

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΓΚΙΟΥΖΕΛΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΥ
ΜΥΛΟΥ ΛΕΙΟΤΡΙΒΗΣΗΣ ΓΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΧΡΗΣΗ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ
ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΣΠΙΤΑΣ

ΑΘΗΝΑ 2023

**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY
OF ATHENS
SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING**



GKIOUZELIS PANAGIOTIS

**OPTIMIZATION AND REDESIGN OF PROTOTYPE
PULVERIZER MILL FOR INDUSTRIAL USE**

**DEPARTMENT OF MACHINE DESIGN AND DYNAMICS
LABORATORY**

SUPERVISOR: PROFESSOR VASILIOS SPITAS

ATHENS 2023



Ευχαριστίες

Για αρχή θα ήθελα να ευχαριστήσω μέσα από τα βάθη της καρδιάς μου τον επιβλέπων καθηγητή μου, κ. Βασίλειο Σπιτά για τη συμβολή του στη διπλωματική εργασία. Παρά τον μεγάλο του φόρτο ως καθηγητής και διευθύνων του εργαστηρίου στοιχείων μηχανών έβρισκε το χρόνο, όρεξη και αφοσίωση στη διπλωματική μου διατριβή ενώ οι γνώσεις και οι ιδέες που μου προσέφερε ήταν μείζονος σημασία στην πορεία της διπλωματικής εργασίας.

Μεγάλη και υψίστου σημασίας ήταν η προσφορά του υποψήφιου Διδάκτορα Γεώργιου Βασιλείου όπου με την καθοδήγηση του έγινε όλη η τεχνική ανάλυση του θέματος όσο σε θεωρητικό τόσο και σε επίπεδο προσομοιώσεων και μπορούσε να γίνει αντιμετώπιση κάθε εμποδίου που εμφανιζόταν κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τους αγαπητούς συμφοιτητές και μελλοντικούς συναδέλφους Παναγιώτη Ντάκο, Κωνσταντίνο Χουζούρη και Άννα Μάνιου που συγχρόνως μαζί με έμένα εκπονούσαν τις διπλωματικές τους εργασίες στο εργαστήριο στοιχείων μηχανών και η συμπαράσταση που είχαμε ο ένας στον άλλον κατά την διεξαγωγή της διπλωματικής εργασίας ήταν κινητήριος δύναμη για την υλοποίηση της.

Τέλος θα ευχαριστήσω τους σημαντικότερους ανθρώπους στην πορεία μου στην σχολή και την διπλωματική εργασία. Αναφέρομαι στους γονείς μου Διονύσιο και Γεωργία και στον αδερφό μου Νικόλαο όπου η υποστήριξη τους σε όλους τους τομείς κατά την φοίτηση μου, και όχι μόνο, συνέβαλαν στο να επιτύχω τους στόχους και να προχωράω ανοδικά στο πέρασμα των χρόνων.



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.

Γκιουζέλης Παναγιώτης



Περιεχόμενα

| | |
|--|----|
| Περίληψη..... | 5 |
| Abstract..... | 6 |
| 1.Εισαγωγή..... | 7 |
| 1.1 Ορισμός λειοτρίβησης-τύποι μύλων..... | 7 |
| 1.2 Πρωτότυπος μύλος..... | 11 |
| 2.Ανάλυση συστήματος..... | 14 |
| 2.1 Προδιαγραφές..... | 14 |
| 2.2 Θεωρητική ανάλυση..... | 15 |
| 2.2.1 Βασικές γεωμετρικές σχέσεις..... | 15 |
| 2.2.2 Στατική ανάλυση και υπολογισμό των δυνάμεων στο δακτύλιο..... | 16 |
| 2.2.3 Υπολογισμός συνολικής ισχύος μύλου..... | 17 |
| 2.3 Επιφανειακές τάσεις..... | 17 |
| 2.3.1 Επιφανειακές τάσεις για την περίπτωση που ο δακτύλιος έρχεται σε επαφή κατά γενέτειρα..... | 17 |
| 2.3.2 Επιφανειακές τάσεις για την περίπτωση σημειακής επαφής του δακτυλίου με στάτη/ράβδο..... | 19 |
| 2.3.3 Ανάλυση επιφανειακών τάσεων με χρήση πεπερασμένων στοιχείων..... | 26 |
| 2.4 Υπολογισμός βέλους κάμψης, αζυγοσταθμίας και ιδιοσυχνοτήτων..... | 29 |
| 2.4.1 Υπολογισμός Βέλους κάμψης..... | 29 |
| 2.4.2 Υπολογισμός Ιδιοσυχνοτήτων..... | 31 |
| 2.4.3 Υπολογισμός αζυγοσταθμίας..... | 35 |
| 2.5 Υπολογισμός τάσεων-παραμορφώσεων λόγω φυγοκεντρικών δυνάμεων..... | 36 |
| 2.6 Αύξηση κλίμακας μύλου βάση την ποσότητα φόρτωσης του μύλου..... | 40 |
| 2.7 Υπολογισμός πτερυγίων ψύξης..... | 42 |
| 3.Σχεδιασμός συστήματος..... | 45 |
| 3.1 Αύξηση κλίμακας μύλου..... | 45 |
| 3.2 Επανασχεδιασμός βασικών εξαρτημάτων..... | 45 |
| 3.2.1 Σχεδιασμός στάτη..... | 45 |
| 3.2.2 Σχεδιασμός βραχίονα..... | 47 |
| 3.2.3 Σχεδιασμός ράβδου και άξονα..... | 50 |



| | |
|--|----|
| 3.2.5 Σχεδιασμός πρόσοψης και στηρίξεων | 53 |
| 3.2.6 Διάταξη μύλου για αποσπόμενα μέρη | 61 |
| 3.2.7 Σχεδιασμός συστήματος ψύξης | 63 |
| 3.2.8 Στερέωση μύλου, συναρμολόγηση και μεταφορά | 67 |
| 3.2.9 Ηχομόνωση μύλου | 77 |
| 4. Συμπεράσματα και μελλοντική ανάλυση | 78 |
| Παραπομπές | 79 |
| Παραρτήματα | 80 |

Περίληψη

Η παρούσα μελέτη εστιάζει στη βελτιστοποίηση ενός πρωτότυπου δακτυλιοειδούς μύλου λειοτρίβησης που προορίζεται για χρήση σε βιομηχανικούς χώρους. Αρχικά έγινε εμβάθυνση στα δημοσιεύματα που υπάρχουν για το συγκεκριμένο μύλο ώστε να κατανοηθεί ο τρόπος λειτουργίας του, ενώ έγινε η αποσυναρμολόγηση του πρωτότυπου μύλου που βρίσκεται στο εργαστήριο στοιχείων μηχανών και δυναμικής του Ε.Μ.Π. Η αρχική επαφή με το μύλο τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πραγματικό επίπεδο δίνει την δυνατότητα να κατανοηθούν οι τομείς που υστερεί ο συγκεκριμένος τύπος μύλου ώστε να γίνει η βελτιστοποίηση αυτών. Η μελέτη συνέχισε με την αποτύπωση των βασικών εξισώσεων που υπάρχουν στην βιβλιογραφία στο υπολογιστικό πρόγραμμα MATLAB για την αρχική διαστασιολόγηση του μύλου και συγχρόνως αποτυπώθηκε το πρωτότυπο μοντέλο σε περιβάλλον cad μέσω του λογισμικού SOLIDWORKS. Έπειτα έγινε συσχέτιση των βασικών διαστάσεων του μύλου με τις επιφανειακές τάσεις που εμφανίζονται κατά την λειτουργία του. Για την μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων γίνονται προσομοιώσεις στο λογισμικό ANSYS και στη συνέχεια δημιουργείται στο ίδιο λογισμικό ένας αλγόριθμος υπολογισμού βέλους κάμψης και ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής αναλόγως την θέση των δακτυλίων και των εδράσεων. Η ανάλυση προχώρησε στο συσχετισμό του μεγέθους του μύλου με την ποσότητα υλικού που φορτώνεται για λειοτρίβηση. Έχοντας τους παραπάνω υπολογιστικούς κώδικες και μεθόδους προσομοιώσεων ξεκίνησε η δημιουργία του βελτιωμένου μύλου όπου σχεδιάζεται, σε περιβάλλον cad, με γνώμονα την μείωση των επιφανειακών τάσεων, και κατά συνέπεια μείωση της φθοράς, εδράσεις στις οποίες τα ρουλεμάν θα είναι προστατευμένα από το βιομηχανικό περιβάλλον και της σκόνης που δημιουργείται κατά τη λειοτρίβηση ενώ θα τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι εύκολο το κεντράρισμα τους και να μη δημιουργούνται αζυγοσταθμίες και ιδιοσυχνότητες. Ο σχεδιασμός επεκτείνεται και στο κομμάτι της εύκολης συντήρησης και συναρμολόγησης του μύλου ενώ δημιουργείται σύστημα ψύξης για την μείωση της θερμικής καταπόνησης του συστήματος. Τελειώνοντας στο κομμάτι του σχεδιασμού δημιουργείται μια διάταξη με αποσπώμενα μέρη ώστε ο μύλος να προσαρμόζεται στην κάθε ανάγκη της παραγωγής και στην δημιουργία ενός θαλάμου ηχομόνωσης για μείωση της ηχορύπανσης. Τελευταίο κομμάτι της μελέτης είναι η σχεδίαση των μηχανολογικών σχεδίων και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την μελέτη αυτή.



Abstract

The present study focuses on the optimization of a prototype ring mill for grinding purposes intended for industrial use. Initially, an in-depth analysis of the existing publications on this specific mill was conducted in order to understand their mode of operation, while the prototype mill located in the Machine Design and Dynamics Laboratory (MDLab) of the National Technical University of Athens (NTUA) was disassembled. The initial contact with the mill, both theoretically and practically, provides the opportunity to comprehend the sections that this mill has disadvantages, with the aim of optimizing them. The study continued with the formulation of the fundamental equations found in the literature in the MATLAB computational software for the initial dimensional analysis of the mill, while the prototype model was simultaneously designed in CAD environment using SOLIDWORKS software. Subsequently, the correlation between the basic dimensions of the mill and the surface stresses that are created during its operation was established. Simulations were conducted in the ANSYS software to have more analytical results, followed by the development of an algorithm for calculating the deflection curve and natural frequencies of the structure based on the positions of the rings and supports. The analysis proceeded to the correlation of the mill's size with the quantity of material loaded for grinding. With the aforementioned computational codes and simulation methods, the creation of an improved mill began, designed in CAD environment with the objective of reducing surface stresses and, consequently, minimizing wear, supports, where the bearings will be protected from the industrial environment and the dust generated during grinding. Moreover, they will be positioned in such a way as to facilitate their centering and avoid any imbalances and natural frequencies. The design also extends to the aspect of easy maintenance and assembly of the mill, while a cooling system is implemented to reduce the thermal load on the system. Finally, in the design aspect, a configuration with detachable parts is developed so that the mill can be adjusted to the specific requirements of production, along with the creation of a soundproof chamber to reduce noise pollution. The last part of the study involves the design of the mechanical drawings and the conclusions drawn from this investigation.

1. Εισαγωγή

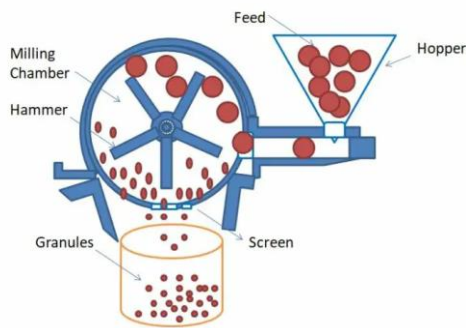
1.1 Ορισμός λειοτρίβησης-τύποι μύλων

Λειοτρίβηση ορίζεται ως η πίεση ή σύνθλιψη τεμαχιδίων μέχρι να γίνουν πούδρα ή μαλακή μάζα.

Λειοτρίβηση γίνεται στη φαρμακευτική για την παραγωγή φαρμακοποιών μορφών όπως ταμπλέτες και κάψουλες, στις βιομηχανίες τροφίμων για την άλεση μπαχαρικών, δημητριακών, κακάου και άλλων συστατικών, στην επεξεργασία μετάλλων, στην οικοδομή για τη δημιουργία τσιμέντου και άλλων οικοδομικών υλικών και σε αρκετές ακόμα βιομηχανίες.

Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται σε ειδικά μηχανήματα που ονομάζονται μύλοι άλεσης. Τέτοιοι μύλοι μπορεί να είναι:

- Σφυρόμυλος (Hammer mill) ο οποίος αποτελείται από ένα στάτη στο οποίο μέσα του βρίσκονται σφυριά που περιστρέφονται και χτυπούν το υλικό για να γίνει η λειοτρίβηση του.



Εικόνα 1.1.1 Σχηματική εικόνα σφυρόμυλου[1]



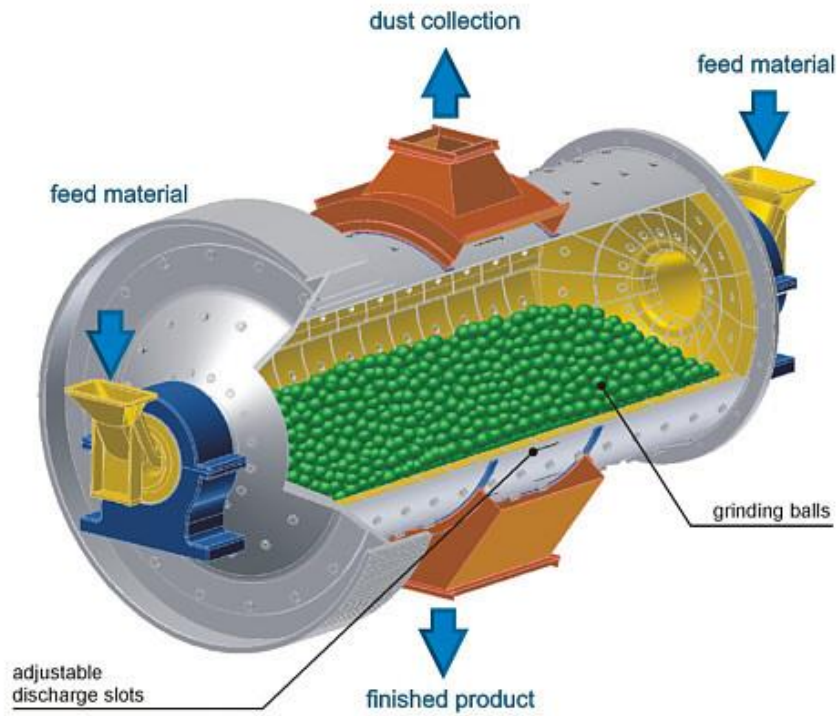
Εικόνα 1.1.2 Σφυρόμυλος[2]

- Σφαιρόμυλος (Ball mill) ο οποίος αποτελείται από ένα κάδο ο οποίος έχει μέσα του μεταλλικές σφαίρες. Μέσα στο σφαιρόμυλο τοποθετείται το υλικό προς λειοτρίβηση και καθώς περιστρέφεται ο κάδος, οι σφαίρες πετάγονται στον αέρα και όταν πέφτουν στο υλικό γίνεται η διάσπασή του σε μικρότερο μέγεθος. Χρησιμοποιείται κυρίως στην βιομηχανία παραγωγής τσιμέντων.



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΓΚΙΟΥΖΕΛΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

MDL ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΜΠ
MACHINE DESIGN LABORATORY NTUA

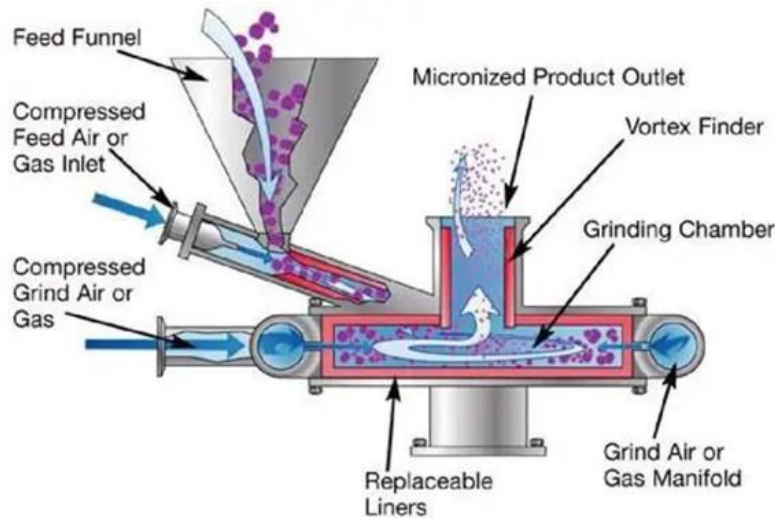


Εικόνα 1.1.3 Σχηματική εικόνα σφαιρόμυλου[15]



Εικόνα 1.1.4 Σφαιρόμυλος[16]

- Μύλοι jet (Jet mills) οι οποίοι μέσω ενός ακροφυσίου αέρα ή κάποιου διαφορετικού αερίου εκτοξεύουν το υλικό μέσα σε ένα σπειροειδές κέλυφος και η σύγκρουση αυτή οδηγεί στη θραύση του υλικού και λειοτρίβηση του. Η έξοδος γίνεται λόγω στροβιλισμού του υλικού.



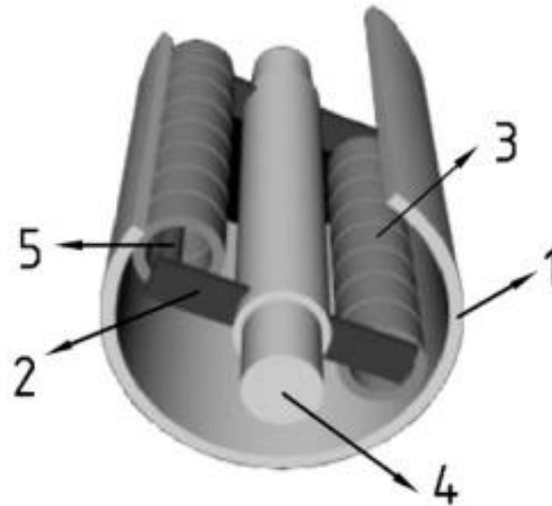
Εικόνα 1.1.5 Σχηματική εικόνα μύλου jet[4]

- Και άλλοι τύποι όπως pin mills, κρυογενικοί μύλοι, κυλινδρικοί μύλοι κλπ.

Η επιλογή του κατάλληλου μύλου γίνεται αναλόγως τις ανάγκες της κάθε βιομηχανίας. Τα χαρακτηριστικά που απαρτίζουν έναν μύλο είναι η κοκομετρία που μπορεί να επιτύχει, το μέγεθος παραγωγής (batch), το υλικό που προορίζεται για λειοτρίβηση, η θερμοκρασία του και άλλοι τεχνοοικονομικοί παράγοντες. Επίσης κάθε μύλος παρουσιάζει τα προτερήματα και τα μειονεκτήματα του όπως είναι η κατανάλωση ενέργειας, φθορά, συντήρηση, απώλειες και επίπεδα θορύβου.

1.2 Πρωτότυπος μύλος

Το 1994 στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο ο Παναγιώτης Μακρής μαζί με την Μαρία Φούντη και το Βασίλειο Σπιτά σχεδίασαν και κατασκεύασαν έναν μύλο άλεσης ο οποίος βασίζεται στην λειοτρίβηση μέσω δακτυλίων και επιτυγχάνει αποδοτική άλεση μετάλλων και πετρωμάτων για βιομηχανική χρήση[5]. Ο μύλος έχει την παρακάτω μορφή



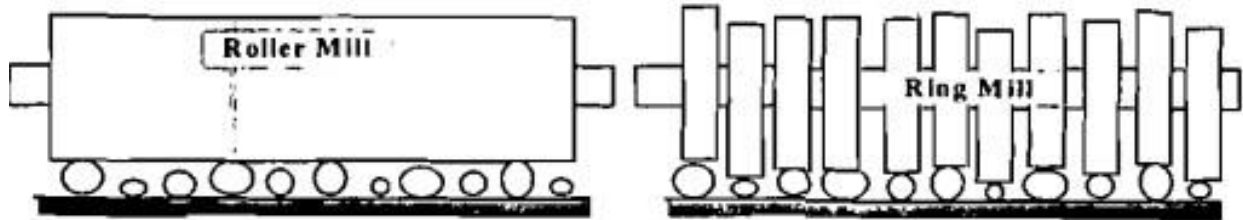
Εικόνα 1.2.1 Μέρη δακτυλιοειδή μύλου[5]

1. Κύλινδρος(στάτης)
2. Βραχίονας(Arm)
3. Δακτυλίδια(rings)
4. Άξονας κίνησης(Shaft)
5. Ράβδος(rod)

Η αρχή λειτουργίας είναι ότι κάθε δακτύλιος επιτρέπεται να κινείται ελεύθερα κατά μήκος και γύρω από κάθε ράβδο. Κατά την περιστροφή του ορθογώνιου μεταλλικού βραχίονα, οι μεταλλικοί δακτύλιοι, λόγω των φυγοκεντρικών δυνάμεων, συμπιέζονται πάνω στην εσωτερική επιφάνεια του κυλίνδρου του μύλου. Ταυτόχρονα, αναπτύσσονται δυνάμεις τριβής μεταξύ των μεταλλικών δακτυλίων και της εσωτερικής επιφάνειας της μηχανής. Έτσι, οι δακτύλιοι περιστρέφονται ελεύθερα γύρω από τον άξονα της συμμετρίας τους και ταυτόχρονα ολισθαίνουν κατά μήκος των βραχιόνων του πλαισίου και κυλούν στην εσωτερική επιφάνεια του κυλίνδρου. Τα σωματίδια αλέθονται στον χώρο που παραμένει μεταξύ της εσωτερικής επιφάνειας του μύλου και των δακτυλίων. Ως εκ τούτου, τα σωματίδια βρίσκονται υπό την επίδραση κάθετων (συμπίεσης) και διαιτητικών δυνάμεων [5].

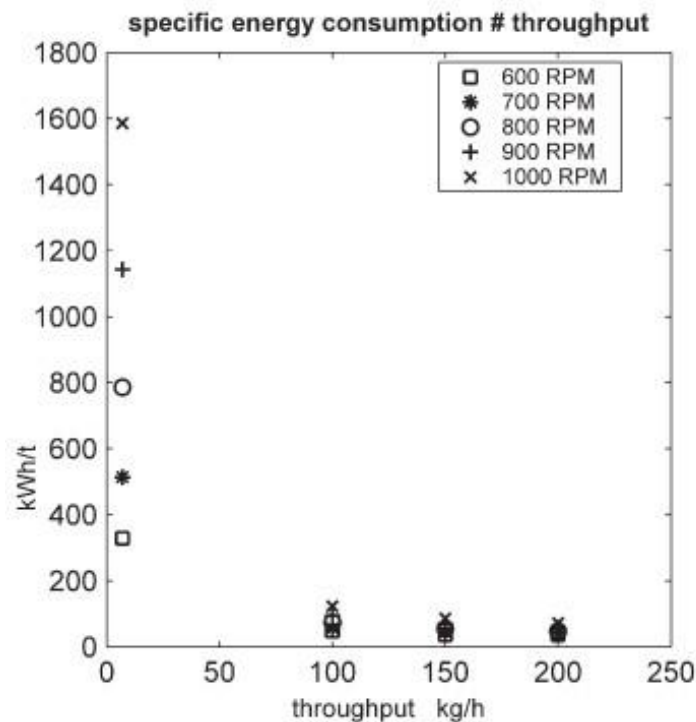
Η μεγάλη υπεροχή του συγκεκριμένου μύλου έναντι των υπολοίπων είναι ότι μπορεί να πετύχει κοκομετρίες οι οποίες φτάνουν τα 0.4 μ m σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Επιπροσθέτως μπορεί να γίνει προσαρμογή των λειτουργικών συνθηκών στις φυσικές ιδιότητες και τις τελικές απαιτήσεις

(π.χ. κατανομή μεγέθους) του υλικού που θα αλεστεί και στην αύξηση της συγκεκριμένης "ενεργού" επιφάνειας του μύλου. Για τον σκοπό αυτό, έχουν επιλεγεί σχεδιαστικά και κατασκευαστικά κριτήρια που οδήγησαν στα εξής: Ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας του αλεσμένου υλικού και μεγιστοποίηση του λόγου του όγκου του αλεσμένου υλικού προς τον όγκο του μύλου[5].



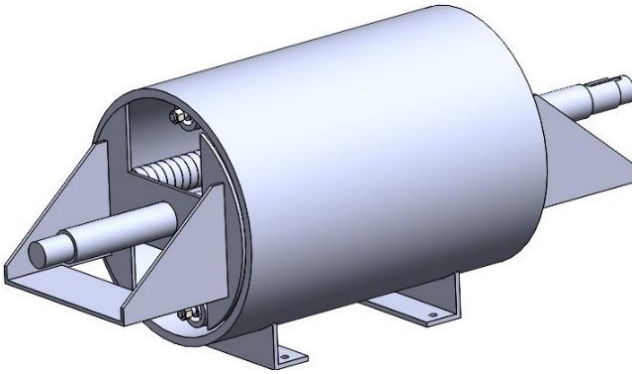
Εικόνα 1.2.2 Σχηματική διαφορά μύλου ρολού με το δακτυλιοειδής

Η Ειδική κατανάλωση(kWh/t) ενέργειας σε σχέση με την παραγωγή(kg/h) είναι:

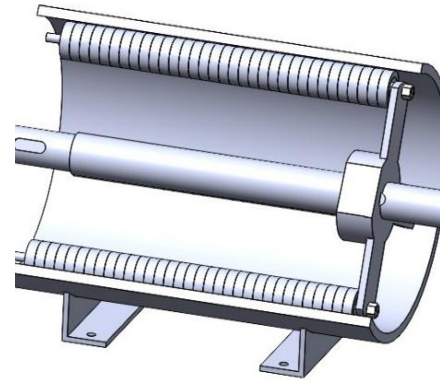


Διάγραμμα 1.2.1 Ειδική κατανάλωσης ενέργειας σε σχέση με την παραγωγή

Το πρωτότυπο μοντέλο που υπάρχει στο εργαστήριο είναι:



Εικόνα 1.2.3 Πρωτότυπος μύλος



Εικόνα 1.2.4 Τομή πρωτότυπου μύλου

Το μήκος του μύλου είναι 110cm και το ύψος του είναι στα 45cm. Το μέγεθος αυτό είναι κατάλληλο για εργαστηριακή χρήση όμως επειδή ο ανασχεδιασμός του θα γίνει για βιομηχανική χρήση, θα χρειαστεί να αυξηθεί το μέγεθος του ώστε να μεγιστοποιηθεί η παραγωγή του βάσει των τεχνικών προδιαγραφών.

Η χρήση του συγκεκριμένου μύλου προορίζεται κυρίως για την λειοτριβήση οικοδομικών υλικών, όμως μπορεί να εφαρμοστεί και στις υπόλοιπες βιομηχανίες με την κατάλληλη παραμετροποίηση.

2. Ανάλυση συστήματος

Σκοπός της ανάλυσης συστήματος είναι να γίνει ο σχεδιασμός θεωρητικών μοντέλων και μοντέλων προσομοιώσεων ώστε κατά τον ανασχεδιασμό του μύλου να μπορούν να τηρούνται οι προδιαγραφές που έχουν τεθεί. Οι προσομοιώσεις εφαρμόζονται στον πρωτότυπο μύλο για να μπορούν να μοντελοποιηθούν οι αναλύσεις και αργότερα βρίσκουν χρήση κατά τον ανασχεδιασμό του συστήματος.

2.1 Προδιαγραφές

Οι πειραματικές δοκιμές που έχουν πραγματοποιηθεί στον πρωτότυπο μύλο είναι υποσχόμενες διότι καταφέρνει να λειοτριβήσει τσιμέντο 42.5R σε υπέρλεπτες κοκκόμετρες που φτάνουν τα 0.4μm σε χρόνο κάτω των 10 λεπτών, εν αντιθέσει με τους κοινούς μύλους που μπορεί να χρειάζονται χρόνους πάνω από μια ώρα. Για να μπορέσει ο μύλος να ενταχθεί από το εργαστήριο σε βιομηχανικό περιβάλλον χρήζει ανασχεδιασμό και βελτιστοποίηση σε μερικούς τομείς του.

Ο βασικός ανασχεδιασμός είναι στα αλεστικά σώματα, τα οποία είναι οι δακτύλιοι, ώστε να μειωθούν οι επιφανειακές τάσεις που δημιουργούνται κατά την λειτουργία του και με αυτό τον τρόπο να μειωθεί η φθορά του μύλου ενώ παράλληλα να είναι πιο οικονομικά συντηρήσιμος. Βάση της αναφοράς[18] ένα υλικό διαρρέει λόγω επιφανειακών τάσεων όταν οι τάσεις αυτές ξεπεράσουν τις 2.5 φορές του ορίου διαρροής του υλικού. Από αυτό προκύπτει ότι

$$\sigma_{MAXHERTZ} = 2.5\sigma_y \quad (2.1.1)$$

Βάση αυτού δημιουργείται η προδιαγραφή ότι η μέγιστη τάση λόγω επιφανειακών τάσεων δεν πρέπει να ξεπερνάει το $\sigma_{MAXHERTZ}$.

Βελτιστοποίηση θα χρειαστεί και στο κομμάτι της ψύξης διότι κατά την λειοτρίβηση το μεγαλύτερο πόσο της ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα. Ο περιορισμός που υπάρχει είναι ότι η θερμοκρασία στο στάτη δεν πρέπει να ξεπερνά τους 60°C διότι σε πιο υψηλές θερμοκρασίες μειώνονται οι αντοχές των υλικών μαζί με τα μέτρα ελαστικότητας και οι δυσκαμψίες τους, αυξάνονται οι τριβές μεταξύ των συνεργαζόμενων εξαρτημάτων και μειώνεται το ιξώδες των λιπαντικών στοιχείων του μύλου που μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία των εδράσεων.

Η βελτιστοποίηση συνεχίζει στον ανασχεδιασμό των συναρμογών μεταξύ των εξαρτημάτων του μύλου ώστε να μπορεί να αποσυναρμολογείται/συναρμολογείται σε εύλογο χρονικό διάστημα και να μην σταματάει για μεγάλο χρόνο η παραγωγή με αποτέλεσμα να μη χρειάζονται πολλές εργατώρες. Επιπλέον η χρήση κοχλιοσύνδεσης στους περισσότερους τομείς οδηγεί στην μη ανάγκη εξειδικευμένων εργαλείων και τεχνικών κατά στη συντήρηση του.

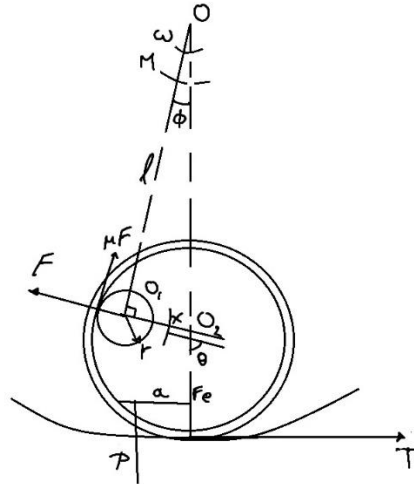
Επιπλέον δίνεται έμφαση στον ανασχεδιασμό των εδράσεων του άξονα ώστε να μπορεί να γίνεται εύκολη ευθυγράμμιση και κεντράρισμα του άξονα με τις εδράσεις του και με τα συνεργαζόμενα εξαρτήματα. Αυτό αποσκοπεί στην μείωση ταλαντώσεων λόγω κακής ευθυγράμμισης ή εκκεντρότητας αποφεύγοντας με αυτό το τρόπο τη γρηγορότερη φθορά των εδράσεων και των ιδιοσυχνοτήτων.

Τέλος γίνεται ασχολία με την ένταση του ήχου διότι το πρωτότυπο κατά τη λειτουργία του είχε ένταση ήχου η οποία έφτανε τα 100db(A). Σε περίπτωση που ο μύλος βρίσκεται σε ανοικτό χώρο ή κοντά με θορυβώδης μηχανές χρειάζεται η μείωση του παραγόμενου θορύβου.

2.2 Θεωρητική ανάλυση

2.2.1 Βασικές γεωμετρικές σχέσεις

Κατά την διαδικασία της λειοτρίβησης οι δυνάμεις που δέχεται το σωματίδιο και η ράβδος είναι:



Εικόνα 2.2.1.1 Σχεδιάγραμμα δυνάμεων

Όπου P είναι η δύναμη πίεσης, F η ορθή δύναμη στην ράβδο και T η διατμητική δύναμη που δέχεται το σωματίδιο. Παρατηρείται ότι η δύναμη P εφαρμόζεται με ένα οφσεντ α το οποίο εξαρτάται κυρίως από την μάζα του φορτίου του υλικού που φορτώνεται ο μύλος. Η ανάλυση βάση της αναφοράς[5] είναι:

Αρχικά υπολογίζεται η 'γωνία σχεδιασμού' θ από το θεώρημα συνημίτωνων στο τρίγωνο OO₁O₂ οπότε

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{(R - r_o)^2 + (r_i - r)^2 - l^2}{2(R - r_o)^2(r_i - r)} \right) \quad (2.2.1)$$

όπου R η εσωτερική ακτίνα του στάτη, r_i η εσωτερική ακτίνα του δακτυλίου, r η ακτίνα της ράβδου, r_o η εξωτερική ακτίνα του δακτυλίου και l το μήκος του βραχίονα[5].

Έπειτα εφαρμόζοντας στο ίδιο τρίγωνο τη σχέση ημιτόνων βγαίνει ότι

$$\frac{1}{\sin(\theta)} = \frac{r_i - r}{\sin(\varphi)} \quad (2.2.2)$$

και ο τύπος ως προς φ είναι:

$$\varphi = \sin^{-1}[(r_i - r) \sin(\theta)]$$

ενώ η γωνία χ είναι η συμπληρωματική γωνία των $\varphi - \theta$.

2.2.2 Στατική ανάλυση και υπολογισμό των δυνάμεων στο δακτύλιο.

Η ανάλυση που γίνεται στον κάθετο και οριζόντιο άξονα δίνει ότι η διατμητική τάση είναι

$$T = m\omega^2 \frac{(R - r_o)\alpha(\sin(\theta) - \mu \cos(\theta))}{r_o(\sin(\theta) - \mu \cos(\theta)) + \alpha \cos(\theta) + \mu \sin(\theta) - \mu r_i} \quad (2.2.3)$$

ενώ η κάθετη δύναμη πίεσης υπολογίζεται από τον τύπο

$$P = m\omega^2(R - r_o) \frac{r_o(\sin(\theta) - \mu \cos(\theta)) - \mu r_i}{r_o(\sin(\theta) - \mu \cos(\theta)) + \alpha \cos(\theta) + \mu \sin(\theta) - \mu r_i} \quad (2.2.4)$$

όπου m η συνολική μάζα των δακτυλίων, ω είναι η γωνιακή ταχύτητα και μ ο συντελεστής τριβής μεταξύ δακτυλίου και ράβδου. Ο υπολογισμός της μάζας των δακτυλίων γίνεται με τρόπο όπου ο αριθμός των δακτυλίων πάνω στη ράβδο να έχει ένα βαθμό πλήρωσης που να μην ξεπερνάει το 95% και ο συντελεστής τριβής είναι μεταξύ χάλυβα με χάλυβα οπότε λαμβάνεται 0.2[5].

Η ορθή τάση που δέχεται η ράβδος υπολογίζεται από το τύπο

$$F = \frac{m\omega^2\alpha(R - r_o)}{r_o(\sin(\theta) - \mu \cos(\theta)) + \alpha * \cos(\theta) + \mu \sin(\theta) - \mu r_i} \quad (2.2.5)$$

ενώ η δύναμη τριβής είναι

$$T_F = \mu F \quad (2.2.6)$$

2.2.3 Υπολογισμός συνολικής ισχύος μύλου

Η ροπή στρέψης που ασκείται στον άξονα υπολογίζεται από τον τύπο

$$M = m\omega^2\alpha \frac{(R - r_o)[l\sin(\varphi + \theta) - l\cos(\varphi + \theta) + \mu r]}{r_o(\sin(\theta) - \mu \cos(\theta)) + \alpha \cos(\theta) + \mu \sin(\theta) - \mu r_i} \quad (2.2.7)$$

ενώ η ισχύς λειοτριβήσης είναι το γινόμενο της ροπής επί την γωνιακή ταχύτητα ω οπότε

$$N = M\omega \quad (2.2.8)$$

Με όλους τους παραπάνω τύπους μπορεί να γίνει η βασική διαστασιολόγηση του μύλου ώστε να υπάρχουν τα βασικά μεγέθη για τον υπολογισμό των επόμενων συντελεστών.

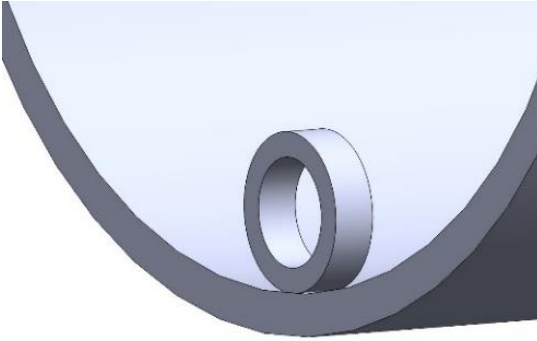
2.3 Επιφανειακές τάσεις

Κατά την λειτουργία του μύλου εμφανίζονται επιφανειακές τάσεις μεταξύ του δακτυλίου και του στάτη στην περίπτωση που δεν υπάρχει σωματίδιο για λειοτριβήση και ανάμεσα στο δακτύλιο και στην ράβδο. Ο υπολογισμός θα γίνει κατά την θεωρία Hertz. Έχοντας γνωστές τις επιφανειακές τάσεις και βάση της προδιαγραφής που έχει τεθεί για την μέγιστη επιφανειακή τάση θα μπορεί να γίνει ο σχεδιασμός των αλεστικών σωμάτων ώστε να μην διαρρέει το υλικό.

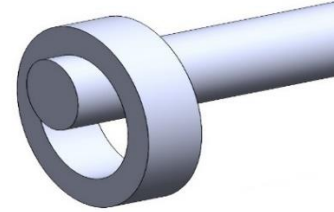
Αρχικά υπολογίζονται οι επιφανειακές τάσεις για την περίπτωση που ο δακτύλιος έρχεται σε επαφή κατά γενέτειρα στην εσωτερική επιφάνεια του στάτη ή την εξωτερική επιφάνεια της ράβδου και έπειτα γίνεται ο υπολογισμός για την περίπτωση που γίνεται επαφή κατά σημείο των προαναφερόμενων επιφανειών.

2.3.1 Επιφανειακές τάσεις για την περίπτωση που ο δακτύλιος έρχεται σε επαφή κατά γενέτειρα

Σε αυτή την περίπτωση ο δακτύλιος έρχεται σε επαφή στο στάτη ή στη ράβδο με τον εξής τρόπο:

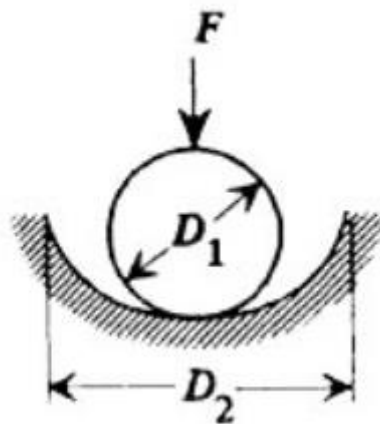


Εικόνα 2.3.1.1 Επαφή δακτυλίου με στάτη κατά γενέτειρα



Εικόνα 2.3.1.2 Επαφή δακτυλίου με ράβδο κατά γενέτειρα

Μεταξύ του δακτυλίου και της ράβδου έχουμε επαφή κοίλου δακτυλίου με κυρτή ράβδο και μήκος w το πλάτος του δακτυλίου. Η επιφάνεια επαφής είναι ορθογωνική με παραβολική κατανομή πίεσης ενώ η ακτίνα καμπυλότητας είναι μια.



Εικόνα 2.3.1.3 Επαφή κοίλου-κυρτού

Αρχικά υπολογίζεται το μισό του πλάτους b της ορθογωνικής επιφάνειας από τον τύπο

$$b = \sqrt{\frac{4F \left[\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right]}{\pi w R'}} \quad (2.3.1)$$

όπου E_1, E_2 τα μέτρα Young κάθε υλικού και ν_1, ν_2 οι λόγοι Poisson του κάθε υλικού. Στην περίπτωση μας τα 2 υλικά είναι ίδια από χάλυβα οπότε $E_1 = E_2 = 210 \text{ GPa}$ και $\nu_1 = \nu_2 = 0.303$. Το R' είναι η ενεργή ακτίνα και ισούται με

$$R = \frac{1}{r_i} - \frac{1}{r} \quad (\text{Το μείον μπαίνει επειδή έχουμε επαφή κυρτού-κοίλου}). \quad (2.3.2)$$

Η μέγιστη πίεση επιφανείας υπολογίζεται από το τύπο

$$P_{max} = \frac{2F}{\pi bw} \quad (2.3.3)$$

Έπειτα υπολογίζονται οι τάσεις σε κάθε άξονα από τους τύπους

$$\sigma_x = -2\nu P_{max} \sqrt{1 + \frac{z^2}{b^2}} - \left| \frac{z}{b} \right| \quad (2.3.4)$$

$$\sigma_y = -P_{max} + \frac{2\frac{z^2}{b^2}}{\sqrt{1 + \frac{z^2}{b^2}}} - \left| \frac{z}{b} \right| \quad (2.3.5)$$

$$\sigma_z = -P_{max} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{z^2}{b^2}}}$$

όπου το z είναι το βάθος κάτω από την επιφάνεια και λαμβάνεται περίπου ίσο με $0.48b$. Από τον κύκλο του Mohr οι διατμητικές τάσεις είναι

$$t_{xz} = \frac{\sigma_x - \sigma_z}{2} \quad (2.3.7)$$

$$t_{yz} = \frac{\sigma_y - \sigma_z}{2} \quad (2.3.8)$$

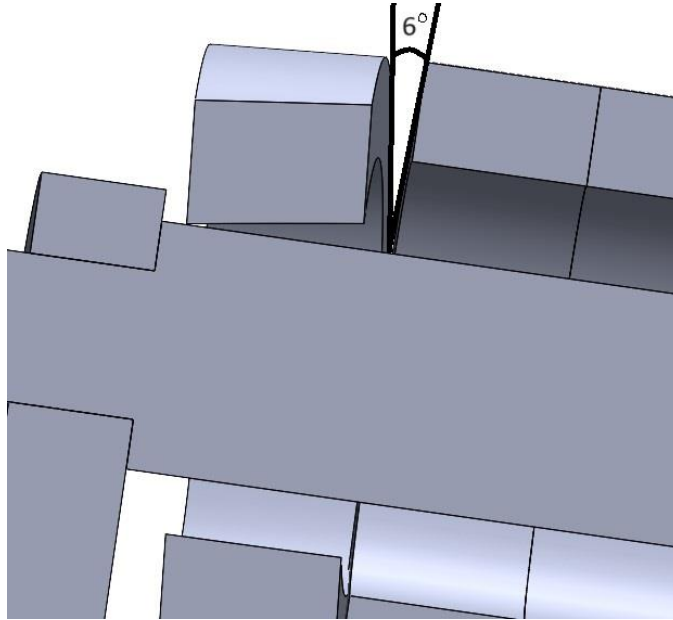
Για την περίπτωση μεταξύ δακτυλίου και στάτη η προσέγγιση είναι ίδια με την διαφορά ότι η δύναμη μεταξύ των σωμάτων είναι P .

2.3.2 Επιφανειακές τάσεις για την περίπτωση σημειακής επαφής του δακτυλίου με στάτη/ράβδο

Επειδή οι δακτύλιοι κινούνται ελεύθερα πάνω στη ράβδο κατά την λειτουργία του μύλου ενώ σύγχρονος η ράβδος δεν είναι τελείως πληρωμένη με δακτυλίους η μεταφορική κίνηση των δακτυλίων ως προς την αξονική κατεύθυνση της ράβδου δημιουργεί ένα διάκενο μεταξύ αυτών. Το διάκενο αυτό δίνει την

δυνατότητα κάποιοι δακτύλιοι να αποκτήσουν μια μικρή γωνία μειώνοντας σημαντικά την επιφάνεια επαφής. Λόγω του αρχικού σχεδιασμού των δακτυλίων όπου οι εσωτερικές και εξωτερικές ακμές δεν έχουν ακτίνα καμπυλότητας, στην περίπτωση που ο δακτύλιος έρθει σε επαφή είτε με το στάτη είτε με τη ράβδο έχοντας γωνία δημιουργείται σημειακή επαφή με ακμή όπου οδηγεί σε απειρισμό των τάσεων.

Η γωνία είναι σχετικά μικρή και δεν ξεπερνάει τις 8 μοίρες. Για τον πρωτότυπο μύλο η μέγιστη γωνία είναι 6 μοίρες



Εικόνα 2.3.2.1 Επαφή δακτυλίου με την ακμή του

Όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες η φθόρα στο στάτη είναι τόσο μεγάλη που εμφανίζεται pitting.



Εικόνα 2.3.2.3 Φθορά στάτη

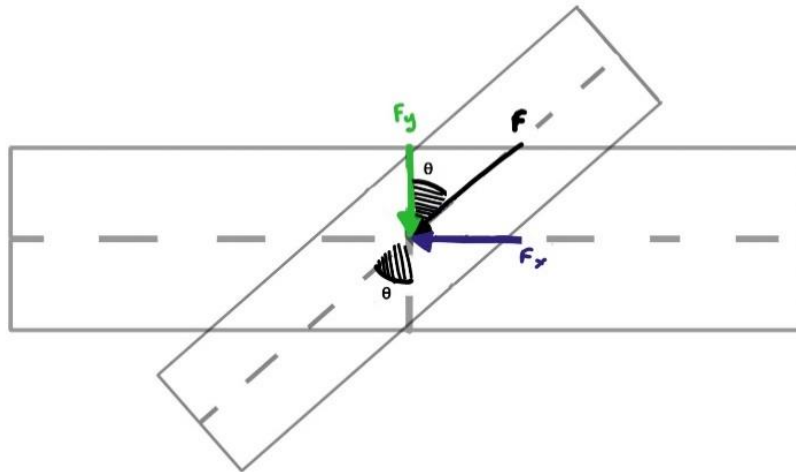
Ενώ η φθορά στους δακτύλιους παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες



Εικόνα 2.3.2.2 Φθορά δακτυλίων

Για την αποφυγή αυτού του φαινομένου, γίνεται μια νέα διαμόρφωση όπου ο δακτύλιος θα έχει μπομπέ διαμόρφωση με ακτίνα καμπυλότητας την ακτίνα που θα υπολογιστεί από την ανάλυση των επιφανειακών τάσεων.

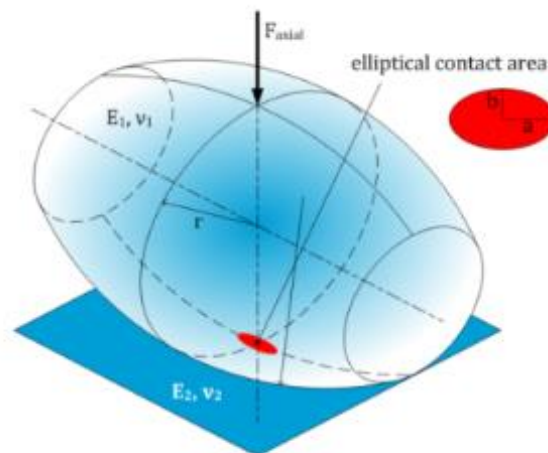
Επειδή ο δακτύλιος έρχεται σε επαφή με γωνία θ στο στάτη ή στη ράβδο, κάνοντας την στατική ανάλυση η κάθετη δύναμη που δέχεται ο στάτης και η ράβδος είναι $P' = P \cos(\theta)$ και $F' = F \cos(\theta)$ αντιστοίχως.



Εικόνα 2.3.2.4 Εφαρμογή δύναμης σε σημειακή επαφή

Επειδή η γωνία θ είναι μικρή $\cos(\theta) \cong 1$

Σε αυτές τις περιπτώσεις η επιφάνεια επαφής είναι ελλειπτική



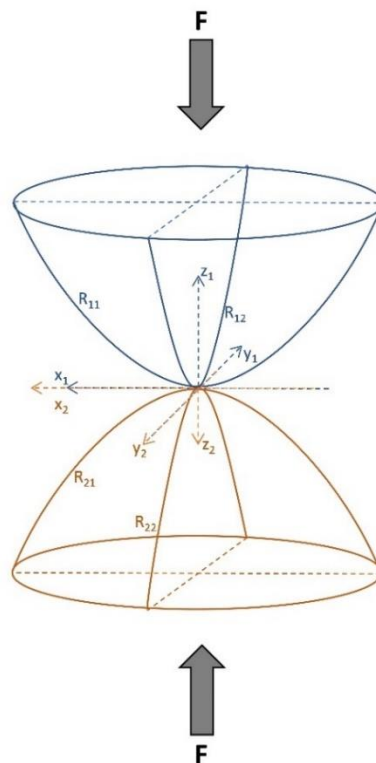
Εικόνα 2.3.2.5 Ελλειπτική επιφάνεια επαφής[9]

Στη θεωρία του Hertz οι δύο επιφάνειες έρχονται σε επαφή με τέτοιο τρόπο ώστε η ορθή επιφάνεια στο σημείο επαφής είναι προσανατολισμένη στην κατεύθυνση της συμπίεσης και παράλληλη μεταξύ τους. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων με αρχή το σημείο επαφής.

Για τους υπολογισμούς αρχικά υπολογίζονται οι δυο θετικές σταθερές A,B από τις ακτίνες καμπυλότητας της επιφάνειας.

$$B + A = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{21}} + \frac{1}{R_{22}} \right) \quad (2.3.10)$$

$$B - A = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{R_{11}} - \frac{1}{R_{12}} \right)^2 + \left(\frac{1}{R_{21}} - \frac{1}{R_{22}} \right)^2 + 2 \left(\frac{1}{R_{11}} - \frac{1}{R_{12}} \right) \left(\frac{1}{R_{21}} - \frac{1}{R_{22}} \right) \cos(2\beta) \right]^{0.5} \quad (2.3.11)$$



Εικόνα 2.3.2.6 Ακτίνες καμπυλότητας[10]

Η σταθερά β υποδηλώνει τη γωνία μεταξύ των δύο κανονικών επιπέδων που περιέχουν τις ορθές καμπυλότητες R_1 και R_2 . Ο παρακάτω πίνακας αναλόγως τα σώματα που έρχονται σε επαφή χρησιμεύει στην εύρεση των A, B

| Type of contact | A | B | A/B |
|--|-----------------------------------|-----------------------------------|---|
| Body 1: Sphere of radius R_1 Body 2: Sphere of radius R_2 | $\frac{1}{2R_1} + \frac{1}{2R_2}$ | $\frac{1}{2R_1} + \frac{1}{2R_2}$ | 1 |
| Body 1: Sphere of radius R_1 Body 2: plane surface | $\frac{1}{2R_1}$ | $\frac{1}{2R_2}$ | 1 |
| Body 1: Cylinder of radius R_1 Body 2: Cylinder of radius R_2 , placed crosswise to body 1 | $\frac{1}{2R_1}$ | $\frac{1}{2R_2}$ | $\frac{R_2}{R_1}$ |
| Body 1: Sphere of radius R_1 Body 2: Cylinder of radius R_2 | $\frac{1}{2R_1}$ | $\frac{1}{2R_1} + \frac{1}{2R_2}$ | $\frac{R_2}{R_1 + R_2}$ |
| Body 1: Sphere of radius R_1 Body 2: Cylindrical cup of radius R_2 ; $R_2 > R_1$ | $\frac{1}{2R_1} - \frac{1}{2R_2}$ | $\frac{1}{2R_1}$ | $\frac{R_2 - R_1}{R_2}$ |
| Body 1: Sphere of radius R_1 Body 2: Spherical cup of radius R_2 ; $R_2 > R_1$ | $\frac{R_2 - R_1}{2R_1 R_2}$ | $\frac{R_2 - R_1}{2R_1 R_2}$ | 1 |
| Body 1: Sphere of radius R_1 Body 2: Surface of rotation with principal radii R_2 and R_3 ; $R_2 > R_1$ | $\frac{1}{2R_1} - \frac{1}{2R_2}$ | $\frac{1}{2R_1} + \frac{1}{2R_3}$ | $\frac{1 - \frac{R_1}{R_2}}{1 - \frac{R_1}{R_3}}$ |

Πίνακας 2.3.2.1 Υπολογισμός A, B

Για την επαφή δακτυλίου-στάτη θεωρείται επαφή σφαίρας με εσωτερική κοιλότητα. Τα A, B για αυτή την περίπτωση είναι

$$A = \frac{1}{2r_{ring}} - \frac{1}{2R} \text{ και } B = \frac{1}{2r_{ring}} \quad (2.3.12)$$

όπου r_{ring} είναι η ακτίνα καμπυλότητας του δακτυλίου. Στη συνέχεια υπολογίζεται η γωνία δ από το τύπο

$$\delta = \cos^{-1} \left(\frac{B - A}{A + B} \right) \quad (2.3.13)$$

και από τον παρακάτω πίνακα υπολογίζονται οι σταθερές c_1, c_2

| δ (degrees) | c_1 | c_2 | δ (degrees) | c_1 | c_2 |
|--------------------|----------|-------|--------------------|-------|-------|
| 0 | ∞ | 0 | 35 | 2.37 | 0.53 |
| 0.5 | 61.4 | 0.1 | 40 | 2.13 | 0.56 |
| 1 | 36.8 | 0.13 | 45 | 1.92 | 0.6 |
| 1.5 | 27.48 | 0.15 | 50 | 1.75 | 0.64 |
| 2 | 22.26 | 0.16 | 55 | 1.61 | 0.67 |
| 3 | 16.5 | 0.19 | 60 | 1.48 | 0.717 |
| 4 | 13.31 | 0.21 | 65 | 1.37 | 0.75 |
| 6 | 9.79 | 0.25 | 70 | 1.28 | 0.8 |
| 8 | 7.86 | 0.28 | 75 | 1.2 | 0.84 |
| 10 | 6.6 | 0.31 | 80 | 1.12 | 0.89 |
| 20 | 3.77 | 0.4 | 85 | 1.06 | 0.94 |
| 30 | 2.731 | 0.49 | 90 | 1 | 1 |

Πίνακας 2.3.2.2 Υπολογισμός γωνίας δ , σταθερών c_1, c_2

Έχοντας τα A, B, c_1, c_2 υπολογίζονται οι ακτίνες a, b

$$a = c_1 \left(\frac{3F}{2E(A+B)} \right)^{1/3} \quad (2.3.14)$$

$$b = c_1 \left(\frac{3F}{2E(A+B)} \right)^{1/3} \quad (2.3.15)$$

ενώ η μέγιστη πίεση Hertz είναι

$$P_{max} = \frac{3F'}{2\pi ab} [9] \quad (2.3.16)$$

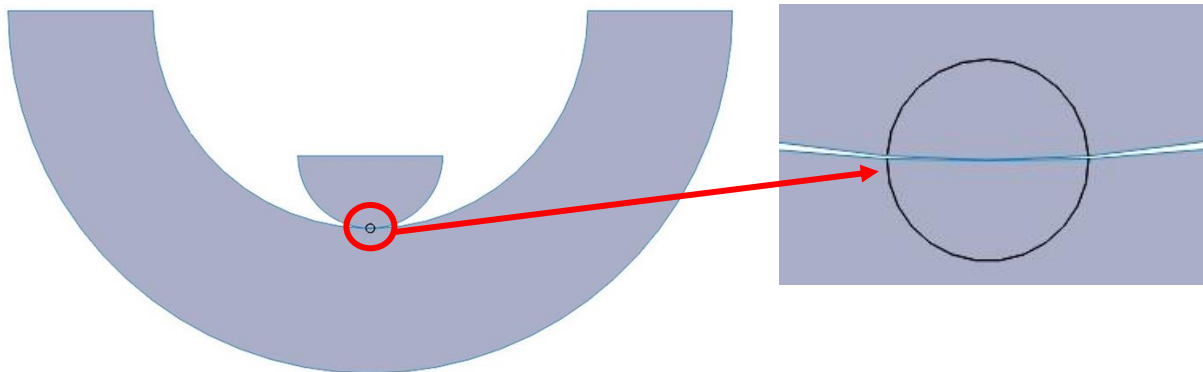
Ο υπολογισμός των τάσεων γίνεται από τους τύπους 2.3.4 έως 2.3.8

Στην επαφή δακτυλίου-στάτη θεωρείται ο ίδιος τύπος επαφής με τη διαφορά πάλι ότι δέχεται τη δύναμη P οπότε ο αλγόριθμος υπολογισμού των τάσεων παραμένει ίδιος με αυτόν της προηγούμενης περίπτωσης.

Όλοι οι παραπάνω υπολογισμοί εισάχθηκαν στο υπολογιστικό πρόγραμμα MATLAB για άμεσους υπολογισμούς και να πραγματοποιηθεί ο συσχετισμός με τους θεωρητικούς υπολογισμούς του κεφαλαίου 2.2 για τις δυνάμεις που δέχονται τα εξαρτήματα του μύλου αλλά και με τις διαστάσεις αυτού.

2.3.3 Ανάλυση επιφανειακών τάσεων με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Για να βρεθεί η ακρίβεια των αναλυτικών υπολογισμών γίνεται ο υπολογισμός των επιφανειακών τάσεων για την περίπτωση που ο δακτύλιος έρχεται σε επαφή με το σάτη ή τη ράβδο με γωνία με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Η προσομοίωση θα γίνει στο λογισμικό ANSYS WORKBENCH με στατική ανάλυση στο δισδιάστατο χώρο. Αρχικά σχεδιάζεται η γεωμετρία των επιφανειακών στο SOLIDWORKS ενώ στο σημείο επαφής σχεδιάζεται ένας μικρός κύκλος ακτίνας ίσης με την ακτίνα α .



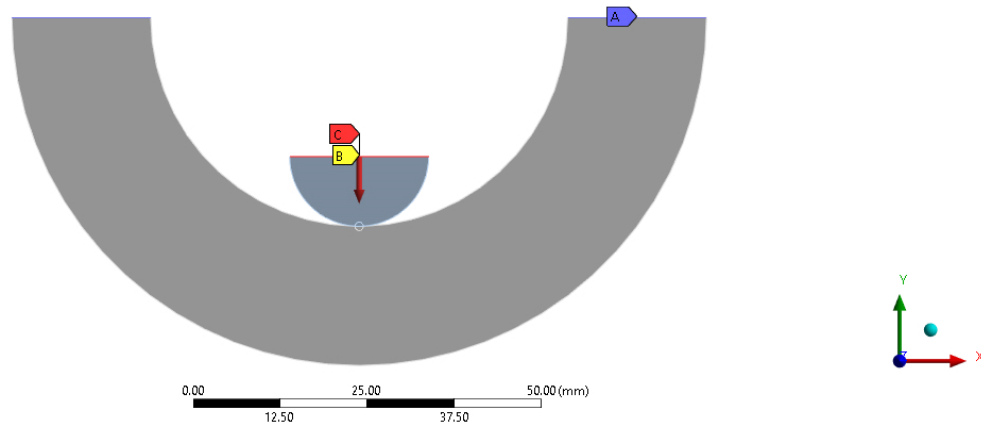
Εικόνα 2.3.3.1 Σχεδιασμός 2D γεωμετρίας

Στη συνέχεια με την επιλογή split line χωρίζεται η επιφάνεια μεταξύ κοίλου-κυρτού και στον μικρό κύκλο. Η επιλογή της διαμέτρου του κύκλου γίνεται σύμφωνα με την καταρχήν εκτίμηση της ζώνης επαφής 2α σύμφωνα με τη θεωρία του Hertz. Αυτό συμβαίνει ώστε να ξεχωριστεί ως διαφορετική επιφάνεια η επιφάνεια επαφής και να επικεντρωθεί σε αυτή την περιοχή η δημιουργία πλέγματος.

Έπειτα εισάγεται το μοντέλο στο ANSYS και ορίζονται οι οριακές συνθήκες. Γίνεται πάκτωση στις δυο πάνω άκρες της κοίλης επιφάνειας (μπλε περιοχή - A) ενώ τοποθετείται μια κύλιση πάνω στην άκρη της κυρτής επιφάνειας ώστε να περιοριστεί η κίνηση μόνο στον κατακόρυφο άξονα(περιοχή B). Τέλος εισάγεται στην ίδια επιφάνεια η δύναμη όπου για όλες τις περιπτώσεις ασκείται δύναμη 2kN.

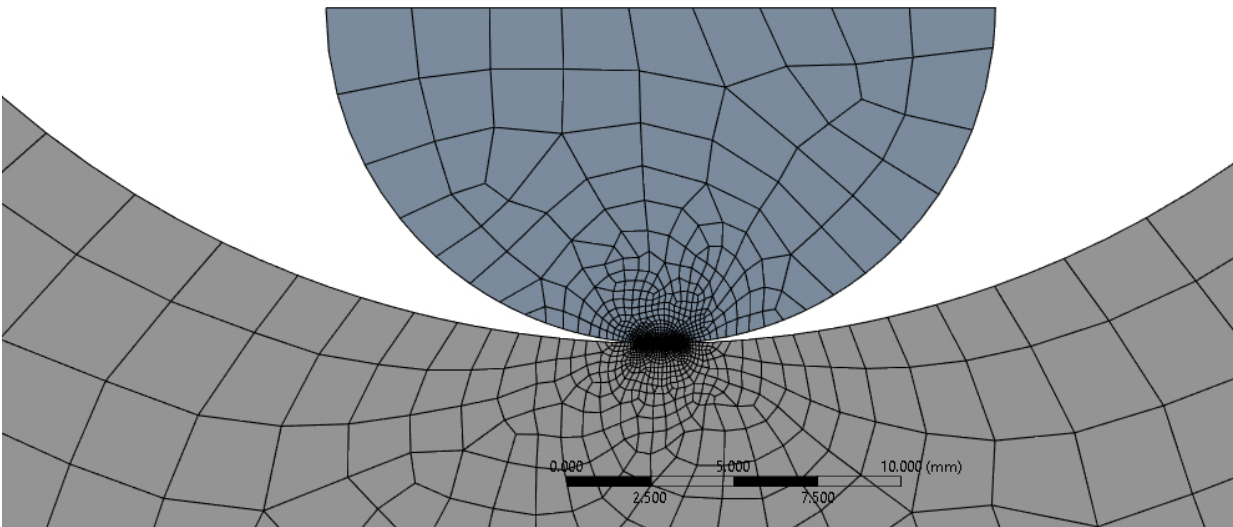
A: Static Structural
Static Structural
Time: 1. s

- Fixed Support
- Displacement
- Force: 2000. N



Εικόνα 2.3.3.2 Συνοριακές συνθήκες 2D ανάλυσης

Όσο αφορά το πλέγμα γίνεται επιλογή μεγέθους στοιχείων στις άκρες του μικρού κύκλου που αντιπροσωπεύουν την επιφάνεια επαφής. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται να δημιουργηθεί πολύ πυκνό πλέγμα στο σημείο επαφής των σωμάτων και πιο αραιό στην υπόλοιπη περιοχή. Πραγματοποιώντας αυτό μειώνεται σε μεγάλο βαθμό η υπολογιστική ανάγκη του προβλήματος διότι θα ακολουθηθεί επαναληπτική διαδικασία, καταφέροντας να πραγματοποιηθεί σε μικρότερο χρόνο. Το μέγεθος το στοιχείων στο σημείο επαφής επιλέγεται στο 1 μm ενώ στο όριο της περιοχής της επαφής το μέγεθος στοιχείων αυξάνεται μέχρι τα 5 μm .

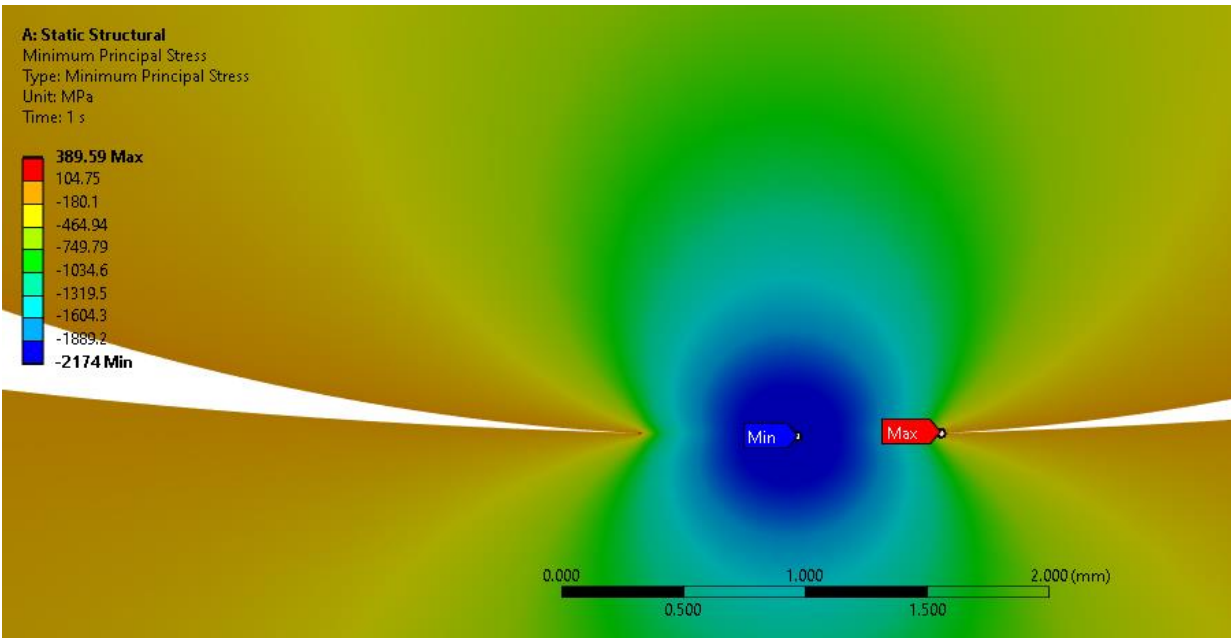


Εικόνα 2.3.3.3 Πλέγμα γεωμετρίας 2D

Ο τύπος επαφής θεωρείται χωρίς τριβές διότι η ύπαρξη τριβής σε ένα ελαστικό πρόβλημα όπως τον επιφανειακών τάσεων θα μειώσει την επιφάνεια επαφής που δημιουργείται με βάση την ακτίνα α . Η χρήση τριβής δεν θα επιτρέπει στα σώματα να έρθουν σε πλήρη επαφή κατά την ανάλυση οπότε αυτό θα οδηγούσε σε εσφαλμένα αποτελέσματα.

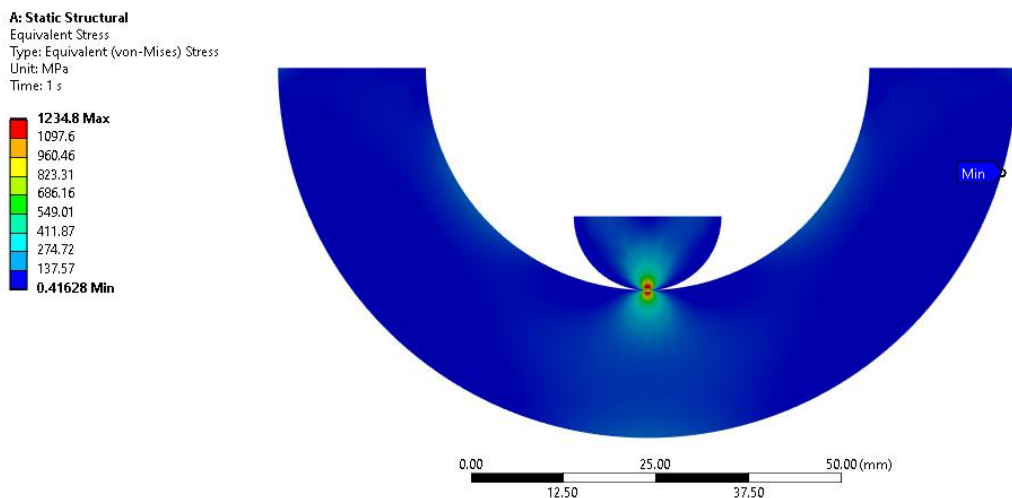
Η τελευταία παραδοχή που γίνεται στην ανάλυση είναι η συμπεριφορά της γεωμετρίας σε plain strain διότι ο δακτύλιος έχει ένα πάχος στην τρίτη διάσταση που δεν εφαρμόζεται στο πρόβλημα της παραπάνω γεωμετρίας.

Οι διαδικασίες αυτές γίνονται για διαφορετικές ακτίνες στάτη, δακτυλίου και ράβδου. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν σε κάθε επανάληψη έχουν την μορφή:



Εικόνα 2.3.3.4 Αποτελέσματα επιφανειακών τάσεων με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Παρατηρείται ότι εμφανίζεται το παραβολικό προφίλ της κατανομής των τάσεων όπως ορίζει η θεωρία του Hertz. Η θετική τάση που εμφανίζεται είναι λόγω των καμπτικών ροπών που εμφανίζονται στην γεωμετρία και δημιουργούν εφελκύστηκες τάσεις. Κανονικά οι τάσεις αυτές είναι σχεδόν μηδαμινές και αυτό επιβεβαιώνεται στα αποτελέσματα των τάσεων von mises



Εικόνα 2.3.3.5 Επιφανειακές τάσεις von mises

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις διάφορες ακτίνες φαίνονται στο παρακάτω πίνακα.

| | | | | |
|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Rod radius[mm] | 10 | 15 | 20 | 25 |
| Ring curvature radius[mm] | 30 | 40 | 50 | 60 |
| σ_{fea} [MPa] | -2216.00 | -1871.00 | -1426.00 | -1261.00 |
| $\sigma_{analytical}$ [MPa] | -2496.00 | -1873.00 | -1387.00 | -1297.00 |
| c | 1.13 | 1.00 | 0.97 | 1.03 |
| Stator Radius[mm] | 200 | 250 | 300 | 400 |
| Ring curvature radius[mm] | 30 | 35 | 50 | 80 |
| σ_{fea} [MPa] | -1383.00 | -1144.00 | -990.00 | -668.00 |
| $\sigma_{analytical}$ [MPa] | -1296.00 | -1117.00 | -915.00 | -631.00 |
| c | 0.94 | 0.98 | 0.92 | 0.94 |

Πίνακας 2.3.3.1 Συγκριτικά αποτελέσματα επιφανειακών τάσεων

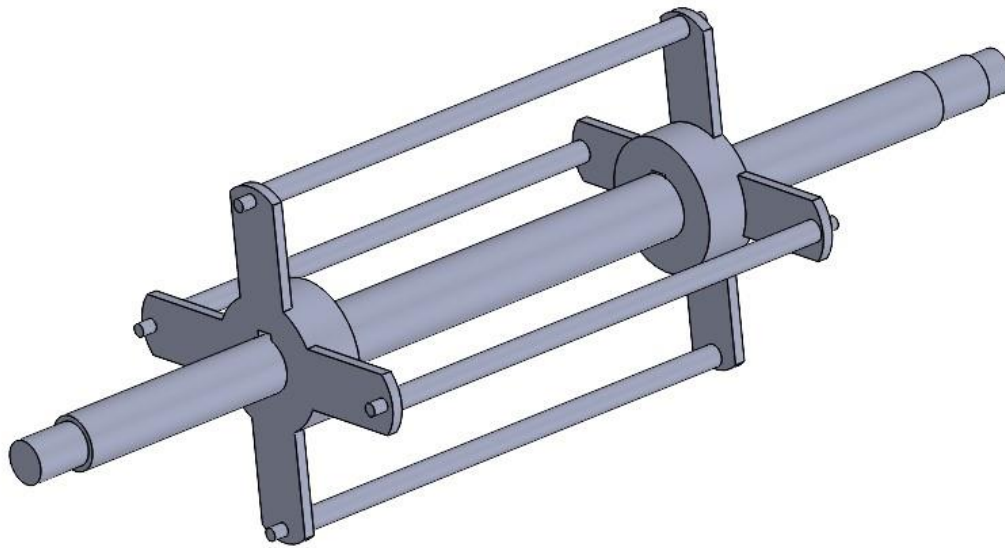
Οι τάσεις του πίνακα είναι οι ελάχιστες κύριες. Ο συντελεστής c είναι ο λόγος των τάσεων που προκύπτουν από την αναλυτική λύση προς τις τάσεις που προκύπτουν από τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Γίνεται εμφανής ότι η μέγιστη απόκλιση που είναι 11% συμβαίνει διότι το μέγεθος το στοιχείων στην προσομοίωση δεν ήταν αρκετά μικρό για υπολογίσει με ακρίβεια την τάση. Στις υπόλοιπες προσομοιώσεις που υπάρχουν μεγαλύτερες ακτίνες η απόκλιση δεν ξεπερνάει το 5.5% οπότε επειδή η αναλυτική μέθοδος έχει ικανοποιητική ακρίβεια με συγκρινόμενη με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων ο υπολογισμός τους θα γίνεται αναλυτικά κατά το σχεδιασμό για μείωση υπολογιστικού χρόνου.

2.4 Υπολογισμός βέλους κάμψης, αζυγοσταθμίας και ιδιοσυχνοτήτων.

Σημαντικά μεγέθη που πρέπει να υπολογιστούν κατά το σχεδιασμό είναι το βέλος κάμψης, η αζυγοσταθμία του συστήματος και κατά επέκταση τις ιδιοσυχνότητες του συστήματος ώστε να μην υπάρχει ο κίνδυνος να εμφανιστεί συντονισμός του συστήματος κατά την λειτουργία του σε ένα εύρος στροφών. Για αυτό τον λόγο δημιουργήθηκε ένας αλγόριθμος υπολογισμού όλων των παραπάνω.

2.4.1 Υπολογισμός Βέλους κάμψης

Αρχικά για τον υπολογισμό του βέλους κάμψης δημιουργείται ένα συναρμολόγημα στο SOLIDWORKS το οποίο θα έχει τα περιστρεφόμενα μέρη που είναι ο άξονας, οι ράβδοι και οι βραχίονες. Οι δακτύλιοι δεν τοποθετούνται διότι περιστρέφονται ελεύθερα πάνω στις ράβδους και είναι δύσκολο μοντελοποιηθούν για τον υπολογισμό. Το συναρμολόγημα είναι:



Εικόνα 2.4.1.1 Συναρμολόγημα για υπολογισμό βέλους κάμψης

Έπειτα εισάγεται το συναρμολόγημα στο ANSYS και χρησιμοποιείται στατική ανάλυση

Για οριακές συνθήκες χρησιμοποιούνται πακτώσεις στα σημεία που εδράζεται ο άξονας, γίνεται προσθήκη της βαρύτητας στον κάθετο άξονα και από την γεωμετρία των δακτυλίων και τον αριθμό τους σε κάθε ράβδο υπολογίζεται η δύναμη που θα δέχεται η κάθε ράβδος.

B: Static Structural

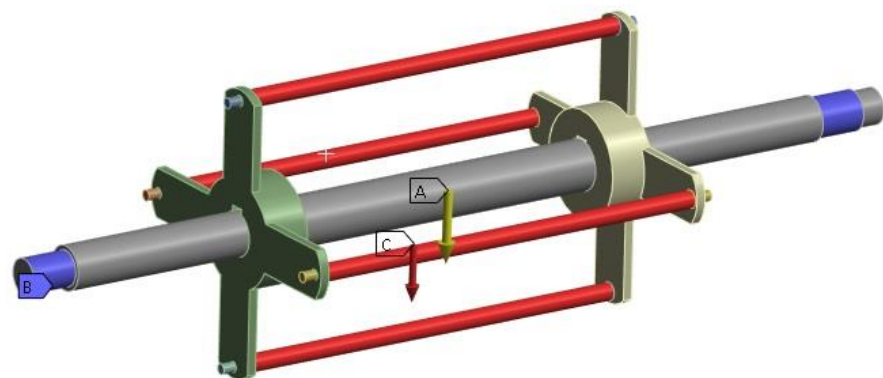
Static Structural

Time: 1, s

A Standard Earth Gravity: 9806,6 mm/s²

B Fixed Support

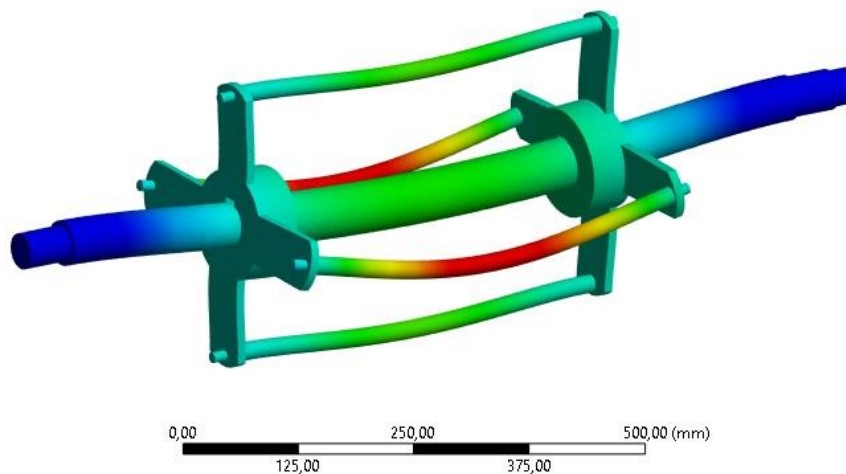
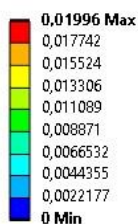
C Force: 65, N



Εικόνα 2.4.1.2 Οριακές συνθήκες υπολογισμού βέλους κάμψης

Για το πλέγμα στον άξονα και στις ράβδους χρησιμοποιήθηκε η επιλογή multizone που δίνει ένα λείο πλέγμα στις κυλινδρικές γεωμετρίες χωρίς να αλλοιώνει την επιφάνεια. Τρέχοντας την προσομοίωση βρίσκεται το βέλος κάμψης της διάταξης

B: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s



Εικόνα 2.4.1.3 Βέλος κάμψης μύλου

2.4.2 Υπολογισμός Ιδιοσυχνοτήτων

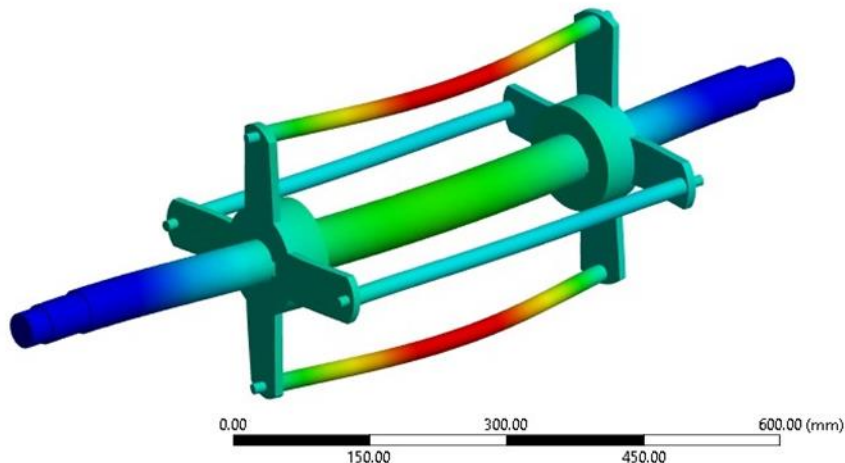
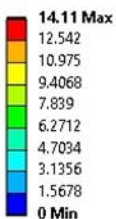
Κρατώντας την ίδια διάταξη με αυτή για τον υπολογισμό του βέλους κάμψης, γίνεται εισαγωγή του μοντέλου στο ANSYS modal. Για οριακές συνθήκες χρησιμοποιούνται στις εδράσεις του άξονα κυλινδρικές στηρίξεις με πακτωμένες όλες τις διευθύνσεις ενώ για πλέγμα γίνεται χρήση των ίδιων ρυθμίσεων με αυτές της προηγούμενης ανάλυσης. Μετά το πέρας της ανάλυσης υπολογίζονται οι ιδιοσυχνότητες. Τα αποτελέσματα είναι:

| Αριθμός ιδιοσυχνότητας | Συχνότητα(Hz) |
|------------------------|---------------|
| 1 | 188 |
| 2 | 188.75 |
| 3 | 194.21 |
| 4 | 263.95 |
| 5 | 284.68 |
| 6 | 284.95 |

Πίνακας 2.4.2.1 Ιδιοσυχνότητες μύλου

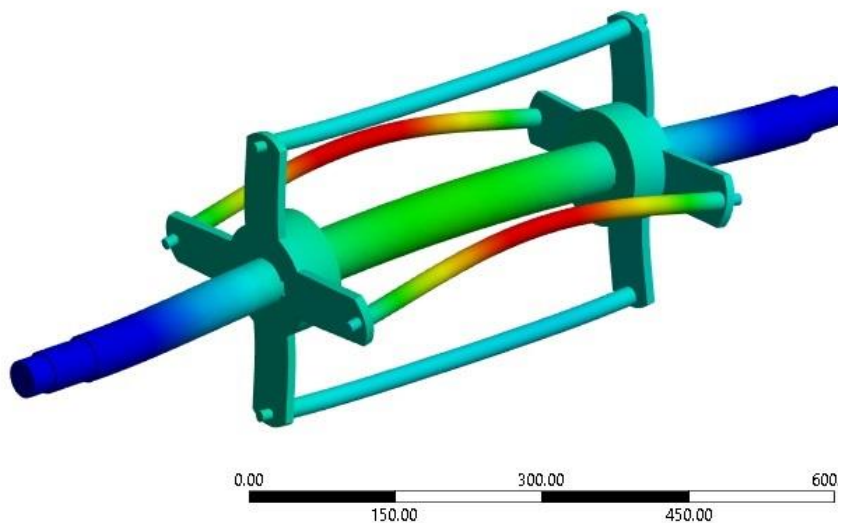
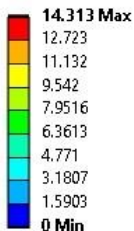
Αρχικά γίνεται η παρατήρηση ότι η πρώτη ιδιοσυχνότητα είναι στα 11280 rpm, συχνότητα πολύ απομακρυσμένη από την περιοχή λειτουργίας του μύλου, οπότε το σύστημα δεν διατρέχει κίνδυνο συντονισμού. Επιπροσθέτως γίνεται αντιληπτό πως οι πρώτες δυο ιδιοσυχνότητες μαζί με τις δυο τελευταίες είναι ίσες. Αυτό συμβαίνει διότι επρόκειτο για τις ίδιες ταλαντώσεις οι οποίες γίνονται σε διαφορετική διεύθυνση. Για τις πρώτες δυο οι ταλαντώσεις είναι:

C: Modal
Total Deformation
Type: Total Deformation
Frequency: 188.29 Hz
Unit: mm



Εικόνα 2.4.2.1 Πρώτη ιδιοσυχνότητα

C: Modal
Total Deformation 2
Type: Total Deformation
Frequency: 188.75 Hz
Unit: mm

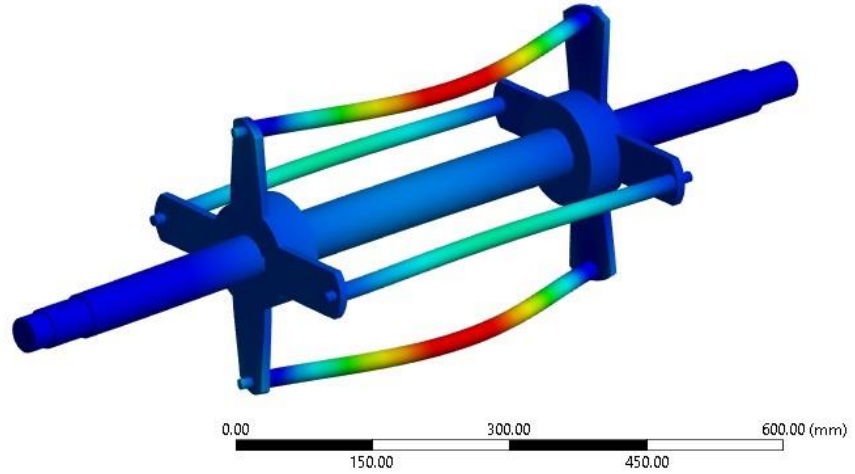
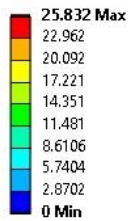


Εικόνα 2.4.2.1 Δεύτερη ιδιοσυχνότητα

Ενώ για τις 2 τελευταίες οι ταλαντώσεις είναι

C: Modal

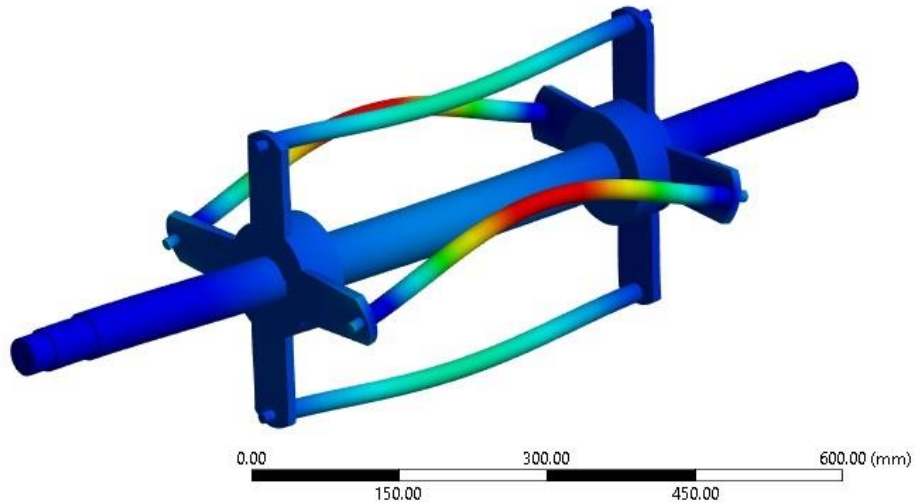
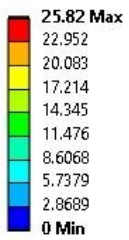
Total Deformation 5
Type: Total Deformation
Frequency: 284.68 Hz
Unit: mm



Εικόνα 2.4.2.3 Πέμπτη ιδιοσυχνότητα

C: Modal

Total Deformation 6
Type: Total Deformation
Frequency: 284.98 Hz
Unit: mm

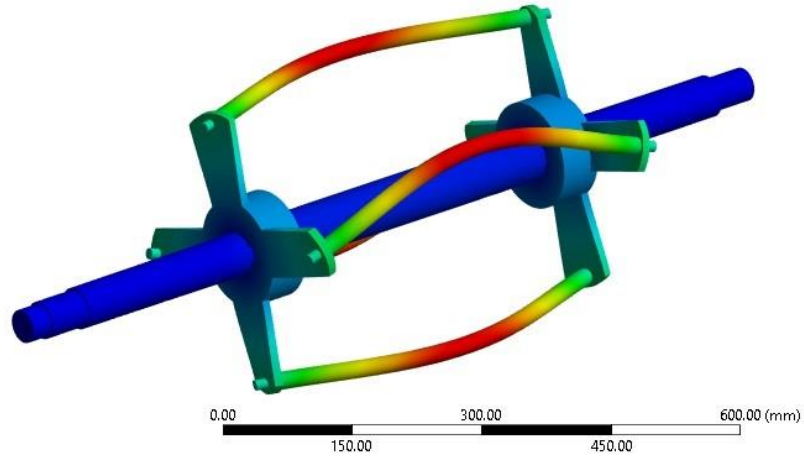
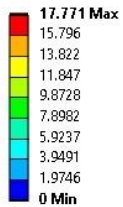


Εικόνα 2.4.2.4 Έκτη ιδιοσυχνότητα

Γίνεται αντιληπτό ότι οι παραπάνω ιδιοσυχνότητες είναι αυτές των ράβδων με την τελευταία ιδιοσυχνότητα να προκαλεί παραμόρφωση κυρίως στις πλάγιες ράβδους ομοίως με την παραμόρφωση λόγο βέλους κάμψης.

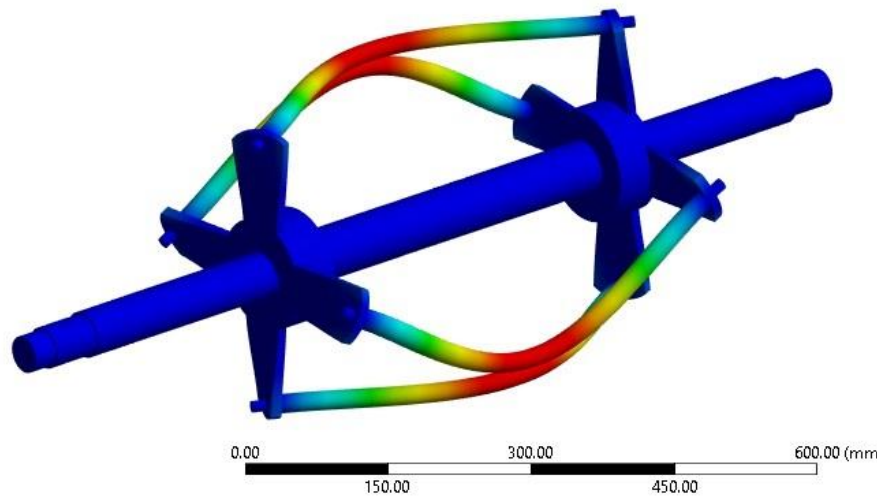
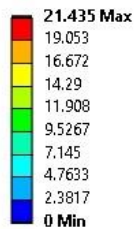
Οι υπόλοιπες δύο ιδιοσυχνότητες είναι οι στρεπτικές ταλαντώσεις του άξονα και των βραχιόνων.

C: Modal
Total Deformation 3
Type: Total Deformation
Frequency: 194.21 Hz
Unit: mm



Εικόνα 2.4.2.5 Τρίτη ιδιοσυχνότητα

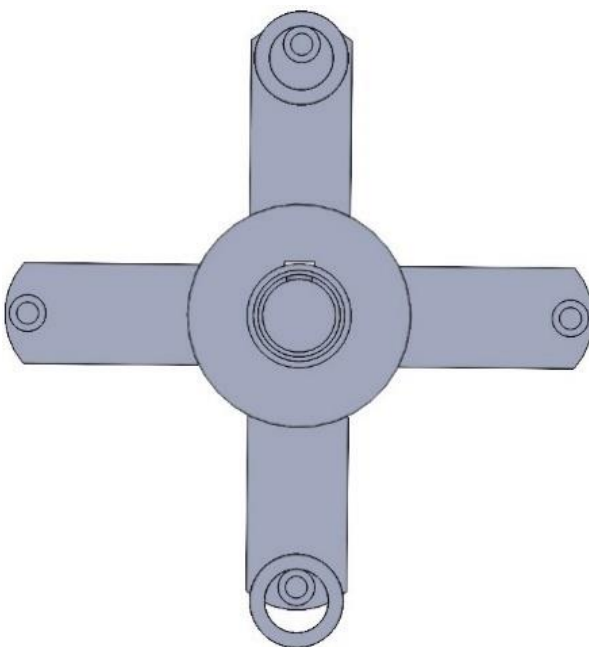
C: Modal
Total Deformation 4
Type: Total Deformation
Frequency: 263.95 Hz
Unit: mm



Εικόνα 2.4.2.6 Τέταρτη ιδιοσυχνότητα

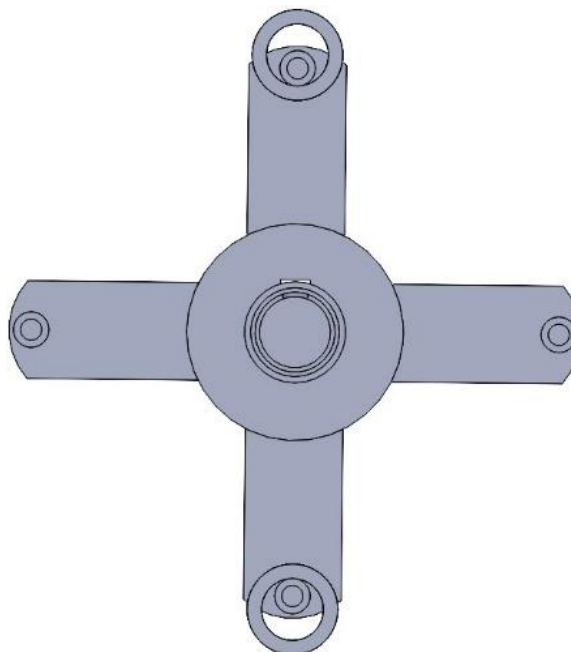
2.4.3 Υπολογισμός αζυγοσταθμίας

Κατά την λειτουργία του μύλου, οι δακτύλιοι οι οποίοι βρίσκονται στην πάνω σειρά μετακινούνται προς τα επάνω λόγω των φυγοκεντρικών δυνάμεων και μετατοπίζουν το κέντρο βάρους της κατασκευής. Αυτό το φαινόμενο προκαλεί αζυγοσταθμία στο σύστημα με πιθανότητα να δημιουργήσει διαφορετικές ιδιοσυχνότητες στο σύστημα. Για να υπάρχει η γνώση των ιδιοσυχνοτήτων στην περίπτωση αυτή μέσα από το SOLIDWORKS σχεδιάζεται η διάταξη με τους δακτυλίους στη θέση ισορροπίας τους και στην περίπτωση που έχουν μετακινηθεί όλοι προς τα πάνω. Έπειτα χρησιμοποιώντας την επιλογή mass properties που παρέχει το λογισμικό πραγματοποιείται ο υπολογισμός του κέντρου μάζας για κάθε περίπτωση.



Center of mass: (millimeters)
X = 98.75
Y = 280.51
Z = 472.82

Εικόνα 2.4.3.1 Κέντρο μάζας με τους δακτυλίους κάτω



Center of mass: (millimeters)
X = 98.79
Y = 281.90
Z = 472.82

Εικόνα 2.4.3.2 Κέντρο μάζας με τους δακτυλίους πάνω

Αφού είναι γνωστή η αλλαγή του κέντρου μάζας προστίθεται στον άξονα μια μάζα αζυγοσταθμίας η οποία μετατοπίζει το κέντρο μάζας του άξονα όσο μετατοπίζουν οι δακτύλιοι το κέντρο μάζας το συστήματος.



Εικόνα 2.4.3.3 Άξονας με μάζα αζυγοσταθμίας

Χρησιμοποιώντας την ίδια διάταξη με αυτή του που έγινε υπολογισμός των ιδιοσυχνοτήτων επαναλαμβάνεται η διαδικασία υπολογισμού των ιδιοσυχνοτήτων με τον άξονα να έχει την μάζα αζυγοσταθμίας. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι

| Συχνότητα χωρίς αζυγοσταθμία(Hz) | Συχνότητα με αζυγοσταθμία(Hz) | Δ Hz |
|----------------------------------|-------------------------------|-------------|
| 188 | 186.5 | 1.5 |
| 188.75 | 195.53 | -6.78 |
| 194.21 | 196.61 | -2.4 |
| 263.95 | 264.5 | -0.55 |
| 284.68 | 283.87 | 0.81 |
| 284.95 | 284.77 | 0.18 |

Πίνακας 2.4.3.1 Διαφορές ιδιοσυχνοτήτων βάση αζυγοσταθμίας

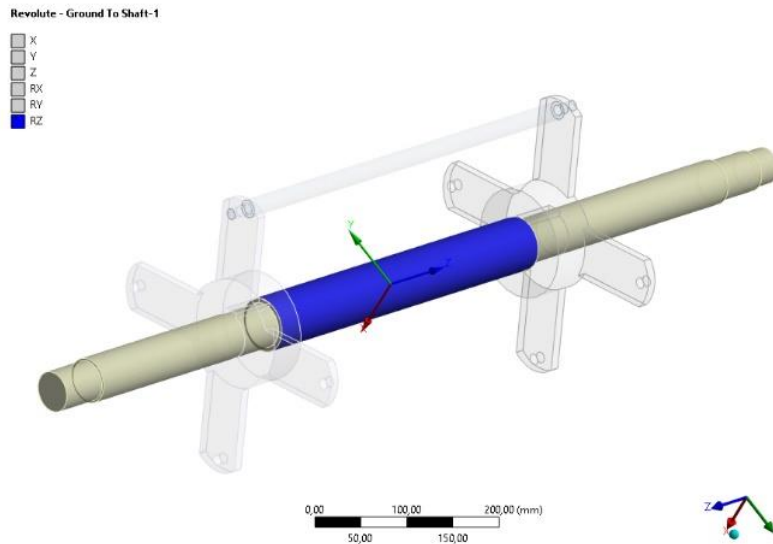
Παρατηρείται πώς οι ιδιοσυχνότητες του συστήματος αλλάζουν ελάχιστα λόγω της αζυγοσταθμίας, οπότε το σύστημα είναι ασφαλές από αζυγοσταθμία λόγω της αλλαγής του κέντρου μάζας.

2.5 Υπολογισμός τάσεων-παραμορφώσεων λόγω φυγοκεντρικών δυνάμεων

Το σύστημα επειδή κατά την λειτουργία του περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα που φτάνει τα 1000rpm και λόγω της μεγάλης μάζας του, εμφανίζονται τάσεις και παραμορφώσεις από τις φυγοκεντρικές δυνάμεις. Για τον υπολογισμό των παραπάνω εισάγεται η γεωμετρία του άξονα μαζί με τους βραχίονες και τη μια ράβδο στο ANSYS και γίνεται προσομοίωση μεταβατικής κατάστασης.

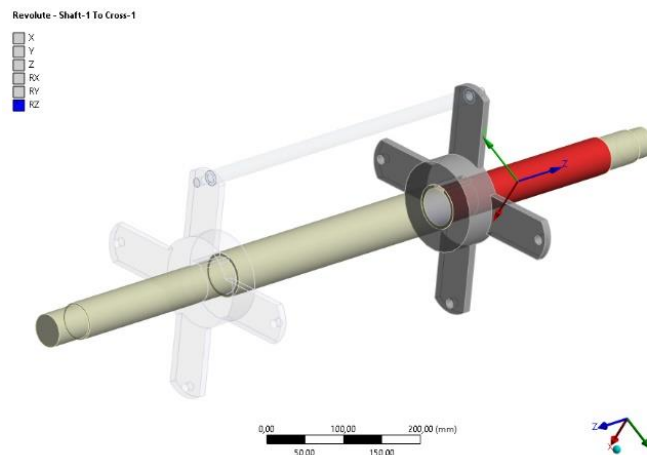
Αρχικά εισάγονται οι βαθμοί ελευθερίας των εξαρτημάτων. Οι βαθμοί ελευθερίας είναι:

1. Περιστροφικός μεταξύ άξονα και εδάφους



Εικόνα 2.5.1 Περιστροφικός βαθμός ελευθερίας μεταξύ άξονα-εδάφους

2. Περιστροφικός μεταξύ άξονα και βραχίονα

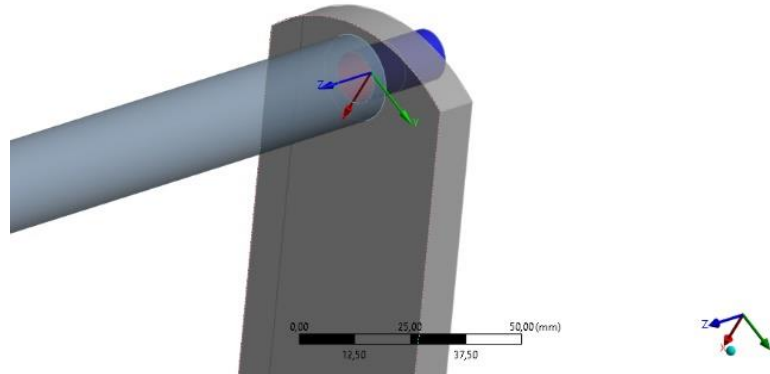


Εικόνα 2.5.2 Περιστροφικός βαθμός ελευθερίας μεταξύ άξονα-βραχίονα

3. Πάκτωση μεταξύ βραχίονα και ράβδου

Fixed - Cross-1 To rod-1

- X
- Y
- Z
- RX
- RY
- RZ



Εικόνα 2.5.3 Πάκτωση βραχίονα με ράβδο

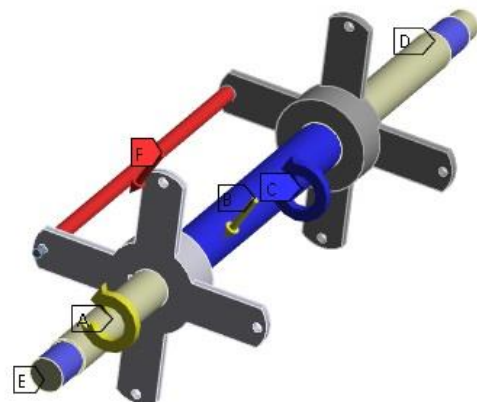
Σε όλα τα σημεία της επαφής γίνεται η θεώρηση ότι υπάρχει πάκτωση μεταξύ τους.

Οι οριακές συνθήκες του συστήματος είναι αρχικά η μέγιστη γωνιακή ταχύτητα του μύλου η οποία είναι τα 105 rad/s. Από τον τύπο 2.2.7 υπολογίζεται η ροπή του άξονα που είναι στα 65Nm. Χρησιμοποιείται βαρύτητα και για τον άξονα κυλινδρικές στηρίξεις με ελεύθερη την επαπτομενική διεύθυνση για την περιστροφή του άξονα. Τέλος προστίθενται στις ράβδους δύναμη ίση με το βάρος των δακτυλίων.

A: Transient Structural

Transient
Time: 1. s

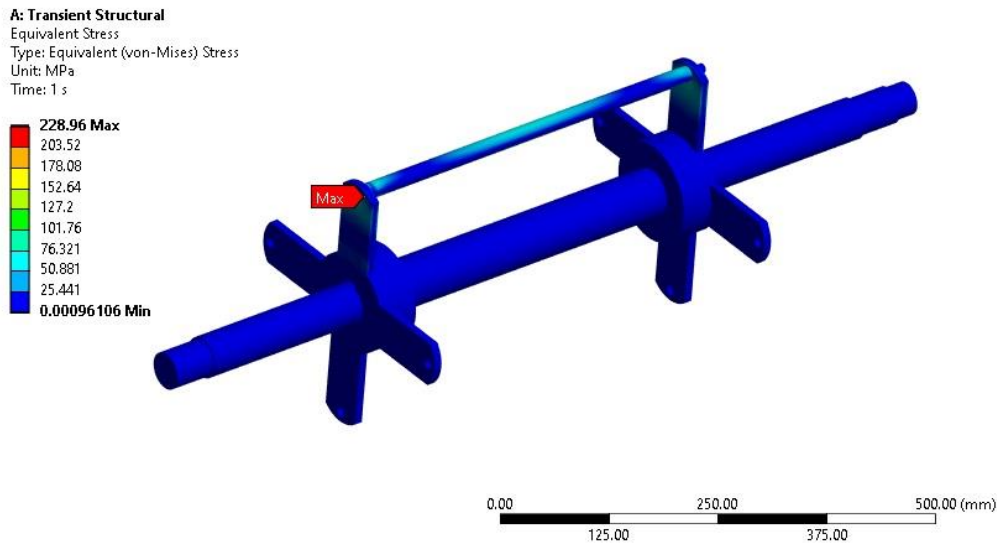
- A** Rotational Velocity: 105. rad/s
- B** Standard Earth Gravity: 9.8066 m/s²
- C** Joint - Moment: -160. N·m
- D** Cylindrical Support: 0. m
- E** Cylindrical Support 2: 0. m
- F** Force: 65. N



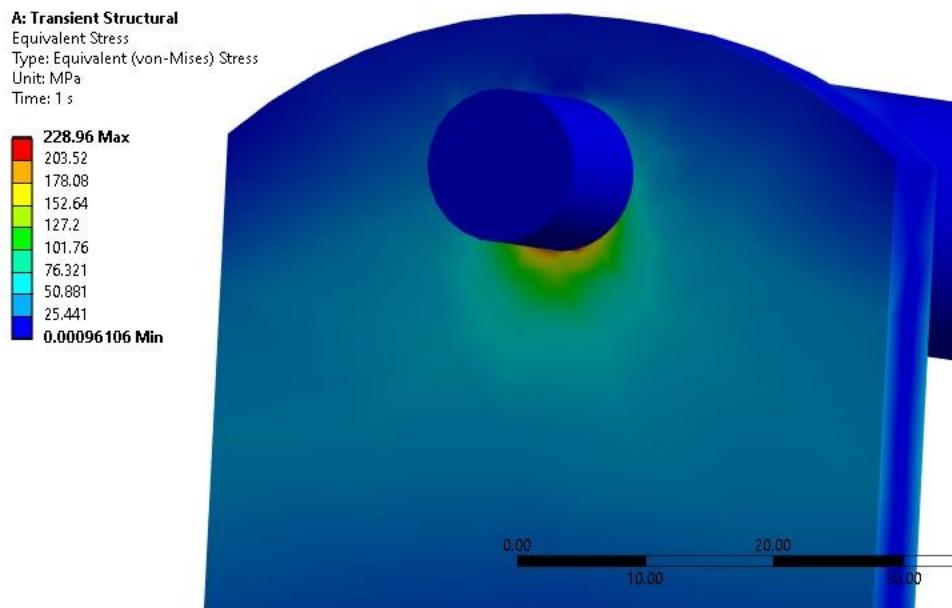
Εικόνα 2.5.4 Συνοριακές συνθήκες προσομοίωσης μεταβατικής κατάστασης

Για το πλέγμα χρησιμοποιείται πάλι η επιλογή multizone στα κυλινδρικά σώματα με μέγιστη ανάλυση. Τέλος για τον επιλυτή επιλέχθηκε αρχικό time step στα 0.05s, ελάχιστο time step στα 0.005s και μέγιστο στα 0.05s ώστε οι συνθήκες προσομοίωσης να εφαρμόζονται πιο στρωτά στους κόμβους και να μην γίνονται απότομες αλλαγές στις ταχύτητες τους.

Τα αποτελέσματα είναι:



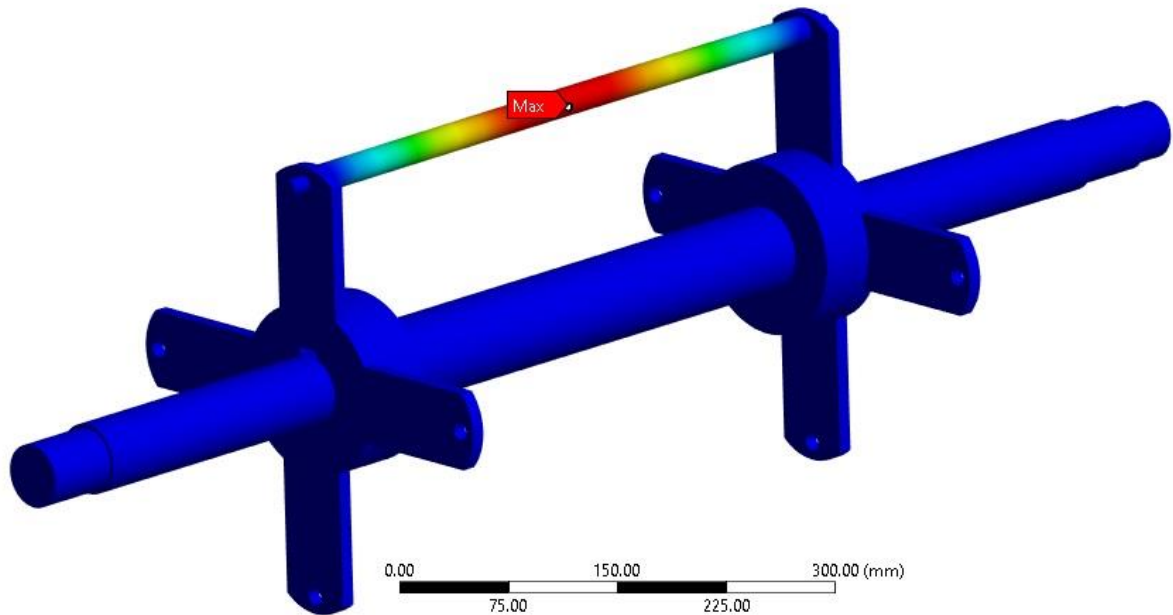
Εικόνα 2.5.6 Τάσεις λόγω φυγοκεντρικών δυνάμεων



Εικόνα 2.5.7 Τάσεις στη συναρμογή βραχίονα-ράβδου

A: Transient Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s

0.56775 Max
0.50467
0.44159
0.3785
0.31542
0.25234
0.18925
0.12617
0.063085
7.5978e-7 Min



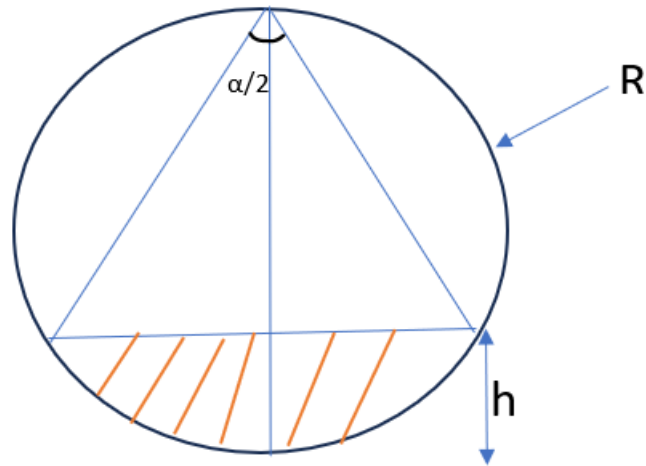
Εικόνα 2.5.8 Παραμόρφωση λόγω φυγοκεντρικών δυνάμεων

Γίνεται αντιληπτό ότι η μέγιστη παραμόρφωση εμφανίζεται στη ράβδο λόγω της μικρότερης δυσκαμψίας που έχει, ενώ εμφανίζεται μέγιστη τάση μεταξύ ράβδου-βραχίονα στην οπή που γίνεται συναρμογή. Οι ακραίες τιμές των τάσεων αφορούν σε σημειακή επαφή μεταξύ των εξαρτημάτων και ως εκ τούτου θεωρούνται μη πραγματικές και δε λαμβάνονται υπόψη.

2.6 Αύξηση κλίμακας μύλου βάση την ποσότητα φόρτωσης του μύλου

Ο ανασχεδιασμένος μύλος επειδή προορίζεται για βιομηχανική χρήση, γίνεται προσπάθεια μεγιστοποίησης της παραγωγής του. Για αυτό το λόγο υπάρχει η ανάγκη να αυξηθεί το μέγεθος του ώστε να αυξηθεί και το βάρος του υλικού που προορίζεται για λειοτρίβηση. Ο συσχετισμός αυτός θα γίνει βάση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του μύλου και του όγκου του υλικού.

Για αρχή η μέγιστη ποσότητα που μπορεί να φορτωθεί ο μύλος δεν πρέπει να ξεπερνάει το μισό του ύψους των δακτυλίων διότι σε διαφορετική περίπτωση ο μύλος θα κορεστεί, θα αυξηθούν οι θερμικές απώλειες και κατά συνέπεια θα μειωθεί δραστικά η απόδοση του. Η επιφάνεια που δημιουργείται από το υλικό μέσα στο μύλο είναι ένα κυκλικός τομέας με ακτίνα την εσωτερική ακτίνα του στάτη και ύψος το μισό ύψος των δακτυλίων όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 2.6.1 Γεωμετρία ποσότητας υλικού για λειοτριβηση

Η γωνία α είναι η γωνία που σχηματίζει με το κέντρο η χορδή-κυκλικό τμήμα.

Γνωρίζοντας τα h, R από τον τύπο

$$h = R(1 - \cos(\frac{\alpha}{2})) [18] \quad (2.6.1)$$

Λύνοντας ως προς α έχουμε

$$\alpha = 2 \cos^{-1}(1 - \frac{h}{R})$$

α σε rad

Η επιφάνεια υπολογίζεται από τον τύπο

$$A = \frac{1}{2} R^2 (\alpha - \sin(\alpha)) [18] \quad (2.6.2)$$

Πολλαπλασιάζοντας την παραπάνω εξίσωση με το μήκος του χώρου K όπου γίνεται η λειοτριβηση προκύπτει ο όγκος του υλικού V .

$$V = AK \quad (2.6.3)$$

Για την περίπτωση αυτή επιλέγεται ως υλικό λειοτριβησης κλίνκερ το οποίο έχει πυκνότητα $\rho = 1600 \frac{kg}{m^3}$

Πολλαπλασιάζοντας τον όγκο με την πυκνότητα προκύπτει η ποσότητα μάζας φόρτωσης του υλικού

$$m_{batch} = V\rho \quad (2.6.4)$$

Για να βρεθεί η νέα ποσότητα αναλόγως την κλίμακα του μύλου πολλαπλασιάζονται οι διαστάσεις R,h,L με το συντελεστή κλίμακας S. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται μια επαναληπτική διαδικασία όπου γίνεται υπολογισμός της ποσότητας μάζας φόρτωσης αναλόγως την κλίμακα του μύλου. Μερικά νούμερα υπολογισμών είναι τα εξής

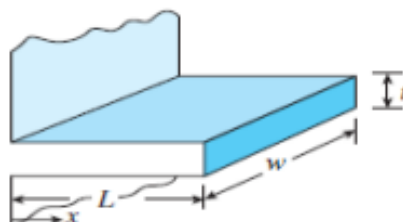
| Scale | Clinker mass[kg] |
|-------|------------------|
| 1 | 3.1 |
| 1.5 | 10.4 |
| 2 | 24.8 |
| 3 | 83.7 |
| 5 | 387.5 |
| 10 | 3100 |

Πίνακας 2.6.1 Μάζας φόρτωσης κλινκερ αναλόγως την κλίμακα

2.7 Υπολογισμός πτερυγίων ψύξης

Για να μπορέσει ο μύλος να βρίσκεται σε θερμοκρασία εντός των προδιαγραφών προτάθηκε η ψύξη του με ψυκτικό μέσο νερό από την παροχή που θα διατεθεί ο βιομηχανικός χώρος. Το νερό θα ρέει στην εξωτερική επιφάνεια του στάτη του μύλου ενδιάμεσα σε πτερύγια που θα τοποθετηθούν κατά την περίμετρο του.

Για την συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέγονται ίσια ορθογώνια πτερύγια μήκους w, ύψους L και πάχους t



Εικόνα 2.7.1 Ορθογωνικό πτερύγιο

Για αρχή υπολογίζεται ο όρος

$$m = \sqrt{\frac{2h}{kt}} \text{ (m}^{-1}\text{)} \quad (2.7.1)$$

όπου h ο συντελεστής συναγωγής και k η θερμική αγωγιμότητα [11,12]. Επειδή ο συντελεστής συναγωγής εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η θερμοκρασία η ταχύτητα του ρευστού και η τραχύτητα της επιφάνειας για τους αρχικούς υπολογισμούς επιλέγεται με $5000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ και το πιο ακριβές νούμερο θα βρεθεί με χρήση πεπερασμένων στοιχείων σε ύστερο χρόνο στο σχεδιασμό των πτερυγίων ενώ η θερμική αγωγιμότητα λαμβάνεται με $0.5918 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ για το νερό.

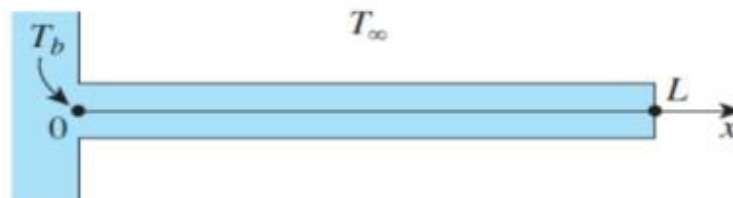
Το ενεργό ύψος του πτερυγίου είναι

$$L_c = L + \frac{t}{2} \quad (2.7.2)$$

και το εμβαδόν του πτερυγίου είναι

$$A_{fin} = 2wL_c \quad (2.7.3)$$

Η μεταφορά θερμότητας μεταξύ πτερυγίου και νερού είναι συναγωγή θερμότητας στην μετωπική επιφάνεια του πτερυγίου με μόνιμη ροή θερμότητας από όλο το πτερύγιο

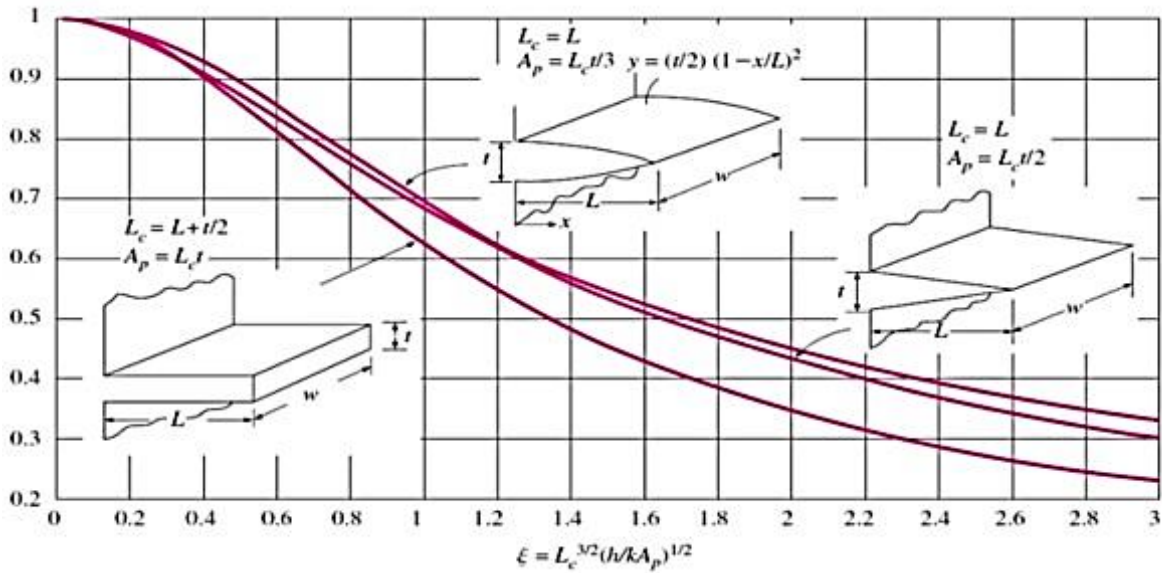


Εικόνα 2.7.2 Συναγωγή θερμότητας πτερυγίου

Η θερμική ισχύς που μπορεί να μεταφέρει το ένα πτερύγιο με συναγωγή είναι

$$Q_{convection} = \sqrt{hkpA_{fin}}(T_b - T_{\infty}) \frac{\sinh(mL) + \left(\frac{h}{mk}\right)\cosh(mL)}{\cosh(mL) + \left(\frac{h}{mk}\right)\sinh(mL)} [11,12] \quad (2.7.4)$$

όπου $T_b=50^{\circ}\text{C}$ η επιθυμητή θερμοκρασία στην επιφάνεια του στάτη και $T_{\infty}=25^{\circ}\text{C}$ η θερμοκρασία του νερού ενώ p είναι η περίμετρος του πτερυγίου. Έπειτα από το διάγραμμα που παρέχει η παραπομπή [11] υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης του πτερυγίου.

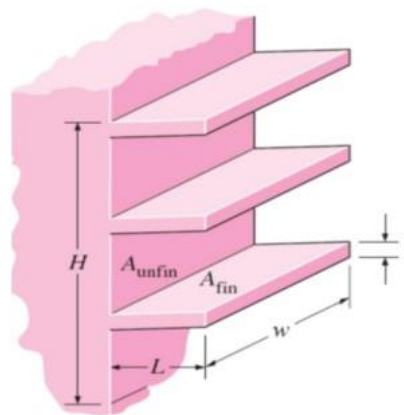


Διάγραμμα 2.7.1 Βαθμός απόδοσης πτερυγίου

ενώ αναλόγως την γωνία θ που θα έχουν τα πτερύγια μεταξύ τους υπολογίζεται ο συνολικός αριθμός τους αφαιρώντας από την επιφάνεια του στάτη την επιφάνεια των πτερυγίων και το διάκενο μεταξύ τους ενώ η συνολική θερμική ισχύς που θα μπορούν να μεταφέρουν τα πτερύγια είναι

$$Q_{total,fin} = h(A_{unfin} + \eta_{fin}A_{fin})(T_b - T_{\infty}) \quad [11,12] \quad (2.7.5)$$

όπου A_{unfin} είναι η επιφάνεια του στάτη χωρίς τα πτερύγια.



Εικόνα 2.7.3 Ολική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας

3. Σχεδιασμός συστήματος

Έχοντας όλους τους υπολογισμούς και τις μεθοδολογίες προσομοιώσεων του κεφαλαίου 2 μπορεί να γίνει ο ανασχεδιασμός και η βελτιστοποίηση του μύλου.

3.1 Αύξηση κλίμακας μύλου

Χρησιμοποιώντας τους θεωρητικούς υπολογισμούς της ενότητας 2.2 γίνεται αύξηση της κλίμακας του υπάρχων μύλου. Η επιλογή της κλίμακας γίνεται με γνώμονα το ότι ο μύλος θα μπορεί να συνδέεται με έναν τυπικό ηλεκτροκινητήρα που βρίσκεται σε βιομηχανικό περιβάλλον και θα του παρέχεται ισχύς από τριφασικό δίκτυο οπότε η ισχύς που θα καταναλώνει ο κινητήρας να μην ξεπερνάει τα 35kW στις 1000 rpm. Αυτό επιτυγχάνεται έχοντας κλίμακα 1.35:1 που με βάση τους τύπους της ενότητας 2.6 ο μύλος θα μπορεί να φορτώνεται με μάζα κλινκερ 7.6kg. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι αρχικές και καινούργιες διαστάσεις του μύλου με τις αντίστοιχες καταναλώσεις ενέργειας. Τα καινούργια μεγέθη είναι μια βασική διαστασιολόγηση αφού σε επόμενα κεφάλαια κάποια εξαρτήματα δέχονται αλλαγή στις διαστάσεις τους.

| Prototype mill | | New mill |
|----------------|-------|----------|
| R[mm] | 176,5 | 238 |
| ri[mm] | 17,5 | 23 |
| ro[mm] | 25,5 | 34 |
| b[mm] | 14 | 19 |
| l[mm] | 148.5 | 200 |
| r[mm] | 10 | 13,5 |
| N[kW] | 17 | 31 |

Πίνακας 3.1.1 Παλιές και καινούργιες διαστάσεις μύλου

3.2 Επανασχεδιασμός βασικών εξαρτημάτων

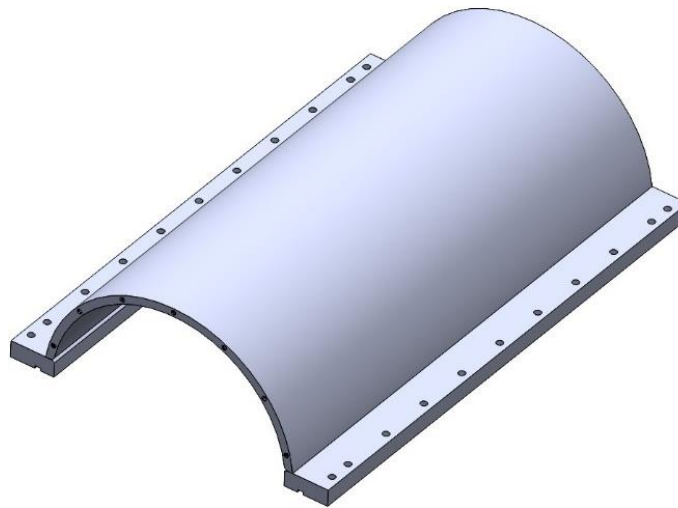
3.2.1 Σχεδιασμός στάτη

Ο σχεδιασμός του στάτη γίνεται με γνώμονα την εύκολη συναρμολόγηση και αποσυναρμολόγηση του μύλου. Έχοντας αυτό ως κριτήριο γίνεται η επιλογή της διαιρούμενης διάταξης όπως γίνεται στα καλούπια τσιμέντου για Brazilian test.



Εικόνα 3.2.1.1 Καλούπι τσιμέντου[13]

Η διάταξη θα αποτελείται από ημικύκλιο σωλήνα που στις άκρες του θα προσκολληθούν 2 πλάκες με τρύπες κατά μήκος της ώστε τα δύο τμήματα να συνδέονται μεταξύ τους με κοχλιοσύνδεση

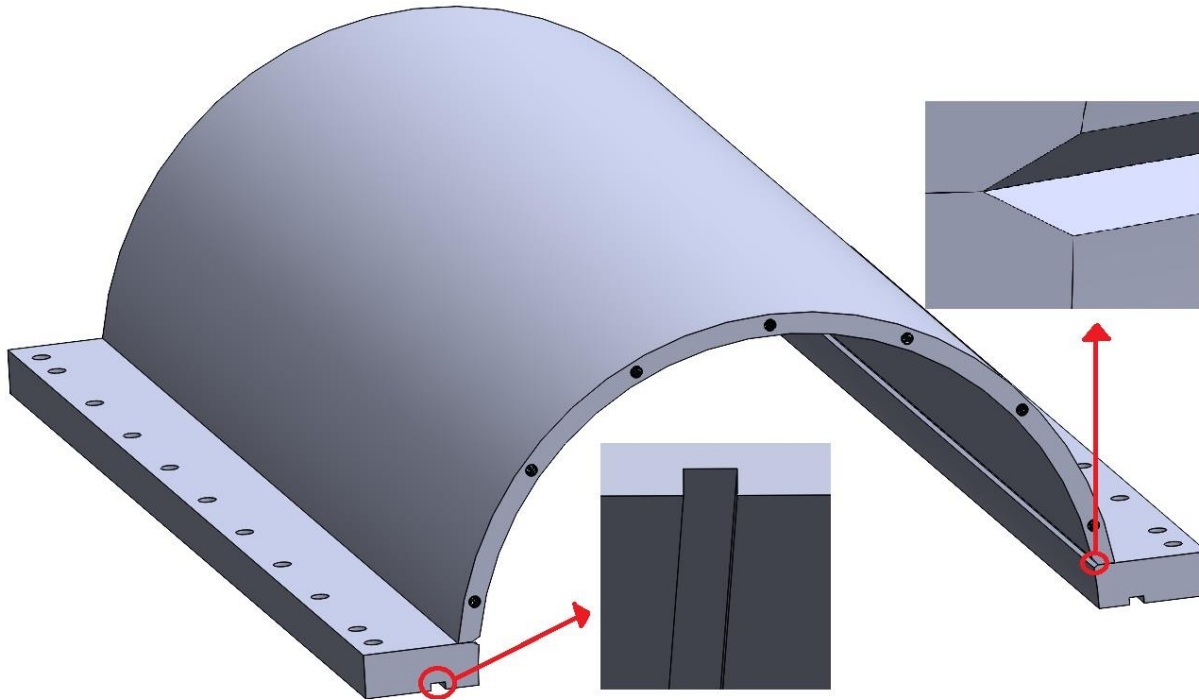


Εικόνα 3.2.1.2 Μισό στάτη με πλάκες

Κάνοντας αναζήτηση βάση τυποποιήσεων σωλήνων η πιο κοντινή τυποποίηση στις απαιτούμενες διαστάσεις είναι η DN450-EN10220 όπου έχει εσωτερική ακτίνα 214mm και εξωτερική 228.5[14].

Στη συνέχεια γίνεται κατεργασία στα δυο ημικύκλια που αποτελούν το στάτη και τις πλάκες. Αρχικά στα ημικύκλια σωλήνων που απαρτίζουν το στάτη πραγματοποιείται και στις δυο πλευρές ένα κόψιμο 30° με πλάτος 5mm όπου εξελίσσεται κατά την αξονική κατεύθυνση του στάτη. Όμοια κατεργασία εφαρμόζεται στην μια πλευρά της πλάκας ώστε να προετοιμαστεί για την συγκόλληση με το στάτη. Τέλος πάλι στην

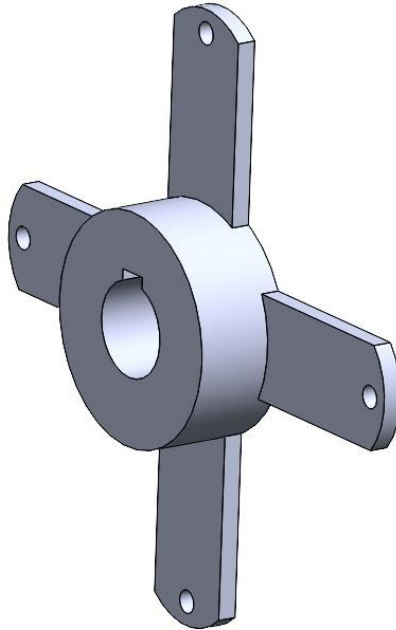
πλάκα δημιουργείται μια αύλακα κατά μήκος της πλάκας ώστε κατά την συναρμογή να τοποθετείται ορθογωνική ταινία φλάντζα για τη στεγανοποίηση από σκόνες και ακαθαρσίες.



Εικόνα 3.2.1.3 Διαμορφώσεις πλάκας και στάτη

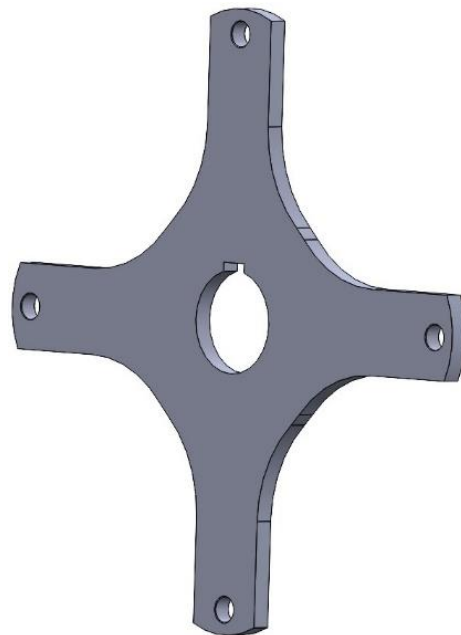
3.2.2 Σχεδιασμός βραχίονα

Ο σχεδιασμός του βραχίονα στον πρωτότυπο μύλο έχει μια περίεργη γεωμετρία διότι αποτελείται από ένα μεγάλο συμπαγές κύλινδρο που έχουν συγκολληθεί πάνω του 4 πτερύγια.



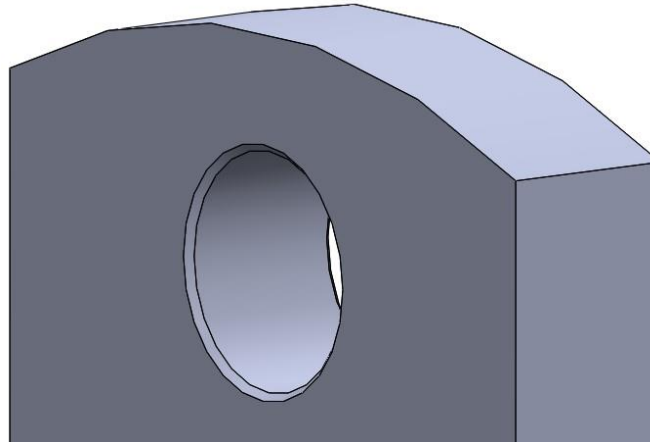
Εικόνα 3.2.2.1 Αρχικός βραχίονας

Αυτή η διαμόρφωση έχει ελαττώματα με αρχή ότι αν μείνει η κατασκευή του εξαρτήματος με συγκόλληση των βραχιόνων πάνω στον κύλινδρο θα δημιουργήσει προβλήματα γεωμετρικών ανοχών. Η δημιουργία του σε μια φρέζα θα είναι κοστοβόρα, χρονοβόρα και θα οδηγεί σε μεγάλη απώλεια υλικού ενώ η κατασκευή του με χρήση λέιζερ την καθιστά αδύνατη. Η νέα διαμόρφωση που προτείνεται είναι η παρακάτω:



Εικόνα 3.2.2.2 Ανασχεδιασμένος βραχίονας

Όλο το εξάρτημα έχει το ίδιο πάχος χωρίς να υπάρχει ο κύλινδρος ενώ το πάχος των βραχιόνων από τα 10 χιλιοστά που ήταν το πρωτότυπο πήγε στα 12. Αυτό το πάχος και η διαμόρφωση το καθιστά εύκολο στο να κατασκευαστεί το εξάρτημα σε φρέζα ή να κοπεί με την χρήση λέιζερ. Επίσης στις τρύπες γίνεται ένα μικρό chamfer για μην εμφανιστεί στην προσομοίωση η μη πραγματική τάση



Εικόνα 3.2.2.3 chamfer βραχίονα

Τέλος λόγω της αλλαγής της διαμέτρου του στάτη βάση της τυποποίησης το μήκος του βραχίονα από τα 200mm πήγε στα 180. Τρέχοντας την ανάλυση μεταβατικής κατάστασης και εισάγοντας τα καινούργια δεδομένα με την καινούργια διαμόρφωση τα αποτελέσματα είναι:

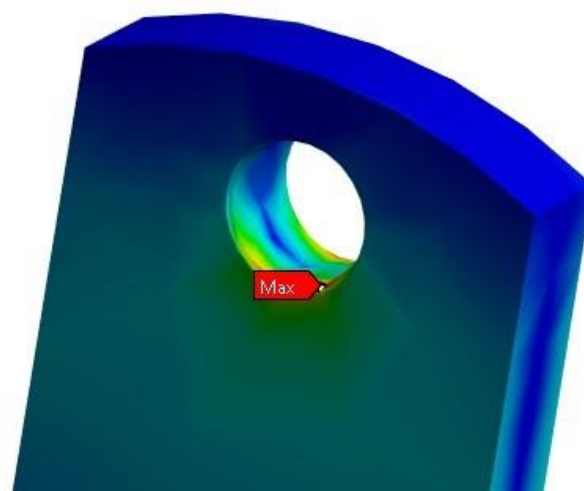
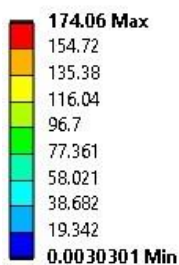
A: Transient Structural

Equivalent Stress

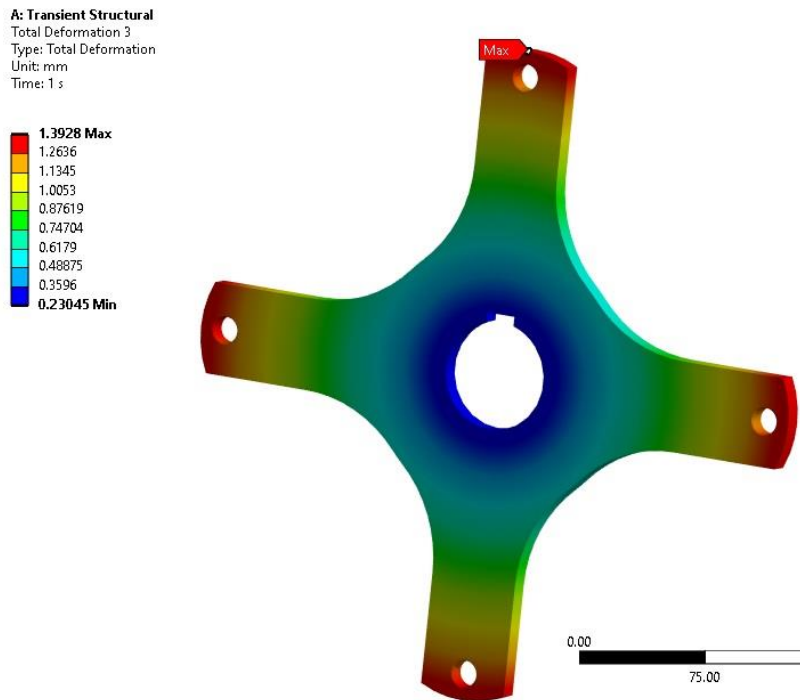
Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 1 s



Εικόνα 3.2.2.4 Αποτελέσματα τάσεων για τον καινούργιο βραχίονα



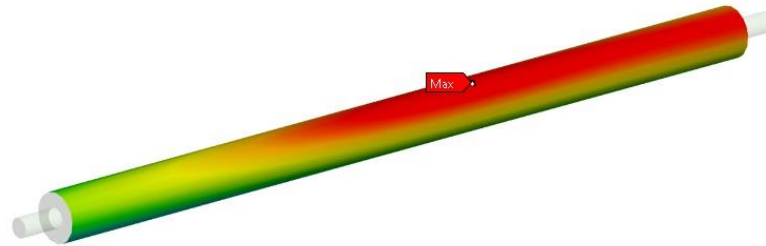
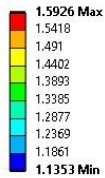
Εικόνα 3.2.2.5 Αποτελέσματα παραμόρφωσης νέου βραχίονα

Παρατηρείται ότι παρά το μεγαλύτερο μέγεθος των πτερυγίων οι τάσεις στις τρύπες που συναρμολογούν οι ράβδοι με τους βραχίονες μειώθηκε αισθητά ενώ οι παραμορφώσεις παραμένουν σε επίπεδο που δεν υπάρχει κίνδυνος να έρθει σε επαφή ο βραχίονας με το στάτη

3.2.3 Σχεδιασμός ράβδου και άξονα

Η ράβδος δεν επιδέχεται κάποια αλλαγή στη διαμόρφωση της με την μόνη διαφορά της ότι αλλάζει η διάμετρος της από τα 20mm στα 40mm για μείωση των επιφανειακών τάσεων και δημιουργείται σπείρωμα M16. Με την ανάλυση μεταβατικής κατάστασης η παραμόρφωση στην ράβδο είναι:

A: Transient Structural
Total Deformation 2
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s

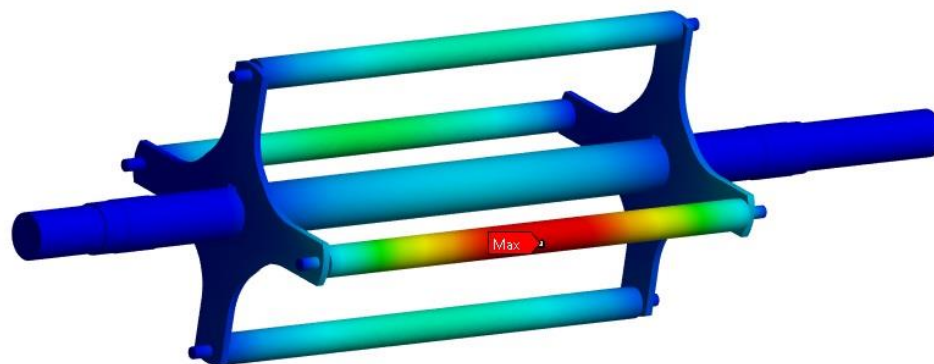
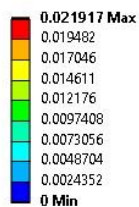


Εικόνα 3.2.3.1 Παραμόρφωση νέας ράβδου

Οι αλλαγές στις διαμέτρους του βραχίονα και της ράβδου έχουν ως αποτέλεσμα να αυξηθεί η ισχύς του μύλου από τα 31kW στα 36kW τα οποία είναι εντός προδιαγραφών.

Όσο αφορά τον άξονα λόγω της αύξησης μήκους του στάτη και των μεγαλύτερων διαστάσεων στα υπόλοιπα εξαρτήματα χρειάστηκε η διάμετρος του να αυξηθεί από τα 57mm στα 65. Επαναλαμβάνοντας τις προσομοιώσεις του κεφαλαίου 2.4.1 και 2.4.2 το βέλος κάμψης του συναρμολογήματος είναι

C: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s



Εικόνα 3.2.3.2 Παραμόρφωση νέου συναρμολογήματος άξονα-ράβδων-βραχιόνων

Ενώ ξαναυπολογίζοντας τις ιδιοσυχνότητες του συστήματος με την μη εμφάνιση της αζυγοσταθμίας και με την εμφάνιση της είναι:

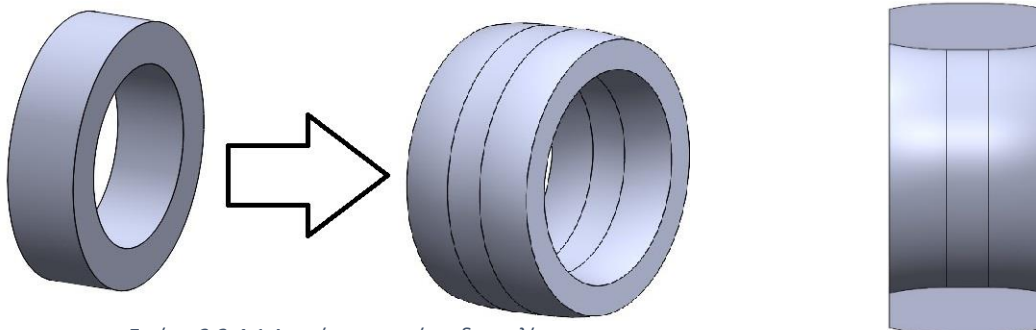
| Συχνότητα χωρίς αζυγοσταθμία(Hz) | Συχνότητα με αζυγοσταθμία(Hz) | ΔHz |
|----------------------------------|-------------------------------|-------|
| 0.96 | 0.94 | 0.02 |
| 175.21 | 175.53 | -0.32 |
| 180.88 | 180.65 | 0.23 |
| 188.89 | 181.87 | 7.02 |
| 181.75 | 182.14 | -0.39 |
| 182.64 | 182.93 | -0.29 |

Πίνακας 3.2.3.1 Ιδιοσυχνότητες ανασχεδιασμένου μύλου

Η πρώτη ιδιοσυχνότητα είναι στα 58 rpm ενώ η δεύτερη είναι στα 10500 rpm οπότε το καινούργιο σύστημα είναι ασφαλή από συντονισμό. Γίνεται αντιληπτό ότι η αλλαγή είναι ελάχιστη οπότε το σύστημα δεν κινδυνεύει λόγω αζυγοσταθμίας.

3.2.4 Σχεδιασμός δακτυλίων

Οι δακτύλιοι είναι από τα πιο σημαντικά εξαρτήματα του μύλου διότι είναι αυτά που κάνουν την λειοτρίβηση και είναι υπεύθυνα για την φθορά του μύλου. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2.3 η ανάλυση επιφανειακών τάσεων επιτρέπει να προσδιορίσει τις μέγιστες τάσεις που εμφανίζονται στους δακτυλίους, τη ράβδο και το στάτη ώστε να είναι γνωστό το αν τα υλικά δεν ξεπερνούν το όριο διαρροής που έχει επιλεγεί. Η νέα γεωμετρία που θα έχουν οι δακτύλιοι σε σχέση με τους πρωτότυπους θα είναι:



Εικόνα 3.2.4.1 Διαμόρφωση νέων δακτυλίων

Χρησιμοποιώντας τους αναλυτικούς τύπους του Hertz του κεφαλαίου 2.3.1-2 που έχουν επιβεβαιωθεί από το κεφάλαιο 2.3.4 γίνεται υπολογισμός των επιφανειακών τάσεων για τον πρωτότυπο και νέο μύλο

| | Prototype Ring | New Ring |
|---|----------------|----------|
| F[N] | 1884 | 2213 |
| P[N] | 1.13E+04 | 7308 |
| Ring curvature[mm] | - | 55 |
| Stress on rod[MPa] | -757 | -80 |
| Stress on Stator[MPa] | -860 | -404 |
| Stress on Rod if ring is on angle[MPa] | ∞ | -1977 |
| Stress on Stator if ring is on angle[MPa] | ∞ | -1486 |

Πίνακας 3.2.4.1 Επιφανειακές τάσεις πρωτότυπου και ανασχεδιασμένου μύλου

Όπως φαίνεται η τάση για την περίπτωση που ο δακτύλιος έρχεται σε επαφή κατά γενέτειρα με τα δυο εξαρτήματα έχει μειωθεί στη δεύτερη περίπτωση λόγω των μεγαλύτερων διαστάσεων παρότι ότι η δύναμη P έχει αυξηθεί κατά 7 φορές περίπου στον καινούργιο μύλο.

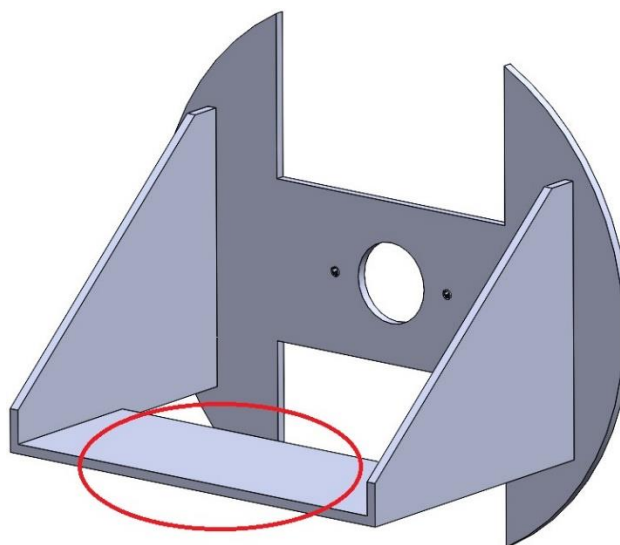
Επιπλέον οι τάσεις για την περίπτωση που ο δακτύλιος έρθει σε επαφή στα εξαρτήματα με γωνία δεν γίνονται άπειρες ενώ η μέγιστη τάση εμφανίζεται όπως αναμενόταν ανάμεσα στο δακτύλιο και το στάτη.

Λόγω της καμπυλότητας που έχουν οι καινούργιοι δακτύλιοι το πάχος που έχουν αυξήθηκε από τα 14mm στα 30mm.

3.2.5 Σχεδιασμός πρόσωσης και στηρίξεων

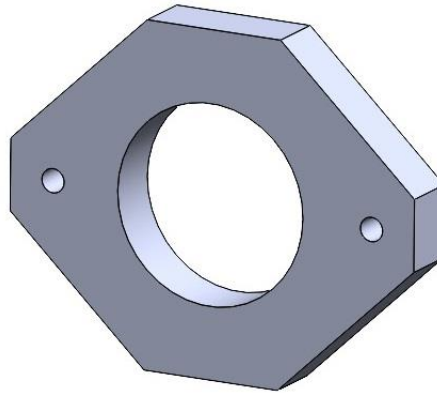
3.2.5.1 Σχεδιασμός πρόσωσης

Στον πρωτότυπο μύλο η πρόσωση όπου τοποθετούνταν το ρουλεμάν και εισαγόταν το υλικό προς λειοτρίβηση είναι:



Εικόνα 3.2.5.1 Πρωτότυπος σχεδιασμός πρόσωσης

Ενώ για στεγάνωση έμπαινε στο κέντρο της πρόσοψης ένα πλακάκι με μια τυπική φλάντζα

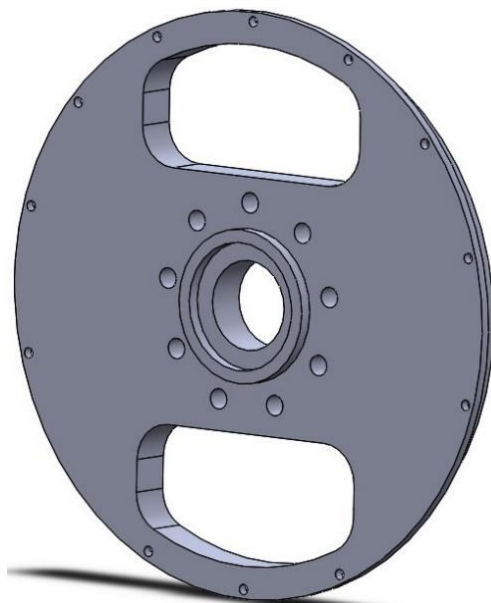


Εικόνα 3.2.5.2 Πλακάκι φλάντζας

Το ρουλεμάν ήταν διαιρετού τύπου και τοποθετούταν πάνω στην βάση της πρόσοψης(εκεί που είναι κυκλωμένο στην φωτογραφία) με κοχλιοσύνδεση ενώ η βάση αυτή είναι ενωμένη πάνω στην πρόσοψη με συγκόλληση. Οι δύο προσόψεις μαζί με τα ρουλεμάν προσαρμόζονταν πάνω στο συναρμολόγημα άξονας-βραχίονες-ράβδους με δακτυλίους και όλο αυτό μαζί πέρναγε από την μια πλευρά του στάτη στην άλλη και ερχόταν πρόσωπο με το μύλο. Η στερέωση και στεγάνωση των προσόψεων πάνω στον μύλο γινόταν με τοποθέτηση φλαντζόκολλας σιλικόνης εκεί που εφαπτόταν η πρόσοψη στον μύλο. Τέλος η παροχή υλικού γινόταν από την πάνω μεριά και το υλικό έρρεε μόνο του από την απέναντι κάτω μεριά.

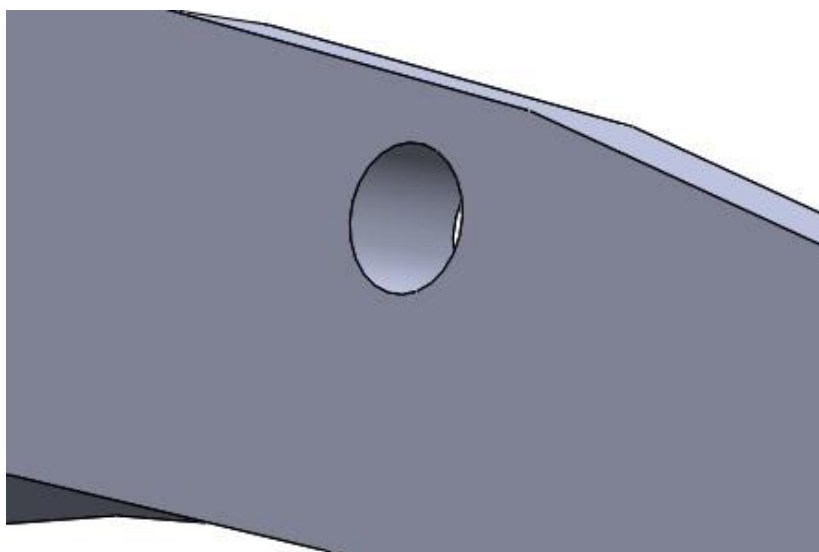
Για αρχή σαν τρόπος κατεργασίας η συγκόλληση της βάσης πάνω στην πρόσοψη δημιουργεί μεγάλα προβλήματα γεωμετρικών ανοχών καθώς η συγκόλληση από έναν τεχνίτη δεν μπορεί να είναι τόσο ακριβής. Επιπλέον η τοποθέτηση διαιρετού ρουλεμάν πάνω στη βάση μόνο με την κοχλιοσύνδεση έχει το πρόβλημα πως κατά την τοποθέτηση του δεν μπορεί να υπάρξει εύκολα καθετότητα με την πρόσοψη και ομοκεντρότητα με τον άξονα και το στάτη. Τέλος η στερέωση και στεγάνωση με φλαντζόκολλα δεν είναι αποδοτική καθώς οι δυνάμεις λόγω κρουστικών φορτίων έχουν ως κίνδυνο να αστοχήσει η φλαντζόκολλα, δεν παρέχει την σωστή στεγάνωση και κατά την συντήρηση του θα πρέπει να καθαρίζεται η παλιά κόλλα και να τοποθετείται καινούργια υπάρχοντας ο κίνδυνος να μην έχει τοποθετηθεί σε όλα τα σημεία σωστά.

Η πρώτη αλλαγή που γίνεται ότι η πρόσοψη θα είναι πλήρως κυκλική χωρίς τα κοψίματα ενώ παραμένουν οι διαμορφώσεις για την εισαγωγή και εξαγωγή του υλικού



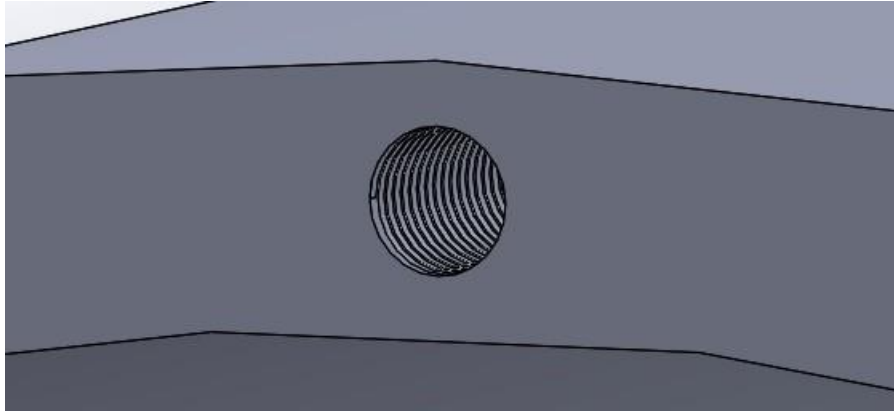
Εικόνα 3.2.5.3 Ανασχεδιασμένη πρόσοψη

Οι οπές γύρω από την οπή που περνάει ο άξονας είναι για το Bearing unit που θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα ενώ οι οπές στις άκρες είναι για την σύνδεση της πρόσοψης με το στάτη.



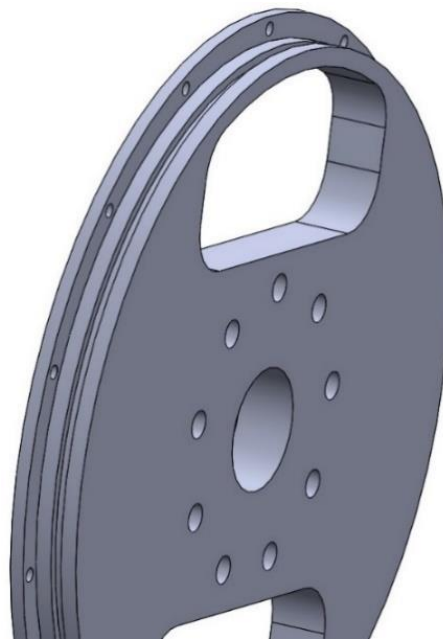
Εικόνα 3.2.5.4 Οπές για συναρμογή με στάτη

Αντιστοίχως στο στάτη ανοίγονται τα τυφλά σπειρώματα για βίδες M8x40x40.



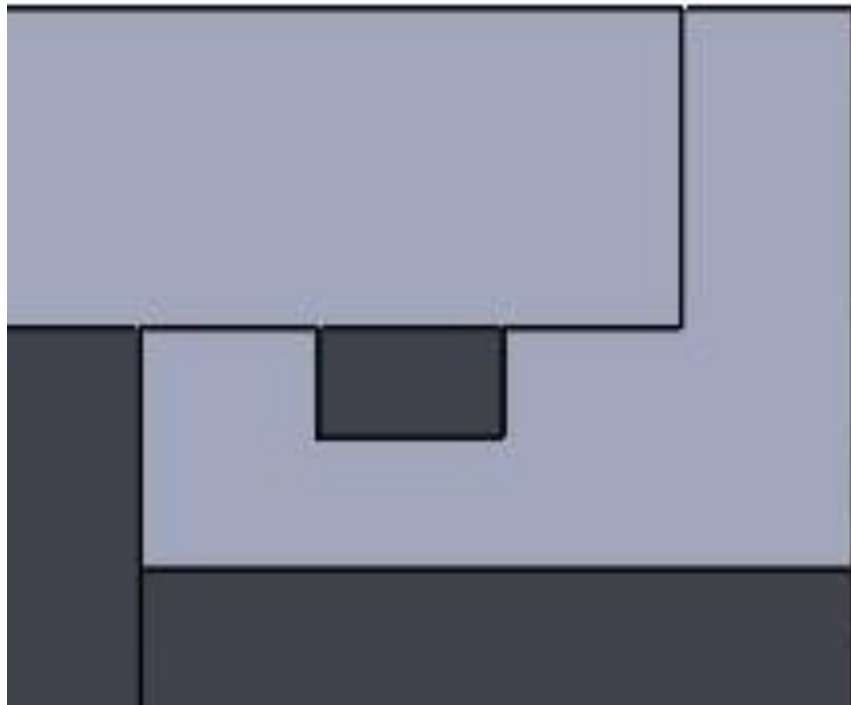
Εικόνα 3.2.5.5 Σπείρωμα στάτη

Για να μπορεί η πρόσοψη να είναι ομόκεντρη με το στάτη πρέπει να δημιουργηθεί μια φλάντζα στη πρόσοψη και επίσης για να επιτευχθεί σωστή στεγάνωση πάνω στη φλάντζα ανοίγεται αύλακα ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί δακτύλιος στεγάνωσης(O-ring).



Εικόνα 3.2.5.6 Φλάντζα πρόσοψης

Έχοντας στεγάνωση με O-ring δεν εξέρχεται σκόνη προς τα έξω ενώ το σύστημα προστατεύεται από την υγρασία. Ο υπολογισμός του O-ring γίνεται βάση του ISO 3601 για συμπίεση 20% οπότε βρίσκονται οι διαστάσεις της αύλακας.



Εικόνα 3.2.5.7 Συναρμογή πρόσοψης με σάτη

3.2.5.2 Υπολογισμός και σχεδιασμός εδράσεων

Μαζί με τα προηγούμενα μειονεκτήματα που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα για τη τοποθέτηση των εδράσεων εισάγεται και το μειονέκτημα της προστασίας των εδράνων. Στον πρωτότυπο μύλο τα έδρανα είναι εκτεθειμένα σε σκόνες και ακαθαρσίες το οποίο μειώνει δραματικά το χρόνο λειτουργίας τους. Η λύση που προτάθηκε είναι ο σχεδιασμός ενός bearing unit όπου θα τοποθετείται μέσα το ρουλεμάν με την κατάλληλη προστασία.

Το συγκεκριμένο εξάρτημα θα συναρμολογείται μαζί με την πρόσοψη που θα επιτρέπει το εύκολο κεντράρισμα του εδράνου με το στάτη και θα συνδέεται με την βάση στήριξης του μύλου αφού εκεί είναι το σημείο που παραλαμβάνονται τα φορτία. Αρχικά γίνονται επιλογή των εδράνων. Για μια αρχική προστασία γίνεται επιλογή εδράνων τύπου 2RS τα οποία έχουν και από τις δυο πλευρές τους φλάντζες για προστασία. Επειδή τα ρουλεμάν θα παραλαμβάνουν κρουστικά φορτία επιλέγονται ρουλεμάν με κυλινδρικά στοιχεία κύλισης διότι η μεγαλύτερη επιφάνεια τους επιτρέπει την παραλαβή μεγαλύτερων φορτίων. Στο site της SKF για άξονα 65mm προτείνει το παρακάτω ρουλεμάν(βλέπετε παράρτημα Β για κωδικό)



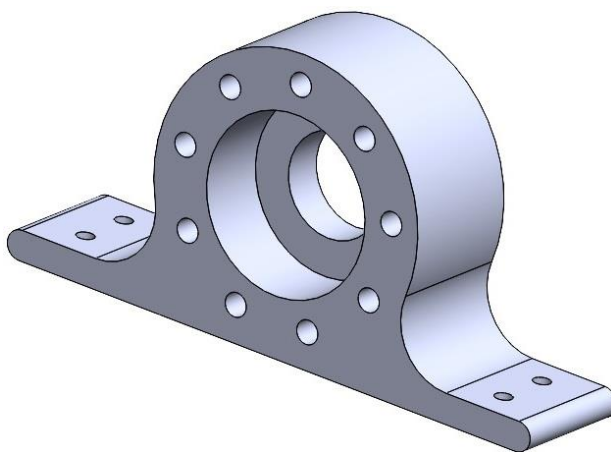
Εικόνα 3.2.5.8 Ρουλεμάν δυο κυλινδρικών σειρών

Η συγκεκριμένη σειρά έχει την δυνατότητα επαναλίπανσης του ρουλεμάν το οποίο αυξάνει τη διάρκεια ζωής του και μεγάλη ακαμψία στην ακτινική διεύθυνση. Η ακαμψία αυτή σε συνδυασμό με ότι το συγκεκριμένο ρουλεμάν κεντράρει τον άξονα μόνο στην αξονική του κατεύθυνση δημιουργεί το πρόβλημα του κεντραρίσματος στις άλλες διευθύνσεις. Για αυτό το λόγο το ένα από τα δύο ρουλεμάν θα αλλαχθεί σε αυτορρυθμιζόμενο ώστε κατά την λειτουργία λόγω των φορτίων να κεντράρει τον άξονα μόνο του. Πάλι από το site της SKF γίνεται επιλογή του συγκεκριμένου τύπου εδράνου(βλέπετε παράρτημα Β για κωδικό).



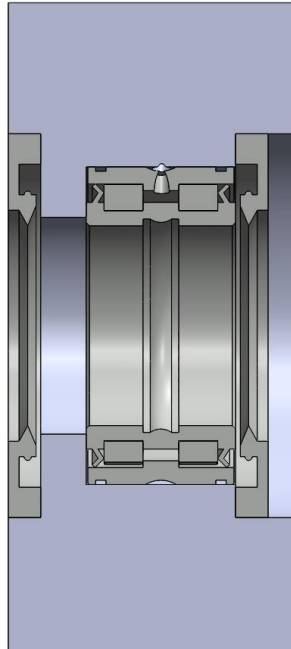
Εικόνα 3.2.5.9 Αυτορρυθμιζόμενο ρουλεμάν

Έχοντας τις διαστάσεις των εδράνων γίνεται ο σχεδιασμός των bearing units. Επειδή το εξάρτημα αυτό θα συνδέεται με τη βάση του μύλου επιλέγεται ο σχεδιασμός φωλιάς τύπου Ω.



Εικόνα 3.2.5.10 Bearing unit

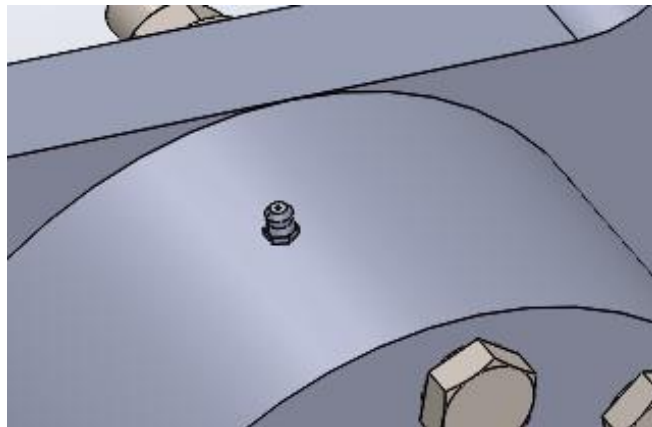
Στο κυκλικό κομμάτι ανοίγονται 9 οπές ώστε να συνδεθεί στην πρόσοψη με κοχλίες M16 ενώ ανοίγονται οι κατάλληλες οπές ώστε να περάσει ο άξονας και να τοποθετηθεί το έδρανο. Και από τις δυο πλευρές του unit τοποθετούνται τσιμούχες άξονα ώστε να προστατεύεται το έδρανο από σκόνες και ακαθαρσίες.



Εικόνα 3.2.5.11 Τσιμούχες άξονα

Το κενό που αφήνεται όπως φαίνεται στην δεξιά πλευρά της φωτογραφίας είναι για να μπορεί το unit να κεντραριστεί με την πρόσοψη για αυτό το λόγο η πρόσοψη από την εξωτερική της πλευρά έχει φλάντζα όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.2.5.3

Στις επίπεδες επιφάνειες δημιουργούνται τρύπες που θα συνδέουν το unit με τη βάση του μύλου. Τέλος κατασκευάζεται σπείρωμα για να τοποθετηθεί μαστός λίπανσης.

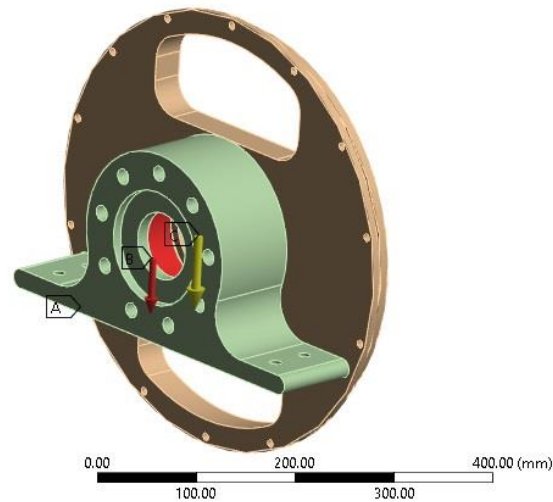


Εικόνα 3.2.5.12 Μαστός λίπανσης

Το μοντέλο bearing unit μαζί με την πρόσοψη εισάγεται στο ANSYS για στατική ανάλυση. Για συνθήκες εισάγεται πάκτωση στην κάτω μεριά του bearing unit και η δύναμη στήριξης στη φωλιά του ρουλεμάν ενώ τοποθετείτε η βαρύτητα. Η επαφή μεταξύ unit και πρόσοψης είναι πακτωμένη. Τέλος για πλέγμα επιλέγεται μέγεθος στοιχείων στα 10mm.

A: Static Structural
Static Structural
Time: 1 s

- A** Fixed Support
- B** Force: 2000. N
- C** Standard Earth Gravity: 9806.6 mm/s²

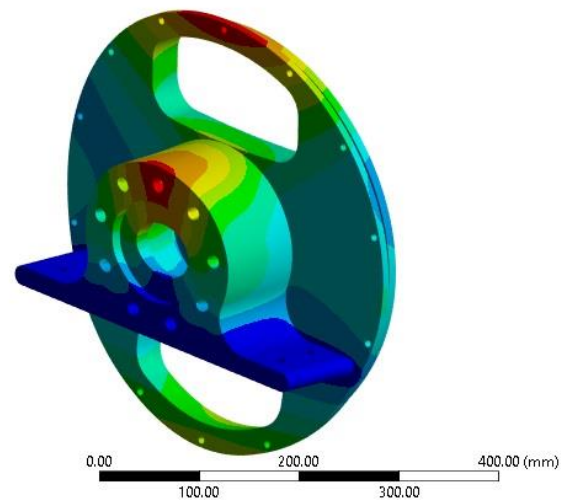


Εικόνα 3.2.5.13 Συνοριακές συνθήκες στατικής ανάλυσης bearing unit με πρόσοψη

Η παραμόρφωση που προκύπτει είναι:

A: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s

- 0.00019023 Max
- 0.00016909
- 0.00014795
- 0.00012682
- 0.00010568
- 8.4545e-5
- 6.3409e-5
- 4.2273e-5
- 2.1136e-5
- 0 Min



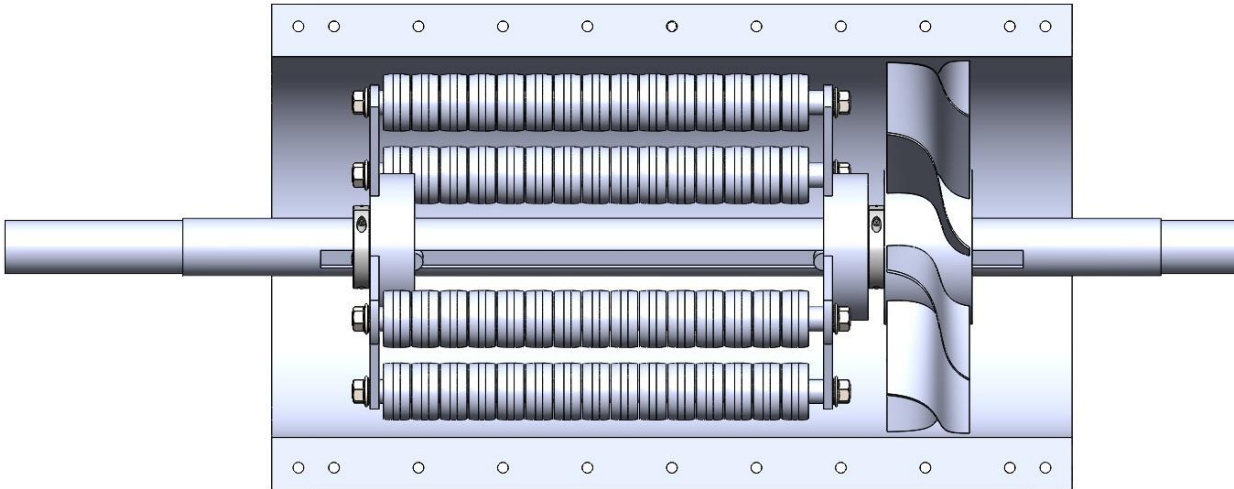
Εικόνα 3.2.5.14 Παραμόρφωση bearing unit με πρόσοψη

Το αποτέλεσμα της ανάλυσης δείχνει ότι το συναρμολόγημα πρόσοψη-bearing unit είναι στιβαρό και έχει την δυνατότητα να στηρίξει το βάρος του άξονα μαζί με το σύνολο ράβδων-βραχιόνων και δακτυλίων.

3.2.6 Διάταξη μύλου για αποσπόμενα μέρη

Η συνεχή αλλαγή των αναγκών και απαιτήσεων στη βιομηχανία καθώς και η χρήση των μηχανημάτων για παραγωγή καινούργιων προϊόντων ωθεί στην δημιουργία μηχανημάτων τα οποία θα έχουν αποσπόμενα μέρη και θα μπορούν τοποθετούνται και να αφαιρούνται εύκολα από το κύριο μέρος. Έτσι και στην περίπτωση του μύλου χρειάζεται το σύνολο που κάνει την λειοτριβήση να τοποθετείται εύκολα και να προσαρμόζεται στο μύλο διαφορετικές διατάξεις. Τέτοια διάταξη μπορεί να αποτελεί ένας μύλος με δυο σειρές αλεστικών σωμάτων για διαφορετικές λειοτριβήσεις, τοποθέτηση μεταφορικού κοχλία ή

ανεμιστήρα για αερομεταφορά. Παρακάτω φαίνεται ο εννοιολογικός σχεδιασμός ενός μύλου με ανεμιστήρα



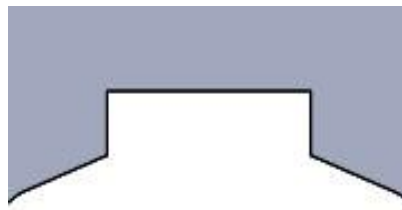
Εικόνα 3.2.6.1 Μύλος με ανεμιστήρα για αερομεταφορά

Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει τα εξαρτήματα να συγκρατούνται στον άξονα μέσω σφηνόδρομου και σφήνας. Αρχικά δημιουργείτε σφηνόδρομος στην επιφάνεια του άξονα



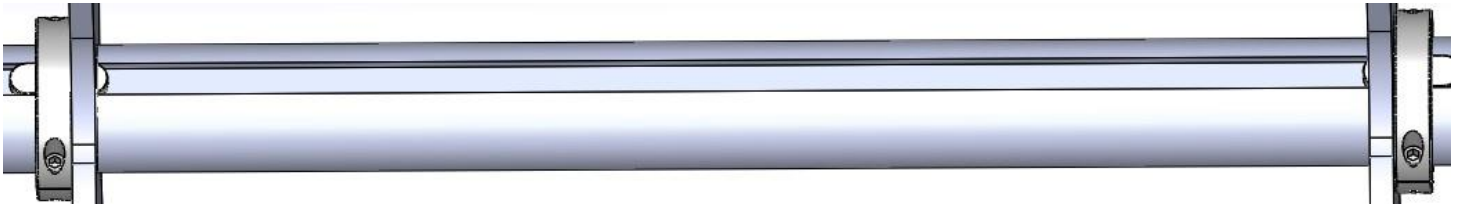
Εικόνα 3.2.6.2 Σφηνόδρομος άξονα

Ενώ στους βραχίονες δημιουργείται η κατάλληλη διαμόρφωση βάση του ISO 2491



Εικόνα 3.2.6.3 Διαμόρφωση βραχίονα για σφήνα

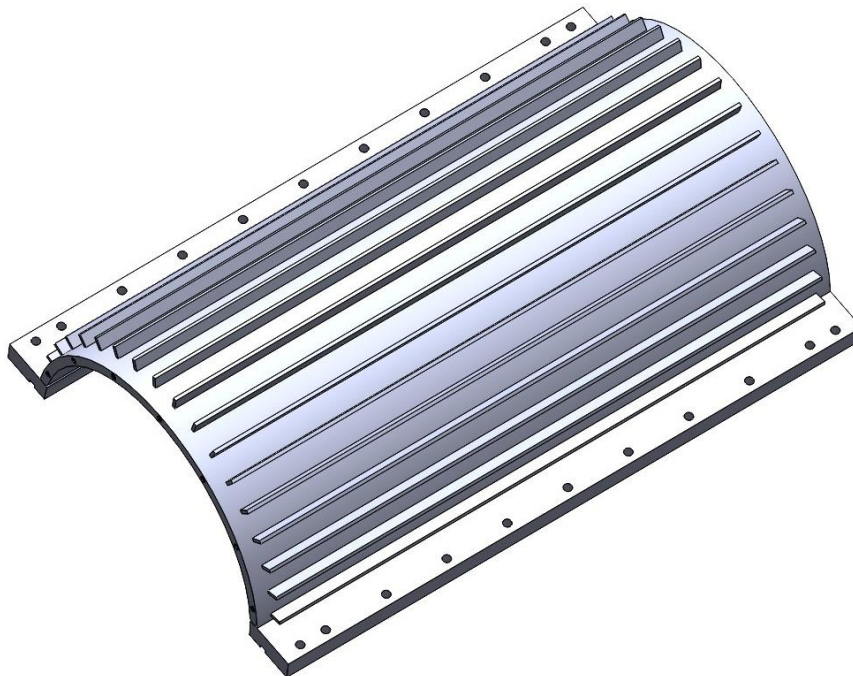
Με αυτό τον τρόπο θα μπορεί το εξάρτημα να τοποθετηθεί σε οποιαδήποτε θέση πάνω στον άξονα και να τοποθετηθεί σφήνα για την συγκράτησή του. Για να μην μετακινούνται τα εξαρτήματα στην αξονική κατεύθυνση πάνω στον άξονα τοποθετούνται εκατέρωθεν του κολάρα άξονα διαιρετά με σφηναύλακα (βλέπετε παράρτημα Γ).



Εικόνα 3.2.6.4 Κολάρα άξονα

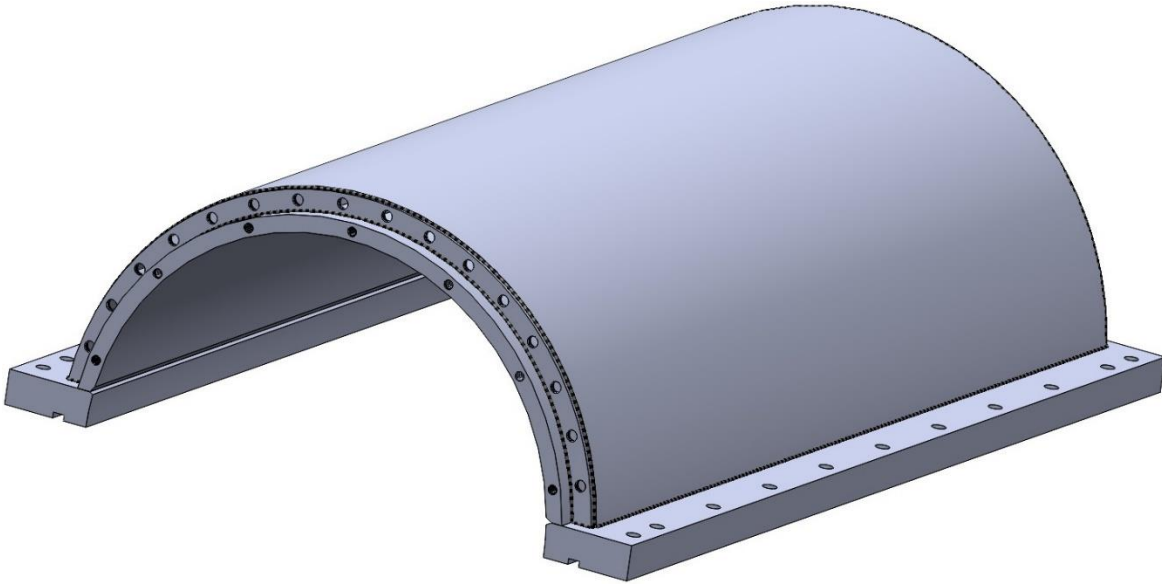
3.2.7 Σχεδιασμός συστήματος ψύξης

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 2.7 η ψύξη του μύλου θα γίνει με τη χρήση πτερυγίων όπου θα διαρρέονται από νερό ενδιάμεσα τους. Τα πτερύγια θα συγκολλούνται στην αξονική διεύθυνση με μεταξύ τους γωνία που ορίζεται αναλόγως των θεωρητικών υπολογισμών. Μετά από δοκιμές επιλέγονται πτερύγια μήκους 856mm για να μπορεί να καλύψει το μεγαλύτερο μήκος του στάτη, πάχος πτερυγίων στα 5mm και ύψος στα 20mm. Τα πτερύγια θα έχουν διαφορά γωνίας 10° όπου οδηγεί ότι το κάθε μισό του στάτη θα έχει 17 πτερύγια. Το κάθε πτερύγιο θα μπορεί να μεταφέρει θερμική ισχύ $Q_{convection} = 1.94kW$ βάση του τύπου 2.7.4 ενώ η συνολική είναι στα 95kW βάση του τύπου 2.7.5 όπου είναι υπεραρκετή για τη συγκεκριμένη διάταξη. Τα πτερύγια πάνω στο στάτη έχουν την εξής διάταξη:



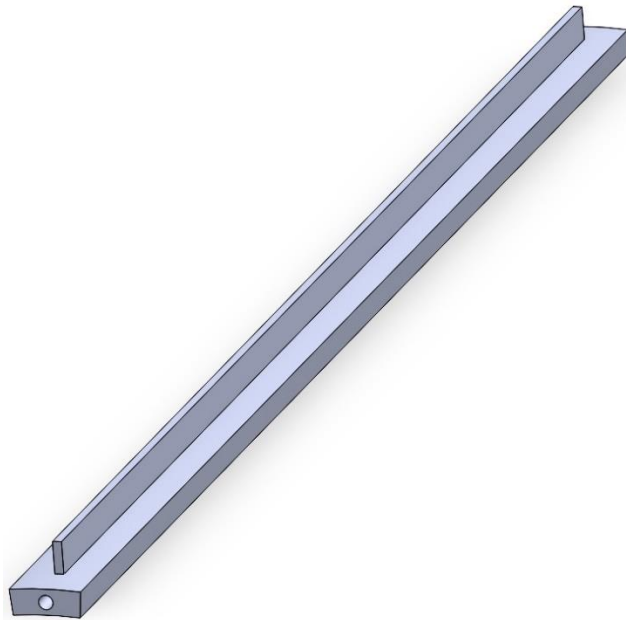
Εικόνα 3.2.7.1 Στάτης με πτερύγια

Στις άκρες των πτερυγίων τοποθετείται ένας κατανομέας όπου το κάθε πτερύγιο θα έχει την δική του οπή για την παροχή και την έξοδο και σε κάθε οπή θα ανοίγεται σπείρωμα που θα συνδέεται μέσω συνδέσμου με εύκαμπτη σωλήνα. Τέλος το πάνω μέρος καλύπτεται με μια λαμαρίνα και όλα τα μέρη συγκολλούνται μαζί για να υπάρξει στεγάνωση.



Εικόνα 3.2.7.2 Στάτης με θάλαμο ψύξης

Για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων εισάγεται το μοντέλο στο ANSYS FLUENT για προσομοίωση ροής ρευστού. Επιλέγεται ένα κομμάτι του στάτη που περιέχει ένα πτερύγιο μόνο



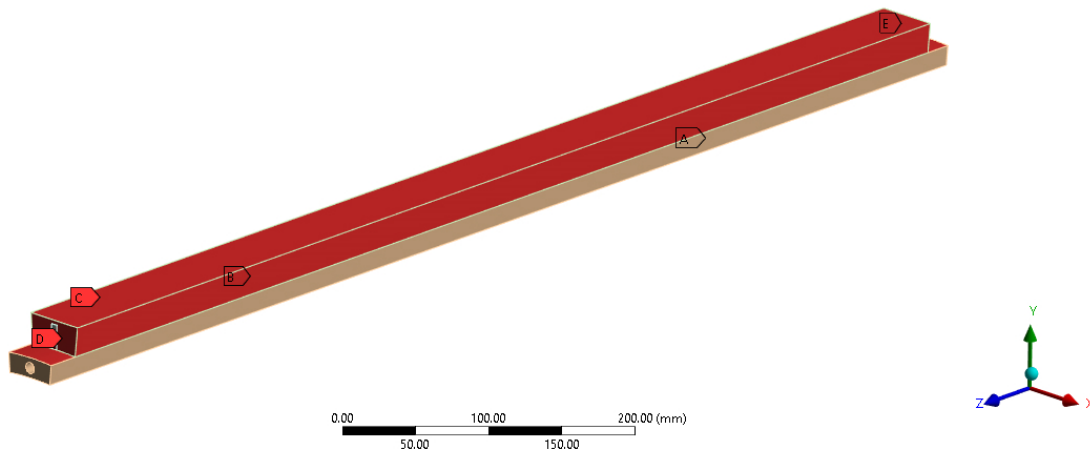
Εικόνα 3.2.7.3 Μοντέλο υπολογισμού πτερυγίου ψύξης

Γύρω από το πτερύγιο σχεδιάζεται το νερό που θα διαρρέει αυτό και εισάγεται η διάταξη στο ANSYS

Πρώτα δημιουργείται το πλέγμα στο meshing με μέγεθος στοιχείων στα 5mm και επιλέγονται οι επιφάνειες που θα γίνεται η εισαγωγή θερμότητας στην εσωτερική πλευρά, η εξωτερική πλευρά, η εισαγωγή του ρευστού, η εξαγωγή του και η επιφάνεια του ρευστού που περικλείει το πτερύγιο.

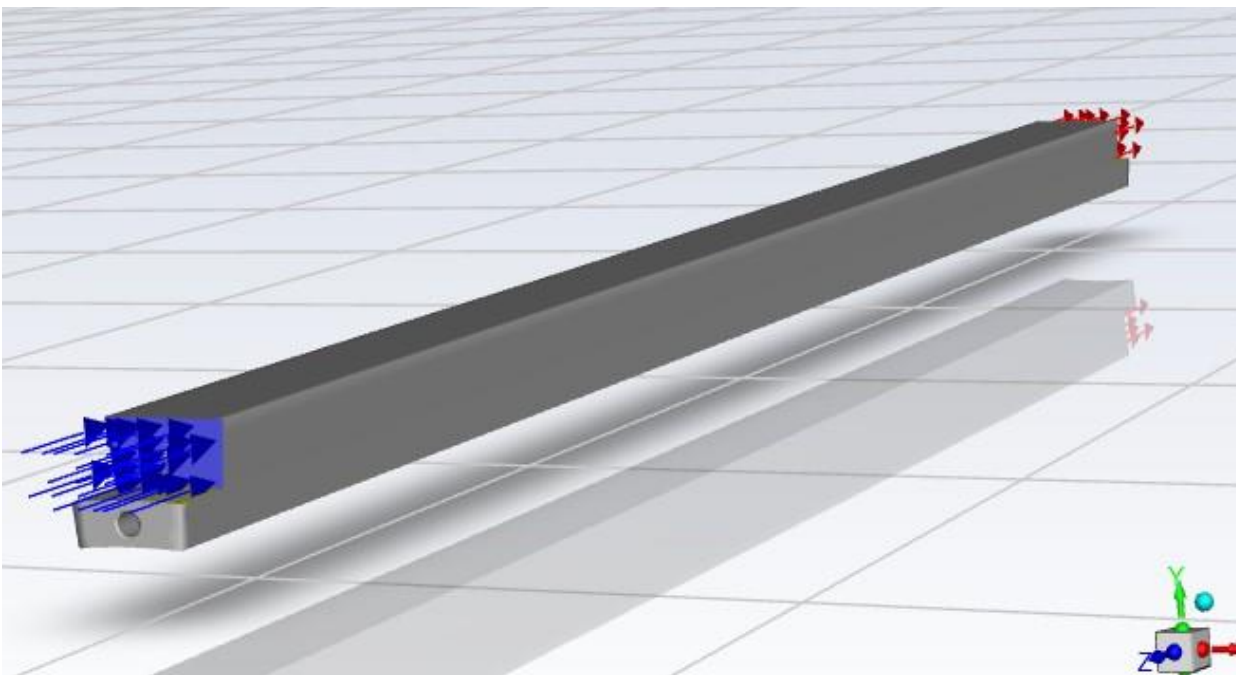
outlet

- A** hot_inside
- B** hot_outside
- C** fluid domain
- D** Inlet
- E** outlet



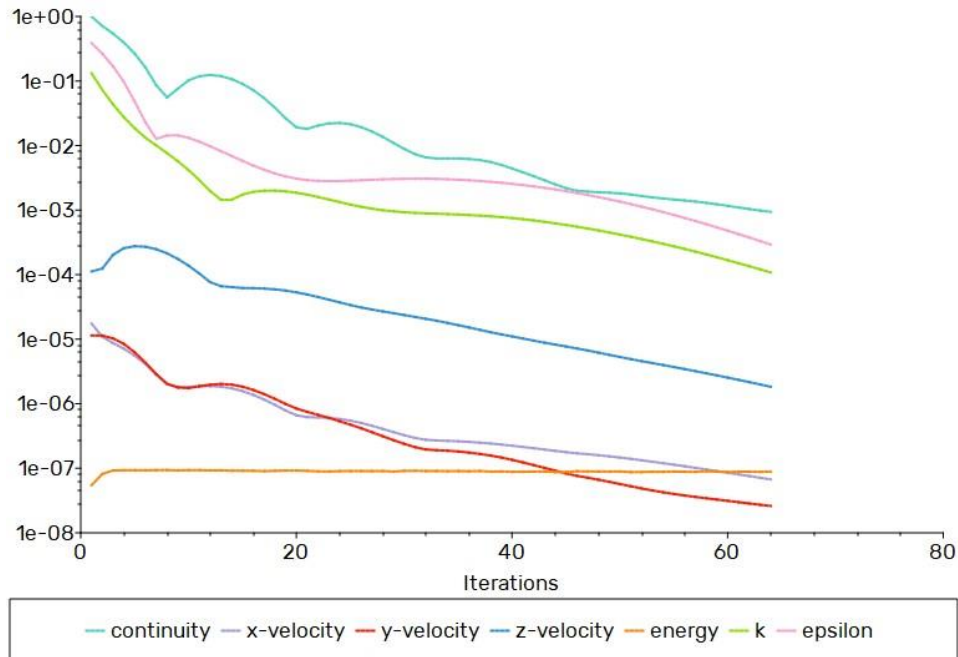
Εικόνα 3.2.7.4 Επιφάνειες πτερυγίου

Έπειτα μεταφέρουμε το πλέγμα στο Fluent.



Εικόνα 3.2.7.5 Μοντέλο πτερυγίου-νερού στο FLUENT

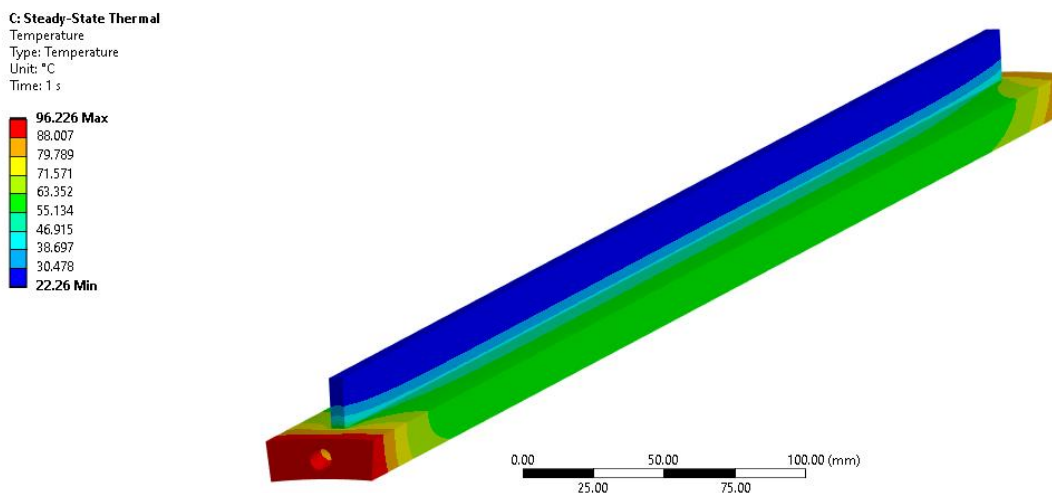
Αρχικά ενεργοποιείτε το energy equation και εισάγεται βαρύτητα στο σύστημα. Στη συνέχεια εισάγεται ο χάλυβας ως υλικό για το στάτη και το πτερύγιο και το υγρό νερό για το ρευστό. Έπειτα για συνοριακές συνθήκες εισάγεται η θερμική ισχύς ανά μονάδα όγκου ($\frac{W}{m^3}$) και ταχύτητα ρευστού στην είσοδο $1.5 \frac{m}{s}$ ενώ για μοντέλο ιξώδους επιλέγεται το k-epsilon δυο εξισώσεων. Για την μέθοδο επίλυσης επιλέγονται σε όλες τις παραμέτρους διακριτοποίηση 2ας τάξεως. Η λύση γίνεται με ακρίβεια double precision και πραγματοποιείται παράλληλα σε 12 πυρήνες. Το πρόβλημα συγκλίνει μετά από 64 επαναλήψεις ενώ τα υπόλοιπα των εξισώσεων είναι:



Διάγραμμα 3.2.7.1 Υπόλοιπα εξισώσεων

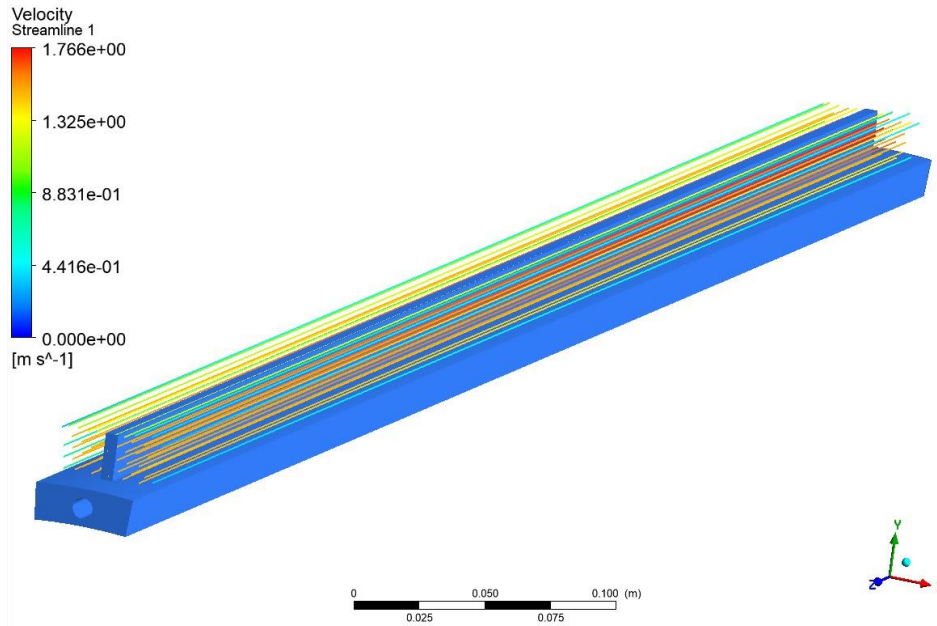
Το διάγραμμα σύγκλισης μας δείχνει ότι τα σφάλματα των εξισώσεων μειώνονται γραμμικά και συνεχόμενα όσο γίνονται οι επαναλήψεις ενώ επιτυγχάνεται το ελάχιστο σφάλμα σε μικρό αριθμό επαναλήψεων. Αυτό μας δείχνει ότι η σύγκλιση του προβλήματος πραγματοποιήθηκε ομαλά.

Έπειτα εξάγονται σε αρχείο ο συντελεστής συναγωγής αναλόγως την θέση του πτερυγίου και παίρνεται ο μέσος όρος αυτού. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα υπολογίζεται στα $4260 \frac{W}{m^2K}$. Για την εύρεση των αποτελεσμάτων τοποθετούνται τα δεδομένα σε Steady State Thermal Analysis και τα η κατανομή θερμοκρασίας στο στάτη και πτερύγιο είναι:



Εικόνα 3.2.7.6 Κατανομή θερμοκρασίας Πτερυγίου

Οι γραμμές ροής του νερού είναι

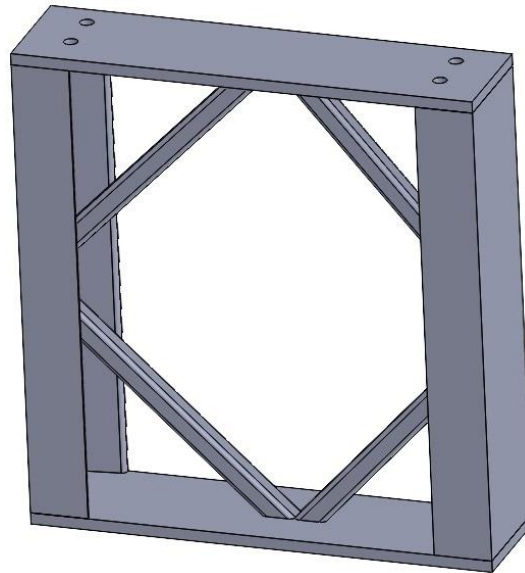


Εικόνα 3.2.7.7 Γραμμές ροής ρευστού

3.2.8 Στερέωση μύλου, συναρμολόγηση και μεταφορά

3.2.8.1 Στερέωση μύλου

Όπως είχε αναφερθεί και στην ενότητα **3.2.5.2** ο μύλος θα στηρίζεται στα bearing units. Προτιμάται η στήριξη του μύλου να γίνει πάνω στα bearing units και όχι πάνω στις πλάκες του στάτη διότι στο σημείο εκείνο οι κολλήσεις δέχονται ήδη μεγάλη καταπόνηση λόγω των κρουστικών δυνάμεων οπότε κρίνεται σκόπιμο να γίνει η στερέωση στα bearing units και όχι σε συγκολλητό εξάρτημα. Επιπλέον το bearing unit είναι πιο στιβαρό εξάρτημα για να γίνει η στήριξη του. Η βάση του μύλου θα είναι ορθογωνική ύψους 420mm. Η κατασκευή της αποτελείται από δύο ορθογωνικές πλάκες πάχους 10mm στο πάνω και κάτω μέρος της βάσης ενώ οι στύλοι θα είναι κοιλοδοκοί c channel 100x10mm. Για ενίσχυση της κατασκευής τοποθετούνται σε γωνία 45° τετράγωνοι κοιλοδοκοί 20x20x2.0mm.

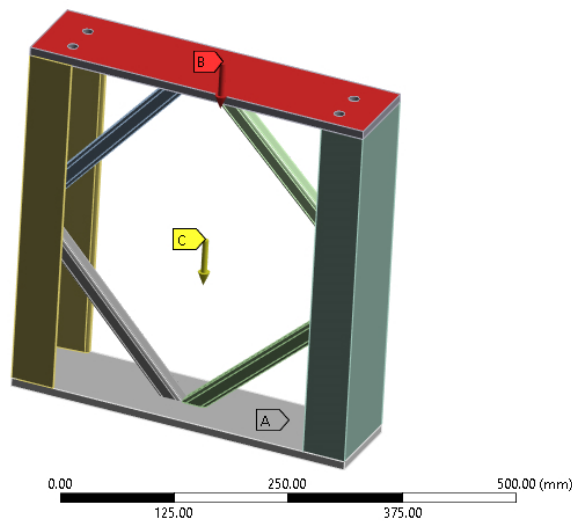


Εικόνα 3.2.8.1 Βάση στήριξης μύλου

Στο πάνω μέρος ανοίγονται 4 τρύπες Φ8 όπου θα ενώνουν τη βάση με το bearing unit μέσω κοχλιοσύνδεσης. Στο κάτω μέρος μπορούν να ανοιχθούν οι κατάλληλες τρύπες αναλόγως το σημείο στερέωσης του.

Εισάγοντας το μοντέλο στο ANSYS για στατική ανάλυση τοποθετούνται για οριακές συνθήκες πάλκτωση στο κάτω μέρος της βάσης, το βάρος που δέχεται η βάση από τον μύλο και τη βαρύτητα.

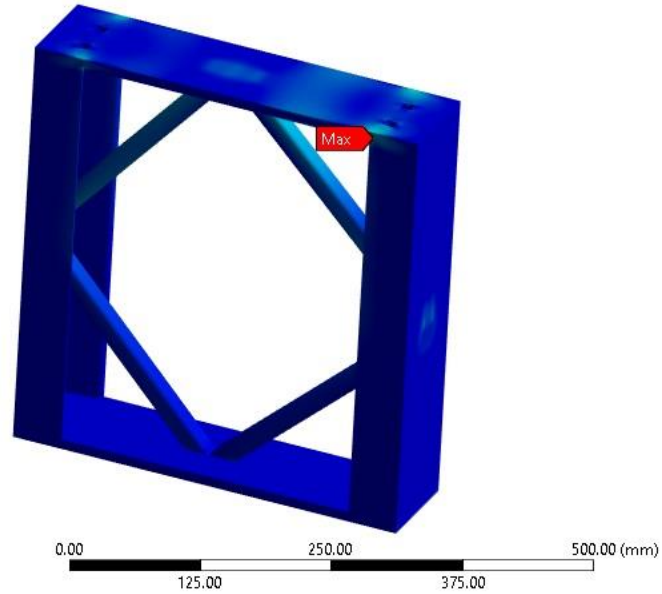
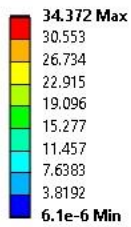
A: Static Structural
Static Structural
Time: 1. s
A Fixed Support
B Force: 2000. N
C Standard Earth Gravity: 9806.6 mm/s²



Εικόνα 3.2.8.2 Οριακές συνθήκες ανάλυσης βάσης

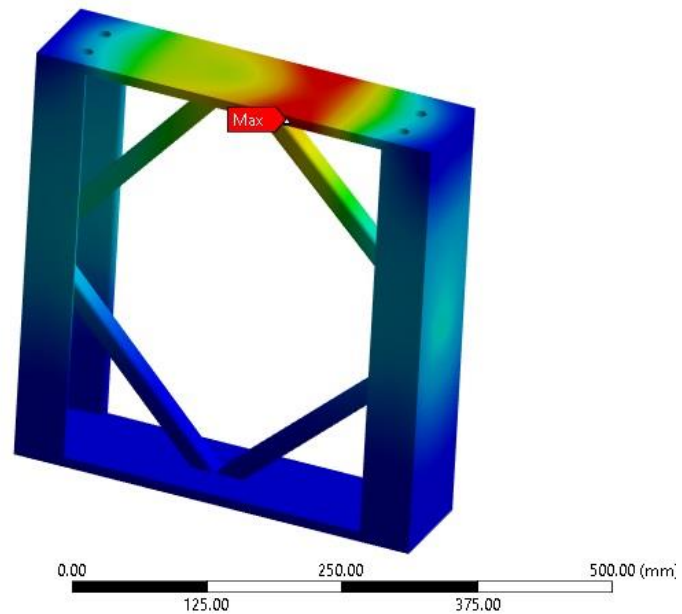
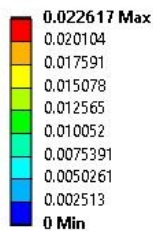
Για πλέγμα χρησιμοποιείται μέγεθος στοιχείων στα 3mm ενώ οι επαφές των κομματιών που είναι συγκολλημένα είναι πακτωμένες Τα αποτελέσματα της ανάλυσης είναι

A: Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1 s



Εικόνα 3.2.8.3 Τάσεις βάσης μύλου

A: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s

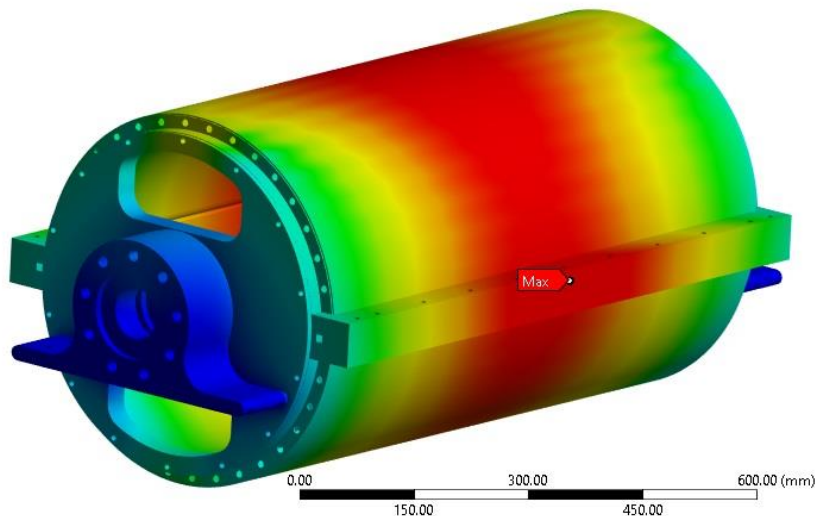
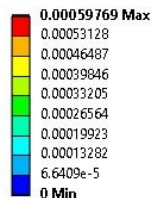


Εικόνα 3.2.8.4 Παραμόρφωση βάσης μύλου

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δείχνουν ότι η μέγιστη τάση της κατασκευής είναι αρκετά μικρότερη από το όριο διαρροής ενός κοινότυπου χάλυβα και η παραμόρφωση είναι ελάχιστη οπότε η βάση είναι ικανή να στηρίξει με ασφάλεια τον μύλο.

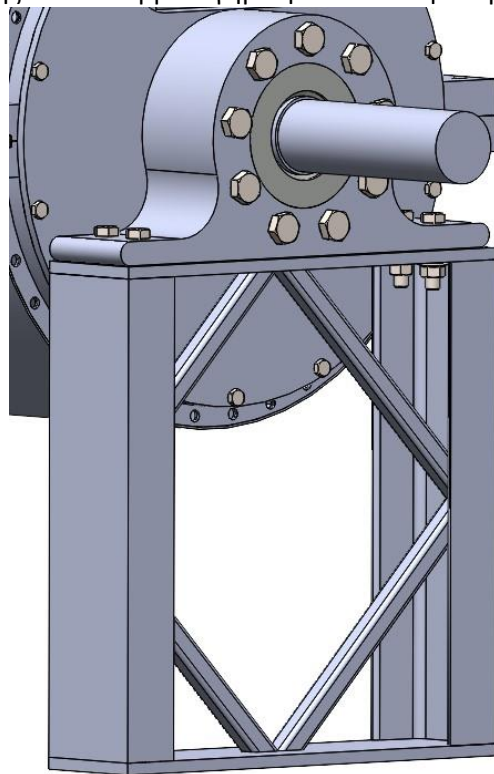
Ανάμεσα στη βάση και στο bearing unit μπορεί να τοποθετηθεί υλικό απόσβεσης ώστε να μειωθούν οι ταλαντώσεις του μύλου κατά την λειτουργία του. Τέτοια υλικά μπορεί να είναι καουτσούκ, PVC ή πολυουρεθάνη. Τέλος το βέλος κάμψης του μύλου λόγω του βάρους του με δυο ακριανές στηρίξεις είναι πολύ μικρό όπως φαίνεται και στην παρακάτω ανάλυση οπότε δεν χρειάζεται και ενδιάμεση στήριξη.

A: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s



Εικόνα 3.2.8.5 Βέλος κάμψης στάτη

Η τοποθέτηση της βάσης στο συναρμολόγημα φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία

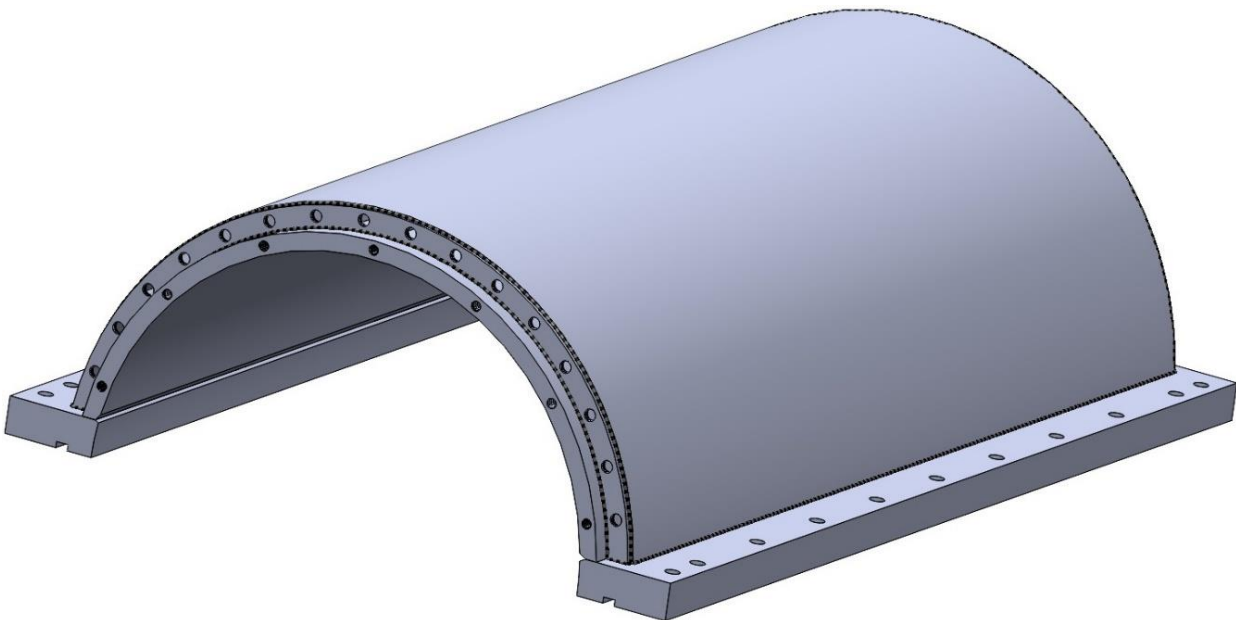


Εικόνα 3.2.8.6 Ο μύλος πάνω στη βάση

Το πρόβλημα που δημιουργείται είναι ότι οι δυο ακριανές βίδες της πρόσοψης που συνδέουν την πρόσοψη με το κάτω μέρος του στάτη δεν μπορούν να υπάρχουν λόγω της βάσης. Οι δυο βίδες αυτές αφαιρούνται από την κατασκευή χωρίς να υπάρχει όμως κάποιο πρόβλημα στη στήριξη της πρόσοψης στο μύλο. Επιπλέον το κάτω μέρος της πρόσοψης δεν γίνεται να χρησιμοποιηθεί για την αποβολή του υλικού οπότε η μεταφορά του θα πρέπει να γίνει με αερομεταφορά ή κενό αέρος.

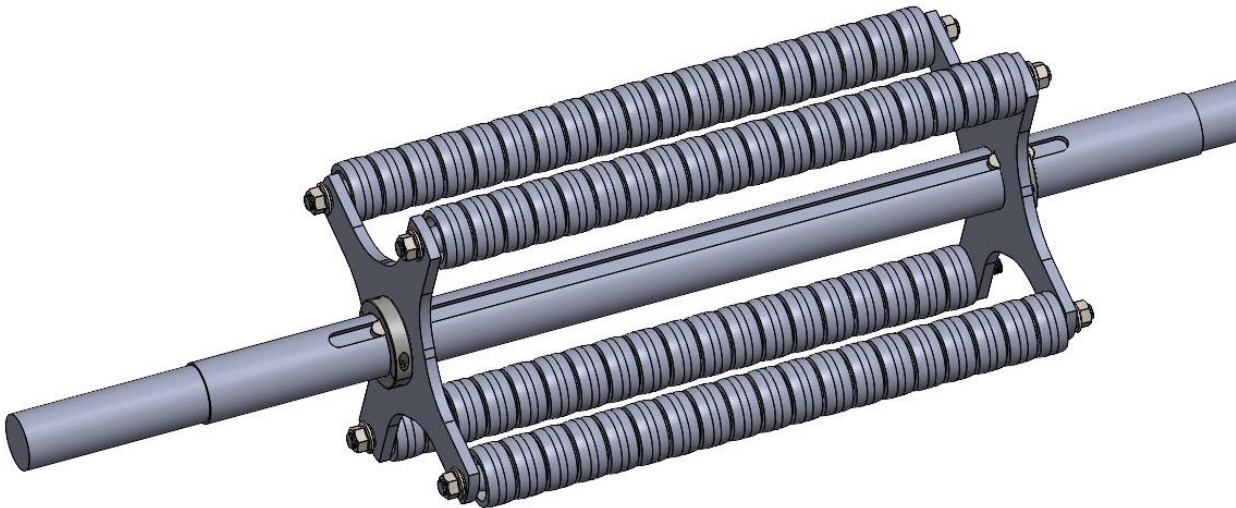
3.2.8.2 Συναρμολόγηση μύλου.

Η συναρμολόγηση του μύλου θα γίνεται εκτός των βάσεων και μετά θα μεταφέρεται ολόκληρος μετά σε αυτές. Για αρχή συγκολλούνται τα μισά του στάτη με τις πλάκες τους και μετά γίνεται η συγκόλληση των περυγίων, του καλύμματος και του κατανομέα πάνω στα μισά του στάτη



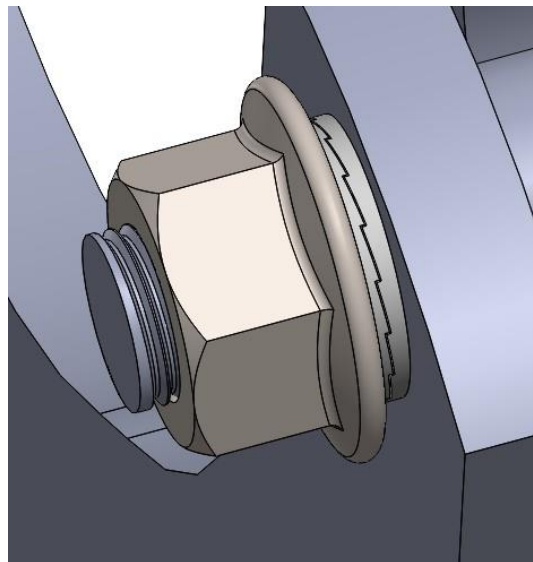
Εικόνα 3.2.8.7 Στάτης με τις συγκολλήσεις

Έπειτα γίνεται συναρμολόγηση του άξονα με τους βραχίονες, τις ράβδους και τους δακτυλίους ενώ τοποθετούνται και τα κολάρα του άξονα και οι σφήνες στους βραχίονες.



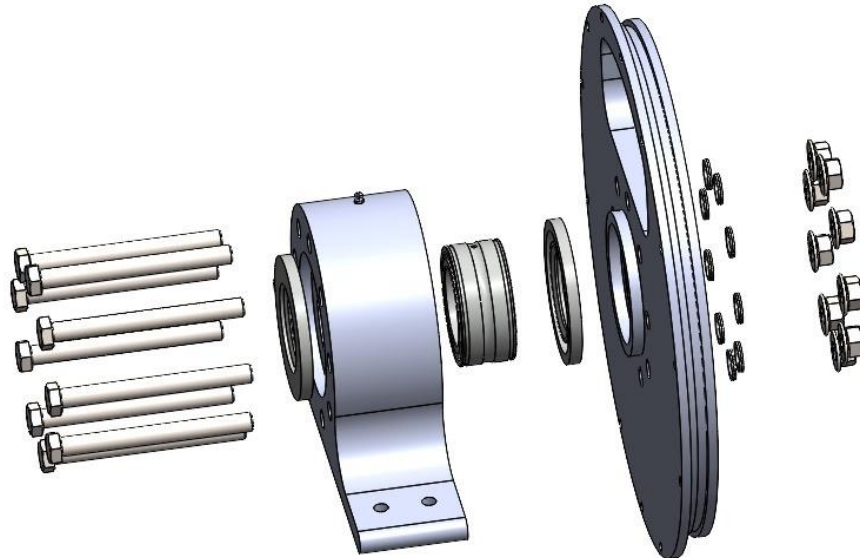
Εικόνα 3.2.8.8 Συναρμολόγημα άξονας-ράβδοι-βραχίονες-δακτύλιοι

Οι ράβδοι ενώνονται στους βραχίονες όπως και στον πρωτότυπο μύλο με περικόχλια όμως στον καινούργιο μύλο γίνεται χρήση ροδελών nord lock που δεν επιτρέπουν την αποκοχλίωση.



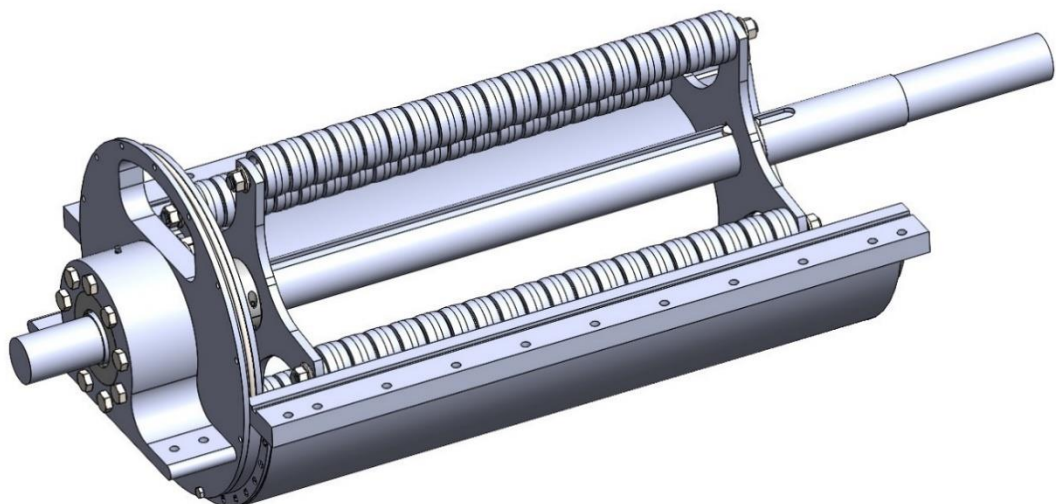
Εικόνα 3.2.8.9 Ροδέλες nord lock

Στη συνέχεια γίνεται η συναρμολόγηση της πρόσοψης με το bearing unit. Στο bearing unit πρεσάρεται το ρουλεμάν μέσα σε αυτό και τοποθετείται η μια τσιμούχα του άξονα. Το bearing unit μαζί με το ρουλεμάν και τη τσιμούχα τοποθετείται στη πρόσοψή και ασφαρίζεται με βίδες και περικόχλια. Και σε αυτή την περίπτωση γίνεται χρήση των nord lock ροδελών. Τέλος τοποθετείται και η τσιμούχα άξονα στην εξωτερική πλευρά του bearing assembly και ο δακτύλιος στεγάνωσης.



Εικόνα 3.2.8.10 Συναρμολόγηση bearing unit και πρόσοψης

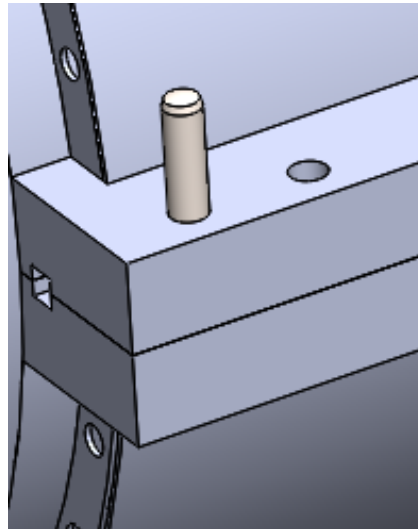
Έχοντας τα παραπάνω συναρμολογήματα γίνεται η ένωση της πρόσοψης με το bearing unit στο κάτω μέρος του στάτη με τις 3 βίδες και έπειτα εισάγεται το συναρμολόγημα άξονα-βραχιόνες-ράβδοι με δακτυλίους.



Εικόνα 3.2.8.11 Τοποθέτηση κινούμενων μερών στο στάτη και συναρμολογή προσόψεων

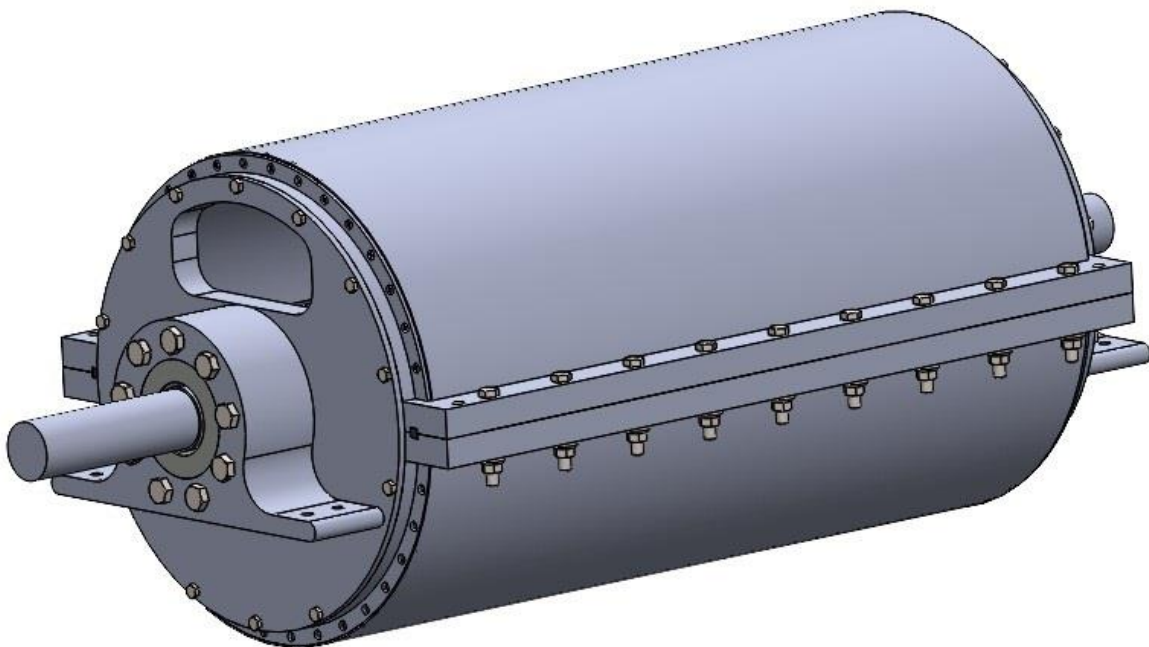
Έπειτα εισέρχεται και η άλλη πρόσοψη με το bearing assembly και έπειτα τοποθετείται το άλλο μισό του στάτη. Πριν τη τοποθέτηση του τοποθετείται η φλάντζα στις δυο πλάκες του κάτω μισού.

Τα δύο μισά ευθυγραμμίζονται με τους παρακάτω πείρους στις άκρες των πλακών



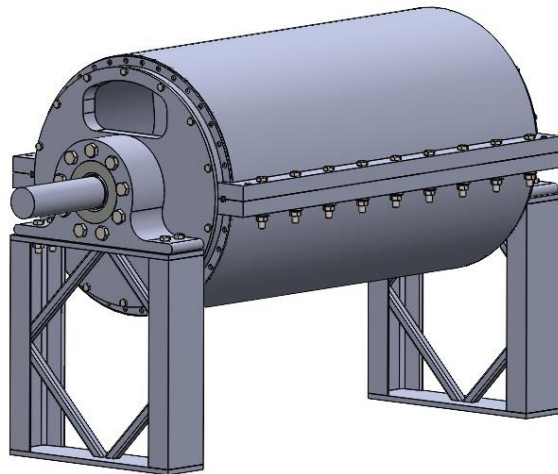
Εικόνα 3.2.8.12 Πίροι ευθυγράμμισης

Στη συνέχεια τοποθετούνται οι υπόλοιπες βίδες μεταξύ στάτη και προσόψεων ενώ τοποθετούνται οι βίδες μεταξύ των πλακών του στάτη. Με αυτό το βήμα ολοκληρώνεται το συναρμολόγημα του μύλου ο οποίος είναι έτοιμος να τοποθετηθεί στις βάσεις του.



Εικόνα 3.2.8.13 Συναρμολογημένος μύλος

Ο μύλος μεταφέρεται μέσω του δοκαριού ανύψωσης που θα αναφερθεί στην επόμενη ενότητα στις βάσεις του.

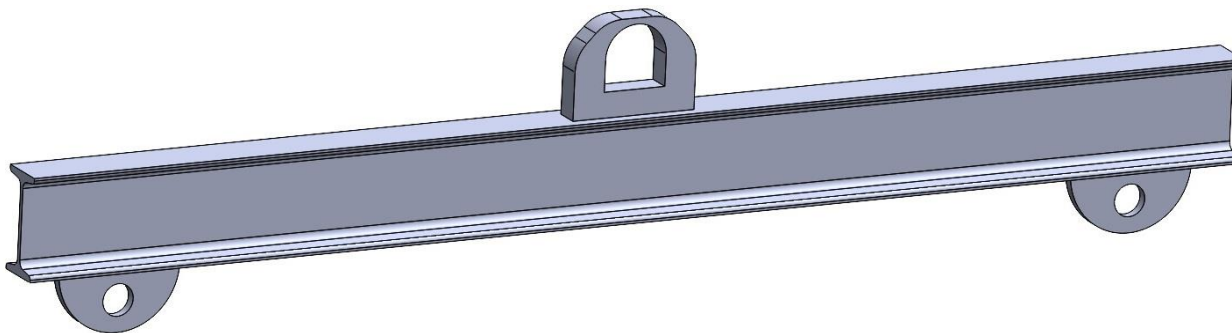


Εικόνα 3.2.8.14 Συναρμολογημένος μύλος στις βάσεις του

Ο έλεγχος και η συντήρηση του μύλου μπορεί να γίνει εύκολα αφαιρώντας το πάνω μισό του στάτη.

3.2.8.3 Μεταφορά μύλου

Για την μεταφορά του μύλου χρειάζεται να κατασκευαστεί ένα δοκάρι ανύψωσης που θα χρησιμοποιείται ιμάντας γύρω από αυτόν και θα τυλίγει τον άξονα. Αρχικά χρησιμοποιείται κοιλοδοκός Sb 80x6 και στο κέντρο του συγκολλάτε ένα έλασμα που θα συνδέεται με τη γερανογέφυρα. Στο από κάτω μέρος του γίνεται συγκόλληση ελασμάτων που θα είναι για την μεταφορά του μύλου.



Εικόνα 3.2.8.15 Δοκάρι ανύψωσης

Στα δυο ελάσματα τοποθετούνται μάρες και από κάτω τους κρίκοι με ασφάλεια όπου θα εισάγεται ο ιμάντας που θα συγκρατεί τον μύλο.

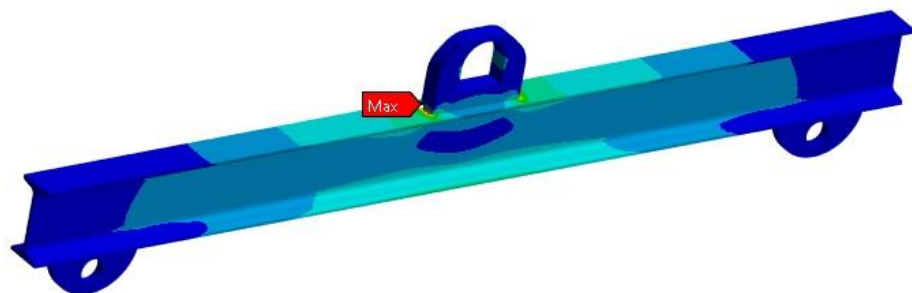
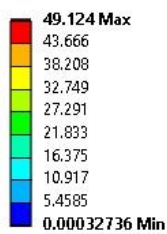


Εικόνα 3.2.8.16 Μάπα μαζί με κρίκο με ασφάλεια

Η δοκός εισάγεται στο ANSYS για στατική ανάλυση. Προστίθεται πάκτωση στο σημείο όπου είναι το έλασμα που δένεται στη γερανογέφυρα και οι δυνάμεις που δέχονται τα ελάσματα που συγκρατούν το μύλο. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης είναι:

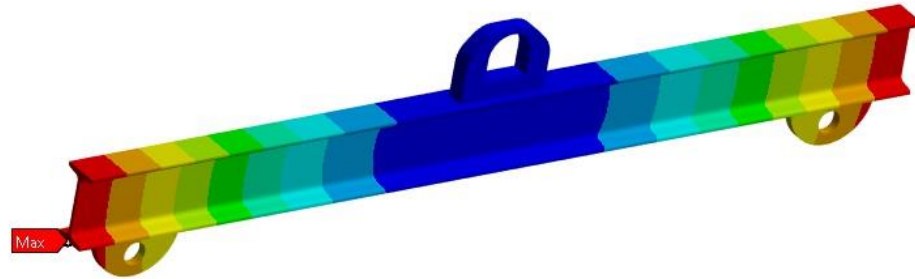
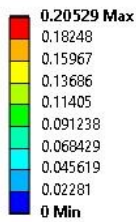
A: Static Structural

Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1 s



Εικόνα 3.2.8.17 Τάσεις δοκαριού ανύψωσης

A: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s



Εικόνα 3.2.8.18 Παραμόρφωση δοκαριού ανύψωσης

Η μέγιστη τάση που εμφανίζεται, αναμενόμενα στο σημείο όπου ενώνεται το έλασμα που συνδέει τη γερανογέφυρα με τη δοκό είναι επιτρεπτή για να μην αστοχήσει η δοκός, έχοντας όμως τη σωστή συγκόλληση στο σημείο αυτό. Τέλος η παραμόρφωση δείχνει ότι η δοκός δεν αποκτάει μεγάλη κάμψη που θα μπορούσε να φέρει το μύλο σε ανεξέλεγκτη κατάσταση κατά την ανύψωση και μεταφορά του.

3.2.9 Ηχομόνωση μύλου

Όσο αφορά το κομμάτι της ηχομόνωσης, το πάχος του στάτη σε συνδυασμό το νερό που κυκλοφορεί στο μύλο δημιουργούν μια απόσβεση στον ήχο. Κατά την λειτουργία του καινούργιου μύλου μπορεί να γίνει μέτρηση της στάθμης της έντασης του ήχου με ντεσιμπελόμετρο και στην περίπτωση όπου η ένταση ξεπερνάει τον 70db(A) να γίνει χρήση ηχομονωτικού υλικού. Το υλικό αυτό θα τοποθετηθεί γύρω από το μύλο για την μείωση της έντασης ενώ η θερμοκρασία λειτουργίας του δεν επιτρέπει στο να υπάρξει περίπτωση ανάφλεξης του υλικού λόγω θερμοκρασίας.

4. Συμπεράσματα και μελλοντική ανάλυση

Έπειτα από όλη την ανάλυση και σχεδιασμό του μύλου προκύπτουν κάποια συμπεράσματα περί του υπολογιστικού θέματος. Το συγκεκριμένο σύστημα που χρειάστηκε να βελτιστοποιηθεί ήταν ένα θέμα με πολλές παραμέτρους σχεδιασμού. Χρειάστηκε να γίνει θεωρητικός υπολογισμός των επιφανειακών τάσεων για να μην υπάρχουν μεγάλες φθορές στα εξαρτήματα του ενώ για την εύρεση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων χρειάστηκε και η χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Προβλήματα κατά την λειτουργία του όπως η αζυγοσταθμία και οι ιδιοσυχνότητες που οδηγούν σε συντονισμό έπρεπε να ελεγχθούν με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων ενώ οι φυγοκεντρικές δυνάμεις που υπάρχουν επηρεάζουν το σχεδιασμό του συστήματος. Η υψηλή θερμοκρασία που υπήρχε στο σύστημα κατά την λειτουργία του οδηγεί στο θεωρητικό σχεδιασμό πτερυγίων ψύξης και βρίσκεται η σχέση μάζας batch με το μέγεθος του μύλου. Με γνώμονα όλους τους παραπάνω υπολογισμούς τόσο σε θεωρητικό όσο και σε επίπεδο προσομοιώσεων ξεκινάει ο ανασχεδιασμός του μύλου από το μέγεθος του και από το σχεδιασμό των βασικών εξαρτημάτων του έχοντας πάντα ως κριτήριο την εύκολη και οικονομικότερη κατασκευή τους και την ευκολία συναρμολόγησης-αποσυναρμολόγησης του μύλου. Ο σχεδιασμός συνεχίστηκε στην κατασκευή εδράσεων οι οποίες θα συναρμολογούνται στο μύλο με ευκολία χωρίς να υπάρχει ο κίνδυνος κεντραρίσματος και ευθυγράμμισης των εδράσεων με το στάτη και τον άξονα. Ο θεωρητικός υπολογισμός των πτερυγίων εφαρμόστηκε στον καινούργιο μύλο ενώ έγινε και σε αυτή την περίπτωση ανάλυση μέσω πεπερασμένων στοιχείων για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων. Η τοποθέτηση των οπών και σπειρωμάτων στην κατασκευή για την συναρμολόγηση-αποσυναρμολόγηση της έχει γίνει με τρόπο ώστε να μπορεί να γίνεται με ευκολία και χρήση απλών εργαλείων. Τέλος έγινε ο σχεδιασμός της βάσης του μύλου για να στηρίζεται με ασφάλεια κατά την λειτουργία του και δημιουργήθηκε η δοκός ανύψωσης για την μεταφορά του.

Η ανάλυση του συγκεκριμένου θέματος θα μπορούσε να συνεχιστεί και σε μελλοντικό χρόνο. Η πιο ακριβής ανάλυση των επιφανειακών τάσεων στο στάτη-ράβδους-δακτυλίου θα μπορούσε να γίνει με χρήση προσομοίωσης Explicit Dynamics ενώ εισάγοντας μέσα σε αυτό και το υλικό προς λειοτρίβηση θα μπορεί να βρεθεί οι δυνάμεις που δέχεται το υλικό. Η ανάλυση αυτή απομακρύνεται από το πλαίσιο διπλωματικής εργασίας διότι για να επιτευχθεί χρειάζεται ένας HPC(High Performance Computer). Η καινούργια διάταξη του μύλου με τα αποσπόμενα μέρη δίνει την δυνατότητα για μελλοντική ανάλυση και σχεδιασμό υποστηρικτικών εξαρτημάτων όπως ανεμιστήρα για αερομεταφορά ή μεταφορικό κοχλία. Τελειώνοντας μια πολύ σημαντική αλλαγή που θα μπορούσε να γίνει μελλοντικά είναι η τροποποίηση του μύλου για χρήση όχι μόνο σε λειοτρίβηση οικοδομικών υλικών αλλά και σε υλικά που προορίζονται για τη βιομηχανία τροφίμων και φαρμάκων.



Παραπομπές

- [1]<https://pharmaguddu.com/hammer-mill-usage-construction-working-principles-and-types/>
- [2]<https://www.worldfertilizer.com/product-news/17062019/hammer-mill-updates/>
- [3]<https://www.cementequipment.org/main-category/cement-grinding-main-category/every-component-of-ball-mill-detailed-explained/>
- [4]<https://www.epic-powder.com/machines/Spiral-Jet-Mill/>
- [5]A NOVEL DRY PULVERIZER FOR LOW COST PRODUCTION OF POWDERS
- [6]Power aspects of a horizontal ring mill pulverizer under continuous comminution of olivine
- [7]Tutorial on Hertz Contact Stress Xiaoyin Zhu
- [8]<https://amesweb.info/HertzianContact/HertzianContactCalculationSteps.aspx>
- [9]<https://tribos.wordpress.com/2017/05/03/overview-of-hertzian-elliptical-or-point-contacts/>
- [10]<https://wiki.tum.de/display/zfp/Hertzian+Theory+of+Contact>
- [11]Çengel, Y. A., Ghajar, A. J., 2015, Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications, 5th Edition in SI Units, Instructor Edition, Online Learning Center, McGraw-Hill
- [12]Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Bergman, T.L, Lavine, A.S., 2011, Principles of Heat and Mass Transfer, 7th Edition International Student Version, Instructor Companion Site, Wiley
- [13]<https://www.globalgilson.com/steel-concrete-cylinder-molds>
- [14]<https://engineersfield.com/nominal-pipe-size-dn450/>
- [15]<https://www.linkedin.com/pulse/ball-mill-highly-efficient-grinding-milling-machine-evita-lee>
- [16]<https://benshaw.com/ball-mill-positioning/>
- [17]<https://www.customprocessingservices.com/blog/what-is-jet-milling>
- [18]<https://www.linkedin.com/pulse/hertz-stress-impact-padeye-design-che-zaid-zakaria-peng-miem-myset>



Παράρτημα

Παράρτημα Α(Κώδικες Matlab)

Κώδικας υπολογισμού θεωρητικών εξισώσεων και επιφανειακών τάσεων

```
%% Data
R=0.214;%Inner mill radius
ri=23e-3;%ring Inner radius
ro=34e-3;%ring Outer radius
b=30e-3;%ring width
lr=0.650;%rod length
r_cem=5e-6;
m_number=ceil(lr/b)-2;
m_ring=6.59;%Ring mass
l=0.180; %Arm length[m];
m=0.2; %Ring/rod friction Coefficient
r=20e-3; %Connecting rod radius
w=105; %Shaft angular velocity
rid=55e-3;
a=8.4e-3;%Coefficient of rolling resistance
e=(m_number*b/lr);
%% Basic geometric relationships
theta=acosd(((R-ro)^2+(ri-r)^2-l^2)/(2*(R-ro)*(ri-r))); %'design angle'[deg]
%theta=75;
% l=sqrt(((2*(R-ro)*(ri-r)*cosd(theta))/(((R-ro)^2+(ri-r)^2)))); %Arm length[mm];
phi=asind((ri-r)*sind(theta));
x=90-phi-theta; %angle x[deg]
%% Static analysis and calculation of the forces acting on the ring
T=(m_ring*w^2*(R-ro)*a*(sind(theta)-m*cosd(theta)))/(ro*(sind(theta)-m*cosd(theta))+a*(cosd(theta)+m*sind(theta))-m*ri); %Shear Force[N]
P=abs((m_ring*w^2*(R-ro))*((ro*sind(theta)-m*cosd(theta))-m*ri)/((ro*(sind(theta)-m*cosd(theta))+a*(cosd(theta)+m*sind(theta))-m*ri))); %Compressive force
f=(ro/a)-m*(ri/a)*(sind(theta)-m*cosd(theta))^-1; %milling force factor
F=(m_ring*w^2*a*(R-ro))/((ro*(sind(theta)-m*cosd(theta))+a*(cosd(theta)+m*sind(theta))-m*ri)); %Normal Force
Tf=m*F; %Frictional Force
%%Calculation of the total milling power N,the net power Nnet and the
%%efficiency of pulverizing machine
M=((m_ring*w^2*a)*((R-ro)*(l*sind(phi+theta)-l*cosd(phi+theta)+m*r)))/(ro*(sind(theta)-m*cosd(theta))+a*(cosd(theta)+m*sind(theta))-m*ri);%torsional moment exerted on the shaft
N=M*w; %Milling power
Vs=w*R*(ri/ro); %Sliding velocity between the ring and the rod
Nf=Tf*Vs; %frictional power loss
N_net=N-Nf; %Net milling power
eff=1-m*(R/(l*sind(phi+theta)-l*cosd(phi+theta)+m*r)); %efficiency of milling machine
%% Hertzian Contact Stress
% Between ring and rod
E_steel=210e9; %Steel Young modulus
```




```
v_steel=0.303; %Steel poisson ratio
R1=(1/(2*r))-(1/(2*ri));%effective radius
b1=sqrt((((4*F)*(2/E_steel))/(pi*b*R1)));%Radius of contact area
P_max1=(2*F)/(pi*b1*b);%Maximun contact Pressure at the center;
z1=0.48*b1;%depth below the surface
sigma_x1=-2*v_steel*P_max1*(sqrt(1+z1^2/b1^2)-abs(z1/b1));
sigma_y1=-P_max1*((1+2*(z1^2/b1^2))/(sqrt(1+z1^2/b1^2))-2*abs(z1/b1));
sigma_z1=-P_max1*(1/sqrt(1+z1^2/b1^2));
sigma_1=sigma_x1;
txy_1=(sigma_x1-sigma_z1)/2;
tyz_1=(sigma_y1-sigma_z1)/2;
%Between Ring and stator
R3=-(1/R)+(1/ro);%effective radius
b3=sqrt((((4*P)*(2/E_steel))/(pi*b*R3)));%Radius of contact area
P_max3=(2*P)/(pi*b3*b);%Maximun contact Pressure at the center;
z3=0.48*b3;%depth below the surface
sigma_x3=-2*v_steel*P_max3*(sqrt(1+z3^2/b3^2)-abs(z3/b3));
sigma_y3=-P_max3*((1+2*(z3^2/b3^2))/(sqrt(1+z3^2/b3^2))-2*abs(z3/b3));
sigma_z3=-P_max3*(1/sqrt(1+z3^2/b3^2));
sigma_3=sigma_x3;
txy_3=(sigma_x3-sigma_z3)/2;
tyz_3=(sigma_y3-sigma_z3)/2;
%% Ring curvature for stress relief
%Radius Parameters
A1=(1/(2*r))-(1/(2*rid));
B1=1/(2*r);
theta1=ceil(acosd((B1-A1)/(A1+B1)));
%ring-rod
%Define c1 c2 from angle theta1
if (0<=theta1)&(theta1)<=0.5
    c11=61.4; c21=0.1018;
elseif (1<=theta1)&(theta1)<=1.5
    c11=36.8; c21=0.1314;
elseif (1.5<=theta1)&(theta1)<=2
    c11=27.48; c21=0.1691;
elseif (2<=theta1)&(theta1)<=3
    c11=16.5; c21=0.1964;
elseif (3<=theta1)&(theta1)<=4
    c11=13.31; c21=0.2188;
elseif (4<=theta1)&(theta1)<=7
    c11=9.79; c21=0.2552;
elseif (8<=theta1)&(theta1)<=10
    c11=7.86; c21=0.2850;
elseif (10<=theta1)&(theta1)<=20
    c11=6.604; c21=3.77;
elseif (20<=theta1)&(theta1)<=30
    c11=3.778; c21=0.4080;
elseif (30<=theta1)&(theta1)<=35
    c11=2.731; c21=0.4930;
elseif (35<=theta1)&(theta1)<=40
    c11=2.397; c21=0.530;
elseif (40<=theta1)&(theta1)<=45
    c11=2.136; c21=0.567;
```



```
elseif (45<=theta1)&(theta1)<=50
    c11=1.754; c21=0.641;
elseif (50<=theta1)&(theta1)<=55
    c11=1.611; c21=0.678;
elseif (55<=theta1)&(theta1)<=60
    c11=1.486; c21=0.747;
elseif (60<=theta1)&(theta1)<=65
    c11=1.378; c21=0.759;
elseif (65<=theta1)&(theta1)<=70
    c11=1.284; c21=0.802;
elseif (70<=theta1)&(theta1)<=75
    c11=1.202; c21=0.846;
elseif (75<=theta1)&(theta1)<=80
    c11=1.128; c21=0.893;
elseif (80<=theta1)&(theta1)<=85
    c11=1.061; c21=0.944;
elseif (85<=theta1)&(theta1)<=90
    c11=1; c21=1;
end
%Finding depth and radius of elliptical contact
a1d=c11*((3*F)/(2*E_steel*(A1+B1)))^(1/3);
b1d=c21*((3*F)/(2*E_steel*(A1+B1)))^(1/3);
P_max1d=(3*F)/(2*pi*a1d*b1d);%Maximum contact pressure
z1d=0.48*b1d;%Depth below surface
%Stresses
sigma_x1d=-2*v_steel*P_max1d*(sqrt(1+(z1d^2/b1d^2))-abs(z1d/b1d));
sigma_y1d=-P_max1d*((1+2*(z1d^2/b1d^2))/(sqrt(1+(z1d^2/b1d^2)))-2*abs(z1d/b1d));
sigma_z1d=(-P_max1d/(1+z1d^2));
sigma_1d=sigma_z1d;
txy_1d=(sigma_x1d-sigma_z1d)/2;
tyz_1d=(sigma_y1d-sigma_z1d)/2;
%Between ring and stator
A3=(1/(2*rid))-(1/(2*R));
B3=1/(2*rid);
theta3=acosd((B3-A3)/(A3+B3));
if (0<=theta3)&(theta3)<=0.5
    c13=61.4; c23=0.1018;
elseif (1<=theta3)&(theta3)<=1.5
    c13=36.8; c23=0.1314;
elseif (1.5<=theta3)&(theta3)<=2
    c13=27.48; c23=0.1691;
elseif (2<=theta3)&(theta3)<=3
    c13=16.5; c23=0.1964;
elseif (3<=theta3)&(theta3)<=4
    c13=13.31; c23=0.2188;
elseif (4<=theta3)&(theta3)<=6
    c13=9.79; c23=0.2552;
elseif (8<=theta3)&(theta3)<=10
    c13=7.86; c23=0.2850;
elseif (10<=theta3)&(theta3)<=20
    c13=6.604; c23=3.77;
elseif (20<=theta3)&(theta3)<=30
    c13=3.778; c23=0.4080;
```



```
elseif (30<=theta3)&(theta3)<=35
    c13=2.731; c23=0.4930;
elseif (35<=theta3)&(theta3)<=40
    c13=2.397; c23=0.530;
elseif (40<=theta3)&(theta3)<=45
    c13=2.136; c23=0.567;
elseif (45<=theta3)&(theta3)<=50
    c13=1.754; c23=0.641;
elseif (50<=theta3)&(theta3)<=55
    c13=1.611; c23=0.678;
elseif (55<=theta3)&(theta3)<=60
    c13=1.486; c23=0.747;
elseif (60<=theta3)&(theta3)<=65
    c13=1.378; c23=0.759;
elseif (65<=theta3)&(theta3)<=70
    c13=1.284; c23=0.802;
elseif (70<=theta3)&(theta3)<=75
    c13=1.202; c23=0.846;
elseif (75<=theta3)&(theta3)<=80
    c13=1.128; c23=0.893;
elseif (80<=theta3)&(theta3)<=85
    c13=1.061; c23=0.944;
elseif (85<=theta3)&(theta3)<=90
    c13=1; c23=1;
end
a3d=c13*((3*P)/(2*E_steel*(A3+B3)))^(1/3);
b3d=c23*((3*P)/(2*E_steel*(A3+B3)))^(1/3);
z3d=0.48*b3d;
P_max3d=(3*P)/(2*pi*a3d*b3d);
sigma_x3d=-2*v_steel*P_max3d*(sqrt(1+(z3d^2/b3d^2))-abs(z3d/b3d));
sigma_y3d=-P_max3d*((1+2*(z3d^2/b3d^2))/(sqrt(1+z3d^2/b3d^2))-2*abs(z3d/b3d));
sigma_z3d=(-P_max3d/sqrt((1+z3d^2/b3d^2)));
sigma_3d=sigma_x3d;
txy_3d=(sigma_x3d-sigma_z3d)/2;
tyz_3d=(sigma_y3d-sigma_z3d)/2;
%Stress ratios
f1=sigma_1d/sigma_1;
f1y=sigma_y1d/sigma_y1;
f1z=sigma_z1d/sigma_z1;
f3=sigma_3d/sigma_3;
f3y=sigma_y3d/sigma_y3;
f3z=sigma_z3d/sigma_z3;
```



Κώδικας υπολογισμού μάζας κλινκερ από την γεωμετρία

```
S=1.35;%Scale  
R=S*176.5e-3;%stator inner radius  
h=S*28e-3;%half height of ring  
a=2*acos(1-(h/R));%angle between center of circle and circular segment  
A=0.5*R^2*(a-sin(a));%Surface  
L=S*0.535;%Length of pulverization  
V=L*A;%Volume  
r=1600;%Clinker density  
m=r*V;%Clinker mass
```

Κώδικας υπολογισμού πτερυγίων

```
clear  
clc  
cp=4184;%Water Heat capacity  
k=0.5918; %k factor  
h=7500;%Heat transfer coefficient  
w=856e-3;%Fin length  
t=5e-3;%Fin thickness  
m=sqrt(2*h/k*t);  
L=20e-3;%Fin height  
Lc=L+t/2;%Real length  
Afin=2*w*Lc;%Fin area  
p=2*(w+Lc);  
Tb=50;%Stator Temp  
Tinf=25;%Water Temp  
Q=sqrt(h*k*Afin*p)*(Tb-  
Tinf)*((sinh(m*L)+(h/(m*k))*cosh(m*L))/((cosh(m*L)+(h/(m*k))*sinh(m*L))));%One fin  
thermal power  
%Efficiency  
ksi=Lc^(3/2)*sqrt(h/(k*Afin));%Concstant  
hfin=0.62;%fin efficiency (From diagram)  
theta=10;  
l_stator=0.657;%Stator arc  
n_fin=17;  
Au_fin=l_stator*w-n_fin*(t*w);%Area of section without fins  
Q_total=h*(Au_fin+hfin*Afin)*(Tb-Tinf)%Total heat power
```

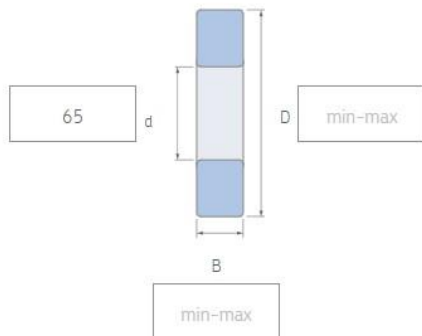
Παράρτημα Β

Κατάλογος προϊόντων SKF

Filters

Dimensional constraints

Enter exact dimensions or ranges in mm to filter (e.g. 23-27, -40)



Bearing types



Cylindrical roller bearing



SKF Explorer bearings ⁱ

Filter on SKF Explorer items only



Capping ⁱ

Filter on open/capped bearings



Capped bearings Open bearings

Cap type

Sealed

Number seals or shields

Both sides

Q Search designation

| Principal dimensions | | | Basic load ratings | | Designation |
|----------------------|--------|--------|--------------------|---------------------|------------------|
| d (mm) | D (mm) | B (mm) | C (kN) | C ₀ (kN) | |
| 65 | 100 | 46 | 138 | 224 | NNF 5013 ADB-2LS |



Image may differ from product. See the technical specification for details.

NNF 5013 ADB-2LSV

Double row full complement cylindrical roller bearing, NNF design with integral sealing and relubrication feature

Double row full complement cylindrical roller bearings incorporate a large number of rollers and are therefore suitable for very heavy radial loads in combination with moderate speeds. Having three flanges on the two-piece inner ring and one central flange on the outer ring, NNF design bearings locate the shaft axially in both directions. Two snap ring grooves in the outer ring simplify mounting and save space axially.

- Very high radial load carrying capacity
- High radial stiffness
- Long service life
- Locate the shaft axially in both directions
- Sealed for increased reliability, with relubrication feature



2213 E-2RS1TN9

Self-aligning ball bearing with seals on both sides

Self-aligning ball bearings, with seals on both sides, have two rows of balls, a common sphered raceway in the outer ring and two deep uninterrupted raceway grooves in the inner ring. They are insensitive to angular misalignment of the shaft relative to the housing. The integral sealing can significantly prolong bearing service life because it keeps lubricant in the bearings and contaminants out.

- Accommodate static and dynamic misalignment
- Excellent high-speed performance
- Excellent light load performance
- Low friction

Παράρτημα Γ

Επιλογή κολλάρων άξονα



BROWSE CATALOG

McMASTER-CARR

shaft collars

Clear All

System of Measurement

✓ Metric

For Shaft Diameter Show

✓ 65mm

Material

Steel

Construction

✓



Two Piece

For Shaft Type Show

✓



Keyed

Keyway Width

1 Product

▶ About Shaft Collars

Shaft collars are useful for holding and positioning components on a shaft. They can also serve as mechanical stops and stroke limiters.

[More](#)

Clamping Two-Piece Shaft Collars



With Keyway

These metal collars are stronger than plastic shaft collars. The two-piece design allows you to install them anywhere on a shaft without removing components or having access to the ends of the shaft. Collars clamp evenly around the shaft to create a strong, mar-free hold. Tighten the clamping screws to secure.

Black-oxide steel collars have some corrosion resistance.

For technical drawings and 3-D models, click on a part number.

Metric—With Keyway

| For Shaft Dia., mm | OD, mm | Wd., mm | Wd., mm | Keyway Dp., mm | Type | Clamping Screw No. Included | Each |
|--------------------------------------|--------|---------|---------|----------------|-------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Black-Oxide 1215 Carbon Steel | | | | | | | |
| 65 | 93 | 19 | 18 | 4.4 | Socket Head Screw | 2 | 3390N29 \$133.40 |



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΓΚΙΟΥΖΕΛΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

MDL ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΜΠ
MACHINE DESIGN LABORATORY NTUA