

Σύστημα Ανακύκλωσης Τρισδιάστατα Εκτυπωμένων Τεμαχίων με μέθοδο FDM



Τομέας: Μηχανολογικών Κατασκευών & Αυτομάτου
Ελέγχου

Επιβλέπων: Βασίλειος Σπιτάς, Καθηγητής ΕΜΠ



Αθήνα 2025

IOANNIS GANTZIDIS

Recycling system of FDM 3D Printed Parts

SCHOOL OF
MECHANICAL
ENGINEERING



Dept.: Department of Mechanical Design & Automatic Control

Supervisor: Vasileios Spitas, Professor NTUA



Athens 2025

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ιωάννης Γαντζίδης

Πίνακας Περιεχομένων

1.	Ευχαριστίες	5
2.	Περίληψη	7
3.	Abstract	8
4.	Εισαγωγή.....	9
○	4.1. Γενική εισαγωγή.....	9
○	4.2. Κύριες μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	9
▪	4.2.3. Χύτευση σε καλούπι	11
▪	4.2.4 Ανακύκλωση μέσω εκβολέα νήματος	12
○	4.3 Σύγκριση των δύο μεθόδων.....	14
5.	Μελέτη	15
○	5.1 Σχεδιασμός και μελέτη τεμαχιστή	15
▪	5.1.1 Σχεδιασμός λεπίδων σε CAD.....	15
▪	5.1.2 Μελέτη της αντοχής της λεπίδας με χρήση FEA	15
▪	5.1.3 Μελέτη συστήματος μονού άξονα	20
○	5.2 Επιλογή εδράνων κύλισης	23
○	5.3 Μελέτη και σχεδιασμός Ιμαντοκίνησης	25
○	5.4 Μελέτη και σχεδιασμός άξονα	39
○	5.5 Συναρμολόγηση Shredder	41
○	5.6 Πειραματική μελέτη της διαμέτρου των αποβλήτων.	45
○	5.7 Σύστημα περιτύλιξης του νέου νήματος	47
6.	Συμπεράσματα.....	52
7.	Μελλοντική Μελέτη	56
○	7.3. Πλήρης σχεδιασμός του extruder μέσω FEA για τη ροή της θερμότητας και του υλικού.	56
○	7.4. Κατασκευή συστήματος ψύξης για το νήμα μετά τον εξωθητή	56
○	7.5. Κατασκευή πλήρως αυτοματοποιημένου συστήματος	57
7.	Κατάλογος πινάκων	58
8.	Κατάλογος εικόνων.....	59
9.	Βιβλιογραφία	60

1. Ευχαριστίες

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο των υποχρεώσεών μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (Ε.Μ.Π.), στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών και συγκεκριμένα στον Τομέα Μηχανολογικών Κατασκευών & Αυτομάτου Ελέγχου κατά το ακαδημαϊκό έτος 2024-2025.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με στήριξαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου και συνέβαλαν στην υλοποίηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Πρώτιστα οφείλω ευχαριστίες στον υπεύθυνο καθηγητή μου κ. Βασίλειο Σπιτά, καθηγητή του Τομέα Μηχανολογικών Κατασκευών & Αυτομάτου Ελέγχου, για την αποδοχή της διπλωματικής εργασίας, την καθοδήγηση του και την συμβολή του σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Δημήτρη Κρυφό μέλος του εργαστηρίου, για τον χρόνο του και την πολύ σημαντική βοήθεια που μου παρείχε σε κάθε δυσκολία που παρουσιάστηκε κατά την εκπόνηση της διπλωματικής. Πολλά ευχαριστώ χρωστώ στους φίλους μου για την βοήθεια και την ψυχολογική στήριξη που μου έχουν προσφέρει κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Τέλος οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου που με εμπιστεύτηκε, με στήριξε και με στηρίζει άνευ όρων σε κάθε πτυχή της ζωής μου, ειδικά στον πατέρα μου, ο οποίος αποτέλεσε καθοριστικό παράγοντα να ακολουθήσω την Μηχανολογία ως αντικείμενο σπουδών.

--κενή σελίδα--

2. Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναφέρεται στον σχεδιασμό και τη μελέτη ενός μηχανήματος τριών φάσεων για την ανακύκλωση μη επιτυχημένων 3D εκτυπώσεων ή πρωτοτύπων. Σκοπός της μελέτης αυτής είναι αφενός η ενίσχυση και καλλιέργεια της οικολογικής συνείδησης και αφετέρου η μείωση του κόστους των πρώτων υλών. Η διαδικασία ανακύκλωσης αποτελείται από τρία βασικά στάδια, τα οποία είναι: ο τεμαχισμός, η εξώθηση και τέλος η επανελίκωση του νήματος (filament). Στο πρώτο στάδιο της διαδικασίας, τα προς ανακύκλωση τεμάχια θρυμματίζονται σε μικρότερα επιμέρους κομμάτια μέσω ενός τεμαχιστικού, μεμονωμένου άξονα. Η έξοδος του τεμαχιστή διαθέτει ένα φίλτρο που επιτρέπει τη διέλευση κομματιών συγκεκριμένης διαμέτρου, τα οποία στην συνέχεια συλλέγονται και οδηγούνται στο επόμενο στάδιο. Το δεύτερο στάδιο αφορά στην εξώθηση των κομματιών σε νήμα μέσω εξωθητή μονού κοχλίου. Η απόφαση για τη χρήση μονού άξονα και μονού κοχλίου ελήφθη μετά από επαναληπτική διαδικασία υπολογισμών και οικονομικών αναλύσεων, οι οποίες κατέδειξαν ότι η αρχική σχεδίαση με τεμαχιστή διπλού άξονα και εξωθητή διπλού κοχλίου ήταν ασύμφορη. Ενώ ο εξωθητής διπλού κοχλίου προσφέρει πλεονεκτήματα στην ανάμειξη και στην επεξεργασία σκληρών υλικών, το κόστος συντήρησης και κατασκευής του είναι διπλάσιο, καθιστώντας τον οικονομικά μη βιώσιμο για την εν προκειμένω εφαρμογή. Αντιθέτως, ο εξωθητής μονού κοχλίου ικανοποιεί πλήρως τις ανάγκες της εφαρμογής, επιτυγχάνοντας την επιθυμητή ποιότητα ανάμειξης και εξώθησης. Στο τρίτο και τελευταίο στάδιο, το παραγόμενο νήμα τυλίγεται ξανά σε τύμπανο, το οποίο κινείται από βηματικό κινητήρα οδηγούμενος από λογικό ελεγκτή. Η διαδικασία σχεδιασμού και μελέτης του συστήματος περιλάμβανε μια πλήρη φάση εννοιολογικού σχεδιασμού και χρήση μεθόδων ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA), με στόχο τη δημιουργία μιας οικονομικής λύσης για την ανακύκλωση απορριπτόμενων 3D εκτυπώσεων. Συμπερασματικά, η λύση αυτή, απευθύνεται τόσο σε ερασιτέχνες, που επιθυμούν να μειώσουν το κόστος πρώτων υλών, όσο και σε βιομηχανίες, που στοχεύουν στη μείωση των εξόδων παραγωγής. Επιπροσθέτως, διεξήχθη επαναληπτική πειραματική διαδικασία στον εξωθητή, μελετώντας τη διάμετρο του παραγόμενου νήματος και το ποσοστό μίξης παρθένου και ανακυκλωμένου υλικού, προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη απόδοση και ποιότητα του παραγόμενου νήματος. Η εργασία τελειώνει με την παρουσίαση των περαιτέρω παραγόντων που θα μπορούσε να αναλύσει με απώτερο σκοπό την μελλοντική έρευνα.

3. Abstract

This thesis focuses on the design and study of a three-phase machine for recycling failed 3D prints or prototypes. The purpose of this study is twofold: to promote and cultivate ecological awareness and to reduce the cost of raw materials. The recycling process consists of three main stages: shredding, extrusion, and finally, re-spooling the filament. In the first stage, the items to be recycled are crushed into smaller pieces using a single-axis shredder. The shredder's output features a filter that allows only pieces of a specific diameter to pass through. These are then collected and directed to the next stage. The second stage involves extruding the pieces into filament using a single-screw extruder. The decision to use a single-axis shredder and a single-screw extruder was made after iterative calculations and financial analysis, which demonstrated that the initial design, which included a dual-axis shredder and a twin-screw extruder, was not cost-efficient. While the twin-screw extruder offers advantages in material mixing and processing harder materials, its maintenance and construction costs are double, making it economically unviable for this application. On the contrary, the single-screw extruder fully meets the application's requirements, achieving the desired mixing and extrusion quality. In the third and final stage, the produced filament is rewound onto a spool driven by a stepper motor controlled by a logic controller. The design and study process included a complete conceptual design phase and the use of finite element analysis (FEA) methods to create an economical solution for recycling discarded 3D prints. In conclusion, this solution is aimed both at hobbyists, who wish to reduce raw material costs, and at industries seeking to lower production expenses. Additionally, iterative experimental procedures were conducted on the extruder to examine the diameter of the produced filament and the ratio of virgin to recycled material, in order to achieve optimal performance and filament quality. The thesis concludes with a discussion of further factors that could be analyzed to facilitate future research.

4. Εισαγωγή

4.1. Γενική εισαγωγή

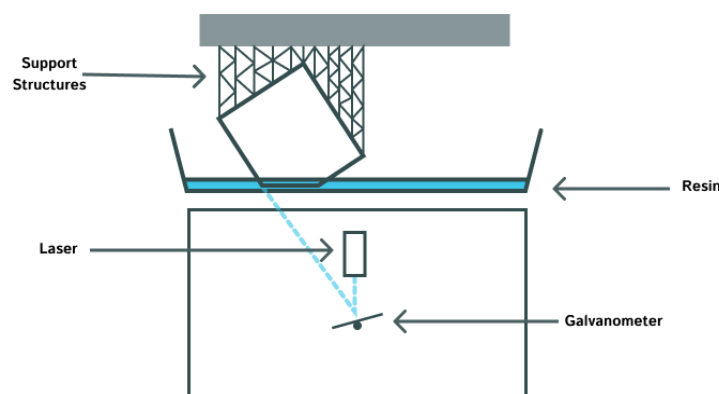
Η παρούσα διπλωματική εστιάζει στην μελέτη, το σχεδιασμό και την κατασκευή, τουλάχιστον σε θεωρητικό επίπεδο ενός συστήματος ανακύκλωσης αποτυχημένων ή πρωτότυπων εκτυπώσεων κατασκευασμένων με την μέθοδο FFF/FDM. Επρόκειτο για υλικά αποτελούμενα από πολλαπλές στρώσεις θερμοπλαστικών πολυμερών.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση, γνωστή και ως 3D Printing, είναι μια τεχνολογία προσθετικής κατασκευής που έχει επιφέρει επανάσταση στη βιομηχανία και την καθημερινή ζωή, παρέχοντας την δυνατότητα δημιουργίας αντικειμένων από πληθώρα υλικών. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την κατασκευή περίπλοκων σχημάτων και δομών, τα οποία θα ήταν αδύνατο ή πολύ δύσκολο να κατασκευαστούν με παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής. Παρακάτω γίνεται μία σύντομη αναδρομή στις πιο διαδεδομένες τεχνικές Τρισδιάστατης προσθετικής κατασκευής και τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε.

4.2. Κύριες μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης

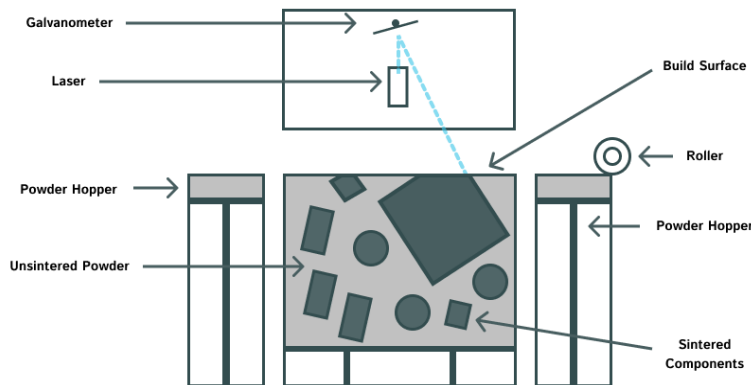
Οι κύριες μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης περιλαμβάνουν την Stereolithography (SLA) & Digital Light Processing (DLP), την Selective Laser Sintering (SLS) και την Fused Deposition Modeling (FDM).

- **Stereolithography (SLA) & Digital Light Processing (DLP):** Οι μέθοδοι αυτοί χρησιμοποιούν φωτοπολυμεριζόμενα υλικά (ρητίνες) τα οποία στερεοποιούνται με την έκθεση σε υπεριώδες φως. Είναι γνωστές για την υψηλή τους ακρίβεια και την ικανότητα να δημιουργεί λεπτομερή αντικείμενα. Ωστόσο, η διαδικασία αυτή είναι συνήθως χρονοβόρα και το υλικό είναι τοξικό προς τον άνθρωπο επομένως χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή κατά τον χειρισμό της πρώτης ύλης. Επίσης καθίσταται αναγκαία η παρουσία φίλτρου ή εξαερισμού κατά την εκτύπωση. Η διαφορά μεταξύ των δύο είναι πως στην SLA χρησιμοποιείται δέσμη η οποία σχεδιάζει το προφίλ της κάθε στρώσης στο βάθος της δεξαμενής με την ρητίνη, ενώ στην DLP υπάρχει μία σειρά από pixels που εκπέμπουν φως ταυτόχρονα επομένως η στρώση πολυμερίζεται ολόκληρη. Στην **Εικόνα 1** απεικονίζεται σχηματικά η διαδικασία.



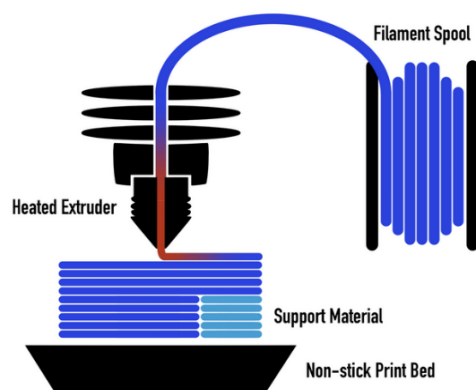
Εικόνα 1 – Σχηματική απεικόνιση μεθόδου SLA

- Selective Laser Sintering (SLS):** Η SLS χρησιμοποιεί ένα λέιζερ για να συντήξει μικρά σωματίδια υλικού, όπως είναι το πλαστικό ή το μέταλλο, σε μια στερεή δομή. Η μέθοδος αυτή προσφέρει υψηλή αντοχή και ακρίβεια. Παρόλα αυτά, δεν αποτελεί μια οικονομική μέθοδο και απαιτεί αρκετό χρόνο για την ολοκλήρωση της διαδικασίας. Στην **Εικόνα 2** παρουσιάζεται σχηματικά η διαδικασία.



Εικόνα 2 - Σχηματική Απεικόνιση μεθόδου SLS

- Fused Deposition Modeling (FDM):** Η FDM είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος 3D Printing λόγω της υψηλής παραγωγικότητας και του χαμηλού κόστους της. Το υλικό, το οποίο είναι συνήθως πλαστικό, τήκεται και εναποτίθεται στρώμα-στρώμα προκειμένου να δημιουργηθεί το αντικείμενο. Ωστόσο, οι απώλειες σε υλικό είναι μεγάλες αρκετές φορές, λόγω των στηριγμάτων που χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη περίπλοκων δομών.



Εικόνα 3 - Σχηματική Απεικόνιση μεθόδου FDM

Συνεπώς, οι απώλειες σε υλικό αποτελούν ένα σημαντικό πρόβλημα, ειδικά στην FDM μέθοδο, καθώς εκεί το πρόβλημα έχει και την μεγαλύτερη έκταση. Αν αναλογιστεί κανείς την ποσότητα του υλικού που

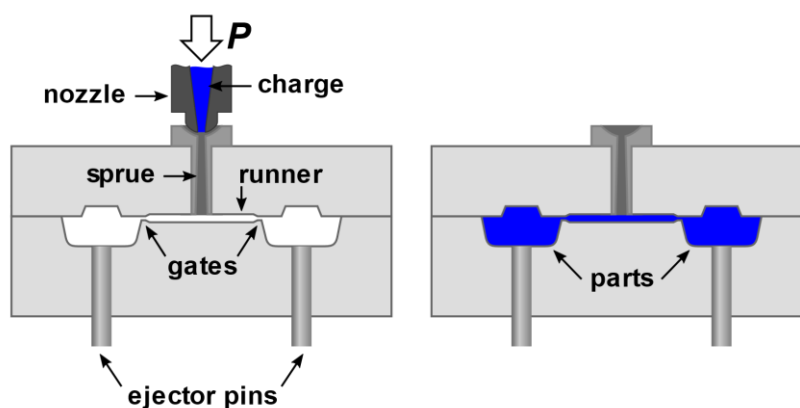
χάνεται μέσω των υποστηριγμάτων,, σε συνδυασμό με το υλικό που συσσωρεύεται από αποτυχημένες εκτυπώσεις ή πρωτότυπα τεμάχια που δεν χρειάζονται πλέον δημιουργείται το εύλογο ερώτημα αν η ανακύκλωση θα μπορούσε να δώσει την λύση στο ζήτημα. Μέσω της ανακύκλωσης, η διαδικασία μπορεί να γίνει περισσότερο αποδοτική και βιώσιμη, παραδείγματος χάριν για μια επιχείρηση. Δεδομένου ότι το υλικό που χάνεται λόγω των προαναφερθέντων, μπορεί να φτάσει έως και το 34% του χρησιμοποιούμενου υλικού [1], [2], υπάρχουν μεγάλα περιθώρια βελτίωσης ως προς την αξιοποίηση του χαμένου υλικού. Στην **Εικόνα 3** παρουσιάζεται σχηματικά η διαδικασία.

Η παρούσα εργασία εστιάζει στη μέθοδο FDM, καθώς πρόκειται για την πιο διαδεδομένη μέθοδο, λόγω της ευχρηστίας της και την πληθώρα εφαρμογών που διαθέτει. Επιπλέον, αποτελεί την διαδικασία Τρισδιάστατης Προσθετικής Κατασκευής με τις μεγαλύτερες απώλειες. Στις επόμενες παραγράφους γίνεται αναφορά στους τρόπους ανακύκλωσης των υλικών που χρησιμοποιούνται.

Η ανακύκλωση των υλικών στην FDM μπορεί να επιτευχθεί με τους εξής δύο (κυρίως) τρόπους:

▪ 4.2.3. Χύτευση σε καλούπι

Η χύτευση σε καλούπι (injection moulding), αποτελεί μια διαδικασία κατασκευής η οποία χρησιμοποιείται για την παραγωγή εξαρτημάτων με την έγχυση λιωμένου υλικού σε κάποιο καλούπι. αξιοποιείται ευρέως για τη δημιουργία διαφόρων προϊόντων προερχόμενα από πλαστικό, μέταλλο, γυαλί και ακόμα και ελαστομερή. Η διαδικασία αυτή είναι ιδανική για τη μαζική παραγωγή εξαρτημάτων με πολύπλοκα σχέδια και στενές ανοχές.



Εικόνα 4 – Σχηματική Απεικόνιση Χύτευσης σε καλούπι

Διαδικασία της εξώθησης Πλαστικού

Αφότου τα ανεπιθύμητα κομμάτια διασπαστούν σε μικρότερα τεμάχια μέσω ενός τεμαχιστή, ακολουθεί η διαδικασία της έγχυσης πλαστικού, που περιλαμβάνει ορισμένα βασικά βήματα. Η διαδικασία ξεκινά με την σύσφιξη, κατά την οποία το καλούπι αποτελείται από δύο ημίση τμήματα, τα οποία διατηρούνται σφιγμένα από μια μονάδα σύσφιξης. Η μονάδα σύσφιξης διασφαλίζει ότι το καλούπι παραμένει κλειστό ενώ το λιωμένο υλικό εγχέεται μέσω ενός ακροφυσίου. Το υλικό αυτό θερμαίνεται και όπως προαναφέρθηκε λιώνει στη μονάδα έγχυσης πριν αναγκαστεί να εισέλθει στην κοιλότητα του

καλουπιού. Μόλις το μείγμα γεμίσει την κοιλότητα του καλουπιού, αρχίζει να ψύχεται και να στερεοποιείται, παίρνοντας το σχήμα του καλουπιού. Ο χρόνος ψύξης εξαρτάται από το υλικό και την γεωμετρία του εκάστοτε εξαρτήματος. Στην **Εικόνα 4** παρουσιάζεται σχηματικά η διαδικασία.

Αφού το εξάρτημα έχει ψυχθεί και στερεοποιηθεί, το καλούπι ανοίγει και ένα σύστημα εξόλκευσης ωθεί το εξάρτημα έξω από την κοιλότητα του καλουπιού.

Το εξάρτημα τις περισσότερες φορές μπορεί να απαιτεί επιπλέον επεξεργασία, όπως την αφαίρεση υπερβολικού υλικού, το γυάλισμα ή το βάψιμο.

Πλεονεκτήματα της Έγχυσης Πλαστικού

Η έγχυση πλαστικού προσφέρει τα εξής οφέλη, καθιστώντας την μια αρκετά δημοφιλή διαδικασία κατασκευής. Τα αναφερόμενα οφέλη είναι τα ακόλουθα:

- **Υψηλή Αποδοτικότητα:** Μόλις ολοκληρωθεί η αρχική ρύθμιση, η διαδικασία παραγωγής είναι γρήγορη και αποδοτική, επιτρέποντας κατά αυτόν τον τρόπο την παραγωγή μεγάλου αριθμού εξαρτημάτων σε σύντομο χρονικό διάστημα.
- **Ακρίβεια και Πολυπλοκότητα:** Η έγχυση πλαστικού μπορεί να παράγει εξαρτήματα με περίπλοκα σχέδια και στενές ανοχές, τα οποία θα ήταν δύσκολο ή αδύνατο να επιτευχθούν με άλλες μεθόδους κατασκευής.

Προκλήσεις και Σκέψεις

Παρόλο που η έγχυση πλαστικού είναι μια πολύ αποδοτική και ευέλικτη διαδικασία, υπάρχουν ορισμένες προκλήσεις και δυσκολίες:

- **Υψηλό Αρχικό Κόστος:** Το κόστος σχεδιασμού και κατασκευής των καλουπιών μπορεί να είναι υψηλό, καθιστώντας την πιο κατάλληλη για μεγάλες παραγωγές.
- **Περιορισμοί Υλικών:** Δεν μπορούν όλα τα υλικά να υποβληθούν σε έγχυση πλαστικού, και ορισμένα ενδέχεται να απαιτούν συγκεκριμένες συνθήκες επεξεργασίας.
- **Περιορισμοί Σχεδιασμού:** Παρόλο που οι περίπλοκοι σχεδιασμοί είναι εφικτοί, υπάρχουν περιορισμοί που σχετίζονται με το πάχος των εξαρτημάτων, τις αντοχές και την ικανότητα πλήρωσης του καλουπιού σε όλη του την έκταση.
- **Περιορισμός Εναλλαξιμότητας:** Το καλούπι είναι μοναδικό για την παραγωγή ενός εξαρτήματος. Για κάθε άλλο εξάρτημα, πρέπει να δημιουργηθεί άλλο καλούπι, γεγονός που καθιστά την διαδικασία χρονοβόρα και υψηλού κόστους.

▪ **4.2.4 Ανακύκλωση μέσω εκβολέα νήματος**

Διαδικασία ανακύκλωσης μέσω εκβολέα νήματος

Μέσω της εξώθησης υλικού από ένα θερμαινόμενο άκρο συγκεκριμένης διαμέτρου μπορεί να παραχθεί ξανά νήμα από τρίμματα ανακυκλωμένου υλικού. Προτού βέβαια πραγματοποιηθεί η εξώθηση, θα πρέπει να γίνει ο θρυμματισμός των ανεπιθύμητων τεμαχίων σε ομοιόμορφα κομμάτια μικρού μεγέθους ώστε να εισέλθουν στον εκβολέα. Η διαδικασία αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί σε τρεις φάσεις

ξεκινώντας με τον θρυμματισμό των απορριπτόμενων υλικών σε μικρά τεμάχια μέσω του τεμαχιστή. Το μηχάνημα αυτό αποτελείται από λείδες οι οποίες καταστρέφουν το εισερχόμενο υλικό. Στην συνέχεια, τα κομμάτια αυτά, μέσω ενός χωνιού οδηγούνται στην επόμενη φάση της εξώθησης. Ο εξωθητής λιώνει και επαναδιαμορφώνει το υλικό σε ένα συνεχές νήμα. Φέρει θερμαινόμενο θάλαμο με έναν ή δυο κοχλίες. Ο ρόλος τους είναι να προωθούν το υλικό στην έξοδο συγκεκριμένης διαμέτρου. Τέλος το νήμα που προκύπτει περιτυλίγεται από ειδικό μηχανισμό ξανά σε τύμπανο ώστε να είναι έτοιμο προς χρήση από τον εκάστοτε εκτυπωτή.

Πλεονεκτήματα

- **Χαμηλό κόστος κατασκευής:** πρόκειται για μια ιδιαίτερα οικονομική κατασκευή, χωρίς περίπλοκα μηχανικά μέρη.
- **Παραγωγή πρώτης ύλης:** Παράγεται μέσα από τη διαδικασία αυτή η πρώτη ύλη, επομένως εξυπηρετείται η κυκλική οικονομία . Δίνεται η δυνατότητα εν συνεχεία να κατασκευαστούν τεμάχια οποιασδήποτε γεωμετρίας.

Προκλήσεις και Σκέψεις

- **Χρονοβόρα διαδικασία:** Για να ολοκληρωθούν οι 3 φάσεις της διαδικασίας απαιτείται μεγάλο χρονικό διάστημα.
- **Περιορισμός στα υλικά:** καθώς χρειάζονται 2 κύκλοι αναθέρμανσης, πολλά υλικά εξ'ορισμού αποκλείονται από την διαδικασία (π.χ. PLA).



Εικόνα 5 – Διάταξη εκβολέα νήματος

Εξαιτίας των προαναφερόμενων λόγων, επιλέχθηκε η μελέτη ενός συστήματος εκβολέα. Η ανάπτυξη ενός οικονομικά προσιτού και αποδοτικού συστήματος ανακύκλωσης για την FDM τρισδιάστατη εκτύπωση είναι κρίσιμη για τη βελτίωση της βιωσιμότητας και της αποδοτικότητας αυτής της τεχνολογίας, πόσο μάλλον σε μία μεγάλης κλίμακας παραγωγή. Μία τυπική διάταξη εκβολέα νήματος παρουσιάζεται στην **Εικόνα 5**.

○ 4.3 Σύγκριση των δύο μεθόδων

Η μέθοδος της έγχυσης πλαστικού και η μέθοδος ανακύκλωσης μέσω εκβολέα νήματος παρουσιάζουν διαφορετικά πλεονεκτήματα και αρνητικά. Η έγχυση πλαστικού προσφέρει υψηλή αποδοτικότητα, ακρίβεια και τη δυνατότητα παραγωγής σύνθετων σχεδίων σε μαζική κλίμακα, αλλά απαιτεί υψηλό αρχικό κόστος για την κατασκευή καλουπιών, έχει περιορισμούς στα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και κατά κύριο χαρακτηρίζεται από περιορισμένη ευελιξία λόγω του περιορισμού που έχει κάθε καλούπι ότι μπορεί να προκύψει τεμάχιο μίας αποκλειστικά γεωμετρίας. Αντίθετα, η μέθοδος ανακύκλωσης μέσω εκβολέα νήματος προσφέρει χαμηλό κόστος κατασκευής, συμβάλλει στην κυκλική οικονομία μέσω της παραγωγής πρώτης ύλης και είναι ευέλικτη για μικρότερες εφαρμογές. Παρόλο που η διαδικασία είναι χρονοβόρα και περιορίζεται σε υλικά που αντέχουν τους κύκλους αναθέρμανσης, (αποκλείοντας υλικά όπως το PLA) λαμβάνοντας υπόψη την ανάγκη για οικονομική και αποδοτική ανακύκλωση υλικών σε εφαρμογές FDM όπου έχουμε και το περισσότερο υλικό που καταλήγει μη αξιοποιήσιμο, η μέθοδος του εκβολέα νήματος επιλέγεται ως η βέλτιστη λύση, ιδίως για την υποστήριξη της βιωσιμότητας και της αποδοτικότητας σε μικρής ή μεγάλης κλίμακας παραγωγή.

5. Μελέτη

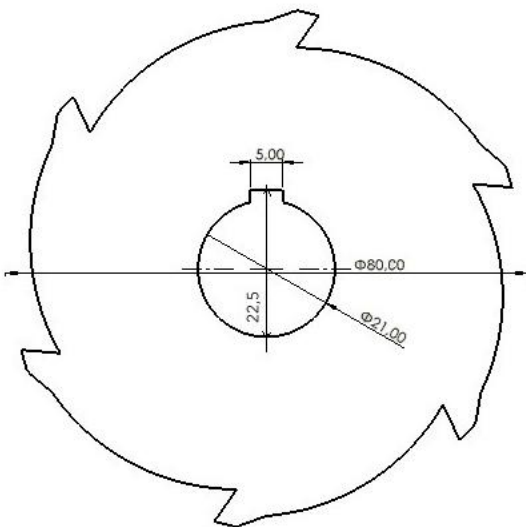
○ 5.1 Σχεδιασμός και μελέτη τεμαχιστή

Η υπό μελέτη κατασκευή επιλέχθηκε να είναι τύπου εκβολέα νήματος. Η μελέτη της κατασκευής ξεκινάει με την μελέτη των επιμέρους τμημάτων της κατασκευής και συγκεκριμένα του τεμαχιστή, ο οποίος αποτελεί και το πρώτο στάδιο του υπό μελέτη συστήματος. Ο τεμαχιστής πρέπει να φέρει ένα σύστημα λεπίδων οι οποίες θα θρυμματίζουν τα τεμάχια. Τα τεμαχισμένα αυτά κομμάτια ύστερα από την διέλευση τους από διαχωριστή, καταλήγουν σε μία δεξαμενή. Ύστερα από μια ανασκόπηση των μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία, επιλέχθηκε αρχικά μηχανισμός δύο αξόνων με λεπίδες. Η επιλογή έγινε με γνώμονα την στιβαρότητα, καθώς και την αυξημένη θλιπτική ικανότητα ενός τέτοιου είδους κατασκευής.

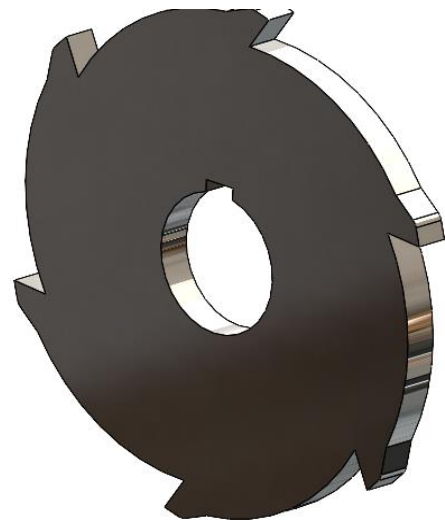
▪ 5.1.1 Σχεδιασμός λεπίδων σε CAD

Ως πρώτο βήμα σχεδιάστηκαν οι λεπίδες του μηχανισμού. Η ονομαστική τους διάμετρος (μετρώντας από την μύτη των λεπίδων) είναι 80mm με 6 δόντια. Επιπλέον δόθηκε σφηνάουλακα διαστάσεων 5mm*3mm όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 6**.

Το πάχος τους είναι 10 mm, καθώς το κάθε απόβλητο άνω των 10mm, δεν είναι επιθυμητό.



Εικόνα 7 – Βασικές διαστάσεις λεπίδας



Εικόνα 6 – Τρισδιάστατη Γεωμετρία λεπίδας

▪ 5.1.2 Μελέτη της αντοχής της λεπίδας με χρήση FEA

Ως υλικό επιλέγεται απλός χάλυβας (Structural Steel στην βιβλιοθήκη της πλατφόρμας Ansys) [3]. Προκειμένου να υπολογιστεί η αντοχή της λεπίδας, πραγματοποιήθηκε δυναμική μελέτη με την χρήση του λογισμικού Ansys, συγκεκριμένα της βιβλιοθήκης Explicit Dynamics [3]. Μέσα από την διαδικασία

αυτή υπολογίζεται επίσης η δύναμη που ασκεί η λεπίδα στο απόβλητο καθώς και η δύναμη που ασκείται στον άξονα και κατά επέκταση και στα έδρανα κύλισης κάθε άξονα.

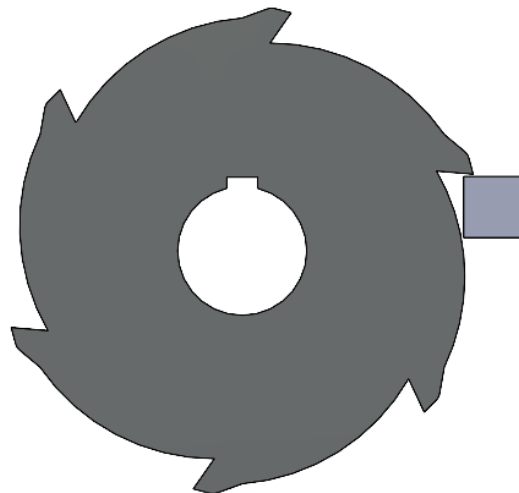
Με την βοήθεια του Probe Tool ευρέθησαν οι δυνάμεις στο σημείο έδρασης της λεπίδας καθώς και η δύναμη που ασκείται στο απόβλητο.

Αρχικά ορίστηκε ένα custom υλικό για το απόβλητο, διότι δεν υπάρχει PETG στην βιβλιοθήκη των υλικών του Ansys. Επομένως στο υλικό προσδόθηκαν οι εξής μηχανικές ιδιότητες [4]:

Πίνακας 1 – Ιδιότητες PETG

Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδα Μέτρησης
Πυκνότητα	1,27	gcm ⁻³
Young Modulus	791	Mpa
Poisson's Ratio	0,4	

Μετάπειτα δημιουργήθηκε το μοντέλο CAD βασισμένο στην γεωμετρία της **Εικόνας 6**, προς ανάλυση. Τοποθετήθηκε παράπλευρα της λεπίδας ένα απλοποιημένο τετραγωνικό υλικό προς τεμαχισμό, με πλευρές ίσες με το πάχος της λεπίδας.



Εικόνα 9 – Γεωμετρία λεπίδας & αποβλήτου

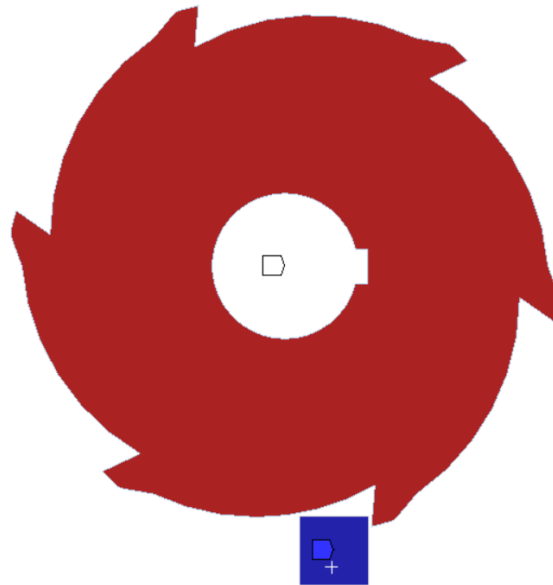
Επομένως το CAD αρχείο που σχεδιάστηκε στο Solidworks, μετατράπηκε σε .step αρχείο και εισήχθη στο DesignModeler. Στο ενσωματωμένο CAD πρόγραμμα της βιβλιοθήκης Ansys πραγματοποιήθηκε ενοποίηση των Parts και έπειτα ακολούθησε διαχωρισμός σε δύο σώματα μέσω της εντολής Form New Part, προτού εισαχθεί η γεωμετρία στο αντίστοιχο Project του Ansys.

Εν συνεχεία , επιλέχθηκε σύστημα συντεταγμένων για κάθε σώμα αντίστοιχα, με σημείο αναφοράς το κέντρο της εκάστοτε γεωμετρίας. Το πλέγμα αποτελείται από στοιχεία solid 186. & 187. [5], [6] και καθορίστηκε στα 0,7 mm μέγεθος για το εκάστοτε στοιχείο και για τα δύο σώματα.

Στις συνοριακές συνθήκες που όριζαν τον τύπο επαφής μεταξύ των δύο σωμάτων, θεωρήθηκε ένα μοντέλο τριβής με συντελεστή ίσο με 0,3 και δυναμικό συντελεστή στα 0,18 όπως βρέθηκε από την

βιβλιογραφία για πλαστικό PETG με χάλυβα [4]. Αντίστοιχα στα Contacts ,δόθηκαν συντελεστές με τις ίδιες παραμέτρους (Συντελεστής τριβής ίσος με 0,3 & δυναμικός συντελεστής ίσος με 0,18).

Στην παρακάτω **Εικόνα 9** φαίνεται ποιο body ορίστηκε ως Contact (Κόκκινο) και ποιο ως Target(Μωβ).



Εικόνα 10 – Contact μεταξύ λεπίδας και αποβλήτου

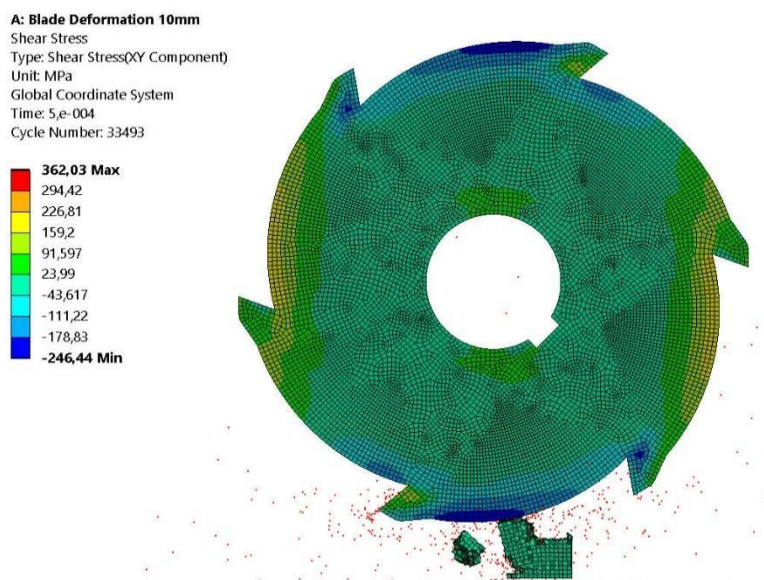
Επιθυμούμε την περιστροφή της λεπίδας, ενώ το απόβλητο επιθυμούμε να παραμείνει πακτωμένο στην μία πλευρά, ώστε να προσομοιάσουμε τις συνθήκες κοπής. Οι οριακές συνθήκες διαμορφώθηκαν ως εξής: Η λεπίδα παραμένει ακίνητη ως προς τους άξονες x και z , ενώ περιστρέφεται κατά 45 μοίρες στον άξονα y , όπως φαίνεται στην **Εικόνα 10**. Στο απόβλητο επιλέγεται μόνο μία επιφάνεια η οποία παραμένει ακλόνητη, αυτό που βρίσκεται απέναντι από την λεπίδα.



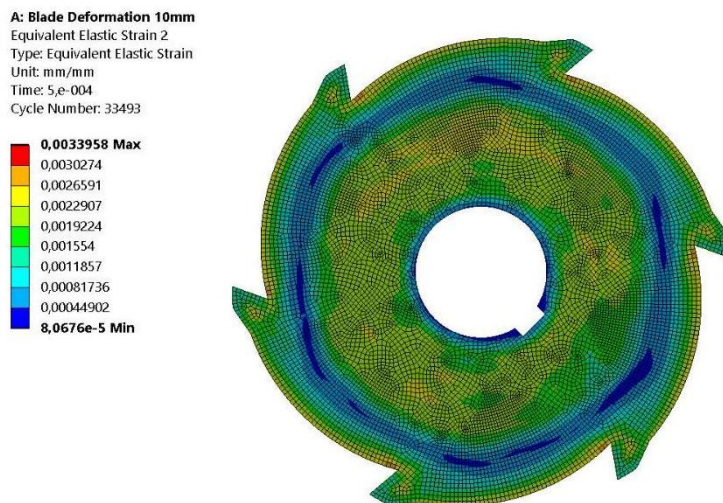
Εικόνα 11 – Οριακές συνθήκες λεπίδας & πακτωμένο face αποβλήτου

Προτού αναλυθούν τα αποτελέσματα αξίζει να σημειωθεί πως ενεργοποιήθηκε μάλιστα η επιλογή On Material Failure, όπως παρουσιάζεται από κάτω ώστε να επιτρέπεται η θραύση υλικού.

Παρατηρήθηκε πως ενώ οι παραμορφώσεις της λεπίδας είναι μηδαμινές, οι δυνάμεις θλίψης που προκύπτουν, καθώς και οι ασκούμενες δυνάμεις στα σημεία έδρασης και κατά επέκταση στα έδρανα κύλισης είναι αρκετά μεγάλες.

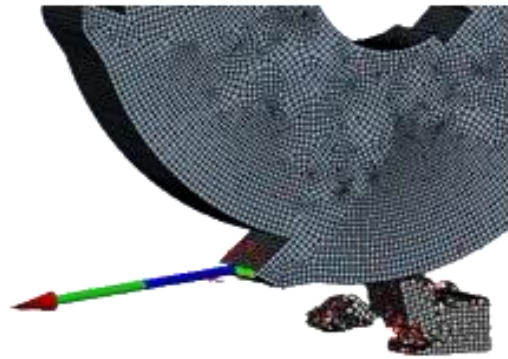


Εικόνα 12 – Διατμητική τάση



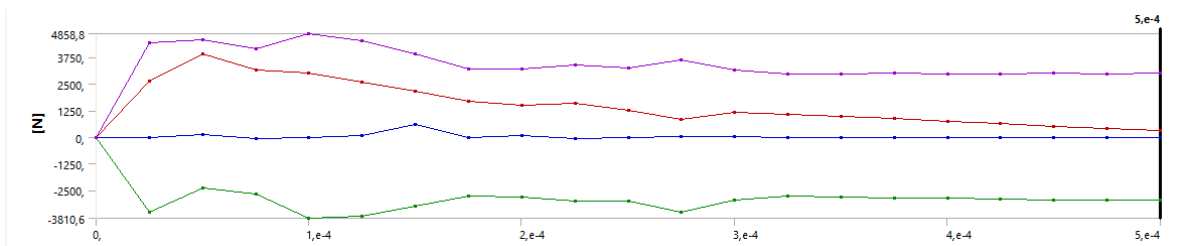
Εικόνα 13 – Παραμόρφωση λεπίδας

Οι τάσεις δεν ξεπερνούν το όριο διαρροής του χάλυβα, κάτι που αποδεικνύεται όταν απομονώνεται το σώμα της λεπίδας, της οποίας η παραμόρφωση δεν πλησιάζει την πλαστική περιοχή. Επιπροσθέτως, τοποθετήθηκε Force Probe Tool στην κοπτική ακμή και στην επιφάνεια επαφής της λεπίδας με τον άξονα.



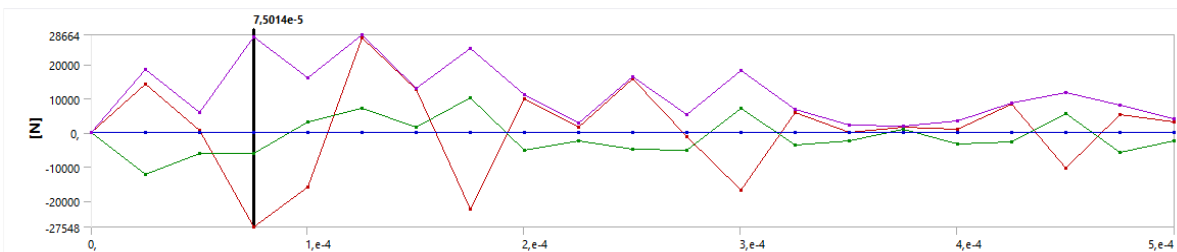
Εικόνα 14 – Probe tool στην κοπτική ακμή

Τα διαγράμματα, στις Εικόνες 14 και 15, των δυνάμεων σε συνάρτηση του χρόνου παρουσιάζονται στις δύο παρακάτω εικόνες. Στην κοπτική ακμή της λεπίδας:



Εικόνα 15 - Διάγραμμα Δυνάμεων στην κοπτική ακμή συναρτήση του χρόνου

Στο σημείο έδρασης:



Εικόνα 16 – Διάγραμμα Δυνάμεων στα σημεία έδρασης συναρτήση του χρόνου

Για τους υπολογισμούς αναφορικά με την ροπή του κινητήρα, λαμβάνονται οι τιμές κατά μέσο όρο και όχι οι ακραίες. Δεν θα ήταν εύλογο να χρησιμοποιήσουμε τις μέγιστες τιμές, καθότι ασκούνται στιγμιαία. Επομένως η μέση δύναμη θλίψης βρίσκεται στα 3239 N και η μέση δύναμη στα ρουλεμάν στα 12466 N.

Ο υπολογισμός της ροπής του κινητήρα δίνεται από τον τύπο (1):

$$T = F \cdot R + J \cdot \omega^2 \quad (1)$$

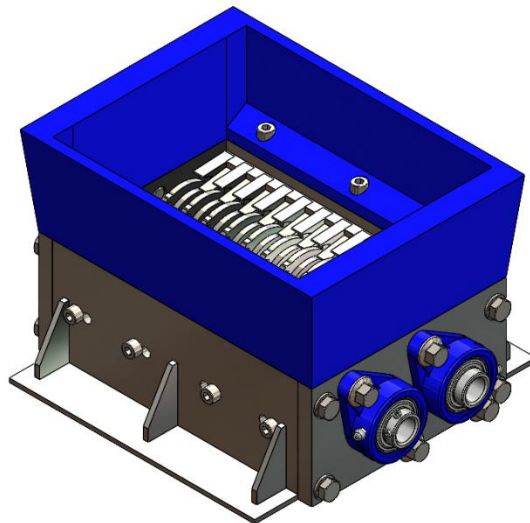
Κατά τον οποίο:

- F η απαιτούμενη δύναμη θλίψης
- R η ακτίνα της λεπίδας
- J ροπή αδρανείας
- ω γωνιακή ταχύτητα

Η ροπή αδρανείας αμελείται, διότι ο κινητήρας τίθεται ήδη σε λειτουργία προτού εισέλθουν τεμάχια για θρυμματισμό. Η απαιτούμενη ροπή διαμορφώνεται στα 129 Nm .

Επομένως δεδομένου ότι οι περισσότεροι ηλεκτρικοί κινητήρες εναλλασόμενου ρεύματος στο εμπόριο της τάξεως των $2,2 \text{ kW}$ έχουν ροπή 15 Nm , θα χρειαζόταν πολύ μεγάλος μειωτήρας για την απαιτούμενη ροπή. Αυτό συμβαίνει καθώς οι 2 λεπίδες ταυτόχρονα θλίνουν το τεμάχιο, διπλασιάζοντας την απαιτούμενη ροπή. Επιπλέον οι δυνάμεις που θα ασκούνταν στα ρουλεμάν και στον άξονα αντίστοιχα θα ήταν αρκετά μεγάλες, γεγονός που με την σειρά του θα καθιστούσε αναγκαία την ύπαρξη υπερδιαστασιοποιημένου άξονα και ρουλεμάν.

Τα αυξημένα κόστη συντήρησης και η πολυπλοκότητα σε συνδυασμό με τα προαναφερόμενα δεδομένα, αποτέλεσε καθοριστικό παράγοντα στην εγκατάλειψη ενός συστήματος δύο αξόνων, εφόσον δεν απαιτούνται κιόλας τέτοιες δυνάμεις θλίψης. Στην **Εικόνα 16** φαίνεται η πρωτότυπη γεωμετρία του συστήματος.



Εικόνα 17 – Συναρμολόγημα Shredder διπλού άξονα

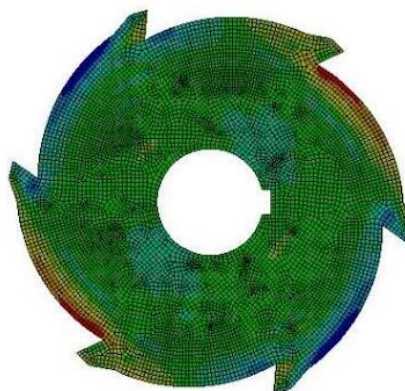
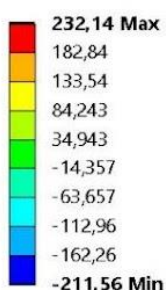
▪ 5.1.3 Μελέτη συστήματος μονού άξονα

Ως αμέσως επόμενο μελετήθηκε το σύστημα μονού άξονα. Η ειδοποιός διαφορά μεταξύ των δύο συστημάτων, εκτός από την ύπαρξη ενός μόνο άξονα, αποτελεί η διαφοροποίηση στον τρόπο θλίψης που αντί μεταξύ των 2 λεπίδων, πραγματοποιείται μεταξύ λεπίδας και του σταθερού τοιχώματος στις

πλευρές της κατασκευής. Ένα τέτοιο σύστημα κρίνεται ικανοποιητικό για την δική μας εφαρμογή και μάλιστα της αρμόζει λόγω του χαμηλότερου κόστους.

Στην προσπάθεια μείωσης και του παραγόμενου αποβλήτου και των δυνάμεων θλίψης μειώθηκε το πάχος των λεπίδων κατά το ήμισυ, δηλαδή στα 5 mm. Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκε για δεύτερη φορά μελέτη μέσω Explicit Dynamics με την νέα πλέον γεωμετρία (μαζί με την λεπίδα μειώθηκε και στο πάχος του αποβλήτου στα 5 mm), με τα αποτελέσματα να είναι πολύ πιο επιθυμητά. Συμπερασματικά, στο μοντέλο δεν υπήρξαν αλλαγές, παρά μόνο η γεωμετρία. Η μέγιστη διατμητική τάση παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα: **Εικόνα 17**

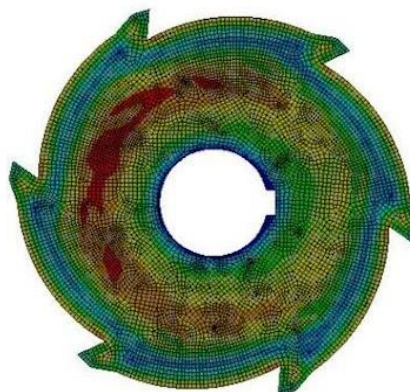
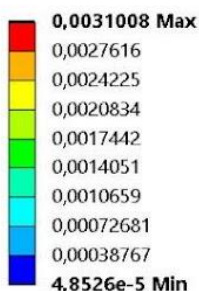
B: Blade Deformation 5mm
Shear Stress
Type: Shear Stress(XY Component)
Unit: MPa
Global Coordinate System
Time: 5,0001e-004
Cycle Number: 27394



Εικόνα 18 – Διατμητική τάση με την νέα γεωμετρία

Η παραμόρφωση ε της λεπίδας παρουσιάζεται στην **Εικόνα 18**:

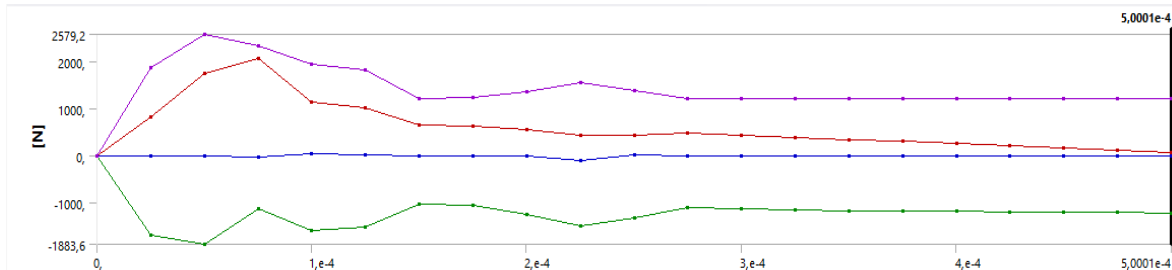
B: Blade Deformation 5mm
Equivalent Elastic Strain 2
Type: Equivalent Elastic Strain
Unit: mm/mm
Time: 5,0001e-004
Cycle Number: 27394



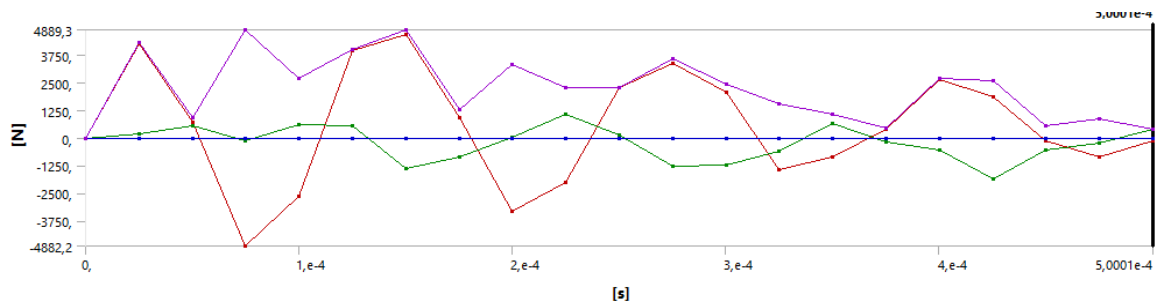
Εικόνα 19 – Παραμόρφωση με την νέα γεωμετρία

Η δύναμη που ασκείται στην κοπτική ακμή σε συνάρτηση με τον χρόνο παρουσιάζεται στο εξής διάγραμμα:

Αντίστοιχα, η δύναμη που ασκείται στην επιφάνεια έδρασης σε συνάρτηση με τον χρόνο φαίνεται στην **Εικόνα 19**:



Εικόνα 20 - Διάγραμμα Τάσεων στα σημεία έδρασης συναρτήση του χρόνου



Εικόνα 21 - Διάγραμμα Τάσεων στην κοπτική ακμή της λεπίδας

Όπως προαναφέρθηκε, για τον υπολογισμό της ροπής λαμβάνονται οι μέσες τιμές, επομένως μεταφέροντας τις τιμές του παραπάνω πίνακα σε υπολογιστικό φύλλο Excel και υπολογίζοντας την μέση τιμή, προκύπτει δύναμη 1859 N και αντίστοιχα στα 6246 N.

Η απαιτούμενη ροπή του κινητήρα διαμορφώθηκε στα 73,4 Nm. Επιλέχθηκε τριφασικός κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος της εταιρείας Busck με τα εξής τεχνικά χαρακτηριστικά, της **Εικόνας 20**:

Motor type T3A100LA-4 2,2KW 230/400V B14 ATEX ZON 2/22
 Brand BUSCK
 Item number Q3041003e

Voltage V	Power kW	Frequency Hz	Current A	Speed rpm
230	2,2	50	7,77	1450
400	2,2	50	4,47	1450
460	2,53	60	4,47	1740

Duty	S1	Efficiency class	IE3
Enclosure	IP65	Efficiency, load 100%	86,7
Insulation class	F	Efficiency, load 75%	87,2
Cooling	IC411 (TEFC)	Efficiency, load 50%	86,2
Max. ambient temp.	40°C	Power fact, load 100%	0,82
Min. ambient temp.	-20°C	Painting	Standard
Max. temp. rise	80 K	Color	RAL 9005
Max altitude, masl	1000	Weight kg	23,9
Torque, Nm	14,49	Sound pressure Lp dB(A)	64
Starting torque ratio	2,8	Bearing DE	6206-2Z/C3
Pull up torque ratio	2,3	Bearing NDE	6206-2Z/C3
Pull out torque ratio	3,3	Balance grade	Normal
Starting current ratio	7,9	Inertia kgm2	0,008754
Winding protection	Thermistors	Cable entries	1xM20, 1xM16

Note ATEX II 3 D Ex tc IIIC T125°C Dc ZONE 22
 ATEX II 3 G Ex nA IIC T4 Gc ZONE 2

Εικόνα 22- τεχνικά χαρακτηριστικά κινητήρα T3A100LA-4

Επομένως, χρειάζεται λόγος μετάδοσης $i=5,065$, στρογγυλοποιημένο ώστε να υπάρχει κάποια παραπάνω ασφάλεια στην τιμή $i=5,07$.

○ 5.2 Επιλογή εδράνων κύλισης

Ύστερα πραγματοποιήθηκε η επιλογή των εδράνων κύλισης των αξόνων. [7]

Το ισοδύναμο δυναμικό φορτίο P είναι ίσο με:

$$P = X \cdot Fr + Y \cdot Fa \quad (2)$$

Κατά το οποίο:

Fr =ακτινικά φορτία

Fa =αξονικά φορτία

X =ακτινικός συντελεστής

Y =αξονικός συντελεστής

Με αξιοπιστία 90%, η ονομαστική διάρκεια ζωής L , σε εκατ. κύκλους δίνεται από την σχέση (3):

$$L = \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad (3)$$

C =εκτιμώμενο δυναμικό φορτίο και $p = 3$ για ένσφαιρα έδρανα.

Για τα ένσφαιρα έδρανα κύλισης της εφαρμογής μας ο συντελεστής X είναι ίσος με 1, συνεπώς με ακτινικό φορτίο Fr ίσο με 3123 N (το μισό του 6246 N διότι και τα δύο έδρανα δέχονται την καταπόνηση αυτή). Επομένως προκύπτει L ίσο με 15,234 εκατ. Περιστροφές έπειτα από αντικαταστάσεις.

Η προαναφερόμενη σχέση μπορεί να εκφραστεί σε ώρες λειτουργίας. Συγκεκριμένα η ονομαστική διάρκεια ζωής σε ώρες λειτουργίας υπολογίζεται ως εξής:

$$Lh = \frac{10^6}{60 \cdot n} \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad (4)$$

Για μεγαλύτερη αξιοπιστία όμως από 90%, τότε η τροποποιημένη διάρκεια ζωής σε ώρες δίνεται από την σχέση (5):

$$Lh' = Lh \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \quad (5)$$

Κατά την οποία:

a_1 = συντελεστής αξιοπιστίας

a_2 = συντελεστής ειδικών χαλύβων

a_3 = συντελεστής εξαρτώμενος από την ταχύτητα περιστροφής και τη θερμοκρασία λειτουργίας

Για αξιοπιστία 99% έχουμε συντελεστή $a_1 = 0,21$ σύμφωνα με τον Πίνακα 2.

Πίνακας 3 – Συντελεστής αξιοπιστίας

Συντελεστής αξιοπιστίας, a_1	
90	1
95	0,62
96	0,53
97	0,44
98	0,33
99	0,21

Αντίστοιχα ο συντελεστής a_2 είναι ίσος με 1 καθώς δεν διαθέτει εξιδεικευμένα υλικά το έδρανο της επιλογής μας. [7]

Ο συντελεστής a_3 υπολογίζεται με τον τύπο:

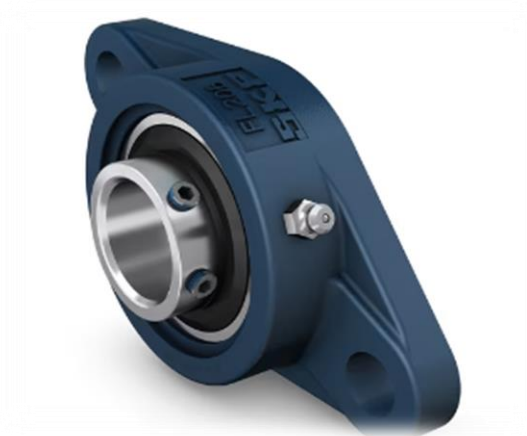
$$a_3 = fn^3 \cdot ft^3 \text{ με } fn = \left(\frac{33_{1/3}}{n}\right)^{1/p} \quad (6)$$

Το ft προκύπτει αναλόγως την θερμοκρασία λειτουργίας, ο πίνακας 9 παρουσιάζει την μεταβολή του συντελεστή με βάση την θερμοκρασία λειτουργίας:

Πίνακας 4 – Συντελεστής θερμοκρασίας ft

Συντελεστής θερμοκρασίας ft	
150	1
200	0,73
250	0,42
300	0,22

Επιλέχθηκαν τα UCFL 204 της SKF με $C_o = 6700$ και $C = 12700$



Εικόνα 23 – SKF UCFL 204

Επομένως, ύστερα από αρκετές αντικαταστάσεις, η διάρκεια ζωής διαμορφώθηκε στις 125,55 ώρες για 255 rpm.

○ 5.3 Μελέτη και σχεδιασμός Ιμαντοκίνησης

Ως σύστημα μείωσης της σχέσης μεταδόσεως, επιλέχθηκε η ιμαντοκίνηση λόγω του χαμηλού κόστους και της ολίσθησης που συμβαίνει όταν υπερβαίνει την ροπή σχεδίασης. Η ιμαντοκίνηση, αποτελεί ένα failsafe σύστημα αποτροπής καταστροφικής ζημιάς σε περίπτωση που υπάρξει φραγμός στο σύστημα θλίψης. Σε αυτό το σενάριο ο ιμάντας απλώς θα γλιστρήσει χωρίς να πάθει ζημιά ο ηλεκτρικός κινητήρας προσπαθώντας να υπερνικήσει το ανυπέβλητο φορτίο. Στην χειρότερη περίπτωση θα χρειαστεί καινούργιος ιμάντας, το κόστος του οποίου είναι πολύ μικρό.

Για τον υπολογισμό της ιμαντοκίνησης του μηχανισμού θλίψης ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα [7], [8]:

- 1) Στροφές τροχαλίας D_1 : Η τροχαλία D_1 είναι στερεωμένη στον άξονα του κινητήρα και συνεπώς περιστρέφεται με στροφές: $n_1 = n_k = 1450 \text{ RPM}$
- 2) Σχέση μετάδοσης i : Η σχέση μετάδοσης της ιμαντοκίνησης λαμβάνεται από τον λόγο των στροφών της κινητήριας (μικρής) τροχαλίας προς την κινούμενη (μεγάλη) τροχαλία και έχει υπολογιστεί ως $i_b = 5,07$.
- 3) Συντελεστής φόρτισης C: από τον Πίνακα 10 για μηχανές με μέτριο φορτίο με ταχύτητα κινητήρα άνω των 600 RPM εργαζόμενες κάτω από 10 ώρες ημερησίως έχουμε συντελεστή φόρτισης: $C = 1$.

Πίνακας 6 – Συντελεστής φόρτισης για ιμαντοκινήσεις κατά DIN 2218

Εργομηχανές	Κινητήριες μηχανές					
	Ομάδα Α			Ομάδα Β		
	Συντελεστής φόρτισης C για ημερήσια λειτουργία σε ώρες					
	έως 10	10... 16	άνω των 16	έως 10	10... 16	άνω των 16
Ελαφρές κινήσεις Κεντροφόρες αντλίες και συμπιεστές, μεταφορικές ταινίες για ελαφρά υλικά, ανεμιστήρες και αντλίες έως 7,5 kW	1	1,1	1,2	1,1	1,2	1,3
Μέσου μεγέθους κινήσεις Ψαλίδια κοπής ελασμάτων, πρέσσες, μεταφορείς με αλυσίδες και ιμάντες για βαριά υλικά, δονητικά κόσκινα, γεννήτριες και διεγέρτριες μηχανές, ζυμωτήρια, εργαλειομηχανές (τόρνοι και λειαντικές μηχανές), πλυντήρια, μηχανές εκτύπωσης, ανεμιστήρες και αντλίες άνω των 7,5 kW	1,1	1,2	1,3	1,2	1,3	1,4
Ισχυρές κινήσεις Μηχανές άλεσης, εμβολοφόροι συμπιεστές, μεταφορείς μεγάλων φορτίων (κοχλιομεταφορείς, δισκοειδείς ταινίες, μεταφορείς με κουβαδάκια), ανεκυστήρες, πρέσσες πλινθανράκων, υφαντουργικές μηχανές, μηχανές χαρτοποιίας, εμβολοφόρες αντλίες, αντλίες εκσκαφών, πριονιστήρια, σφυρόμυλοι	1,2	1,3	1,4	1,4	1,5	1,6
Πολύ ισχυρές κινήσεις Συστήματα άλεσης υψηλής φόρτισης, θραυστήρες πέτρας, στιλβωτικές μηχανές, αναμεικτῆρες, βαρούλκα, γερανοί, εκσκαφείς	1,3	1,4	1,5	1,5	1,6	1,8
Ομάδα Α: Κινητήρες εναλλασσόμενου και τριφασικού ρεύματος με κανονική ροπή εκκίνησης (έως 2 της ονομαστικής ροπής) π.χ. σύγχρονοι και μονοφασικοί κινητήρες με βοηθητική τάση εκκίνησης, τριφασικοί κινητήρες με εκκίνηση απ' ευθείας, συνδεσμολογία αστέρα-τριγώνου ή ρεοστάτη δακτυλίου, κινητήρες διακλάδωσης συνεχούς ρεύματος, μηχανές εσωτερικής καύσης και στρόβιλοι με n άνω των 600 RPM						
Ομάδα Β: Κινητήρες εναλλασσόμενου και τριφασικού ρεύματος με υψηλή ροπή εκκίνησης (άνω του 2 της ονομαστικής ροπής) π.χ. μονοφασικοί κινητήρες με υψηλή ροπή εκκίνησης, κινητήρες σειράς συνεχούς ρεύματος με συνδεσμολογία εν σειρά, μηχανές εσωτερικής καύσης και στρόβιλοι με n έως των 600 RPM						

Η ισχύς σχεδιασμού, η οποία είναι ίση με την μεταφερόμενη ισχύ, δηλαδή την ισχύ της τροχαλίας D_1 αυξημένη κατά τον συντελεστή φόρτισης, προκύπτει σύμφωνα με την σχέση:

$$N_{dp} = C \cdot N_{τροχ} \quad (7)$$

, όπου:

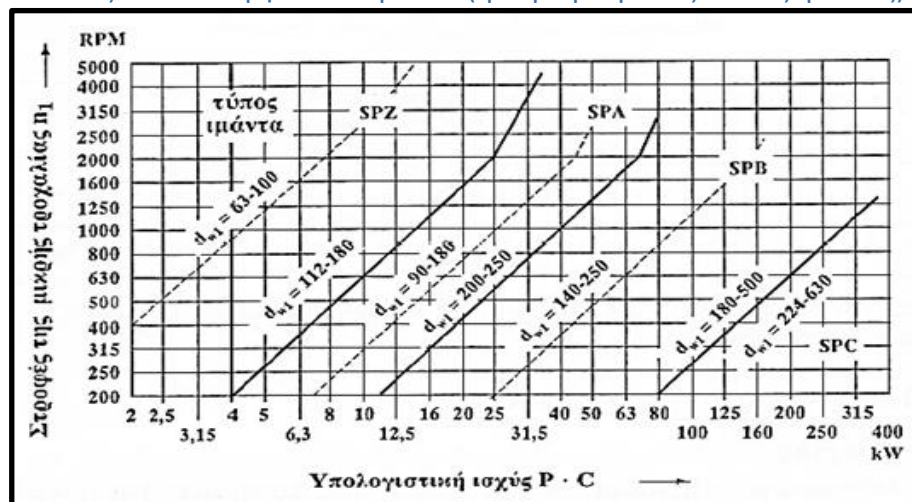
N_{dp} η ισχύς σχεδιασμού, σε kW

C ο συντελεστής λειτουργίας

$N_{τροχ}$ η ισχύς μικρής τροχαλίας D_1 , σε HP , ίση με την ισχύ του κινητήρα.

Από το νομογράφημα του **Πίνακα 5**, υπολογιστικής ισχύος – ταχύτητας, επιλέγεται τυποποιημένη διατομή μικροτραπεζοειδών ιμάντων, για ισχύ σχεδιασμού $N_{dp} = 2,2 kW$ και ταχύτητα της μικρής τροχαλίας $n_1 = 1450RPM$, δηλαδή ιμάντα SPZ του οποίου στην συνέχεια θα υπολογιστεί η πολλαπλότητα του για την μεταφορά της δεδομένης ισχύος. Στο διάγραμμα του **Πίνακα 5** φαίνεται επιπλέον η ελάχιστη διάμετρος που μπορεί να ληφθεί για την μικρή τροχαλία.

Πίνακας 9 – Επιλογή τύπου ιμάντα (για μικροτραπεζοειδείς ιμάντες)



Τα κριτήρια επιλογής της διαμέτρου της μικρής τροχαλίας ορίζονται τα εξής:

- Η διάμετρος να είναι τυποποιημένη, μεγαλύτερη ή ίση με την μικρότερη διάμετρο του **Πίνακα 5**
- Η προκύπτουσα γραμμική ταχύτητα να είναι μεταξύ $5 < v < 30 m/s$

Σύμφωνα με τον **Πίνακα 5** επιλέγεται διάμετρος τροχαλίας ίση με 71 mm , όμως προκύπτει γραμμική ταχύτητα μικρότερη των 5 m/s και υπολογίζεται η γραμμική ταχύτητα από τη σχέση (8):

$$u_1 = (\pi \cdot D_1 \cdot n_1) / 60 = 5,39 \text{ m/s} \quad (8)$$

Η διάμετρος της κινούμενης (μεγάλης) τροχαλίας υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση (9):

$$D_2 = i_b \cdot D_1 \cdot (1 - \psi) \quad (9)$$

Η οποία προκύπτει με αντικατάσταση στην σχέση (9) ότι:

$$D_2 = 354,57 \text{ mm}$$

D_2 η διάμετρος μεγάλης τροχαλίας, σε mm

i_b ο βαθμός μετάδοσης της ιμαντοκίνησης

D_1 η διάμετρος της μικρής τροχαλίας, σε mm

ψ ο συντελεστής διολίσθησης του ιμάντα, $\psi = 1,5\%$

Πίνακας 10 – Διάμετροι τροχαλιών για τραπεζοειδής μάντες (DIN 2211)

Διάμετροι Τροχαλιών για Τραπεζοειδείς (DIN 2211) μάντες								
40	50	63	71	80	90	100	112	125
140	160	180	200	224	250	280	315	355
400	450	500	560	630	710	800	900	1000

Από τον **Πίνακα 6** επιλέγεται τυποποιημένη διάμετρος: $D_2 = 355 \text{ mm}$

Για ανοιχτή διάταξη, η προσωρινή απόσταση των αξόνων των τροχαλιών λαμβάνεται από τον τύπο (10):

$$a = 0,8 \cdot (D_1 + D_2) \quad (10)$$

Με αντικατάσταση προκύπτει:

$$a = 340,8 \text{ mm}$$

Επιπλέον, για ανοιχτή διάταξη, το μήκος του μάντα που αντιστοιχεί στην απόσταση των αξόνων α που υπολογίστηκε παραπάνω δίνεται από την σχέση (11):

$$L_w = 2 \cdot \alpha + \pi \cdot (D1 + D2)/2 + (D2 - D1)^2/(4\alpha) \quad (11)$$

αντικαθιστώντας όλα τα γνωστά μεγέθη, υπολογίζεται $L_w = 1409,92 \text{ mm}$

Πίνακας 13 – Συντελεστής μήκους C_4 για μικροτραπεζοειδής μάντες & Πίνακας 16 – ΔL για διαφορετικούς τύπους μάντων

Τύπος	SPZ	SPA	SPB
L_w	630	800	1250
C_4	0,82	0,81	0,82
L_w	710	900	1400
C_4	0,84	0,83	0,84
L_w	800	1000	1600
C_4	0,86	0,85	0,86
L_w	900	1120	1800
C_4	0,88	0,87	0,88
L_w	1000	1250	2000
C_4	0,90	0,89	0,90
L_w	1120	1400	2240
C_4	0,93	0,91	0,92
L_w	1250	1600	2500
C_4	0,94	0,93	0,94
L_w	1400	1800	2800
C_4	0,96	0,95	0,96
L_w	1600	2000	3150
C_4	1,00	0,96	0,98
L_w	1800	2240	3550
C_4	1,01	0,98	1,00
L_w	2000	2500	4000
C_4	1,02	1,00	1,02

L_w μήκος ενέργειας σε mm

Εύρεση της τυποποιημένης εξωτερικής περιμέτρου L_a από την περίμετρο ενέργειας L_w για μικροτραπεζοειδείς μάντες. [5]

Τύπος μάντα	SPZ	SPA	SPB
ΔL	12	17	22

$L_w + \Delta L = L_a$
Όπου L_w : περίμετρος ενέργειας, L_a : εξωτερική περίμετρος

Για μάντα SPZ σύμφωνα με τον Πίνακα 8 ισχύει $\Delta L = 12 \text{ mm}$. Το εξωτερικό μήκος του μάντα L_a λαμβάνεται αν προσθέσουμε στην τυποποιημένη περίμετρο ενέργειας (μέσο μήκος μάντα) L_w την τιμή του ΔL , ήτοι:

Από την σχέση που αναγράφεται στους παραπάνω πίνακες προκύπτει:

$$L_a = L_w + \Delta L = 1421,92 \text{ mm} \quad (12)$$

Με δεδομένο το μήκος του μάντα L_w , πλέον επιλύεται η σχέση του μήκους ως προς την απόσταση α και προκύπτει η σχέση (13):

$$\alpha = \rho + \sqrt{\rho^2 - q} \quad (13)$$

Όπου το ρ βρίσκεται από:

$$\rho = Lw/4 - \pi/8 \cdot (D1 + D2) = 185,19 \text{ mm} \quad (14)$$

και

$$q = 1/8 \cdot (D2 - D1)^2 = 10082 \text{ mm}^2 \quad (15)$$

Επομένως αντικαθιστώντας έχουμε:

$$a = 340,8 \text{ mm}$$

Η ρύθμιση της απόστασης του κέντρου του άξονα της τροχαλίας δίνεται από τις σχέσεις (16),(17)

$$x \geq 0,02 \cdot Lw = 28,19 \text{ mm} \quad (16)$$

$$y \geq 0,015 \cdot Lw = 21,148 \text{ mm} \quad (17)$$

Το τόξο τύλιξης του μάντα στην μικρή τροχαλία δίνεται από την σχέση (18):

$$\varphi_1 = 180 - 2 \cdot \sin^{-1}((D1 - D2)/(2a)) = 177,7 \text{ μοίρες} \quad (18)$$

Ο συντελεστής περιέλιξης C_2 , λαμβάνει υπόψη τις δυσμενείς συνθήκες όταν η γωνία περιέλιξης της μικρής τροχαλίας είναι $\alpha < 180^\circ$. Υπολογίζεται από τον **Πίνακα 8** για την τιμή του τόξου τύλιξης που υπολογίστηκε παραπάνω. Επειδή δεν υπάρχει η γωνία των 177° στον πίνακα θα εφαρμόσουμε γραμμική παρεμβολή ως εξής:

Πίνακας 19 – Συντελεστής C_2 που λαμβάνει υπόψη τη γωνία περιέλιξης της μικρής τροχαλίας

Γωνία περιέλιξης φ_1	70°	80°	90°	100°	110°	120°	130°	140°	150°	160°	170°	180°
Συντελεστής C_2	0,58	0,63	0,68	0,73	0,78	0,82	0,86	0,89	0,92	0,95	0,98	1,0

Από τον **Πίνακα 9** έχουμε:

Για γωνία τύλιξης $\varphi_1 = 180^\circ$ ο συντελεστής τύλιξης είναι $C_2 = 0,89$

Για γωνία τύλιξης $\varphi_1 = 170^\circ$ ο συντελεστής τύλιξης είναι $C_2 = 0,92$

Για γωνία τύλιξης $\varphi_1 = 177,71^\circ$ ο συντελεστής τύλιξης είναι C_2

Θέτουμε:

$$x = 177,71^\circ \rightarrow y = C_2$$

$$x_0 = 170^\circ \rightarrow y_0 = 0,98$$

$$x_1 = 180^\circ \rightarrow y_1 = 1$$

Με γραμμική παρεμβολή προκύπτει η τιμή του συντελεστή περιέλιξης C_2 για γωνία περιέλιξης της μικρής τροχαλίας ίση με $\varphi_1 = 173^\circ$, ως εξής:

$$\frac{y - y_0}{x - x_0} = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \Rightarrow$$

$$y = y_0 + (x - x_0) \left(\frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \right) \Rightarrow$$

$$\frac{C_2 - 0,98}{177,71 - 170} = \frac{1 - 0,98}{180 - 170} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow C_2 = 0,9954$$

Ο συντελεστής μήκους λαμβάνει υπόψη του ότι με την αύξηση του μήκους του ιμάντα αυξάνεται και η ικανότητα για μεταφορά ισχύος και η διάρκεια ζωής, διότι ελαττώνεται ο αριθμός κάμψεων. Από τον **Πίνακα 9** για μικροτραπεζοειδείς ιμάντες και τύπο ιμάντα SPZ με $L_w = 2117,39 \text{ mm}$ λαμβάνεται:

$$C_4 = 0,96$$

Η ειδική ισχύς ανά επιλεγέντα ιμάντα υπολογίζεται από τον **Πίνακα 5.6**. Εξαρτάται από τον τύπο του ιμάντα και την περιφερειακή ταχύτητα. Στον πίνακα αυτό δίνεται η ειδική ισχύς σε $kW/\text{ιμάντα}$ σαν συνάρτηση της διαμέτρου της μικρής τροχαλίας σε mm , της ταχύτητας περιστροφής σε RPM και της σχέσης μετάδοσης της ιμαντοκίνησης.

Η ειδική ισχύς για $n = 2000 \text{ rpm}$ και $D1 = 71 \text{ mm}$.

Ύστερα ο απαιτούμενος αριθμός ιμάντων j υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$j \geq \frac{P \cdot C}{P_0 \cdot C_2 \cdot C_4} \quad (19)$$

όπου:

- P η προς μεταφορά ισχύς, σε kW
- C συντελεστής φόρτισης
- P_o ειδική ισχύς, σε $kW/μάντα$
- C_2 συντελεστής περιέλιξης
- C_4 συντελεστής μήκους

Αντικαθιστώντας προκύπτει 1,28 , επομένως παίρνουμε τον επόμενο ακέραιο , το 2.

Η συχνότητα κάμψεων δίνεται από την σχέση (20):

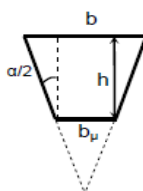
$$B = z \cdot u_1 / L_w \quad (20)$$

- B συχνότητα κάμψεων, σε s^{-1}
- z αριθμός τροχαλιών
- u_1 γραμμική ταχύτητα μικρής τροχαλίας D_1 , σε m/s
- L_w μέσο μήκος ιμάντα, σε m

Με αντικατάσταση προκύπτει: $B = 7,64 s^{-1} < B_{max} = 40 s^{-1}$

Πίνακας 20 – Μικροτραπεζοειδής ιμάντες DIN 7763 & τροχαλίες DIN 2211

Τύπος ιμάντα κατά DIN 7753	SPZ	SPA	SPB	
b	9,7	12,7	16,3	
h	8	10	13	
c	2	2,8	3,5	
f	8	10	12,5	
e	12	15	19	
t_{min}	11	14	18	
$d_{w(min)}$	63	90	140	
Γωνία αύλακος α° για $d_{w(min)}$	34°	63...80	90...118	140...190
	38°	>80	>118	>190



Για SPZ ιμάντα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ιμάντα είναι αυτά που φαίνονται στον **Πίνακα 10**:

- Μεγάλη πλευρά τραπεζίου: $b = 9,7 \text{ mm}$
- Ύψος τραπεζίου $h = 8 \text{ mm}$
- Γωνία τραπεζίου $\alpha = 34 \text{ μοίρες}$
- Μικρή πλευρά τραπεζίου $b\mu = 4,808 \text{ mm}$

Από τριγωνομετρία αντικαθιστώντας τα παραπάνω δεδομένα ισχύει ότι:

$$\tan(\alpha/2) = (b - b\mu)/(2 \cdot h) \Rightarrow b\mu = 4,81 \text{ mm} \quad (21)$$

Το εμβαδόν της διατομής υπολογίζεται λαμβάνοντας τον τύπο του εμβαδού τραπεζίου:

$$A = (b + b\mu) \cdot h / 2 \quad (22)$$

Αντικαθιστώντας στην σχέση (22) προκύπτει:

$$A = 58,04 \text{ mm}^2$$

Πυκνότητα υλικού: $\rho = 0,9 \text{ Kg/dm}^3$

Ειδικό βάρος υλικού: $\gamma = 0,9 \text{ Kp/dm}^3$

Συντελεστής τριβής: $\mu = 0,4$

Μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη: $E_b = 5 \text{ Kp/mm}^2$

Μετάπειτα ακολούθησε ο υπολογισμός των δυνάμεων που ασκούνται στον εκάστοτε ιμάντα

Περιφερειακή δύναμη F_u

Για να υπολογίσουμε την περιφερειακή δύναμη F_u που αναπτύσσεται στον ιμάντα αρχικά υπολογίζουμε την ροπή στρέψης της τροχαλίας D_1 από τον τύπο (23) :

$$MtD_1 = 71620 (N\text{τροχ} / n_1) \quad (23)$$

Αντικαθιστώντας στην σχέση (23) προκύπτει:

$$MtD_1 = 145,722 \text{ kp cm}$$

Η περιφερειακή δύναμη F_u των ιμάντων υπολογίζεται από την ροπή στρέψης της μικρής τροχαλίας D_1 σύμφωνα με την σχέση (24) :

$$MtD_1 = F_u \cdot \left(\frac{D_1}{2}\right) = \frac{2MtD_1}{D_1} \Rightarrow F_u = 41,04 \text{ kp} \quad (24)$$

Για κάθε ιμάντα άρα:

$$F_u = \frac{27,134}{2} \text{ kp} = 20,52 \text{ kp}$$

Φυγόκεντρική δύναμη

Η φυγόκεντρη δύναμη S_f που αναπτύσσεται στον ιμάντα ορίζεται από την σχέση (25):

$$S_f = w \cdot v^2 \quad (25)$$

,όπου:

S_f φυγόκεντρη δύναμη, σε N

w γραμμική πυκνότητα, σε kg/m

v περιφερειακή ταχύτητα, σε m/s

Για την γραμμική πυκνότητα:

$$W = \rho \cdot A \quad (26)$$

Με: $\rho = 0,9 \text{ kg/dm}^3$

$$A = 58,08 \text{ mm}^2 = 58,08 \cdot 10^{-2} = 4 \text{ dm}^2$$

Αντικαθιστούμε και προκύπτει:

$$W = 0,0522 \text{ και } S_f = 0,154 \text{ kp}$$

Δυνάμεις κλάδων ιμάντων S_1, S_2

Η περιφερειακή δύναμη F_u είναι ίση με τη διαφορά των δυνάμεων των κλάδων του ιμάντα, ήτοι

$$F_u = S_1 - S_2 \Rightarrow S_2 = S_1 - F_u \quad (27)$$

Για τις δυνάμεις του έλκοντα και του ελκόμενου κλάδου τραπεζοειδή ιμάντα ισχύει και η σχέση:

$$S_1 - S_f = (S_2 - S_f) \cdot e^{\frac{\mu\phi_1}{\sin(\frac{\alpha}{2})}} \quad (28)$$

Μετέπειτα αντικαθιστούμε την σχέση (27) στην σχέση (28) και ύστερα από πράξεις καταλήγουμε στην εξής σχέση:

$$\begin{aligned} S_1 - S_f &= (S_1 - F_u - S_f) \cdot e^{\frac{\mu\phi_1}{\sin(\frac{\alpha}{2})}} \\ S_1 &= \frac{F_u \cdot e^{\frac{\mu\phi_1}{\sin(\frac{\alpha}{2})}} + S_f \cdot (e^{\frac{\mu\phi_1}{\sin(\frac{\alpha}{2})}} - 1)}{e^{\frac{\mu\phi_1}{\sin(\frac{\alpha}{2})}} - 1} \Rightarrow \\ S_1 &= 20,67 \text{ Kp} \end{aligned}$$

Επομένως έχοντας το S_1 μπορούμε να αντικαταστήσουμε στην σχέση (27) και:

$$S_2 = S_1 - F_u \Rightarrow S_2 = 0,154 \text{ Kp}$$

Πρόταση ιμάντα

Η πρόταση του ιμάντα ορίζεται με την σχέση (29):

$$S_o = (S_1 + S_2) / 2 \quad (29)$$

Αντικαθιστώντας:

$$S_o = 10,41 \text{ Kp}$$

Δύναμη που καταπονεί τον άξονα κάθε τροχαλίας

Η δύναμη που καταπονεί κάθε άξονα της εκάστοτε τροχαλίας δίνεται από τον τύπο:

$$Rb = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + 2 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot \cos\varphi} \quad (30)$$

$$\varphi = 2 \cdot \omega = 180 - \varphi_1 = 180 - 177,7 = 2,3^\circ \quad (31)$$

Με αντικατάσταση στην σχέση (30) λαμβάνουμε:

$$Rb = 20,73 \text{ kp}$$

Εφελκυστική τάση λόγω της S1

$$\sigma_1 = \frac{S_1}{A} = 0,356 \frac{\text{kp}}{\text{mm}^2} \quad (32)$$

Εφελκυστική τάση λόγω της Sf

$$\sigma_f = \frac{S_f}{A} = 0,00266 \frac{\text{kp}}{\text{mm}^2} \quad (33)$$

Εφελκυστική τάση λόγω της κάμψης

$$\sigma_b = E_b \left(\frac{h}{D_1} + h \right) = 0,5063 \frac{\text{kp}}{\text{mm}^2} \quad (34)$$

Έλεγχος Αντοχής

Η συνολική μέγιστη ισχύς ορίζεται από την σχέση (35)

$$\sigma_{max} = \sigma_1 + \sigma_f + \sigma_b \Rightarrow \quad (35)$$

$$\sigma_{max} = \sigma_1 + \sigma_f + \sigma_b = 0,865 \text{ kp} < \sigma_{\varepsilon\pi} = 0,9 \text{ kp/mm}^2.$$

Άρα οι ιμάντες κρίνονται κατάλληλοι.

Διάρκεια ζωής σε ώρες

Η διάρκεια ζωής ορίζεται από την εξής σχέση (36):

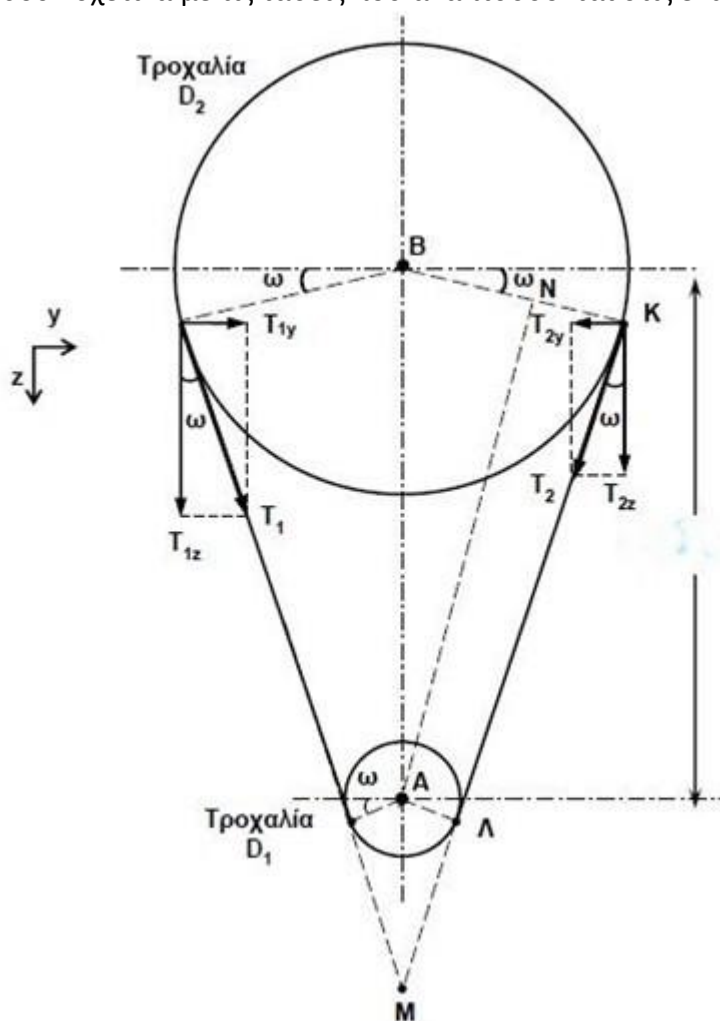
$$H = Nb/3600 \cdot B(\sigma_{\varepsilon\pi} / \sigma_{\max})^m \quad (36)$$

- $N = 10^7$ κύκλοι
- $M = 8$ για τραπεζοειδή ιμάντα

Αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση (36) προκύπτει:

$$H = 497,45 \text{ ώρες}$$

Παρακάτω ακολουθεί η **Εικόνα 22**, στην οποία απεικονίζεται η σχηματική αναπαράσταση του συστήματος μαντοκίνησης με τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις με σκοπό την ευνοϊκότερη κατανόηση των πράξεων που ακολουθούν σχετικά με τις τάσεις που αναπτύσσονται στις εκάστοτε τροχαλίες.



Εικόνα 24 - Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος μαντοκίνησης

Γωνία κλίσης κλάδων ιμάντα

$$\omega = \eta\mu^{-1}(D_2 - D_1/2a) \Rightarrow \omega = 14,98^\circ \quad (37)$$

Τάσεις ιμαντών και δυνάμεις στον κοχλία K1

Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στα δύο εφαπτομενικά τμήματα του ιμάντα υπολογίζονται από τις εξής σχέσεις (38) & (39):

$$T_1 = j \cdot S_1 = 2 \cdot 20,67 = 41,35 \text{ kp} \quad (38)$$

$$T_2 = j \cdot S_2 = 2 \cdot 0,154 = 0,309 \text{ kp} \quad (39)$$

Αναλύοντας τις τάσεις T_1 και T_2 σε συνιστώσες y και z :

$$T_{1y} = T_1 \cdot \eta\mu\omega = 37,92 \text{ kp} \quad (40)$$

$$T_{1z} = T_1 \cdot \sigma\upsilon\nu\omega = 16,49 \text{ kp} \quad (41)$$

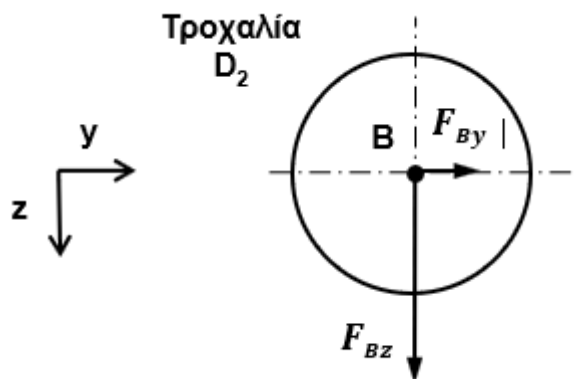
$$T_{2y} = T_2 \cdot \eta\mu\omega = 0,28 \text{ kp} \quad (42)$$

$$T_{2z} = T_2 \cdot \sigma\upsilon\nu\omega = 0,123 \text{ kp} \quad (43)$$

Υπολογίζουμε την συνολική δύναμη F_B που ασκείται στον άξονα από τον ιμάντα στην θέση B , λόγω της έλξης των κλάδων του ιμάντα. Η δύναμη αυτή υπολογίζεται με βάση τις συνιστώσες F_{By} και F_{Bz} κατά τους άξονες y και z του κοχλία (όπως φαίνονται στην **Εικόνα 23** αντίστοιχα).

$$F_{By} = T_{1y} - T_{2y} = 37,64 \text{ kp} = 37,64 \cdot 9,81 \text{ N} = 369,27 \text{ N} \quad (44)$$

$$F_{Bz} = T_{1z} + T_{2z} = 21,47 \text{ kp} = 16,37 \cdot 9,81 \text{ N} = 160,6 \text{ N} \quad (45)$$



Εικόνα 25- Κατακόρυφη και Οριζόντια δύναμη που ασκείται στην τροχαλία

Η συνισταμένη δύναμη που ασκείται στον άξονα ισούται με 402,68 N.

Η προένταση του ιμάντα μπορεί να εξασφαλιστεί με ρεγυλατόρους στην βάση του ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος οι οποίοι μάλιστα να διαθέτουν και λαστιχένιους αποσβεστήρες των κραδασμών, παρόλα αυτά δεν έχουν σχεδιαστεί λόγω του ότι ο κατασκευαστής δεν δίνει σαφή εικόνα στο σχεδιαστικό αρχείο που μας παρέχει σχετικά με τις βάσεις στήριξης του κινητήρα.

○ 5.4 Μελέτη και σχεδιασμός άξονα

Για τον υπολογισμό της αντοχής του άξονα χρησιμοποιείται η εξίσωση Soderberg (46) για εναλλασόμενο φορτίο. [7]

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\left(\sigma_m + \sigma_r \cdot \frac{S_y}{S_e}\right)^2 + a \cdot \left(\tau_m + \tau_r \cdot \frac{S_{sy}}{S_{se}}\right)^2} \leq \frac{S_y}{N} \quad (46)$$

Όπου $\alpha=4$ σύμφωνα με την Θεωρία της Μέγιστης Διατμητικής Τάσης (ΜΔΤ), και $\alpha=3$ σύμφωνα με την Θεωρία του Έργου Παραμόρφωσης (ΘΕΠ).

σ_{eq} = ισοδύναμη ορθή τάση

σ_m = μέση ορθή τάση

σ_r = εύρος εναλλαγής της ορθής τάσης

T_m = μέση διατμητική τάση

T_r = εύρος εναλλαγής της διατμητικής τάσης

S_y = Όριο διαρροής του υλικού του άξονα σε εφελκυσμό

S_e = Όριο τροποποιημένης διαρκούς αντοχής του υλικού του άξονα σε εφελκυσμό ίσο με:

$$S_e = C_F \cdot C_R \cdot C_S \cdot C_W \cdot \frac{1}{k_f} \cdot S'_n \quad (47)$$

S_y = Όριο διαρροής του υλικού του άξονα σε διάτμηση

S_e = Όριο τροποποιημένης διαρκούς αντοχής του υλικού του άξονα σε διάτμηση

$$S_{se} = C_F \cdot C_R \cdot C_S \cdot C_W \cdot \frac{1}{k_{sf}} \cdot S'_{sn} \quad (48)$$

N = συντελεστής ασφάλειας του άξονα

Η σχέση του Soderberg μπορεί να γραφεί, αν αντικαταστήσουμε τις τάσεις με τις εξισώσεις ως προς τις ροπές ως εξής:

$$d = \sqrt[3]{\frac{32N}{\pi S_y} \sqrt{\left(M_m + Mr \frac{S_y}{S_e}\right)^2 + \frac{\alpha}{4} \left(T_m + T_r \frac{S_{sy}}{S_{se}}\right)^2}} \quad (49)$$

Που μας δίνει την απαιτούμενη διάμετρο που πρέπει να έχει ο άξονας.

Οι δυσμενέστερες καταστάσεις στον άξονα βρίσκονται στο σημείο έδρασης των τροχαλιών του μάντα, όπου $T_m = 127 \text{ Nm}$ και $Mr = 24 \text{ Nm}$.

Προκύπτει $C_F = 0,8$ από διάγραμμα στον Σχήμα 5-3 σελ. 129 [7]

Έπειτα έχουμε $C_R = 0,814$ σύμφωνα με το διάγραμμα στο **Πίνακα 11**

Πίνακας 22 – Συντελεστής CR

Αξιοπιστία υλικού	DMF	CR
0,5	0	1
0,9	1,288	0,897
0,95	1,645	0,868
0,98	2,05	0,836
0,99	2,326	0,814
0,999	3,091	0,753
0,999 9	3,719	0,702
0,999 99	4,265	0,659
0,999 999	4,753	0,62
0,999 999 9	5,199	0,584
0,999 999 99	5,612	0,551
0,999 999 999	5,997	0,52

Και τέλος σύμφωνα με το Σχήμα 5-4α στην σελίδα 130 [7].

$$C_S = 0,59$$

Τέλος $C_W=1$ λόγω του ότι δεν έχουμε συγκολλήσεις.

Ο δυναμικός συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων k_f προκύπτει από την σχέση (49):

$$k_f = 1 + q(k_t - 1) \quad (49)$$

Ο οποίος δεδομένου ότι έχουμε σφηναύλακα διαστάσεων $5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ προκύπτει ίσος με 2.

Η παραπάνω μεθοδολογία καταχωρήθηκε σε υπολογιστικό φύλλο στο Excel με αποτέλεσμα ο άξονας να έχει ως απαιτούμενη ελάχιστη διάμετρο $19,87 \text{ mm}$ για χάλυβα τύπου 1541 .(Για συντελεστή ασφαλείας 1,4)

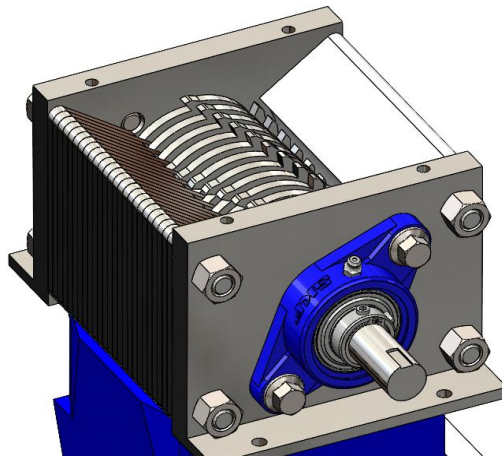


Εικόνα 25 – Άξονας της κατασκευής σε CAD γεωμετρία

Στο σημείο έδρασης των λεπίδων ο άξονας έχει διάμετρο 21 mm , ενώ στην υπόλοιπη 20 mm , όπως παρουσιάζεται στην παραπάνω **Εικόνα 24**. Πέρα από την σφηναύλακα κλειδώματος των λεπίδων, υπάρχουν δύο θέσεις για ασφάλειες που κλειδώνουν τον άξονα.

○ 5.5 Συναρμολόγηση Shredder

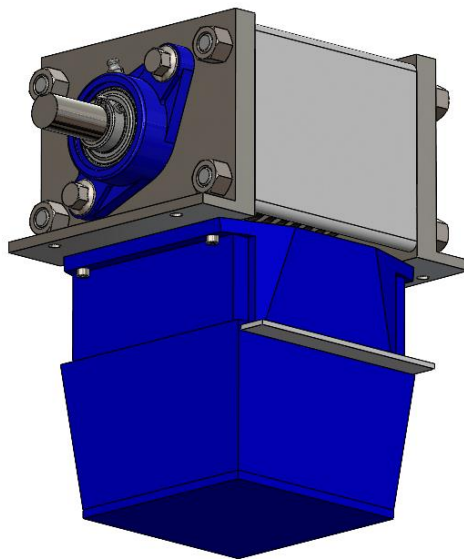
Ο τεμαχιστής αποτελείται από λεπίδες οι οποίες είναι τοποθετημένες με διαφορά φάσης 4,6 μοιρών μεταξύ τους ώστε να αποφευχθεί η ταυτόχρονη κοπή πολλών λεπίδων. Οι λεπίδες εναλλάσσονται με συγκεκριμένους αποστάτες μεταξύ τους. Η συγκράτηση των λεπίδων επάνω στον άξονα πραγματοποιείται με σφήνα. Στην μία πλευρά του άξονα υπάρχουν οι σταθερές λεπίδες πάνω στις οποίες συμβαίνει ο θρυμματισμός των αντικειμένων. Από την άλλη υπάρχει διαχωριστής που αποτρέπει την αφιτράριστη ροή των τριμάτων. Η ένωση της κατασκευής πραγματοποιείται με 4 κοχλίες με παξιμάδια στην άλλη τους άκρη, όπως φαίνεται στην παρακάτω **Εικόνα 25**:



Εικόνα 26 - Shredder

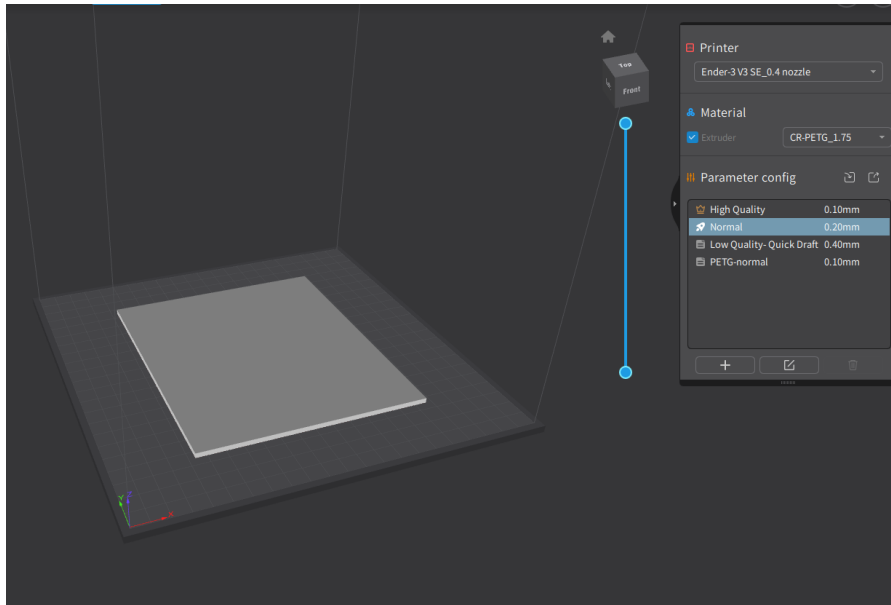
Ο άξονας εδράζεται πάνω σε δύο έδρανα κύλισης της SKF με κωδική ονομασία SKF UCFL 204, τοποθετημένα πλαγίως για εξοικονόμηση χώρου. Επιπλέον ο άξονας διατηρεί την συγκράτηση του με τη χρήση δύο ασφαλειών σε κάθε άκρη του.

Στο κάτω τμήμα του τεμαχιστή προσαρμόζεται μια χοάνη, η οποία κατευθύνει τα απόβλητα σε κάδο. Στη μέση της χοάνης παρεμβάλλεται διαχωριστής μεγέθους που συγκρατεί τα απόβλητα διαμέτρου άνω των 5mm.



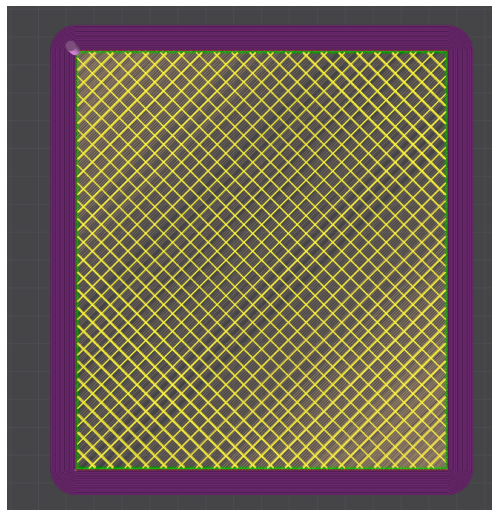
Εικόνα 27 - Φίλτρο και κάδος κατασκευής

Για την κατασκευή του φίλτρου κατασκευάζουμε στο CAD μία πλάκα 133 mm x 150 mm με πάχος 3 mm .Υστερα εισάγουμε την γεωμετρία σε αρχείο .stl στον Slicer. (Creality Print Slicer **Εικόνα 27**). [9]



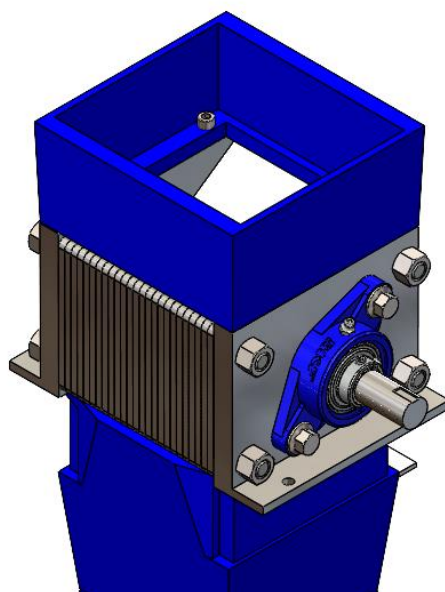
Εικόνα 28 – Εισαγωγή STL αρχείου στο Creality Print Slicer

Στην συνέχεια, αφαιρούμε τα Bottom και Top surfaces και δίνουμε Infill τύπου Grid. Αναλόγως πόσο μικρά απόβλητα επιθυμούμε να διαπερνούν δίνουμε μικρότερο ή μεγαλύτερο ποσοστό Infill. Η γεωμετρία που προκύπτει στον Slicer είναι η εικονιζόμενη παρακάτω (**Εικόνα 28**):



Εικόνα 29 - Μορφολογία φίλτρου

Στο άνω τμήμα του τεμαχιστή προσθέτουμε προστατευτικό κάλυμμα αποσπώμενο ώστε να αποφευχθεί τραυματισμός από απόβλητα που εκτοξεύονται.



Εικόνα 30 – Προστατευτικό κάλυμμα στην είσοδο της κατασκευής

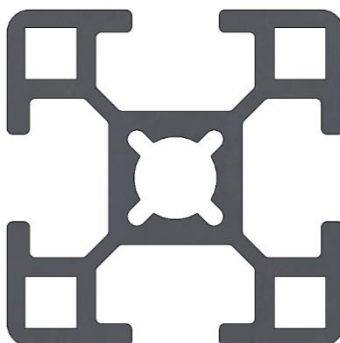
Η κατασκευή του κάδου , φίλτρου και προστατευτικού καλύμματος γίνεται με χρήση FDM εκτυπωτή με υλικό PETG λόγω της καλής του αντοχής σε δυνάμεις και θερμοκρασίες, καθώς και της ευκολίας εκτύπωσης. Χρησιμοποιήθηκε το εξής προφίλ εκτύπωσης για τα προαναφερθέντα τμήματα:

Πίνακας 23 - Συνθήκες εκτύπωσης μέσω φίλτραρίσματος

Παράμετρος	Επιλογή
Infill density	20%
Infill pattern	grid
Print speed	120 mm/s
Printing Temperature	240 C
Layer height	0,2 mm

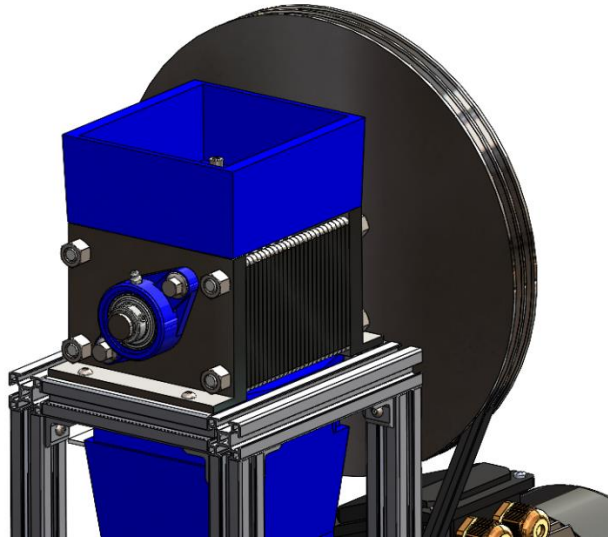
Δεν δόθηκε μεγάλο ποσοστό Infill λόγω του ότι δεν επρόκειτο να υποβληθούν τα τμήματα αυτά σε μεγάλες δυνάμεις.

Ο σκελετός πάνω στον οποίο τοποθετείται η κατασκευή αποτελείται από aluminum T-slots με το εικονιζόμενο προφίλ (Εικόνα 30) 30 mm x 30 mm:



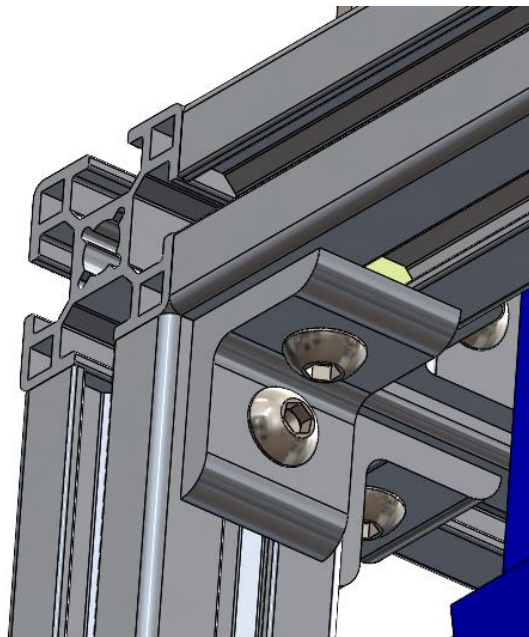
Εικόνα 31 – Προφίλ aluminum t-slot

Η βάση πάνω στην οποία βιδώνεται ο τεμαχιστής αποτελείται από προφίλ μήκους 150mm και 220mm. Η βάση αυτή είναι υψωμένη με 4 aluminum T-slots σε κάθε γωνία της, μήκους 350mm και απεικονίζεται στην **εικόνα 31**.



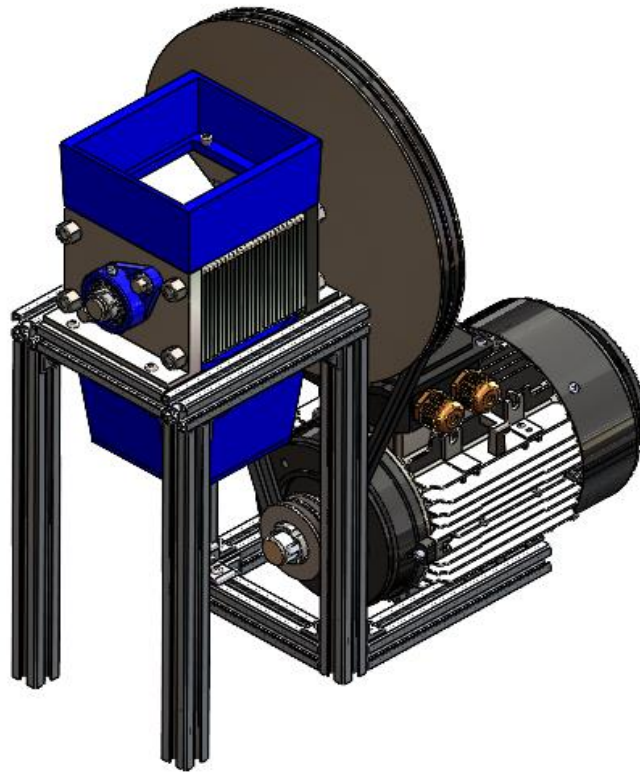
Εικόνα 32 – Βάση Τεμαχιστή

Η ένωση των τμημάτων μεταξύ τους πραγματοποιείται με T-nuts DIN 508 και γωνιές, όπως επίσης και η συγκράτηση της κατασκευής γίνεται επίσης με T-nuts DIN 508. Η ένωση αυτή, παρουσιάζεται στην **εικόνα 32**.



Εικόνα 33 – Συγκράτηση γωνιών κατασκευής με γωνιές & T-nuts

Παρακάτω παρουσιάζεται το τελικό συναρμολόγημα του τεμαχιστή με προσαρτισμένο τον κινητήρα στο κάτω μέρος του συναρμολογήματος και την μετάδοση κίνησης. Το σχεδιαστικό αρχείο του κινητήρα δόθηκε από την ίδια την κατασκευάστρια εταιρεία.



Εικόνα 34 - Τελικό συναρμολόγημα της κατασκευής

○ 5.6 Πειραματική μελέτη της διαμέτρου των αποβλήτων.

Ο εξωθητής μπορεί να δεχθεί ένα συγκεκριμένο εύρος διαμέτρου αποβλήτων. Ο θριμματιστής κατασκευάστηκε με σκοπό να παράγει απόβλητα κάτω των 5 χιλιοστών παρόλα αυτά πραγματοποιήθηκε πειραματική μελέτη ώστε να επιβεβαιωθεί.

Δημιουργήθηκε μία διάταξη υπό κλίμακα πρωτότυπο με 2 λεπίδες και αποστάτες (**Εικόνα 33**), καθότι δεν υπήρχε λόγος για πειραματικούς σκοπούς να κατασκευαστούν παραπάνω. Στον άξονα εκτός της μείωσης του μήκους λόγω των λιγότερων λεπίδων ,τροποποιήθηκε ώστε να μπορεί να περιστραφεί δια χειρός. Αποφασίστηκε το υλικό των προς θρυμμάτιση αντικειμένων να είναι από πλαστελίνη, καθώς θα ήταν αδύνατο τα γρανάζια από PETG να διασπάσουν κάποιο άλλο υλικό, όπως φαίνεται και στις **Εικόνες**

34, 35, επιλέχθηκε πλαστελίνη ανοικτού χρώματος ώστε να είναι και ευδιάκριτα τα απόβλητα προς μέτρηση.



Εικόνα 35 – Πειραματική διάταξη



Εικόνα 36 – Μέτρηση αποβλήτων

Η κατανομή των αποβλήτων με βάση την διάμετρό (Μέγιστη διάσταση) τους προέκυψε όπως φαίνεται στον διάγραμμα που ακολουθεί.

Πίνακας 13 – Διάγραμμα κατανομής διαμέτρου αποβλήτων

Παρατηρούμε από το διάγραμμα πως το μεγαλύτερο πλήθος των αποβλήτων κυμαίνονται στην περιοχή $4.5 - 5.5 \text{ mm}$, γεγονός που εξυπηρετεί τις ανάγκες μας.

○ 5.7 Σύστημα περιτύλιξης του νέου νήματος

Για την περιέλιξη του καινούργιου νήματος χρησιμοποιείται μηχανικό σύστημα περιέλιξης, όπως φαίνεται στην **εικόνα 36**. Ένα αρκετά θετικό στοιχείο του community του 3D Printing αποτελεί η ύπαρξη πληθώρας από ιστοσελίδες με αναρτημένο σχεδιαστικό υλικό CAD γεωμετρίας έτοιμο προς εκτύπωση, δωρεάν προς το κοινό. Χρησιμοποιούμε από την βιβλιοθήκη του Printables ένα πλήρως μηχανικό μοντέλο περιέλιξης:” **Bambu Lab P1 / X1 / X1C / X1CC Filament Spool Switcher & Winder**”. [10]



Εικόνα 37 – Σύστημα περιέλιξης

Όσο περιστρέφεται το καρούλι ,το νήμα μετακινείται δεξιά αριστερά με την ταχύτητα που αρμόζει

Με ιδιαίτερα εύκολο τρόπο, ο μηχανισμός μπορεί να γίνει ηλεκτροκίνητος ,με χρήση Arduino και βηματικού κινητήρα. Με έναν αντάπτορα δηλαδή, προσαρμόζεται ο άξονας του ηλεκτροκινητήρα στο γρανάζι του συστήματος περιέλιξης.

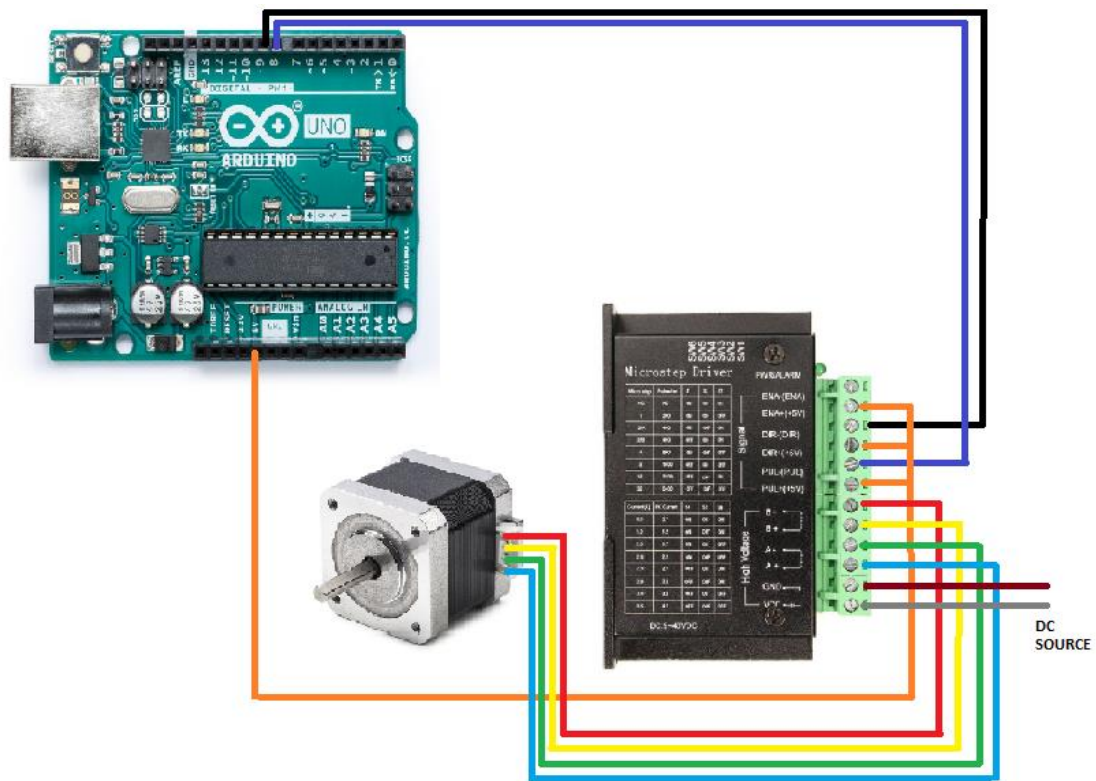
Για τον έλεγχο του βηματικού κινητήρα θα χρειαστεί ένας λογικός ελεγχτής ,ένας driver, και εξωτερική παροχή ρεύματος με DC 12 V.

Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται τα εξής εξαρτήματα με την συνδεσμολογία που διαφαίνεται παρακάτω:

- Uno Arduino Board Rev.3
- Microstep Driver TB6600

- Stepper motor NEMA 17

Παρακάτω ακολουθεί και το κύκλωμα της κατασκευής, στην **εικόνα 37**:



Εικόνα 38 – Κύκλωμα Arduino

Μέσω ενός κοινού τροφοδοτικού μπορεί η κατασκευή να τροφοδοτηθεί με ρεύμα 12 Volt .

Για την εύρεση των χρόνων και ταχυτήτων περιστροφής του βηματικού κινητήρα ,το πρόβλημα μοντελοποιήθηκε σε matlab.

Στην αρχή το καρούλι δεν έχει υλικό τυλιγμένο επάνω του, επομένως τυλίγεται στην αρχική διάμετρο του καρουλιού. Αφότου τυλιχθεί τόσες φορές ώστε να καλύψει το πλάτος του καρουλιού και υπερκαλύψει την πρώτη στρώση, πρέπει να τυλίξει την ίδια διάμετρο συν δύο φορές την διάμετρο/πάχος του νήματος, η οποία είναι 1.75mm. Η διάμετρος στην οποία σταματάει είναι στα 136mm με πλάτος καρουλιού στα 59.5mm. Τα προαναφερθέντα μεγέθη έχουν μετρηθεί από καρούλι της Creality. Κατασκευάζεται επομένως ο εξής κώδικας στο περιβάλλον Matlab:

```
clc
```

```
clear
```

```
Flow=5; %%5 mm/s
```

```
final=42+26;
```

```
widthvar=59.5/1.75;
```

```
for i=26:1.75:68
```

```
    r=i;
```

```
    P=2*pi()*r;
```

```
    t=(P/Flow);
```

```
    n=(1/t)*60;
```

```
    tcorr=(t*widthvar);
```

```
    disp(n);
```

```
    disp(tcorr);
```

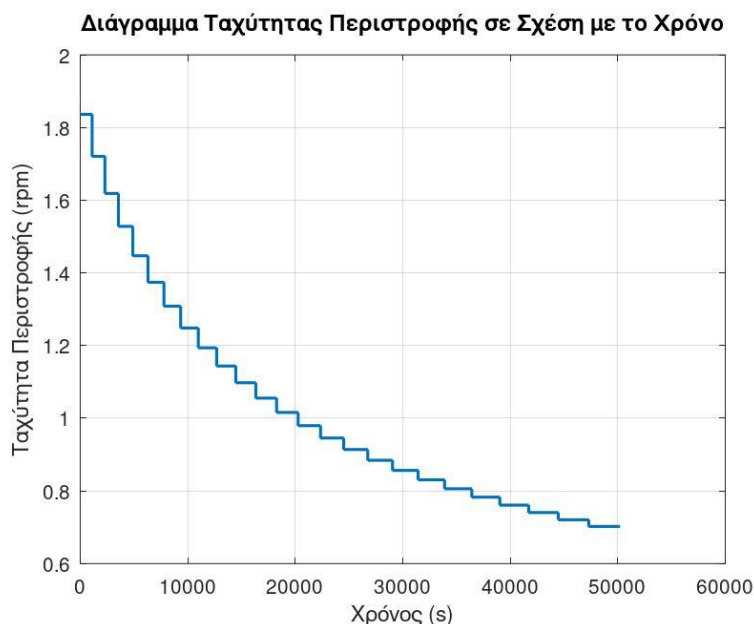
```
end
```

Υποθέτοντας ροή από τον extruder 5 mm/s, προκύπτουν οι εξής χρόνοι/ταχύτητες περιστροφής:

```
tcorr= [1110.8672, 1185.6371, 1260.4070, 1335.1769, 1409.9468, 1484.7167, 1559.4866, 1634.2565, 1709.0264,  
1783.7963, 1858.5662, 1933.3361, 2008.1060, 2082.8759, 2157.6458, 2232.4157, 2307.1856, 2381.9555,  
2456.7255, 2531.4954, 2606.2653, 2681.0352, 2755.8051, 2830.5750, 2905.3449]
```

Ορίζεται ταχύτητα περιστροφής σε rpm αντίστοιχα:

```
n = [1.8364, 1.7206, 1.6185, 1.5279, 1.4469, 1.3740, 1.3081, 1.2483, 1.1937, 1.1436, 1.0976, 1.0552, 1.0159, 0.9794,  
0.9455, 0.9138, 0.8842, 0.8564, 0.8304, 0.8058, 0.7827, 0.7609, 0.7403, 0.7207, 0.7022]
```



Εικόνα 39 - Διάγραμμα ταχύτητας περιστροφής σε σχέση με το χρόνο

Αντίστοιχα ο κώδικας για το Arduino ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή κίνηση του βηματικού κινητήρα:

```
// Define pins
```

```

const int stepPin = 2; // STEP pin
const int dirPin = 3; // DIR pin
const int enPin = 4; // Enable pin (if required)
// RPM to delay calculation (microseconds per step)
long calculateDelay(float rpm, int stepsPerRevolution) {
    return (60L * 1000000L) / (rpm * stepsPerRevolution);
}

void setup() {
    // Set pins as output
    pinMode(stepPin, OUTPUT);
    pinMode(dirPin, OUTPUT);
    pinMode(enPin, OUTPUT);
    // Enable the motor
    digitalWrite(enPin, LOW); // Assuming LOW enables the driver
    digitalWrite(dirPin, HIGH); // Set direction (HIGH or LOW depending on your wiring)
}

void spinMotor(float rpm, float durationMinutes, int stepsPerRevolution) {
    long delayTime = calculateDelay(rpm, stepsPerRevolution);
    unsigned long durationMillis = durationMinutes * 60 * 1000;
    unsigned long startTime = millis();
    while (millis() - startTime < durationMillis) {
        digitalWrite(stepPin, HIGH);
        delayMicroseconds(delayTime / 2);
        digitalWrite(stepPin, LOW);
        delayMicroseconds(delayTime / 2);
    }
}

void loop() {
    // Steps per revolution for your stepper motor
    int stepsPerRevolution = 200; // Commonly 200 steps for 1.8 degree/step motors
    // Define the RPM and duration in minutes

```

```
float rpm[] = {1.8364, 1.7206, 1.6185, 1.5279, 1.4469, 1.3740, 1.3081, 1.2483, 1.1937, 1.1436, 1.0976, 1.0552, 1.0159, 0.9794, 0.9455, 0.9138, 0.8842, 0.8564, 0.8304, 0.8058, 0.7827, 0.7609, 0.7403, 0.7207, 0.7022};
```

```
float duration[] = {1110.8672, 1185.6371, 1260.4070, 1335.1769, 1409.9468, 1484.7167, 1559.4866, 1634.2565, 1709.0264, 1783.7963, 1858.5662, 1933.3361, 2008.1060, 2082.8759, 2157.6458, 2232.4157, 2307.1856, 2381.9555, 2456.7255, 2531.4954, 2606.2653, 2681.0352, 2755.8051, 2830.5750, 2905.3449};
```

```
for (int i = 0; i < 26; i++) {  
    spinMotor(rpm[i], duration[i], stepsPerRevolution);
```

```
}
```

```
// Stop the motor
```

```
while (true) {
```

```
    digitalWrite(stepPin, LOW);
```

```
}}
```

6. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Σύστημα Ανακύκλωσης Τρισδιάστατα Εκτυπωμένων Τεμαχίων με μέθοδο FDM », μελετάται και σχεδιάζεται το σύστημα θλίψης των τεμαχίων και το σύστημα τύλιξης του καινούργιου νήματος. Το σύστημα θλίψης αποτελείται από ένα πλαίσιο με 4 δοκούς πάνω στο οποίο εδράζεται όλος ο μηχανισμός. Το σύστημα κίνησης αποτελείται από μια ιμαντοκίνηση η οποία μεταφέρει την ισχύ από τον ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος στον άξονα. Ο άξονας φέρει επάνω του τις λεπίδες οι οποίες έχουν διαφορά φάσης μερικών μοιρών μεταξύ τους, ο οποίος με την σειρά του εδράζεται επάνω σε δύο έδρανα κύλισης. Για την περιέλιξη του νέου νήματος επιλέχθηκε μηχανικό σύστημα περιέλιξης το οποίο κινείται μέσω βηματικού κινητήρα ελεγχόμενου από ελεγχτή τύπου Arduino. Η μελέτη περιλαμβάνει τον υπολογισμό των στοιχείων μετάδοσης κίνησης όπως είναι οι μάντες, τα έδρανα κύλισης στα οποία στηρίζεται ο άξονας, οι λεπίδες, ο άξονας καθώς και τον σχεδιασμό του κυκλώματος μαζί με τον προγραμματισμό του λογικού ελεγχτή.

Η λειτουργία του είναι η εξής: Τοποθετούμε στο άνω μέρος του τεμαχιστή το τεμάχιο προς θλίψη. Εκκινούμε το σύστημα και όλα τα απόβλητα οδηγούνται μέσω του κώνου στον εξωθητή. Τα απόβλητα τα οποία είναι μεγαλύτερα από το επιθυμητό συγκρατούνται από το διαχωριστή. Ύστερα θέτουμε σε λειτουργία τον εξωθητή και παράγεται το καινούργιο νήμα. Το νήμα αυτό μόλις φτάσει το απαιτούμενο μήκος προσδένεται στο τύμπανο και τυλίγεται σε αυτό πλήρως αυτοματοποιημένα.

Συμπερασματικά, η κατασκευή κρίνεται πραγματοποιήσιμη και επιτυγχάνει με επιτυχία τον αρχικό σκοπό της. Με χαμηλό κόστος παράγεται ένα σύστημα ικανό να ανακυκλώσει διάφορα πολυμερή τα οποία χρησιμοποιούνται στην μέθοδο FDM, τα οποία έχουν αντοχή σε πολλαπλούς κύκλους αναθέρμανσης. Συγκεκριμένα το κόστος της κατασκευής υπολογίζεται παρακάτω για κάθε εξάρτημα και συνολικά.

- 2 x έδρανα κύλισης SKF UCFL 204 = 40 €
- 1 x άξονας 1541 χάλυβας = 20 €
- 13 x λεπίδες συμβατικός χάλυβας = 130€
- 12 x αποστάτες = 120 €
- 4 x Κοχλίες ISO 4162 – M10 X 25 X 25-N = 2,8€
- 8 X Παξιμάδια ISO 4034 – M12 – N = 1€
- 8 X Ντίζες 12 X 180 = 1€
- 4 X Κοχλίες Allen ISO 4762 M6 X16 – 16N = 1€

- 2 X Πλάκες = 40 €
- 25 X Σταθερές λεπίδες = 250 €
- 1 X Προστατευτικό κάλυμα = 5 €
- 1 X Δεξαμενή τριμμάτων = 10 €
- 1 x Διαχωριστής = 2,5 €
- 40 X Κοχλίες Allen ISO 7380 M6 X 12 – 12N = 4 €
- 18 X Γωνιές = 18 €
- 18 x t nuts DIN 3030 M6 = 4,5 €
- 4 x Aluminum t slot 540 mm = 5,4 €
- 3 x Aluminum t slot 150 mm = 1,5 €
- 4 x Aluminum t slot 220 mm = 2,2 €
- 2 X Κωνική πλήμνη DIN 1108 = 7,48 €
- 6 x B18.3.6M – M6x 1.0 x25 = 3,6 €
- 1 x 2,2 kw AC κινητήρας (BUSCK T3A100LA-4) = 727,47 €
- 1 x Τροχαλία DIN 2211 71 mm = 20 €
- 1 x Τροχαλία DIN 2211 355 mm = 100 €
- 2 X SPZ Ιμάντες = 20 €
- 2 x Ασφάλειες DIN 471 – 20 x 1.2 = 5 €
- 1 x μη κοπτική πλευρά = 5 €
- Arduino uno Rev.3 = 30 €

- Βηματικός κινητήρας Nema 17 = 16 €
- Τροφοδοτικό 12 V DC = 10 €
- Σύστημα τύλιξης = 30 €

Οι τιμές των εξαρτημάτων (εκτός των τεμαχίων που κατασκευάζονται με την μέθοδο FDM) αποτελούν τιμές λιανικής. Οι τιμές των custom εξαρτημάτων έχουν προκύψει έπειτα από σχετική επικοινωνία με κατασκευαστές. Για την τιμή των εξαρτημάτων που έχουν κατασκευαστεί με μέθοδο FDM η κοστολόγηση του τεμαχίου έγινε συμπεριλαμβάνοντας τους εξής παράγοντες:

- Κόστος υλικού
- Κόστος ενέργειας (ρεύματος) εκτύπωσης

Λαμβάνεται υπόψη, λοιπόν, το κόστος του PETG στα 20 €/kg και το κόστος κατανάλωσης ρεύματος είναι στα 0,1395 €/kWh ενώ η μέση κατανάλωση του εκτυπωτή στα 100W.

Το τελικό κόστος παραγωγής προκύπτει ως:

Κόστος = τιμή ρεύματος*ώρες λειτουργίας*κατανάλωση ανά ώρα + κόστος υλικού, άρα καταλήγουμε στην εξής σχέση (50).

$$K = (\text{τιμή ρεύματος} * \text{ώρες λειτουργίας} * \text{κατανάλωση ανά ώρα}) + \text{κόστος υλικού} \quad (50)$$

Συνολικά η κατασκευή επομένως κοστίζει 1633,45 € για να κατασκευαστεί. Συγκριτικά με άλλες αντίστοιχες κατασκευές στην αγορά αποτελεί μια πολύ πιο οικονομική λύση στο υπό εξέταση πρόβλημα. Παραδείγματος χάριν, ο τεμαχιστής της Fellfill (**Εικόνα 39**) κοστίζει 2190 € .



Εικόνα 40 – Τεμαχιστής της Fellfill

Αντίστοιχα και το σύστημα τύλιξης της Filabot (**Εικόνα 40**) κοστίζει 3406 €.



Εικόνα 41 – Σύστημα τύλιξης της Filabot

7. Μελλοντική Μελέτη

Στην παρούσα εργασία έγινε αναφορά στον σχεδιασμό ενός συστήματος ανακύκλωσης αποτυχημένων ή πρωτότυπων 3D εκτυπώσεων, το οποίο περιλαμβάνει τρία βασικά στάδια: θρυμματισμό, εξώθηση και περιέλιξη του παραγόμενου νήματος. Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε αφορούσε κυρίως τον σχεδιασμό και τις υπολογιστικές απαιτήσεις των μηχανισμών αυτών. Οι βασικές μέθοδοι περιλάμβαναν τη χρήση ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA) για τη λεπίδα του τεμαχιστή, την μελέτη και τον σχεδιασμό του συστήματος μετάδοσης κίνησης, του άξονα, των εδράνων κύλισης καθώς και την αυτοματοποίηση της διαδικασίας περιέλιξης μέσω λογικού ελεγκτή και βηματικού κινητήρα. Ωστόσο, υπάρχουν αρκετές περιοχές στις οποίες μπορεί να επεκταθεί η παρούσα έρευνα και να βελτιωθεί η απόδοση του συστήματος.

○ 7.3. Πλήρης σχεδιασμός του extruder μέσω FEA για τη ροή της θερμότητας και του υλικού.

Ένα από τα πιο πολύπλοκα μέρη του συστήματος είναι ο εξωθητής, ο οποίος πραγματοποιεί την τήξη και την αναδιαμόρφωση του θρυμματισμένου υλικού σε νήμα. Στην παρούσα μελέτη δεν έγινε αναλυτική μελέτη του εξωθητή, καθώς η εστίαση ήταν στον τεμαχιστή και στον μηχανισμό περιέλιξης. Ωστόσο, η προσομοίωση και η κατασκευή εξειδικευμένου εξωθητή για την δική μας εφαρμογή χρησιμοποιώντας FEA για την ανάλυση θερμοκρασιακών κατανομών και της ροής του υλικού θα μπορούσε να προσφέρει σημαντική βελτίωση στην ποιότητα και την ομοιομορφία του παραγόμενου νήματος.

Η χρήση FEA για τη ροή θα μπορούσε να βοηθήσει στη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του κοχλία και των διαύλων του εξωθητή, ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη ανάμειξη και εξώθηση του υλικού. Επιπλέον, η μελέτη της θερμοκρασιακής κατανομής θα βοηθούσε στον σχεδιασμό συστημάτων ψύξης που θα βελτίωναν την ποιότητα του νήματος και θα μείωναν τον χρόνο ψύξης.

○ 7.4. Κατασκευή συστήματος ψύξης για το νήμα μετά τον εξωθητή

Ένα επιπλέον σημείο που θα μπορούσε να μελετηθεί περαιτέρω, αποτελεί η ψύξη του παραγόμενου νήματος. Η ψύξη γίνεται μέσω φυσικής ροής αέρα όμως ενδέχεται να μην είναι επαρκές. Ένα προσαρμοσμένο σύστημα ψύξης, το οποίο θα περιλαμβάνει ψύξη μέσω αέρα ή υγρών, θα μπορούσε να βοηθήσει στη βελτίωση της ποιότητας του νήματος και στη μείωση του χρόνου παραγωγής. Άλλωστε το νήμα πρέπει να είναι μη παραμορφώσιμο ώστε να μπορεί έγκαιρα να τραβηχτεί και να προσαρτηθεί στο σύστημα περιέλιξης.

Επιπλέον, θα μπορούσε να αναπτυχθεί ένα σύστημα ελέγχου που θα ρυθμίζει την ένταση της ψύξης ανάλογα με την ταχύτητα παραγωγής και την θερμοκρασία του νήματος

○ 7.5. Κατασκευή πλήρως αυτοματοποιημένου συστήματος

Επιπροσθέτως μία σημαντική αναβάθμιση ως προς την ευχρηστία του συστήματος αποτελεί η πλήρης αυτοματοποίηση του, όχι μόνο του συστήματος τύλιξης αλλά από την αρχή μέχρι το τέλος. Από την στιγμή δηλαδή που ο χειριστής τοποθετεί το τεμάχιο προς τεμαχισμό μέχρι την επανατύλιξη του νήματος η διαδικασία να εκτυλίσσεται χωρίς την επέμβαση του χειριστή. Ένα τέτοιο εγχείρημα θα απαιτούσε την εκτεταμένη χρήση βηματικών κινητήρων ελεγχόμενους από λογικό ελεγκτή.

7. Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1 – Ιδιότητες PETG.....	16
Πίνακας 2 – Συντελεστής αξιοπιστίας.....	24
Πίνακας 3 – Συντελεστής θερμοκρασίας ft.....	24
Πίνακας 4 – Συντελεστής φόρτισης για ιμαντοκινήσεις κατά DIN 2218.....	25
Πίνακας 5 – Επιλογή τύπου ιμάντα (για μικροτραπεζοειδείς ιμάντες).....	26
Πίνακας 6 – Διάμετροι τροχαλιών για τραπεζοειδής ιμάντες (DIN 2211).....	27
Πίνακας 7 – Συντελεστής μήκους C4 για μικροτραπεζοειδής ιμάντες.....	28
& Πίνακας 8 – ΔL για διαφορετικούς τύπους ιμάντων.....	28
Πίνακας 9 – Συντελεστής C2 που λαμβάνει υπόψη τη γωνία περιέλιξης της μικρής τροχαλίας.....	29
Πίνακας 10 – Μικροτραπεζοειδής ιμάντες DIN 7763 & τροχαλίες DIN 2211.....	31
Πίνακας 11 – Συντελεστής CR.....	40
Πίνακας 12 - Συνθήκες εκτύπωσης μέσου φιλτραρίσματος.....	43
Πίνακας 13 – Διάγραμμα κατανομής διαμέτρου αποβλήτων.....	46

8. Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1 – Σχηματική απεικόνιση μεθόδου SLA.....	9
Εικόνα 2 - Σχηματική Απεικόνιση μεθόδου SLS.....	10
Εικόνα 3 - Σχηματική Απεικόνιση μεθόδου FDM	10
Εικόνα 4 – Σχηματική Απεικόνιση Χύτευσης σε καλούπι.....	11
Εικόνα 5 – Διάταξη εκβολέα νήματος	13
Εικόνα 6 – Τρισδιάστατη Γεωμετρία λεπίδας	15
Εικόνα 7 – Βασικές διαστάσεις λεπίδας.....	15
Εικόνα 8 – Γεωμετρία λεπίδας & αποβλήτου Πίνακας 1 – Ιδιότητες PETG	16
Εικόνα 8 – Γεωμετρία λεπίδας & αποβλήτου.....	16
Εικόνα 9 – Contact μεταξύ λεπίδας και αποβλήτου	17
Εικόνα 10 – Οριακές συνθήκες λεπίδας & πακτωμένο face αποβλήτου.....	17
Εικόνα 11 – Διατμητική τάση.....	18
Εικόνα 12 – Παραμόρφωση λεπίδας.....	18
Εικόνα 13 – Probe tool στην κοπτική ακμή.....	19
Εικόνα 14 - Διάγραμμα Δυνάμεων στην κοπτική ακμή συναρτήση του χρόνου	19
Εικόνα 15 – Διάγραμμα Δυνάμεων στα σημεία έδρασης συναρτήση του χρόνου	19
Εικόνα 16 – Συναρμολόγημα Shredder διπλού άξονα	20
Εικόνα 17 – Διατμητική τάση με την νέα γεωμετρία	21
Εικόνα 18 – Παραμόρφωση με την νέα γεωμετρία	21
Εικόνα 19 - Διάγραμμα Τάσεων στα σημεία έδρασης συναρτήση του χρόνου.....	22
Εικόνα 20- Τεχνικά χαρακτηριστικά κινητήρα T3A100LA-4.....	22
Εικόνα 22 - Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος ιμαντοκίνησης.....	24
Εικόνα 21 – SKF UCFL 204.....	24
Εικόνα 23- Κατακόρυφη και Οριζόντια δύναμη που ασκείται στην τροχαλία.....	31
Εικόνα 22 - Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος ιμαντοκίνησης.....	36
Εικόνα 23- Κατακόρυφη και Οριζόντια δύναμη που ασκείται στην τροχαλία.....	37
Εικόνα 25 - Shredder.....	39
Εικόνα 24 – Άξονας της κατασκευής σε CAD γεωμετρία.....	40
Εικόνα 25 - Shredder.....	41
Εικόνα 26 - Φίλτρο και κάδος κατασκευής	41
Εικόνα 27 – Εισαγωγή STL αρχείου στο Creality Print Slicer	42
Εικόνα 28- Μορφολογία φίλτρου	42
Εικόνα 29 – Προστατευτικό κάλυμμα στην είσοδο της κατασκευής	43
Εικόνα 30 – Προφίλ aluminum t-slot.....	43
Εικόνα 31 – Βάση Τεμαχιστή	44
Εικόνα 32– Συγκράτηση γωνιών κατασκευής με γωνιές & T-nuts.....	44
Εικόνα 33- Τελικό συναρμολόγημα της κατασκευής	45
Εικόνα 34– Μέτρηση αποβλήτων	46
Εικόνα 35– Πειραματική διάταξη	46
Εικόνα 36– Σύστημα περιέλιξης	46
Εικόνα 37 – Κύκλωμα Arduino.....	48
Εικόνα 38 - Διάγραμμα ταχύτητας περιστροφής σε σχέση με το χρόνο.....	49
Εικόνα 39 - Τεμαχιστής της Fellfill	54
Εικόνα 40 - Σύστημα τύλιξης της Filabot	55

9. Βιβλιογραφία

- [1] M. Molitch-Hou, «Unique Moving Supports Reduce 3D Printing Waste by 35%,» *3DPRINT.com*, 2021.
- [2] U. o. S. California, «How a moving platform for 3D printing can cut waste and costs,» *ScienceDaily*, April 6, 2021.
- [3] A. Inc., «Ansys Help,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/main_page.html. [Πρόσβαση 8 12 2024].
- [4] S. B. ,. H. N. Sofiane Guessasma, «Printability and Tensile Performance of 3D Printed Polyethylene Terephthalate Glycol Using Fused Deposition Modelling,» 2019.
- [5] A. Inc., «mm.bme.hu,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_SOLID186.html. [Πρόσβαση 8 12 2024].
- [6] A. Inc., «mm.bme.hu,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_SOLID187.html. [Πρόσβαση 8 12 2024].
- [7] Χ. Α. Παπαδόπουλος, Στοιχεία Μηχανών, Αθήνα: Τζιόλα, 2020.
- [8] Δ. Ν. Γαβρίλης Σωτήριος, «Μελέτη και σχεδίαση ανυψωτήρα συνεργείου αυτοκινήτων ικανότητας 3.2 t,» Τ.Ε.Ι Δυτικής Ελλάδας - Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε., Πάτρα, 2015.
- [9] Creality, «staticdj.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://img.staticdj.com/ba2666081fb342da6266c2b8058ce04a.pdf>. [Πρόσβαση 2024 12 8].
- [10] M. Kiszely, «Printables.com,» 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.printables.com/model/407688-bambu-lab-p1-x1-x1c-x1cc-filament-spool-switcher-w>. [Πρόσβαση 8 12 2024].
- [11] Α. Θ. Αντωνιάδης, Μηχανολογικό Σχέδιο, Αθήνα : Τζιόλα, 2018.