκτυπωτών έτσι ώστε όποιος ασχολείται με 3Δ εκτυπωτές και του περισσεύουν ανταλλακτικά, καθώς και έχει την γνώση της λειτουργίας των μηχανισμών να μπορεί με σχετική ευκολία να το κατασκευάσει. Βέβαια η διαδικασία αυτή έχει κι άλλα πλεονεκτήματα σε σχέση με διαδικασίες τεμαχισμού πλαστικών προς ανακύκλωση υλικού και την δημιουργία ανακυκλωμένων PET pallets και έπειτα την δημιουργία νήματος με το παραδοσιακό-βιομηχανικό τρόπο παραγωγής. Πλεονεκτήματα όπως το μεγαλύτερο MW λόγω της πολύ μικρότερης επεξεργασίας που δέχεται. Το εύρος και η εστίαση της Διπλωματικής Εργασίας και ειδικότερα των εργαστηριακών πειραμάτων και της σχεδίασης συστήματος θα επικεντρώνεται σε αυτές τις βελτιώσεις που θα έρθουν να φέρουν λύση σε προβληματικά σημεία της όλης διαδικασίας μετασχηματισμού του υλικού που θα ανιχνευτούν από την βιβλιογραφική έρευνα αλλά και από τα εργαστηριακά πειράματα.

Περιορισμοί της Διπλωματικής Εργασίας όσον αφορά την βιβλιογραφική έρευνα είναι ότι θα αποτελείται από την ανασκόπηση επιστημονικών άρθρων αλλά και άλλων πηγών σχετικές μόνο με την ανακύκλωση PET, τις φυσικές και χημικές ιδιότητες του υλικού PET και με την διαδικασία μετατροπής PET μπουκαλιών σε υλικό για 3Δ εκτύπωση. Οι περιορισμοί σχετικά με τα εργαστηριακά πειράματα και για την σχεδίαση προϊόντος θα είναι οι πόροι που θα αποτελούνται κυρίως από εξαρτήματα 3Δ εκτυπωτών και εκτυπωμένα κομμάτια. Οποιαδήποτε άλλα υλικά και εργαλεία θα είναι όσο το δυνατόν πιο οικονομικά αλλά πάντα επαρκή για την επιτέλεση των σκοπών των πειραμάτων. Ουσιαστικά υπάρχει περιορισμός στις συνθήκες εργασίας ενός maker και πρόκειται για ένα εργαστήριο σπιτιού. Εξάλλου το προς σχεδίαση προϊόν που θα παράξει η ΔΕ θα είναι κατά πάσα πιθανότητα ένα σύστημα DIY παράλληλο με την κουλτούρα του makers movement. Τώρα το αν θα είναι open source είναι μια άλλη κουβέντα και εξαρτάται από το μέγεθος την καινοτομίας αλλά και ίσως από το αν μπορούν οι καινοτόμες βελτιώσεις της ΔΕ να εφαρμόζονται και να συγκεντρώνονται σε ένα προϊόν-αντικείμενο-συσκευή ξεχωριστό από το βασικό σύστημα μετατροπής που ήδη κυκλοφορεί στο διαδίκτυο ως open source σχέδιο.

III. Ανασκόπηση της βιβλιογραφίας

Επισκόπηση προηγούμενων μελετών για το υλικό PET και την ανακύκλωση του

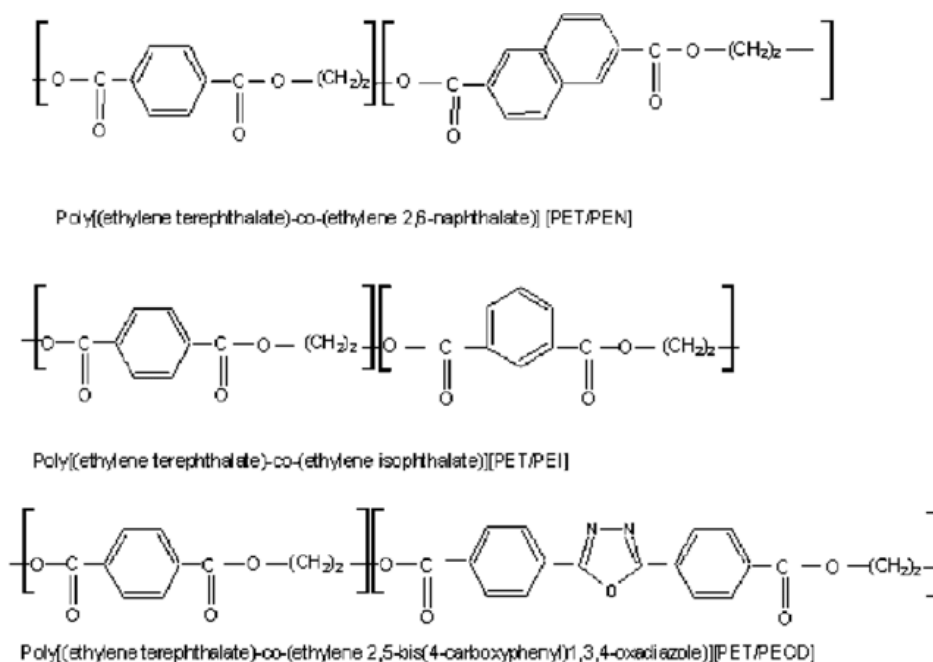


Εικ. 2 - “μονάδα επανάληψης PET” (Venkatachalam et al., 2012)

| Property | Test method | Value (unit) |
|--------------------------------------|--------------|--|
| Molecular weight (of repeating unit) | – | 192 (g mol ⁻¹) |
| Mark–Houwink parameters | – | $k = 3.72 \times 10^{-2}$ (ml g ⁻¹) $a = 0.73$ |
| Weight-average MW | – | 30,000–80,000 (g mol ⁻¹) |
| Density | – | 1.41 (g cm ⁻³) |
| Glass transition temperature | DSC | 69–115 (°C) |
| Melting Temperature | DSC | 265 (°C) |
| Heat of fusion | DSC | 166 (J/g) |
| Breaking strength | Tensile | 50 (MPa) |
| Tensile strength (Young’s modulus) | | 1700 (MPa) |
| Yield strain | Tensile | 4 (%) |
| Impact strength | ASTM D256-86 | 90 (J m ⁻¹) |
| Water absorption (after 24 h) | – | 0.5 (%) |

Πίνακας 1 - “φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά του εμπορικού PET” (Awaja & Pavel, 2005)

Τα τελευταία χρόνια, οι παραγωγοί παρθένου PET τείνουν να παράγουν συμπολυμερή PET (συμπολυμερές είναι το πολυμερές προϊόν που έχει προέλθει από τη χημική σύζευξη δύο ή περισσότερων διαφορετικών μονομερών που ενώνονται μαζί, δηλαδή πολυμερίζονται, ενώ η χημική αυτή διεργασία ονομάζεται συμπολυμερισμός (“Copolymer,” 2024)), όπως PET τροποποιημένο με ισοφθαλικό οξύ, αντί για ομοπολυμερές PET. Λόγω της μειωμένης κρυσταλλικότητας, της βελτιωμένης ολκιμότητας, των ανώτερων δυνατοτήτων επεξεργασίας και της βελτιωμένης διαύγειας, το συμπολυμερές PET χρησιμοποιείται συνήθως για την κατασκευή φιαλών PET. Το Σχ. 2 δείχνει μερικά από τα πιο σημαντικά συμπολυμερή PET.(Awaja & Pavel, 2005; *Copolymer - an Overview* | *ScienceDirect Topics*, n.d.)



Εικ. 3 “Μερικά από τα πιο σημαντικά συμπολυμερή PET”(Awaja & Pavel, 2005)

Το σημείο τήξης (T_m) του εμπορικού PET είναι μεταξύ 255°C και 265°C , ενώ είναι 265°C για πιο κρυσταλλικό PET. Το σημείο υαλώδους μετάπτωσης (T_g) παρθένου PET κυμαίνεται μεταξύ 67°C και 140°C . Είναι κοινώς γνωστό ότι το παρθένο PET κρυσταλλώνεται με σχετικά αργό ρυθμό. Η θερμοκρασία έχει σημαντικό αντίκτυπο στον ρυθμό κρυστάλλωσης του παρθένου PET. Ο υψηλότερος ρυθμός κρυστάλλωσης εμφανίζεται στους 150°C με 190°C . Το άμορφο, διαφανές PET μπορεί να δημιουργηθεί με γρήγορη ψύξη του τήγματος PET σε θερμοκρασία κάτω από το T_g . Το ημι-κρυσταλλικό PET μπορεί να κατασκευαστεί με θέρμανση στερεού άμορφου PET σε θερμοκρασίες που υπερβαίνουν το T_g , όπου μπορεί να επιτευχθεί κρυσταλλικότητα 30%. Άλλες παράμετροι που επηρεάζουν τον ρυθμό κρυστάλλωσης περιλαμβάνουν το μοριακό βάρος (MW), η παρουσία nucleating agents (Οι nucleating agents ή παράγοντες πυρηνοποίησης είναι ανόργανα υλικά που προστίθενται στα πολυμερή για να αυξήσουν την κρυσταλλικότητα και να συντομεύσουν τους χρόνους του κύκλου ψύξης, θέρμανσης. Επιταχύνουν τη μετάβαση από λιωμένο σε στερεό υλικό. Η αλλαγή της κρυσταλλικότητας των πλαστικών αλλάζει ιδιότητες όπως η πυκνότητα, η διαύγεια αλλά και τις μηχανικές του ιδιότητες), τον βαθμό προσανατολισμού της αλυσίδας, τον τύπο του καταλύτη πολυμερισμού που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του PET αρχικά και το θερμικό ιστορικό. (Awaja & Pavel, 2005; *Nucleating Agents - Polymer Additives Selection - SpecialChem*, n.d.)

Το PET χρησιμοποιείται ιστορικά στην κατασκευή υφαντικών ινών από τα μέσα της δεκαετίας του 1940. Ο Nathaniel Wyeth ανέπτυξε το μπουκάλι PET το 1973 και έγινε γρήγορα δημοφιλές. Στη δεκαετία του 1980, χρησιμοποιήθηκε ευρέως για την κατασκευή μπουκαλιών μιας χρήσης αναψυκτικών. Η παραγωγή πολυεστέρων στον κόσμο επεκτάθηκε από 25-30 εκατομμύρια τόνους το 2000 σε 55 εκατομμύρια τόνους το 2012, με το τereφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET) να αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μέρος αυτής της αύξησης. Η αυξανόμενη ζήτηση για κλωστοϋφαντουργικές χρήσεις, καθώς και στις βιομηχανίες συσκευασίας τροφίμων και φιαλών για την αντικατάσταση του γυαλιού, έχει οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της χρήσης πολυεστέρα σε ίνες και ρητίνες χύτευσης. Η παγκόσμια βιομηχανία PET κυριαρχείται

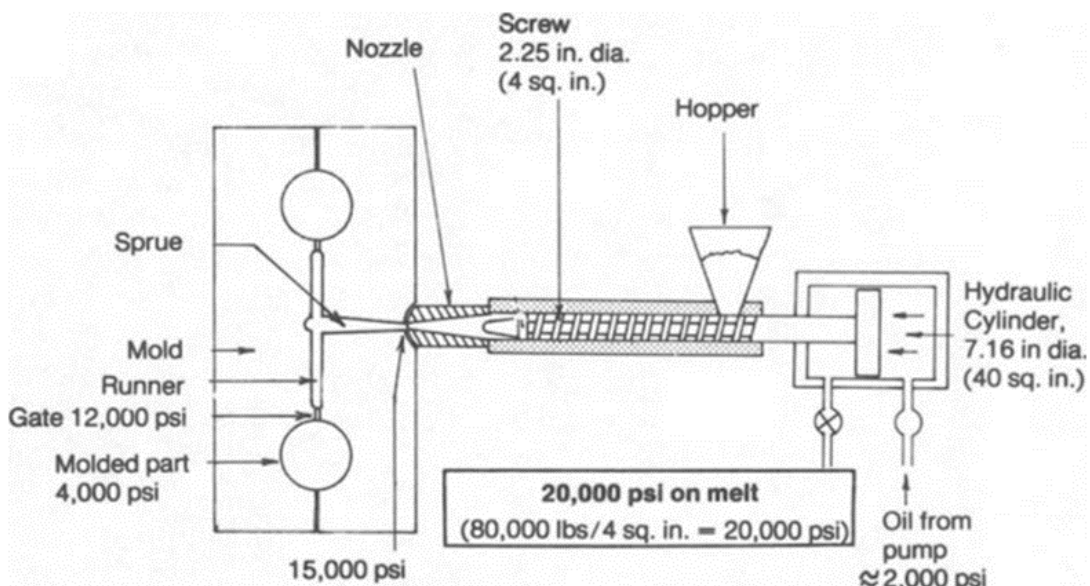
επί του παρόντος από δύο ποιότητες PET: PET ποιότητας φιάλης και PET ποιότητας ινών. Οι κύριες διαφορές μεταξύ αυτών των τυπικών κατηγοριών είναι τα μοριακά τους βάρη ή τα εγγενή ιξώδη (IV intrinsic viscosity), καθώς και η οπτική εμφάνιση και οι μέθοδοι παραγωγής τους. Το ένα διαφέρει από το άλλο όσον αφορά την ποσότητα και το είδος των συνμονομερών, των σταθεροποιητών, των μεταλλικών καταλυτών και των χρωστικών. Το PET που είναι κατάλληλο για χρήση σε υφαντικές ίνες έχει εύρος μοριακού βάρους 15.000–20.000 g/mol, που μεταφράζεται σε εγγενές ιξώδες 0,55–0,67 dL/g. Οι ποιότητες ινών PET υψηλού μοριακού βάρους για εξειδικευμένα νήματα όπως το κορδόνι βιομηχανικού ελαστικού μπορεί να έχουν εγγενές ιξώδες που υπερβαίνει τα 0,95 dL/g. Το PET ποιότητας φιάλης είναι διαυγές σαν το γυαλί όταν είναι άμορφο και με μοριακό βάρος από 24.000 έως 36.000 g/mol κατά μέσο όρο αντιστοιχεί σε ένα εγγενές ιξώδες 0,75 έως 1,00 dL/g. Το εγγενές ιξώδες της κοινής ποιότητας φιάλης είναι 0,80 dL/g. Εκτός από την παραγωγή ταινιών συσκευασίας, κασετών βίντεο και ήχου, παράγονται και άλλοι τύποι PET. Αυτά τα είδη PET έχουν συχνά εγγενή ιξώδη 0,64 dL/g που είναι τυπική ποιότητα. Το PET χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορα προϊόντα ηλεκτρονικά εξαρτήματα, αυτοκίνητα, είδη οικιακής χρήσης, φωτιστικά, ηλεκτρικά εργαλεία, αθλητικά είδη, για την παραγωγή φιλμ τα οποία χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως η φωτογραφία, τα φύλλα ακτίνων X, ταινίες εγγραφής και ηλεκτρικές μονωτικές ταινίες καθώς το PET είναι γνωστό για τις καλές του ιδιότητες ηλεκτρικής μόνωσης. Οι κόκκοι PET μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία για παρασκευή προϊόντων μέσω εξώθησης, χύτευσης με έγχυση και χύτευσης με εμφύσηση, ανάλογα με την επιθυμητή εφαρμογή και τις απαιτήσεις του τελικού προϊόντος. (Al-Sabagh et al., 2016; Awaja & Pavel, 2005)

| Application | $[\eta]$ (dl g ⁻¹) |
|--------------------------|--------------------------------|
| Recording tape | 0.60 |
| Fibres | 0.65 |
| Carbonated drink bottles | 0.73–0.8 |
| Industrial tyre cord | 0.85 |

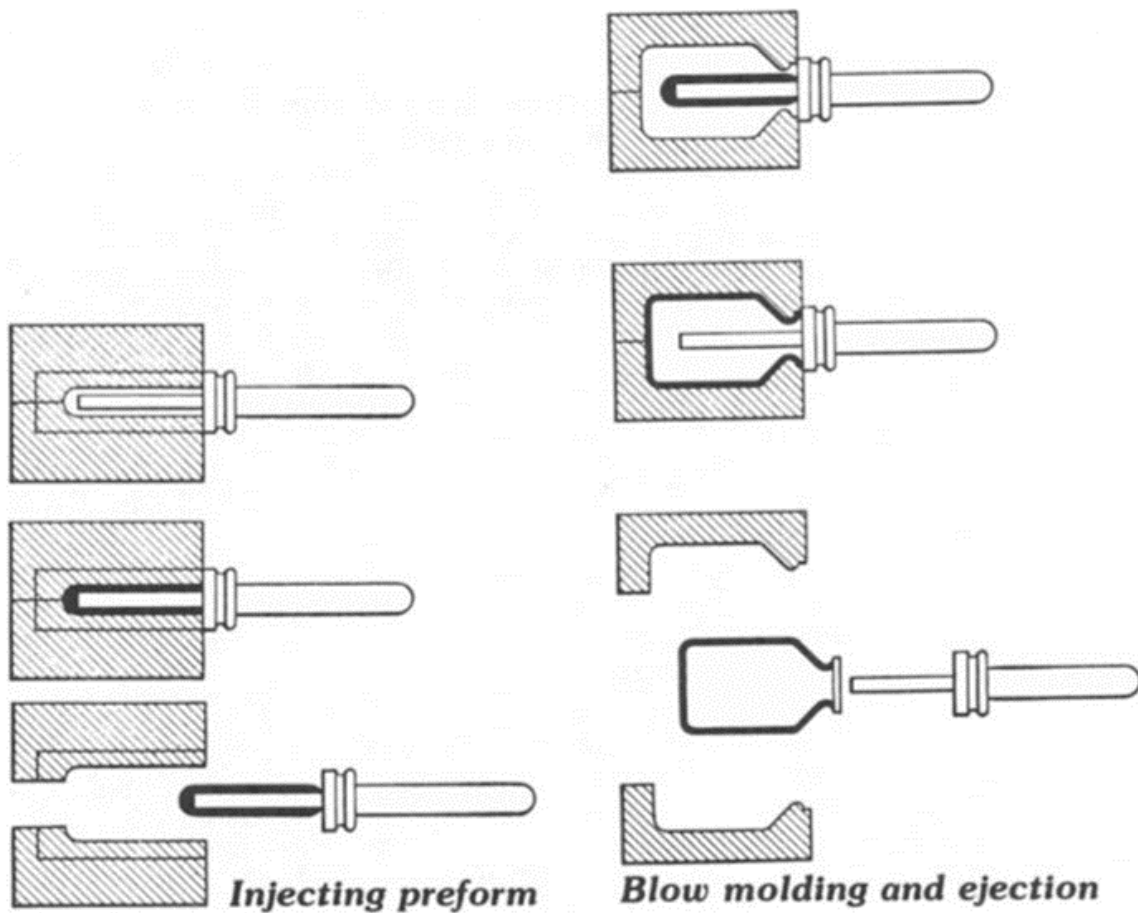
Πίνακας 2. “Παραδείγματα διαφορετικού εγγενούς ιξώδους για διαφορετικές εφαρμογές”(Awaja & Pavel, 2005)

Η αρχαιότερη και πιο βασική μέθοδος επεξεργασίας PET είναι η εξώθηση. Οι διαδικασίες εξώθησης (Extrusion) που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή αφρού και η εξώθηση για χύτευση είναι οι πιο δημοφιλείς. Η χύτευση με εξώθηση (Extrusion moulding) είναι ουσιαστικά μια διαδικασία όπου το λιωμένο PET εξωθείται μέσα από ένα καλούπι συνεχόμενα μέχρι που στερεοποιείται στο σχήμα του καλουπιού και στη συνέχεια κόβεται κάθετα της πορείας εξώθησης του σε κομμάτια. Μεγάλα-μακριά αντικείμενα παράγονται συνήθως χρησιμοποιώντας καλούπια εξώθησης PET. Επιπλέον, το PET εξωθείται εύκολα για τη δημιουργία μεμβρανών, φύλλων, σωλήνων και μονομήματος όπως είναι οι υφαντικές ίνες ή και το νήμα 3Δ εκτύπωσης. Ακόμα είναι εφικτό να παραχθεί αφρώδες PET με μεθόδους εξώθησης, με την δημιουργία PET υψηλής διακλάδωσης, υψηλού MW, εφαρμόζονται πολυλειτουργικοί τροποποιητές στο PET. Αυτό επιτρέπει στους παραγωγούς να κάνουν αφρό PET χρησιμοποιώντας μια τεχνική εξώθησης. Οι σχεδιαστές γενικά προτιμούν την τεχνική χύτευσης με έγχυση (IM injection moulding) επειδή επιτρέπει τον ακριβέστερο έλεγχο και την πρόβλεψη της παραγωγής εξαρτημάτων με περίπλοκα σχήματα και τρισδιάστατες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με άλλες διαδικασίες παραγωγής. Το Σχ.3 βοηθάει στην μερική του κατανόηση αλλά υπάρχουν και πολλά βίντεο στο youtube για αυτήν την μέθοδο επεξεργασίας αλλά και για της άλλες που περιγράφουν την διαδικασία κατανοητά και εξονυχιστικά. Όμως όταν χυτεύεται με έγχυση, το καθαρό PET δεν είναι πολύ χρήσιμο. Λόγω της περιορισμένης κρυστάλλωσης που μπορεί να συμβεί κατά τη διάρκεια της ψύξης μετά τη χύτευση με έγχυση και

προκαλείται από το υψηλό Tg του PET, το PET με έγχυση έχει κακές φυσικές ιδιότητες. Πολλοί ερευνητές και επιχειρήσεις έχουν βελτιώσει την κατάσταση χρησιμοποιώντας χημικές ουσίες που πυρηνώνουν ή/και αυξάνοντας τη θερμοκρασία του καλούπι έως και 140 C για να ενθαρρύνουν την κρυστάλλωση. Τέλος, το PET έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε εφαρμογές χύτευσης με εμφύσηση (blow moulding) φιαλών. Το PET εγχέεται πρώτα σε ένα ψυχρό καλούπι για να δημιουργηθεί ένα άμορφο πρόπλασμα πριν χυτευθεί με εμφύσηση. Το πρόπλασμα μεταφέρεται απευθείας ενώ χρησιμοποιείται χύτευση με εμφύσηση σε ένα μηχάνημα που φυσάει αέρα, τεντώνοντας και διαμορφώνοντας το πρόπλασμα σε μπουκάλι. Δηλαδή αναλυτικότερα το πρόπλασμα θερμαίνεται ξανά κατά τη διάρκεια της χύτευσης με εμφύσηση σε θερμοκρασία περίπου 10 C πάνω από το Tg προτού εμφυσηθεί σε καλούπι φιάλης χρησιμοποιώντας ξεχωριστό εξοπλισμό εμφύσησης αέρα (Σχ.4). Έχει διαπιστωθεί ότι ένα διαυγές πρόπλασμα είναι σημάδι μιας επιτυχημένης διαδικασίας χύτευσης με έγχυση. (Awaja & Pavel, 2005; Rosato, 2012)



Εικ. 4 - “ Παράδειγμα φόρτισης πίεσης σε τήγμα πλαστικού κατά τη χύτευση με έγχυση”(Rosato, 2012)



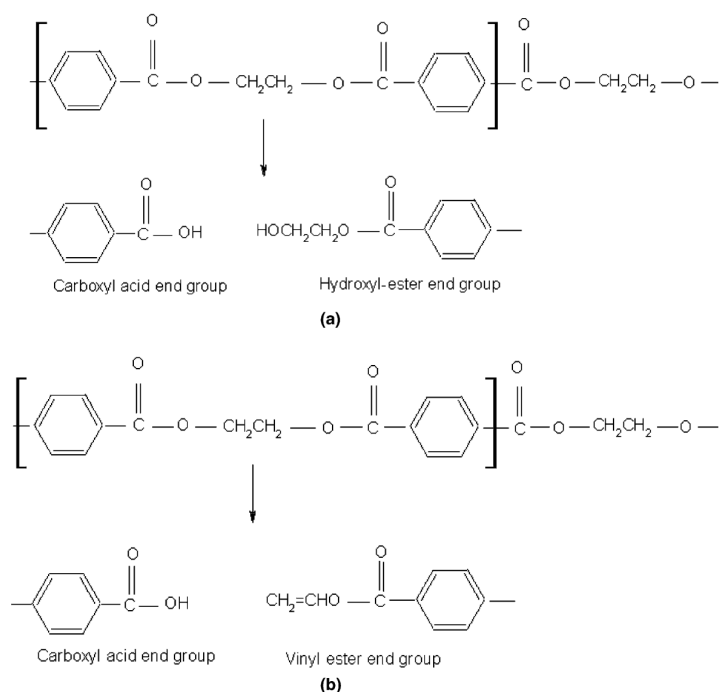
Εικ. 5 “Βασική διαδικασία χύτευσης με εμφύσηση” (Rosato, 2012)

Ανακύκλωση PET

Η περιβαλλοντική ζήτηση για βελτίωση της διαχείρισης απορριμμάτων οδήγησε στην έναρξη του τομέα ανακύκλωσης POSTC-PET (post consumer PET). Το γεγονός ότι τα προϊόντα PET αποσυντίθενται φυσικά με πολύ αργούς ρυθμούς είναι ένας άλλος παράγοντας που ωθεί την επιχείρηση ανακύκλωσης PET. Σε κανονικές συνθήκες, αυτό το πλαστικό δεν είναι βιοδιασπώμενο αφού δεν υπάρχει κανένας οργανισμός που να μπορεί να καταβροχθίσει τα σχετικά μεγάλα μόριά του. Παρόλα αυτά το *Ideonella sakaiensis*, ένα βακτηριακό είδος, έχει βρεθεί ότι υποβαθμίζει το PET. Τα υδρολυτικά ένζυμα για το PET (PHEs) ανακαλύφθηκαν πρόσφατα. Με αυτόν τον τρόπο, η βιοαποκατάσταση θα μπορούσε να προσφέρει μια εναλλακτική λύση στην ανακύκλωση πλαστικών απορριμμάτων. Έχει προσδιοριστεί πώς το PET και η υδρολάση του μονο(2-υδροξυαιθυλίου) και του τερεφθαλικού οξέος (MHET) από το *I. sakaiensis* αποικοδομούν το PET σε αβλαβή μονομερή. Σε σύγκριση με τη μικροβιακή κοινοπραξία, τόσο το αρχικό στέλεχος όσο και τα ανασυνδυασμένα στελέχη μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ταχύτερη αποικοδόμηση του PET. Ωστόσο, λόγω της χαμηλής καταλυτικής δραστηριότητας αυτών των ενζύμων, η εμπορική βιοαποικοδόμηση σίγουρα απαιτεί περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη. Το PET πρέπει να

υποβληθεί σε δύσκολες, δαπανηρές διεργασίες προκειμένου να διασπαστεί βιολογικά. Η καλύτερη μέθοδος για την οικονομική μείωση των απορριμμάτων PET είναι μέσω μεθόδων ανακύκλωσης. Από την άλλη πλευρά, νέες και λιγότερο δαπανηρές μέθοδοι ανακύκλωσης PET δίνουν ένα πλεονέκτημα στις επιχειρήσεις ανακύκλωσης PET εφοδιάζοντας τις βιομηχανίες με συγκριτικά φθηνότερο PET ενώ η τιμή του παρθένου PET παραμένει σταθερή. Το 1977, το πρώτο πρόγραμμα ανακύκλωσης φιαλών POSTC-PET ξεκίνησε για πρώτη φορά. (Al-Sabagh et al., 2016; Awaja & Pavel, 2005; Taniguchi et al., 2019)

Οι νιφάδες POSTC-PET ανακυκλώνονται χρησιμοποιώντας δύο κύριες τεχνικές. Η χημική και η μηχανική ανακύκλωση είναι αυτές οι διαδικασίες. Με πλήρη αποπολυμερισμό σε μονομερή ή μερικό αποπολυμερισμό σε oligομερή, το POSTC-PET μπορεί να ανακυκλωθεί χημικά (χημειούλεται). Το νερό (υδρόλυση), η μεθανόλη (μεθανόλυση) και το EG (γλυκόλυση) είναι οι χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται για τον αποπολυμερισμό του PET. Στο Σχ. 5, οι δομές των ενώσεων που δημιουργήθηκαν όταν το PET αποπολυμερίστηκε φαίνονται δίπλα στη δομή PET. Έπειτα τα συστατικά αυτά απομονώνονται και υποβάλλονται σε επανεπεξεργασία για χρήση στην βιομηχανία ως μονομερή και oligομερή. Το κύριο μειονέκτημα της χημειόλυσης PET είναι ότι έχει μεγάλο κόστος πραγματοποίησης. Από την άλλη πλευρά, για να ανακυκλωθεί μηχανικά το POSTC-PET, αρχικά απομακρύνονται οι ρύποι με τη διαλογή, τον τεμαχισμό και το πλύσιμο. Στην συνέχεια ακολουθεί το στέγνωμα και η επεξεργασία τήξης. (Awaja & Pavel, 2005)



Εικ. 6 - “Αντιδράσεις αποικοδόμησης του PET: (α) αντίδραση υδρόλυσης του PET και (β) αντίδραση θερμικής αποδόμησης” (Awaja & Pavel, 2005)

Πολυάριθμες μελέτες υποστηρίζουν ότι πρέπει να πληρούνται συγκεκριμένες ελάχιστες προϋποθέσεις για της νιφάδες PET προκειμένου να ανακυκλωθούν μηχανικά επιτυχώς. Ο Πίνακας 3 παρέχει παραδείγματα των ελάχιστων προδιαγραφών για τις νιφάδες POSTC-PET. Η ποσότητα και το είδος των ρύπων που

περιέχονται στις νιφάδες POSTC-PET είναι οι κύριοι καθοριστικοί παράγοντες της καταλληλότητάς τους για ανακύκλωση. Ο κύριος παράγοντας που συμβάλλει στην αποικοδόμηση των φυσικών και χημικών χαρακτηριστικών του POSTC-PET κατά την επανεπεξεργασία είναι οι ρύποι. Καλύτερη ποιότητα R-PET επιτυγχάνεται με τη μείωση της ποσότητας αυτών των ακαθαρσιών. Πολυάριθμοι ρύποι, συμπεριλαμβανομένης της ακεταλδεΐδης, του νερού, των χρωστικών και των ακαθαρσιών που παράγουν οξύ, υπάρχουν στο POSTC-PET. Το οξικό οξύ ή και καρβοξυλικό οξύ, το οποίο σχηματίζεται όταν αποικοδομούνται τα πάματα πολυ(οξικού βινυλεστέρα), το αβιετικό οξύ, το οξύ κολοφωνίου και το υδροχλωρικό οξύ, που παράγονται από κόλλες και το PVC είναι τα πιο επιζήμια οξέα για τη διαδικασία ανακύκλωσης POSTC-PET. Κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας τήξης PET προς ανακύκλωση, τα οξέα λειτουργούν ως καταλύτες για την διάσπαση της αλυσίδας. Σύμφωνα με τους Paci και La-Mantia, η καταλυτική επίδραση του υδροχλωρίου που αναπτύσσεται κατά τη διάσπαση του PVC ακόμη και στις χαμηλές συγκεντρώσεις των 100 ppm προάγει την κοπή της αλυσίδας PET (Paci & La Mantia, 1999). Ακόμα, μέσω μιας διαδικασίας υδρόλυσης, το νερό μειώνει το μοριακό βάρος (MW) κατά την ανακύκλωση. Για να αποφευχθεί η πτώση του MW, η μόλυνση από υγρασία πρέπει να είναι κάτω από 0,02%. Η διαδικασία πλύσης με νιφάδες παράγει το μεγαλύτερο μέρος της περιεκτικότητας σε νερό, ωστόσο το αποτελεσματικό στέγνωμα μπορεί να το μειώσει σημαντικά. Ενδιαφέρον έχει ότι το PET και το POSTC-PET περιέχουν ακεταλδεΐδη. Είναι ένα υποπροϊόν των διεργασιών φυσικής υποβάθμισης του PET. Στις πρώτες φάσεις του σχεδιασμού της διαδικασίας ανακύκλωσης, η μετανάστευση της ακεταλδεΐδης στα τρόφιμα από τα δοχεία PET ήταν ένα σημαντικό πρόβλημα. Λόγω της υψηλής πτητικότητας της ακεταλδεΐδης, μπορεί να μειωθεί με επεξεργασία υπό κενό ή ξήρανση. Για να μειωθεί η ποσότητα της παραγόμενης ακεταλδεΐδης, σταθεροποιητές που περιλαμβάνουν το 4-αμινοβενζοϊκό οξύ, τη διφαινυλαμίνη και το 4,5-διυδροξυβενζοϊκό οξύ προστίθενται στο PET. Λιγότερο σημαντικό αλλά αξιοσημείωτος είναι ότι παράγονται ανεπιθύμητα χρώματα κατά την ανακύκλωση λόγω χρωματιστών θραυσμάτων φιαλών και ετικέτες τυπωμένης μελάνης. Η ενίσχυση των διαδικασιών διαλογής και πλύσης φιαλών προς ανακύκλωση μπορεί να βοηθήσει στην εξάλειψη των χρωστικών ρύπων. Κατα τα άλλα οι χρωστικές ουσίες δεν επηρεάζουν τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά του ανακυκλωμένου PET. Τέλος, είναι πολύ επικίνδυνο για την δημόσια υγεία εάν μείνουν υπολείμματα από ουσίες όπως βενζίνη, απορρυπαντικά, εντομοκτόνα κλπ στο ανακυκλωμένο PET. Οι προαναφερόμενες θα προέρχονταν από λανθασμένη χρήση μπουκαλιών για την αποθήκευση τέτοιων υγρών. Βέβαια η αύξηση της ευαισθητοποίησης των ανθρώπων για τον κίνδυνο αποθήκευσης τέτοιων ουσιών που επηρεάζουν τη δημόσια υγεία έχει ελαχιστοποιήσει σημαντικά την ποσότητα αυτών των ρύπων. (Al-Sabagh et al., 2016; Awaja & Pavel, 2005)

Minimum requirements for POSTC-PET flakes to be re-processed

| Property | Value |
|--------------------|-------------------------------------|
| $[\eta]$ | $>0.7 \text{ dl g}^{-1}$ |
| T_m | $>240 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| Water content | $<0.02 \text{ wt.}\%$ |
| Flake size | $0.4 \text{ mm} < D < 8 \text{ mm}$ |
| Dye content | $<10 \text{ ppm}$ |
| Yellowing index | <20 |
| Metal content | $<3 \text{ ppm}$ |
| PVC content | $<50 \text{ ppm}$ |
| Polyolefin content | $<10 \text{ ppm}$ |

Πίνακας 3 - “Ελάχιστες απαιτήσεις για νιφάδες POSTC-PET προς επανεπεξεργασία”(Awaja & Pavel, 2005)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, σημαντική υποβάθμιση του POSTC-PET κατά την επεξεργασία προκαλείται από υψηλά επίπεδα μόλυνσης από άλλα συστατικά. Έτσι ένα από τα πιο σημαντικά βήματα στη μηχανική ανακύκλωση του PET είναι ο καθαρισμός του POSTC-PET από ακαθαρσίες. Τα μπουκάλια POSTC-PET περνάνε από διαδικασία διαλογής, θρυμματίζονται και καθαρίζονται ως μέρος μιας σειράς διαδικασιών αφαίρεσης των ρύπων. Τα μπουκάλια PET διαχωρίζονται ουσιαστικά από PVC, πολυαιθυλένιο και άλλα πλαστικά κατά τη διαδικασία διαλογής. Πριν από τον θρυμματισμό, το PVC μπορεί να αφαιρεθεί χειρωνακτικά από τις φιάλες PET. Ωστόσο, αυτό γενικά δεν αφαιρεί περισσότερο από το 90% του συνολικού PVC. Αν και δεν υπάρχουν αναφορές για πλήρη διαχωρισμό του PVC, είναι δυνατός ο διαχωρισμός του PVC από τα αναμειγμένα σκουπίδια μπουκαλιών PVC και PET με αποτελεσματικό τρόπο, εφαρμόζοντας τεχνικές που βασίζονται στις διαφορές μεταξύ των φυσικών ή χημικών χαρακτηριστικών των δύο πολυμερών. Μια τεχνική αυτοματοποιημένου διαχωρισμού που βασίζεται στην ανίχνευση ατόμων χλωρίου που βοηθούν στην αναγνώριση του PVC περιγράφηκε από τον Gottesman(Gottesman, 1992). Ο Famechon ισχυρίζεται ότι η διαδικασία πολλαπλών σταδίων θρυμματισμού γνωστή ως διαδικασία μικρονυλίου εξάλειψε το 97,5% του PVC(Famechon, 1992). Το κόστος του χειροκίνητου διαχωρισμού PVC αυξάνεται, γεγονός που υποδηλώνει ότι αυτές οι αυτοματοποιημένες διαδικασίες διαχωρισμού θα ήταν πιο πρακτικές για χρήση στις επιχειρήσεις ανακύκλωσης. Έτσι οι τεχνολογίες διαχωρισμού ανταγωνίζονται η μία την άλλη. Το POSTC-PET περνάει από διαλογή και στη συνέχεια θρυμματίζεται σε νιφάδες, ώστε να μπορεί να πλυθεί, στεγνωθεί και γενικότερα επεξεργαστεί εύκολα. Το πλύσιμο των νιφάδων POSTC-PET μπορεί να γίνει με μία από τις δύο μεθόδους. Η πρώτη είναι το υδατικό πλύσιμο η οποία είναι μια διαδικασία δύο σταδίων που ξεκινά με ένα ζεστό πλύσιμο χρησιμοποιώντας 2% NaOH και απορρυπαντικό στους 80 C και τελειώνει με ένα δροσερό πλύσιμο με απλό νερό.

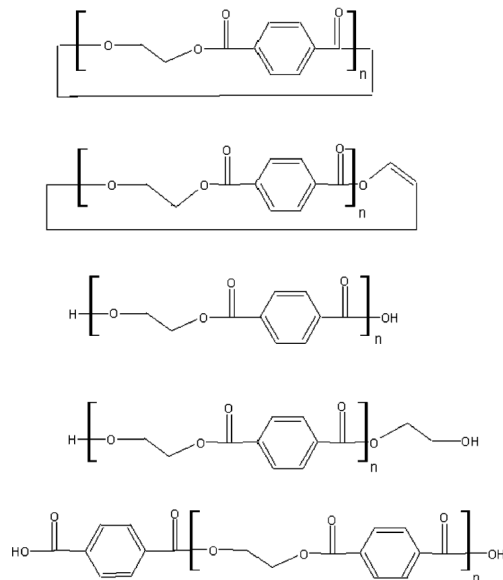
Η δεύτερη γίνεται χρησιμοποιώντας το τετραχλωροαιθυλένιο (TCE) που έχει αποδειχθεί ότι είναι αποτελεσματικός διαλύτης για τον καθαρισμό των νιφάδων PET.(Al-Sabagh et al., 2016; Awaja & Pavel, 2005)

Η ξήρανση των κομματιών μετά την πλύση θεωρείται ότι είναι ένα κρίσιμο στάδιο στην ανακύκλωση του POSTC-PET διατηρώντας το επίπεδο υγρασίας των νιφάδων POSTC-PET στο ελάχιστο. Έτσι επιτυγχάνεται μειωμένη υδρολυτική αποικοδόμηση άρα η αποφυγή μείωσης του MW και αυξημένη

αντοχή τήξης του R-PET (“Η αντοχή τήξης ενός πολυμερούς είναι ένα μέτρο της αντίστασης του στην εντατική παραμόρφωση και σχετίζεται με τις εμπλοκές της μοριακής αλυσίδας του πολυμερούς και την αντίστασή του στο ξεμπέρδεμα υπό τάση”(Hernández-Alamilla & Valadez-Gonzalez, 2016) . Η πλειοψηφία των παραγωγών POSTC-PET χρησιμοποιεί διαδικασίες ξήρανσης που διαρκούν μεταξύ 3 και 7 ωρών και πραγματοποιούνται σε θερμοκρασίες 140 C έως 170 C. Δεν επιτρέπεται να υπάρχουν περισσότερα από 50 ppm νερού σε νιφάδες PET, και αυτό συχνά επιτυγχάνεται με τη χρήση αφυδατωμένων ξηραντηρίων που λειτουργούν στους 170 C για 6 ώρες πριν από την τροφοδοσία των τριμμάτων-νιφάδων στον εξωθητή. Μία από τις θερμοκρασίες άνω του Tg που το PET μπορεί να αναπτύξει τον μέγιστο ρυθμό κρυσταλλοποίησης. (Al-Sabagh et al., 2016; Awaja & Pavel, 2005)

Μέσω ενός τυπικού συστήματος εξώθησης, οι νιφάδες POSTC-PET μπορούν να μετατραπούν σε χρήσιμους κόκκους R-PET. Λόγω της βελτιωμένης απόδοσης ανάμειξης σε σύγκριση με έναν εξωθητήρα μονού κοχλία, ο εξωθητής διπλού κοχλία είναι μια χρήσιμη συσκευή για εφαρμογές ανάμειξης και εξώθησης πολυμερών και όχι μόνο. Οι κόκκοι που παράγονται, ωστόσο, έχουν χαμηλό MW λόγω των ακαθαρσιών που υπάρχουν στις νιφάδες POSTC-PET που υποδεικνύονται παραπάνω. Αυτό συμβαίνει λόγω των διαδικασιών αποδόμησης, οι νιφάδες PET που εξωθούνται στους 280 C δηλαδή 20 C άνω του Tm παρουσία των προαναφερθέντων ρύπων έχουν χαμηλότερο μοριακό βάρος. Το θεμελιώδες πλεονέκτημα της μηχανικής ανακύκλωσης του POSTC-PET είναι ότι η διαδικασία είναι φθηνή, εύκολη στην εκτέλεση και οικολογικά αβλαβής. Το κιτρίνισμα του πολυμερούς αποτελεί σημαντικό εμπόδιο για την ανακύκλωση POSTC-PET. Οι διαδικασίες διασταύρωσης και οξειδωσης μέσα στα μόρια είναι αυτές που δίνουν το χρώμα. Το κιτρίνισμα είναι ένα σοβαρό ζήτημα για το R-PET στην κατασκευή φιαλών. Το βασικό μειονέκτημα της μηχανικής ανακύκλωσης είναι η μείωση του MW κατά την επεξεργασία, που μερικές φορές αναφέρεται και ως μείωση το εγγενούς ιξώδους [η]. (Al-Sabagh et al., 2016; Awaja & Pavel, 2005)

Τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες, έχει σημειωθεί σημαντική αύξηση της ευαισθητοποίησης σχετικά με αυτό το ζήτημα μεταξύ των κατασκευαστών και των ακαδημαϊκών, οι οποίοι εργάζονται για να ανακαλύψουν λύσεις για να διατηρήσουν σταθερά τα [η] κατά την επεξεργασία του POSTC-PET. Ακόμα, οι βραχύτερες αλυσίδες PET με ακραίες ομάδες οξέος και βινυλεστέρα είναι μια άλλη συνέπεια, λόγω της θερμικής θραύσης του συνδέσμου εστέρα PET. Το Σχήμα 5 απεικονίζει τη θερμική διάσπαση και η υδρόλυση του POSTC-PET. Κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας του PET πάνω από το σημείο τήξης του, δημιουργούνται ολιγομερή και πτητικές χημικές ουσίες, γεγονός που μειώνει το MW. Σύμφωνα με τον Scheirs, τα γεγονότα θερμικής αποδόμησης προκαλούν το σχηματισμό κυκλικών και γραμμικών ολιγομερών μορίων κατά την επανεπεξεργασία του PET. Επέδειξε επίσης πώς η ποσότητα των ολιγομερών αυξήθηκε από 0,9 τοις εκατό κατά βάρος στο παρθένο PET σε 1,8-3,0 wt.% στο R-PET. Το Σχήμα 6 παρέχει παραδείγματα των πιο σημαντικών κυκλικών και γραμμικών ολιγομερών μορίων που βρίσκονται στο R-PET. Απο τα σχήματα 5 και 6 καταλαβαίνουμε ότι η πλειονότητα των προϊόντων διάσπασης του PET έχει χαμηλό MW, το οποίο μειώνει το [η]. Επιπλέον, αυτές οι ενώσεις λειτουργούν ως καταλύτης για να επιταχύνουν τις αντιδράσεις αποδόμησης. Επιπρόσθετα, επειδή ορισμένα από τα προϊόντα διάσπασης περιλαμβάνουν καρβοξυλικές απολήξεις, αυτό αυξάνει τη συνολική ποσότητα καρβοξυλίου στο PET, γεγονός που μειώνει τη θερμική σταθερότητα του PET. Πολλές έρευνες έχουν θέσει ως στόχο να ξεπεράσουν τη μείωση του MW ή [η] των R-PETs . Στην συνέχεια θα περιγραφεί μια λίστα τεχνικών και διαδικασιών που έχουν τεκμηριωθεί τα τελευταία 40 χρόνια για την ανάκτηση ή τη διατήρηση MW ή [η] κατά την επεξεργασία.(Al-Sabagh et al., 2016; Awaja & Pavel, 2005)



Εικ. 7 - “Κυκλικές και γραμμικές oligομερείς ενώσεις που υπάρχουν σε R-PET κατά την επεξεργασία τήξης των νιφάδων POSTC-PET”(Awaja & Pavel, 2005)

Τα νεότερα μηχανήματα ανακύκλωσης PET διαθέτουν και συστήματα αναρρόφησης. Οι υδρατμοί και οποιαδήποτε άλλα πτητικά χημικά που υπάρχουν ή δημιουργούνται κατά την επεξεργασία εξαλείφονται συνεχώς. Η εξάλειψη των πτητικών χημικών ουσιών κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας θεωρείται πλέον απαραίτητη, καθώς τα πτητικά συστατικά επιταχύνουν περαιτέρω τα γεγονότα αποδόμησης. Η Erema χρησιμοποιεί τώρα επεξεργασία απαέρωσης υπό κενό και ενδεδειγμένη ξήρανση για την εξάλειψη της υγρασίας στα συστήματα ανακύκλωσης πλαστικών για να μειώσει τον αντίκτυπο των διαδικασιών αποδόμησης, με αποτέλεσμα μεγαλύτερο R-PET [η] από ό,τι θα επέφερε η εξώθηση διαφορετικά.(Awaja & Pavel, 2005)

Ο κύριος σκοπός των σταθεροποιητών επεξεργασίας PET είναι να μειώσουν τον αντίκτυπο της μόλυνσης από PVC. Βοηθούν επίσης στη θερμική σταθερότητα. Οι σταθεροποιητές με βάση το μέταλλο, όπως το μερκαπτιδίο βουτυλικού κασσίτερου, το μερκαπτιδίο αντιμονίου και ο φθαλικός μόλυβδος, αποτελούν την πλειοψηφία των σταθεροποιητών διεργασίας PET. Το PET σταθεροποιείται με την προσθήκη οργανικού φωσφορικού κατά την επανεπεξεργασία μετατρέποντας ομάδες υδροϋπεροξειδίου σε μη radical products. Σύμφωνα με τον Scheirs, η διφωσφορώδης δις(2,4,δι-τριβουτυλφαινυλ) πενταερυθριτόλη μπορεί να καταστείλει τις διαδικασίες κιτρίνισης, να ελαχιστοποιήσει την παραγωγή ακεταλδεΰδης και να αποτρέψει την απώλεια MW. Η χρήση σταθεροποιητών έχει μειονεκτήματα, το μεγαλύτερο είναι η σημαντική αύξηση του κόστους ανακύκλωσης PET.(Awaja & Pavel, 2005)

Στον πολυμερισμό στερεάς κατάστασης SSP (solid state polymerisation), το POSTC-PET θερμαίνεται σε θερμοκρασία πάνω από το T_g του αλλά κάτω από το T_m του, δηλαδή χαμηλότερη και από τη θερμοκρασία επεξεργασίας τήγματος που είναι 280 C. Το εύρος που λαμβάνουν χώρα οι διεργασίες συμπίκνωσης, είναι θερμοκρασίας από 200 C έως 240 C. Οι αντιδράσεις στην αποικοδόμησης έχουν

ελάχιστη επίπτωση στο R-PET σε αυτές τις θερμοκρασίες, όμως το MW αυξάνεται ως αποτέλεσμα αυτής της επεξεργασίας. Τα υποπροϊόντα SSP εξαλείφονται συνεχώς είτε χρησιμοποιώντας κενό είτε ρεύμα αδρανούς αερίου. Προκειμένου να ενισχυθεί το MW του POSTC-PET, ο Καραγιαννίδης και άλλοι αξιολόγησαν την εφαρμογή του SSP. Εξέτασαν πώς ο χρόνος απόκρισης και η θερμοκρασία επηρεάζουν το $[\eta]$ του τελικού PET. Ισχυρίστηκαν ότι μετά από σταθερή κατάσταση στους 230 C για 8 ώρες, σχηματίζεται τροποποιημένο PET με ενισχυμένο αριθμό μέσου μοριακού βάρους Mn (Number average molecular weight). Το SSP, ωστόσο, θεωρείται πολύ αργό και δαπανηρό για χρήση σε βιομηχανική βάση. (Awaja & Pavel, 2005)

Στη διαδικασία επέκτασης της αλυσίδας του PET ή και του POSTC-PET, οι σπασμένες αλυσίδες που προκαλούνται από το σπάσιμο των αλυσίδων PET κατά την επεξεργασία τήγματος ενώνονται ξανά με αντίδραση ενός δι- ή πολυ-λειτουργικού υλικού χαμηλού MW με ακραίες ομάδες καρβοξυλίου και/ή υδροξυλίου PET. Οι Inata και Matsumura εισήγαγαν τον μηχανισμό της αντίδρασης επέκτασης της αλυσίδας PET. Προτείνουν τρεις πιθανές αλληλεπιδράσεις μεταξύ ενός επεκτατικού αλυσίδας 2,2'-δισ(2-οξαζολίνης) και του PET. Η πρώτη είναι μια αντίδραση προσθήκης-χτισίματος στην οποία ένα μόριο επέκτασης αλυσίδας αντιδρά με μια αλυσίδα PET. Δεύτερη είναι μια διαδικασία σύζευξης στην οποία δύο αλυσίδες PET ενώνονται με ένα μόριο επέκτασης αλυσίδας. Ο ιδανικός στόχος για τη διαδικασία επέκτασης της αλυσίδας είναι αυτός. Τρίτον, η μη αλληλεπίδραση, όπου το μόριο επέκτασης της αλυσίδας αποτυγχάνει να αντιδράσει με τις αλυσίδες PET. (Awaja & Pavel, 2005)

Επισκόπηση προηγούμενων μελετών για την παραγωγή νημάτων τρισδιάστατης εκτύπωσης

Το υλικό τροφοδοσίας της τεχνολογίας εκτυπωτών FDM είναι το νήμα πολυμερούς συγκεκριμένων διαμέτρων. Στο εμπόριο υπάρχουν πολλά είδη πολυμερών σε μορφή νήματος για τροφοδοσία εκτυπωτών 3D. Το ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο (ABS) και το πολυγαλακτικό οξύ (PLA) είναι τα δύο μη γεμισμένα δηλαδή μη σύνθετα θερμοπλαστικά πολυμερή που χρησιμοποιούνται στην προσθετική κατασκευή με τεχνολογία FDM ή FFF πιο συχνά. Τα ακόλουθα υλικά είναι κάποια από τα επίσης μη σύνθετα θερμοπλαστικά νημάτια που διατίθενται στο εμπόριο: ακρυλικό ακρυλονιτρίλιο στυρένιο (ASA), πολυαμίδιο (PA), πολυανθρακικό (PC), πολυφαινυλοσουλφόνη (PPSF, PPS ή PPSU), πολυαιθεριμίδιο (PEI), θερμοπλαστική πολουρεθάνη (TPU), τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET), θερμοπλαστικό ελαστομερές (TPE), πολυβινυλική αλκοόλη (PVA), κετόνη πολυαιθέρα (PEEK), φθοριούχο πολυβινυλιδένιο (PVDF), πολυοξυμεθυλένιο (POM), πολυστυρένιο υψηλής πρόσκρουσης (HIPS), πολυαιθεριμίδιο (ULTEM) και νάιλον. Επιπλέον, επειδή το πολυπροπυλένιο (PP) είναι ένα από τα πολυμερή που παρατηρούνται συχνά στην καθημερινή ζωή, άρχισε επίσης να τραβάει την προσοχή για εφαρμογή στην FDM προσθετική κατασκευή. Στην Ιαπωνία έχουν μεγάλη δημοτικότητα τα νημάτια PP, χρησιμοποιούνται επειδή παρέχουν υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες, όπως ακαμψία και υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό με καθαρό φινίρισμα επιφάνειας, καθώς και βελτιωμένη ανθεκτικότητα στη θερμότητα, την κόπωση και τα χημικά. Επιπλέον, ένας αριθμός άλλων τύπων νημάτων δημιουργούνται ενεργά και απελευθερώνονται ως εμπορικά νημάτια. Διάφορα προσθετικά μπορεί να περιλαμβάνονται στα πολυμερή για ενίσχυση της αντοχής, της αισθητικής, της αγωγιμότητας και της αντοχής στη θερμοκρασία. Για να αυξηθούν οι δυνατότητες της τρισδιάστατης εκτύπωσης, αναπτύσσονται σταδιακά νέα σύνθετα υλικά. (Κονάτσονα et al., 2020; Kristiawan et al., 2021)

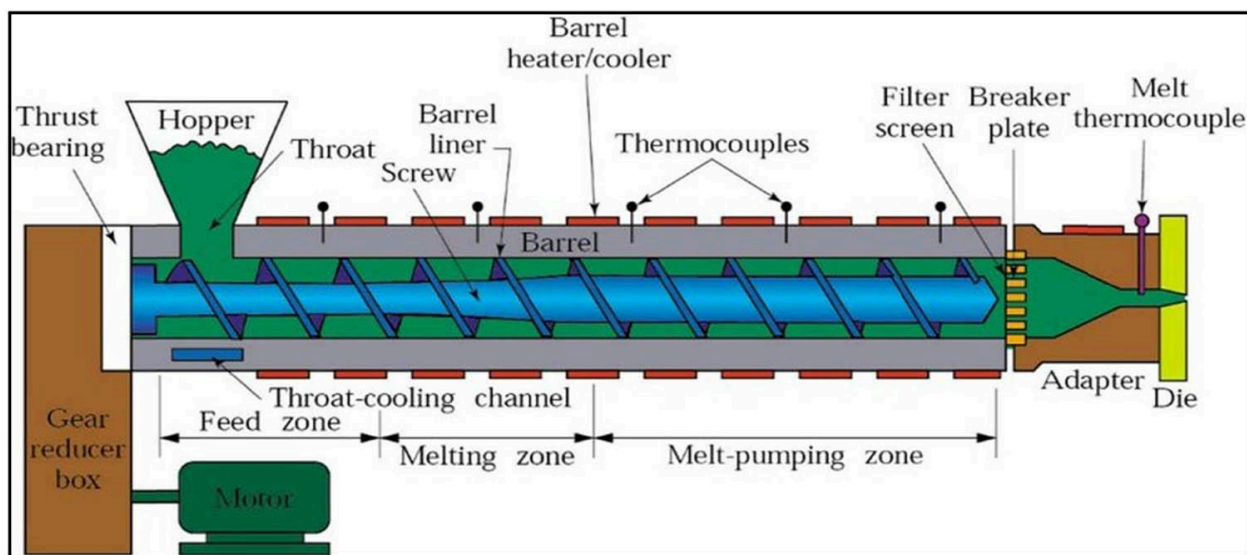
Ένα συμπολυμερές PET που έχει τροποποιηθεί με γλυκόλη έχει δημιουργηθεί για να ξεπεραστούν οι περιορισμοί κρυστάλλωσης του πολυμερούς PET. Οι μονάδες αιθυλενογλυκόλης (EtGly) του PET αντικαθίστανται εν μέρει με μονάδες 1,4-κυκλοεξανομεθανόλης (CHDM) για να δημιουργηθεί τερεφθαλική πολυ(-αιθυλενογλυκόλη-συν-1,4-κυκλοεξανομεθανόλη ή PETG). Όταν το ποσοστό CHDM κυμαίνεται από 32% έως 62%, το συμπολυμερές PETG είναι άμορφο.

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά του συμπολυμερούς PETG είναι συγκρίσιμα με εκείνα του PET. Το συμπολυμερές PETG παρουσιάζει αξιοσημείωτη διαφάνεια, ευελιξία, ανθεκτικότητα σε εφελκυσμό, καλή δυνατότητα επεξεργασίας και μεγάλη χημική αντοχή. Έχει πολλές χρήσεις και τα τελευταία χρόνια, το PETG έχει αποκτήσει δημοτικότητα και στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Τέλος, το PETG μπορεί να παραχθεί με ανακυκλωμένο PET αλλά και να ανακυκλωθεί το ίδιο. (Κονάτσονά et al., 2020)

Το νήμα κατασκευάζεται τυπικά από καθαρό πολυμερές χαμηλού σημείου τήξης ώστε να μπορεί να επεξεργαστεί από τους εκτυπωτές, οι οποίοι έχουν συνήθως όριο μέγιστης θερμοκρασίας τους 300 βαθμούς C. Μερικές φορές είναι απαραίτητο να αυξηθεί η αντοχή των καθαρών πολυμερών προκειμένου να δημιουργηθούν συστήματα με δομικές ιδιότητες και λειτουργικά πλεονεκτήματα που δεν μπορούν να επιτευχθούν με ένα απλό συστατικό. Έτσι λοιπόν, πολλοί ερευνητές και επιχειρήσεις έχουν δημιουργήσει σύνθετα πολυμερή ως υλικό νήματος τρισδιάστατης εκτύπωσης. Τα εμπορικά διαθέσιμα, καθαρού πολυμερούς νήματα μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία αμέσως ως υλικό FDM. Ωστόσο, επειδή κάθε ενίσχυση σε ένα σύνθετο πολυμερές θα παρέχει ένα διαφορετικό σύνολο ιδιοτήτων, η διαδικασία δημιουργίας σύνθετων νημάτων και η εκτύπωση με αυτά πρέπει πρώτα να εξεταστεί προσεκτικά. (Kristiawan et al., 2021)

Η εξώθηση πολυμερικών σφαιριδίων pellets (πρώτων υλών) επιτρέπει την παραγωγή καθαρού νήματος πολυμερούς για υλικά FDM. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας εξωθητήρες, οι οποίοι σπρώχνουν-πιέζουν το υλικό μέσω οπών κοπής για να παραχθεί το νήμα με κατάλληλη διάμετρο ως προϊόν εξώθησης. Η δημιουργία νήματος από πολυμερή σύνθετα υλικά (με ενίσχυση) επιτυγχάνεται με την ανάμειξη του υλικού πριν από τη διαδικασία εξώθησης προετοιμάζοντας κάθε συνθετικό υλικό εκ των προτέρων ώστε να υπάρχει σωστή σύζευξη των επιμέρους υλικών. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες τεχνικές για το συνδυασμό των υλικών, ανάλογα με τις ιδιότητες των επιμέρους συστατικών, η πιο απλή και σύνθητες τεχνική είναι η χρήση μίξερ. Το ίδιο ισχύει και για “καθαρά” υλικά τα οποία αναμιγνύουν σχεδόν πάντα με χρωστικές. Μετά την ανάμειξη είναι πάντα καλό να ακολουθεί και ξήρανση του μίγματος πριν την τροφοδοσία του στον εξωθητή για να αποφευχθούν διεργασίες αποικοδόμησης των πολυμερικών αλυσίδων όπως είναι η υδρόλυση. Αυτό επιτυγχάνεται σε θερμοκρασίες 60 με 80 κελσίου για 2 ώρες. Στο Σχήμα 7, εμφανίζεται ένας τυπικός εξωθητής νήματος. Οι πρώτες ύλες που μπορεί να είναι καθαρά παρθένα θερμοπλαστικά, ανακυκλωμένα πρώτη ύλη ή και σύνθετα υλικά τροφοδοτούνται στον κοχλία μέσω μιας χοάνης κατά τη διαδικασία δημιουργίας νήματος. Ο περιστρεφόμενος κοχλίας βρίσκεται στο βαρέλι και σπρώχνει το υλικό με τις επιφάνειες του διαδοχικά μέσα από όλες τις ζώνες του βαρελιού με τελικό προορισμό το στόμιο ακροφυσίου. Στο βαρέλι ζεσταίνονται οι πρώτες ύλες σταδιακά όλο και περισσότερο όσο προχωράνε προς το ακροφύσιο. Οι ζώνες τροφοδοσίας, μετάβασης-τήξης και τήξης-άντλησης αποτελούν τις τρεις ζώνες του βαρελιού (οι ζώνες σε άλλους εξωθητές μπορεί να είναι περισσότερες ή και λιγότερες). Οι πρώτες ύλες πλαστικοποιούνται στη ζώνη τροφοδοσίας, μαλακώνουν περαιτέρω στη ζώνη μετάβασης-τήξης και λιώνουν εξ ολοκλήρου στη ζώνη τήξης-άντλησης. Ανάλογα το υλικό που τροφοδοτείται στον εξωθητή οι θερμοκρασίες επιλέγονται κατάλληλα για κάθε μια από τις

διάφορες ζώνες του βαρελιού. Ένας ή δύο κοχλίες μπορεί να υπάρχουν στην κάννη. Οι εξωθητήρες με μία κοχλία αναφέρονται ως εξωθητήρες μονού κοχλία, ενώ εκείνοι με δύο κοχλίες αναφέρονται ως εξωθητήρες διπλού κοχλία. Από τη ζώνη τήξης-άντλησης, οι λιωμένες πρώτες ύλες εξωθούνται μέσω ενός ακροφυσίου. Τα απαραίτητα στόμια ακροφυσίου χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της διαμέτρου του παραγόμενου νήματος. Για νημάτια 1,75 mm, χρησιμοποιείται συχνά ορειχάλκινο στόμιο ακροφυσίου με διάμετρο 2,5 έως 3,5 mm. Τα υλικά που εξωθούνται κινούνται μέσα από μια ζώνη ψύξης αφού περάσουν από τη στόμιο ακροφυσίου. Η διάμετρος του συνήθως χρησιμοποιούμενου νήματος για FDM είναι 1,75, με πρότυπο ανοχής 0,05 mm. Ο ρυθμός ψύξης έχει ουσιαστικό αντίκτυπο στην ποιότητα του νήματος. Για τη ψύξη του νήματος, χρησιμοποιούνται πολλές μέθοδοι, όπως κανόνι(α) κρύου αέρα και ένα λουτρό νερού ή και δύο λουτρά νερού ρυθμισμένα σε διαφορετικές θερμοκρασίες για την σταδιακή ψύξη του νήματος με τον κατάλληλο ρυθμό που απαιτεί το κάθε υλικό. Μετά το σύστημα ψύξης βρίσκεται το καρούλι που τυλίγεται το νήμα. Αυτό το καρούλι περιστρέφεται μέσω ενός μοτέρ για να τυλίγει το νήμα αλλά και για να το τραβάει από το ακροφύσιο με την κατάλληλη ταχύτητα και τάση που θα επιφέρει την σωστή διάμετρο νήματος. Οπότε πιο σημαντικό από την διάμετρο του ακροφυσίου του εξωθητήρα είναι η ταχύτητα που τραβάει και τυλίγει το νήμα το καρούλι- μοτέρ. Για τον λόγο αυτό υπάρχει ένας μετρητής λέιζερ λίγο μετά τα λουτρά ψύξης για να μετράει την διάμετρο του παραγόμενου νήματος σε πραγματικό χρόνο, έτσι ώστε να προσαρμόζεται και η ταχύτητα του μοτέρ αναλόγως. (Dey et al., 2021; Herianto et al., 2020; Kristiawan et al., 2021; Make:, 2015; Printed Solid, Inc. - 3D Printers, Filament, Upgrades, and Service, 2019)



Εικ. 8 - Εξαρτήματα-ανατομία μηχανών εξώθησης(Dey et al., 2021)

Ανάλυση της τρέχουσας κατάστασης της ανακύκλωσης-μετατροπής φιαλών PET για την κατασκευή νημάτων τρισδιάστατης εκτύπωσης

Υπάρχουν πολλές μελέτες για την παραγωγή νήματος 3Δ εκτύπωσης από διάφορα ανακυκλωμένα πολυμερή, με χρήση εξωθητών και ανακυκλωμένο πολυμερές σε μορφή κόκκων (pellets), ακόμα και με απευθείας χρήση των νιφάδων-θρημάτων (flakes) στην τροφοδοσία εξωθητών. Αντίθετα, υπάρχουν

ελάχιστα επιστημονικά άρθρα για την μετατροπή φιαλών PET σε νήμα 3Δ εκτύπωσης με την τεχνολογία που θα εφαρμόσει αυτή η ΔΕ και ήδη έχουν εφαρμόσει πολλοί makers ανά τον κόσμο.

Η τεχνολογία αυτή πραγματοποιείται με την χρήση ενός απλού στην κατασκευή μηχανήματος που αποτελείται κυρίως από εκτυπωμένα κομμάτια και εξαρτήματα 3d εκτυπωτών. Το μηχάνημα αυτό επιτρέπει την μετατροπή λωρίδων PET (απο POSTC-bottles που διαφορετικά μάλλον θα κατέληγαν σε χωματερές) σε χρήσιμο νήμα για 3Δ εκτύπωση. Νήμα PET που θεωρείται πολύ δυνατό αλλά και εύκαμπτο, ανθεκτικό στα χημικά και στη θερμοκρασία αλλά και σχετικά εύκολο στην εκτύπωση. Η πρόσβαση σε ένα οικονομικό και πιο “οικολογικό” υλικό είναι πολύ σημαντική ως maker, ερευνητής ή και επαγγελματίας, διότι για την δημιουργία ενός σωστού αντικειμένου μπορεί να έχουν προηγηθεί λάθος δοκιμαστικά σχέδια ή αποτυχημένες εκτυπώσεις και γενικά χαμένο υλικό απο στηρίξεις που καταλήγουν στα σκουπίδια (υπάρχουν βέβαια τρόποι για να ανακυκλώνεις και αυτά με διαδικασίες θρυμματισμού τους και τροφοδοσίας των τριμμάτων αυτών σε εξωθητήρες).

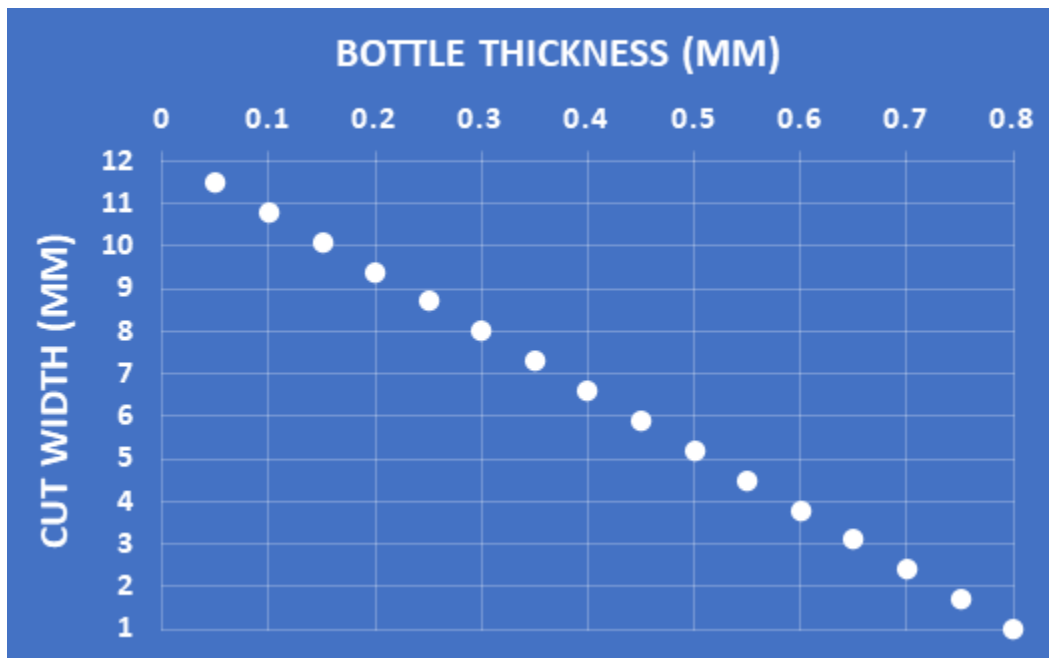
Περιγραφή της διαδικασίας μετατροπής από μπουκάλι σε νήμα

Μετατροπή μπουκαλιών σε λωρίδες

Η επιλογή μπουκαλιών είναι στρατηγική. Προτείνεται χρήση φιαλών συνήθως μεγέθους 1,5 με 2 λίτρων που προέρχονται από ροφήματα αφού τα μικρότερα δεν έχουν αρκετό υλικό και τα μεγαλύτερα από αυτά είναι πιο δυσεύρετα δύσκολα στην διαχείριση-κοπή τους. Αρχικά, είναι σημαντικό να αφαιρεθούν οι ετικέτες, υπολείμματα κόλλας και οι ακαθαρσίες που μπορεί να έχουν μείνει στο εσωτερικό αλλά και στο εξωτερικό των φιαλών. Ένας καλός τρόπος για να αφαιρεθεί η κόλλα από την φιάλη είναι το μούλιασμα-ζέσταμα της κόλλας για λίγο σε ζεστό νερό ή με ζεστό αέρα και έπειτα τρίψιμο με ένα πανί και φυτικό λάδι ή WD-40 ή Goo-Off ή Orange Deodorizer Spray. Καλό είναι μετά από αυτό το βήμα να καθαριστεί καλά το εξωτερικό της φιάλης. Έπειτα ακολουθεί η λείανση της επιφάνειας του μπουκαλιού από τυχόν ραβδώσεις και μοτίβα του σχεδιασμού της φιάλης. Αυτό επιτυγχάνεται με την άσκηση πίεσης στο εσωτερικό της φιάλης και εφαρμογή θερμότητας περιφερειακά της φιάλης. Η πίεση μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι να εφαρμοστεί στο πάμα του μπουκαλιού μια βαλβίδα ποδηλάτου και να ασκηθεί πίεση 20 psi (pounds per square inch) με μία τρόμπα. Δεύτερος τρόπος και λιγότερο δημοφιλής είναι να προστεθεί κάποια εύκολα πτητική ουσία ακόμα και νερό ώστε με το που θερμανθεί λίγο το μπουκάλι στην επόμενη φάση να μετατραπεί η ουσία από την υγρή της μορφή στην αέρια που έχει μεγαλύτερο όγκο λόγω διαστολής και ως συνέπεια να δημιουργηθεί πίεση στο εσωτερικό της φιάλης (βέβαια ανάλογα την φύση της ουσίας αυτής η διαδικασία μπορεί να είναι επικίνδυνη σε συνδυασμό με την θερμότητα είτε απλά με την εισπνοή της επιλεγμένης ουσίας). Η θερμότητα μπορεί να ασκηθεί μέσω διαφόρων πηγών αν και η πιο δημοφιλής είναι η χρήση θερμοπίστολου που κάνει γρήγορη δουλειά και ακολουθούν η καύση γκαζιού ή το μάτι κουζίνας. Σημαντικό για την ποιότητα των λωρίδων και ακολούθως του νήματος είναι η άσκηση της θερμότητας να είναι καλά καταμερισμένη σε ολόκληρη την επιφάνεια του μπουκαλιού ώστε να επηρεαστεί ομοιόμορφα (και όσο το δυνατόν λιγότερο) το πάχος των τοιχωμάτων του. Για να επιτευχθεί αυτό, πρέπει το μπουκάλι να περιστρέφεται στην κατάλληλη ταχύτητα και απόσταση πάνω από την εστία θερμότητας. Στην συνέχεια, αφαιρείται η πίεση αέρα μέσω της βαλβίδας και έπειτα μπορεί να ανοιχτεί το μπουκάλι για λόγους ασφάλειας. ((292) *How to Remove a*

STUPID GLUE from Plastic Container - YouTube, n.d.; *Recreator 3D Quick Start Guide*, n.d.; *The Recreator 3D Operations Manual*, n.d.; Tylman & Dzierzek, 2020)

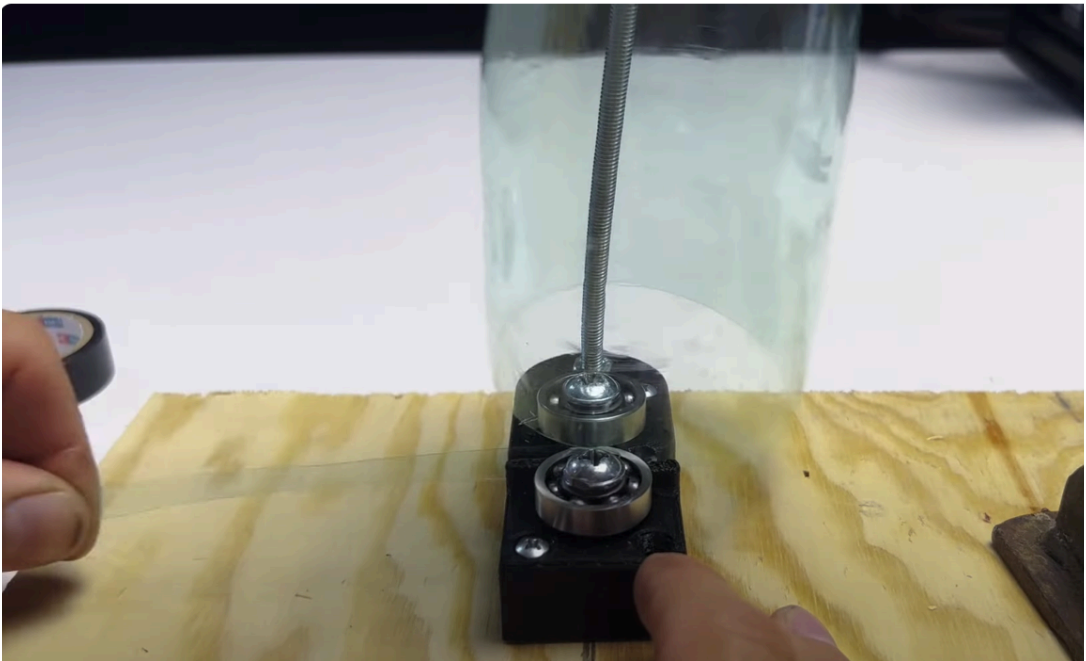
Τέλος, αφαιρείται ο πάτος της φιάλης με ένα ψαλίδι ή και κοπίδι, ακολουθεί πλύσιμο και στέγνωμα του εσωτερικού της φιάλης και εφαρμόζεται μια σχισμή εκεί που αφαιρέθηκε ο πάτος για να χρησιμοποιηθεί ως αρχή για να περάσει από ένα σύστημα κοπής μπουκαλιών (bottle-cutter κυκλοφορούν διάφορα σχέδια προς εκτύπωση αλλά και έτοιμα προϊόντα στο διαδίκτυο). Το πάχος του τοιχώματος της φιάλης καθορίζει πόσο φαρδιά (πλάτος) πρέπει να είναι η λωρίδα έτσι ώστε να υπάρχει η κατάλληλη ποσότητα υλικού κατά μήκος της λωρίδας και ακολούθως του νήματος, αλλά πιο συγκεκριμένα το πλάτος πρέπει να είναι τέτοιο ώστε όταν περνάει από το ακροφύσιο η λωρίδα και μετασχηματίζεται σε μορφή καλαμακίου ανάλογα και με το πάχος της λωρίδας θα πρέπει ίσα που να κλείνει ή μάλλον ίσα που να μην κλείνει το καλαμάκι όπως φαίνεται και στο σχ.13. Στο Σχ. 8 φαίνεται μια γραμμική σχέση μεταξύ πάχους τοιχώματος και πλάτους λωρίδας που προκύπτει από την εμπειρική παρατήρηση του δημιουργού του the recreator 3d και αποτελεί μια μη ακριβή πρόταση για το πλάτος κοπής της λωρίδας. Οι τιμές που δίνει δεν βγάζουν νόημα ιδίως στα άκρα του γραφήματος αλλά για μεσαίες τιμές είναι αρκετά κοντά στην πραγματικότητα και είναι χρησιμές ως αφετηρίες τιμές πλάτους για τα προσωπικά πειράματα κάποιου maker . Η λωρίδα τυλίγεται σε ένα καρούλι και είναι έτοιμη για μετατροπή.((292) *How to Remove a STUPID GLUE from Plastic Container - YouTube*, n.d.; *Recreator 3D Quick Start Guide*, n.d.; *The Recreator 3D Operations Manual*, n.d.; Tylman & Dzierzek, 2020)



Εικ. 9 - Διάγραμμα πρότασης της κατάλληλης αναλογίας πάχους φιάλης και πλάτους λωρίδας. (*The Recreator 3D Operations Manual*, n.d.)

Κάποια από τα βασικά συστήματα κοπής μπουκαλιών που κατασκευάζονται από τους makers που επιχειρούν την μετατροπή μπουκαλιών σε νήμα είναι τα εξής:

- 1) Χρήση ρουλεμάν με τροχισμένες επιφάνειες που συγκλίνουν με αποτέλεσμα η μυτερές άκρες τους να κόβουν το μπουκάλι



Εικ. 10 - 1) Τρόχισμα των ρουλεμάν συστήματος κοπής μπουκαλιών με ρουλεμάν 2)Συστημα κοπής μπουκαλιών με ρουλεμάν σε χρήση (mr3dp, 2023)

Θεωρείται η πιο αποτελεσματική μέθοδος για τους λόγους ότι φέρει την μικρότερη αντίσταση στην κοπή και ότι επιφέρει λωρίδα σταθερού πλάτους με πολύ μικρές-αμελητέες αποκλίσεις. Απο την άλλη η κατασκευή του είναι πιο πολύπλοκη από τις άλλες μεθόδους ειδικά εάν είναι επιθυμητή η ρύθμιση του πλάτους της λωρίδας.

- 2) Χρήση λεπίδας φαλτσέτας, βίδες, παξιμάδια και ροδέλες με ρυθμιζόμενο πλάτος κοπής με την χρήση των ροδέλων.



Εικ.11 - 1) Τοποθέτηση της λεπίδας ανάμεσα από τις ροδέλες 2)Συστημα κοπής μπουκαλιών με φαλτσέτα και ροδέλες σε χρήση (Plastic bottle cutter, 2021)

Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι είναι πολύ απλή στην κατασκευή και το μειονέκτημα ότι η φαλτσέτα κόβει μεν το μπουκάλι αλλά φέρει μεγαλύτερη αντίσταση σε σχέση με τα ρουλεμάν.

- 3) Χρήση πακτωμένης λεπίδας φαλτσέτας και δημιουργία εγχοπών για την επιλογή πλάτους λωρίδας.

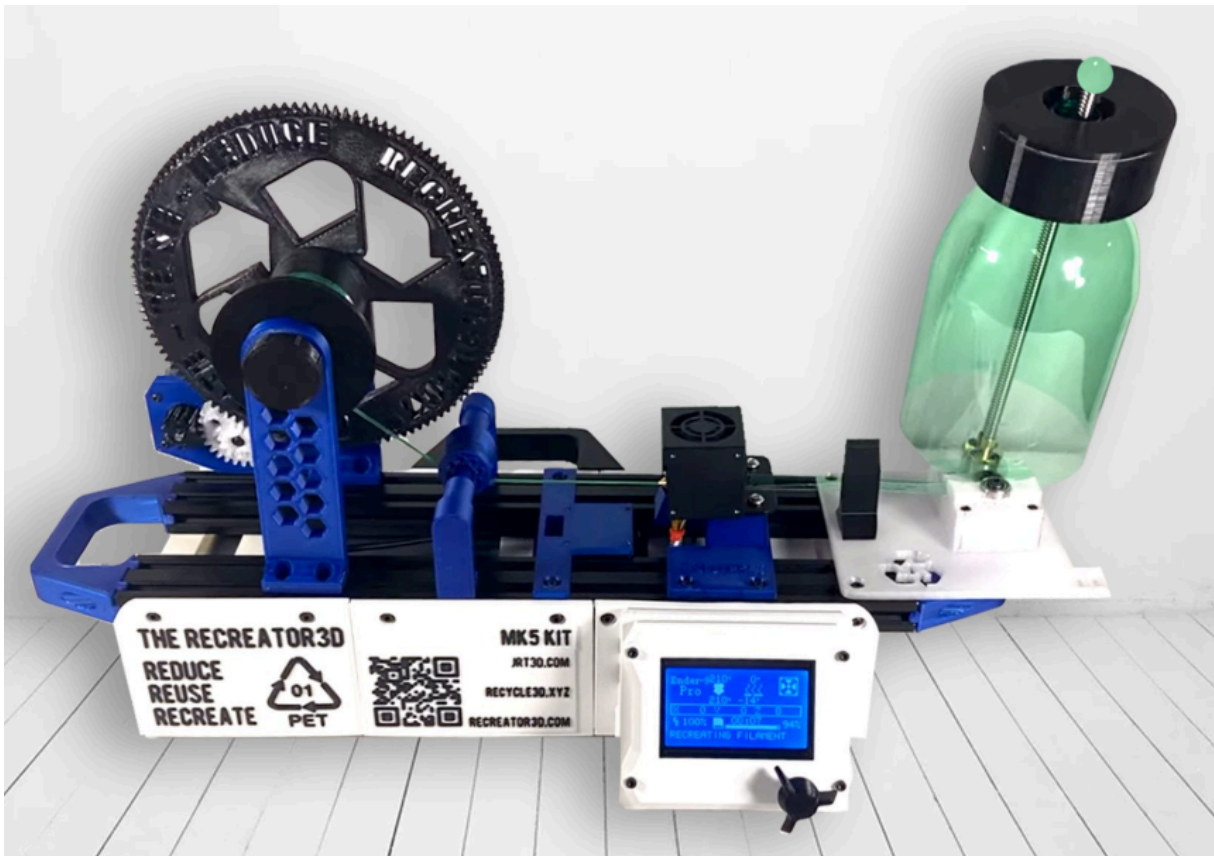


Εικ. 12 Σύστημα κοπής μπουκαλιών με φαλτσέτα και εσοχές σε χρήση (Plastic bottle cutter, 2021)

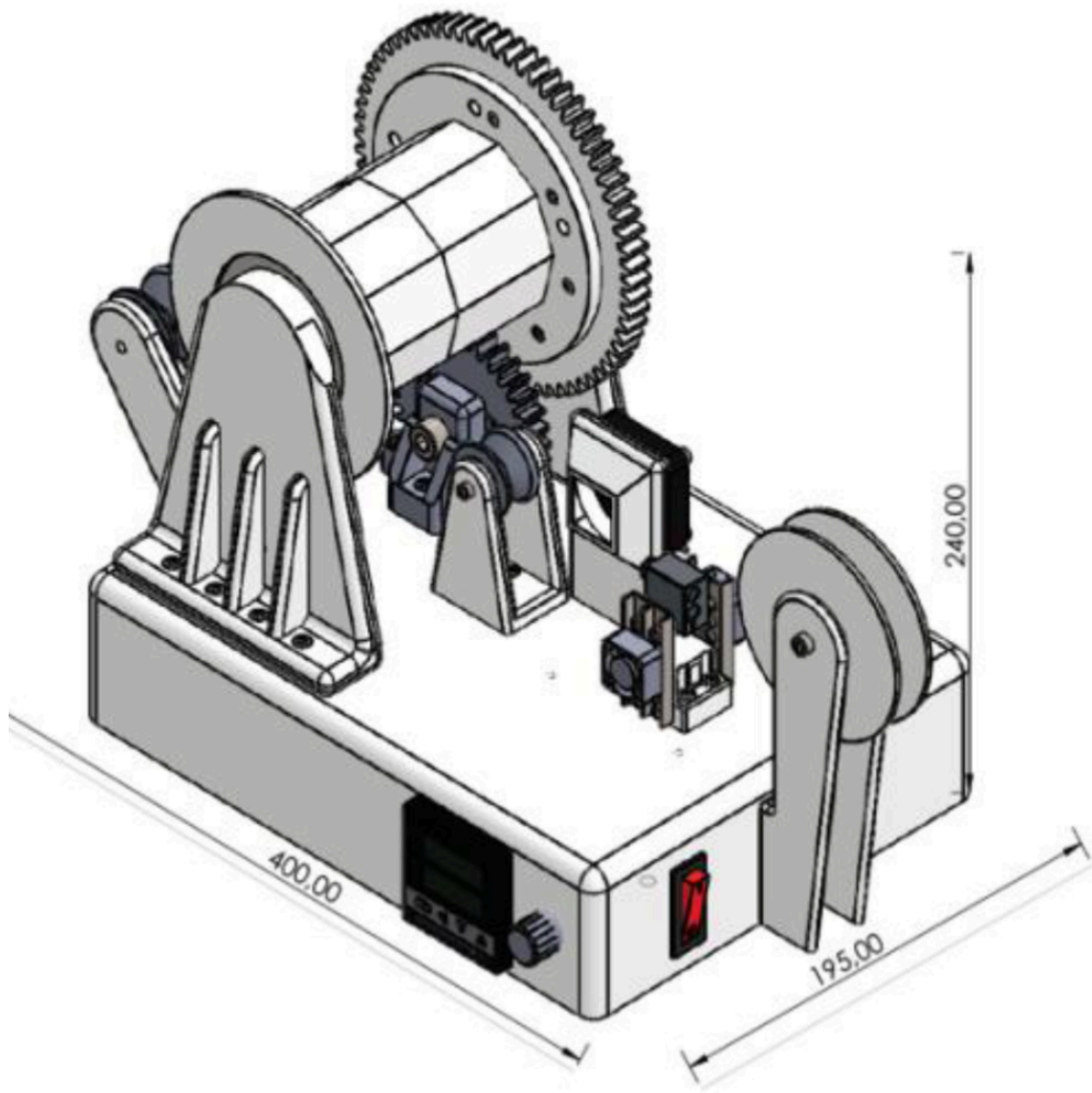
Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι είναι πολύ απλή στην κατασκευή και το μειονέκτημα ότι η φαλτσέτα κόβει μεν το μπουκάλι αλλά φέρει μεγαλύτερη αντίσταση σε σχέση με τα ρουλεμάν.

Κατασκευή και λειτουργία ενός συστήματος μετατροπής (μετατροπή από λωρίδες σε νήμα)

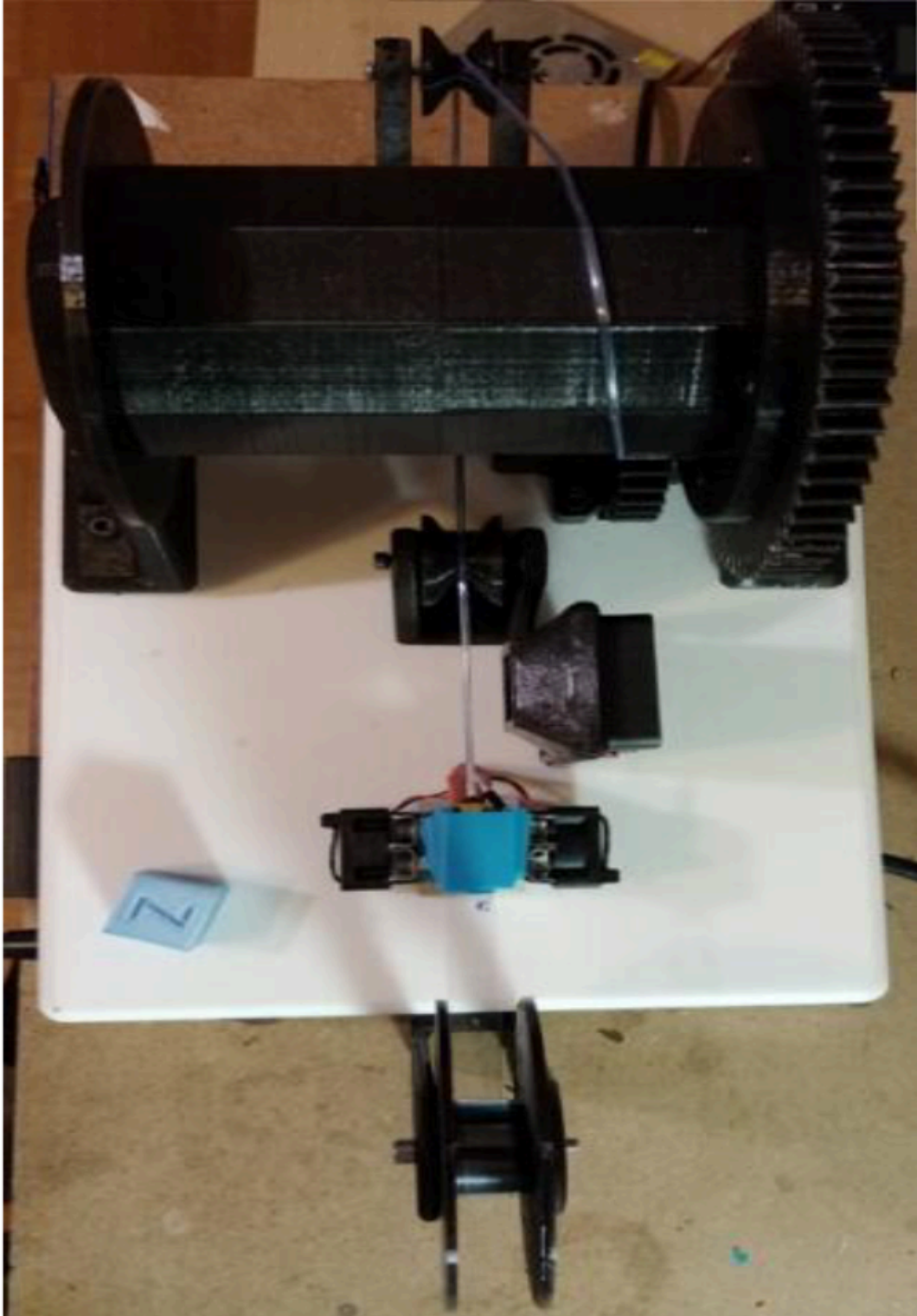
Υπάρχουν πολλές διαφορετικές εκδοχές του ίδιου μηχανήματος-συστήματος μετατροπής φιαλών PET σε νήμα για 3D εκτύπωση, αποτέλεσμα των υλικών, εξαρτημάτων και τεχνικών γνώσεων που διαθέτει ο κάθε maker. Συνήθως τα απαραίτητα εξαρτήματα για την κατασκευή του προέρχονται σχεδόν αποκλειστικά από 3D εκτυπωτές. Τα κύρια εξαρτήματα εκτυπωτών(ή και όχι από εκτυπωτές, αλλά συνήθως ναι) που χρειάζονται είναι μπλόκ θέρμανσης(μαζί με heater και temperature sensor), ακροφύσιο, heat sink, τροφοδοτικό ρεύματος, motherboard, control panel, stepper motor και ανεμιστηράκι/ια. Από εκεί και πέρα είναι απαραίτητο να τυπωθούν και άλλα διάφορα κομμάτια όπως είναι και το βασικότερο, που είναι μια ομάδα-σύστημα κομματιών που χρησιμεύει στην μετατροπή της κίνησης του μοτέρ στο καρούλι τυλίγματος και έλξης του παραγόμενου νήματος από το ακροφύσιο και εμπεριέχει πχ. γρανάζια, καρούλι, βάση-στήριγμα-πόδια καρουλιού, άξονας περιστροφής καρουλιού κλπ. Ένα ακόμα εκτυπωμένο κομμάτι είναι ο οδηγός του νήματος για την τροφοδότηση του στο ακροφύσιο, όπως υπάρχει επίσης και pulley guide για το νήμα μετά το ακροφύσιο. Επιπρόσθετα, σημαντικό εκτυπωμένο κομμάτι αποτελεί η βάση για το καρούλι και το καρούλι που θα έχει τυλιγμένη την λωρίδα PET. Στα Σχ. 9,10,11 και 12 απεικονίζονται κάποια παραδείγματα συστημάτων με τα εμφανή τους εξαρτήματα. Τέλος, κάποια συστήματα μετατροπής αντί για καρούλι με τυλιγμένη λωρίδα έχουν ενσωματωμένο ένα σύστημα κοπής φιαλών σε λωρίδα PET που κόβει το μπουκάλι παράλληλα με την μετατροπή της λωρίδας, με την δύναμη που ασκεί το μοτέρ μέσω του καρουλιού έλξης του νήματος από μοτέρ όπως φαίνεται στο σχ. 9.



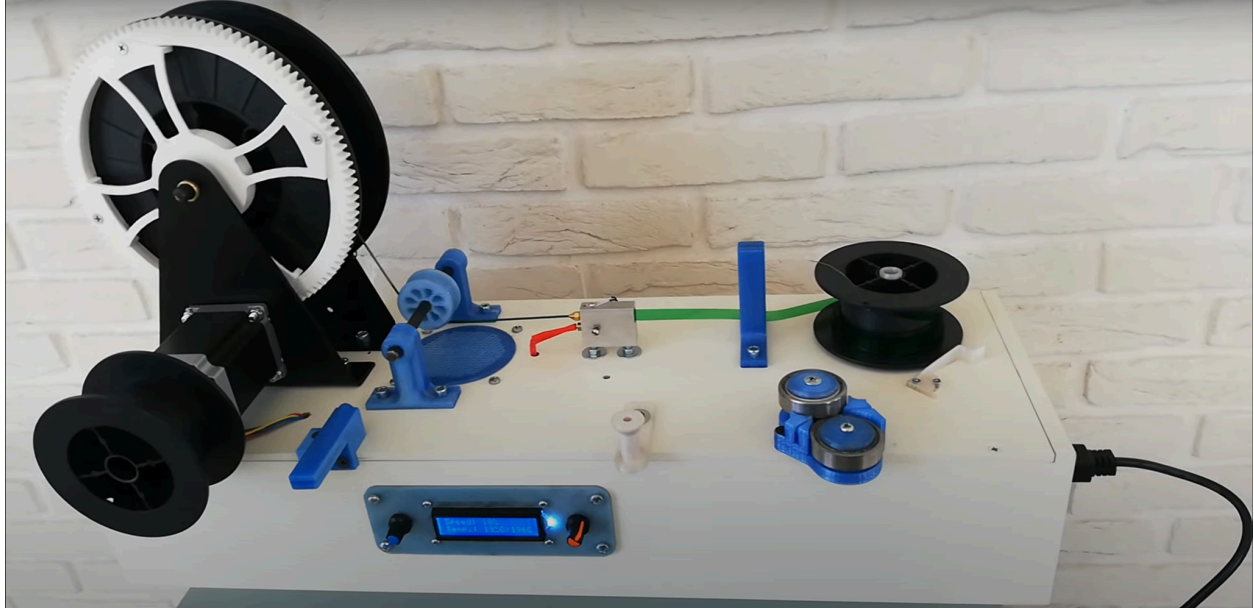
Εικ. 13 - Σύστημα μετατροπής THE RECREATOR3D MK5 KIT(*Thanks for Interested in Filament by The Recreator 3D.Docx, n.d.*)



Εικ. 14 - Σύστημα μετατροπής Simple machine, πλάγια όψη (Tylman & Dzierzek, 2020)



Εικ. 15 - Σύστημα μετατροπής Simple machine, φωτογραφία πρωτοτύπου σε κάτοψη (Tylman & Dzierzek, 2020)

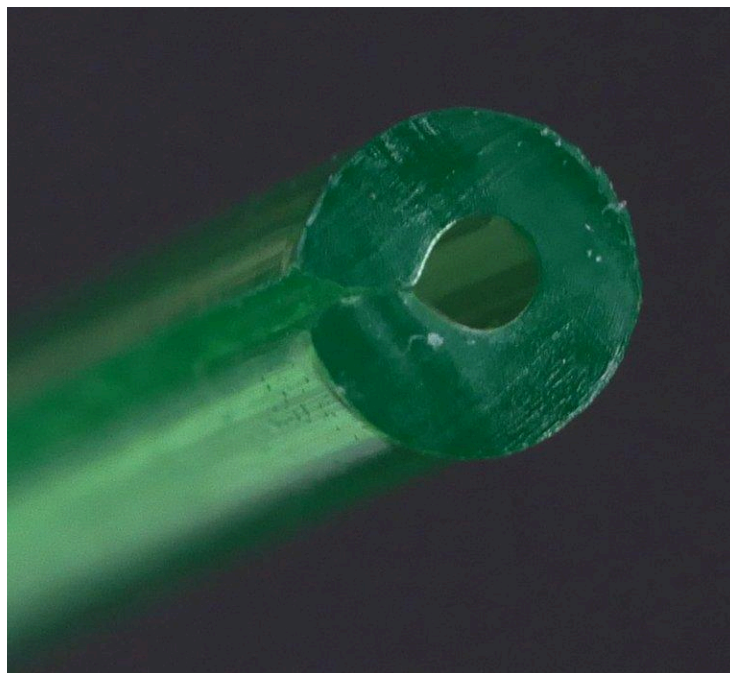


Εικ. 16 - Σύστημα μετατροπής PETBOT (Unbox Therapy, 2020)

Η λειτουργία του συστήματος μετατροπής είναι απλή. Για παράδειγμα στο σχήμα 12 φαίνεται ότι έχει τοποθετηθεί ένα καρούλι στα δεξιά. Σε αυτό το καρούλι έχει τυλιχτεί λωρίδα PET, η άκρη της λωρίδας πρέπει να είναι μυτερή και λεπτή ώστε να περάσει με ευκολία πρώτα μέσα από τον μπλέ οδηγό που ακολουθεί αριστερά του καρουλιού και έπειτα μέσα από το heat sink (που δεν υπάρχει στο συγκεκριμένο σύστημα), το μπλόκ θέρμανσης και το ακροφύσιο διαμέτρου 1.7mm. Επόμενο βήμα είναι να ρυθμιστεί η κατάλληλη θερμοκρασία (συνήθως 210 βαθμούς κελσίου) για το μπλοκ θέρμανσης άρα και το ακροφύσιο από το motherboard, αυτό γίνεται μέσω του control panel εύκολα όπως θα το ρύθμιζε κανείς και στον εκτυπωτή του (το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει και με το λογισμικό που έχει ενσωματωμένο ένα motherboard εκτυπωτή). Όταν η ένδειξη της αποκτημένης θερμοκρασίας του ακροφυσίου που διαγράφεται στο panel είναι η επιλεγμένη, τότε η άκρη της λωρίδας που μόλις έχει περάσει από το κρύο τότε ακροφύσιο πρέπει να τραβηχτεί, να περάσει κάτω από το pulley guide και να συνδεθεί με το καρούλι τυλίγματος-έλξης του νήματος που θα συνεχίζει να το τραβάει μέχρι ολόκληρη η λωρίδα να περάσει από το ακροφύσιο και να μετατραπεί σε νήμα. Εάν το χειροκίνητο τράβηγμα του νήματος μέσα από το ακροφύσιο είναι δύσκολο, είτε το ακροφύσιο δεν έχει ανοιχτεί σε διάμετρο 1,7mm είτε το νήμα έχει κοπεί πολύ πλατύ για το πάχος της φιάλης και κατ'επέκταση της λωρίδας, τότε ένα από αυτά τα δύο ή και τα δύο θα πρέπει να διορθωθούν. (*The Recreator 3D Operations Manual*, n.d.)

Η προτεινόμενη θερμοκρασία του ακροφυσίου είναι 195 C-210 C κελσίου αλλά στην πράξη το σύστημα συνήθως χρειάζεται 200 C και πάνω ώστε να επιτραπεί από το λογισμικό της motherboard του 3D εκτυπωτή να τρέξει ο κώδικας G-code που είναι απαραίτητος για τον έλεγχο του stepper motor. Η κατάλληλη θερμοκρασία εξαρτάται από το PET της κάθε εταιρείας φιαλών αλλά και από την ταχύτητα που τραβάει το καρούλι νήματος τα οποία ρυθμίζονται πειραματικά και εμπειρικά. Η θερμοκρασίες αυτές βρίσκονται ανάμεσα στο T_g και T_m , ο λόγος γι' αυτό είναι ότι ο στόχος δεν είναι να λιώσει το υλικό

αλλά να μετασχηματιστεί-πλαστεί σε κυλινδρικό νήμα(Σχ. 13). Αυτό βέβαια σημαίνει ότι το νήμα δεν θα είναι συμπαγές αλλά θα έχει κενά στο εσωτερικό του. Αν η θερμοκρασία ήταν τέτοια ώστε να έλιωνε το πλαστικό τότε το νήμα δεν θα μπορούσε να τραβηχτεί και θα σχιζόταν (σε αντίθεση με την παραγωγή εργοστασιακού νήματος που το πλαστικό λιώνει, έλκεται από το καρούλι αλλά επίσης ταυτόχρονα εξωθείται από τον εξωθητήρα, ενώ στην περίπτωση της μετατροπής της λωρίδας υπάρχει μόνο η έλξη από το καρούλι και καμία εξώθηση του). Ακόμα σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι σε αυτές τις θερμοκρασίες ο ρυθμός πυρηνοποίησης είναι κοντά στο μέγιστο, αφού ο μέγιστος ρυθμός πυρηνοποίησης παίρνει μέρος σε θερμοκρασίες ανάμεσα στους 150 - 190 βαθμούς κελσίου. Αυτό σημαίνει ότι για να αποφευχθεί η ανεπιθύμητη ημικρυστάλλωση στο νήμα που θα διευκολύνει μελλοντικά και την κρυστάλλωση στο εκτυπωμένο κομμάτι θα πρέπει να υπάρχει ένα σύστημα ψύξης του νήματος μετά το ακροφύσιο ώστε να παραμείνει το νήμα όσο το δυνατόν σε μεγαλύτερο ποσοστό άμορφο.(Awaja & Pavel, 2005; *The Recreator 3D Operations Manual*, n.d.)



Εικ. 17 - Τομή του παραγόμενου νήματος. (*Thanks for Interested in Filament by The Recreator 3D.Docx*, n.d.)

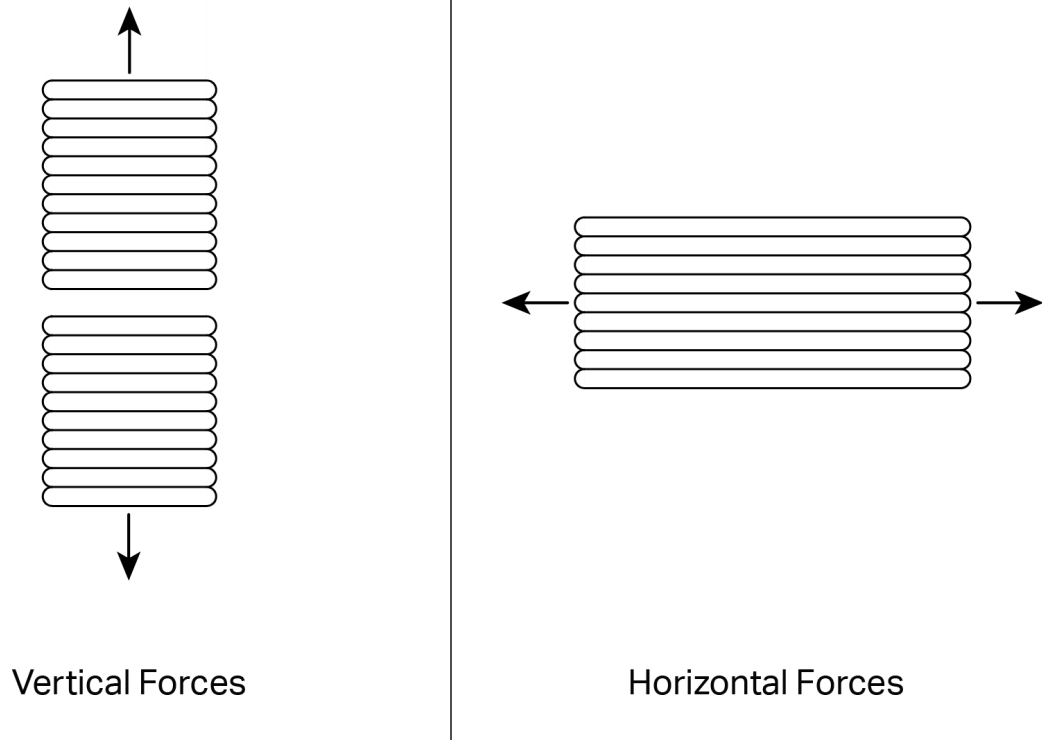
Το ακροφύσιο πρέπει να έχει άνοιγμα διαμέτρου 1,75mm ώστε να παραχθεί νήμα διαμέτρου 1,75mm. Τέτοια ακροφύσια δεν παράγονται για εκτυπωτές, έτσι για να δημιουργήσουν ένα οι makers ανοίγουν την τρύπα του ακροφυσίου με ένα μικρότερο από 1,75mm μικρότερης διαμέτρου τρυπάνι, προσεκτικά και σιγά σιγά μέχρι να χωράει να περάσει οριακά και με δυσκολία ένα δείγμα βιομηχανικού νήματος. Εάν το σύστημα παράγει νήμα με τραχιά επιφάνεια παρόμοια με αυτή του γυαλόχαρτου, η ταχύτητα τραβίγματος μπορεί να είναι πολύ υψηλή ή το ακροφύσιο μπορεί να είναι τραχύ από το άνοιγμα της οπής με το τρυπάνι και να χρειάζεται τρίψιμο.(*The Recreator 3D Operations Manual*, n.d.)

Ανάλυση των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων του ανακυκλωμένου νήματος, συμπεριλαμβανομένης και της δυνατότητας εκτύπωσης

Υπάρχουν αρκετές έρευνες που δοκιμάζουν τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες τυπωμένων δοκιμαστικών κομματιών από διάφορα υλικά για 3D εκτύπωση συμπεριλαμβανομένου και του R-PET και σε ένα μόνο επιστημονικό άρθρο του B-PET(bottle-PET). Το πρόβλημα με αυτές τις έρευνες είναι ότι χωρίς να το διαπιστώνουν ή έστω χωρίς να το αναφέρουν, τα τυπωμένα δοκιμαστικά κομμάτια για R-PET και B-PET δεν είχαν τυπωθεί σωστά ώστε το υλικό να παραμείνει άμορφο με αποτέλεσμα το πολυμερές να έχει κρυσταλλώσει σε έναν βαθμό και να φαίνεται στις φωτογραφίες από το ότι πρώτον δεν είναι πλέον διάφανο και δεύτερον ότι η θραύση του είναι ψαθυρή και όχι με μη ελαστικά παραμορφωμένες άκρες(Σχ.14). Επίσης καμία έρευνα δεν διευκρίνισε την διεύθυνση εκτύπωσης των δειγμάτων, κάτι που είναι πολύ σημαντικό για τις ιδιότητες και αντοχές ενός εκτυπωμένου κομματιού αφού δεν είναι ισότροπο (στην διεύθυνση εκτύπωσης Z που πέφτει το ένα layer πάνω στο άλλο η προσκόλληση του υλικού δεν είναι καλή γι' αυτό έχει πολύ υποδεέστερη αντοχή σε σχέση με τους άξονες X και Y, μια καλή εικονική αναπαράσταση είναι αυτή στο Σχ.15 .Τα αποτελέσματα των επιστημονικών άρθρων είναι στους πίνακες 4 και 5.



Εικ. 18 - φωτογραφία από έρευνα αντοχής εκτυπωμένων δοκιμών (σωστή διεύθυνση εκτύπωσης αλλά εμφανώς ημικρυσταλλικό αδιάφανο B-PET)(Tylman & Dzierzek, 2020)



Εικ. 19 - Οπτικοποίηση της ανισοτροπίας ενός εκτυπωμένου κομματιού.(*3D Printing Settings Impacting Part Strength*, n.d.)

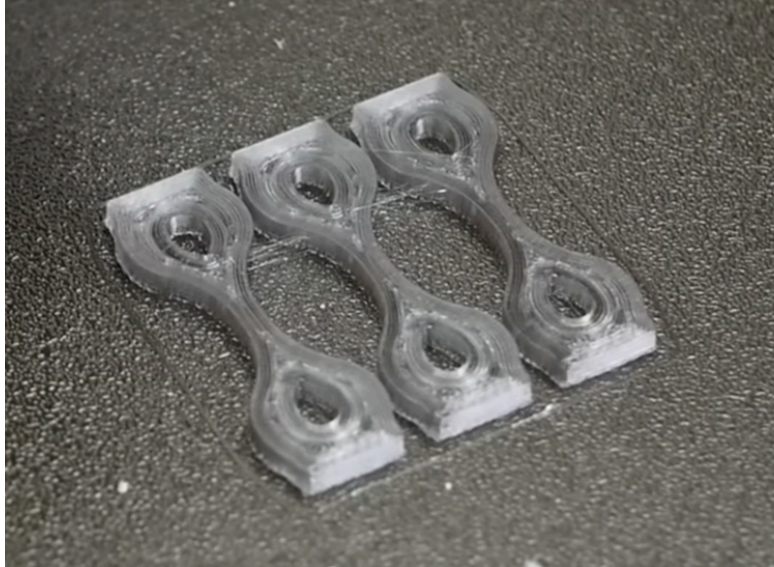
| Material | E_t MPa | σ_Y MPa | σ_M MPa | ϵ_M % | σ_B MPa | ϵ_B % | h mm | b mm | A_0 mm ² |
|----------|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------|---------|--------------------------|
| PET-G | 205 | 42,1 | 42,1 | 5,8 | 8,39 | 9,3 | 4 | 10,2 | 40,80 |
| PLA | 267 | 44,1 | 44,1 | 4,5 | 16,5 | 5,8 | 4 | 10,2 | 40,80 |
| ABS | 200 | 32,0 | 32,0 | 5,2 | 11,2 | 6,2 | 4 | 10,2 | 40,80 |
| BPET | 133 | - | 26,2 | 5,4 | 10,3 | 5,5 | 4 | 10,2 | 40,80 |

Πίνακας 4 - Αποτελέσματα τεστ αντοχής σε εφελκυσμό.(Tylman & Dzierzek, 2020)

| Material 3D Printed X-Y Axis | Tensile Strength (MPa) | Breaking Stress (MPa) | Young's Modulus (GPa) | Yield Strength (MPa) | Elongation (%) |
|-------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| ABS Filament | 29 | 27 | 0.745 | 1.24 | 4.8 |
| PLA Filament | 55 | 54 | 1.528 | 2.89 | 2.7 |
| Virgin PET Filament | 38 | 37 | 0.836 | 2.529 | 2.9 |
| Recycled PET Filament | 33 | 31 | 0.738 | 2.05 | 3.2 |

Πίνακας 5 - Σε αυτήν τη έρευνα δεν είχαν B-PET αλλά είχαν νήμα από R-PET.(Mosaddek et al., 2018)

Ευτυχώς ένας δημοφιλής maker και youtuber ο Στεφάν με επωνυμία καναλιού CNC Kitchen που ασχολείται κυρίως με 3D εκτυπώσεις έκανε δοκιμές αντοχής με καλής ποιότητας B-PET που του έστειλε ο δημιουργός του The Recreator 3D (ένας από τους πρώτους αν όχι ο πρώτος που έφτιαξε σύστημα μετατροπής μπουκαλιών σε νήμα, άρα με μεγάλη εμπειρία στο αντικείμενο). Τα δικά του δοκιμαστικά κομμάτια είναι διάφανα άρα και άμορφα (Σχ.16 και 17). Τα δείγματα που τύπωσε όρθια για να δοκιμάσει την δύναμη της προσκόλλησης των επιπέδων όμως δεν του βγήκαν άμορφα (Σχ.18). Εξηγεί ότι ο λόγος που έγινε η κρυστάλλωση είναι ότι το κάθε layer είναι πολύ μικρό και δεν προλαβαίνει να κρυσώσει μέχρι να εναποθετηθεί η επόμενη με αποτέλεσμα να μην απελευθερώνονται εύκολα τα ποσά θερμότητας δίνοντας έτσι χρόνο στο υλικό να κρυσταλλοποιηθεί (Σχ.19). Επίσης το γεγονός ότι το καυτό μπλοκ θέρμανσης και το ακροφύσιο βρίσκονται σταθερά ακριβώς από πάνω δεν βοηθάει να κρυσώσουν γρήγορα τα στρώματα. Για την καλύτερη εκτύπωση τέτοιων κομματιών ώστε να βγούν άμορφα θα μπορούσε να προστεθεί στον εκτυπωτή τουλάχιστον ένα ανεμιστηράκι που θα ανακυκλώνει το ζεστό αέρα γύρω από το υλικό που μόλις εναποτέθηκε ώστε να ψυχθεί γρηγορότερα. Έτσι λοιπόν, η μόνη δοκιμές με μάλλον ορθά αποτελέσματα πρέπει να είναι του Στεφάν. Ακολουθούν εικόνες από τα τεστ (Σχ. 20) και σχεδιαγράμματα με τα αποτελέσματα (Σχ.21,22) για το B-PET σε σύγκριση και με άλλα υλικά που έχει τεστάρει. (CNC Kitchen, 2022)



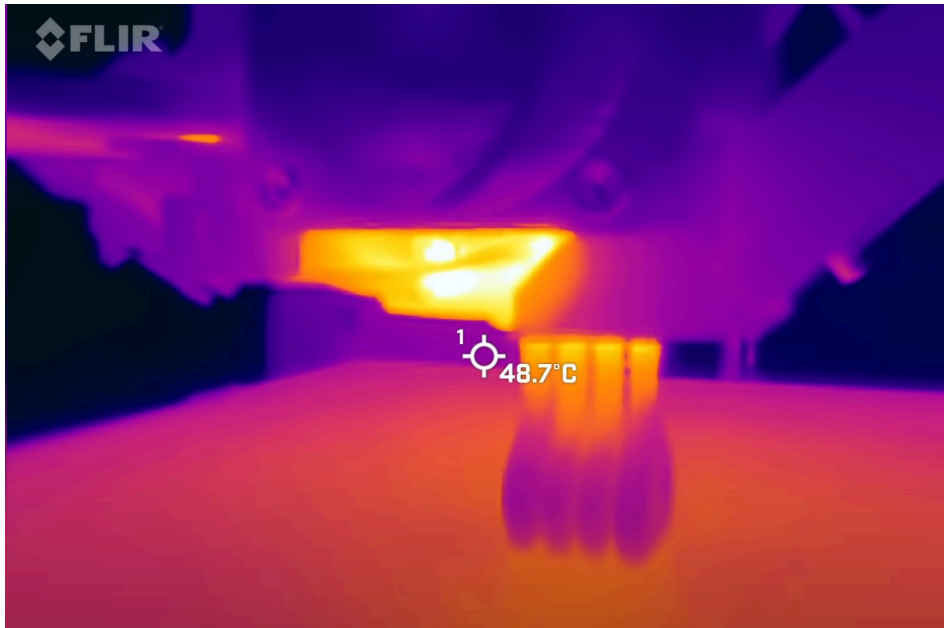
Εικ. 20 - Οριζόντια τυπωμένα διάφανα άμορφα κομμάτια ή έστω με πολύ χαμηλό ποσοστό κρυσταλλικότητας.(CNC Kitchen, 2022)



Εικ. 21 - Κομμάτια που τυπώθηκαν άμορφα δίπλα σε ημικρυσταλλικά διάφορων ποσοστών κρυσταλλικότητας.(CNC Kitchen, 2022)



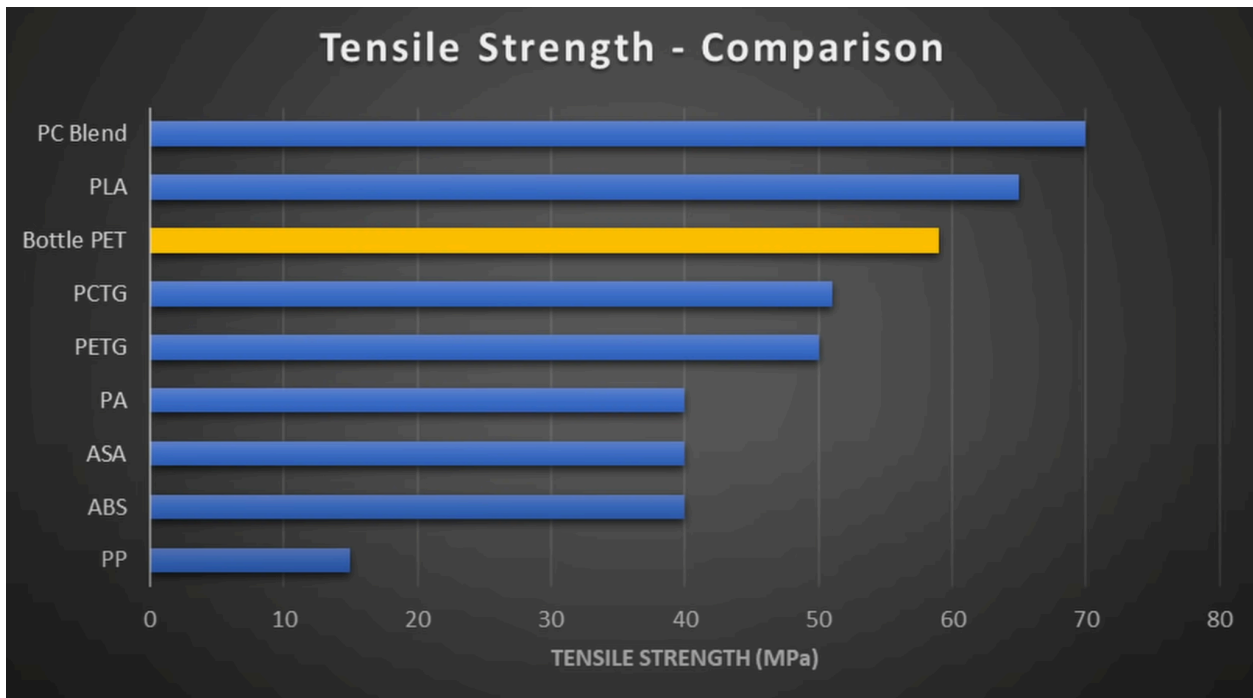
Εικ. 22 - Τα κάθετα τυπωμένα ημικρυσταλλικά κομμάτια.(CNC Kitchen, 2022)

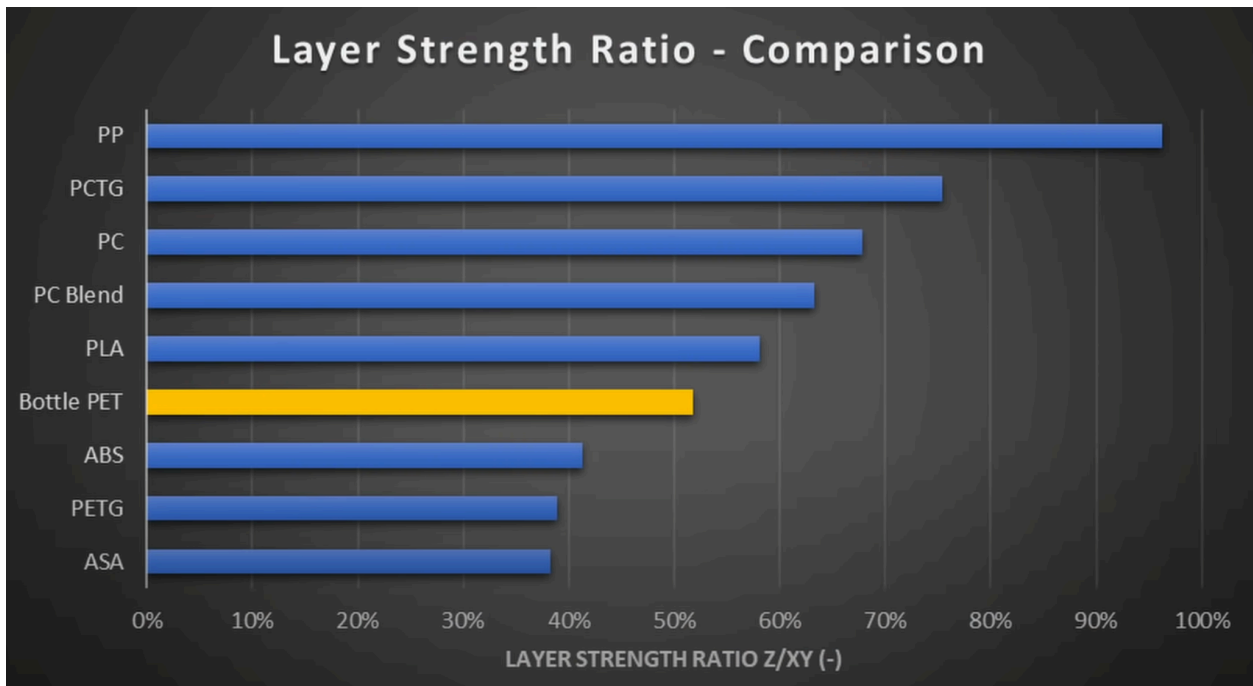
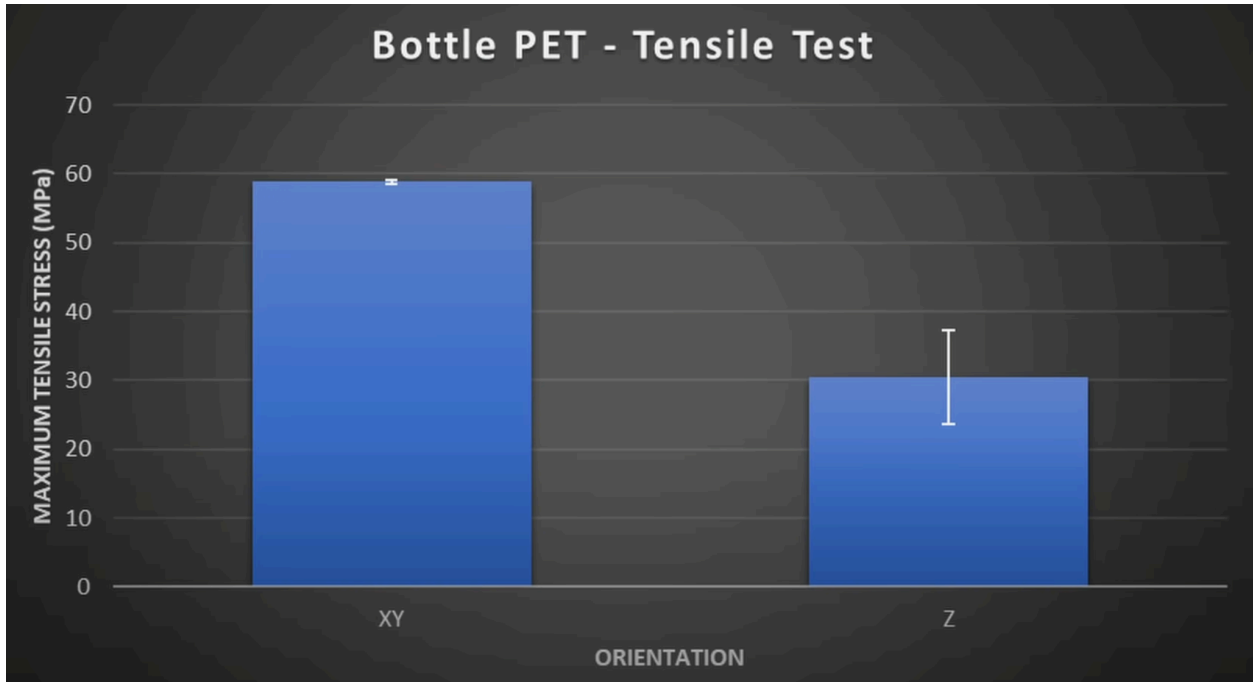


Εικ. 23 - Τύπωμα των κάθετων ημικρυσταλλικών κομματιών μέσα από κάμερα θερμότητας.(CNC Kitchen, 2022)

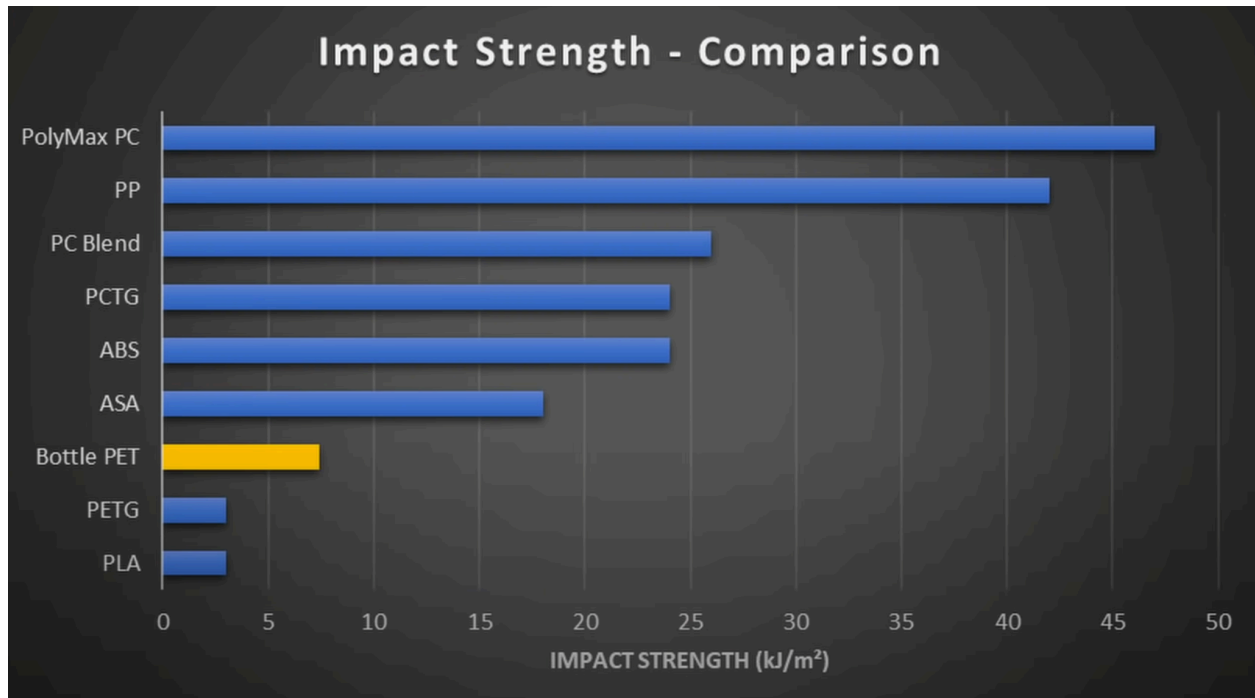


Εικ. 24 - Τεστ αντοχής σε εφελκυσμό(σωστή εκτύπωση, άμορφο, διάφανο κομμάτι, ελαστική παραμόρφωση στο σημείο θραύσης)(CNC Kitchen, 2022)





Εικ. 25 - Σύγκριση με άλλα υλικά αντοχής σε εφελκυσμό.(CNC Kitchen, 2022)



Εικ. 26 - Αντοχή στην κρούση.(CNC Kitchen, 2022)

Συμπεράσματα από την έρευνα και εντοπισμός ερευνητικών κενών και ευκαιριών για περαιτέρω διερεύνηση

Το σημαντικότερο κενό και η μεγαλύτερη ευκαιρία είναι ότι στην παρούσα φάση όλοι οι makers εκτελούν την διαδικασία μετατροπής κάθε φορά μόνο για μία φιάλη. Το υλικό νήμα που μπορεί να παραχθεί από μια φιάλη είναι πάνω κάτω στα 20 γραμμάρια. Με 20 γραμμάρια υλικού μπορεί είτε να εκτυπωθεί κάτι πολύ μικρό είτε κάτι μεγάλο αλλά να διακόπτεται η εκτύπωση κάθε φορά που τελειώνει το νήμα για να μπει το επόμενο. Όμως αυτή η διαδικασία διακοπής, αλλαγής νήματος και επανεκκίνησης εκτύπωσης συνήθως αφήνει ατέλειες στο κομμάτι που εκτυπώνεται. Μια λύση στο ότι δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί μια μεγάλη εκτύπωση χωρίς παύση της για αλλαγή του νήματος είναι μια διαδικασία ένωσης των νημάτων αλλά και σε αυτήν την περίπτωση έχει χαθεί πολύτιμος χρόνος στην επανάληψη της διαδικασίας μετατροπής για κάθε ένα μπουκάλι ξεχωριστά (και η διαδικασία για να επαναληφθεί προϋποθέτει ότι το ακροφύσιο πρέπει να αφηθεί να κρυώσει για να περάσει η αρχή της λωρίδας, ανάλογα την σχεδίαση του συστήματος να αλλάχουν τα καρούλια ή έστω να αφαιρεθεί το το νήμα και να προστεθεί καινούρια λωρίδα, ξανά να περιμένεις να πιάσει θερμοκρασία το ακροφύσιο, να τραβήξεις το νήμα για να το συνδέσεις στο καρούλι τραβήγματος του νήματος και να βάλεις τον G-code να τρέξει). Καθώς στην πρώτη περίπτωση της παύσης εκτύπωσης για αλλαγή του νήματος υπάρχει πολύς χαμένος χρόνος και ταλαιπωρία. Έτσι αυτή η διπλωματική προτείνει μια διαδικασία ή ένα σύστημα ένωσης των λωρίδων PET ώστε η διαδικασία μετατροπής να πραγματοποιείται μια φορά απο τον maker και το σύστημα να παράγει νήμα συνεχόμενα και σε μεγάλη ποσότητα. Αυτό το νήμα στην συνέχεια θα μπορεί

μετά να χρησιμοποιηθεί για εκτύπωση μεγάλων κομματιών χωρίς την ανάγκη παύσης της εκτύπωσης για αλλαγή του νήματος.

Ένα ενδιαφέρον συμπέρασμα είναι ότι το υλικό που παράγεται από την μετατροπή μπουκαλιών σε νήμα μπορεί να θεωρηθεί ανώτερο του R-PET και του PETG αν τυπωθεί σωστά με την αποφυγή της ημικρυστάλλωσης του. Όπως φάνηκε-αποδείχθηκε και από τα τεστ αντοχής του Στεφάν. Και αυτό θα μπορούσε να υποστηριχθεί από το γεγονός ότι για την παραγωγή του δεν απαιτείται ο θρυμματισμός του σε πολύ μικρά κομμάτια, πράγμα που θα μείωνε το μοριακό βάρος του υλικού από τον αναπόφευκτο σχισμό των αλυσίδων κατά τον τεμαχισμό του αλλά και από της διεργασίες αποικοδόμησης που παίρνουν μέρος κατά την επεξεργασία στους εξωθητές.

Δεύτερο σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι το υλικό μπορεί να κρυσταλλοποιηθεί σε έναν μικρό ποσοστό κατά την εκτύπωση κυρίως αλλά και στην διαδικασία μετατροπής των φιαλών, πράγμα που θα επηρεάσει αρνητικά τις ιδιότητές του υλικού-αντικειμένου όπως η αντοχή του και η διαφάνεια του. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να ξεπεραστεί κατά ένα σημαντικό ποσοστό από την άμεση ψύξη του υλικού μετά την θέρμανση του πάνω από την θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης στην περίπτωση της μετατροπής του σε νήμα (η θερμοκρασία μετατροπής είναι γύρω στους 210 βαθμούς κελσίου, που σημαίνει ότι περνάει από θερμοκρασίες ανάμεσα στους 150-190 βαθμούς κελσίου που είναι μέσα στο εύρος των ταχύτερων ρυθμών κρυσταλλοποίησης) και την τήξη του στην περίπτωση της εκτύπωσης (δηλαδή περνάει κατά την ψύξη του από όλες τις κατάλληλες θερμοκρασίες για την κρυσταλλοποίηση του υλικού). Μια πρώτη σχετικά εύκολα εφαρμόσιμη λύση για τη επίτευξη γρηγορότερης ψύξης είναι η εγκατάσταση μικρών ανεμιστήρων για την αλλαγή του θερμού αέρα γύρω από το μόλις θερμασμένο υλικό για την πιο γρήγορη ανταλλαγή ποσοτήτων θερμότητας με το περιβάλλον. Ένα ακόμα βήμα πιο πέρα θα μπορούσε να είναι η χρήση ανεμιστήρων προώθησης κρύου αέρα.

Από την έρευνα της ανακύκλωσης PET πολύ σημαντική είναι η πληροφορία ότι εάν το υλικό έχει ρύπους και υγρασία κατά την αναθέρμανση του σε θερμοκρασίες άνω του T_m θα υπάρχουν συνέπειες στο εγγενές ιξώδες του υλικού και άρα και στις μηχανικές του ιδιότητες. Οπότε είναι καλό οι φιάλες να καθαρίζονται και να ξεραίνονται ή έστω στεγνώνονται επαρκώς πριν την επεξεργασία τους. Αυτό σημαίνει επίσης ότι πρέπει να είναι σε τέτοια καθαρή και ξηρή κατάσταση και πριν την διαδικασία μετατροπής διότι το σωληνοειδές σχήμα που παίρνει η λωρίδα μετά την μετατροπή της μπορεί να κρατήσει-εγκλωβίσει εύκολα υγρασία στο κενό που έχει στο εσωτερικό του το παραγόμενο νήμα. Τέλος, μετά την μετατροπή του θα πρέπει να αποθηκεύεται σε ξηρό χώρο ή σε σακούλα αφαίρεσης αέρα αεροστεγώς ώστε να μην αποκτήσει υγρασία μέχρι την χρήση του για εκτύπωση ή πριν την χρήση του να περνάει από κάποιο σύστημα αφύγρυνσης.

IV. Υλικά και μεθοδολογία πειραμάτων και σχεδίασης

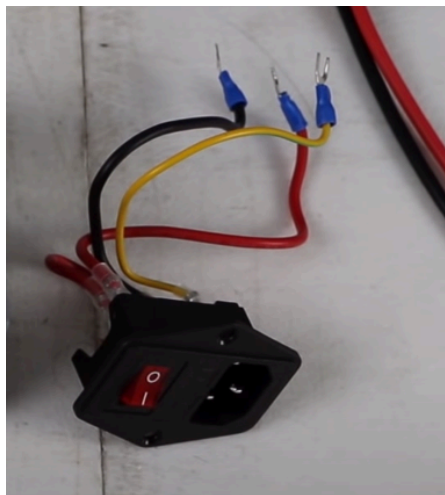
Αναφορά των υλικών και εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη, συμπεριλαμβανομένων των φιαλών PET και του εξοπλισμού τρισδιάστατης εκτύπωσης

1. Τροφοδοτικό LED IP20 Ισχύος 350W με Τάση Εξόδου 24V 147-70539



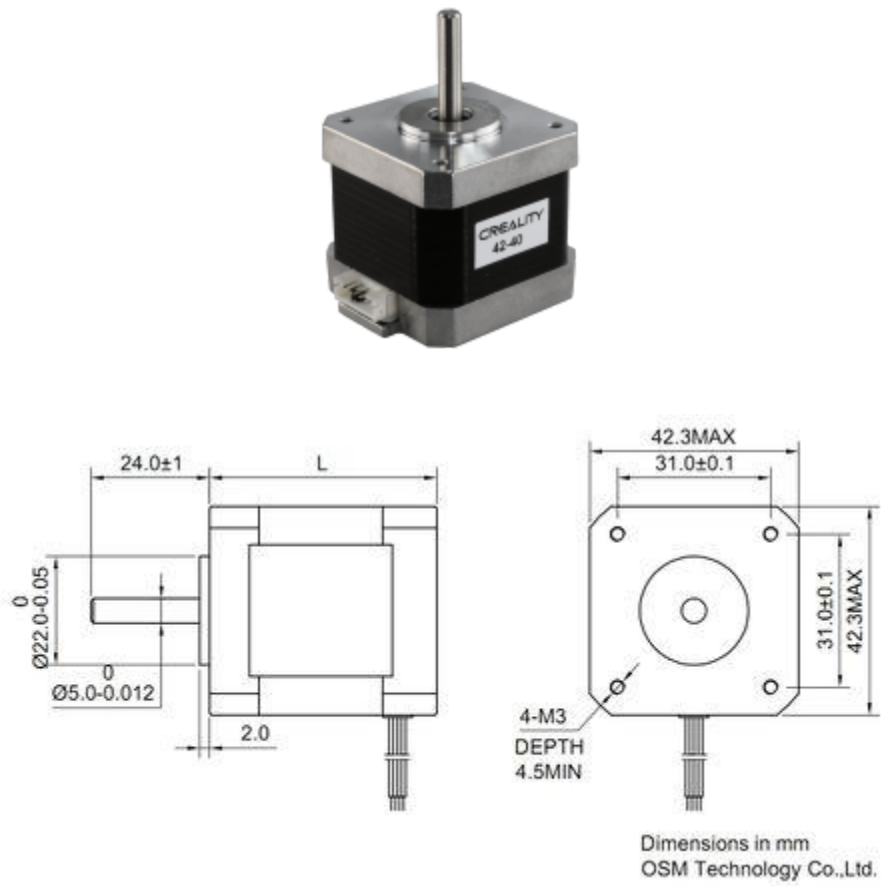
Εικ. 27 - Τροφοδοτικό

2. Creality 3D Ender-3 Power Switch - διακόπτης ρεύματος



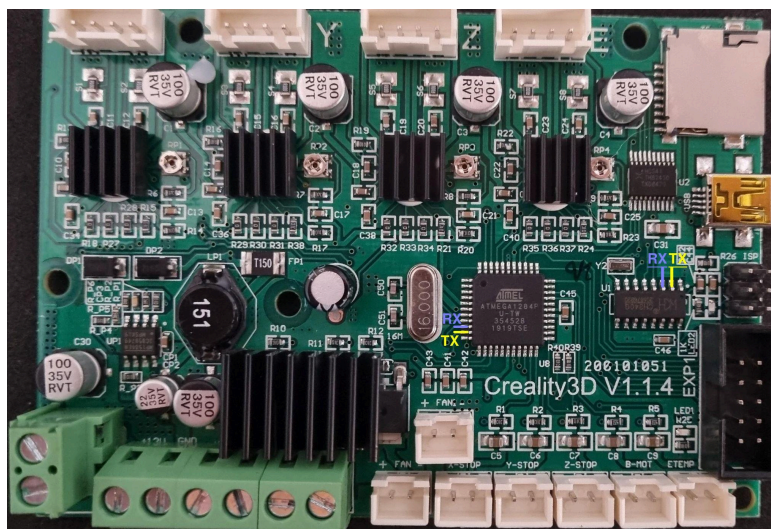
Εικ. 28 - Διακόπτης ρεύματος

3. Creality3D 42-40 stepper motor - βηματικός κινητήρας



Εικ. 29 - Βηματικός κινητήρας

4. Creality motherboard V1.1.4 - μητρική πλακέτα



Εικ. 30 - Μητρική πλακέτα

5. Creality Ender 3 heat block - μπλοκ θέρμανσης



Εικ. 31 - Μπλοκ θέρμανσης

6. 1.0 brass nozzle - μπουτζίνο ακροφύσιο



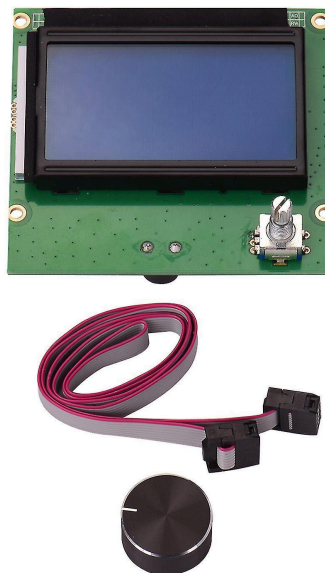
Εικ. 32 - Μπουτζίνο ακροφύσιο

7. Creality heater and temperature sensor - θερμάστρα του μπλοκ θέρμανσης (με κόκκινα καλώδια) και αισθητήρας θέρμανσης (με λευκά καλώδια)



Εικ. 33 - Θερμάστρα του μπλοκ θέρμανσης (με κόκκινα καλώδια) και αισθητήρας θέρμανσης (με λευκά καλώδια)

8. Ender 3 lcd screen - control panel - Πάνελ ελέγχου



Εικ. 34 - Πάνελ ελέγχου

9. 3Δ εκτυπωτής Ender 3 v2



Εικ. 35 - 3Δ εκτυπωτής Ender 3 v2

10. Elegoo Neptune 4 Max - 3d printer

11. Ξύλινο ράφι - ουσιαστικά μια σανίδα ξύλου για βάση του συστήματος μετατροπής

12. 1.5 L Μπουκάλια νερού και αναψυκτικών(τα μπουκάλια νερού έχουν πάχος περίπου 0.3mm ενώ των αναψυκτικών 0.6mm)

13. Κολλητήρι ρεύματος 80W με ρυθμιζόμενη θερμοκρασία μέχρι και 600 C



Εικ. 36 - Κολλητήρι ρεύματος

14. Elegoo PLA filament 1.75mm colored - βιομηχανικό νήμα εκτύπωσης PLA



Εικ. 37 - Βιομηχανικό νήμα εκτύπωσης PLA

15. Λεπίδες Φαλτσέτας 18mm

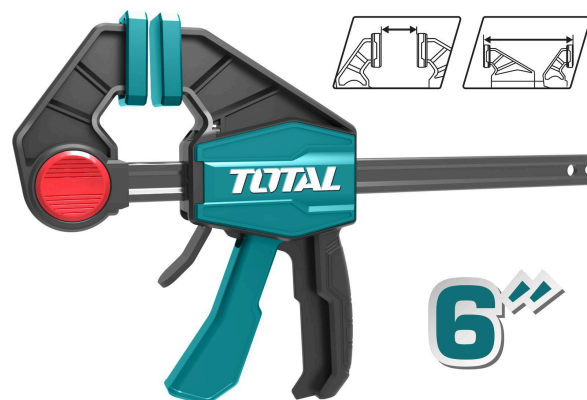


Εικ. 38 - Λεπίδα Φαλτσέτας 18mm

16. Μια μεταλλική ράβδος-σωλήνας διαμέτρου 22mm

17. Ψαλίδι

18. 2 x Total THT1340601 Αυτόματος Σφιγκτήρας Σκανδάλης με Μέγιστο Άνοιγμα 150mm



Εικ. 39 - Αυτόματος Σφιγκτήρας Σκανδάλης

19. Heat gun - θερμοπίστολο

20. Ηλεκτρικό δραπανοκατσάβιδο

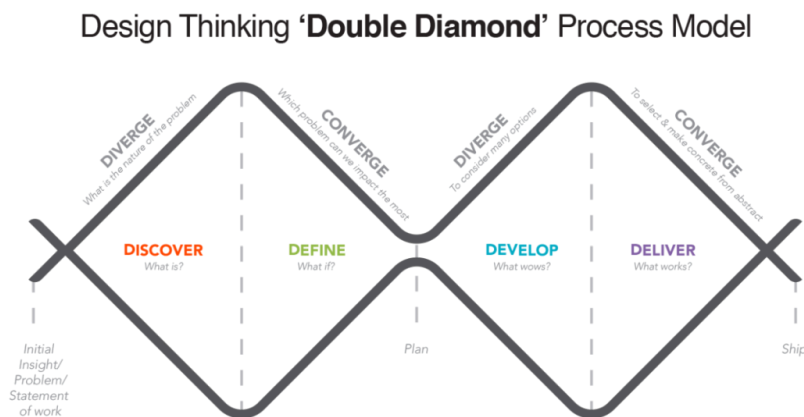
21. Ηλεκτρική τρόμπα με πιεσόμετρο

- 22. Vegetable oil - φυτικό λάδι
- 23. Βαλβίδες απο σαμπρέλες ποδηλάτου
- 24. Ρουλεμάν
- 25. Βίδες, ροδέλες και παξιμάδια
- 26. 2 x 20 λεπτά νομίσματα ευρώ
- 27. 2 x πιαστράκια ζωγραφικής

Περιγραφή των στόχων και της μεθοδολογίας σχεδίασης δοκιμαστικού πρωτοτύπου μετατροπής πλαστικών μπουκαλιών PET σε υλικό για 3Δ εκτύπωση

Οι πρωταρχικοί στόχοι του σχεδιασμού του πρωτοτύπου είναι η δημιουργία ενός απλού συστήματος μετατροπής με σκοπό την έναρξη των πειραμάτων για την ένωση των λωρίδων, δηλαδή ένα δοκιμαστικό πρωτότυπο για τη διασφάλιση της προτεινόμενης λύσης ως υλοποιήσιμη. Η κύρια αυτή προτεινόμενη λύση είναι η ένωση των λωρίδων που προκύπτουν απο την κοπή των φιαλών για την δημιουργία μιας μεγάλης συνεχόμενης λωρίδας που θα μπορεί να τροφοδοτηθεί με επιτυχία σε ένα σύστημα μετατροπής μπουκαλιών σε νήμα και στην συνέχεια σε 3Δ εκτυπωτή. Κατ επέκταση το δοκιμαστικό πρωτότυπο θα εξυπηρετήσει και τον σκοπό του να δώσει έμπνευση για περαιτέρω βελτιώσεις κάνοντας φανερά πιθανά προβληματικά σημεία που δεν θα ήταν προφανή χωρίς την χρήση ενός τέτοιου συστήματος. Ταυτόχρονα όμως θα γίνει προσπάθεια και στη σχεδίαση του πρωτοτύπου για την μέγιστη ποιότητα και ευχρηστία που μπορεί να επιτευχθεί στα όρια αυτής της φάσης σχεδίασης.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την σχεδίαση δοκιμαστικού πρωτοτύπου είναι η μέθοδος Double Diamond με τα ακόλουθα βήματα, discover , define, develop και deliver.



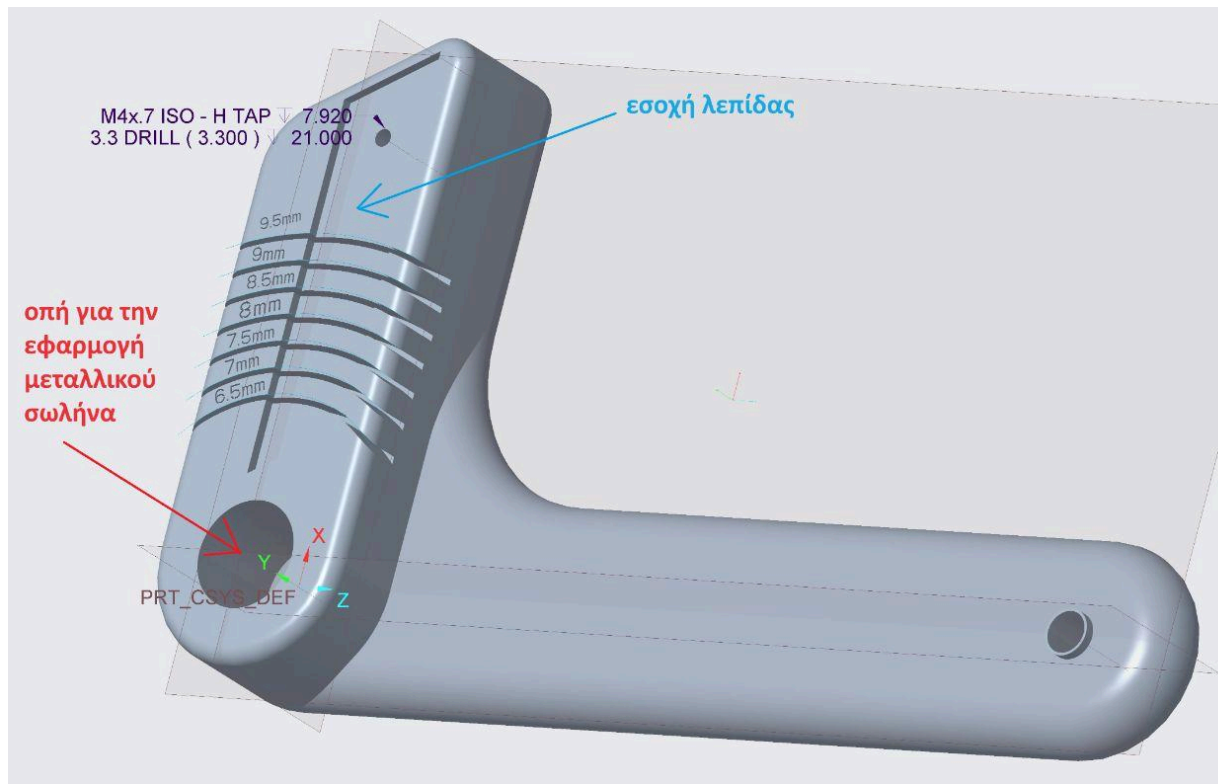
Εικ. 40 - Διάγραμμα περιγραφής της μεθοδολογίας σχεδίασης διπλού διαμαντιού(Quinn, 2022)

Το πρώτο βήμα λοιπόν ήταν η ανακάλυψη και μελέτη ήδη υπάρχοντων τρόπων, τεχνικών και υλικών υλοποίησης συστήματος μετατροπής μπουκαλιών σε νήμα για 3Δ εκτύπωση καθώς και των συστημάτων κοπής των μπουκαλιών σε λωρίδες ως προετοιμασία τους για τροφοδότηση στο σύστημα μετατροπής, πράγμα που είχε γίνει ήδη από την μελέτη της αρθρογραφίας και άλλων πηγών. Δεύτερο

βήμα ήταν ο καθορισμός των στοιχείων που πρέπει να κρατηθούν έτσι όπως έχουν από την έρευνα, ποιά πρέπει να βελτιωθούν και ποιά θα πρέπει να δημιουργηθούν εξ ολοκλήρου από την αρχή για την επίτευξη του σκοπού της ΔΕ. Δηλαδή την δημιουργία των συστημάτων που είναι απαραίτητα για την πραγματοποίηση μιας ανανεωμένης και βελτιωμένης διαδικασίας μετατροπής μπουκαλιών σε νήμα. Στην συνέχεια στο στάδιο του develop έγινε ιδεασμός και πρόχειρα σχέδια στο χέρι και στην συνέχεια στο CAD πρόγραμμα Creo Parametric τα οποία εξελίχθηκαν και οδήγησαν στο τελευταίο στάδιο, δηλαδή το deliver όπου οι προτεινόμενες λύσεις υλοποιήθηκαν και δοκιμάστηκαν. Κάποια από τα σχεδιαζόμενα συστήματα ή στοιχεία αυτών δεν είχαν άμεση επιτυχία στον πρώτο κύκλο σχεδίασης και υλοποίησης. Έτσι, για αυτά η όλη διαδικασία-μεθοδολογία σχεδίασης ή έστω μέρος αυτής επαναλαμβάνεται για άλλη μια ή και παραπάνω φορές μέχρι το αποτέλεσμα να είναι το προσδοκώμενο.

Περιγραφή των σταδίων σχεδίασης και υλοποίησης πρωτότυπου συστήματος κοπής μπουκαλιών PET

Το πρώτο στάδιο της υλοποίησης ήταν να σχεδιαστεί ένα λειτουργικό δοκιμαστικό πρωτότυπο για την κοπή των μπουκαλιών σε λωρίδες. Γρήγορα σχεδιάστηκε στο creo το πρώτο σχέδιο επηρεασμένο από την μέθοδο με χρήση πακτωμένης λεπίδας φαλτσέτας και δημιουργία εγκοπών-εσοχών για την επιλογή πλάτους λωρίδας. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι είναι πολύ απλή στην κατασκευή ενώ το μειονέκτημα της ότι η φαλτσέτα κόβει μεν το μπουκάλι αλλά φέρει μεγαλύτερη αντίσταση σε σχέση με τα τροχιζμένα ρουλεμάν. Εκτυπώθηκε με pla (πλαστικό πολυμερές) νήμα εκτύπωσης στον εκτυπωτή ender 3.

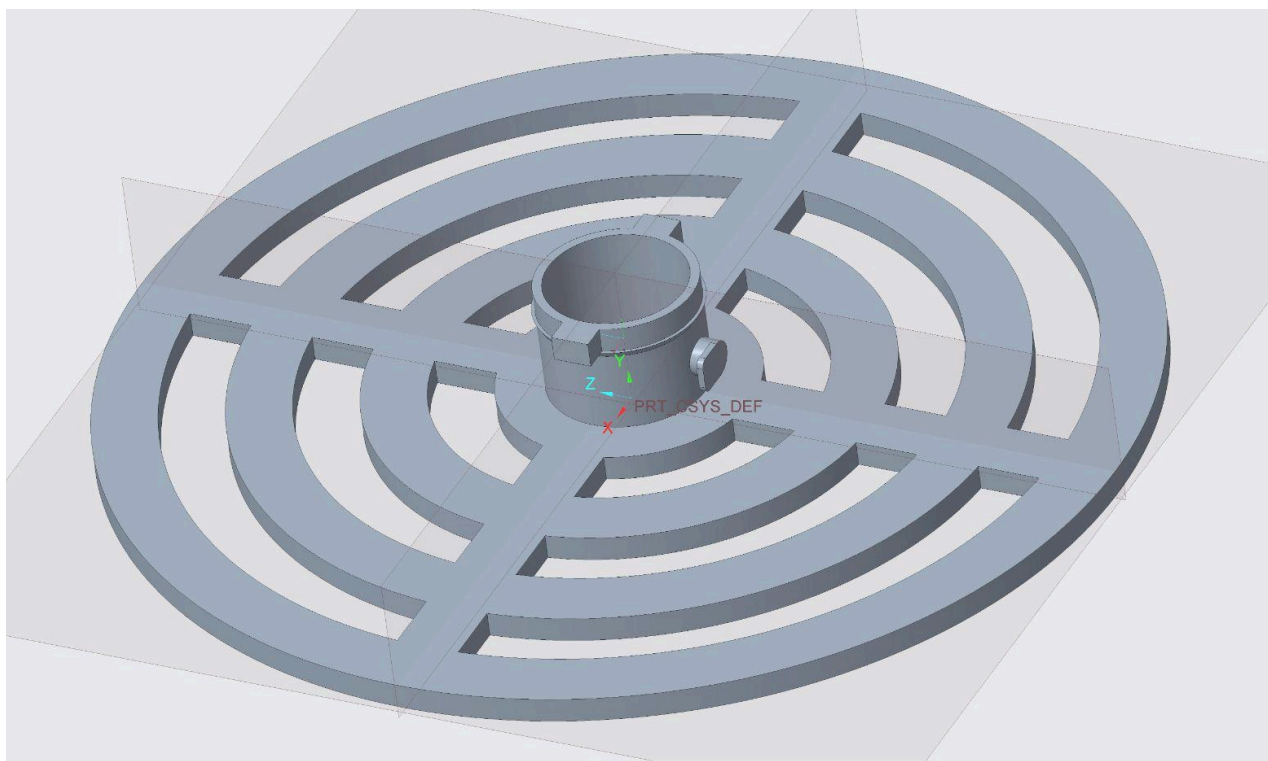


Εικ. 41 - Σχέδιο (στο λογισμικό σχεδίασης Creo) συστήματος κοπής μπουκαλιών PET σε λωρίδες 1ης γενιάς

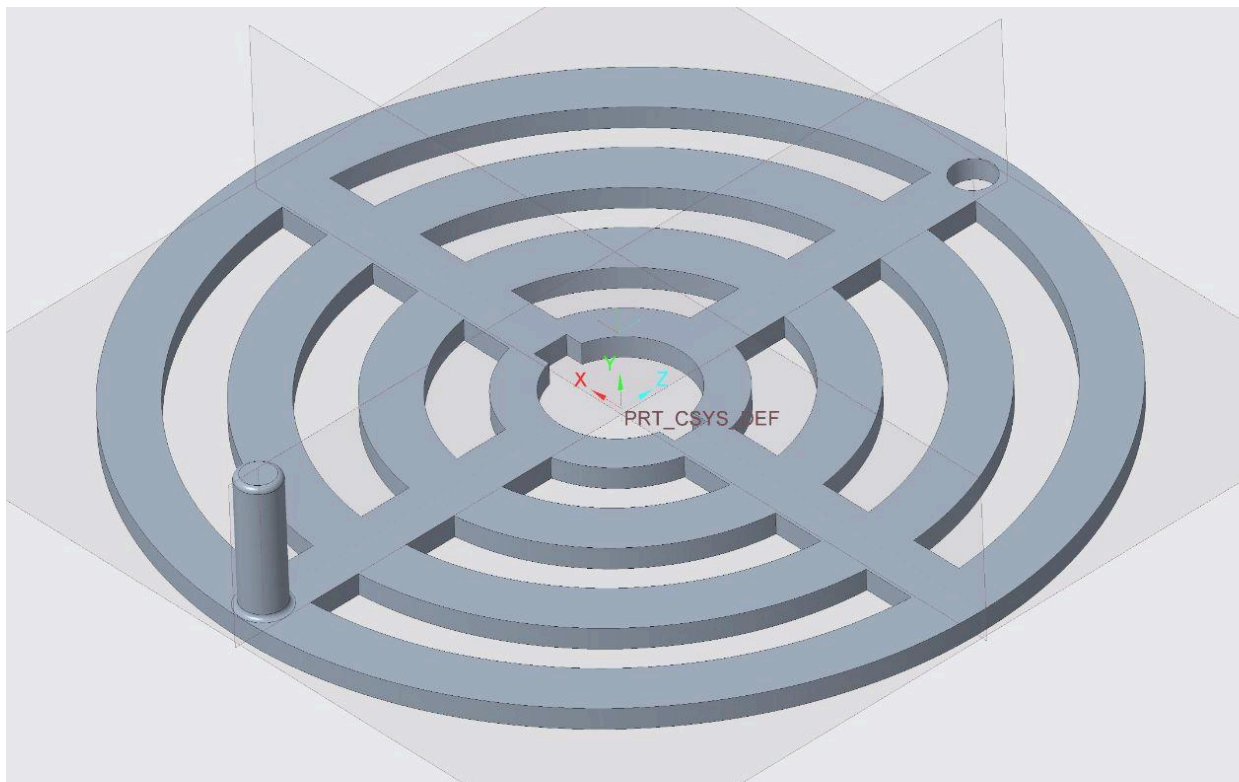
Εκεί που δείχνει το κόκκινο βελάκι είναι η οπή για τη εφαρμογή μεταλλικού σωλήνα για χρήση του ως οδηγό και άξονα περιστροφής (στο περίπου) του μπουκαλιού. Ενώ εκεί που δείχνει το μπλε βελάκι μπαίνει η λεπίδα όπως φαίνεται στην Εικ.42 με την βοήθεια δύο βιδών.



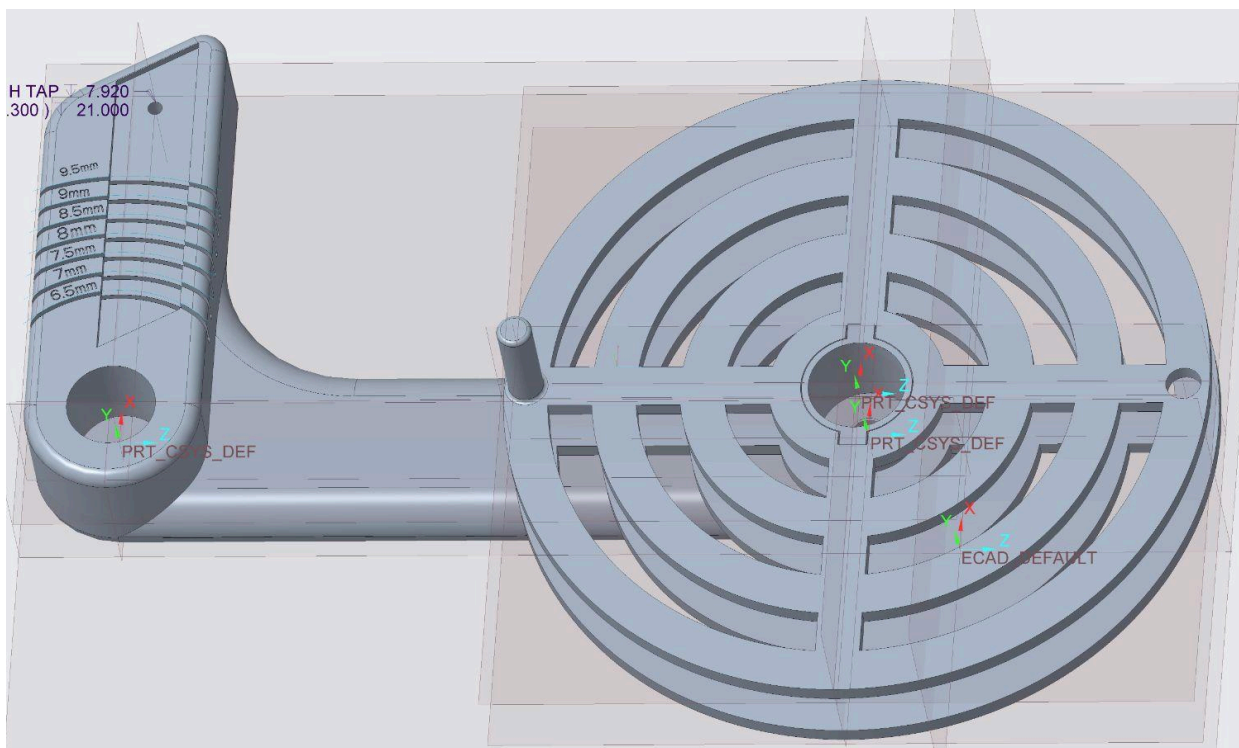
Εικ. 42 - Εκτύπωση συστήματος κοπής μπουκαλιών PET σε λωρίδες 1ης γενιάς



Εικ. 43 - Σχέδιο κάτω μέρους καρουλιού λωρίδας του συστήματος κοπής μπουκαλιών PET σε λωρίδες 1ης γενιάς



Εικ. 44 - Σχέδιο πάνω μέρους καρουλιού λωρίδας του συστήματος κοπής μπουκαλιών PET σε λωρίδες 1ης γενιάς

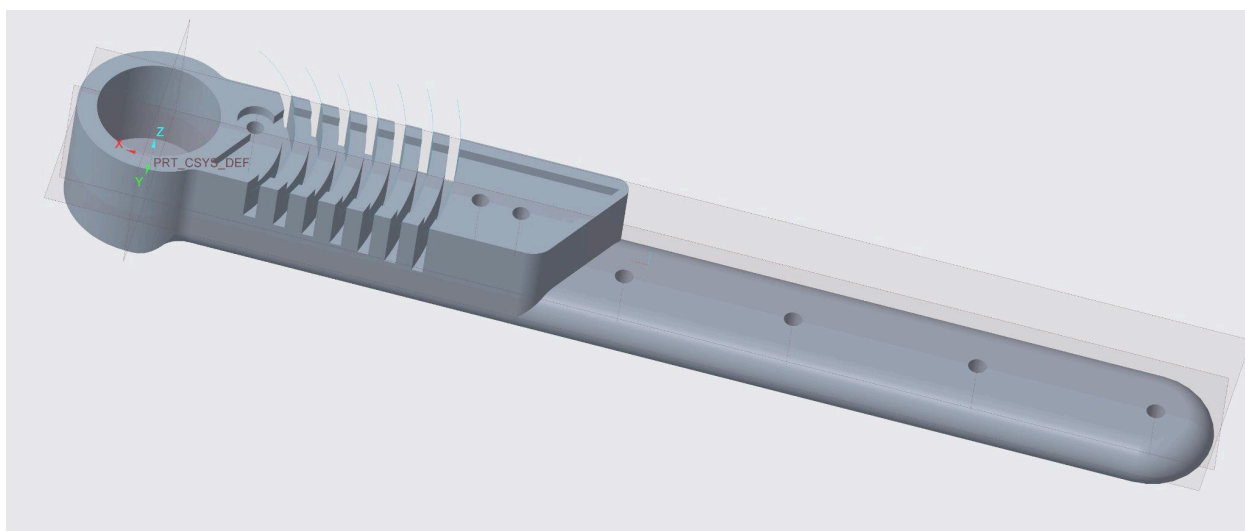


Εικ. 45 - Σχέδιο συστήματος κοπής μπουκαλιών PET σε λωρίδες 1ης γενιάς μαζί με το καρουλι λωρίδας

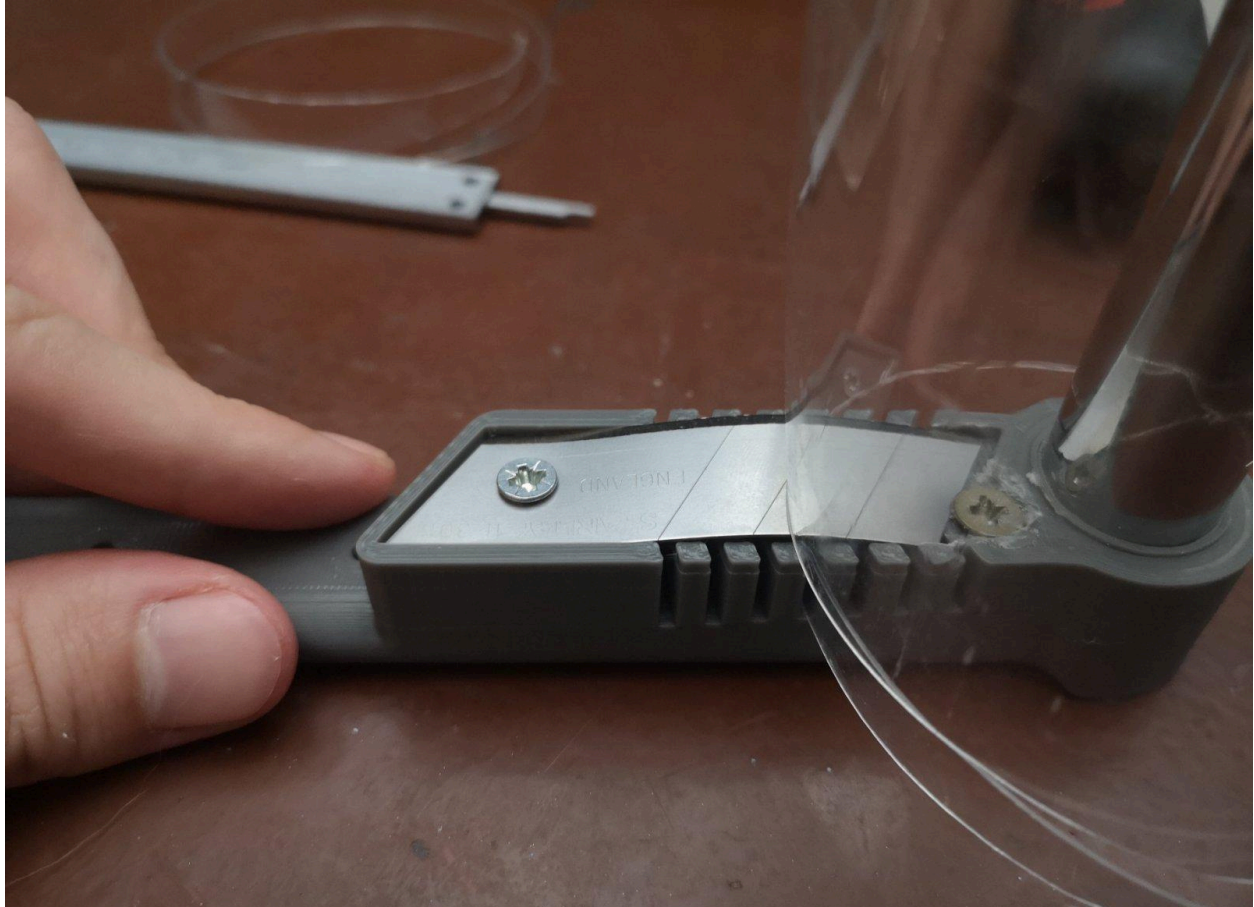
Το σχέδιο αυτό είχε σκοπό να κόβει τα μπουκάλια σε λωρίδες επιλεγμένου πλάτους καθώς παράλληλα τυλίγεται γύρω από το καρούλι με αποσπώμενο πάνω κομμάτι για την εύκολη αγκίστρωση της λωρίδας στο καρούλι. Το καρούλι περιστρέφεται με την εφαρμογή ενός ρουλεμάν και πύρου ως άξονα περιστροφής που δεν φαίνονται στα παραπάνω εικονιζόμενο σχέδια(Εικ. 41, 43, 44, 45 στην Εικ. 42 φαίνεται ο πύρος σε συναρμολόγηση με το κύριο κομμάτι). Δηλαδή θα γινόταν η πρώτη εγκοπή στο μπουκάλι, μετά θα περνάει από το κοπίδι για να κοπεί λίγο στην αρχή μέχρι να περαστεί η αρχή της λωρίδας στο καρούλι και έπειτα με την περιστροφή του καρουλιού απο την σχεδιασμένη λαβή του επάνω αποσπόμενου κομματιού θα ολοκληρωνόταν η κοπή του μπουκαλιού σε λωρίδα. Αν η τεχνική με την περιστροφή του καρουλιού δεν δούλευε, το μέρος του κύριου κομματιού του συστήματος κοπής που στηρίζεται πάνω το καρούλι θα χρησιμεύει ως λαβή για το χειροκίνητο τράβηγμα της λωρίδας και κοπής του μπουκαλιού.

Το σχέδιο αυτό ήταν αποτυχία για διάφορους λόγους. Αρχικά ο σχεδιασμός του υποσυστήματος για την περιστροφή του καρουλιού είχε λάθη που το έκαναν να παλατζάρει και να μην περιστρέφεται σωστά και κάθετα στον άξονα περιστροφής του (ίσως με χρήση δύο ρουλεμάν στον σχεδιασμό να περιστρεφόταν καλύτερα, αλλά υπήρξε έλλειψη σε ρουλεμάν). Επίσης το αποσπώμενο κομμάτι του παλάτζαρε και αυτό με την προσπάθεια περιστροφής του καρουλιού απο την σχεδιασμένη λαβή. Το καρούλι αφαιρέθηκε αλλά και με το χειροκίνητο τράβηγμα της λωρίδας υπήρχαν επίσης προβλήματα. Το κυριότερο ήταν ότι η λαβή έπεφτε σχεδόν πάνω στην ευθεία από την οποία θα τραβιόταν η λωρίδα με αποτέλεσμα να είναι άβολη έως απίθανη η χρήση του.

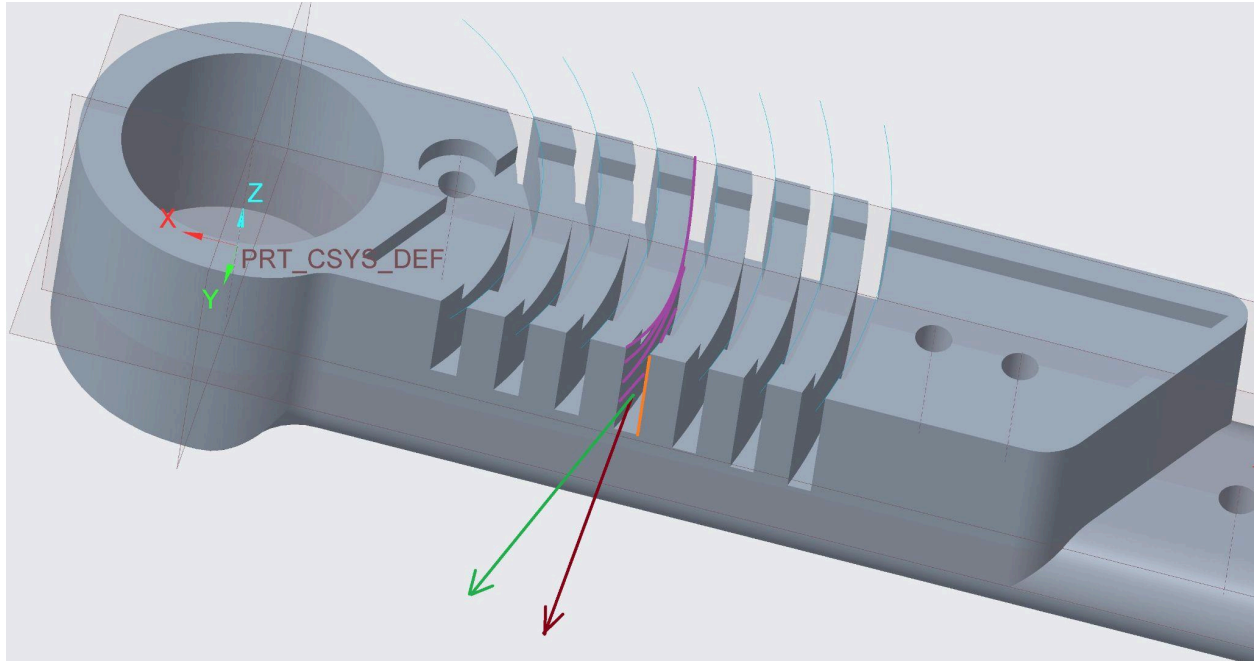
Οπότε το σχέδιο τροποποιήθηκε για την διόρθωση αυτού του τελευταίου λάθους, αλλά και για να πληροί την απαίτηση που είχε παραμεληθεί στο πρώτο σχέδιο, να μπορεί να πακτωθεί σε τραπέζι ή σε κάποια άλλη επιφάνεια.



Εικ. 46 - Σχέδιο συστήματος κοπής μπουκαλιών PET σε λωρίδες 2ης γενιάς



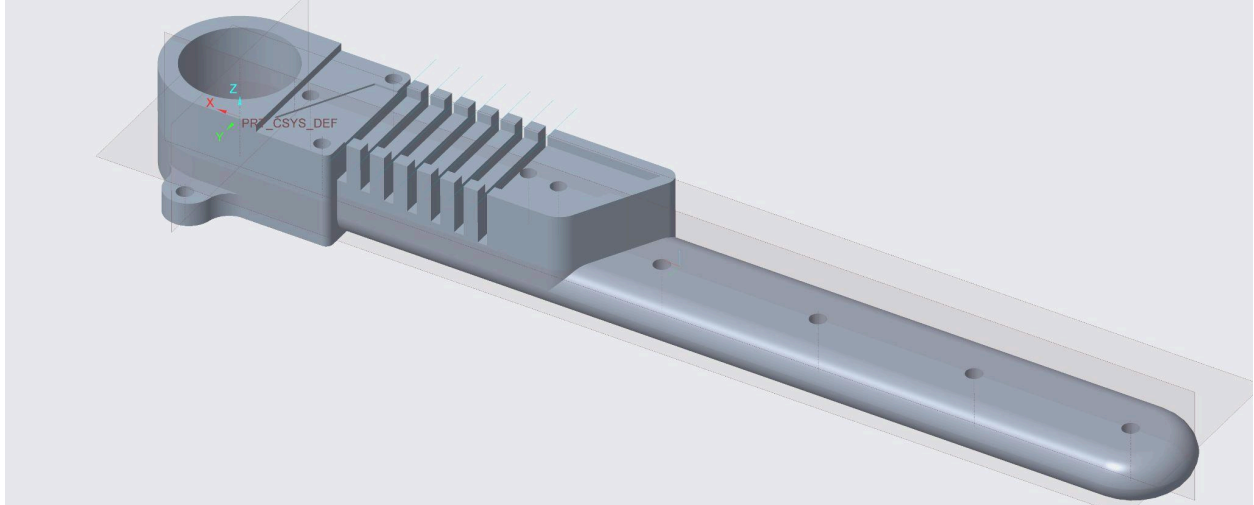
Εικ. 47 - Εκτύπωση συστήματος κοπής μπουκαλιών PET σε λωρίδες 2ης γενιάς, που είναι εμφανής ο λυγισμός της λεπίδας κατά την κοπή



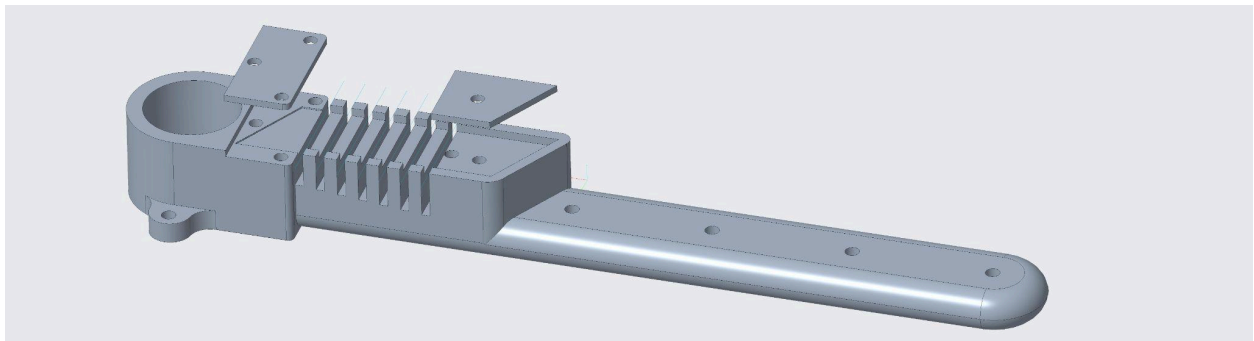
Εικ. 48 - Σήμανση διευθύνσεων και σημείων αναφοράς στο συστήματος κοπής μπουκαλιών PET σε λωρίδες 2ης γενιάς

Για άλλη μια φορά, το σχέδιο είχε μια πληθώρα ελαττωμάτων. Πρώτον όπως φαίνεται από την εικόνα 47 το μπουκάλι κόκα κόλας είναι αρκετά σκληρό και η πάκτωση της λεπίδας αρκετά ανεπαρκής ώστε η λεπίδα να λυγίζει και ανασηκώνεται κατά την διάρκεια της προσπάθειας κοπής. Τέλος, αν τραβηχτεί η λωρίδα κάθετα στην λαβή του συστήματος (κόκκινο βελάκι) υπάρχουν τριβές που προκαλούν αντίσταση στην κοπή στα σημεία που έχουν επισημανθεί με πορτοκαλί και μωβ. Η τριβή θα είναι ελάχιστη μικρότερη αν η λωρίδα τραβηχτεί στην διεύθυνση του πράσινου βέλους, δηλαδή μόνο στο μώβ. Αλλά το σύστημα είναι σχεδιασμένο για να τραβιέται η λωρίδα στην διεύθυνση του κόκκινου βέλους κάθετα στην λαβή, ενώ στην διεύθυνση του πράσινου βέλους είναι άβολο, εκτός αν πακτωθεί όλο το σύστημα σε κάποια σταθερή επιφάνεια, αλλά και πάλι θα υπάρχουν οι τριβές στα σημεία της εσοχής (μώβ) και η λεπίδα θα ανασηκώνεται με αποτέλεσμα να μην κόβεται σωστά η λωρίδα.

Το σχέδιο τρίτης γενιάς είναι μια μικρή τροποποίηση του προηγούμενου με στόχο την καλύτερη σταθεροποίηση της λεπίδας (ώστε να μην λυγίζει και σηκώνεται) και την αποφυγή των σημείων τριβής στις εσοχές.



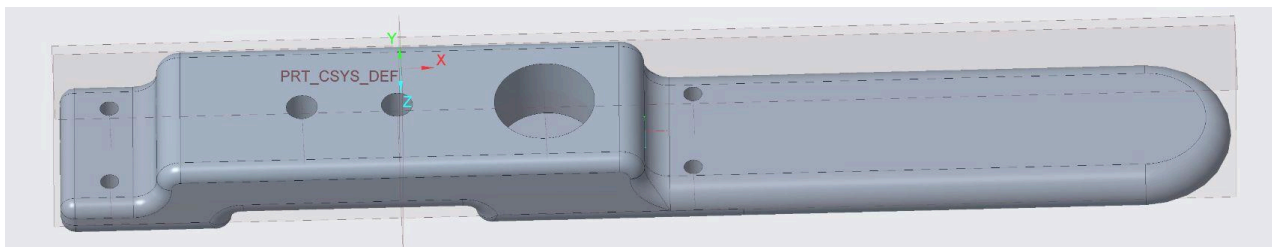
Εικ. 49 - Σχέδιο του βασικού κομματιού του συστήματος κοπής μπουκαλιών PET σε λωρίδες 3ης γενιάς



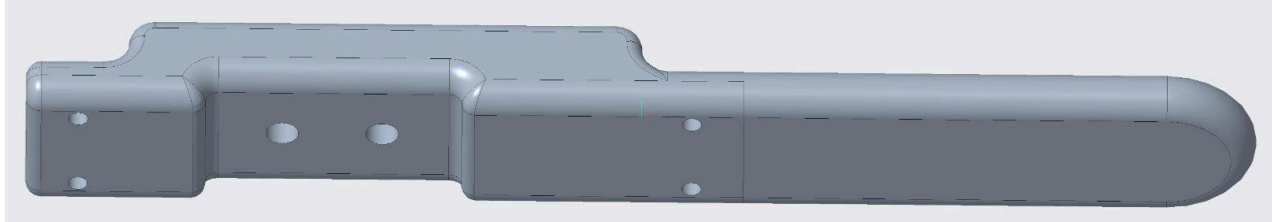
Εικ. 50 - Σχέδιο ολοκληρωμένου συστήματος κοπής μπουκαλιών PET σε λωρίδες 3ης γενιάς

Απο τη δοκιμή κοπής μπουκαλιών με το εκτυπωμένο πρωτότυπο φάνηκε ότι η αντίσταση λόγω τριβών είχε μειωθεί σημαντικά αλλά λόγω του πάχους του μπουκαλιού (μπουκάλι αναψυκτικού πάχους 0.6mm) και την εγγενή σκληρότητα το υλικού PET καθώς και την για άλλη μια φορά ανεπαρκή σταθεροποίηση της λεπίδας αυτή λυγίζει και σηκώνεται όπως και στο προγενέστερο σχέδιο.

Έτσι γεννήθηκε η ανάγκη της αλλαγής τύπου συστήματος κοπής και σχεδιάστηκε σύστημα με χρήση της μεθόδου χρήσης λεπίδας φαλτσέτας, βίδες, παξιμάδια και ροδέλες με ρυθμιζόμενο πλάτος κοπής με την χρήση των ροδέλων.

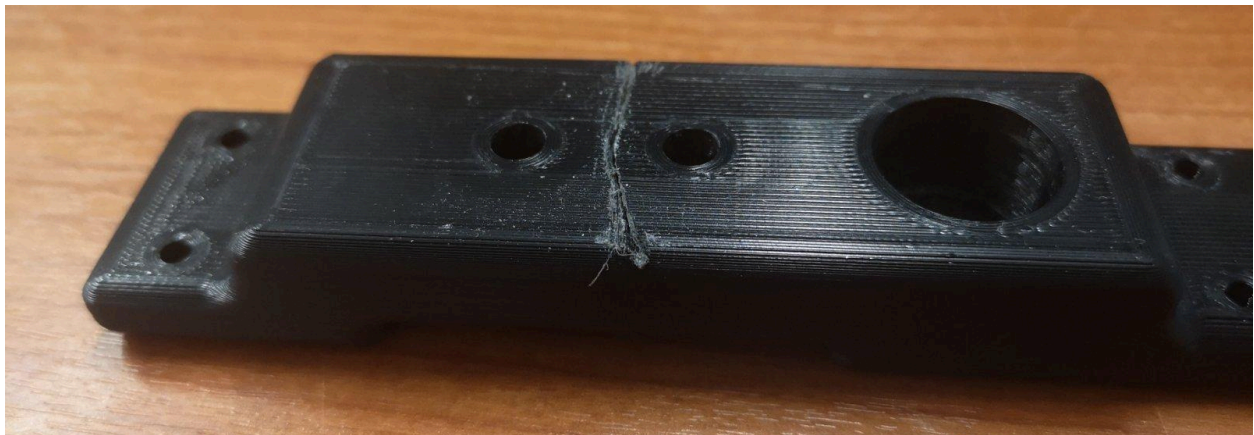


Εικ. 51 - Σχέδιο συστήματος κοπής μπουκαλιών PET σε λωρίδες 4ης γενιάς



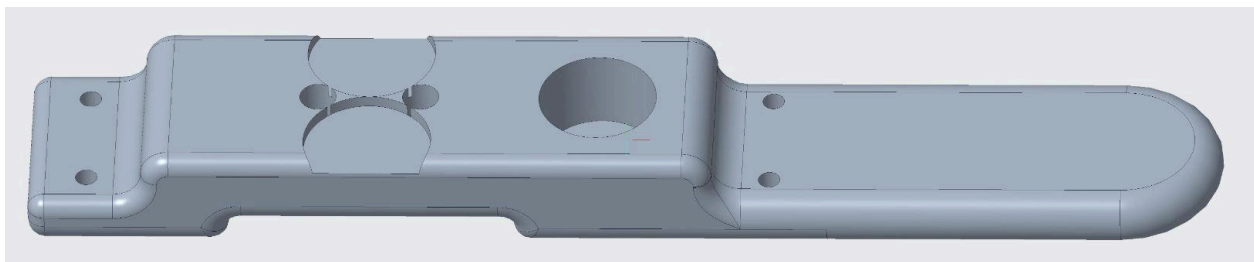
Εικ. 52 - Σχέδιο συστήματος κοπής μπουκαλιών PET σε λωρίδες 4ης γενιάς(2η όψη)

Από αυτό το σχέδιο και πέρα θα εφαρμόζονται σφιγκτήρες στα δύο άκρα του συστήματος για την σταθεροποίηση του στην άκρη μιας σταθερής έδρας με σκοπό το πιο εύκολο και σταθερό τράβηγμα της παραγόμενης λωρίδας κατά την κοπή. Για μελλοντική χρήση θα σχεδιάζονται και οπές στα άκρα των συστημάτων για την πάκτωση του συστήματος σε κάποια επιφάνεια. Αυτό το σχέδιο φάνηκε να δουλεύει αρκετά καλά πέρα από το ότι δεν έβγαζε λωρίδες με πολύ σταθερό πλάτος (λόγω του ότι οι οπές για τις βίδες δεν είναι αρκετά κοντά αφήνοντας έτσι μεγάλο άνοιγμα στο σημείο ανάμεσα στις ροδέλες που περνάει το μπουκάλι για να κοπεί με αποτέλεσμα να μην οδηγείτε σωστά προς την κοπή του) και επίσης είχε το θανάσιμο ελάττωμα ότι το μπουκάλι κατά την κοπή χάραζε σταδιακά ολο και πιο βαθιά το εκτυπωμένο με PLA κομμάτι όπως φαίνεται και στην επόμενη φωτογραφία (Εικ. 53).

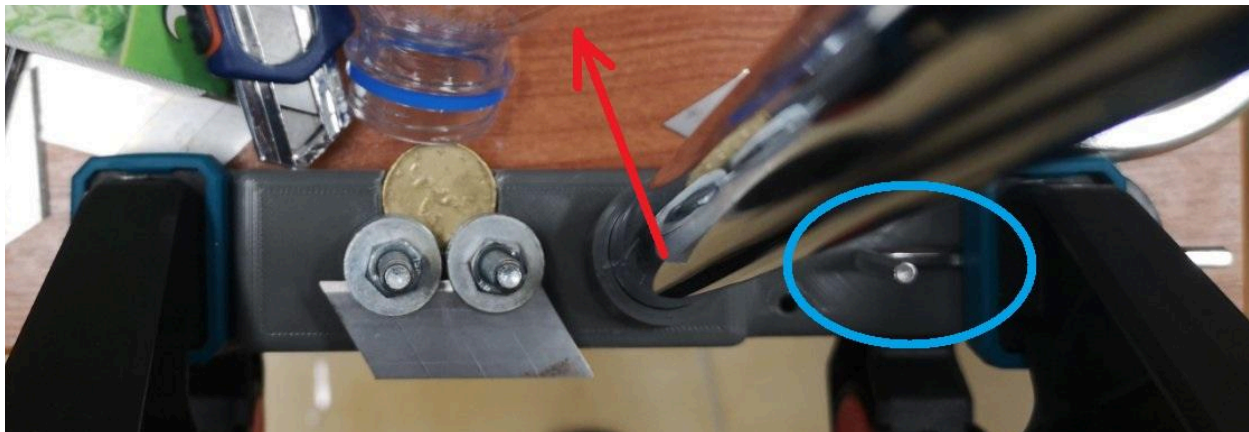


Εικ. 53 - Εκτύπωση συστήματος κοπής μπουκαλιών PET σε λωρίδες 4ης γενιάς με εμφανή φθορά-χάραξη

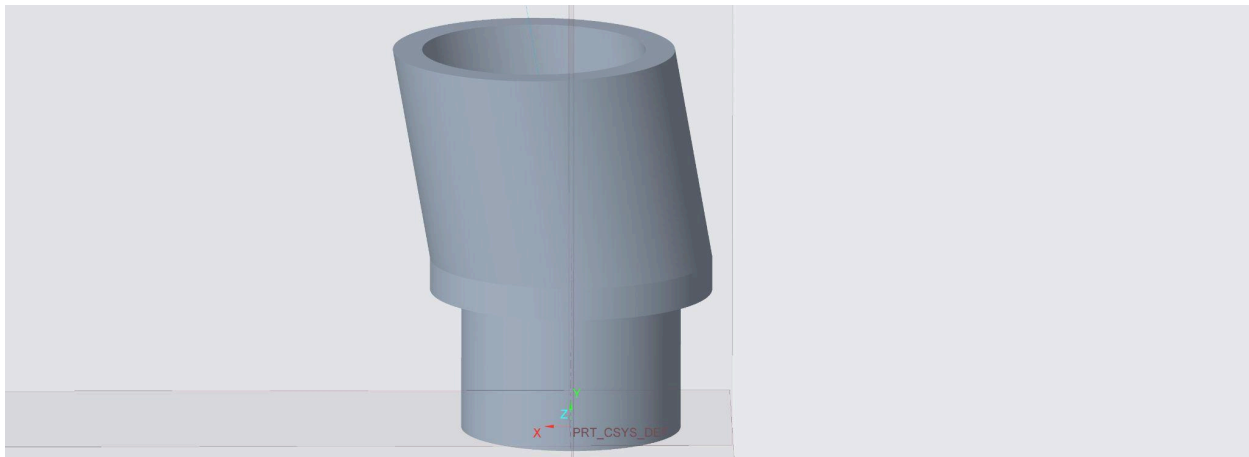
Έτσι το επόμενο σχέδιο ήρθε να διορθώσει αυτά τα δύο προαναφερθέντα ελαττώματα με την απαραίτητη σμίκρυνση της απόστασης των δύο οπών για τις βίδες και με την εφαρμογή υποδοχών για μεταλλικά νομίσματα των 20 λεπτών για να αποφευχθεί η χάραξη του συστήματος κατά την κοπή.



Εικ. 54 - Σχέδιο συστήματος κοπής μπουκαλιών PET σε λωρίδες 5ης γενιάς



Εικ. 55 - Εκτύπωση συστήματος κοπής μπουκαλιών PET σε λωρίδες 5ης γενιάς μαζί με όλα τα απαραίτητα εξαρτήματα (έχει γίνει σήμανση διεύθυνσης και εξαρτήματος για αναφορά)



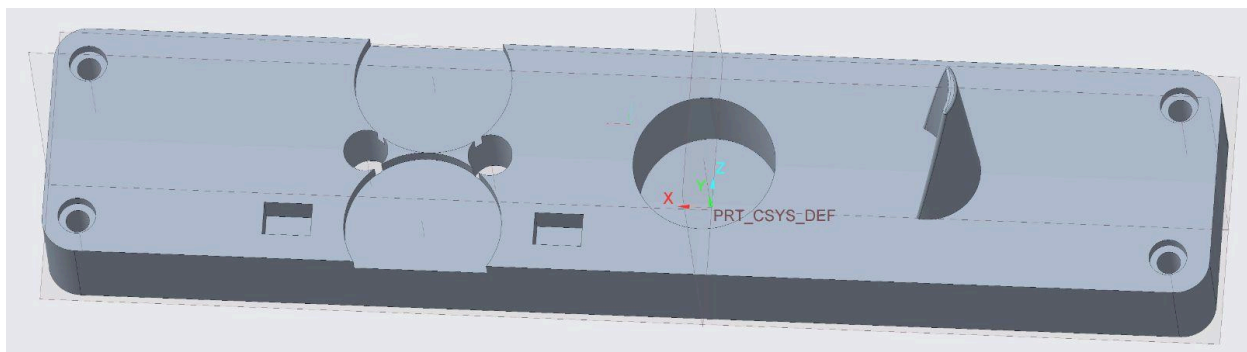
Εικ. 56 - Σχέδιο extension συστήματος κοπής μπουκαλιών PET σε λωρίδες 5ης γενιάς

Τα προαναφερθέντα ελαττώματα διορθώθηκαν όπως αναμενόταν και είχε σχεδιαστεί αλλά ήρθαν στην επιφάνεια άλλα καινούργια. Ένα από αυτά προυπήρχε αλλά δεν του είχε δοθεί βαρύτητα. Αυτό ήταν ότι το μπουκάλι κατά την κοπή λυγίζει και δεν μπορούσε να τροφοδοτηθεί σωστά στο σημείο της κοπής, κυρίως λόγω και του βαριδίου που εφαρμόζεται στο πάνω μέρος του μπουκαλιού για να έχει μια τάση προς τα κάτω για να κόβει σταθερά το ίδιο πλάτος λωρίδα. Έτσι σχεδιάστηκε ένα extension που φαίνεται στην πάνω εικόνα για να μπαίνει στην οπή που ήταν προορισμένη για των μεταλλικό σωλήνα οδηγό του μπουκαλιού. Αυτό το extension έχει δικιά του οπή για τον σωλήνα αλλά σε πλάγια διεύθυνση, αυτο θεωρήθηκε σημαντικό να δοκιμαστεί για να διορθώσει το πρόβλημα του τσαλακώματος του μπουκαλιού κατά την κοπή του, εφόσον έχει αναφερθεί ως σημαντικό το να είναι λίγο γυρτός ο άξονας οδηγός του μπουκαλιού (προς την κατεύθυνση που δηλώνει το κόκκινο βελάκι στην Εικ 55) σε ένα βίντεο που είχε μελετηθεί στο κομμάτι την έρευνας. Δοκιμάστηκε λοιπόν αλλά επέφερε πενιχρά αποτελέσματα. Η εξήγηση των μετρίων αποτελεσμάτων αποδόθηκε στην απόσταση μεταξύ του άξονα και του σημείου κοπής που ήταν μεγαλύτερη από ότι θα έπρεπε για να δουλέψει αυτή η τεχνική.

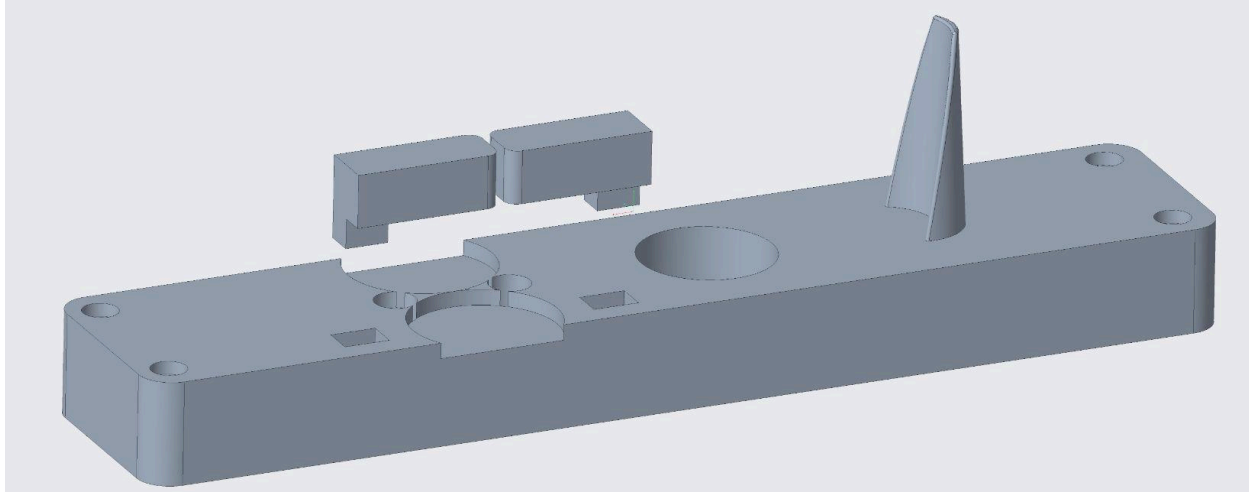
Οπότε αυτοσχεδιαστικά εφαρμόστηκε άλλη λύση με την τοποθέτηση ενός κλειδιού Allen όπως φαίνεται στην δεύτερη από πάνω φωτογραφία κυκλωμένο με μπλε. Τοποθετήθηκε εκεί για να κρατάει την κομμένη κάτω άκρη του μπουκαλιού ανοιχτή και να εμποδίζει έτσι το τσαλάκωμα του μπουκαλιού κατά την διαδικασία της κοπής. Με την παρέμβαση αυτή το σύστημα δούλεψε ικανοποιητικά.

Κατά την χρήση αυτού του συστήματος παρατηρήθηκε ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας για την σωστή και με συνεπές πλάτος κοπή μπουκαλιού σε λωρίδα. Ο παράγοντας αυτός ήταν να παραμένει η λωρίδα κατά και έπειτα την κοπή κάθετη στην λεπίδα. Αυτό θα μπορούσε να γίνει με σχεδίαση οδηγών για την λωρίδα μετά το σημείο κοπής. Διότι χωρίς οδηγούς και όταν η απόσταση ανάμεσα στις δύο στήλες που σχηματίζουν οι ροδέλες δεν είναι ίσα ίσα για να περνάει το πάχος του μπουκαλιού παρατηρήθηκε ότι μετά το σημείο κοπής η λωρίδα περιστρέφεται και αλλάζει διευθύνσεις με αποτέλεσμα να παραμορφώνει το μπουκάλι μέχρι και λίγο πριν την κοπή του και έτσι να αλλάζει το πλάτος της λωρίδας. Παρατηρήθηκε επίσης ότι όταν η λωρίδα παραμένει κάθετη με αυτοσχέδια παρέμβαση με το χέρι, το πλάτος της λωρίδας έχει μεγάλη συνέπεια και το μπουκάλι παραμορφώνεται-τσαλακώνεται πολύ πιο δύσκολα.

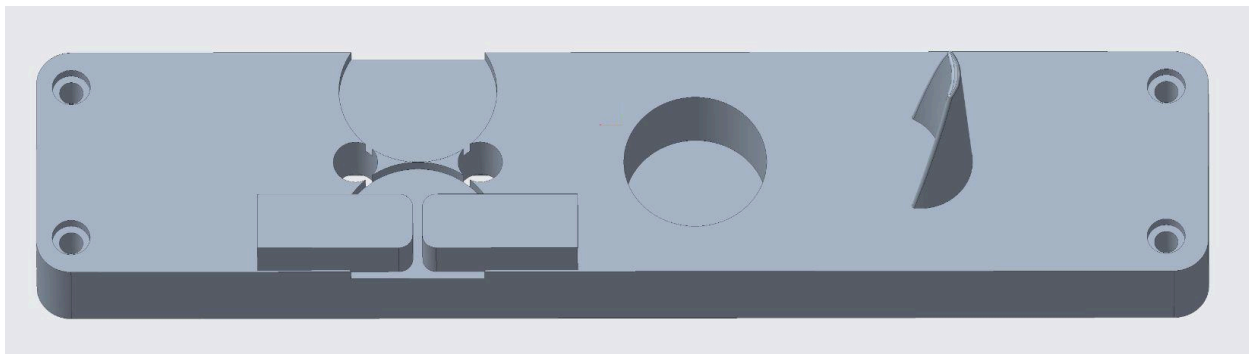
Όποτε η ανάγκη ενός νέου βελτιωμένου σχεδίου συστήματος κοπής ήταν σημαντική. Η απόσταση ανάμεσα στις στήλες ροδελών δεν μπορούσε να ρυθμιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια γιατί οι ροδέλες κολυμπούν γύρω από την βίδα που τις διαπερνά. Οπότε το μόνο που μπορούσε να γίνει ήταν να σχεδιαστούν οδηγοί για την λωρίδα μετά το σημείο κοπής. Και έτσι έγινε.



Εικ. 57 - Σχέδιο συστήματος κοπής μπουκαλιών PET σε λωρίδες 6ης γενιάς

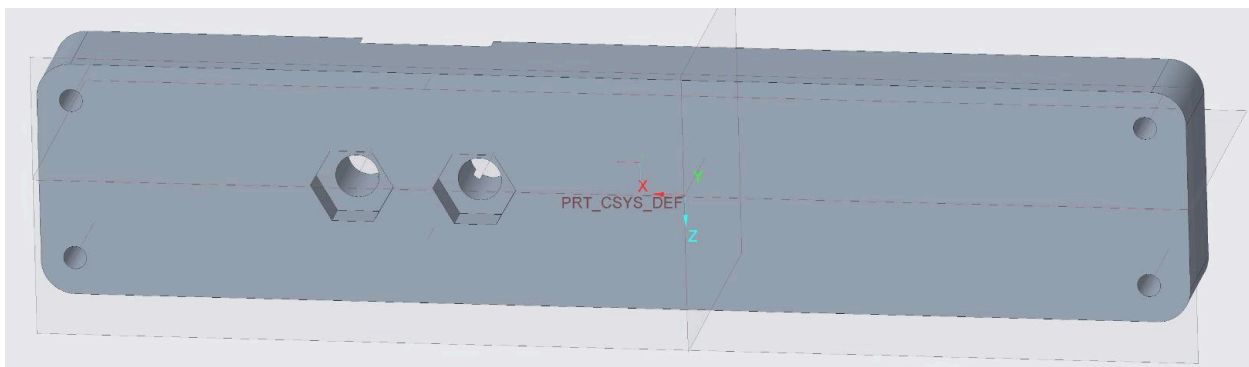


Εικ. 58 - Σχέδιο συστήματος κοπής μπουκαλιών PET σε λωρίδες 6ης γενιάς μαζί με τα δύο κομμάτια οδηγούς



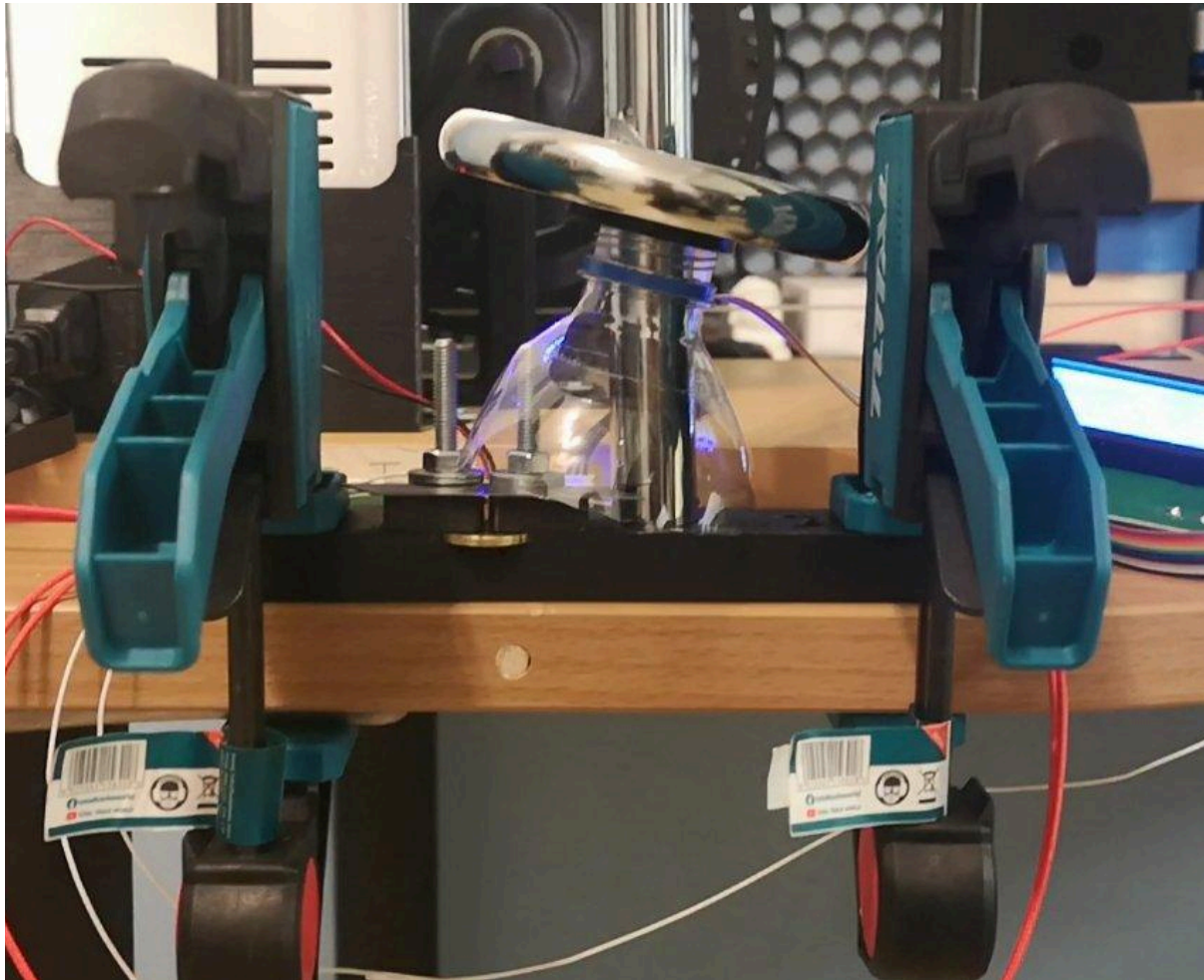
Εικ. 59 - Σχέδιο συστήματος κοπής μπουκαλιών PET σε λωρίδες 6ης γενιάς μαζί με τα δύο κομμάτια οδηγούς συναρμολογημένα

Στο σύστημα αυτό έχουν σχεδιαστεί εσοχές για την εφαρμογή αποσπόμενων οδηγών για την λωρίδα. Ο λόγος της σχεδίασης αποσπόμενων οδηγών είναι ότι το ύψος τους θα πρέπει να είναι εναλλάσσιμο ανάλογα με το επιθυμητό πάχος της λωρίδας και δηλαδή το ύψος τοποθέτησης της λεπίδας ανάμεσα στις ροδέλες. Έτσι εκτυπώθηκαν δύο ζευγάρια οδηγών. Ένα για τα μπουκάλια αναψυκτικού (με μικρότερο ύψος για μικρότερο πλάτος λωρίδας αφού το πάχος του μπουκαλιού είναι μεγαλύτερο των μπουκαλιών νερού) και ένα για μπουκάλια νερού.

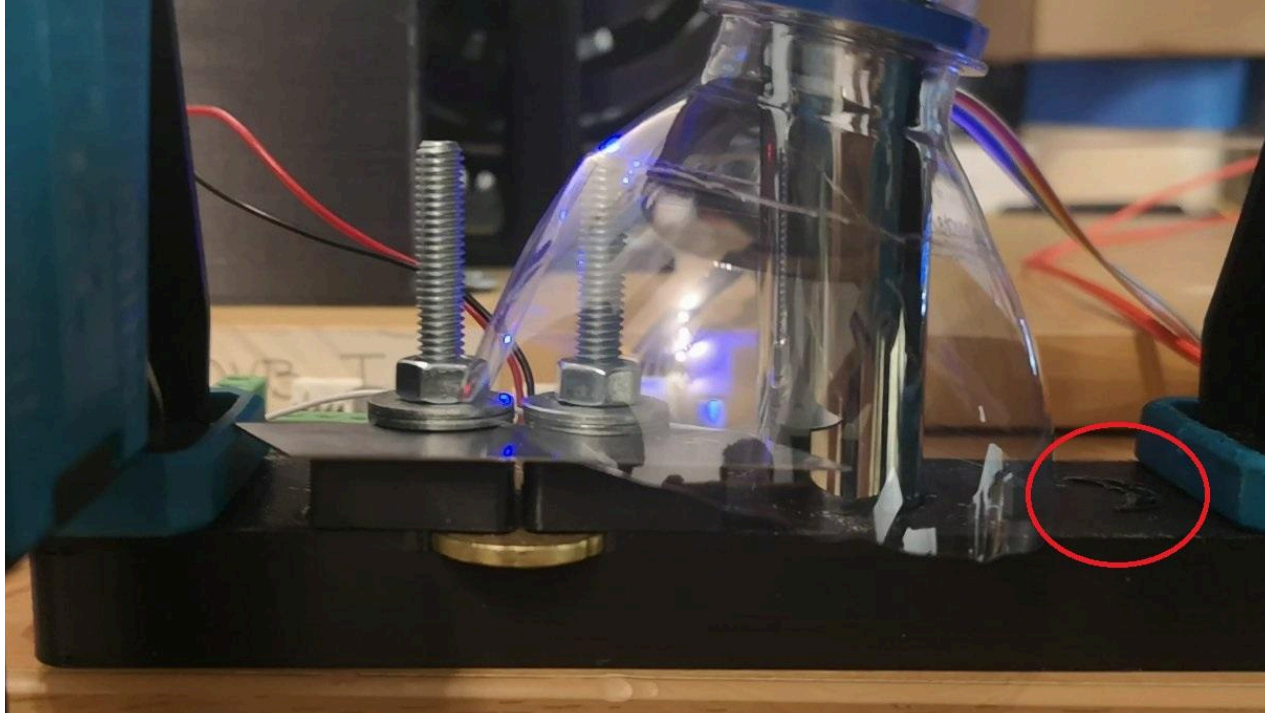


Εικ. 60 - Σχέδιο συστήματος κοπής μπουκαλιών PET σε λωρίδες βης(κάτω πλευρά)

Επίσης όπως φαίνεται στην εικόνα 60, στο σχέδιο αυτό προστέθηκαν εσοχές για τις εξάγωνες κεφαλές των βιδών. Πράγμα που θα βελτιώνει την χρήση λόγω του ότι στα προηγούμενα σχέδια που λείπουν η εσοχές όταν σφίγγει ο χρήστης τα παξιμάδια για να σταθεροποιηθεί καλά η λεπίδα ανάμεσα στις ροδέλες γυρνάνε μαζί και η βίδες, με αποτέλεσμα να πρέπει να σταθεροποιούνται αυτοσχεδιαστικά οι βίδες για να επιτευχθεί το σωστό σφίξιμο των παξιμαδιών.



Εικ. 61 - Εκτύπωση συστήματος κοπής μπουκαλιών PET σε λωρίδες βης συναρμολογημένο με όλα τα απαραίτητα εξαρτήματα

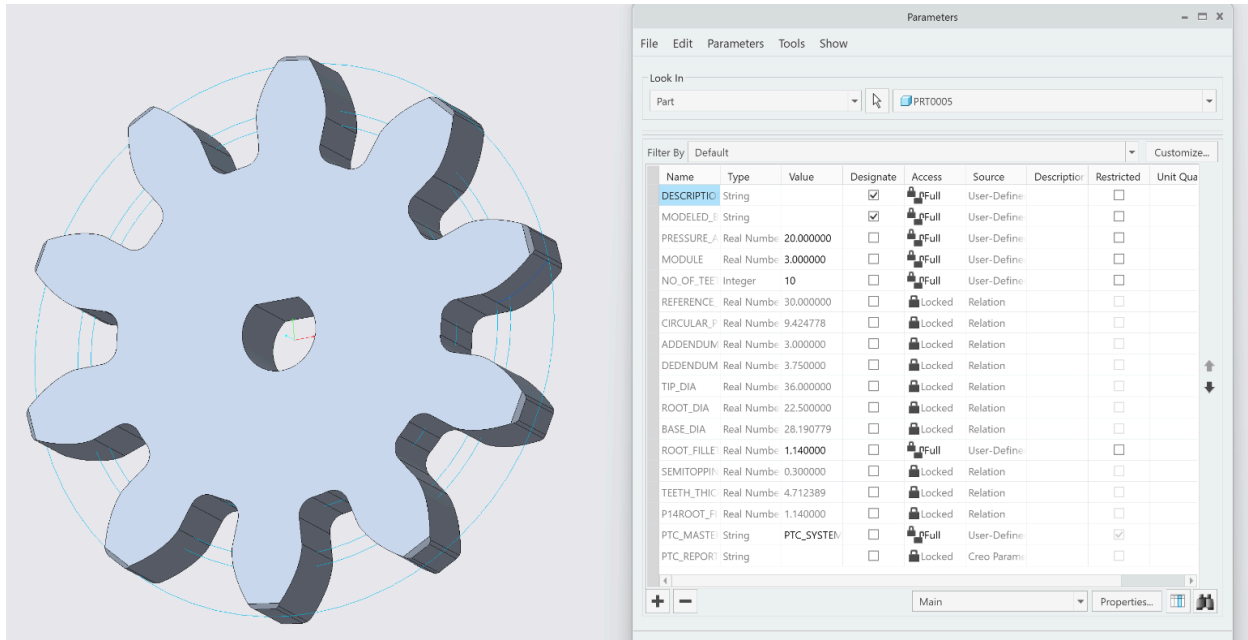


Εικ. 62 - Εκτύπωση συστήματος κοπής μπουκαλιών PET σε λωρίδες 6ης συναρμολογημένο με όλα τα απαραίτητα εξαρτήματα (με σήμανση σημείου για αναφορά)

Δυστυχώς η προεξοχή που σχεδιάστηκε και λειτούργησε ως σταθεροποίηση του ανοίγματος του κάτω μέρους του μπουκαλιού προς κοπή στην θέση του Allen, έσπασε, όπως φαίνεται και στην Εικ. 62 κυκλωμένο με κόκκινο. Παρόλα αυτά το σχέδιο αυτό έχει πολύ καλά αποτελέσματα με σταθερό πλάτος παραγόμενης λωρίδας. Το μόνο κακό είναι ότι πάλι λόγω του σπασμένου κομματιού το μπουκάλι τσαλακώνεται και δεν τροφοδοτείται πολύ καλά στο σημείο κοπής αν δεν υπάρχει βοήθεια με το χέρι για την διατήρηση του σχήματος της φιάλης κατά την κοπή της. Κατά τα άλλα έχει πολύ καλά αποτελέσματα και σχετικά εύκολη χρήση.

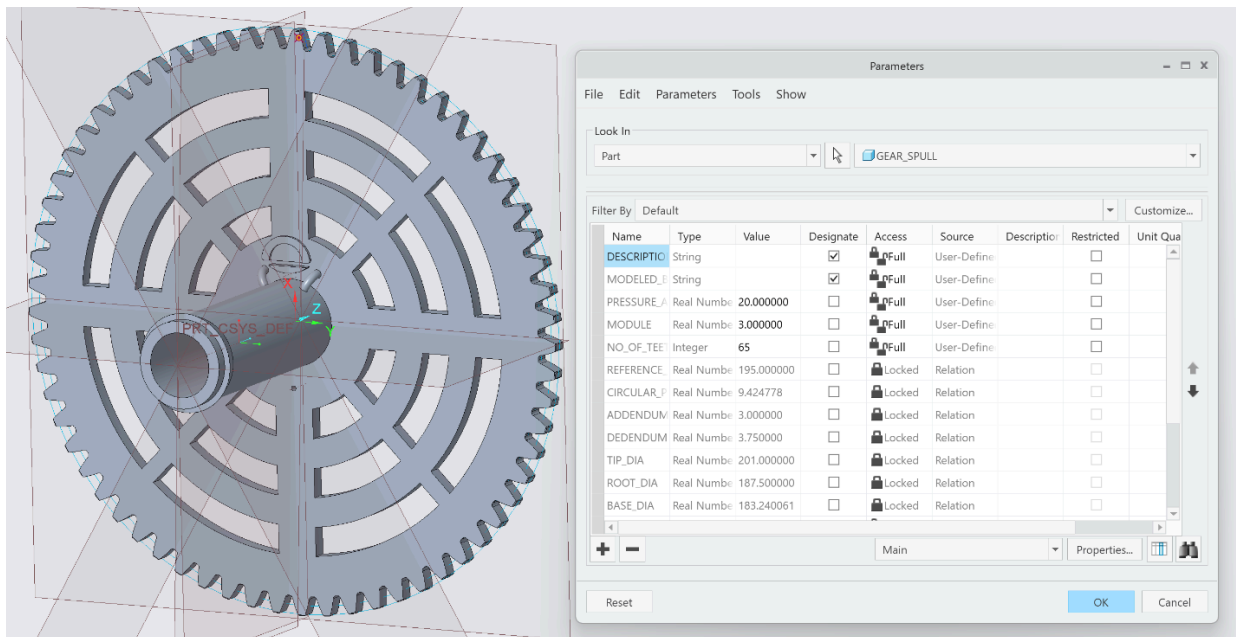
Περιγραφή των σταδίων υλοποίησης πρωτότυπου συστήματος μετατροπής μπουκαλιών PET σε νήμα 3D εκτύπωσης

Η υλοποίηση του πρωτοτύπου ξεκίνησε με τον σχεδιασμό της καρδιάς του συστήματος, δηλαδή τον σχεδιασμό του υποσυστήματος του καρουλιού που με την βοήθεια βηματικού κινητήρα θα τραβάει και θα τυλίγει το παραγόμενο νήμα. Αρχικά σχεδιάστηκαν τα γρανάζια που θα αυξάνουν την ροπή από τον κινητήρα στο καρούλι. Για την σχεδίαση των γραναζιών ακολουθήθηκε κατά βήμα ένα tutorial σχεδίασης γραναζιών για το creo ((CADx, 2022)), δεν υπάρχει λόγος να χαθεί χρόνος και κόπος για την επανεφεύρεση της ρόδας. Έτσι, γρήγορα γρήγορα δημιουργήθηκε γρανάζι στο creo παραμετροποιησιμο σε γρανάζι με όσα δόντια χρειάζεται για να επιφέρει την επιθυμητή διάμετρο γραναζιού.



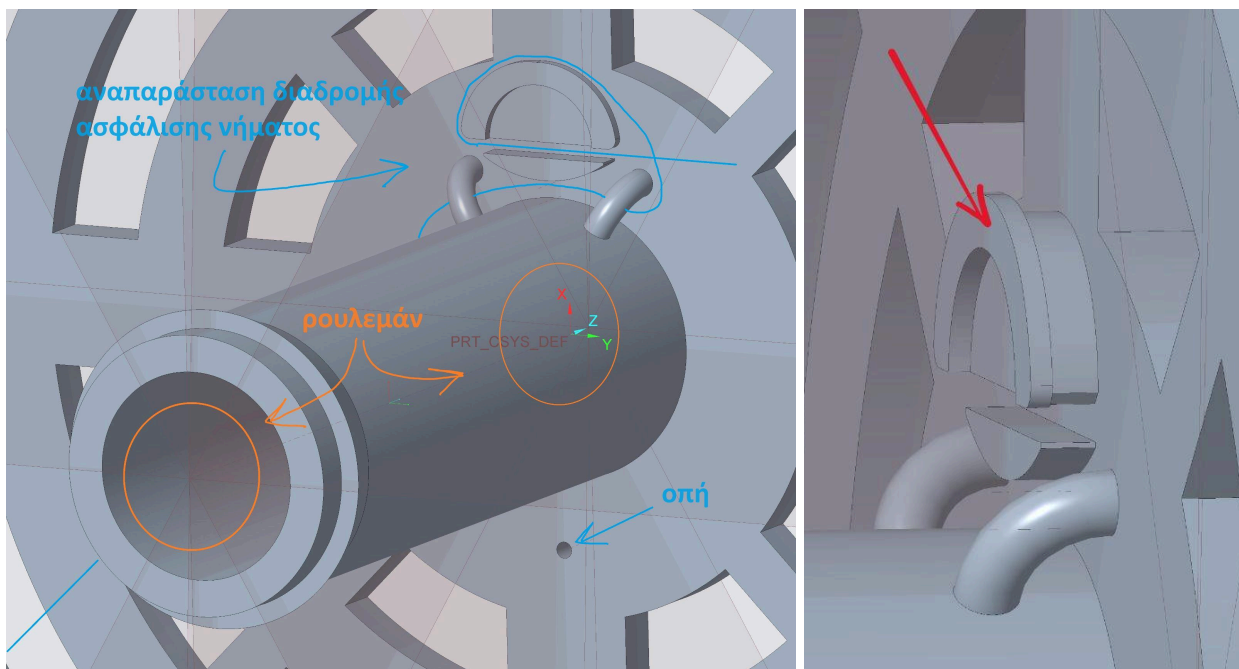
Εικ. 63 - Στιγμιότυπο σχεδίου μικρού γραναζιού για τον άξονα του μοτέρ μαζί με τον πίνακα των παραμέτρων σχεδιασμού του

Το παραπάνω εικονιζόμενο γρανάκι (Εικ. 63) έχει 10 δόντια και σχεδιάστηκε στο κέντρο του οπή για να τοποθετηθεί στον άξονα του βηματικού κινητήρα. Στο παρακάτω μεγάλο γρανάκι (Εικ. 64) σχεδιάστηκε το καρούλι που θα τυλίγεται το νήμα και έχει 65 δόντια. Η μεγάλη αυτή διαφορά στον αριθμό των δοντιών των δύο γραναζιών επιλέχθηκε εσκεμμένα με την λογική να μεγιστοποιηθεί όσο περισσότερο γίνεται η ροπή και να μειωθεί η ταχύτητα.



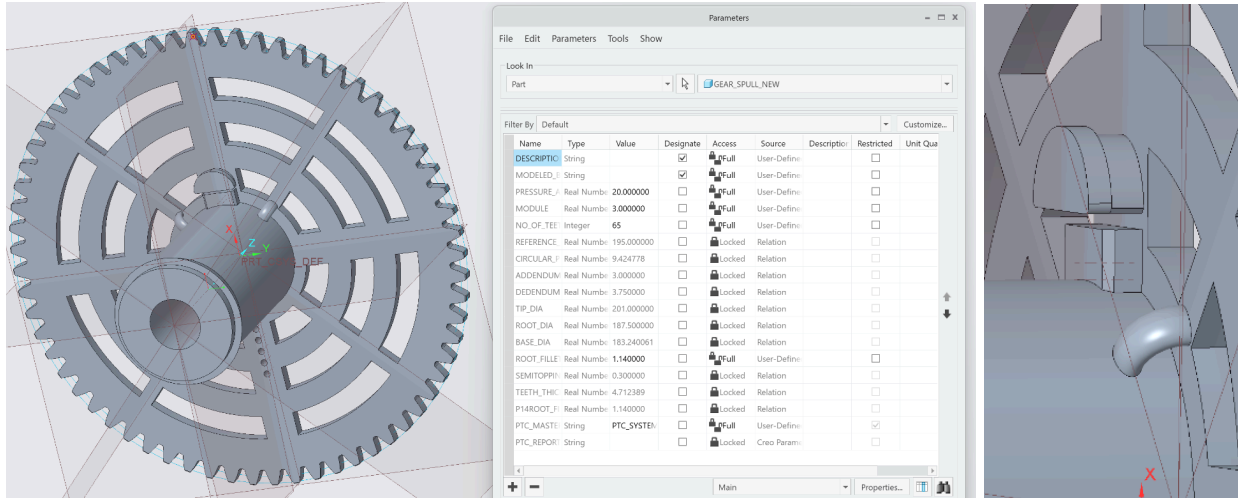
Εικ. 64 - Στιγμιότυπο σχεδίου μεγάλου γραναζιού - καρούλι νήματος μαζί με τον πίνακα των παραμέτρων σχεδιασμού του

Το μοτίβο με τους κενούς χώρους στο επίπεδο σώμα του γραναζιού σχεδιάστηκε έτσι ώστε να εξοικονομεί υλικό στην εκτύπωση χωρίς να θυσιάζεται η μηχανική αντοχή του κομματιού ενώ επιπρόσθετα βελτιώνει την ορατότητα κατά την χρήση του συστήματος. Επίσης κάποιες γεωμετρικές που σχεδιάστηκαν όπως φαίνονται στις από κάτω εικόνες (Εικ. 65) έχουν σκοπό την ασφάλιση του νήματος όπως αναπαρίσταται με την μπλέ γραμμή. Επίσης τοποθετήθηκε μια οπή στο από κάτω αντίστοιχο μέρος σε περίπτωση που δεν δούλευε ο πρώτος τρόπος ασφάλισης του νήματος να υπάρχει μια δεύτερη επιλογή. Η πρώτη τεχνική ασφάλισης νήματος φάνηκε να δουλεύει όπως προοριζόταν μέχρι που κάποια στιγμή έσπασε το “περύγιο” που σημαίνεται με το κόκκινο βελάκι στην Εικ. 65.2. Αυτό έγινε γιατί δεν είχε σχεδιαστεί σωστά σε εκείνο το σημείο με τις προδιαγραφές που χρειάζεται ένα κομμάτι που θα εκτυπωθεί για να αντέξει. Είχε όμως ήδη διαπιστωθεί ότι έπρεπε να αλλάξει και η σχεδίαση του καρουλιού οπότε το σχέδιο θα δεχθεί διορθώσεις και θα ξανά τυπωθεί. Τέλος με τους πορτοκαλί κύκλους στην εικόνα 65.1 αναπαριστώνται τα σημεία που τοποθετούνται-κουμπώνουν τα ρουλεμάν για την αβίαστη περιστροφή του καρουλιού.



Εικ. 65 - Στιγμιότυπα σχεδίου μεγάλου γραναζιού - καρούλι νήματος με σημάνσεις για αναφορά

Δύο σημαντικές αλλαγές έγιναν. Η πρώτη ήταν να γίνει το καρούλι πιο παχύ, δηλαδή με μεγαλύτερη διάμετρο. Αυτό έπρεπε να γίνει γιατί το παραγόμενο νήμα έτσι όπως τυλίγεται παίρνει το σχήμα του καρουλιού με αποτέλεσμα το νήμα να έχει σπειροειδή μορφή με μικρή διάμετρο πράγμα που το έκανε δύσκολα διαχειρίσιμο στην μεταφορά του σε άλλο καρούλι. Η δεύτερη αλλαγή είναι ότι έπρεπε να σχεδιαστεί καλύτερα το κομμάτι της ασφάλισης του νήματος ώστε να έχει μεγαλύτερη αντοχή ως εκτυπωμένο κομμάτι και να κρατήσει. Έτσι σχεδιάστηκε το επόμενο κομμάτι το οποίο λειτουργεί όπως πρέπει και είναι η τελική έκδοση του κομματιού για το πρωτότυπο δοκιμαστικό σύστημα μετατροπής.

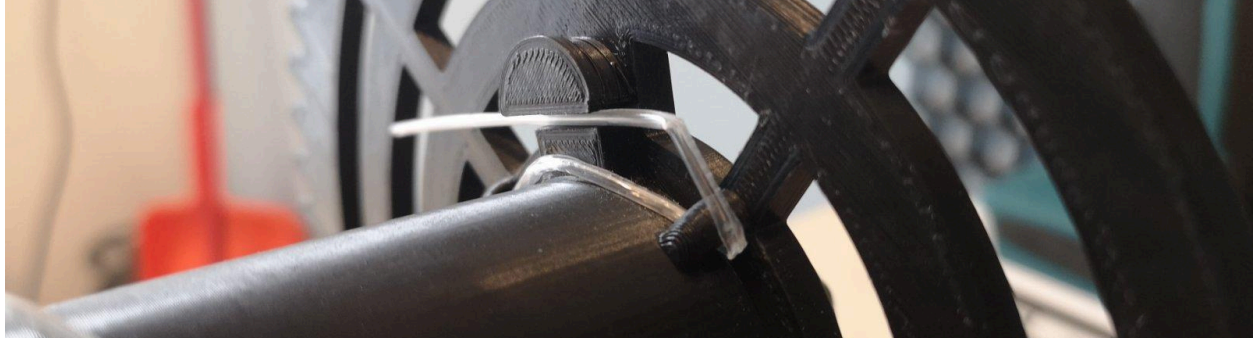


Εικ. 66 - 1) Στιγμιότυπο σχεδίου μεγάλου γραναζιού - καρούλι νήματος 2ης γενιάς μαζί με τον πίνακα των παραμέτρων σχεδιασμού του 2) Στιγμιότυπο σχεδίου μεγάλου γραναζιού - καρούλι νήματος με ζουμ σε λεπτά χαρακτηριστικά από άλλη οπτική

Δύο τρόποι ασφάλισης νήματος στο καρούλι. Ο δεύτερος προέκυψε στα πειράματα και είναι πιο αξιόπιστος και ευκολότερος στην εκτέλεση. Ο λόγος που είναι πιο αξιόπιστος είναι γιατί το νήμα μπορεί να εισχωρήσει καλύτερα στην χαραμάδα ενώ στον πρώτο όχι τόσο γιατί στην συνέχεια μετά την χαραμάδα το νήμα διασταυρώνεται με τον εαυτό του όπως φαίνεται και στην εικόνα 67 και το σπρώχνει ελαφριά έξω από την χαραμάδα.

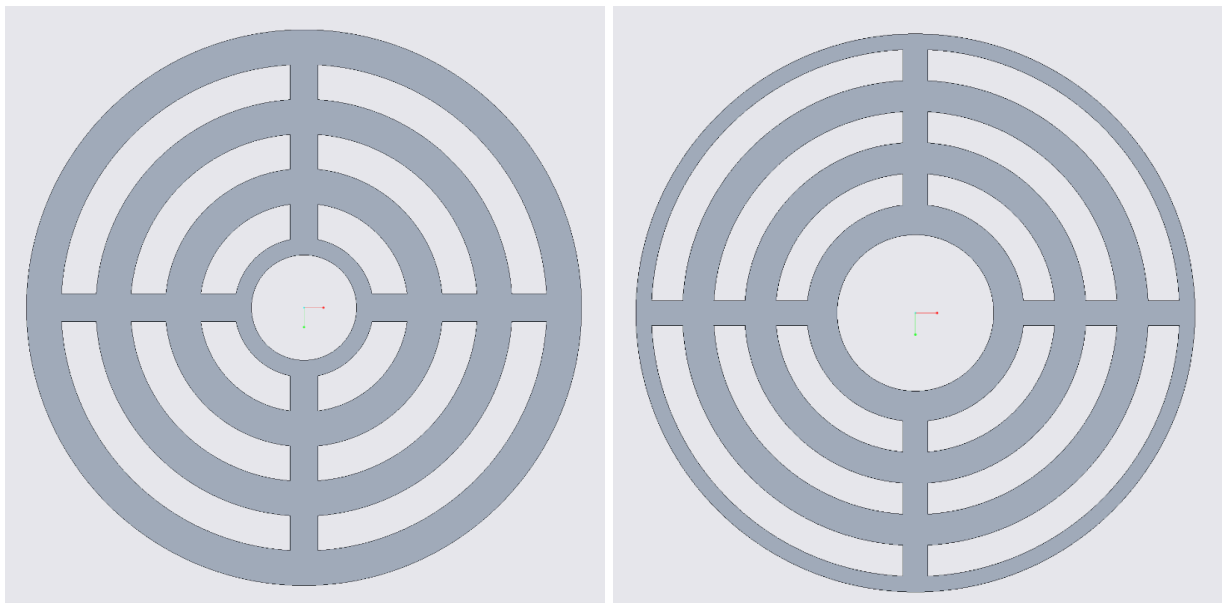


Εικ. 67 - Εκτυπωμένο μεγάλο γρανάκι - καρούλι νήματος. Ασφάλιση νήματος με χρήση των σχεδιασμένων χαρακτηριστικών του σχεδίου (1η τεχνική)

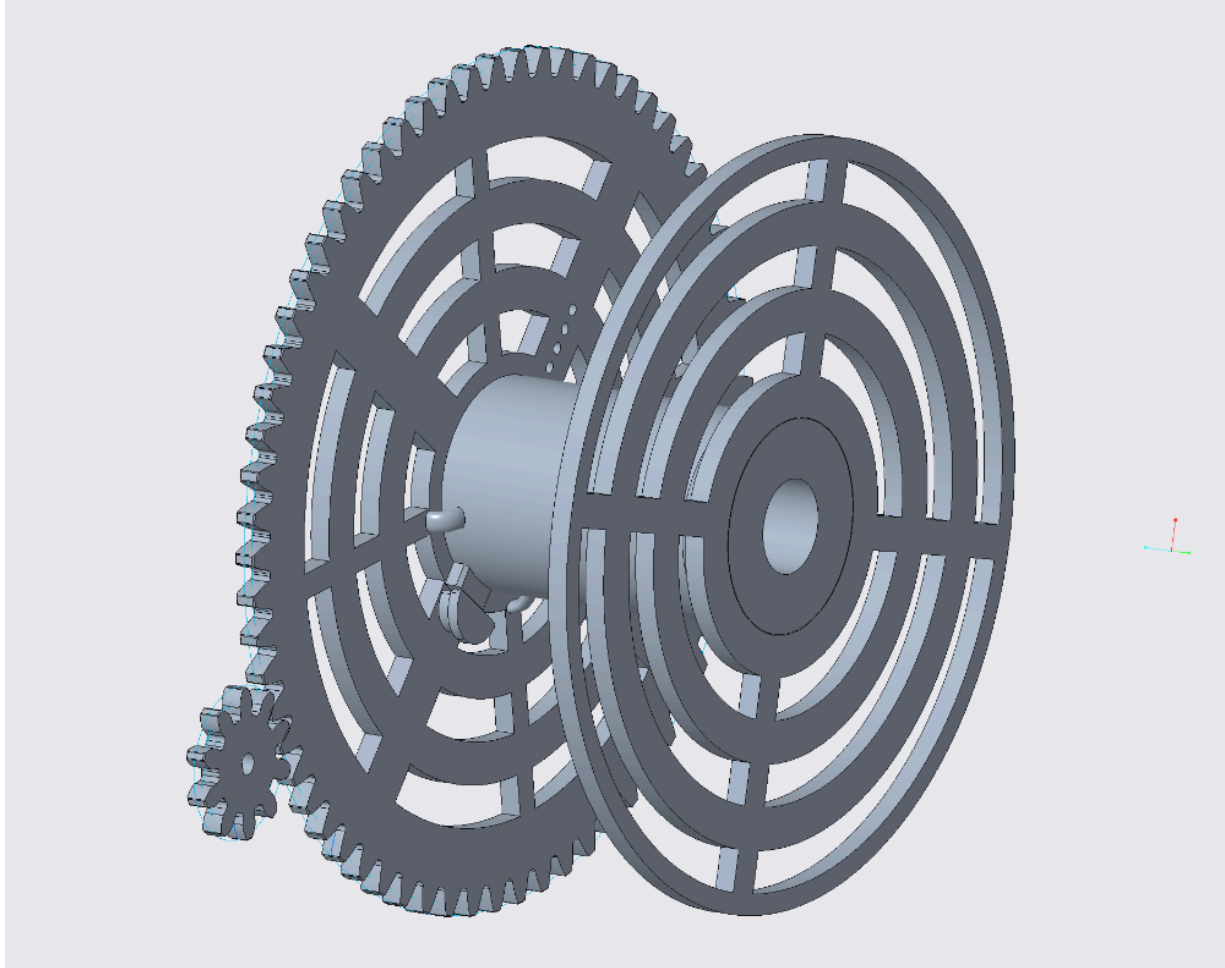


Εικ. 68 - Εκτυπωμένο μεγάλο γρανάζι - καρούλι νήματος. Ασφάλιση νήματος με χρήση των σχεδιασμένων χαρακτηριστικών του σχεδίου (2η τεχνική)

Επίσης σχεδιάστηκε ξεχωριστά για λόγους πιο εύκολης και αποτελεσματικής εκτύπωσης ένας δίσκος για το κλείσιμο του καρουλιού. Δημιουργήθηκε για την πρώτη έκδοση του καρουλιού και τροποποιήθηκε για την δεύτερη. Από κάτω υπάρχουν εικόνες και με τις δύο εκδόσεις καθώς και της δεύτερης συναρμολογημένη με το κομμάτι του καρουλιού.

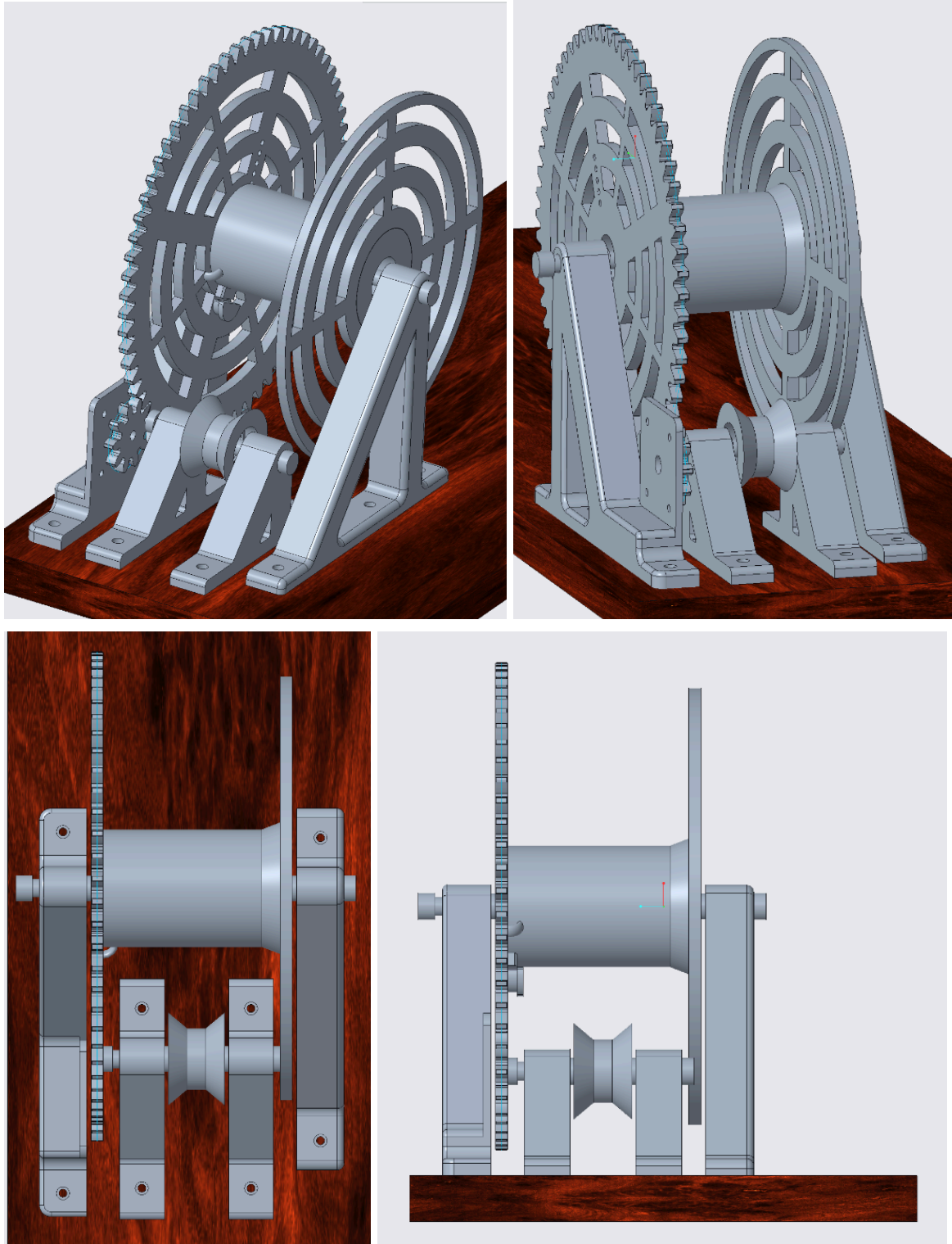


Εικ. 69 - 1) Εκδοχή δίσκου για κλείσιμο καρουλιού νήματος 1ης γενιάς 2) Εκδοχή δίσκου για κλείσιμο καρουλιού νήματος 2ης γενιάς



Εικ. 70 - Εκδοχή δίσκου για κλείσιμο καρουλιού νήματος 2ης γενιάς σε συναρμολόγηση με το καρούλι 2ης γενιάς

Το επόμενο βήμα ήταν η σχεδίαση των ποδιών-βάσεων του καρουλιού. Για την ακρίβεια τα πόδια του καρουλιού σχεδιάστηκαν παράλληλα και εξαρτώμενα από τον σχεδιασμό της τροχαλίας οδηγού νήματος. Έτσι ο σχεδιασμός του συστήματος μετατροπής φτάνει στο σημείο που απεικονίζεται από κάτω εικόνες 71.

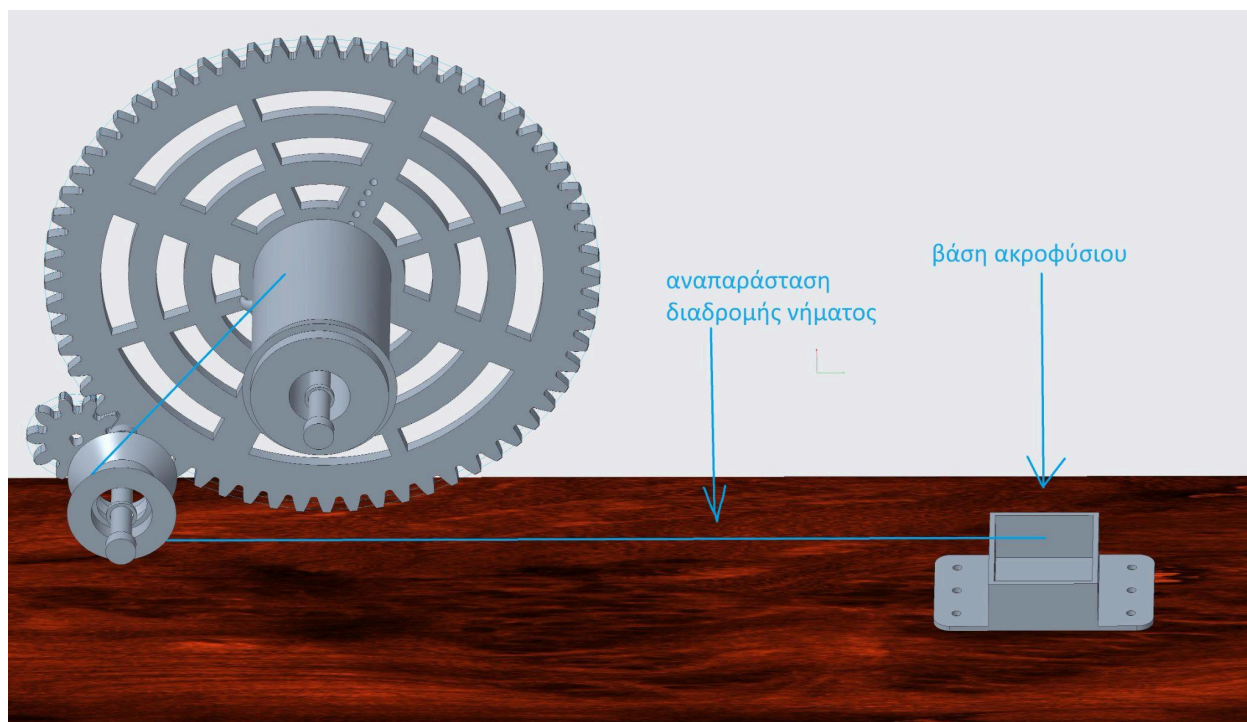


Εικ.71 - Σχέδιο συναρμολόγησης συστήματος έλξης και τύλιξης νήματος και συστήματος τροχαλίας οδηγού νήματος (εικόνες από διαφορετικές οπτικές)

Τα πόδια του καρουλιού αλλά και της τροχαλίας έγιναν με γνώμονα την βέλτιστη μηχανική αντοχή εφόσον ήταν γνωστό ότι η μετατροπή της λωρίδας σε νήμα μέσα από το ακροφύσιο φέρει αρκετά

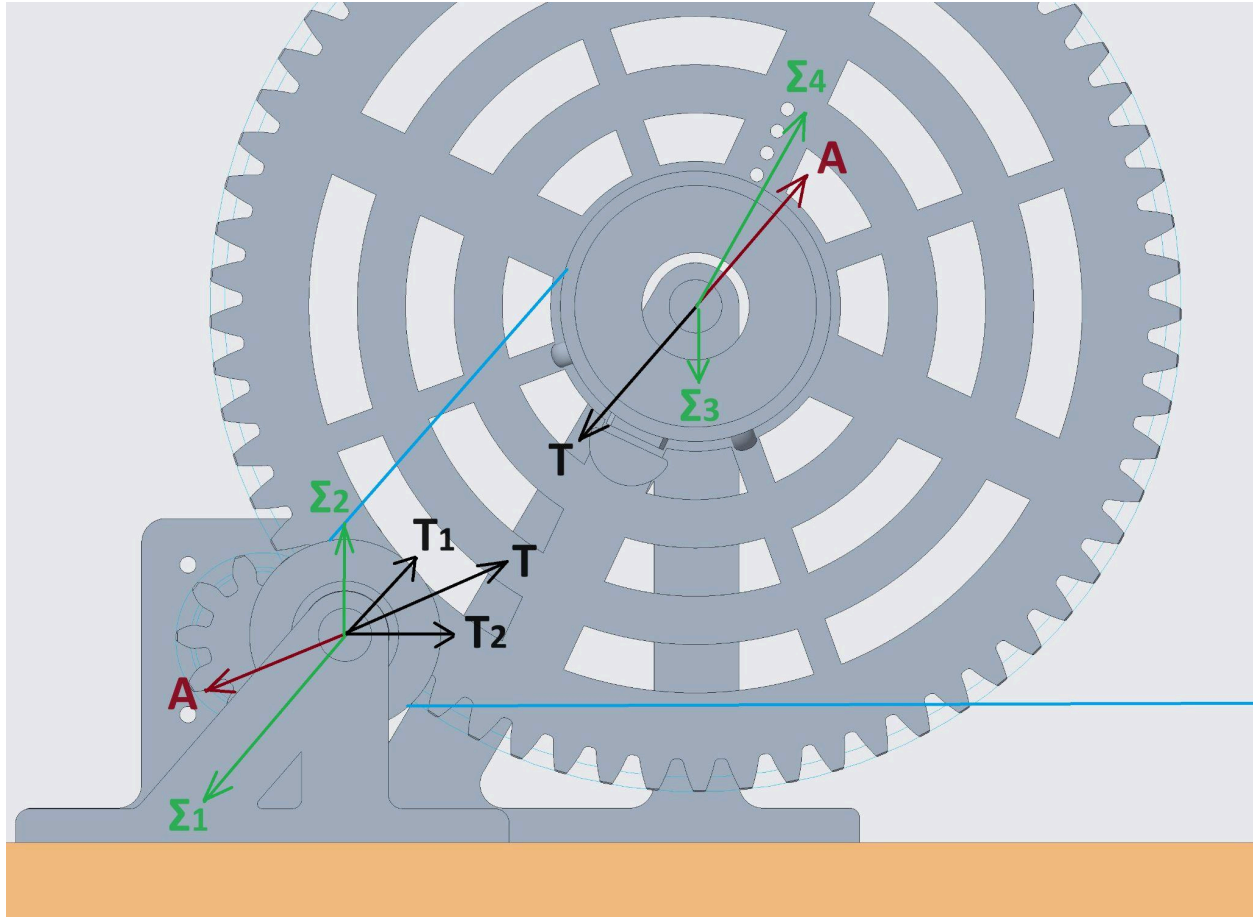
μεγάλες αντιστάσεις. Δεν υπήρχε δυνατότητα μέτρησης της αντίστασης αυτής εφόσον δεν υπήρχε διαθέσιμο δυναμόμετρο. Οπότε η σχεδίαση των κομματιών έγινε βάση απλών αναλύσεων των διευθύνσεων των δυνάμεων. Επίσης και να υπήρχε η μέτρηση της δύναμης αντίστασης δεν θα μπορούσε να γίνει στατική ανάλυση αφού δεν υπάρχουν δεδομένα υλικού για αντοχή εκτυπωμένων κομματιών σε προγράμματα ανάλυσης, αφού οι μηχανικές ιδιότητες των εκτυπωμένων κομματιών εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες της διαδικασίας εκτύπωσης. Όμως κάθε κομμάτι που σχεδιάζεται για αυτήν την εργασία σχεδιάζεται με γνώμονα την εκτυπωσιμότητα του με τρόπο τέτοιο που να το δίνει μην βέλτιστη δυνατή αντοχή.

Αρχικά υπάρχει πρόθεση για την στρατηγική χωρική διάταξη κάποιων βασικών στοιχείων, του καρουλιού, της τροχαλίας και του ακροφύσιου. Σκοπός της συγκεκριμένης διάταξης που απεικονίζεται από κάτω είναι η μεγιστοποίηση της απόστασης μεταξύ της τροχαλίας και ακροφύσιου ώστε να δίνεται χρόνος στο παραγόμενο νήμα να ψυχθεί πριν τυλιχτεί στο καρούλι. Ταυτόχρονα όμως το σύστημα να καταλαμβάνει όσο τον δυνατόν λιγότερο χώρο. Άρα η τοποθέτηση της τροχαλίας αριστερά και κάτω από το καρούλι δίνει αυτήν την έξτρα απόσταση από το ακροφύσιο. Επίσης θα πρέπει να υπάρχει αρκετός χώρος αριστερά του ακροφυσίου έτσι ώστε να μπορεί να τραβιέται η αρχή του νήματος με πένσα, που είναι ένα από τα απαραίτητα βήματα της διαδικασίας μετατροπής.



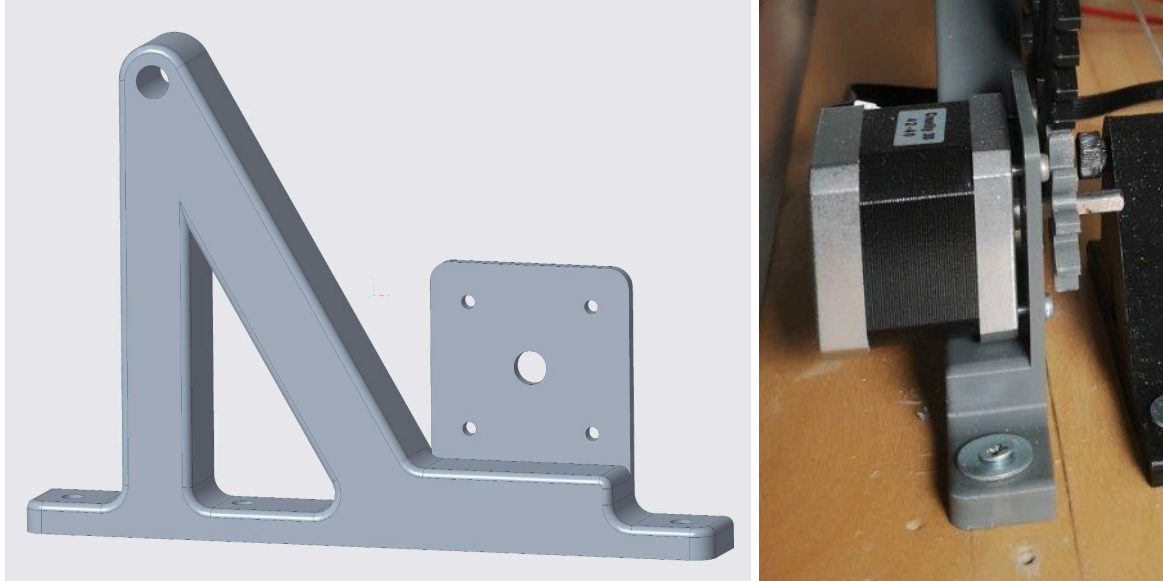
Εικ. 72 - Αναπαράσταση διαδρομής νήματος

Στην εικόνα 73 φαίνεται μια απλή ανάλυση των δυνάμεων. Με T συμβολίζεται η δύναμη που ασκείται στους άξονες από το νήμα και ισούται με την τάση του νήματος. Με A συμβολίζεται η δύναμη που θα αντιστέκεται στην κάθε T ενώ με Σ συμβολίζονται οι συνιστώσες που δημιουργούν τις A και προέρχονται από την γεωμετρία των ποδιών της τροχαλίας και του καρουλιού



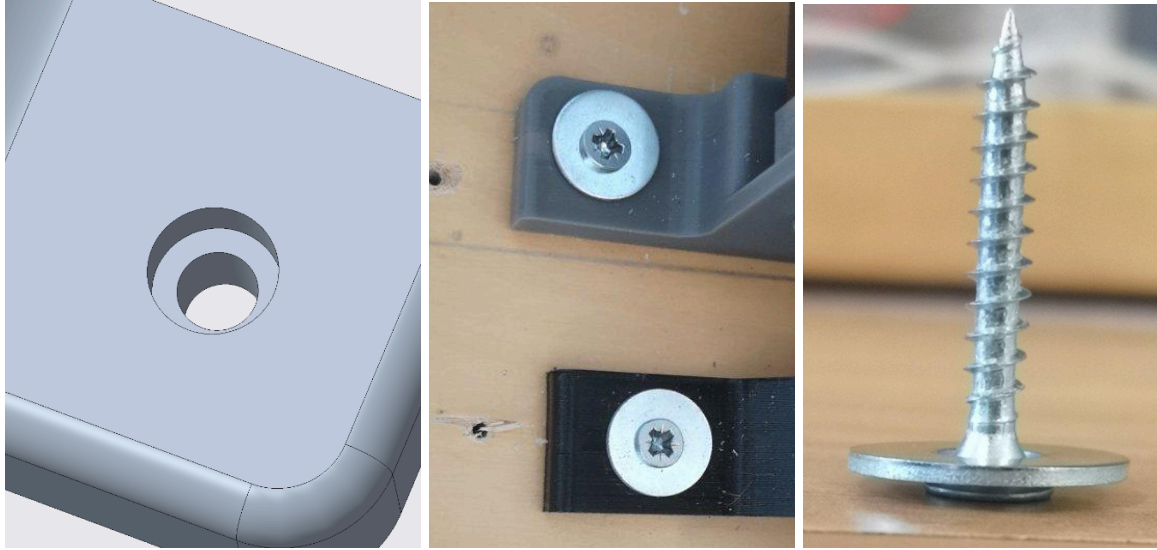
Εικ. 73 - Ανάλυση δυνάμεων

Το ένα από τα δύο πόδια του καρουλιού σχεδιάστηκε για να ενσωματώνει και την βάση του μοτέρ στο οποίο τον άξονα θα συνδεθεί το μικρό γρανάζι. Είναι πολύ σημαντικό να υπολογιστεί και να εφαρμοστεί σωστά στο σχέδιο η απόσταση μεταξύ των αξόνων περιστροφής των γραναζιών (μεγάλο γρανάζι-καρούλι και το μικρό γρανάζι του άξονα του μοτέρ). Η απόσταση αυτή είναι ίση με το πηλίκο της διαίρεσης του αθροίσματος των διαμέτρων (reference_dia) των γραναζιών διά δύο. Επίσης σημαντικό είναι να αυξηθεί αυτή η απόσταση στο σχέδιο κατά λίγα χιλιοστά για λόγους ανοχής. Το κομμάτι του ποδιού που θα τοποθετηθεί το μοτέρ σχεδιάστηκε βάση του τεχνικού σχεδίου του βηματικού κινητήρα ώστε οι αποστάσεις να είναι ακριβώς και οι βίδες να περνάνε από τις οπές οριακά ώστε να υπάρχει σταθερότητα (βίδες M3 διαμέτρου 3 ενώ οι οπές σχεδιάστηκαν 3.4mm). Τέλος η απόσταση της από κάτω επιφάνειας που ουσιαστικά θα στηρίζεται το μοτέρ πάρθηκε και αυτή από το τεχνικό σχέδιο και είναι πολύ σημαντικό να είναι σωστή με την απαραίτητη ανοχή (1mm) διότι αλλιώς είτε θα στραβώσει το κομμάτι που βιδώνει πάνω το μοτέρ από το βάρος του μοτέρ είτε αν είναι πιο ψηλά δεν θα ευθυγραμμίζονται οι οπές του κομματιού με αυτές του μοτέρ.



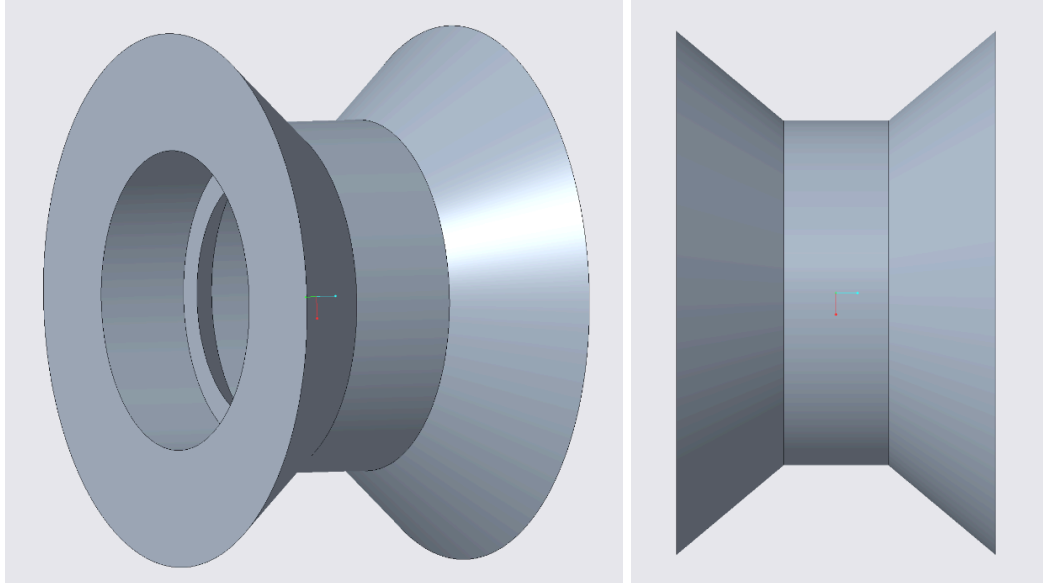
Εικ. 74 - 1) Σχέδιο ποδιού καρουλιού - βάση βηματικού κινητήρα 2) Εκτυπωμένο κομμάτι μαζί με τοποθετημένο βηματικό κινητήρα

Τα πόδια προορίζονταν για πάκτωση σε ξύλινη σανίδα (πρώην ράφι) όπως και πολλά άλλα κομμάτια που θα σχεδιαστούν για την ολοκλήρωση του συστήματος μετατροπής μπουκαλιών σε νήμα. Καθώς οι οπές που σχεδιάστηκαν για την πάκτωση με βίδες και ροδέλες αυτών των κομματιών (φαίνεται στην εικόνα 75.1) και ειδικά αυτών που απαιτούν καλή μηχανική αντοχή έγιναν με δύο διαμέτρους μια μικρότερη που διαπερνά μέχρι τέλους το κομμάτι και υπάρχει για να περνάει το σώμα της βίδας και να βιδώνει ίσα ίσα στα τοιχώματα της. Η δεύτερη διάμετρος της οπής εξυπηρετεί στο να φιλοξενεί κομμάτι της κεφαλής της βίδας ώστε να εισχωρήσει αρκετά η βίδα στο κομμάτι και να πιάσει καλά την ροδέλα ώστε να αξιοποιήσει την χρησιμότητα της. Χωρίς την ρηχή οπή μεγάλης διαμέτρου η βίδα δεν ακουμπάει την ροδέλα και έτσι δεν γίνεται χρήση της. Η χρήση των ροδελών θεωρήθηκε απαραίτητη διότι τα εκτυπωμένα κομμάτια δεν είναι συμπαγή και άρα η πιο ευρεία κατανομή των δυνάμεων αυξάνει την αντοχή.

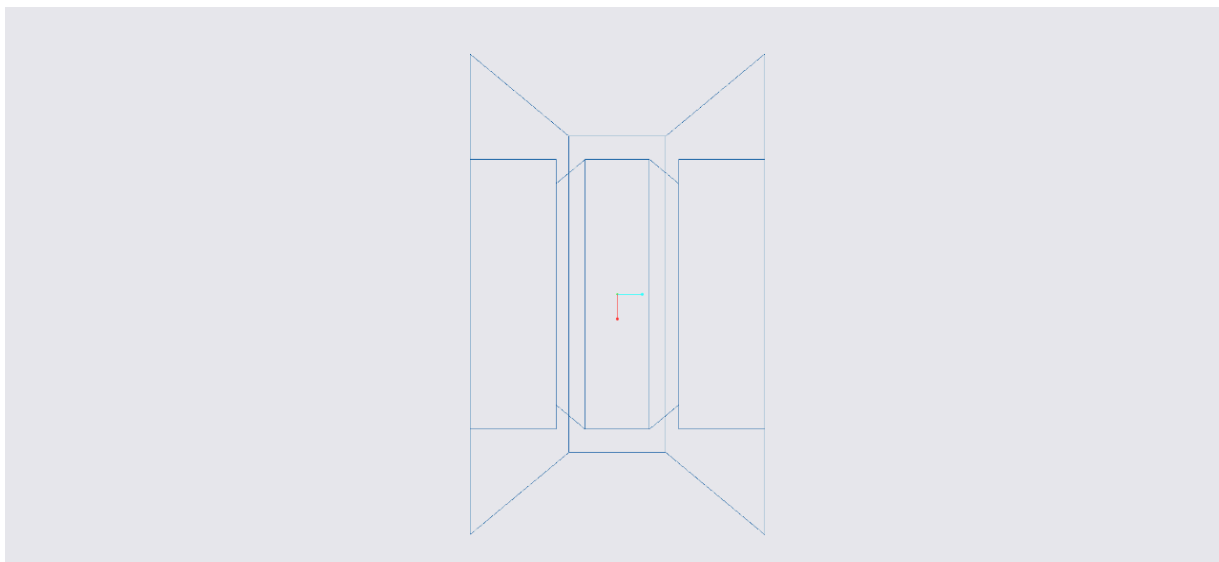


Εικ. 75 - 1) Σχέδιο οπής για βίδες με ροδέλες 2) Εκτυπωμένα κομμάτια με οπές για βίδες με ροδέλες με βίδες και ροδέλες 3) Βίδα με ροδέλα (πλάγια όψη)

Ο σχεδιασμός της τροχαλίας ενσωματώνει επίσης δύο ρουλεμάν, ένα σε κάθε πλευρά όπως και στο καρούλι. Έτσι σχεδιάστηκαν στο εσωτερικό της στοπ για να εμποδίζουν τα ρουλεμάν από το να εισχωρήσουν περισσότερο στο εσωτερικό της τροχαλίας, αντίθετα με το καρούλι που τα στοπ δεν ήταν απαραίτητα να σχεδιαστούν διότι τα ρουλεμάν εκείνα έχουν δικό τους στοπ στον εξωτερικό τους δακτύλιο που προεξέχει και δεν αφήνει το ρουλεμάν να περάσει πιο μέσα στο καρούλι. Επίσης και στα δύο κομμάτια (καρούλι και τροχαλία) η ανοχή στο σχέδιο των εσοχών των ρουλεμάν ήταν 0,4mm (εσοχή στο σχέδιο 22,4 και διάμετρος ρουλεμάν 22mm) που είναι γενικά μια καλή ανοχή για κομμάτια που προορίζονται για εκτύπωση και πράγματι η εφαρμογή ήταν τέλεια με αίσθηση ελαφρού σφηνώματος. Κατά τα άλλα όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες 76, 77 και 78 πρόκειται για ένα κλασικό σχεδιασμό τροχαλίας, το αυλάκι είναι αχρείαστα λίγο μεγαλύτερο από ότι είναι απαραίτητο για την διέλευση του νήματος αλλά δουλεύει, απλά καταλαμβάνει παραπάνω χώρο από ότι θα μπορούσε.



Εικ. 76 - Σχέδιο τροχαλίας σε δύο διαφορετικές όψεις

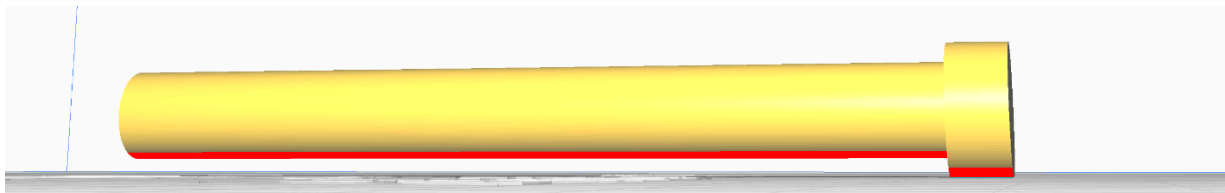


Εικ. 77 - Σχέδιο τροχαλίας διάφανο για ορατότητα της εσωτερικής γεωμετρίας

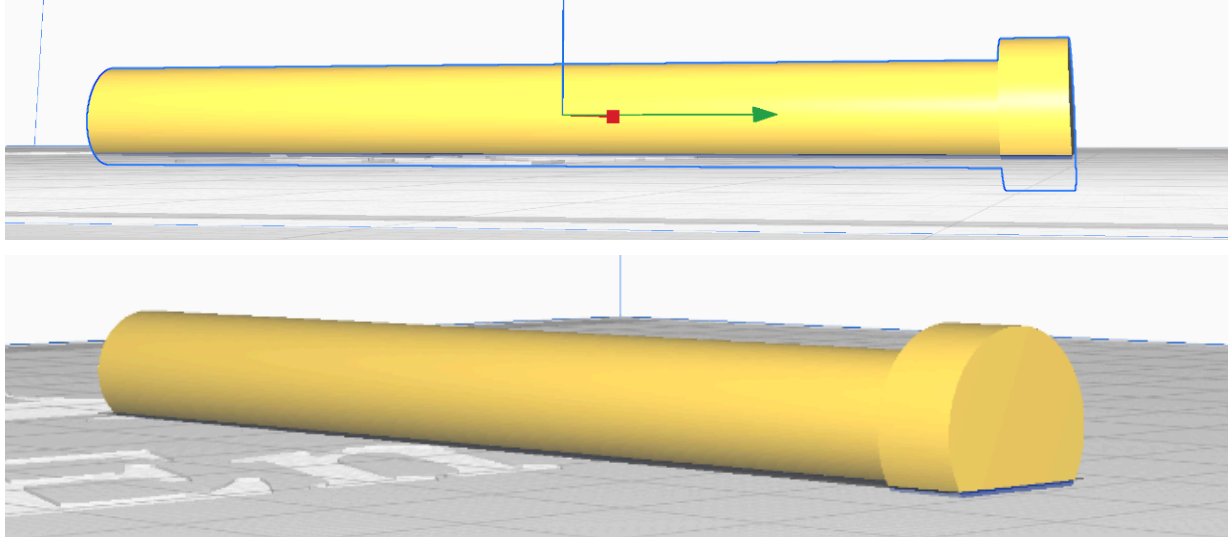


Εικ. 78 - 1) Είδος ρουλεμάν που χρησιμοποιείται στην τροχαλία 2) Εκτυπώσεις κομματιών και ρουλεμάν σε συναρμολόγηση σε χρήση

Ο πίροι που διαπερνούν τα κομμάτια των ποδιών, καρουλιού, τροχαλίας αλλά και τα ρουλεμάν είναι επίσης σχεδιασμένα και εκτυπωμένα κομμάτια. Η εκτύπωση των πύρων έγινε οριζόντια για μεγαλύτερη αντοχή ενώ αν τυπωθούν όρθια η αντοχή τους θα είναι πολύ μικρή λόγω του προσανατολισμού των layers και των προσανατολισμό δυνάμεων που δέχονται στην χρήση τους. Οι παρακάτω εικόνες (Εικ. 79, 80.1 και 80.2) είναι από το λογισμικό (slicer - ultimaker cura) που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία το g-code για την εκτύπωση όλων των κομματιών που είναι απαραίτητα για το πρωτότυπο σύστημα μετατροπής μπουκαλιών σε νήμα εκτύπωσης. Στην πρώτη εικόνα φαίνονται με κόκκινο τα σημεία του πύρου που είναι απαραίτητες οι στηρίξεις. Δυστυχώς όμως και με τις στηρίξεις το κομμάτι δεν εκτυπώνεται καλά σε εκείνα τα σημεία και ως συνέπεια και στα υπόλοιπα, με αποτέλεσμα το κομμάτι να μην έχει την ηθελημένη λειτουργικότητα, δηλαδή να είναι ίσιο και διαπερνά όλα τα άλλα κομμάτια. Έτσι επιλέχθηκε η τεχνική του να βυθιστεί το αντικείμενο κάτω από την επιφάνεια εκτύπωσης ώστε να εκτυπώσει μόνο το κομμάτι που φαίνεται με κίτρινο. Το κομμάτι αυτό δεν χρειάζεται στηρίξεις και εκτυπώθηκε ακριβώς έτσι όπως φαίνεται, τελείως ίσιο σε αντίθεση με το προηγούμενο και στις απαραίτητες διαστάσεις ώστε να διαπερνά τα υπόλοιπα κομμάτια ίσα ίσα (7.8 mm διάμετρος πύρου, 8.2 mm διάμετρος οπής για τη διέλευση του πύρου στα κομμάτια ποδιών και 8mm άνοιγμα του εσωτερικού δακτυλίου των ρουλεμάν).

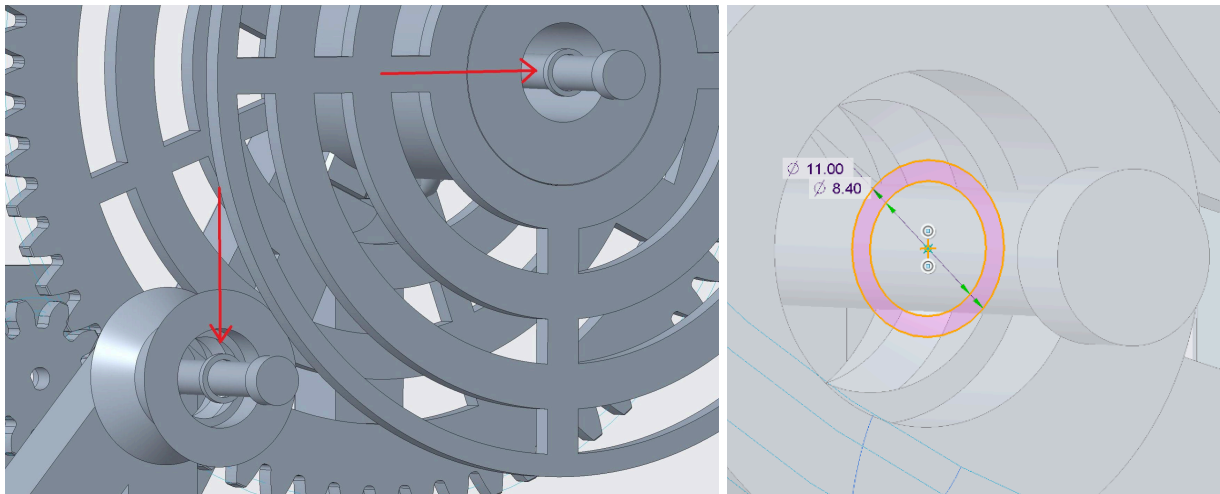


Εικ. 79 - Στιγμιότυπο από το λογισμικό slicer (ultimaker cura) που απεικονίζονται με κόκκινο τα σημεία που απαιτούνται στηρίξεις για την εκτύπωση του κομματιού-πύρου.



Εικ. 80 - Στιγμιότυπα διαφορετικές οπτικές γωνίες του κομματιού-πίρου στο λογισμικό slicer (ultimaker cura) που φαίνεται η τοποθέτηση του στο κρεβάτι του εκτυπωτή για την εκτύπωση του χωρίς στηρίξεις.

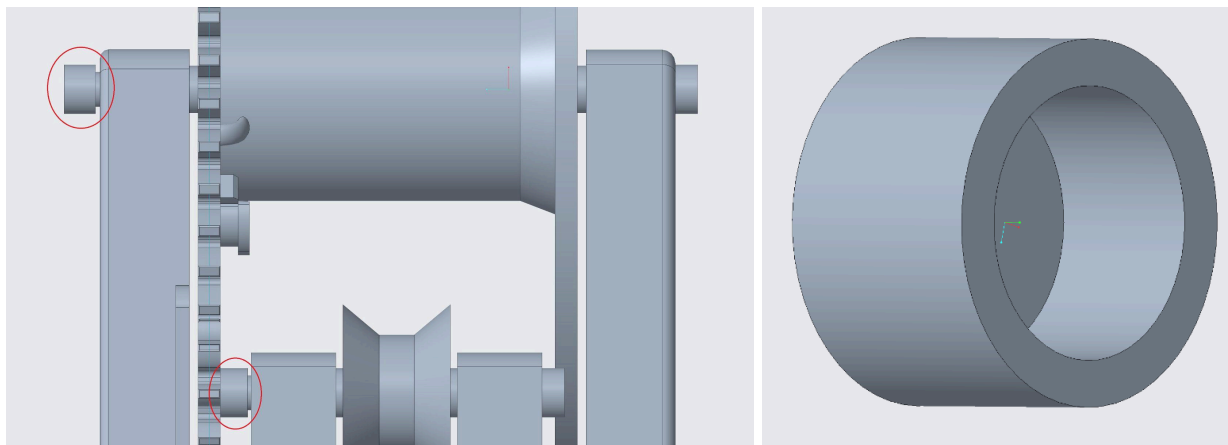
Επιπρόσθετα σχεδιάστηκε δαχτυλίδι που τυπώθηκε 4 φορές, δύο για το σύστημα του καρουλιού και 2 για το σύστημα της τροχαλίας, που διαπερνούνται και αυτά από τον πύρο του αντίστοιχου συστήματος και τοποθετούνται ανάμεσα από τα ρουλεμάν και τα πόδια. Στόχος της σχεδίασης τους είναι να αγγίζουν μόνο τον εσωτερικό δακτύλιο των ρουλεμάν και να κρατάνε απόσταση από τα πόδια ώστε να μπορούν να γίνονται η επιστροφή ελεύθερα και χωρίς τριβές.



Εικ. 81 - 1) Στιγμιότυπο από το σχέδιο συναρμολόγησης των κομματιών των συστημάτων καρουλιού νήματος και τροχαλίας για την ένδειξη της τοποθέτησης των δαχτυλιδιών 2) Στιγμιότυπο που φαίνονται οι διαστάσεις του δαχτυλιδιού

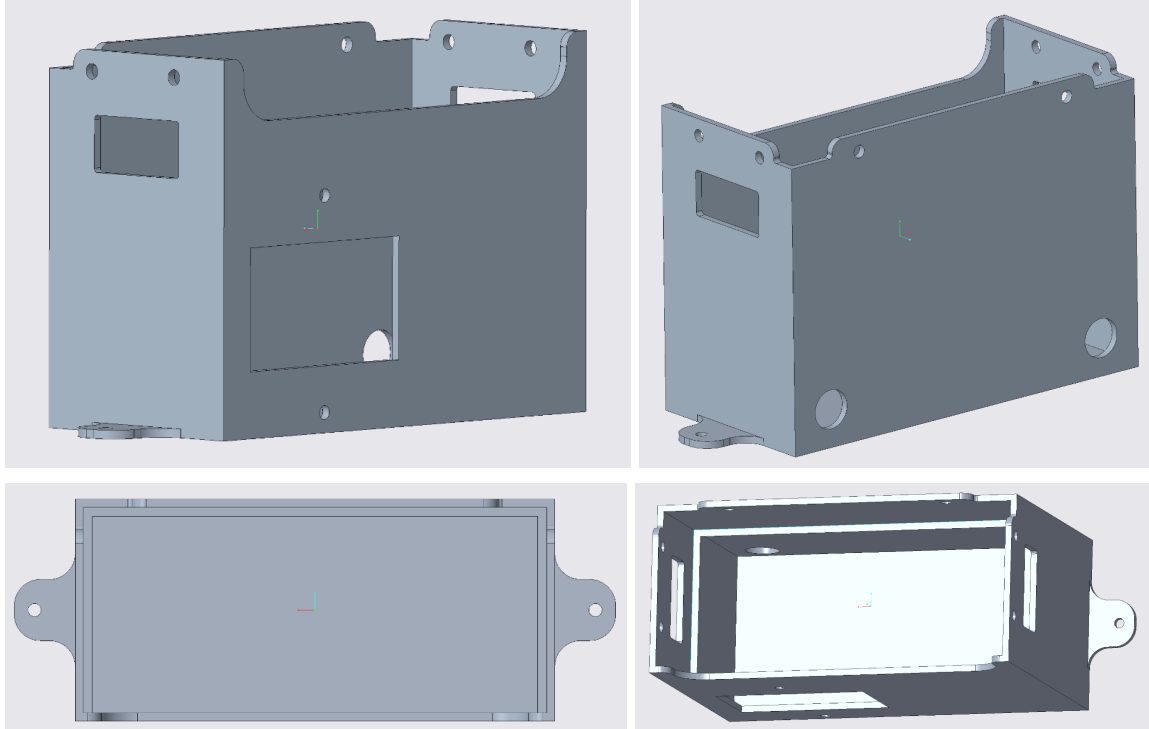
Τέλος, σχεδιάστηκαν καπάκια ασφάλισης των πύρων που θα τοποθετούνταν με κόλλα στιγμής, διότι η σχεδίαση βιδωτού καπακιού δεν είναι εφικτή σε αυτές τις διαστάσεις με αυτήν την τεχνολογία εκτύπωσης. Στην πραγματικότητα δεν χρησιμοποιήθηκαν ποτέ διότι η εφαρμογή των πύρων ήταν τόσο

καλή που δεν ήταν απαραίτητη η περαιτέρω ασφάλιση τους. Επίσης δεν ήταν θεμιτή η κόλληση τους διότι στο πειραματικό αυτό στάδιο σε περίπτωση ανάγκης η αποσυναρμολόγηση θα ήταν δύσκολη.



Εικ. 82 - 1) Στιγμιότυπο από το σχέδιο συναρμολόγησης των κομματιών των συστημάτων καρουλιού νήματος και τροχαλίας για την ένδειξη της τοποθέτησης των καπακιών των πέρων 2) Στιγμιότυπο του σχεδίου του καπακιού

Πέρα λοιπόν από αυτό το υποσύστημα της έλξης και τυλίγματος του παραγόμενου νήματος του συστήματος μετατροπής μπουκαλιών σε νήμα, σχεδιάστηκαν κι άλλα κομμάτια για την ολοκλήρωση του πρωτοτύπου. Αρχικά σχεδιάστηκε η υποδοχή-βάση για το power supply. Το σχέδιο επηρεάστηκε από αυτό της βάσης για το power supply του ender 3 που ουσιαστικά τοποθετεί το τροφοδοτικό όρθιο αφήνοντας από κάτω χώρο για τα καλώδια και τον διακόπτη. Αυτή η κάθετη τοποθέτησή του, του δίνει ανεπιθύμητο ύψος αλλά εξασφαλίζει καλή κυκλοφορία του αέρα για την ψύξη του τροφοδοτικού. Για να αναπνέει καλά το τροφοδοτικό το σχέδιο αναπτύχθηκε έτσι ώστε να μην καλύπτει κανένα άνοιγμα του. Το μπροστινό τετράγωνο άνοιγμα που φαίνεται στην πρώτη εικόνα που ακολουθεί είναι σχεδιασμένο για να περνάει και να βιδώνει στην από πάνω και κάτω οπές ο διακόπτης on/off. Στα πλάγια υπάρχουν άλλα δύο τετράγωνα ανοίγματα για να επιτρέπουν στο τροφοδοτικό να αναπνέει από τα ανοίγματα που διαθέτει σε αυτά τα σημεία. Τα στρογγυλά ανοίγματα στο πίσω μέρος χαμηλά εξυπηρετούν την ανάγκη της διεξόδου για τα καλώδια, είναι δύο και σε αυτά τα σημεία γιατί κάποια καλώδια δεν είναι αρκετά μακριά, έτσι από όποια μεριά και να πρέπει να προσανατολιστούν δεν θα υπάρχει σπατάλη του μήκους τους. Επίσης υπάρχουν οπές παραμετρικά για την ασφάλιση του τροφοδοτικού με βίδες (δεν βρέθηκαν ποτέ οι κατάλληλες βίδες, γ' αυτό και απουσιάζουν από το πρωτότυπο, πάλι καλά το τροφοδοτικό εφαρμόζει αρκετά καλά στην εκτυπωμένη βάση ώστε να του προσφέρει την απαραίτητη στήριξη που χρειάζεται). Πολύ σημαντικό είναι να αναφερθεί το στοπ που σχεδιάστηκε στο εσωτερικό του και φαίνεται στην κάτωψη του. Το στοπ αυτό είναι εκεί για να εξασφαλίσει ότι το τροφοδοτικό θα εισχωρεί όσο ορίστηκε στο σχέδιο και να ευθυγραμμίζεται με τα σχεδιασμένα στοιχεία που προαναφέρθηκαν καθώς και να αφήνει χώρο στο εσωτερικό της βάσης για τα καλώδια και το πίσω μέρος του σώματος του διακόπτη on/off.

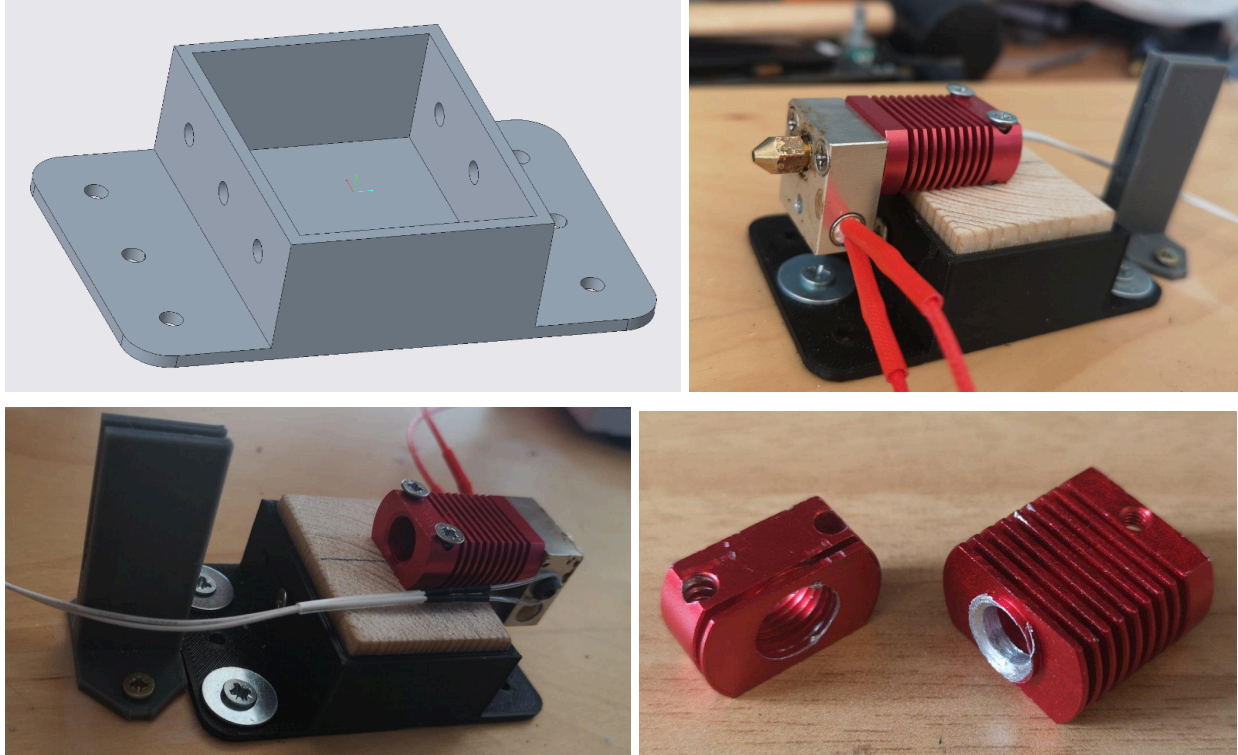


Εικ. 83 - Στιγμιότυπα από διάφορες οπτικές γωνίες του σχεδίου της βάσης του τροφοδοτικού για την ολοκληρωμένη ανάδειξη της μορφολογίας του



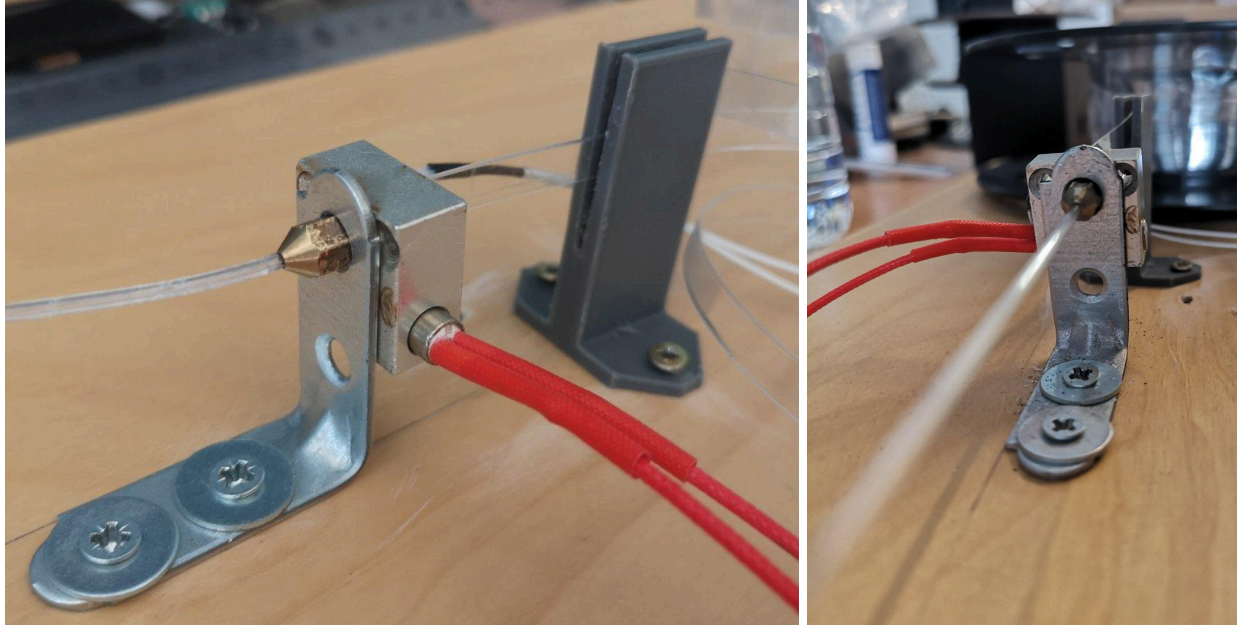
Εικ. 84 - Εκτυπωμένη και σε χρήση βάση τροφοδοτικού

Το επόμενο κομμάτι που σχεδιάστηκε ήταν η βάση για το ακροφύσιο (μαζί με το heat block και heat sink). Το κομμάτι ξύλου κόπηκε στο ακριβές ύψος ώστε το νήμα που θα βγαίνει από το ακροφύσιο να είναι στο ίδιο ύψος με την κάτω μεριά της τροχαλίας ώστε το νήμα να τραβιέται συνευθειακά με την οπή του ακροφυσίου και παράλληλα στην ξύλινη σανίδα και βάση του συστήματος. Το heat sink θεωρητικά θα βοηθούσε στην σταδιακή ελάττωση της θερμοκρασίας όσο πιο μακριά απο το heat block, έτσι το heat sink θα έχει θερμοκρασία κάτω των 210 βαθμών κελσίου που είναι η θερμοκρασία το heat block, θερμοκρασία που δεν θεωρείται αρκετή για την ανάφλεξη του ξύλου. Επίσης θα θερμαίνει την λαρίδα σταδιακά μέχρι να φτάσει στο ακροφύσιο και να μετασηματιστεί. Το heat sink τελικά έσπασε, λογικά λόγω της τοποθέτησης του, η θερμοκρασία δεν πέφτει αρκετά και σε συνδυασμό με τις δυνάμεις που του ασκούνταν λόγω της έλξη του καρουλιού αναπτύχθηκαν ρωγμές στο υλικό που λογικά είχαν δημιουργηθεί από το άνοιγμα της οπής του με ηλεκτρικό τρυπάνι.



Εικ. 85 - 1) Σχέδιο βάσης ακροφύσιου και λοιπών εξαρτημάτων 2,3) Εκτυπωμένη βάση ακροφύσιου και λοιπών εξαρτημάτων δίπλα στον οδηγό λορίδας 4) Εικόνα με το σπασμένο heat sink

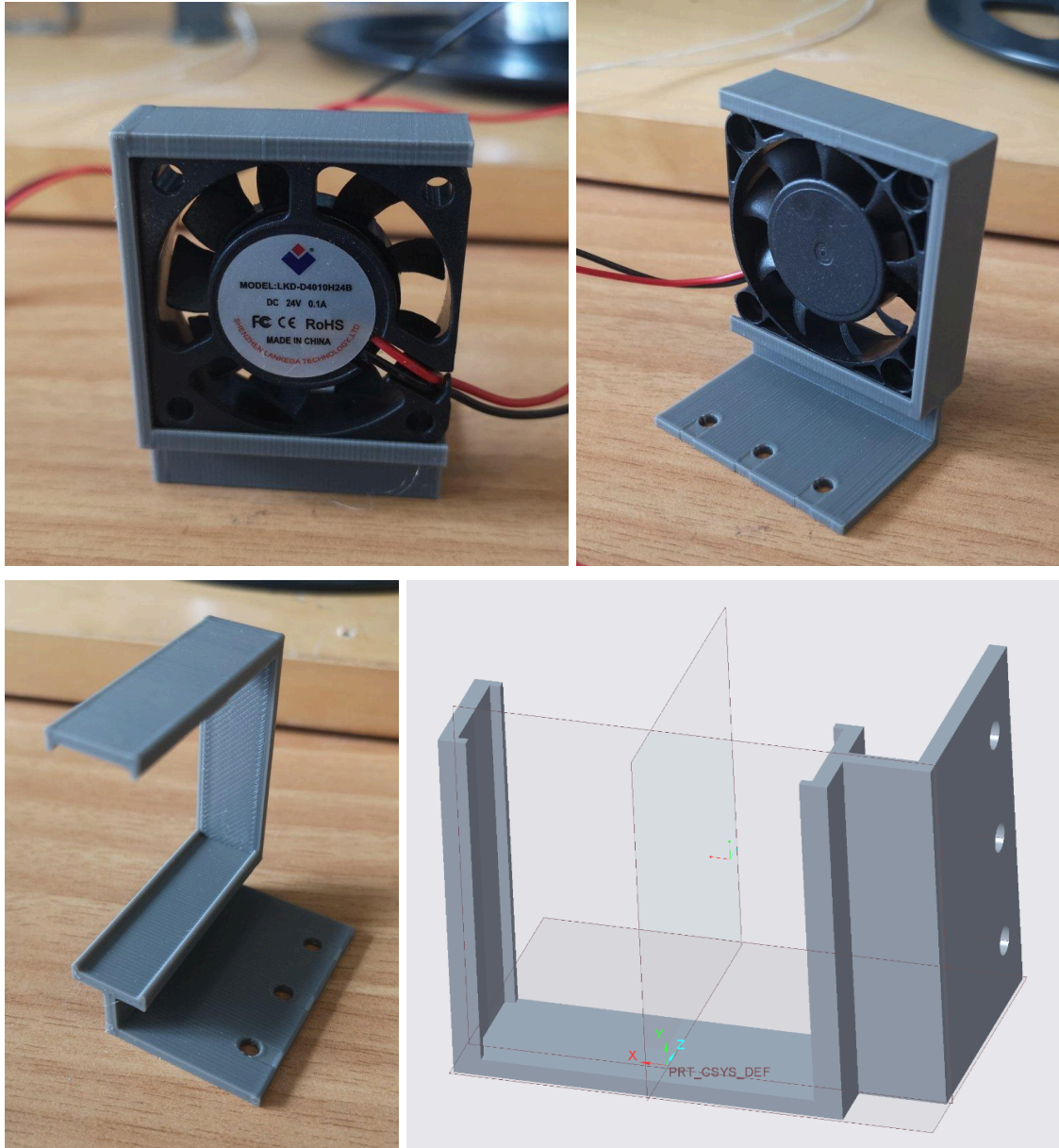
Έτσι το heat block και ακροφύσιο τελικά τοποθετήθηκαν σε αυτή τη γωνία στήριξης που φαίνεται στις εικόνες 86 1 και 2. Ευτυχώς το ύψος που θα στηρίζεται το ακροφύσιο έχει μηδαμινή απόκλιση από το ύψος του κάτω μέρους της τροχαλίας και το νήμα εξακολουθεί να έλκεται συνευθειακά. Τέλος, επίσης σαν απο τύχη οι οπές της γωνίας ήταν ακριβώς στην διάμετρο που επέτρεψε το βίδωμα του ακροφυσίου μέσα από την πάνω οπή της γωνίας και έπειτα στο heat block έτσι ώστε να γαντζώνει και να σταθεροποιείται πάνω στην γωνία στήριξης απόλυτα.



Εικ. 86 - Εικόνα χρήσης της γωνίας στήριξης ως βάση για το ακροφύσιο και τα λοιπά εξαρτήματα δίπλα στον οδηγό λωρίδας

Όπως φαίνεται και στις παραπάνω εικόνες 86 1 και 2 σχεδιάστηκε και ένα κομμάτι (εκτυπομένο με γκρι υλικό) που εξυπηρετεί ως οδηγός της λωρίδας για την τροφοδοσία της στο ακροφύσιο. Η χρήση του και η απλός σχεδιασμός του είναι αυτεξήγητες.

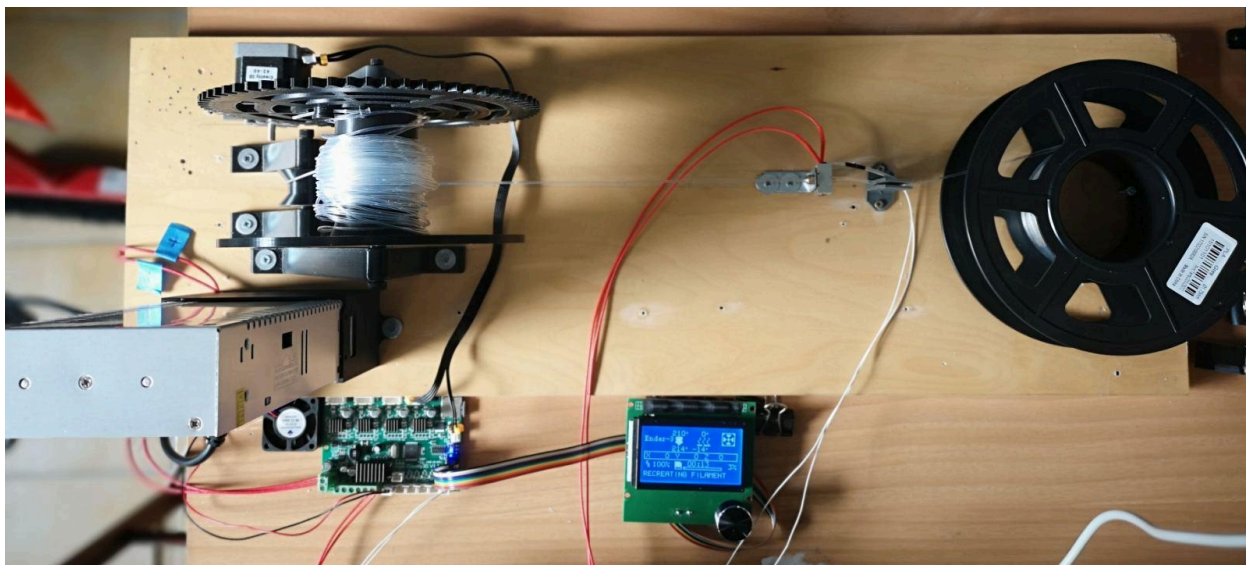
Τέλος σχεδιάστηκε μια βάση για το ανεμιστηράκι. Μεγάλη σημασία δόθηκε στον σχεδιασμό για 3Δ εκτύπωση ως ένα ενιαίο εκτυπώσιμο κομμάτι που δεν θα έχει την ανάγκη στηρίξεων (έγινε σχεδίαση για εκτύπωση στον προσανατολισμό που φαίνεται στην τελευταία εικόνα). Επίσης θεωρήθηκε θετικός ο σχεδιασμός της έτσι ώστε το ανεμιστηράκι να είναι αποσπώμενο από την βάση εύκολα με συρταρωτό τρόπο (σε περίπτωση βλάβης ή καθαρισμού).



Εικ. 87 - 1,2,3) Εκτυπωμένη βάση για το ανεμιστηράκι 4) Σχέδιο στον Η/Υ βάσης για το ανεμιστηράκι, τοποθετημένο στον προσανατολισμό που εκτυπώθηκε ώστε να μην απαιτούνται στηρίξεις

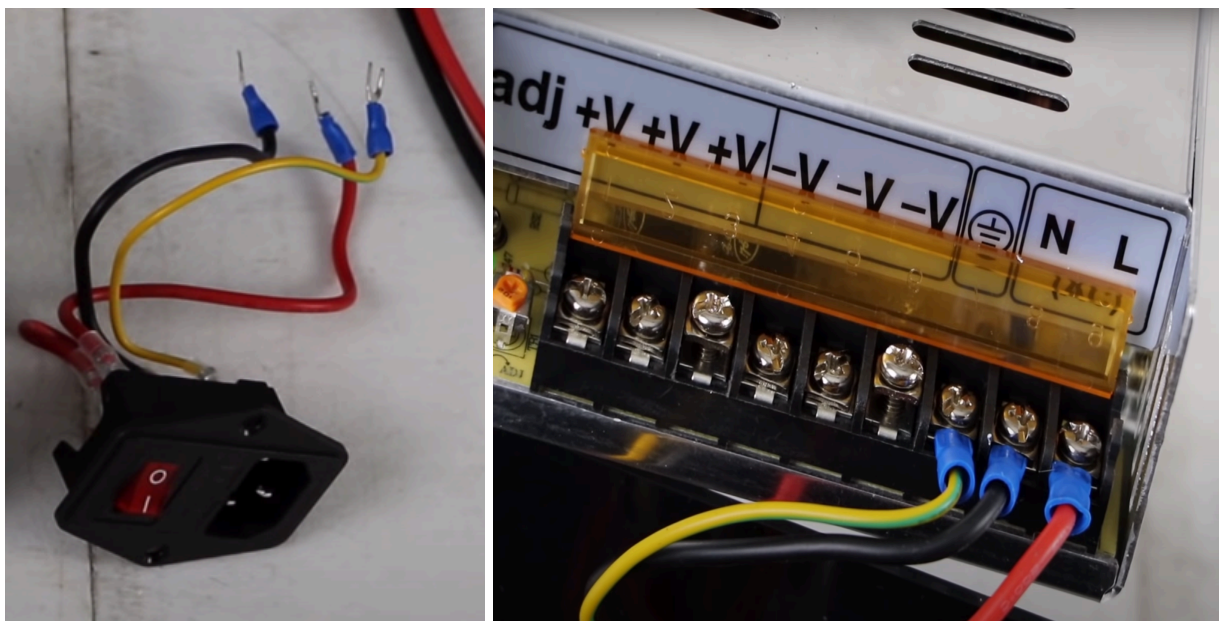
Το ανεμιστηράκι εν τέλει δεν χρησιμοποιήθηκε ποτέ στα πειράματα με το πρωτότυπο διότι δεν ενεργοποιήθηκε με τον έτοιμο G κώδικα που βρέθηκε στο σάιτ [The ReCreator 3D](https://www.therecreator3d.com/) που προοριζόταν για συστήματα μετατροπής που χρησιμοποιούν πλακέτα από creality ender 3 εκτυπωτή καθώς δεν υπάρχουν γραμμές αφιερωμένες στην λειτουργία του και δεν θεωρήθηκε αρκετά απαραίτητο το να προστεθούν, τουλάχιστον σε αυτό το στάδιο.

Όταν όλα τα απαραίτητα κομμάτια του πρωτότυπου συστήματος ήταν σχεδιασμένα και εκτυπωμένα τότε έγινε η συναρμολόγηση του. Κάποια κομμάτια τροποποιήθηκαν στην πορεία όπως έγιναν αναφορές προηγουμένως. Για την συναρμολόγηση χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρικό δραπενοκατσάβιδο για να βιδώνουν οι βίδες στο ξύλο.



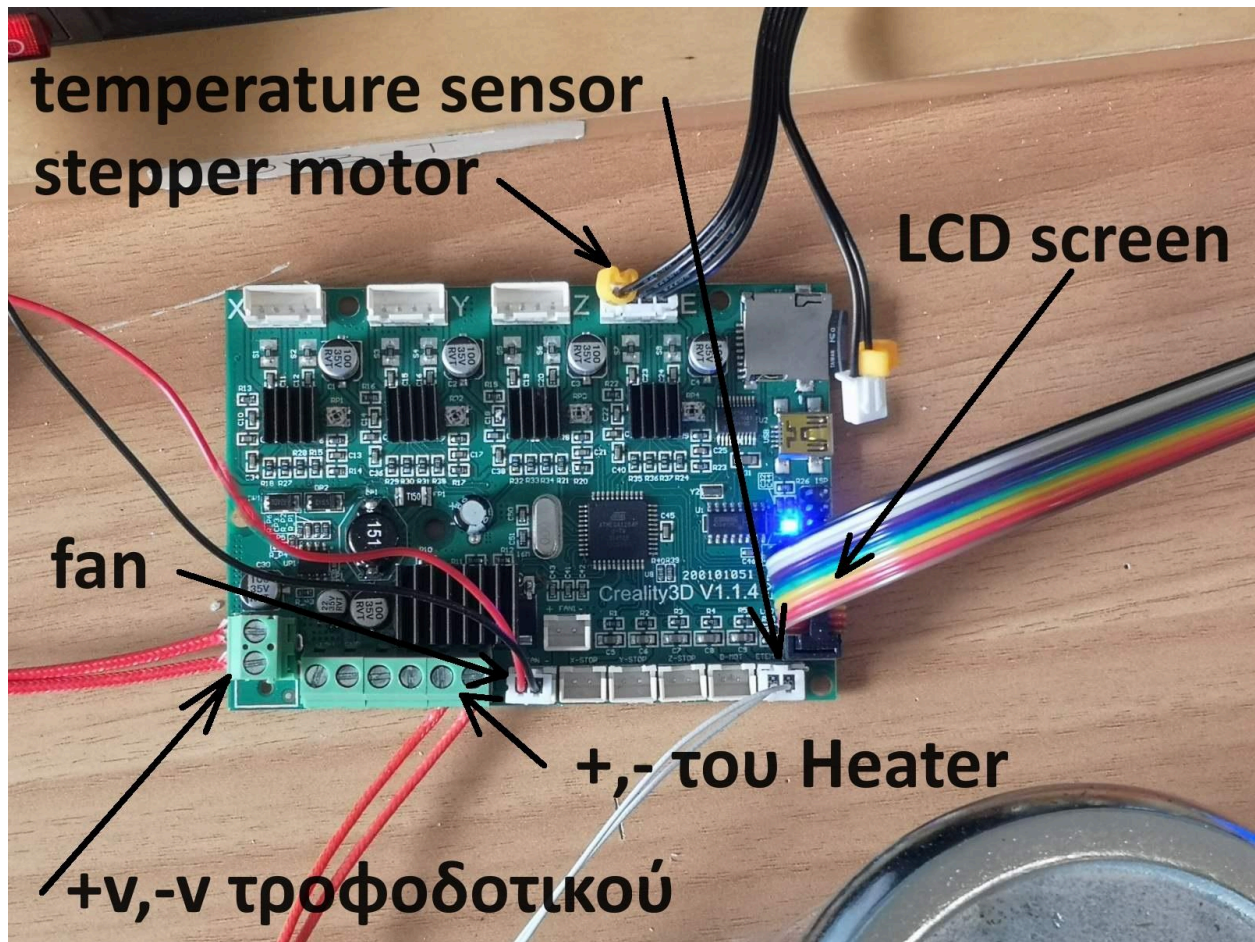
Εικ. 88 - Συναρμολογημένο και έτοιμο για χρήση πρωτότυπο σύστημα μετατροπής μπουκαλιών PET σε νημα για 3Δ εκτυπωτές

Οι συνδέσεις στο τροφοδοτικό είναι οι αυτές που φαίνονται στις φωτογραφίες και επίσης δύο καλώδια συνδέθηκαν αντίστοιχα σε ένα από τα +V και -V για το σκοπό της τροφοδοσίας της μητρικής πλακέτας που με την σειρά της τροφοδοτεί τα υπόλοιπα εξαρτήματα.



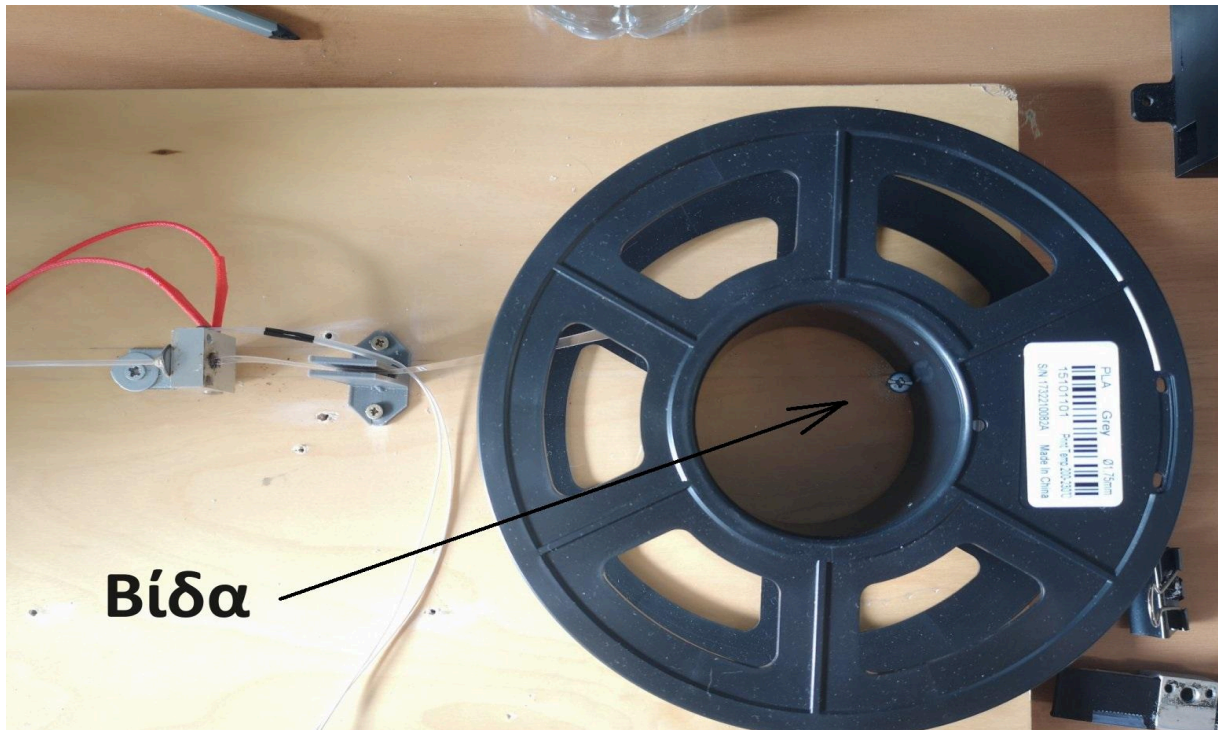
Εικ. 89 - 1) Διακόπτης ρεύματος 2) Συνδεσιμότητα των καλωδίων του διακόπτη ρεύματος με το τροφοδοτικό

Η πλακέτα αντίστοιχα έχει τις δικές της συνδέσεις που περιγράφονται στην φωτογραφία(Εικ. 90).

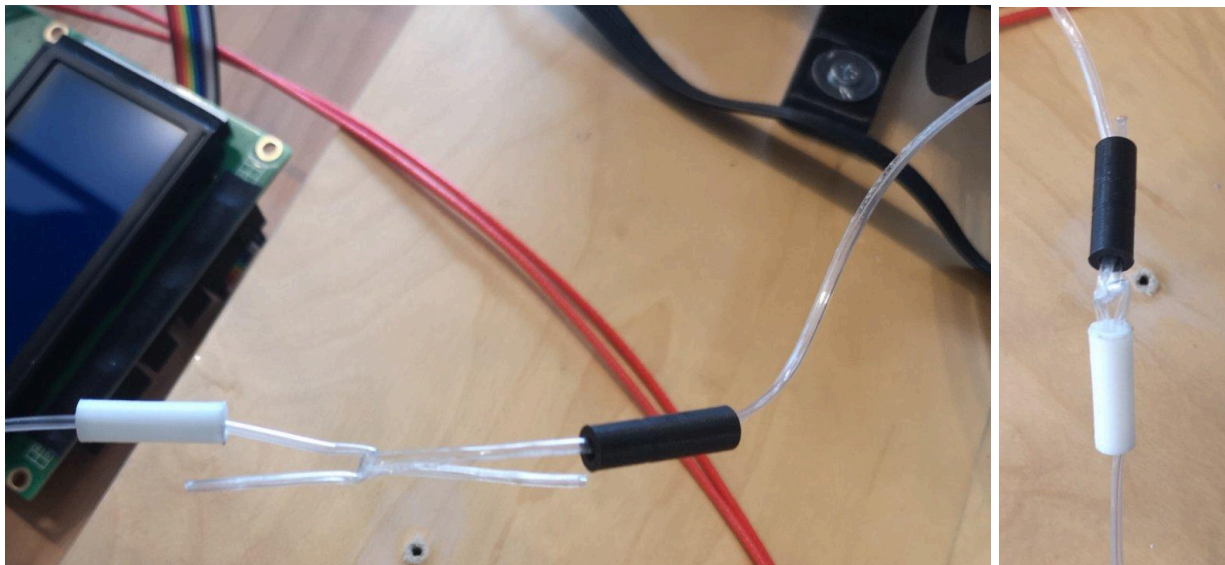


Εικ. 90 - Σήμανση των συνδέσεων της μητρικής πλακέτας με τα υπόλοιπα ηλεκτρονικά εξαρτήματα

Οι τελευταίες προσθήκες στο πρωτότυπο σύστημα ήταν η τοποθέτηση μιας βίδας για να κρατάει ένα καρούλι (το καρούλι είναι από υλικό νήμα εκτύπωσης και σε αυτό τυλίγεται η λωρίδα) και να βοηθάει στην περιστροφή που πάνω του θα τυλίγεται η λωρίδα που προορίζεται για τροφοδοσία στο σύστημα. Θα μπορούσε να σχεδιαστεί ένας καλύτερος μηχανισμός για αυτήν την λειτουργία αλλά για την φάση λειτουργικού πρωτοτύπου αυτό είναι επαρκές. Τέλος, σχεδιάστηκαν και εκτυπώθηκαν δύο μικρά κομμάτια σε σχήμα καλαμακιού για την πιο εύκολη ασφάλιση του νήματος στο καρούλι έλξης του χωρίς να χρειάζεται περιττό χειροκίνητο με την βοήθεια πένσας τράβηγμα του νήματος από το ακροφύσιο μέχρι και το καρούλι αλλά για μόνο μια μικρή απόσταση από το ακροφύσιο. Η χρήση τους είναι αυτεξήγητη με τις παρακάτω φωτογραφίες(Εικ. 91, 92.1 και 92.2).



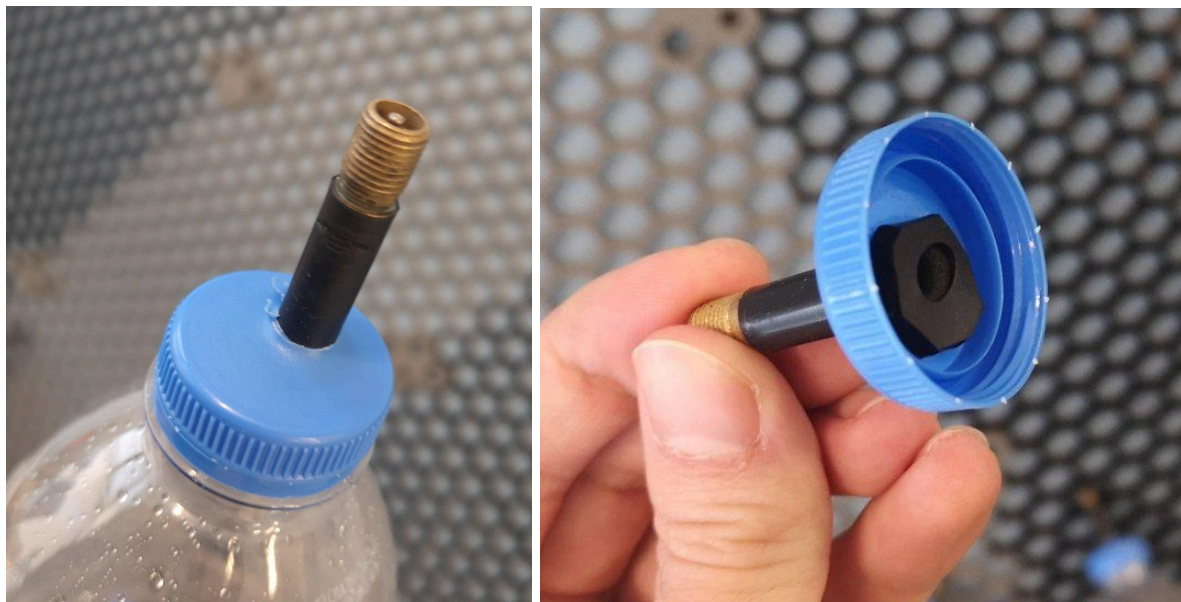
Εικ. 91 - Τοποθέτηση βίδας για την υποβοήθηση περιστροφής και σταθεροποίησης του καρουλιού λορίδας



Εικ. 92 - Φωτογραφίες για την κατανόηση της τεχνικής ασφάλισης του νήματος στο καρούλι νήματος

Επισκόπηση της διαδικασίας μετατροπής για τους σκοπούς των πειραμάτων της διπλωματικής εργασίας

Για τα πειράματα της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά είδη μπουκαλιού. Το ένα είναι αναψυκτικού coca cola zero 1.5 L (0.6mm πάχος) ενώ το άλλο νερού AB Βασιλόπουλος 1.5 L (0.25mm πάχος). Αρχικά τρυπήθηκαν τα πώματα με ένα ηλεκτρικό δραπανοκατσάβιδο σε λίγο μικρότερη διάμετρο απ' ότι έχουν οι βαλβίδες που έχουν κοπεί από σαμπρέλες ποδηλάτου. Έπειτα με λίγη πίεση περάστηκαν η βαλβίδες μέσα από τις οπές των πτωμάτων.



Εικ. 93 - Εικόνες για την κατανόηση της χρήσης βαλβίδων ποδηλάτου για το φούσκωμα των μπουκαλιών

Στα μπουκάλια κόκα κόλας πρέπει να γίνεται ένα καλό ξέπλυμα του εσωτερικού με νερό ενώ στα μπουκάλια νερού δεν είναι απαραίτητο. Στην συνέχεια αφαιρείται η ετικέτα από τα μπουκάλια και φουσκώνονται με την βοήθεια ηλεκτρικής τρόμπας στα 20psi. Μετά από αυτό με χρήση θερμοπίστολου εφαρμόζεται προσεκτικά θερμότητα στα τοιχώματα των φιαλών περιστρέφοντας τα ώστε να παραμορφώνονται ομοιόμορφα και να διατηρηθεί το πάχος τους ενώ εξομαλύνονται τα μοτίβα και οι ραβδώσεις.

Τότε ενώ είναι ακόμα ζεστές οι φιάλες και ιδιαίτερα στο σημείο που είναι τα υπολείμματα της κόλλας από την ετικέτα (γι' αυτό είναι καλό να περνιέται το σημείο με την κόλλα τελευταίο πάνω από το θερμοπίστολο), τοποθετείται σε ένα χαρτί σπορέλαιο και με αυτό τρίβεται η κόλλα και αφαιρείται. Με ένα άλλο χαρτί σκουπίζονται πρόχειρα τα υπολείμματα λαδιού και ότι κόλλα παραμένει μαζί με το λάδι ενώ για τον πλήρη καθαρισμό τους πλένονται με σφουγγάρι και σαπούνι πιάτων. Να σημειωθεί ότι η αφαίρεση της κόλλας και το πλύσιμο είναι πολύ πιο εύκολη διαδικασία όσο η φιάλη είναι φουσκωμένη.

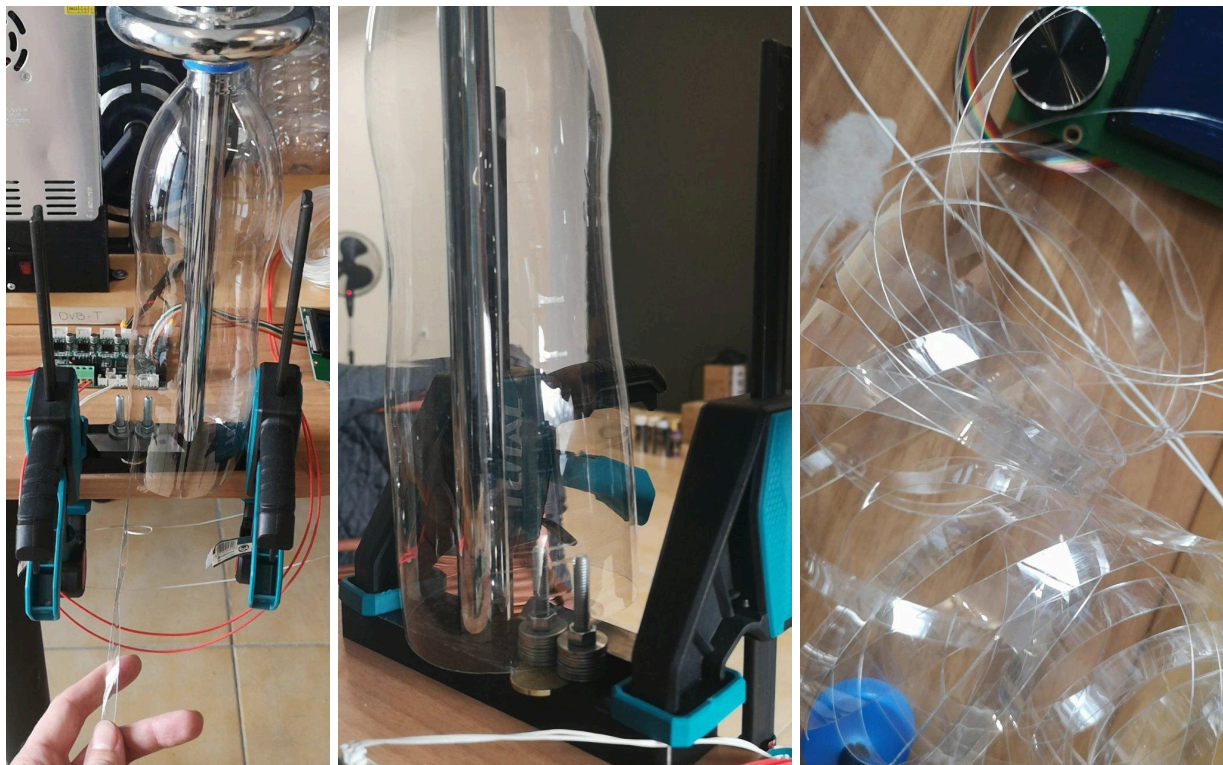


Εικ. 94 - Φωτογραφίες από τα βήματα λείανσης των φιαλών και αφαίρεσης της κόλλας από την ετικέτα

Ύστερα αφαιρείται η πίεση από την βαλβίδα με κάτι μυτερό για να είναι ασφαλής η αφαίρεση του πώματος και το κόψιμο του πάτου του μπουκαλιού που είναι και το επόμενο βήμα. Η αφαίρεση του πάτου γίνεται με ψαλίδι και όσο τον δυνατόν πιο ίσια γίνεται. Με ένα πανί ή χαρτοπετσέτα αφαιρείται η υγρασία και τα νερά από το εσωτερικό της φιάλης. Στην συνέχεια πάλι με το ψαλίδι κόβεται η αρχή της λωρίδας ώστε να μπορεί να περάσει από το σύστημα κοπής μπουκαλιών.



Εικ. 95 - Φωτογραφίες από τα βήματα προετοιμασίας της φιάλης για το σύστημα κοπής



Εικ. 96 - 1,2) Φωτογραφίες από την χρήση του συστήματος κοπής 3) Λωρίδα που προέκυψε από την κοπή ενός μπουκαλιού

Ακολουθεί το τύλιγμα της λωρίδας σε ένα απλό καρούλι από χρησιμοποιημένο νήμα εκτύπωσης. Αν και στα πειράματα για την ένωση των λωρίδων αυτό το βήμα παραλείπεται για να επιτρέπεται η εύκολη επεξεργασία της λωρίδας (δηλαδή να κόβεται για να ενώνεται σε διάφορα σημεία). Στην συνέχεια η άκρη της λωρίδας κόβεται πολύ λεπτή, δηλαδή κάτω των 17mm (διάμετρος ανοίγματος ακροφύσιου) ώστε να περάσει από το ακροφύσιο. Έπειτα ενεργοποιείται το σύστημα μετατροπής και ρυθμίζεται η θερμοκρασία του ακροφύσιου στους 210 βαθμούς κελσίου, όταν το ακροφύσιο πιάσει θερμοκρασία, με μια πένσα τραβιέται η άκρη της λωρίδας που περάστηκε μέσα από το ακροφύσιο, μέχρι να είναι αρκετό το μήκος του παραγόμενου πλέον νήματος για να ασφαλιστεί στο καρούλι έλξης του. Πλέον το μόνο που απομένει είναι να ενεργοποιηθεί ο κώδικας από το πάνελ και να ξεκινήσει το μοτέρ να τραβάει το νήμα.

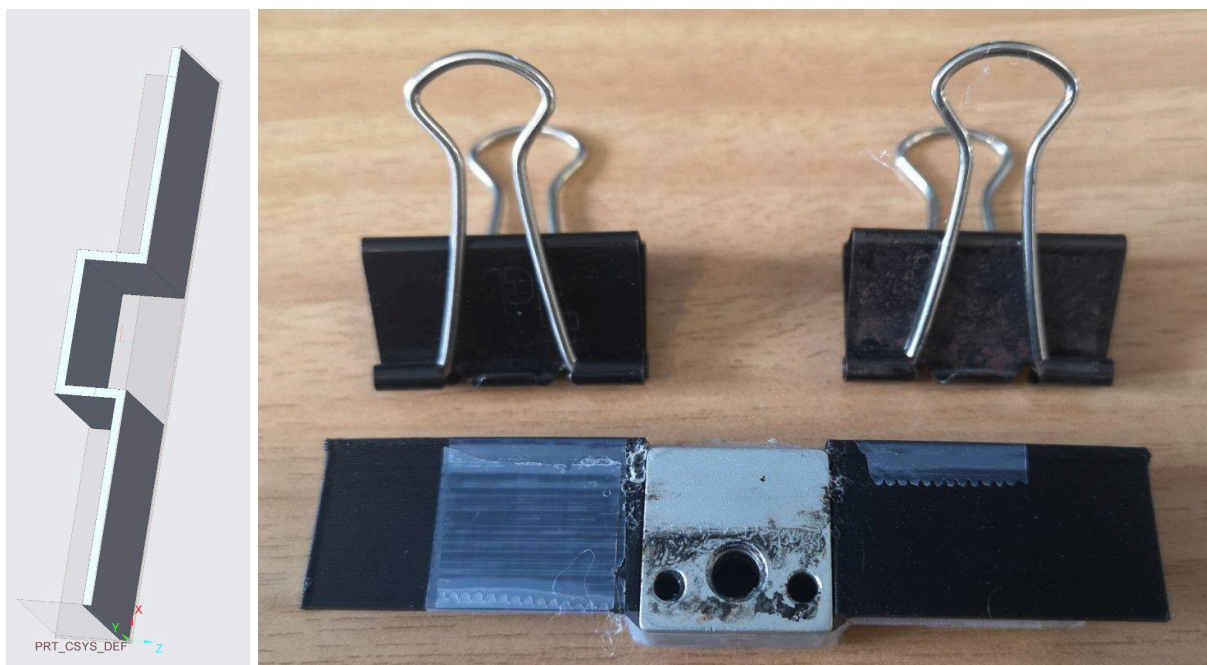
Περιγραφή των πειραμάτων για την βελτίωση της διαδικασίας μετατροπής μέσω της ένωσης των λωρίδων και μέθοδοι συλλογής δεδομένων

Τα πειράματα για την ένωση των λωρίδων ξεκίνησαν απευθείας μόλις το λειτουργικό πρωτότυπο ολοκληρώθηκε και είχαν μια βασική δομή-μεθοδολογία. Αφού γίνεται η κοπή πολλαπλών μπουκαλιών σε λωρίδες, προετοιμάζεται μια από αυτές για να περάσει από το σύστημα μετατροπής. Δηλαδή κόβεται η μια άκρη της με ψαλίδι ώστε να είναι αρκετά λεπτή και να μπορεί να περάσει από το ακροφύσιο. Αφού αυτό θερμαίνεται η λωρίδα τραβιέται με μια πένσα μέχρι να μπορεί να ασφαλιστεί στο καρούλι έλξης νήματος. Έπειτα η λωρίδα κόβεται τουλάχιστον σε ένα σημείο λίγο πριν το ακροφύσιο (περίπου στο μισό μέτρο) ώστε να δοκιμαστεί κάποια τεχνική ένωσης. Στην συνέχεια προετοιμάζεται η κάμερα για την

καταγραφή του πειράματος και ξεκινά η μετατροπή της λωρίδας σε νήμα μέχρι να περάσει το σημείο της ένωσης και είτε να αποτύχει και να σπάσει η ένωση είτε να περάσει με επιτυχία από το ακροφύσιο χωρίς να σπάσει η ένωση. Στην περίπτωση της επιτυχίας η διαδικασία επαναλαμβάνεται από το σημείο της κοπής της λωρίδας σε ένα ή παραπάνω σημεία για την δοκιμή τεχνικής ένωσης, ενώ στην περίπτωση της αποτυχίας ξεκινάει από το σημείο της κοπής της άκρης της υπολειπόμενης λωρίδας ή της επόμενης ώστε να περάσει από το ακροφύσιο. Είτε στην πρώτη περίπτωση είτε στην δεύτερη η διαδικασία επαναλαμβάνεται με την ίδια τεχνική ένωσης ώστε να υπάρχει πλήθος προσπαθειών και δεδομένων για κάθε τεχνική ένωσης μέχρι αυτή να αποκλειστεί, να τροποποιηθεί ή να θεωρηθεί λειτουργική. Όταν μια τεχνική φαίνεται να έχει επιτυχία δοκιμάζεται πολλαπλές φορές σε κάθε πέρασμα (εκκίνηση του συστήματος μετατροπής), δηλαδή θα κοπεί η λωρίδα σε παραπάνω από ένα σημεία και θα δοκιμαστούν πολλές ενώσεις της ίδιας τεχνικής για να φανερωθεί το ποσοστό επιτυχίας της.

Λήφθηκαν υπόψη πολλές τεχνολογικές μέθοδοι ένωσης πλαστικών κομματιών αλλά όλες ήταν ακατάλληλες είτε λόγω απαίτησης ακριβούς εξοπλισμού είτε λόγω ακαταλληλότητας για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Έτσι η μόνη επιλογή ήταν το λιώσιμο των πλαστικών με απλά εργαλεία όπως ένα κολλητήρι. Αγοράστηκε κολλητήρι για την ΔΕ διότι θεωρήθηκε απαραίτητο το κολλητήρι να διαθέτει την δυνατότητα επιλογής θερμοκρασίας ώστε να επιλεγεί η θερμοκρασία των 260 βαθμών κελσίου που είναι και η θερμοκρασία τήξης του υλικού. Έτσι το υλικό θα προστατεύεται από το να καεί ή να υποβαθμιστεί.

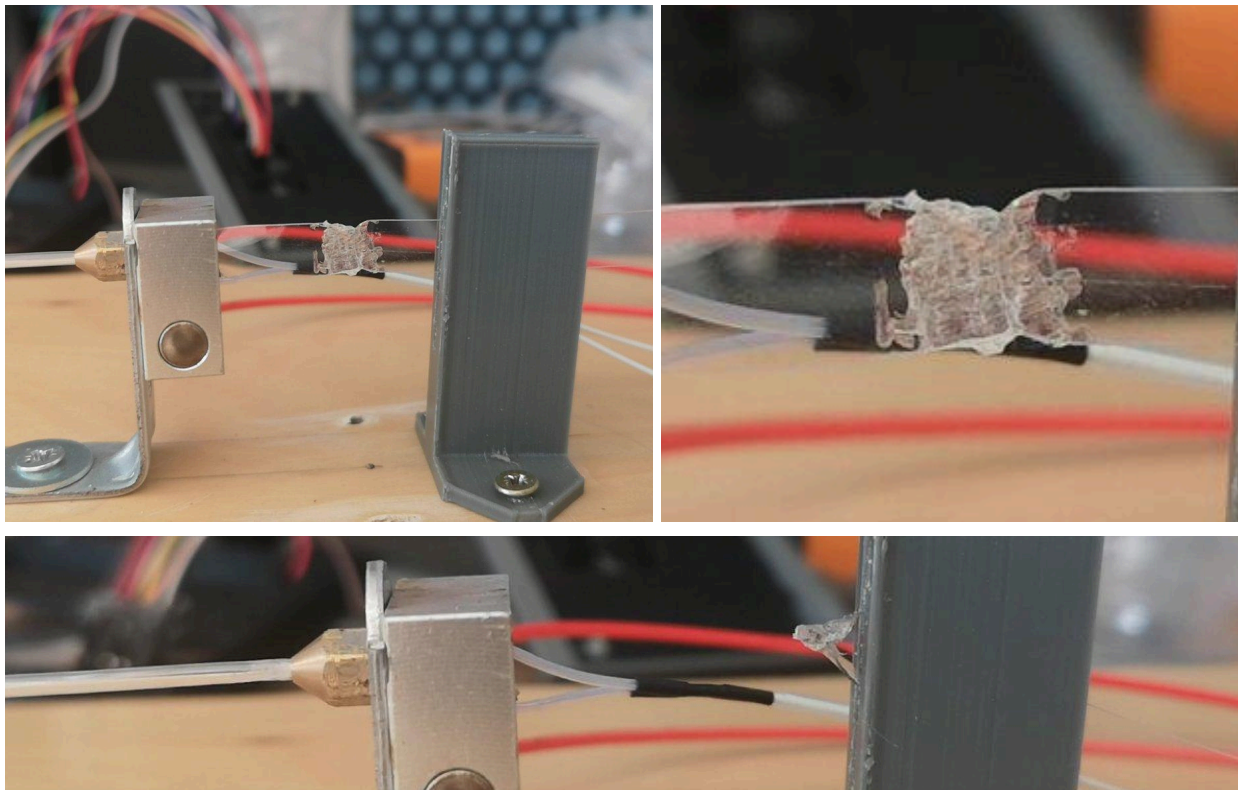
Για την χρήση του κολλητηριού σχεδιάστηκε ένα απλό πρόχειρο κομμάτι που εκτυπώθηκε και φιλοξενεί ένα heat block για ender 3 με σκοπό να υπάρχει μια μεταλλική επιφάνεια πάνω στην οποία να γίνεται η ένωση των λωρίδων με το κολλητήρι. Το κομμάτι αυτό φαίνεται στις παρακάτω φωτογραφίες (Εικ. 96 2,3 και 4) μαζί με δύο πιαστράκια ζωγραφικής τα οποία χρησιμεύουν στην τοποθέτηση και ακινητοποίηση των άκρων των προς ένωση λωρίδων.





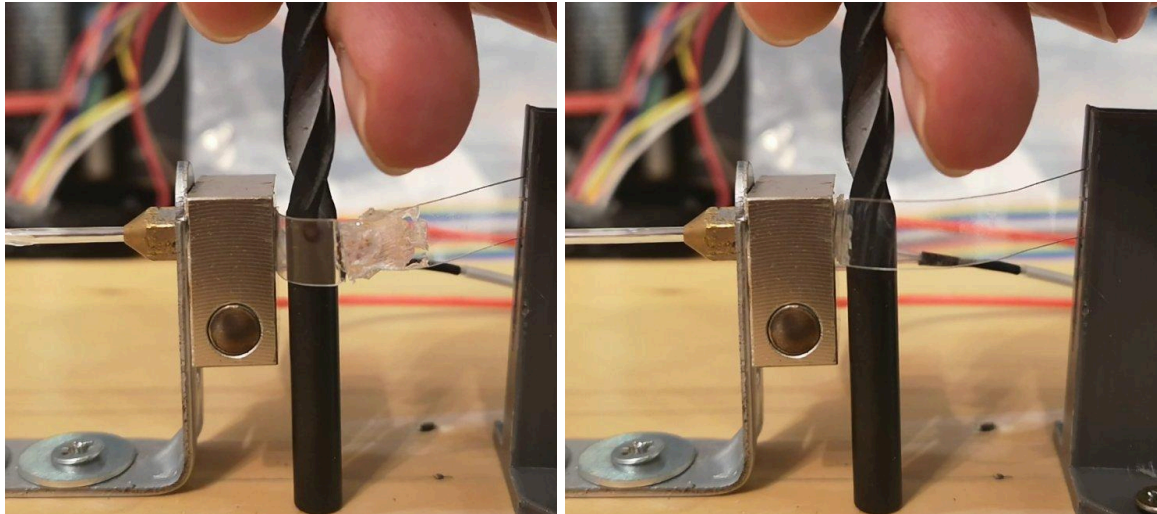
Εικ. 97 - 1) Σχέδιο στον Η/Υ προχειρής βάσης του μπλοκ θέρμανσης για την δημιουργία συστήματος για την ένωση των λωρίδων 2) Όλα τα εξαρτήματα για την ένωση των λωρίδων πλην του κολλητηριού 3,4) Φωτογραφίες από την χρήση του συστήματος ένωσης των λωρίδων

Η πρώτη τεχνική που δοκιμάστηκε ήταν η απλή τοποθέτηση των δύο άκρων των λωρίδων προς ένωση τη μια πάνω στην άλλη και το κολλητήρι να λιώνει την από πάνω λωρίδα σιγά σιγά πάνω στην από κάτω. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να αλείφεται ουσιαστικά η πάνω λωρίδα στην κάτω αλλά χωρίς να λιώνει η από κάτω ώστε να δημιουργούνται διαπλοκές στις αλυσίδες. Ακόμα ήταν φανερή η κρυστάλλωση του υλικού σε μεγάλο βαθμό στο σημείο της ένωσης γεγονός που θεωρήθηκε αποθαρρυντικό για την ικανότητα της ένωσης να περάσει από το ακροφύσιο. Η δοκιμή αυτής της τεχνικής ήταν αποτυχημένη σε όλες τις προσπάθειες όπως και αναμενόταν.



Εικ. 98 - Εικόνες ανάδειξης της πιο απλής τεχνικής ένωσης και της αποτυχίας της να περάσει από το ακροφύσιο

Δοκιμάστηκε επίσης η ίδια τεχνική ένωσης αλλά με μικρές παραλλαγές, όπως για παράδειγμα να περνάει η λωρίδα κοντά από το heat block πριν περάσει μέσα από αυτό και το ακροφύσιο, με το σκεπτικό ότι θα προθερμάνεται και θα μαλακώνει λίγο το κομμάτι της ένωσης πριν περάσει από το ακροφύσιο για να διευκολύνει τον μετασχηματισμό της σε νήμα. Παρόλα αυτά και αυτές οι προσπάθειες δεν έφεραν το επιθυμητό αποτέλεσμα και κατέληξαν στο σπάσιμο της ένωσης.



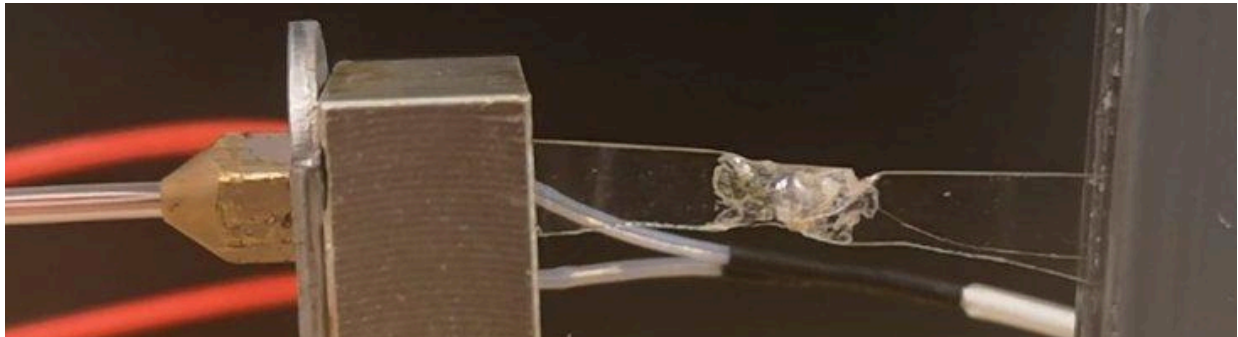
Εικ. 99 - Εικόνες από την τροποποίηση της διαδρομής της λωρίδας για να περνάει κοντά από το μπλοκ θέρμανσης

Στην συνέχεια δοκιμάστηκε η ίδια τεχνική της ένωσης με λιώσιμο της από πάνω λωρίδας στην από κάτω αλλά σε μικρότερη επιφάνεια ώστε να είναι ευκολότερο να περάσει από το ακροφύσιο. Αναλυτικότερα οι δύο άκρες των λωρίδων προς ένωση κόβονται στο μισό τους πλάτος και τοποθετούνται η μια πάνω από την άλλη και με το κολλητήρι στους 260 βαθμούς κελσίου η από πάνω λιώνεται και “αλείφεται” στο πάνω μέρος της από κάτω λωρίδας. Η τεχνική και σε αυτή της την παραλλαγή απέτυχε σε κάθε προσπάθεια. Η λογική της μείωσης του πλάτους των λωρίδων στα δύο άκρα που θα γίνει η ένωση ώστε να υπάρχει το ίδιο ποσό υλικού στο σημείο της ένωσης όπως και στο υπόλοιπο νήμα είναι κάτι που υπήρχε η πρόθεση να γίνει εξαρχής. Απλά υπάρχει επίσης η ανάγκη να δοκιμαστεί και να αποκλειστεί η πιο απλοϊκή προσέγγιση της μη μείωσης του πλάτους και απλού λιώσιματος της από πάνω λωρίδας στην από κάτω. Έτσι από αυτό το σημείο των πειραμάτων και μετά θα εφαρμοστεί μείωση του πλάτους των λωρίδων στα σημεία της ένωσης σε κάθε τεχνική ένωσης.



Εικ. 100 - Φωτογραφία αποτελέσματος απλής τεχνικής ένωσης με μειωμένο πλάτος λωρίδας

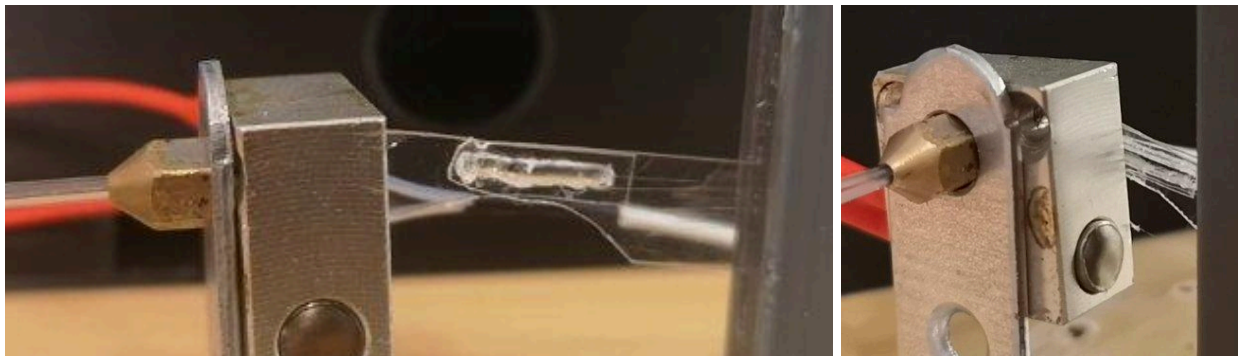
Μετά από αυτήν την τεχνική έπρεπε να δοκιμασθεί κάτι διαφορετικό, το απλό λιώσιμο της από πάνω λωρίδας δεν είχε επιθυμητά αποτελέσματα. Έτσι δοκιμάστηκε η ένωση των λωρίδων με λιώσιμο στα ενδιάμεσα τοιχώματά τους, δηλαδή τοποθέτηση της μιας λωρίδας πάνω στην άλλη αλλά την ώρα της κόλλησης το κολλητήριο να τοποθετείται ανάμεσα ώστε να λιώνει λίγο και την από πάνω και την από κάτω. Η διαδικασία αυτή θέλει προσοχή γιατί η από πάνω λωρίδα κυρίως αλλά και η κάτω λόγω εντροπίας μαζεύουν και λυγίζουν, οπότε δεν είναι εύκολα διαχειρίσιμες στο να έρθει και να κάτσει μετά η μια πάνω στην άλλη και μετά να περάσει το κολλητήριο πάνω και από τις δύο. Η ένωση που φέρνει ως αποτέλεσμα η τεχνική αυτή έχει πολύ μεγάλο ποσοστό κρυστάλλωσης και δεν περνάει από το ακροφύσιο.



Εικ. 101 - Εικόνα από την δοκιμή μιας τεχνικής ένωσης λωρίδων

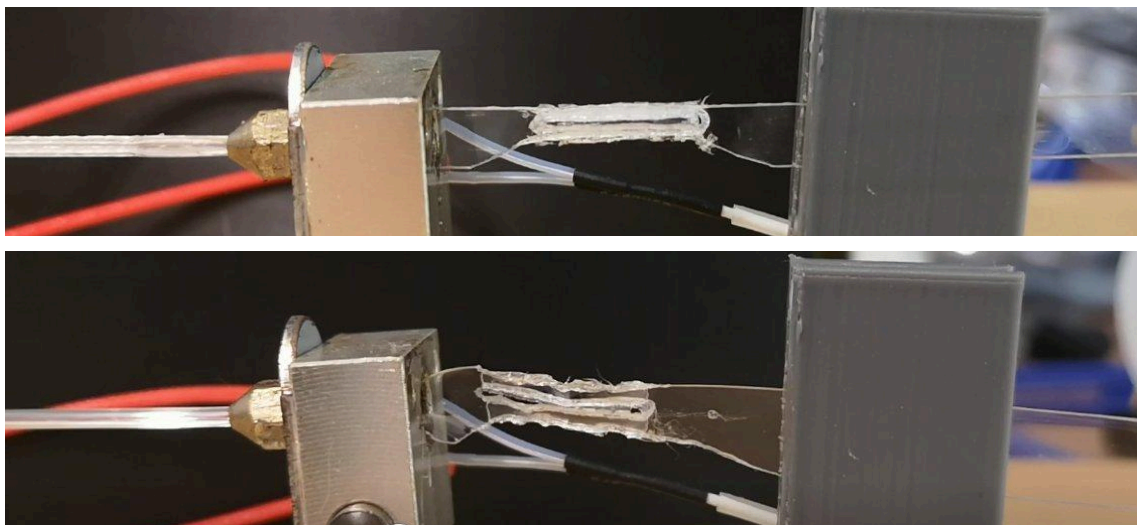
Έπρεπε λοιπόν να δοκιμαστούν τεχνικές που να λιώνουν και τις δύο λωρίδες στο σημείο της ένωσης ώστε να γίνει διαπλοκή των αλυσίδων. Πρώτα δοκιμάστηκε μια τεχνική που τοποθετούνται οι δύο άκρες των λωρίδων (πάντα με μειωμένο περίπου στο μισό πλάτος) η μια πάνω στην άλλη. Δια μήκη της επικάλυψης των δύο λωρίδων με το κολλητήριο γίνονται τρύπες διαπερνώντας με την μύτη του κολλητηριού και τις δύο λωρίδες. Εφαρμόζεται επίσης μία μικρή περιστροφική κίνηση με αλλαγή φοράς. Το αποτέλεσμα αυτής της τεχνικής ήταν μια σειρά αποτυχιών αλλά οδήγησε στην επόμενη τεχνική. Στην τεχνική αυτή η άκρες των λωρίδων και πάλι συμπίπτουν όπως και σε όλες τις άλλες αλλά σε αυτήν με την μύτη του κολλητηριού χαράζεται-σκάβεται ένα “χαντάκι” (με δύο ή τρία αργά περάσματα προς

την ίδια κατεύθυνση, την κατεύθυνση απο το ακροφύσιο και προς την λωρίδα) που διαπερνά τις δύο λωρίδες. Η ένωση δεν πέρασε από το ακροφύσιο χωρίς να σπάσει σε καμία προσπάθεια.



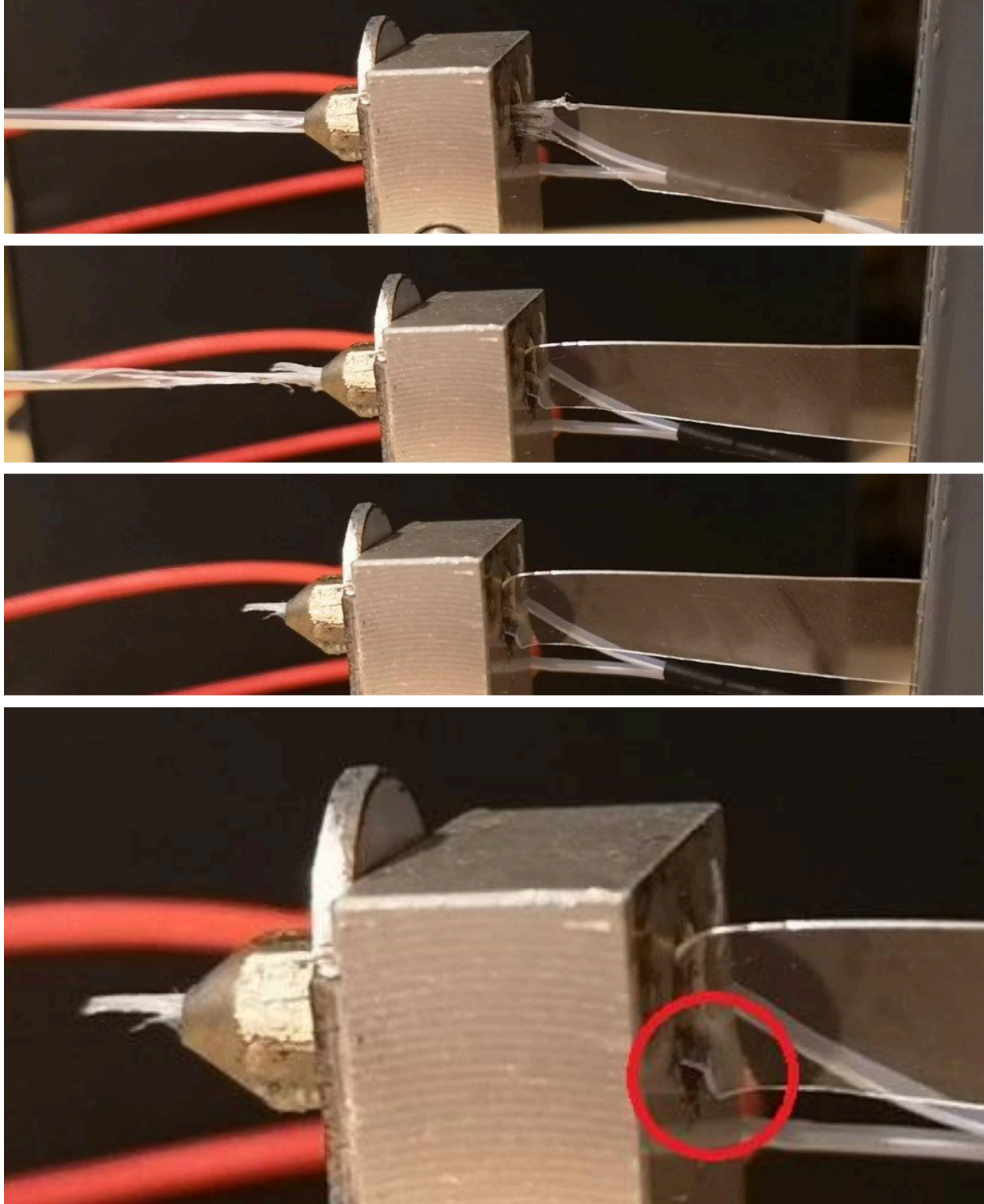
Εικ. 102 - Εικόνες από την δοκιμή μιας τεχνικής ένωσης λωρίδων

Όταν όμως στην προηγούμενη τεχνική προστέθηκαν και περάσματα του κολλητηριού από τις δύο πλάγιες πλευρές των λωρίδων (πάλι τα περάσματα γίνονταν με συγκεκριμένη κατεύθυνση φοράς από το ακροφύσιο προς την λωρίδα) υπήρξε η πρώτη επιτυχία την οποία ακολούθησαν κι άλλες.



Εικ. 103 - Εικόνες από δοκιμές της επιτυχημένης τεχνικής ένωσης λωρίδων

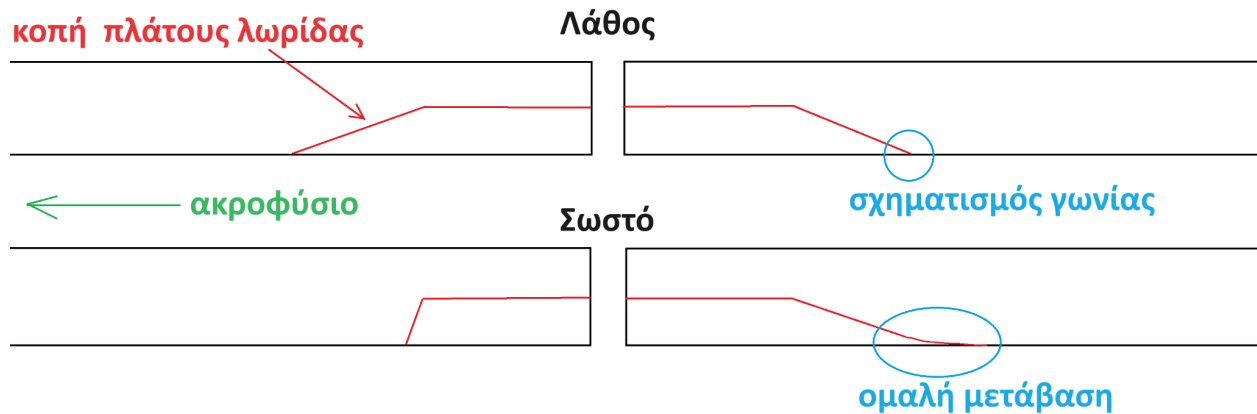
Ακόμα όμως το ποσοστό επιτυχίας ήταν 8 με 9 στα 10. Κάτι έκανε κάποιες προσπάθειες να αποτυγχάνουν. Η απάντηση σε αυτό είναι ότι όταν κόβεται η άκρη της λωρίδας στο μισό της πλάτους αν η μετάβαση στο πάχος της λωρίδας είναι απότομη τότε το σημείο αυτής της μετάβασης δεν τροφοδοτείται καλά στο ακροφύσιο (στην δεύτερη μετάβαση πλάτους λωρίδας που περνάει από το ακροφύσιο, αυτή μετά την ένωση) και έτσι δημιουργείται μεγάλη αντίσταση και η ένωση σπάει.



Εικ. 104 - 1,2,3) Εικόνες από δοκιμή της επιτυχημένης τεχνικής ένωσης λωρίδων που απέτυχε 4) Σήμανση του αποτελέσματος του λάθους σε κάποιες εκτελέσεις της επιτυχημένης τεχνικής ένωσης λωρίδων

Όπως φαίνεται και στις από πάνω φωτογραφίες (Εικ. 104) όταν το κόψιμο της άκρης της λωρίδας που θα ενωθεί με αυτήν που θα περάσει πρώτη από το ακροφύσιο είναι απότομο με μεγάλη κλίση και σχηματίζει

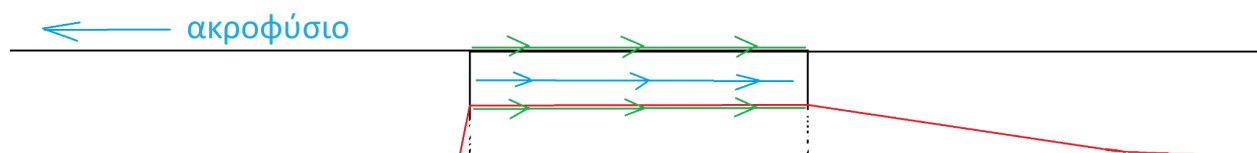
γωνία στο σημείο της μετάβασης του στο κανονικό πλάτος λωρίδας, τότε θα δημιουργηθεί αυτό το τσάκισμα όταν θα πάει να περάσει από το heat block και θα φέρει αρκετή αντίσταση ώστε να σπάσει η ένωση.

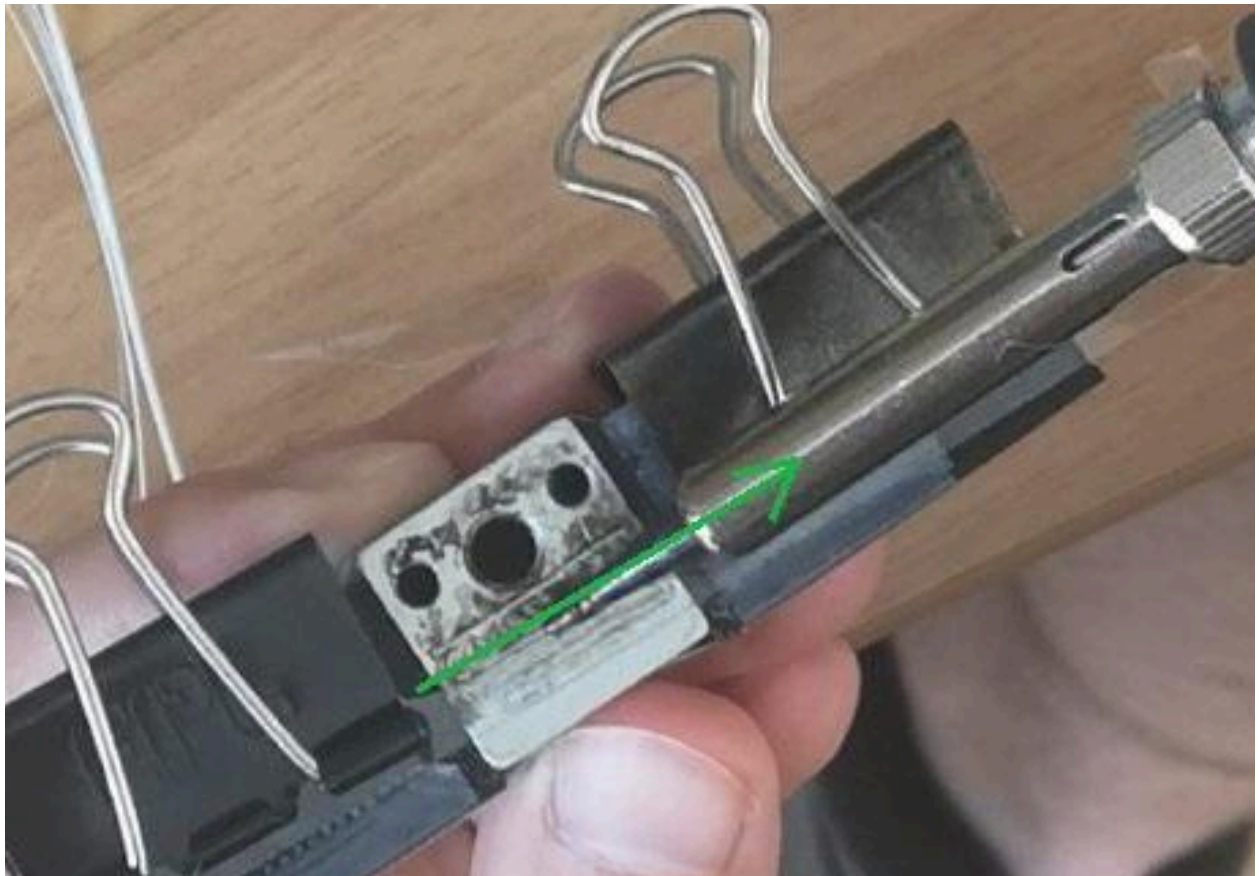
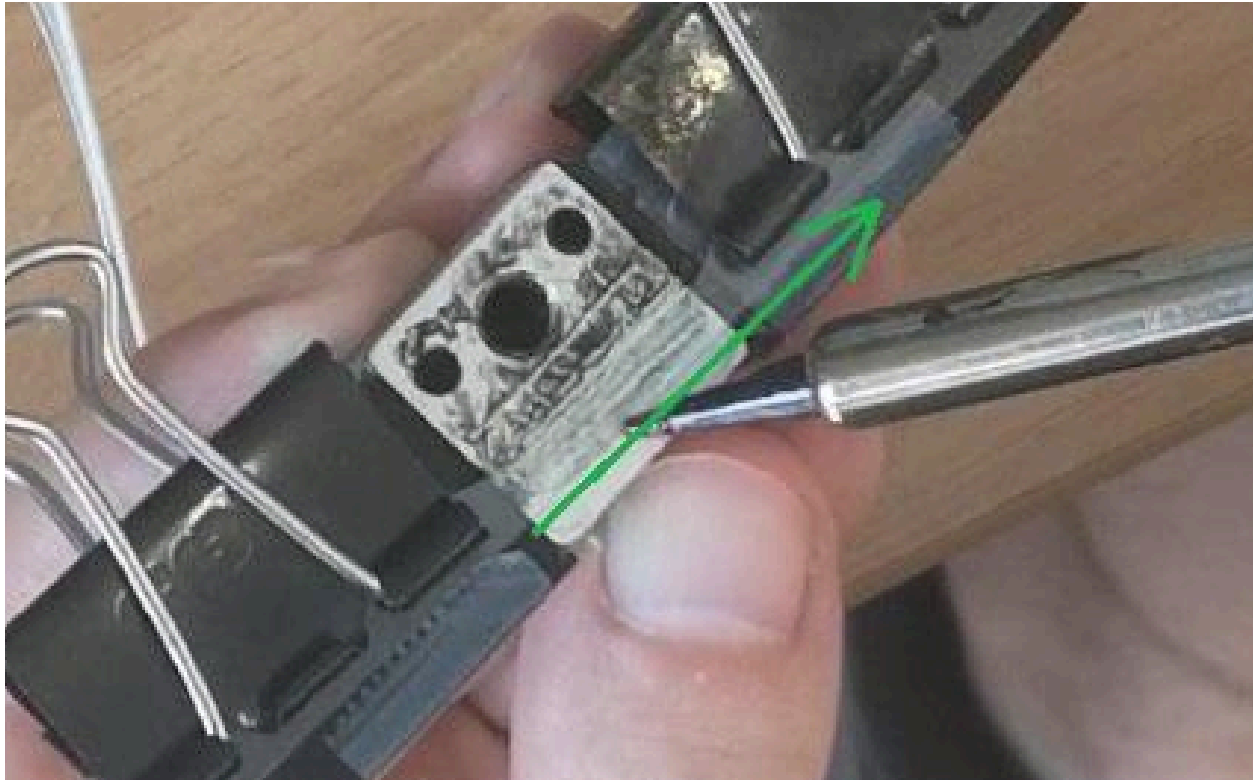


Εικ. 105 - Σχεδιάγραμμα για την ένδειξη της αποφυγής του λάθους στην τεχνική ένωσης λωρίδων που επιφέρει την αστοχία της ένωσης όταν πάει να περάσει από το ακροφύσιο

Η αριστερά εικονιζόμενη λωρίδα που είναι αυτή που θα περάσει πρώτη από το ακροφύσιο δεν έχει καμία σημασία πόσο απότομα θα γίνει η μετάβαση στο πλάτος της (μετάβαση πλάτους λωρίδας πριν το σημείο της ένωσης). Γι' αυτό προτείνεται να γίνεται απότομα ώστε να υπάρχει η μέγιστη δυνατή ποσότητα υλικού σε αυτό το σημείο στο μήκος του παραγόμενου νήματος και να μην υπάρχει το ρίσκο αισθητής ασυνέχειας στην τροφοδότησης υλικού κατά την εκτύπωση.

Η σωστή τεχνική ένωσης είναι η εξής. Τοποθετείται η αριστερά λωρίδα (αυτή που περνάει από το ακροφύσιο πρώτη) από κάτω και η δεξιά από πάνω. Αρχικά γίνονται δύο αργά περάσματα στα πλάγια των λωρίδων, ένα από πάνω και ένα από κάτω με κατεύθυνση από το ακροφύσιο προς την λωρίδα (δηλαδή από το ακροφύσιο και πίσω). Επανάληψη άλλη μια φορά. Αυτό γίνεται για να λιώσουν σε εκείνα τα σημεία οι λωρίδες και να δημιουργηθούν διαπλοκές. Επίσης έτσι μειώνεται το πλάτος της λωρίδας στο σημείο της ένωσης, πράγμα που διευκολύνει το πέρασμα της από το ακροφύσιο. Επιπρόσθετα γίνεται για να δημιουργηθεί μια πρώτη ένωση των λωρίδων πριν γίνει η χάραξη στην μέση γιατί με την χάραξη κάποια σημεία λόγω εντροπίας θα μαζέψουν και η ένωση των πλαγίων δεν θα ήταν αρκετά καλή αν γινόταν έπειτα. Για αυτό και γίνονται αυτά τα τέσσερα περάσματα πρώτα και επίτηδες εναλλάξ στην πάνω και κάτω πλευρά για να μην γίνονται ανεπιθύμητες παραμορφώσεις. Τα περάσματα αυτά φαίνονται στην απο κάτω εικόνα με πράσινο, ενώ με μπλε απεικονίζονται τα μεσαία περάσματα. Καλό είναι κατά την διάρκεια αυτών των περασμάτων να εξασφαλίζεται ότι οι δύο άκρες λωρίδων ακουμπάνε καλά η μια πάνω στην άλλη αλλιώς αυτά τα περάσματα δεν θα δημιουργήσουν αποτελεσματική ένωση των λωρίδων σε εκείνα τα σημεία.





Εικ. 106 - 1) Σχεδιάγραμμα για την ένδειξη των σημείων και της κατεύθυνσης των περασμάτων του κολλητηριού
2,3) Εικόνες για την ένδειξη των σημείων και της κατεύθυνσης των δυο πλάγιων περασμάτων του κολλητηριού

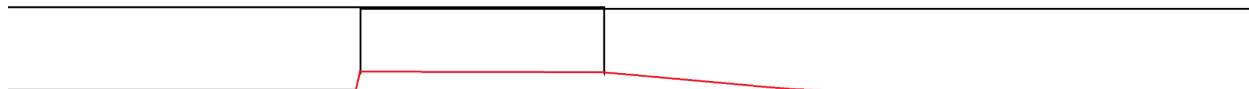
Έπειτα με το κολλητήρι χαράζεται πρώτα απαλά και μετρίως αργά ένα μικρό “χαντάκι”, θέλει συγκεκριμένη ταχύτητα και δύναμη ώστε απλά να κάνει ένα πρώτο μικρό “χαντάκι” χωρίς να παραμορφωθεί πολύ το γύρω υλικό λόγω εντροπίας. Το πρώτο μικρό “χαντάκι” θα αποτελέσει οδηγό για το δεύτερο και τρίτο πέρασμα που θα είναι λίγο πιο αργά και με μεγαλύτερη δύναμη που έχουν σκοπό να λιώσουν και να διαπεράσουν και τις δύο λωρίδες μέχρι το κολλητήρι να ακουμπήσει το heat block (όταν το κολλητήρι αγγίζει το heat block είναι αισθητό).



Εικ. 107 - 1) Εικόνα για την ένδειξη των σημείων και της κατεύθυνσης των μεσαίων περασμάτων του κολλητηριού
2) Φωτογραφία για την ένδειξη του αποτελέσματος της επιτυχημένης τεχνικής ένωσης λωρίδων και ειδικότερα για την ένδειξη του “χαντακιού” που διαμορφώνουν τα μεσαία περάσματα του κολλητηριού

Δοκιμάστηκε επίσης να είναι μεγαλύτερο από το μισό πλάτος της λωρίδας στο σημείο της ένωσης και ήταν επιτυχία. Αν τηρεί τους κανόνες που αναφέρθηκαν τότε το πλάτος των λωρίδων στο σημείο της ένωσης μπορεί να είναι μέχρι και $\frac{3}{4}$ του κανονικού πλάτους, βέβαια με το πέρασμα του κολλητηριού θα

μειωθεί το πλάτος και θα αυξηθεί το πάχος. Όταν οι άκρες των λωρίδων στο σημείο της ένωσης κόβονται σε πλάτος $\frac{3}{4}$ και όχι στο $\frac{1}{2}$ τότε η μετάβαση είναι πιο εύκολο να γίνει ομαλή και στο σημείο της μετάβασης υπάρχει μικρότερη έλλειψη υλικού που αναπληρώνεται και από το έξτρα υλικό στο σημείο της ένωσης. Άρα φέρνει μια ισορροπία στην ροή του υλικού κατά την εκτύπωση.



Εικ. 108 - α) Σχεδιάγραμμα για την ένδειξη του νέου επιτρεπτού πλάτους ($\frac{3}{4}$) των λωρίδων στα σημεία της ένωσης

Κάπου εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι η τεχνική αυτή ήταν πολύ πιο επιτυχημένη με τα μπουκάλια νερού παρά με αυτά της κόκα κόλας. Στα μπουκάλια της κόκα κόλας αρχικά υπήρξαν αρκετές επιτυχίες και μετά καθόλου. Πιθανότατα κάποια από τα μπουκάλια να είχαν υποστεί κάποια υποβάθμιση στο υλικό τους από μη εμφανή κακομεταχείριση. Αν και γενικά, η εφαρμογή αυτής της τεχνικής ένωσης είναι πιο δύσκολη σε αυτά τα μπουκάλια γιατί το μεγαλύτερο πάχος τους οδηγεί σε μικρότερο πλάτος λωρίδας και μετά τα περιθώρια για την χάραξη του “χαντακιού” στενεύουν. Γενικότερα η διαχείριση πιο παχιών μπουκαλιών είναι δυσκολότερη και στην κοπή τους σε λωρίδες και στην ένωση τους και στο απλό χωρίς ενώσεις πέρασμα τους από το ακροφύσιο για μετατροπή τους σε νήμα διότι λόγω πάχους δεν ζεσταίνονται και λυγίζουν ώστε να τροφοδοτηθούν στο ακροφύσιο εύκολα. Έτσι είναι προτιμότερη η χρήση των μικρού πάχους μπουκαλιών, δηλαδή τα μπουκάλια νερού.

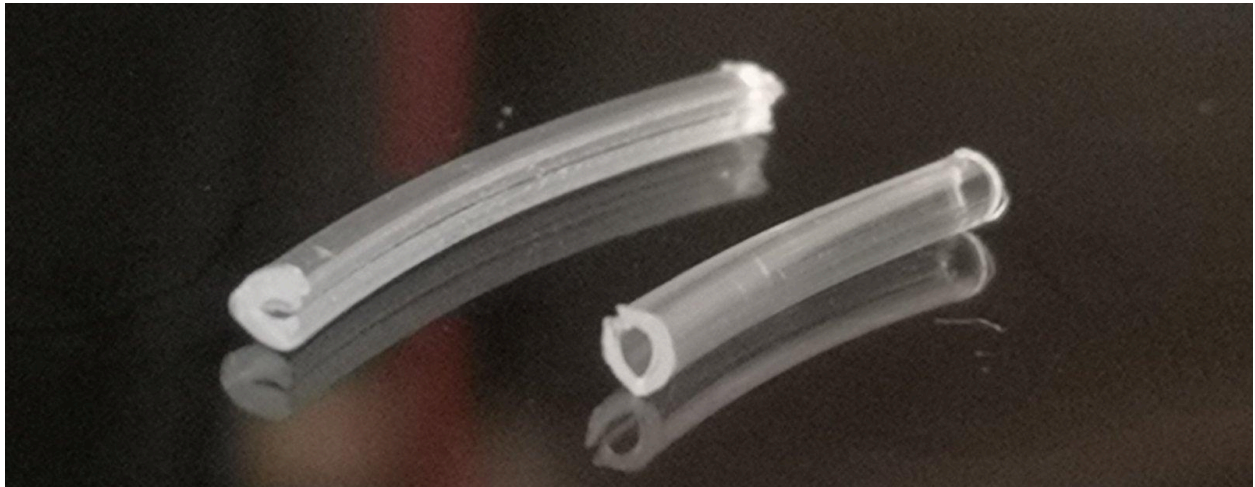
Ακόμα σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι έγιναν πειράματα με παραλλαγές της επιτυχημένης τεχνικής για να επαληθευτεί η σημαντικότητα των κανόνων της. Έτσι έγιναν διάφορες παραλλαγές με την φορά των περασμάτων του κολλητηριού τόσο για το πέρασμα στην μέση των λωρίδων όσο και για το πλαϊνά περάσματα. Μετά και από αυτά τα πειράματα φαίνεται ότι η φορά από το ακροφύσιο και προς τα πίσω είναι η μόνη που λειτουργεί και είναι σημαντικό να τηρείται σε κάθε πέρασμα. Επίσης δοκιμάστηκε η ένωση χωρίς το πέρασμα του κολλητηριού από την μέση της λωρίδας αλλά μόνο από τα πλάγια. Και άλλες διάφορες παραλλαγές μα τίποτα άλλο δεν πέρασε με επιτυχία από το ακροφύσιο.

Τέλος έγιναν δοκιμές για να καθοριστεί ποιό θα έπρεπε να είναι το ελάχιστο μήκος των άκρων των λωρίδων προς ένωση που έχουν μειωμένο πλάτος, δηλαδή το ελάχιστο μήκος της ένωσης. Αυτό δοκιμάστηκε με μια σειρά περασμάτων ενώσεων με διαδοχικά μικρότερο μήκος ένωσης. Τα μήκη που η ενώσεις σπάνε είναι 1 και λιγότερο συχνά 1.5 χιλιοστών. Μια ένωση 1.5 χιλιοστών αν έχει γίνει καλά μπορεί να περάσει από το ακροφύσιο με επιτυχία αλλά το ελάχιστο προτεινόμενο από αυτήν την ΔΕ μήκος ένωση είναι τα 2 χιλιοστά.

Περιγραφή πειραμάτων εκτύπωσης με νήμα από ενωμένες λωρίδες

Τα νήματα που παράχθηκαν από τις ενωμένες λωρίδες δοκιμάστηκαν αρχικά σε έναν φτηνό τυπικό εκτυπωτή creality ender 3. Σε αυτόν τον εκτυπωτή δοκιμάστηκαν ενωμένες λωρίδες και από μπουκάλια νερού και κόκα κόλας (από τα μπουκάλια κόκα κόλας δοκιμάστηκε νήμα από τις περιορισμένες αρχικές επιτυχίες). Να σημειωθεί ότι αυτά τα νήματα είχαν πολύ μεγαλύτερη συχνότητα ενώσεων από ότι θα έχουν κανονικά γιατί οι λωρίδες κοβόντουσαν επίτηδες σε πολλά σημεία για την δοκιμή των ενώσεων.

Πράγμα που βοηθάει και στα πειράματα εκτύπωσης για να υπάρχουν περισσότερα και γρηγορότερα δεδομένα για την επίδραση των ενώσεων στην εκτύπωση.



Εικ. 109 - Τομή - κομμάτια νήματος από μπουκάλια διαφορετικού πάχους



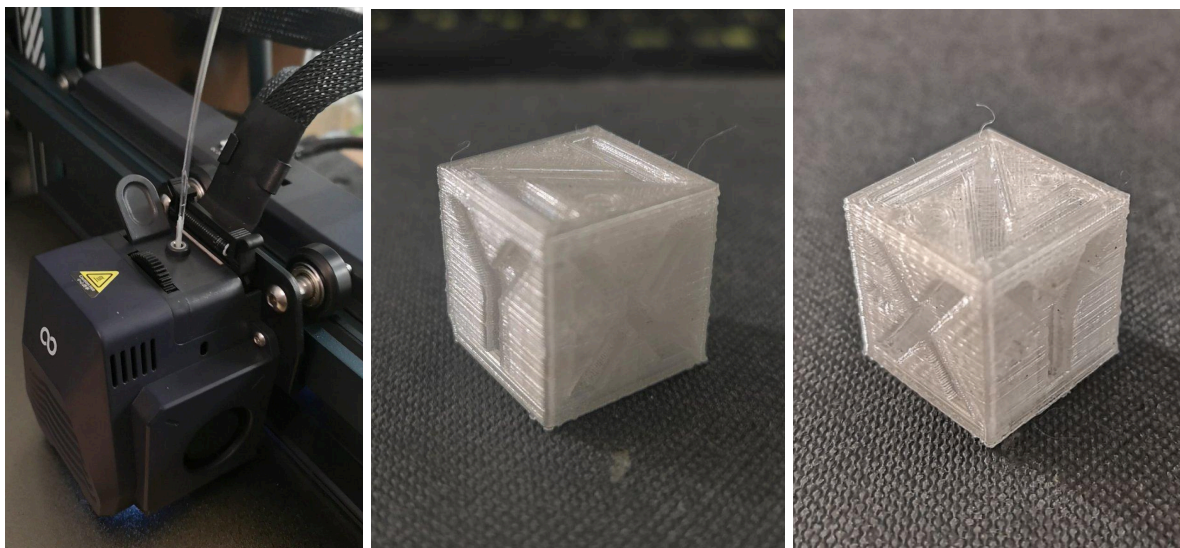
Εικ. 110 - Φωτογραφία από ένωση λωρίδων που πέρασε από το ακροφύσιο

Τα πειράματα στον ender 3 δεν πήγαν και πολύ καλά. Και τα δύο νήματα τυπώνουν καλά αλλά με την προϋπόθεση ότι θα είναι κάποιος από πάνω να σπρώχνει το νήμα όταν γλιστράει από τον τροφοδότη (extruder) και δεν μπορεί να το σπρώξει. Ο τροφοδότης του εκτυπωτή αυτού έχει ένα γρανάζι και ένα ρουλεμάν, το γρανάζι γαντζώνει το νήμα υλικού και το σπρώχνει.

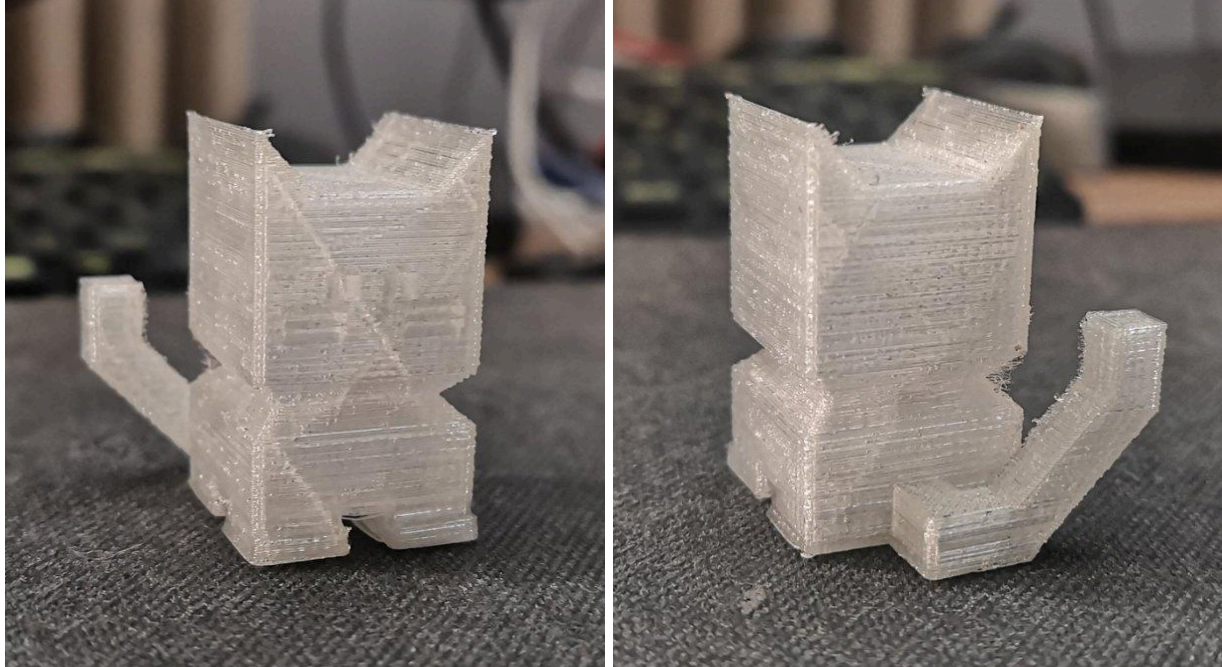


Εικ. 111 - Φωτογραφία από την τροφοδοσία του νήματος από ενωμένες λωρίδες PET στον εκτυπωτή ender 3 που διαθέτει εξωθητή μονού γραναζιού

Όταν το υλικό είναι συμπαγές δεν υπάρχει κανένα πρόβλημα στην τροφοδοσία. Αλλά στην περίπτωση των νημάτων από μετατροπή μπουκαλιών το υλικό δεν είναι συμπαγές και επίσης είναι κάπως σκληρό το PET γαντζώνει εύκολα το γρανάτζι. Αυτό βέβαια επηρεάζει περισσότερο το νήμα από τα μπουκάλια που είναι πιο λεπτό το υλικό και όταν το γρανάτζι πάει να γαντζώσει το υλικό αυτό απλά υποχωρεί γιατί είναι ευλύγιστο και έχει κενό στο εσωτερικό του. Το γρανάτζι του εξωθητή μπορεί να σφίξει πιο κοντά στο ρουλεμάν αλλά και με το μέγιστο σφίξιμο το πρόβλημα διορθώνεται μόνο για το νήμα από παχιά μπουκάλια. Όμως και πάλι το πρόβλημα δεν έχει εξαλειφθεί τελείως γιατί στο σημεία της ένωσης και μετά της ένωσης τις περισσότερες φορές μπλοκάρει-γλιστράει και δεν μπορεί να τροφοδοτηθεί από τον εξωθητή. Η ολοκληρωτική λύση στο πρόβλημα ήρθε με την χρήση ενός καινούργιου εκτυπωτή Elegoo Neptune 4 max με double gear extruder (εξωθητή διπλού γραναζιού), δηλαδή στη θέση του ρουλεμάν έχει και εκεί γρανάτζι. Με την πρώτη δοκιμή πάλι φαινόταν να γλιστράει το νήμα από μπουκάλια νερού αλλά με λίγο σφίξιμο των γραναζιών αυτά ήρθαν πιο κοντά και τροφοδοτούν το νήμα χωρίς καμία αποτυχία μέχρι και στα σημεία των ενώσεων.



Εικ. 112 - 1) Φωτογραφία από την τροφοδοσία του νήματος από ενωμένες λωρίδες PET στον εκτυπωτή Elegoo Neptune 4 Max που διαθέτει εξωθητή διπλού γραναζιού 2,3) Αποτέλεσμα εκτύπωσης δοκιμαστικού κύβου με νήμα από ενωμένες λωρίδες PET



Εικ. 113 - Αποτέλεσμα εκτύπωσης δοκιμαστικού μοντέλου γάτας με νήμα από ενωμένες λωρίδες PET στον εκτυπωτή Elegoo Neptune 4 Max

Για να εκτυπωθεί καλά το PET στον καινούργιο εκτυπωτή θέλει ρύθμιση θερμοκρασίας ακροφυσίου 270 βαθμούς κελσίου σε αντίθεση με τον ender 3 που για κάποιο λόγο τυπώνει στους 260 βαθμούς (η μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να φτάσει αυτός ο εκτυπωτής). Επίσης για τη σωστή εκτύπωση με νήμα από μετατροπή μπουκαλιών πρέπει να ρυθμιστεί ο ρυθμός τροφοδοσίας υλικού από 1 σε 1.7 για τα μπουκάλια νερού ενώ για τα μπουκάλια κόκα κόλας στο 1.3. Αυτό γίνεται για να αναπληρωθεί το υλικό που υπάρχει στο κέντρο του νήματος στα εργοστασιακά νήματα ενώ λείπει στο νήμα από μπουκάλια. Τέλος του PET δεν του αρέσει να τυπώνεται σε μεγάλες ταχύτητες, από τα πειράματα παρατηρήθηκε ότι οι ιδανικές ταχύτητες είναι 20 με 50 mm/s.

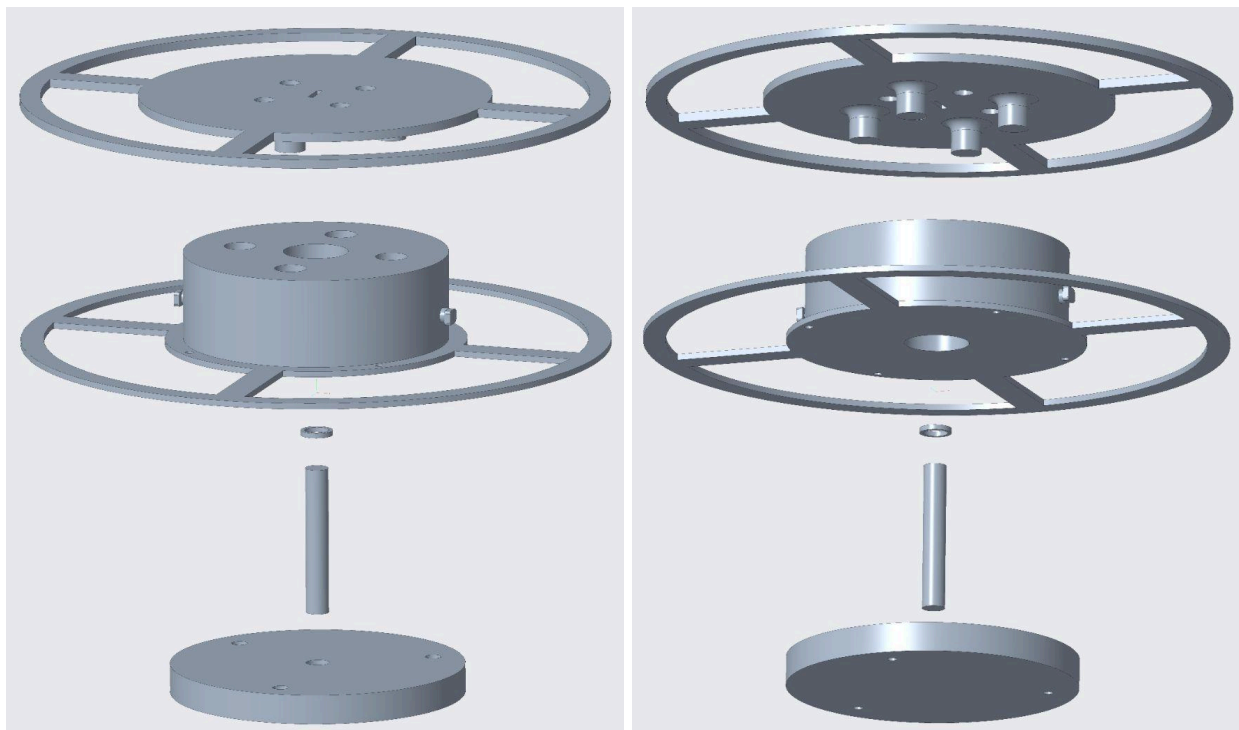
Περιγραφή της διαδικασίας σχεδίασης βελτιώσεων για το DIY σύστημα μετατροπής πλαστικών μπουκαλιών PET σε υλικό για 3Δ εκτύπωση

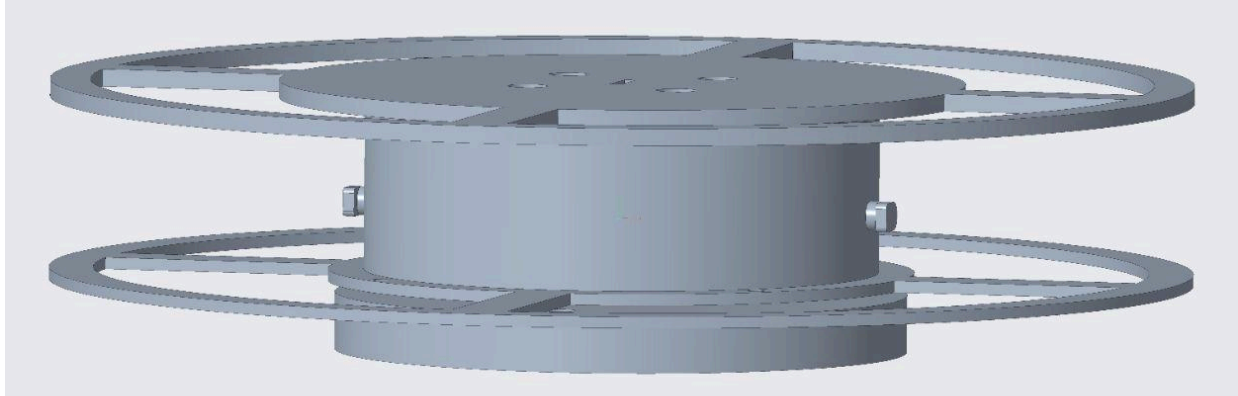
Το πρωτότυπο πειραμάτων είναι ήδη ένα πλήρως λειτουργικό σύστημα μετατροπής πλαστικών μπουκαλιών PET σε υλικό για 3Δ εκτύπωση, αλλά θα μπορούσε να γίνει πιο φιλικό στην χρήση εξοικονομώντας χρόνο και κόπο στον χρήστη. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την λύση κάποιων μικρών προβλημάτων που εξακολουθούν να υπάρχουν στην διαδικασία της μετατροπής. Το κυριότερο πρόβλημα όσον αφορά αυτή την διπλωματική εργασία είναι το μικρό μέγεθος λωρίδας άρα και παραγόμενου νήματος που σημαίνει την ανάγκη για επανάληψη όλης της διαδικασίας μετατροπής πολλές φορές και την διακοπή της εκτύπωσης για αλλαγή νήματος ξανά και ξανά για να μπορέσει να εκτυπωθεί ένα κομμάτι άνω των 20 γραμμαρίων (περίπου όσο ζυγίζει η λωρίδα από ένα μπουκάλι). Μια λύση σε αυτό το πρόβλημα επήλθε από τα πειράματα που διεξήχθησαν σε αυτή την ΔΕ για την ένωση των λωρίδων και την επιτυχή τροφοδότηση τους στο σύστημα μετατροπής και έπειτα του παραγόμενου νήματος σε 3Δ

εκτυπωτή. Εφόσον δόθηκε λοιπόν μια λύση σε αυτό ήρθε η σειρά επιμεληθούν μικρότερα αλλά υπαρκτά προβλήματα που η λύση τους θα κάνει τη διαδικασία και το σύστημα μετατροπής πιο ευχάριστα στον χρήστη.

Πρώτο και σημαντικότερο προβληματικό σημείο είναι το χειροκίνητο τράβηγμα της λωρίδας κατά την κοπή της. Θα μπορούσε να θεωρηθεί κουραστικό όταν η διαδικασία επαναλαμβάνεται ξανά και ξανά συνεχόμενα. Επίσης κουραστικό και βαρετό μπορεί να θεωρηθεί το επαναλαμβανόμενο τύλιγμα της λωρίδας σε καρούλι στην προετοιμασία για την χρήση του στο σύστημα μετατροπής. Η λύση που ακολουθεί κάνει αυτές τις δύο διαδικασίες πιο υποφερτές και σίγουρα πιο γρήγορες.

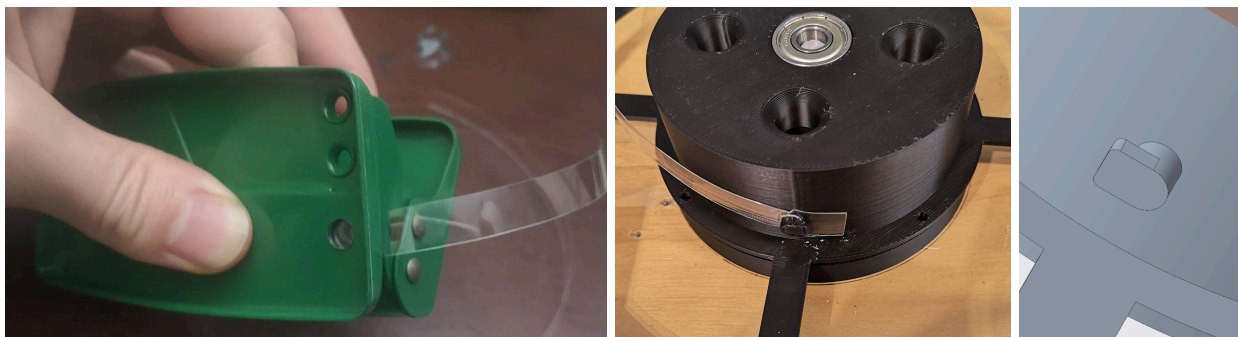
Σχεδιάστηκε λοιπόν καρούλι που θα τυλίγει την λωρίδα καθώς ταυτόχρονα θα την τραβάει για την κοπή της. Χρησιμοποιεί δύο ρουλεμάν για την ομαλή περιστροφή του καθώς για κινητήρα χρησιμοποιεί ένα ηλεκτρικό δραπενοκατσάβιδο, έτσι δεν υπάρχει η ανάγκη για αγορά ή χρήση κι άλλου μοτέρ και η σύνδεση του στην μητρική πλακέτα καθώς και η δημιουργία εξατομικευμένου κώδικα. Αν και στην περίπτωση χρήσης μοτέρ θα πρέπει να αλλάξει και το λογισμικό γιατί όπως προαναφέρθηκε στην ΔΕ το λογισμικό που χρησιμοποιεί η πλακέτα δεν επιτρέπει την χρήση των stepper motors αν δεν έχει πιάσει πρώτα μια συγκεκριμένη θερμοκρασία το ακροφύσιο. Ενώ αν έχει πιάσει την θερμοκρασία το ακροφύσιο για να γίνει χρήση του βηματικού κινητήρα ο χρήστης μετά θα πρέπει να περιμένει να πέσει η θερμοκρασία του ακροφυσίου αν θέλει να περάσει την άκρη μιας λωρίδας μέσα από το ακροφύσιο για να αρχίσει το σύστημα την μετατροπή. Το υποσύστημα που σχεδιάστηκε αποτελείται από 5 εκτυπωμένα κομμάτια και το ηλεκτρικό δραπενοκατσάβιδο.





Εικ. 114 - 1,2) Μη συναρμολογημένα κομμάτια προς εκτύπωση του συστήματος τύλιξης λωρίδων, έλξης λωρίδων απευθείας από το σύστημα κοπής μπουκαλιών κατά την κοπή τους και τροφοδοσίας των λωρίδων στο ακροφύσιο (από διαφορετικές οπτικές) 3) Συναρμολόγηση στον Η/Υ των σχεδίων των κομματιών του συστήματος τύλιξης και έλξης λωρίδων απευθείας από το σύστημα κοπής μπουκαλιών κατά την κοπή τους

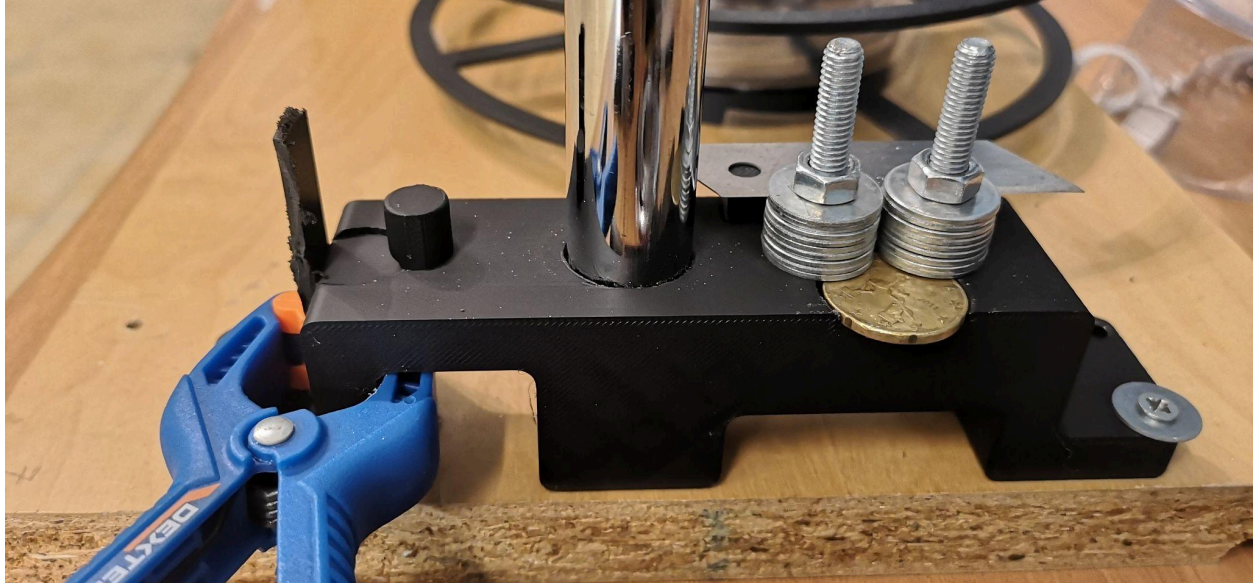
Αρχικά τοποθετείται το μπουκάλι στο σύστημα κοπής του το οποίο έχει πακτωθεί στην άκρη της ξύλινης βάσης δίπλα ακριβώς από το σύστημα καρουλιού λωρίδας. Ξεκινάει η κοπή του μπουκαλιού χειροκίνητα μέχρι το μήκος της λωρίδας να είναι αρκετό ώστε να φτάνει μέχρι το καρούλι. Έπειτα γίνεται μια οπή στην άκρη της λωρίδας για μπορεί να ασφαλιστεί πάνω στην προεξοχή που έχει σχεδιαστεί στο καρούλι. Η προεξοχή έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να μπορεί να γαντζωθεί η λωρίδα για να τραβηχτεί στην μια κατεύθυνση περιστροφής αλλά στην αντίθετη να ξεγαντζώνεται για να μπορεί να αποσυνδεθεί αυτόματα στο τέλος της μετατροπής και να μην φέρει αντίσταση και σπάσει κάποιο μέλος το συστήματος, πιο πιθανά η προεξοχή αυτή. Σε περίπτωση που δεν λειτουργήσει αυτή η σχεδιαστική πρόθεση και σπάσει η προεξοχή μπορεί να χρησιμοποιηθεί κολλητική ταινία για την ασφάλιση της λωρίδας στο καρούλι που και πάλι ανάλογα με την φορά της περιστροφής θα δράσει διαφορετικά. Στην συνέχεια τοποθετείται το πάνω κομμάτι του καρουλιού στο σύστημα και στην οπή που είναι σχεδιασμένη στο πάνω μέρος του εφαρμόζεται το ηλεκτρονικό δραπανοκατσάβιδο που θα ωθήσει το καρούλι να περιστραφεί και να τυλίξει την λωρίδα γύρω από το καρούλι ενώ ταυτόχρονα θα το τραβάει για να κοπεί από το σύστημα κοπής.





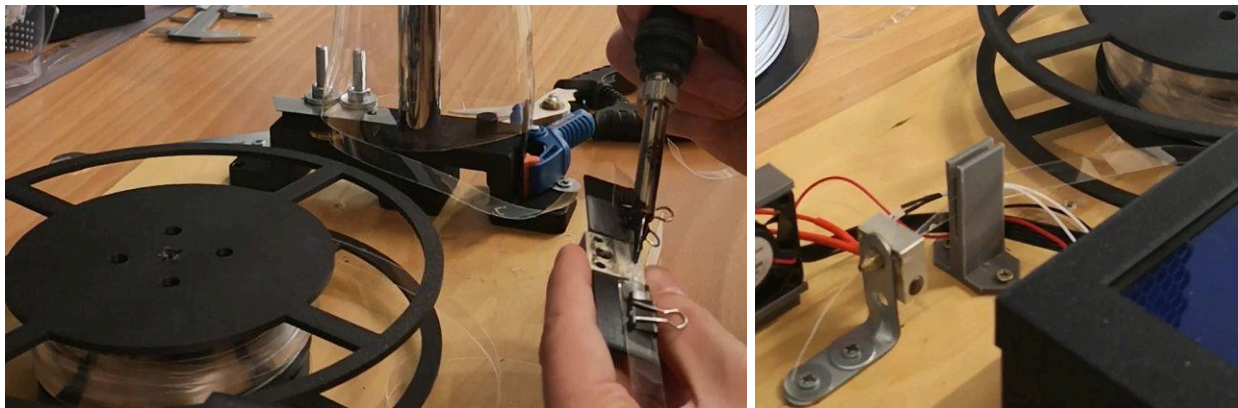
Εικ. 115 - 1,2,4,5) Εικόνες από την διαδικασία κοπής και τύλιξης των λωρίδων με το σύστημα τύλιξης και έλξης λωρίδων 3) Σχέδιο προεξοχής για το γάντζωμα της λωρίδας

Στην φωτογραφία (Εικ. 115.5) φαίνεται και το καινούριο σύστημα κοπής που σχεδιάστηκε. Δημιουργήθηκε η ανάγκη για καινούριο σύστημα κοπής γιατί το προηγούμενο είναι πολύ κοντό και το καρούλι τραβάει την λωρίδα με κλίση προς τα πάνω και επηρεάζει την συνέπεια στο πάχος της λωρίδας. Αντίθετα είναι καλό να υπάρχει μια μικρή κλίση στο τράβηγμα τις λωρίδας προς τα κάτω. Έτσι δημιουργήθηκε ένα πιο ψηλό σύστημα κοπής που έχει κληρονομήσει όλα τα άλλα χαρακτηριστικά του από το προηγούμενο, πλην της προεξοχής για την σταθεροποίηση του κομμένου πάτου της φιάλης ώστε να παραμένει το μπουκάλι ατσαλάκωτο. Η προεξοχή τροποποιήθηκε αλλά επιόλαια, με αποτέλεσμα να μην είναι λειτουργική για άλλη μια φορά. Οπότε έγινε αυτοσχεδιασμός για την σταθεροποίηση της φιάλης για άλλη μια φορά. Θα γινόταν επανασχεδιασμός για την διόρθωση αυτού του χαρακτηριστικού ώστε να είναι λειτουργικό αλλά δεν υπήρχε ο χρόνος.



Εικ. 116 - Σύστημα κοπής μπουκαλιών σε λωρίδες με εφαρμογή αυτοσχεδιασμού (μανταλάκι και κομμάτι πλαστικού) για το κρατημα του κομμένου πάτου του μπουκαλιού προς κοπή ώστε να μην τσαλακώνει

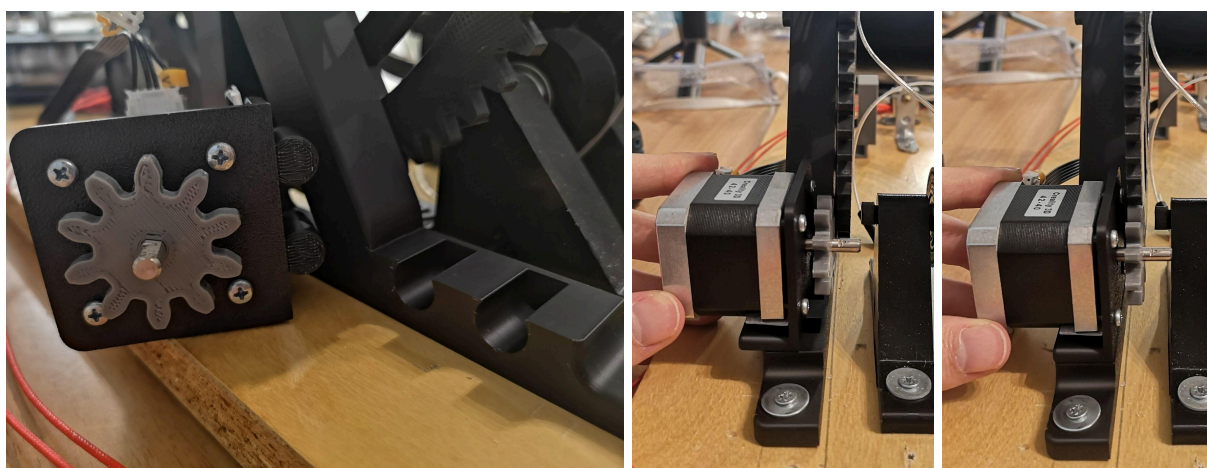
Αυτό το καρούλι έχει άλλο ένα θετικό. Αφού κοπεί το πρώτο μπουκάλι και τυλιχτεί στο καρούλι μπορεί να τοποθετηθεί το δεύτερο να γίνει μια αρχική κοπή του μπουκαλιού σε λωρίδα και να ενωθούν οι δύο άκρες των δύο λωρίδων με την τεχνική ένωσης με κολλητήρι. Στην συνέχεια απλά χρησιμοποιείται το τρυπάνι για να κοπεί και το δεύτερο μπουκάλι σε λωρίδα ενώ ενωμένη με την πρώτη λωρίδα. Η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί για πολλά μπουκάλια μέχρι να γεμίσει το καρούλι λωρίδας. Τέλος απλά περνιέται η άκρη των ενωμένων λωρίδων από το ακροφύσιο και ξεκινάει η μετατροπή.



Εικ. 117 - 1) Ένωση των λωρίδων ενώ η πρώτη είναι τυλιγμένη και η δεύτερη στα μέσα της διαδικασίας κοπής της
2) Πέρασμα της άκρης των ενωμένων λωρίδων μέσα από το ακροφύσιο για την εκκίνηση της μηχανής- συστήματος μετατροπής

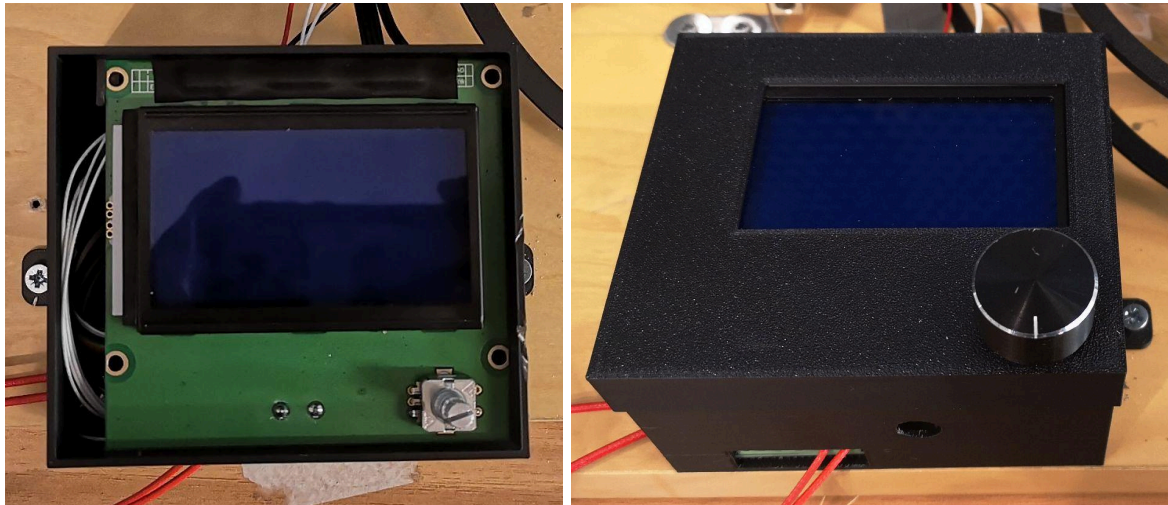
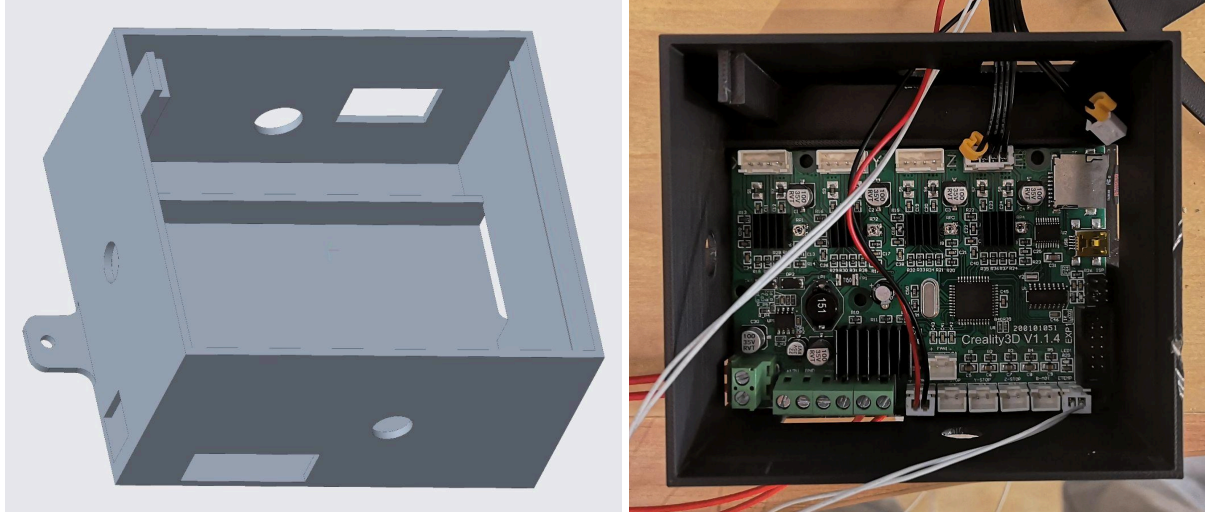
Ακόμα ένα πρόβλημα που έπρεπε να δοθεί μια κομμη λύση σε αυτό ήταν ότι αφού το νήμα έχει παραχθεί και η διαδικασία της μετατροπής έχει ολοκληρωθεί, το νήμα που βρίσκεται στο καρούλι νήματος πρέπει να μεταφερθεί σε κάποιο άλλο καρούλι, συνήθως σε κάποιο καρούλι από τελειωμένο εργοστασιακό νήμα. Αυτό είναι απαραίτητο να γίνει για να αποθηκευτεί το παραγόμενο νήμα ή για να χρησιμοποιηθεί.

Για να γίνει αυτό όμως πρέπει να αποσυνδεθεί το μοτέρ από την πλακέτα διότι αλλιώς υπάρχει ο κίνδυνος να καεί η πλακέτα όταν αναπτύσσεται μεγάλη ταχύτητα στο μοτέρ και είναι συνδεδεμένο με αυτή, ενώ επίσης παραμένει η αντίσταση που φέρει το μοτέρ. Για αυτόν τον λόγο σχεδιάστηκε καινούρια βάση για το μοτέρ ώστε να αποσυνδέεται εύκολα το μικρό γρανάζι από το μεγάλο και να μην υπάρχει η ανάγκη της αποσύνδεσης του μοτέρ από την μητρική πλακέτα και να απουσιάζει η αντίσταση του μοτέρ στην αφαίρεση του νήματος από το καρούλι νήματος. Το μικρό γρανάζι δεν θα είναι εύκολο να αλλάξει θέση πάνω στον άξονα του μοτέρ γιατί είναι εφαρμοσμένο πολύ στριμωχτά και καλό είναι να παραμείνει έτσι. Οπότε η λύση αυτή που κάνει όλο το μοτέρ εύκολα αποσπώμενο είναι η ιδανική για αυτήν την περίπτωση. Το επόμενο βήμα θα ήταν να σχεδιαστεί και ένα σύστημα που με την βοήθεια κάποιου μοτέρ ή ξανά με το ηλεκτρονικό δραπενοκατσάβιδο να γίνεται η μεταφορά του νήματος σε εργοστασιακά καρούλια πολύ πιο γρήγορα και εύκολα, μόνο που δεν υπάρχει ο χρόνος να γίνει και αυτό σε αυτήν την ΔΕ.



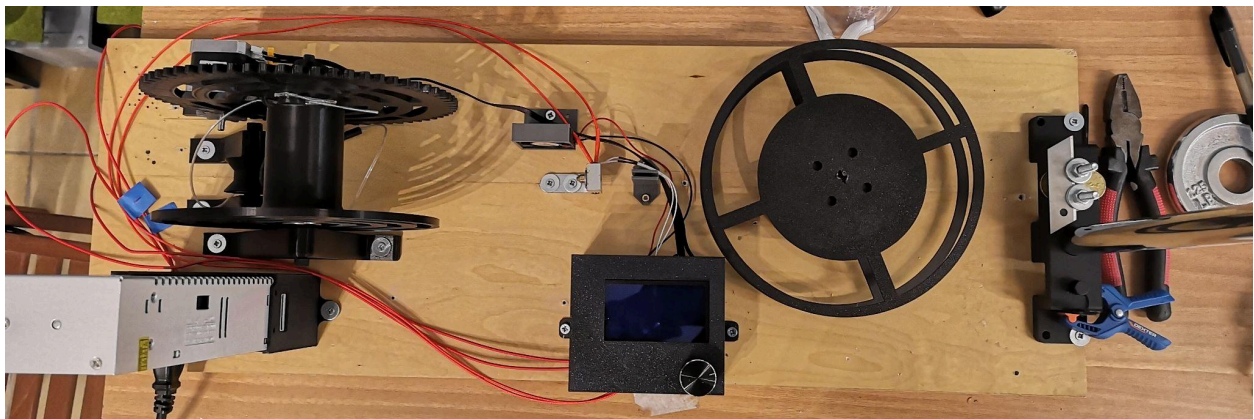
Εικ. 118 - Φωτογραφίες από την χρήση της εκτυπωμένης αποσπώμενης βάσης του βηματικού κινητήρα

Τέλος για να μην σκονίζονται τα ηλεκτρονικά μέρη του συστήματος αλλά και για την καλύτερη οργάνωση και τοποθέτηση τους στο σύστημα έγινε σχεδίαση μιας θήκης που φιλοξενεί το πάνελ χειρισμού, την μητρική πλακέτα και μέρος κάποιων καλωδίων. Η πλακέτα τοποθετείται κάτω κάτω με καλή εφαρμογή ώστε να μην κουνιέται και να μπορεί να χρησιμοποιηθεί το TF card slot και micro USB port μέσω της οπής που έχει σχεδιαστεί στα πλάγια. Υπάρχουν ανοίγματα σε όλα τα τοιχώματα για συγκεκριμένους σκοπούς που είναι αυτεξήγητοι με τις φωτογραφίες (Εικ. 119) αλλά και ανοίγματα που σχεδιάστηκαν για την περίπτωση που χρειαστούν (καλύτερα να υπάρχουν και να μην χρειαστούν παρά το αντίθετο). Η οθόνη - πάνελ ελέγχου έρχεται και κάθετα επίσης με πολύ καλή εφαρμογή και στο κατάλληλο ύψος ώστε να υπάρχει χώρος από κάτω για τα καλώδια και από πάνω τόσος όσος για να έρχεται το καπάκι της θήκης ανάμεσα στο περιθώριο που υπάρχει ανάμεσα στο ύψος της οθόνης του πάνελ και του κουμπιού ώστε να μπορεί να γυρνάει ελεύθερα και να πατιέται.



Εικ. 119 - 1)Σχέδιο βασικού κομματιού της θήκης του πάνελ χειρισμού και της μητρικής πλακέτας 2,3,4)
 Φωτογραφίες για την ανάδειξη της τοποθέτησης της μητρικής πλακέτας και του πάνελ χειρισμού

Μετά από αυτές τις προσθήκες η εικόνα του συστήματος αλλά και η ευχρηστία του άλλαξαν σημαντικά.



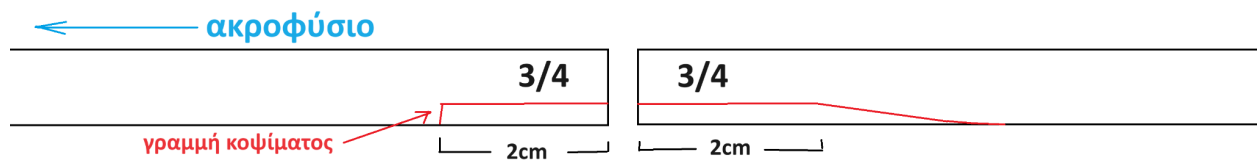
Εικ. 120 - Φωτογραφία βελτιωμένου συστήματος μετατροπής μπουκαλιών PET σε νήμα για 3δ εκτύπωση

V. Αποτελέσματα

Παρουσίαση των αποτελεσμάτων που έχουν εξαχθεί από την πραγματοποίηση των πειραμάτων

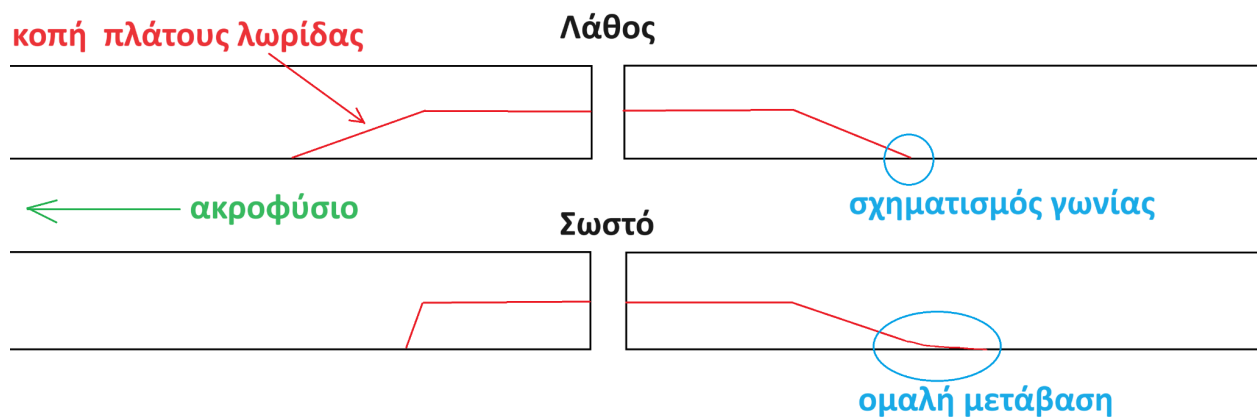
Από τα πειράματα φαίνεται ότι η χρήση πιο λεπτού μπουκαλιού διευκολύνει την διαδικασία μετατροπής και ειδικά όταν προτιμάται η διαδικασία της ένωσης λωρίδων. Αυτό ισχύει γιατί τα παχιά μπουκάλια φέρουν μεγαλύτερη αντίσταση στην κοπή τους σε λωρίδες οπότε αν το σύστημα κοπής δεν είναι πολύ καλό τότε δυσκολεύουν την διαδικασία. Επίσης λόγω πάχους είναι δυσκολότερο να θερμανθούν και να παραμορφωθούν για να περάσουν από το ακροφύσιο (τουλάχιστον όχι στην ίδια ταχύτητα με τα πιο λεπτά μπουκάλια). Τέλος το σημαντικότερο είναι ότι είναι πολύ δυσκολότερο να ενωθούν οι λωρίδες από παχιά μπουκάλια, τουλάχιστον με αυτήν την τεχνική που αναπτύχθηκε από την ΔΕ.

Η τεχνική ένωσης που αναπτύχθηκε στην ΔΕ είναι η ένωση με κολλητήρι με πολύ συγκεκριμένο τρόπο. Αρχικά κόβονται οι άκρες των λωρίδων προς ένωση έτσι ώστε να απομείνουν το λιγότερο $\frac{1}{2}$ και το περισσότερο $\frac{3}{4}$ του πάχους τους σε προτεινόμενο μήκος τουλάχιστον 2 εκατοστών.



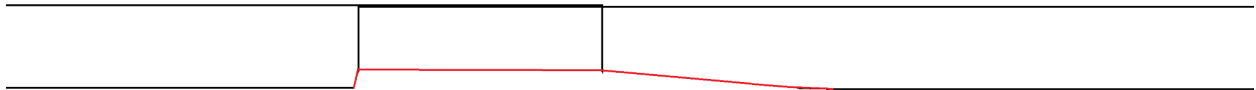
Εικ. 121 - Σχεδιάγραμμα για την ένδειξη του μεγιστου επιτρεπτου πλάτους ($\frac{3}{4}$) των λωρίδων στα σημεία της ένωσης και το προτεινόμενο ελάχιστο μήκος

Προσοχή πρέπει να δίνεται επίσης κατά την κοπή της άκρης της δεύτερης λωρίδας από το ακροφύσιο, ώστε η μετάβαση στο πλάτος λωρίδας να γίνεται ομαλά και να μην σχηματίζει γωνία όπως υποδεικνύεται στην εικόνα 122.



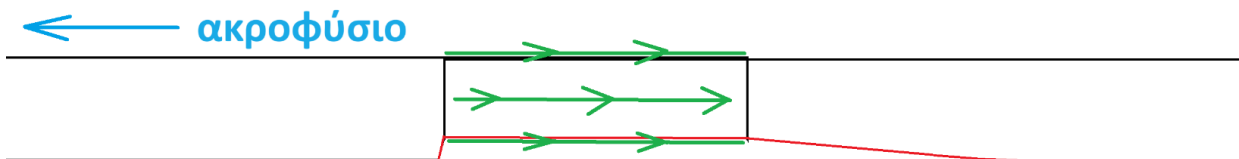
Εικ. 122 - Σχεδιάγραμμα για την ένδειξη της αποφυγής του λάθους στην τεχνική ένωσης λωρίδων που επιφέρει την αστοχία της ένωσης όταν πάει να περάσει από το ακροφύσιο

Έπειτα αυτές οι άκρες τοποθετούνται πάνω στο σύστημα κόλλησης ώστε να συμπίπτουν οι μειωμένες σε πάχος άκρες με αυτήν προς το ακροφύσιο απο κάτω και εκτελούνται περάσματα με το κολλητήρι.



Εικ. 123 - Σχεδιάγραμμα για την ένδειξη της τοποθέτησης των κομμένων άκρων των λωρίδων την μια πάνω στην άλλη

Τα περάσματα με το κολλητήρι είναι 7. Τα 4 είναι εναλλάξ μια από πάνω μια από κάτω και τα άλλα 3 γίνονται στην μέση. Το πρώτο από αυτά τα 3 γίνεται πιο μαλακά και γρήγορα γιατί απλά έχει σκοπό να χαράξει την διαδρομή για τα επόμενα 2 έχουν σκοπό να διαπεράσει η μύτη του κολλητηριού και τις δύο λωρίδες.



Εικ. 124 - 1) Σχεδιάγραμμα για την ένδειξη των σημείων και της κατεύθυνσης των περασμάτων του κολλητηριού
2) Φωτογραφία για την ένδειξη του αποτελέσματος της επιτυχημένης τεχνικής ένωσης λωρίδων και ειδικότερα για την ένδειξη του “χαντακιού” που διαμορφώνουν τα μεσαία περάσματα του κολλητηριού

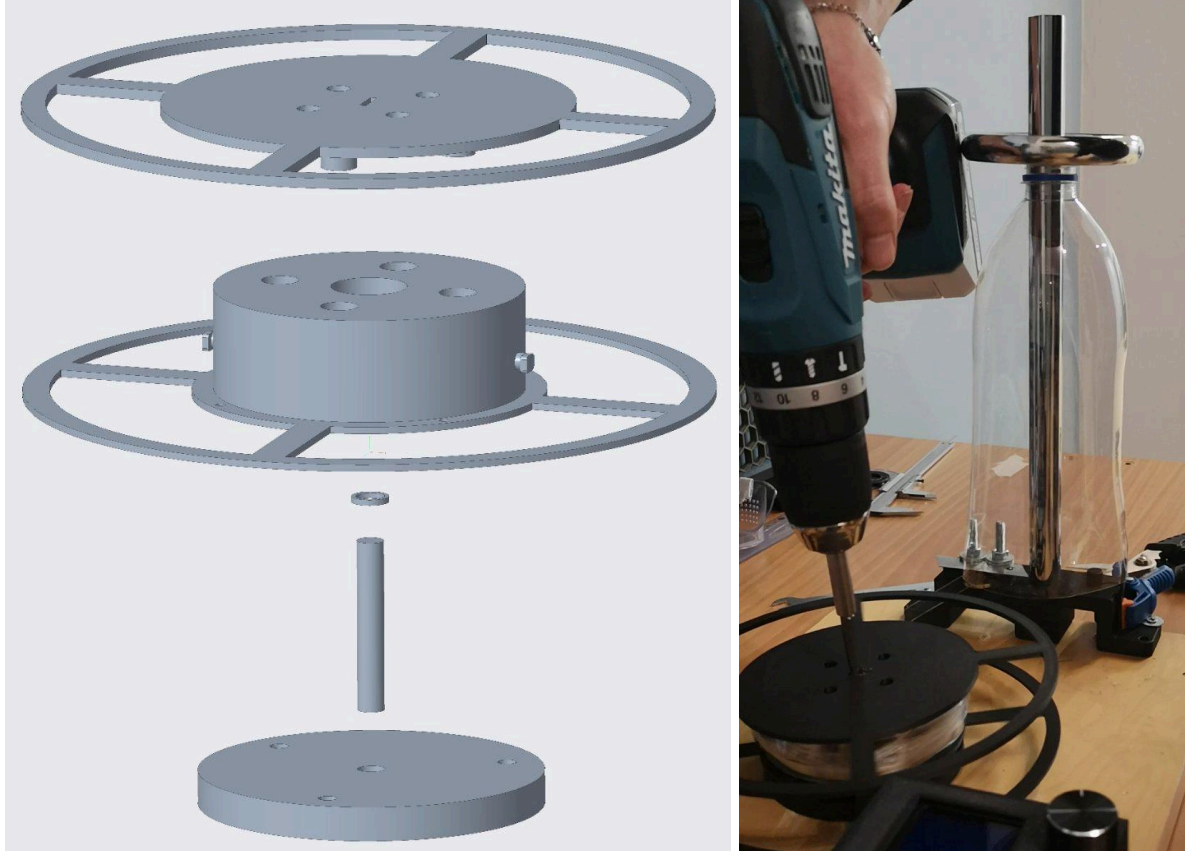
Όσον αφορά την εκτύπωση με νήμα από ενωμένες λωρίδες από μπουκάλια PET νερού. Για την εκτύπωση χωρίς την ανάγκη συνεχών παρεμβάσεων με αυτό το νήμα είναι απαραίτητη η χρήση εκτυπωτή με dual gear extruder ώστε να τροφοδοτείται σωστά το νήμα. Ακόμα η θερμοκρασία εκτύπωσης είναι ανάμεσα στους 260 με 270 βαθμούς κελσίου ανάλογα τον εκτυπωτή. Επίσης το PET τυπώνει καλά στις ταχύτητες 20 με 50 mm/s. Τέλος ο ρυθμός τροφοδοσίας υλικού (νήματος) απο τον εξωθητή πρέπει να ρυθμιστεί από 1 σε 1.7 για τα μπουκάλια νερού ενώ για τα μπουκάλια κόκα κόλας στο 1.3 ώστε να αναπληρωθεί το υλικό που υπάρχει στο κέντρο του νήματος στα εργοστασιακά νήματα που λείπει στο νήμα από

μπουκάλια (αυτό γίνεται από το λογισμικό slicer που δίνει τις εντολές μέσω κωδικά gcode στον εκτυπωτή για την εκτύπωση).

Τέλος εάν κάποιος δεν έχει σκοπό να κάνει ένωση των λωρίδων και θέλει να μετατρέπει κάθε φιάλη σε νήμα ξεχωριστά, καθώς και δεν διαθέτει εκτυπωτή με dual gear extruder τότε από τα πειράματα στην εκτύπωση φαίνεται ότι θα ήταν προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί διότι χωρίς dual gear extruder με νήμα από τα λεπτά μπουκάλια δεν θα γίνεται σωστά η τροφοδότηση του υλικού.

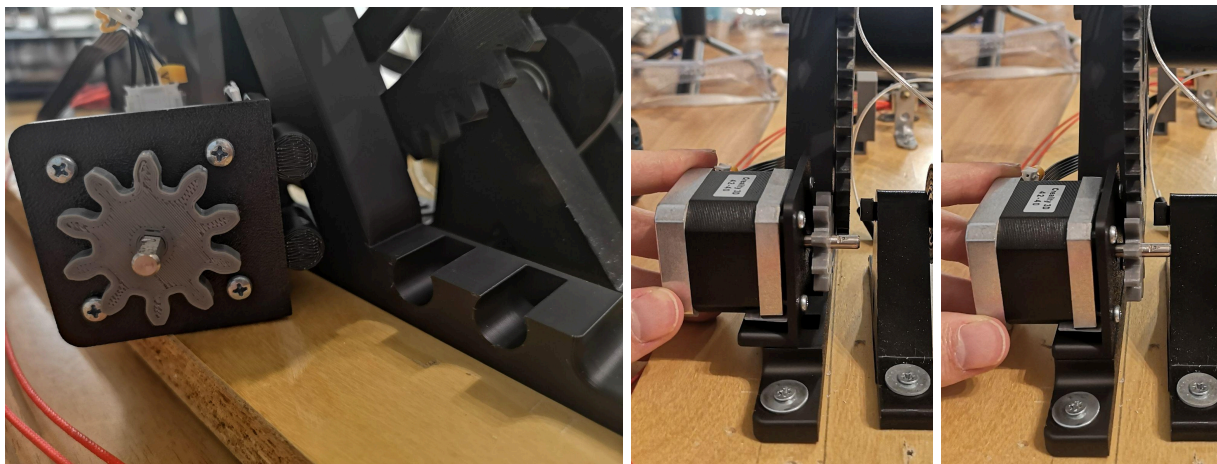
Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της διαδικασίας σχεδίασης βελτιώσεων για το DIY σύστημα μετατροπής πλαστικών μπουκαλιών PET σε υλικό για 3D εκτύπωση

Σχεδιάστηκε καρούλι για την τροφοδοσία της λωρίδας στο σύστημα μετατροπής που περιστρέφεται αβίαστα με την βοήθεια δύο ρουλεμάν. Προσφέρει επίσης την δυνατότητα και έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να μπορεί να τυλίξει την λωρίδα με την βοήθεια ηλεκτρικού δραπενοκατσάβιδου στον ρόλο του κινητήρα, ενώ ταυτόχρονα με την τύλιξη να κάνει και το τράβηγμα της λωρίδας για την κοπή της φιάλης. Με το τέλος της κοπής του πρώτου μπουκαλιού μπορεί να γίνει ένωση της ακρης της λωρίδας που είναι πάνω στο καρουλι με την αρχή της λωρίδας από το επόμενο μπουκάλι προς κοπή ώστε να κοπεί και το επόμενο μπουκάλι ενώ ταυτόχρονα τυλίγεται η λωρίδα που προκύπτει στο καρουλι. Η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί πολλές φορές μέχρι να γεμίσει το καρούλι με ενωμένες λωρίδες ή πλέον μια μεγάλη συνεχή λωρίδα έτοιμη να περάσει η άκρη της από το ακροφύσιο και να ξεκινήσει η μετατροπή της σε νήμα.



Εικ. 125 - 1) Μη συναρμολογημένα κομμάτια προς εκτύπωση του καρουλιού λωρίδας 2) Σύστημα τύλιξης, έλξης-κοπής και τροφοδοσίας λωρίδων σε χρήση

Η επόμενη βελτίωση στο σύστημα ήταν η επανασχεδίαση της βάσης του βηματικού κινητήρα ώστε να μπορεί να είναι εύκολα αποσπόμενος ώστε να διευκολύνει την διαδικασία της μεταφοράς του νήματος από το καρούλι του συστήματος σε ένα άλλο καρούλι για την αποθήκευσή του και χρήση του.



Εικ. 126 - Φωτογραφίες από την χρήση της εκτυπωμένης αποσπόμενης βάσης του βηματικού κινητήρα

Ανάλυση της σημασίας των αποτελεσμάτων

Το σημαντικότερο αποτέλεσμα της ΔΕ είναι η ένωση των λωρίδων. Ίσως είναι και ιδιαίτερα σημαντικό ότι η τεχνική ένωσης που αναπτύχθηκε δεν απαιτεί κάποιον ειδικό εξοπλισμό ούτε κάποια περίτεχνη κατασκευή ή προϊόν αλλά μονάχα ένα κολλητήριο που μπορεί να βρεθεί σε κάθε εργαστήριο. Έτσι είναι προσβάσιμο σε κάθε maker που έχει την ανάγκη ή απλά την θέληση να φτιάχνει το δικό του νήμα από μπουκάλια.

Ακόμα οι περαιτέρω βελτιώσεις στο DIY σύστημα μετατροπής το κάνουν πιο φιλικό στην χρήση και του εξοικονομούν χρόνο και κόπο. Πράγμα που κάνει την δραστηριότητα της μετατροπής πλαστικών μπουκαλιών σε νήμα ακόμα πιο ελκυστική επιλογή για πολλούς makers. Αυτό ακολούθως σημαίνει ότι όταν πιο πολλοί μετατρέπουν μπουκάλια σε νήμα τόσα περισσότερα μπουκάλια που δεν θα ανακυκλώνοντουσαν αποκοτούν και μια δεύτερη χρήση-ζωή.

Εντοπισμός πιθανών περιοχών για βελτίωση

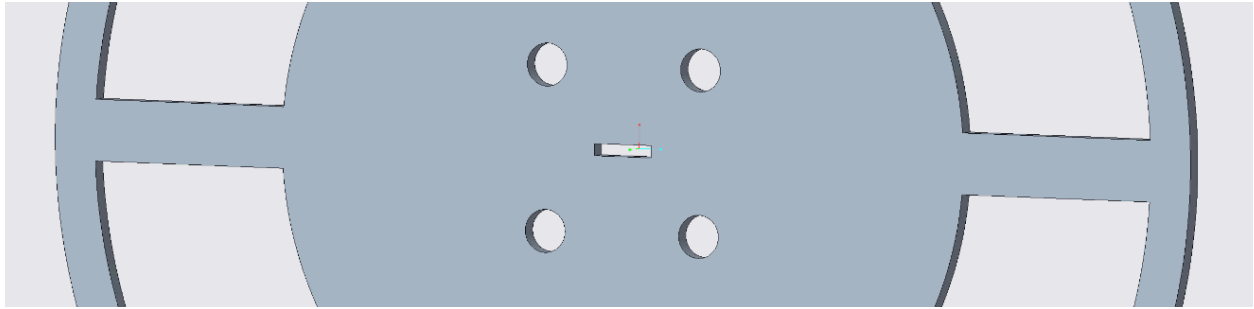
Το πιο σημαντικό σημείο προς βελτίωση είναι και πάλι η ένωση των λωρίδων. Θα μπορούσε να σχεδιαστεί σύστημα-προϊόν που να ενώνει τις λωρίδες χωρίς χρήση ψαλιδιού και κολλητηριού. Δηλαδή μια ολοκληρωμένη λύση, ένα σύστημα που να τοποθετούνται οι άκρες των λωρίδων προς ένωση και με μια δράση του χρήστη να ενώνονται.

Ακόμα θα μπορούσε να γίνει σχεδίαση ολοκληρωμένου βιομηχανικού προϊόντος συστήματος μετατροπής που να συμπεριλαμβάνει όλα τα υποσυστήματα που είναι απαραίτητα για την διαδικασία μετατροπής.

Θα ήταν πολύ βοηθητικό να σχεδιαστεί ένα ακόμα μηχανοκίνητο σύστημα που να μπορεί να δέχεται άδεια καρούλια από βιομηχανικό νήμα και να τυλίγει -μεταφέρει σε αυτά γρήγορα και ξεκούραστα το νήμα απο το καρούλι έλξης νήματος.

Θα μπορούσε επίσης να σχεδιαστεί ένα ακόμα κομμάτι για το καρούλι λωρίδας. Είχε προνοηθεί ότι θα ήταν μάλλον απαραίτητο γιατί το ηλεκτρικό δραπενοκατσάβιδο με την μεταλλική του μύτη έχει πληγώσει το υλικό όπως φαίνεται και στην εικόνα 127.2. Γι' αυτό έχουν επίσης σχεδιαστεί αυτές οι τέσσερις οπές γύρω από την υποδοχή για το δραπενοκατσάβιδο ως ασφαλιστική δικλείδα, ώστε να μπορεί να συνδεθεί άλλο ένα κομμάτι που να κουμπώνει σε αυτές τις οπές. Το κομμάτι αυτό θα μπορεί να σχεδιαστεί με καλύτερη υποδοχή για την μύτη κατσαβιδιού που να έχει μεγαλύτερη αντοχή ή έστω να μπορεί να αλλάζεται συχνά μόνο αυτό το μικρό κομμάτι και όχι όλο το μεγάλο πάνω κομμάτι του καρουλιού. Τέλος θα ήταν καλό να εκτυπωθεί με PET που είναι σκληρότερο και η επιφάνεια που θα έρχεται σε επαφή η μύτη του

κατσαβιδιού για να περιστρέφει το καρούλι να είναι μεγαλύτερη ώστε να καταμερίζονται οι δυνάμεις περισσότερο.



Εικ. 127 - 1) Στιγμιότυπο από το σχέδιο του πάνω κομματιού του καρουλιού λωρίδας που φαίνονται οι τέσσερις οπές στο κέντρο 2) Εκτυπομένο πάνω κομμάτι του καρουλιού λωρίδας μετά από χρήση του, με εμφανή πληγή στο υλικό από το δραπενοκατσάβιδο

Επίσης μια ακόμα βελτίωση πάνω στο σύστημα κοπής μπουκαλιών θα ήταν απαραίτητη για να είναι πλήρως λειτουργικό χωρίς καμία αυτοσχεδιαστική παρέμβαση παρέμβαση. Αυτό που του λείπει είναι η σχεδίαση μιας προεξοχής έτσι ώστε να κρατάει το μπουκάλι ατσαλάκωτο κατά την κοπή κρατώντας τον κομμένο πάτο του μπουκαλιού ανοιχτό και λίγο τεντωμένο. Έγιναν απόπειρες για τον σχεδιασμό αυτού του χαρακτηριστικού αλλά δεν είχαν επιτυχία γιατί δυστυχώς δεν του δόθηκε αρκετή βαρύτητα, χρόνος, προσοχή και σκέψη.

Μια ακόμα πολύ σημαντική βελτίωση είναι η προσθήκη κάποιας στρώσης θερμομονωτικού υλικού κάτω από την μεταλλική γωνία που είναι τοποθετημένο το ακροφύσιο, το heat block, το temperature sensor και το heater διότι εγκυμονεί ο κίνδυνος με τον καιρό και την πολύωρη χρήση να αυτοαναφλεχθεί το ξύλο.

Επιπλέον θα μπορούσε να είχε γίνει σχεδίαση για την καλύτερη διαχείρισης-τοποθέτηση των καλωδίων. Επιπρόσθετα καλό θα ήταν αν και όχι απαραίτητο να σχεδιαστούν χερούλια για την ευκολότερη μεταφορά του συστήματος.

Τέλος θα ήταν καλό να τροποποιηθεί ο G κώδικας για την μετατροπή ώστε να κάνει χρήση του μικρού ανεμιστήρα. Επιπρόσθετα να σχεδιαστεί μια φουσούνα που θα συγκεντρώνει και θα ρίχνει τον αέρα από το ανεμιστηράκι οριζόντια στο μήκος του παραγόμενου νήματος λίγο μετά το ακροφύσιο.

VI.Συμπέρασμα

Περίληψη των κύριων ευρημάτων της μελέτης

Το κύριο εύρημα που παρήγαγε η μελέτη είναι μια τεχνική ένωσης λωρίδων από πλαστικό PET μπουκαλιών νερού για την παραγωγή συνεχούς νήματος 3Δ εκτύπωσης. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση κολλητηριού, μιας απλής κατασκευής και δύο μανταλάκια. Οι ενωμένες αυτές λωρίδες μπορούν να τροφοδοτηθούν σε κάποιο σύστημα μετατροπής λωρίδων σε νήμα χωρίς να σπάσουν οι ενώσεις και στην συνέχεια να τροφοδοτηθεί αυτό το νήμα σε εκτυπωτή που διαθέτει συγκεκριμένα και ιδικά dual gear extruder και να γίνει εκτύπωση κάποιου κομματιού χωρίς κανένα πρόβλημα στην τροφοδοσία του υλικού-νήματος που προέρχεται από ενωμένες λωρίδες και/ή λεπτά μπουκάλια νερού. Επίσης σχεδιάστηκαν βελτιώσεις για συστήματα μετατροπής λωρίδων σε νήμα. Δύο είναι οι σημαντικότερες. Η πρώτη είναι η σχεδίαση ενός καρουλίου που θα περιστρέφεται με την βοήθεια ενός ηλεκτρικού δραπενοκαταβάιδου για να τυλίγει τις λωρίδες καθώς ταυτόχρονα τις τραβάει για να διευκολύνει και επιταχύνει την κοπή τους από το σύστημα κοπής μπουκαλιών. Επίσης εξυπηρετεί στην ομαλή και αβίαστη τροφοδοσία της λωρίδας στο ακροφύσιο. Η δεύτερη σημαντική βελτίωση είναι η σχεδίαση της βάσης του βηματικού κινητήρα έτσι ώστε να είναι εύκολα αποσπώμενος αποσυμπλέκοντας έτσι τα δύο γρανάζια και απελευθερώνοντας το καρούλι νήματος ώστε η μεταφορά το νήματος σε άλλο καρούλι να είναι μια ευκολότερη διαδικασία από ότι πριν.

Επιπτώσεις των αποτελεσμάτων για τους makers, τον τομέα της ανακύκλωσης πλαστικών και της παραγωγής νημάτων τρισδιάστατης εκτύπωσης

Μπορεί να μην μπορεί ο καθένας να κάνει στο σπίτι του ανακύκλωση αλλά πολύ makers μπορούν πλέον να κάνουν recycling τα μπουκάλια που χρησιμοποιούν οι ίδιοι ή ο περίγυρός τους και να τους δίνουν μια δεύτερη ζωή σαν νήμα για 3Δ εκτύπωση και μία τρίτη σαν εκτυπωμένο κομμάτι. Μπορεί κάποιοι makers να πιστεύουν ότι η διαδικασία μετατροπής δεν αξίζει τον κόπο του απαιτεί και ότι είναι πολύ χρονοβόρα αλλά με την διάδοση των βελτιώσεων και της τεχνικής ένωσης λωρίδων που προτείνει η ΔΕ να αλλάξουν γνώμη και να το δοκιμάσουν.

Οι makers με την εφαρμογή των βελτιώσεων στο σύστημα μετατροπής και την ένωση λωρίδων μπορούν να γλιτώσουν πολύτιμο χρόνο και να κερδίσουν γεμάτα καρούλια συνεχούς νήματος και όχι μικρά κομμάτια νήματος. Επιπλέον το νήμα αυτό που προέρχεται από ήδη χρησιμοποιημένο πλαστικό και παράγεται σχεδόν με μηδενικό κόστος μπορεί να τους κάνει να νιώθουν καλύτερα για το αντίκτυπο του

έχει το χόμπι τους στο περιβάλλον αλλά και για στην τσέπη τους. Πράγμα που σημαίνει ότι μπορούν να μειώσουν σημαντικά την κατανάλωση από βιομηχανικά παραγόμενα νήματα που χρησιμοποιούν παρθένο πλαστικό. Οπότε δεν είναι μόνο ότι χρησιμοποιούνται ξανά πλαστικά μπουκάλια που δεν υπάρχουν οι υποδομές για να ανακυκλωθούν αλλά μειώνεται και η δημιουργία νέων πλαστικών.

Συστάσεις για μελλοντική έρευνα και πρακτικές εφαρμογές

Μια πρόταση είναι να γίνουν περισσότερα πειράματα αντοχής των εκτυπωμένων κομματιών που συμπεριφέρονται σαν να είναι κατασκευασμένα από ανισότροπο υλικό και αντιδρούν διαφορετικά ανάλογα την κατεύθυνση που εφαρμόζονται οι δυνάμεις πάνω τους, ανάλογα τον προσανατολισμό του κομματιού κατά την εκτύπωση, δηλαδή την διεύθυνση σε σχέση με την γεωμετρία του κομματιού που θα γίνει η εναπόθεση των στρώσεων (layers) στην εκτύπωση. Καθώς και να συμπεριληφθούν τα δεδομένα στις βιβλιοθήκες των συστημάτων σχεδίασης, ανάλυσης και παραγωγής (CAD, CAE, CAM).

Επίσης ενδιαφέρον και μεγάλη σημασία θα είχε μια έρευνα για τις επιλογές ανακύκλωσης των εκτυπωμένων κομματιών (καθώς και στηρίξεις, υλικό που εξωθείται για τον μόνο λόγο του καθαρισμού του ακροφυσίου από το προηγούμενο χρώμα-υλικό σε εκτυπωτές που χρησιμοποιούν πολλά καρούλια, αποτυχημένες εκτυπώσεις) σε ατομικό αλλά και σε μαζικό επίπεδο έτσι ώστε τίποτα να μην πετιέται και να συνεισφέρει στο πρόβλημα της ρύπανσης.

Χρήσιμη θα ήταν η σχεδίαση ενός συστήματος για εργαστήρια, πανεπιστήμια ή και για οικία που θα κάνει ανακύκλωση τεμαχισμένων πλαστικών σε pellets. Έτσι όποιος διαθέτει μηχανήμα 3d printing filament maker όπως αυτά της 3devo θα μπορεί να το χρησιμοποιήσει για ανακύκλωση χωρίς να δυσκολεύεται να τροφοδοτήσει κομμένα κομμάτια πλαστικού στο χωνί του μηχανήματος αλλά και για άλλες πιθανές χρήσεις που μπορεί να έχει κάποιος για τα pellets ανακυκλωμένου πλαστικού.

VII. Βιβλιογραφικές αναφορές

3D Printing Settings Impacting Part Strength. (n.d.). Retrieved June 1, 2023, from

<https://markforged.com/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-plastics-composites/understanding-3d-printing-strength/3d-printing-settings-impacting-part-strength>

(292) How to remove a STUPID GLUE from plastic container—YouTube. (n.d.). Retrieved May

31, 2023, from

<https://www.youtube.com/watch?v=9BWLm6M5Kdk&list=PLFwbA7ptb5EQyDWzzipEYvzZH1qZ43Bp-&index=25>

Al-Sabagh, A. M., Yehia, F. Z., Eshaq, Gh., Rabie, A. M., & ElMetwally, A. E. (2016). Greener routes for recycling of polyethylene terephthalate. *Egyptian Journal of Petroleum*, 25(1), 53–64. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.03.001>

Awaja, F., & Pavel, D. (2005). Recycling of PET. *European Polymer Journal*, 41(7), 1453–1477. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2005.02.005>

CADx (Director). (2022, July 20). *Spur gear in Creo Parametric | Error free equation driven gear design in Creo Parametric*. <https://www.youtube.com/watch?v=awPW2JnCAh0>

CNC Kitchen (Director). (2022, January 22). *HOW STRONG is PET Bottle Filament?* <https://www.youtube.com/watch?v=N06FWr06iOI>

Copolymer. (2024). In *Wikipedia*.

<https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Copolymer&oldid=1204913565>

Copolymer—An overview | ScienceDirect Topics. (n.d.). Retrieved May 21, 2023, from <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/copolymer>

Dey, A., Roan Eagle, I. N., & Yodo, N. (2021). A Review on Filament Materials for Fused Filament Fabrication. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 5(3), 69. <https://doi.org/10.3390/jmmp5030069>

Famechon, R. (1992). Separation of poly(vinyl chloride) from poly(ethylene terephthalate) by micronyl process. *Makromolekulare Chemie. Macromolecular Symposia*, 57(1), 95–102. <https://doi.org/10.1002/masy.19920570108>

Gottesman, R. T. (1992). Separation of poly (vinyl chloride) from poly(ethylene terephthalate) and other plastics using automatic sortation devices. *Makromolekulare Chemie. Macromolecular Symposia*, 57(1), 133–143. <https://doi.org/10.1002/masy.19920570112>

Herianto, Atsani, S. I., & Mastrisiswadi, H. (2020). Recycled Polypropylene Filament for 3D

- Printer: Extrusion Process Parameter Optimization. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 722(1), 012022.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/722/1/012022>
- Hernández-Alamilla, M., & Valadez-Gonzalez, A. (2016). The effect of two commercial melt strength enhancer additives on the thermal, rheological and morphological properties of polylactide. *Journal of Polymer Engineering*, 36(1), 31–41.
<https://doi.org/10.1515/polyeng-2014-0322>
- Ji, L. N. (2013). Study on Preparation Process and Properties of Polyethylene Terephthalate (PET). *Applied Mechanics and Materials*, 312, 406–410.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.312.406>
- Kováčová, M., Kozakovičová, J., Procházka, M., Janigová, I., Vysopal, M., Černičková, I., Krajčovič, J., & Špitalský, Z. (2020). Novel Hybrid PETG Composites for 3D Printing. *Applied Sciences*, 10(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/app10093062>
- Kristiawan, R. B., Imaduddin, F., Ariawan, D., Ubaidillah, & Arifin, Z. (2021). A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. *Open Engineering*, 11(1), 639–649.
<https://doi.org/10.1515/eng-2021-0063>
- Make: (Director). (2015, February 11). *How It Is Made: 3D Printing Filament*.
<https://www.youtube.com/watch?v=OEkksADFjP8>
- Mosaddek, A., Kommula, H. K. R., & Gonzalez, F. (2018). Design and Testing of a Recycled 3D Printed and Foldable Unmanned Aerial Vehicle for Remote Sensing. *2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 1207–1216.
<https://doi.org/10.1109/ICUAS.2018.8453284>
- mr3dp (Director). (2023, August 7). *DIY - Testing My PET Bottle Cutter—Filament—3D Print!*
<https://www.youtube.com/watch?v=AqZ1wrYwgPA>
- Nucleating Agents—Polymer Additives Selection—SpecialChem*. (n.d.). Retrieved May 21,

2023, from

<https://polymer-additives.specialchem.com/product-categories/additives-nucleating-agents>

Paci, M., & La Mantia, F. P. (1999). Influence of small amounts of polyvinylchloride on the recycling of polyethyleneterephthalate. *Polymer Degradation and Stability*, 63(1), 11–14. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(98\)00053-6](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(98)00053-6)

Plastic bottle cutter (Director). (2021, November 26). *TWO SIMPLE AND RELIABLE BOTTLE CUTTERS!!!!!!* <https://www.youtube.com/watch?v=QyOKVBeIQ5w>

Polyethylene terephthalate (PET or PETE) | Structure, Properties, & Uses | Britannica. (2023, May 12). <https://www.britannica.com/science/polyethylene-terephthalate>

Printed Solid, Inc. - 3D Printers, Filament, Upgrades, and Service (Director). (2019, December 12). *Starting up the extrusion line for the day*.

<https://www.youtube.com/watch?v=H6KFhqo7qXg>

Quinn, L. (2022, August 17). *Quick Steps through the Double Diamond*. Medium.

<https://uxplanet.org/quick-steps-through-the-double-diamond-cf2e00b22ba7>

Recreator 3D Quick Start Guide. (n.d.). Google Docs. Retrieved May 31, 2023, from

https://docs.google.com/document/d/1OOXti46sr3bpCZSMrf-5ag5W0EQ1LZP-ObjVozj-7Fk/edit?usp=embed_facebook

Rosato, D. V. (2012). *Plastics Processing Data Handbook*. Springer Science & Business Media.

Taniguchi, I., Yoshida, S., Hiraga, K., Miyamoto, K., Kimura, Y., & Oda, K. (2019).

Biodegradation of PET: Current Status and Application Aspects. *ACS Catalysis*, 9(5), 4089–4105. <https://doi.org/10.1021/acscatal.8b05171>

Thanks for Interested in Filament by The Recreator 3D.docx. (n.d.). Google Docs. Retrieved May 31, 2023, from

https://docs.google.com/document/d/1bib3N_IkMiWcz8da_UMtpK7mX0ekQsx6/edit?usp=sharing&oid=113605061036357346208&rtpof=true&sd=true&usp=embed_facebook

The Recreator 3D Operations Manual. (n.d.). Google Docs. Retrieved May 31, 2023, from https://docs.google.com/document/d/1laL29G5qoCZrL91mc9rsJPk5bVZh8Q_4DLB4gmqqj1A/edit?usp=embed_facebook

Tylman, I., & Dzierzek, K. (2020). Filament for a 3D Printer from Pet Bottles- Simple Machine. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 1386–1392. <https://doi.org/10.18178/ijmerr.9.10.1386-1392>

Unbox Therapy (Director). (2020, June 23). *PETBOT in action (making filament)*. <https://www.youtube.com/watch?v=SZPMRKLgNbg>

Venkatachalam, S., Nayak, S. G., Labde, J. V., Gharal, P. R., Rao, K., Kelkar, A. K., Venkatachalam, S., Nayak, S. G., Labde, J. V., Gharal, P. R., Rao, K., & Kelkar, A. K. (2012). Degradation and Recyclability of Poly (Ethylene Terephthalate). In *Polyester*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/48612>