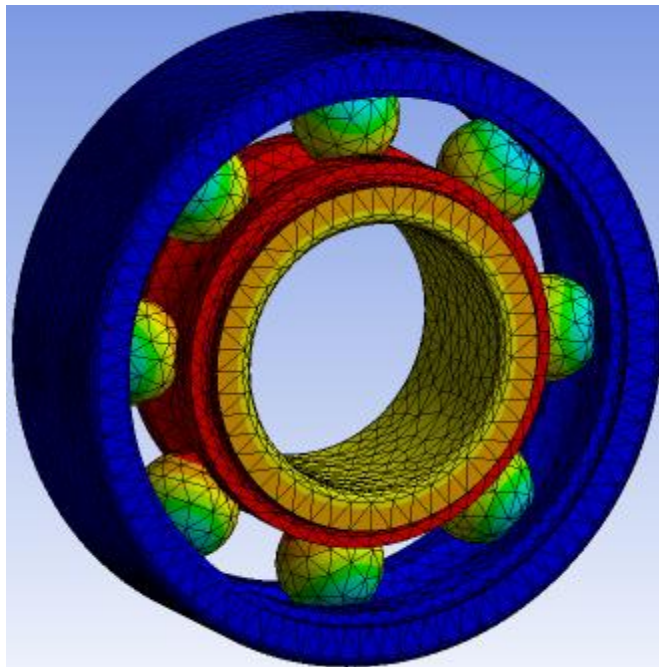


ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΕΔΡΑΝΩΝ ΚΥΛΙΣΗΣ ΜΕ ΤΗΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΑ: ΜΕΛΙΣΣΑΡΟΠΟΥΛΟΥ ΒΑΣΙΛΙΚΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟΣ ΥΠΟΤΡΟΦΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2015

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδάστριας: Ο κάτωθι υπογεγραμμένη σπουδάστρια έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο σπουδάστρια
(Ονοματεπώνυμο)

.....

(Υπογραφή)

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία με τίτλο «Μελέτη μηχανικής συμπεριφοράς εδράνων κύλισης με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων» με τη βοήθεια του επαγγελματικού προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ANSYS, έχει ως σκοπό την μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς συγκεκριμένων εδράνων κύλισης τυποποιημένης γεωμετρίας, τα οποία έχουν σημαντική επίδραση στην δυναμική των στηριζόμενων μέσα σε αυτών αξόνων.

Αφορμή του θέματος της πτυχιακής εργασίας αποτέλεσε η πρακτική μου άσκηση στην ΒΙ.ΠΕ ΠΑΤΡΩΝ καθώς με έκανε να καταλάβω τον σημαντικό ρόλο τον οποίο έχουν τα έδρανα κύλισης(ρουλεμάν) στον χώρο της βιομηχανίας διότι αποτελούν τα πιο θεμελιώδη εξαρτήματα από όλα τα περιστρεφόμενα στοιχεία των μηχανών. Ένα αρκετά μεγάλο ποσοστό μεταξύ 40-50%των αστοχιών των μηχανών, οφείλεται στα ελαττώματα των εδράνων κύλισης (ρουλεμάν). Η εμφάνιση σφαλμάτων κατά την διάρκεια λειτουργία τους, μπορεί να οδηγήσει σε βλάβη ολόκληρης της μηχανής, με συνέπεια απρογραμμάτιστες διακοπές της παραγωγής και κατ' επέκταση οικονομικές ζημίες. Για τους λόγους αυτούς θεωρήσαμε σημαντικό με τον επιβλέποντα καθηγητή μου Γεώργιο Γιαννόπουλο να ασχοληθούμε με το θέμα αυτό.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά και μέσα από την καρδιά μου τον καθηγητή μου και πάνω από όλα σπουδαίο άνθρωπο τον κ. Γ. Γιαννόπουλο καθηγητή του τμήματος Μηχανολογίας Πατρών για την βοήθεια, την υπομονή και την κατανόηση που έδειξε όλο αυτό το διάστημα για την ολοκλήρωση της πτυχιακής μου εργασίας. Δεν θα ξεχάσω να ευχαριστήσω και όλους του καθηγητές του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, αλλά πάνω από όλα την οικογένεια μου γιατί χωρίς αυτούς δεν θα είχε ανοίξει ούτε ένας δρόμος για ένα καλύτερο μέλλον δικό μου αλλά και δικό τους ελπίζω.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή ασχολείται με τη πρόβλεψη της μηχανικής συμπεριφοράς ένσφαιρων και βαρελοειδών εδράνων κύλισης με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Η ανάλυση περιορίζεται σε στατικά φορτία καθότι η δυναμική ανάλυση ενός τρισδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων προσομοίωσης πραγματικών ταχυτήτων περιστροφής ενός εδράνου κύλισης, απαιτεί τεράστιο υπολογιστικό κόστος στο οποίο ένας συμβατικός προσωπικός υπολογιστής δύσκολα μπορεί να ανταπεξέλθει. Σκοπός είναι η μελέτη της δυσκαμψίας και της αντοχής των συγκεκριμένων στοιχείων μηχανών η οποία έχει σημαντική επίδραση στη δυναμική των στηριζόμενων μέσα σε αυτών αξόνων.

Η παρούσα πτυχιακή είναι οργανωμένη σε κεφάλαια όπως αναλύεται παρακάτω:

Στην πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια γενική αναφορά στις στηρίξεις των αξόνων και τα έδρανα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο πραγματοποιείται αναλυτικότερη περιγραφή των εδράνων ολίσθησης, κύλισης αλλά και των ωστικών εδράνων.

Το τρίτο κεφάλαιο ασχολείται με τις πιο συνηθισμένες βλάβες που παρουσιάζονται στα έδρανα στήριξης αξόνων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη περιγραφή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και ο τρόπος που αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται στον υπολογιστή με τη βοήθεια του Ansys-Workbench..

Στο πέμπτο κεφάλαιο αποσαφηνίζεται λεπτομερώς ο τρόπος μοντελοποίησης όλων των προβλημάτων που αντιμετωπίστηκαν στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται ομαδοποιημένα τα αποτελέσματα που αφορούν την στατική απόκριση των εξεταζόμενων εδράνων κύλισης.

Τέλος στο έβδομο κεφάλαιο παρατίθενται τα συνολικά συμπεράσματα αυτής της προσπάθειας.

ΠΕΡΙΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	iii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iv
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
1.ΣΤΗΡΙΞΕΙΣ ΑΞΟΝΩΝ ΚΑΙ ΕΔΡΑΝΑ.....	5
1.1 ΑΞΟΝΑΣ	6
1.2 ΕΔΡΑΝΑ.....	7
1.2.1 Ανάλυση εδράνων ως στοιχεία μηχανής.....	9
1.2.2 Επίδραση του φορτίου πριν την λειτουργία στη διάρκεια ζωής του εδράνου.....	13
1.2.3 Επιδράσεις της ταχύτητας, της λίπανσης και των υλικών.....	22
1.2.4 Έδρανα με μανίκια	26
1.3 ΡΟΥΛΕΜΑΝ	27
1.3.1. Τύποι ρουλεμάν.....	27
2.ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΔΡΑΝΩΝ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ,ΚΥΛΙΣΗΣ ΚΑΙ ΩΣΤΙΚΩΝ	31
2.1 ΕΔΡΑΝΑ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ	31
2.1.1 Είδη λίπανσης.....	32
2.1.2 Μέρη εδράνου ολίσθησης.....	33
2.1.3Χαρακτηριστικά των εδράνων ολίσθησης.....	33
2.1.4Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των εδράνων ολίσθησης.....	34
2.1.5Φθορές στα έδρανα ολίσθησης.....	35
2.2 ΕΔΡΑΝΑ ΚΥΛΙΣΗΣ.....	36
2.2.1 Βασικές μορφές εδράνων κύλισης.....	38
2.2.2 Υπολογισμός εδράνων κύλισης.....	41
2.2.3 Υλικά Κατασκευής Εδράνων Κύλισης.....	42
2.2.4 Λίπανση εδράνων κύλισης.....	42
2.3 ΩΣΤΙΚΑ ΕΔΡΑΝΑ	45
3.ΒΛΑΒΕΣ ΕΔΡΑΝΩΝ.....	47
3.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ.....	47
3.2 ΚΑΚΗ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗ	49
3.4 ΦΘΑΡΜΕΝΟΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΣ ΔΑΚΤΥΛΙΟΣ ΡΟΥΛΕΜΑΝ	51
3.5 ΦΘΑΡΜΕΝΟΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΣ ΔΑΚΤΥΛΙΟΣ ΡΟΥΛΕΜΑΝ	54
3.6 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΧΑΛΑΡΟΤΗΤΑ.....	56
3.7ΣΤΡΟΒΙΛΙΣΜΟΣ ΡΕΥΣΤΟΥ ΚΟΥΖΙΝΕΤΟΥ.....	57
3.8ΦΘΑΡΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΥΛΙΣΗΣ ΡΟΥΛΕΜΑΝ.....	59
3.9ΑΝΕΠΑΡΚΗΣ ΛΙΠΑΝΣΗ ΡΟΥΛΕΜΑΝ	60
4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΟ ANSYS.....	62

4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ ANSYS	62
4.3ΒΗΜΑΤΑ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣΣΤΟ ANSYS-WORKBENCH.....	65
5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΔΡΑΝΩΝ ΚΥΛΙΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	86
5.1ΥΛΙΚΑ.....	86
5.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ.....	86
5.3ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΠΑΦΗΣ, ΦΟΡΤΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ.....	89
5.4 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ.....	91
5.5ΕΠΙΛΥΣΗ	93
6. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	95
6.1 ΕΝΣΦΑΙΡΟ ΕΔΡΑΝΟ ΚΥΛΙΣΗΣ	95
6.2 ΒΑΡΕΛΟΕΙΔΕΣ ΕΔΡΑΝΟ ΚΥΛΙΣΗΣ.....	97
6.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΝΣΦΑΙΡΟΥ ΚΑΙ ΒΑΡΕΛΟΕΙΔΟΥΣ ΕΔΡΑΝΟΥ ΚΥΛΙΣΗΣ.....	99
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	101
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	102

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα έδρανα που χρησιμοποιούνται στις διάφορες μηχανές κατασκευάζονται με γνώμονα την ασφαλή παραλαβή των φορτίων των αξόνων, την αξιόπιστη λειτουργία, τον μεγάλο χρόνο ζωής, την μειωμένη τριβή, την ακρίβεια στην περιστροφική κίνηση, την μειωμένη απαίτηση συντήρησης και την ελαχιστοποίηση του κατασκευαστικού κόστους. Για να καλυφθούν οι απαιτήσεις των διαφόρων εφαρμογών, έχουν αναπτυχθεί πολλοί τύποι εδράνων, που διαφέρουν κατά το σχήμα, το υλικό, την λίπανση, την αρχή λειτουργίας τους και τα λοιπά χαρακτηριστικά τους.

Γενικά, τα έδρανα είναι στοιχεία της μηχανής που επιτρέπουν στα εξαρτήματα να κινούνται το ένα σε σχέση με το άλλο. Χωρίς έδρανα τα πάντα θα ακινητοποιηθούν συμπεριλαμβανομένων και των ανθρώπων, των οποίων οι αρθρώσεις αποτελούνται από έδρανα ολίσθησης με επαφή. Τα έδρανα μπορούν να χωριστούν σε δύο γενικές κατηγορίες: στα έδρανα επαφής και μη επαφής.

Τα έδρανα τύπου επαφής έχουν μηχανική επαφή μεταξύ των στοιχείων και περιλαμβάνουν έδρανα ολίσθησης, κύλισης και έδρανα κάμψης. Η μηχανική επαφή σημαίνει ότι η δυσκαμψία κάθετα προς την κατεύθυνση μπορεί να είναι πολύ υψηλή, αλλά η φθορά ή ακόμα και η κόπωση μπορεί να περιορίσει τη ζωή τους.

Τα έδρανα μη επαφής αφορούν εξωτερικής πίεσης, υδροδυναμικού ρευστού (υγρό, αέριο ή ενδιάμεσης φάσης) και μαγνητικά έδρανα. Η έλλειψη μηχανικής επαφής σημαίνει ότι η στατική τριβή μπορεί να εξαλειφθεί, παρόλο που υπάρχει αντίσταση λόγω ιξώδους τριβής όταν υπάρχουν ρευστά. Ωστόσο η διάρκεια ζωής μπορεί να είναι πρακτικά άπειρη εάν οι εξωτερικές μονάδες ισχύος που απαιτούνται για την λειτουργία τους παραλείπονται. Κάθε τύπος των εδράνων έχει τα δικά του τμήματα εξειδίκευσης σε κάθε περιοχή και έτσι οι μηχανικοί σχεδιασμού θα πρέπει να είναι εξοικειωμένοι με τους διαφορετικούς τύπους εδράνων καθώς επίσης με τις εφαρμογές και τους περιορισμούς τους.

Όπως και με όλους τους τύπους μηχανικών εξαρτημάτων, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τις βασικές αρχές λειτουργίας των διαφορετικών τύπων εδράνων, έτσι ώστε να μπορούμε να επιλέγουμε το σωστό για την εκάστοτε εφαρμογή. Πράγματι, οι βασικές αρχές σχεδιασμού είναι πολύ μεγάλης σημασίας όσον αφορά στην κατάλληλη χρήση των ρουλεμάν στις μηχανές. Η αρχή της αμοιβαιότητας είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στο σχεδιασμό συστημάτων εδράνων. Κάθε φορά που σχεδιάζουμε ένα έδρανο θα πρέπει να επαναπροσδιορίσουμε το σχεδιασμό του, φτιάχνοντας κάτι τελείως διαφορετικό, συγκρίνοντας το στη συνέχεια με την αρχική ιδέα.

Έδρανα χρησιμοποιούνται από την εποχή της εφεύρεσης του τροχού. Ωστόσο σε όλη την αρχαιότητα, ο βασικός τύπος εδράνου ήταν τα έδρανα τριβής. Ήταν συνήθως ξύλινα, και ως λιπαντικό χρησιμοποιούταν το ζωικό λίπος. Το αρχαιότερο δείγμα ρουλεμάν είναι ξύλινο και υποστηρίζει ένα περιστρεφόμενο τραπέζι. Γύρω στα 1500μ.Χ εντοπίστηκαν σχέδια από ρουλεμάν για το σχεδιασμό ενός ελικοπτέρου του Λεονάρντο ντα Βίντσι, ενώ τα πρώτα σχέδια κυλινδρικού ρουλεμάν ήταν του Αγκοστίνου Ραμέλλι. Ένα πρόβλημα με τα σφαιρικά και κυλινδρικά ρουλεμάν είναι ότι οι σφαίρες ή οι κύλινδροι τρίβονται μεταξύ τους προκαλώντας επιπρόσθετη αντίσταση. Το πρόβλημα αυτό συνήθως αντιμετωπίζεται με την χρήση μιας στεφάνης η οποία διατηρεί τα στοιχεία κύλισης σε συγκεκριμένες θέσεις. Η πρώτη περιγραφή ενός ρουλεμάν αυτού του τύπου αποδίδεται στον Γαλιλαίο. Το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας σφαιρικού ρουλεμάν με δακτυλίου απονεμήθηκε στον Philip Vaughan.

Αυτοί που τα χρησιμοποίησαν κατάφεραν να κινούνται γρηγορότερα, και δεν έχουν σταματήσει μέχρι σήμερα. Αυτοί που χρησιμοποιούν καλύτερα ρουλεμάν, κινούνται ακόμα πιο γρήγορα, με μηχανές μεγαλύτερης ακρίβειας, οι οποίες αυξάνουν την παραγωγικότητα, δίνοντας τους πλεονεκτική θέση στην αγορά. Το μέλλον ανήκει σε αυτούς που μπορούν και κινούνται γρήγορα αλλά και με ακρίβεια!

Η εξέλιξη της τεχνολογίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το συνδυασμό της παρατήρησης με την ανάγκη. Η ιδέα ενός στοιχείου κύλισης ήρθε από κάποιον που παρατήρησε μια πέτρα να κυλάει από ένα λόφο, ή από κάποιον που έπεσε αφού παραπάτησε επάνω σε έναν κυλινδρικό κορμό ο οποίος κινούνταν από κάτω του; Ή μήπως προέκυψε από την παρατήρηση πως ένα βαρύ αντικείμενο μπορούσε να μετακινηθεί ευκολότερα εάν κυλούσε, πράγμα που οδήγησε στην έμπνευση του να τοποθετήσουν ένα βαρύ αντικείμενο το οποίο δεν μπορούσε να κυλίσει, πάνω από ένα άλλο που μπορούσε; Ο Αρχιμήδης ανακάλυψε το μυστικό του άξονα, και ίσως συνειδητοποίησε πως μια μεγάλη διάμετρος τροχού πάνω σε έναν άξονα μικρής διαμέτρου, είχε μικρότερη τριβή. Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε πως έχουμε ένα φορτίο μάζας M το οποίο στηρίζεται πάνω σε τροχούς διαμέτρου D σε άξονες διαμέτρου d , με συντελεστή τριβής μ μεταξύ του άξονα και του τροχού. Θεωρούμε πως οι τροχοί δεν ολισθαίνουν στο έδαφος. Για να μετακινήσουμε το φορτίο, απαιτείται μια δύναμη F σε κάθε άξονα ίση με $Mg/4$. Το κέντρο περιστροφής είναι το σημείο επαφής μεταξύ του τροχού και του εδάφους που απέχει $D/2$ από το κέντρο του άξονα. Η συνθήκη που απαιτείται για να υπάρξει κίνηση, είναι πως η ροπή ως προς το κέντρο, $FD/2$, θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη ροπή λόγω της τριβής που αναπτύσσεται ανάμεσα στους άξονες και τους τροχούς και αντιστέκεται στην κίνηση, και ισούται με $M\mu d/2$. Επομένως η δύναμη που θα πρέπει να ασκηθεί θα πρέπει να ισούται με: $F > M\mu d/D$, $F/mg = \mu d/D$. Τώρα ας θεωρήσουμε τα όρια των μεταβλητών στην ανάλυση αυτή: εάν $D \gg d$, δεν έχει σημασία πόση δύναμη διαθέτει αυτός που θα κινήσει το φορτίο. Αν η σταθερά της τριβής είναι σε ένα λογικό επίπεδο, όπως μεταξύ $\mu = 0.05 - 0.1$ όπως στα έδρανα ολίσθησης με λίπανση, και αν D/d είναι στην της τάξης του 20, η δύναμη θα είναι 200-400 φορές λιγότερη από το πραγματικό βάρος του φορτίου. Επομένως μπορεί κανείς να αντιληφθεί για ποιόν λόγο, για μια πολύ μακρά περίοδο στην ανθρώπινη ιστορία, τα έδρανα ολισθαίνουσας επαφής ήταν απολύτως επαρκή.

Όσο τα μηχανήματα εξελίσσονταν, αναπτύσσονταν και καλύτεροι άξονες για να συγκρατούν τα εργαλεία γέωτρησης και διάτρησης, ή κανόνια και πυροβόλα. Έγινε εμφανές πως καθώς αυξανόταν η ταχύτητα, οι άξονες ανέπτυσσαν υψηλές θερμοκρασίες που κατανάλωναν ενέργεια μειώνοντας την ακρίβεια. Δεν είναι ξεκάθαρο ποιος ακριβώς ανακάλυψε το πρώτο έδρανο κύλισης με αντίσταση στην τριβή, αλλά διάφορες εταιρείες ξεκίνησαν να τα παράγουν στα τέλη του 1800. Έχει ενδιαφέρον να σημειωθεί πως η μεγαλύτερη πρώτη εφαρμογή ενός τέτοιου εδράνου, ήταν το έδρανο όπου η κατανάλωση ενέργειας έπαιζε μεγάλη σημασία: Το ποδήλατο! Αναπτύχθηκαν πολύ γρήγορα εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία και συγκεκριμένα σε σιδηρόδρομους, και μία νέα εποχή ξεκίνησε.

Η απόδοση ενός εδράνου με στοιχεία κύλισης έχει σχέση με την ακρίβεια που κατασκευάστηκε: Τα πιο ακριβή έδρανα κύλισης φτιάχνονται σε μηχανές που χρησιμοποιούν ρευστά φιλμ. Στην πραγματικότητα, οι πρώτες μηχανές που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των εξαρτημάτων κύλισης των εδράνων αυτών χρησιμοποιούσαν υδροδυναμικά έδρανα, όπου η υψηλή ταχύτητα σχετικής κίνησης μεταξύ των εξαρτημάτων, προκαλούσε τη δημιουργία ενός λιπαντικού φιλμ μεταξύ τους, το οποίο απέτρεπε τη μηχανική επαφή. Οποιαδήποτε τραχύτητα ή κυματισμός στις επιφάνειες των εξαρτημάτων ήταν απίθανη να συμβεί μέσα από τα

δισεκατομμύρια μόρια λαδιού που τις διαχώριζαν, δημιουργώντας το απόλυτο ελαστικό μέσο. Τα υδροδυναμικά έδρανα αποτρέπουν την επαφή μεταξύ των μηχανικών εξαρτημάτων, και ορισμένες μεγάλες τουρμπίνες που υποστηρίζονταν από τέτοιου είδους έδρανα, εξακολούθησαν να δουλεύουν για πολλές δεκαετίες μετά την κατασκευή τους.

Το κύριο πρόβλημα με τα υδροδυναμικά έδρανα, ωστόσο, είναι πως το πάχος του υδροδυναμικού στρώματος, και επομένως η ακρίβεια του εδράνου, εξαρτάται από την ταχύτητα. Ίσως αυτός να είναι ο λόγος που οδήγησε στην ανάπτυξη εδράνων εξωτερικής υδροστατικής πίεσης. Τα υδροστατικά έδρανα χρησιμοποιούν πεπιεσμένα φιλμ ρευστού που ελέγχουν το κενό και επιτυγχάνουν μηχανική ακρίβεια του ενός δισεκατομμυριοστού. Αλλά εξακολουθούν να πάσχουν από την θερμότητα που αναπτύσσεται λόγω των διαμηθικών τάσεων στα κενά. Τα αεροστατικά έδρανα από την άλλη χρησιμοποιούν αεροκινούμενα εξαρτήματα που έχουν πολύ μικρότερη ανάπτυξη θερμότητας.

Τα μαγνητικά έδρανα πηγαίνουν ένα βήμα παραπέρα για να στηρίξουν ένα κινούμενο στοιχείο χρησιμοποιώντας σερβοελεγχόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Οι συσκευές φυγοκέντρωσης υψηλής ταχύτητας και οι συμπιεστές αγωγού φυσικού αερίου συχνά χρησιμοποιούν μαγνητικά έδρανα για να παρέχουν την απόλυτη ταχύτητα και αξιοπιστία. Οι μηχανές επόμενης γενιάς για την κατασκευή ημιαγωγών νανομετρικής κλίμακας βασίζονται σε μαγνητικά έδρανα.

Τα ωστικά έδρανα πλήρους κύκλου, είναι τα πιο απλά επειδή χρησιμοποιούν υλικό παραμόρφωσης στις ενώσεις των αρθρώσεων του άξονα περιστροφής. Από απλά και μικρής διάρκειας ζωής καταναλωτικά προϊόντα έως υψηλής ακριβείας όργανα, τα ωστικά έδρανα είναι τα πιο κοινά και αποτελεσματικά.

1.ΣΤΗΡΙΞΕΙΣ ΑΞΟΝΩΝ ΚΑΙ ΕΔΡΑΝΑ

1.1 ΑΞΟΝΑΣ

Άξονας είναι μια μεταλλική ράβδος. Τα άκρα του είναι οπωσδήποτε κυλινδρικά (στροφείς). Γενικά άξονες είναι περιστρεφόμενα στοιχεία μεταφοράς ισχύος ή κινήσεως και καταπονούνται σε δυναμικά φορτία. Οι άξονες που δεν περιστρέφονται ονομάζονται άτρακτοι, δεν μεταφέρουν ισχύ, χρησιμοποιούνται για την στήριξη περιστρεφόμενων τροχαλιών, τροχών, τυμπάνων κλπ., καταπονούνται σε στατικά φορτία και υπολογίζονται σαν δοκοί. Επίσης οι άξονες χωρίζονται σε ευθύγραμμους και στροφαλοφόρους, πλήρεις ή κοίλους. Οι άξονες ανάλογα με την φόρτισή τους παραμορφώνονται στρεπτικά και διατμητικά καθώς επίσης καμπτικά και εφελκυστικά ή θλιπτικά. Αντίστοιχες είναι και οι τάσεις οι οποίες αναπτύσσονται σε αυτούς.

Ένας άξονας κατά τον σχεδιασμό του πρέπει να διαμορφωθεί με τέτοιο τρόπο ώστε τα στοιχεία που θα συναρμολογηθούν πάνω του, να έχουν την συγκεκριμένη θέση τους και να ασφαρίζονται σε σχετική αξονική ή στρεπτική κίνηση. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται αλλαγές διατομών και ασφαλιστικά στοιχεία κινήσεως καθώς επίσης και σφήνες-σφηνόδρομοι ή πολύσφηννα. Επίσης οι θέσεις όπου ο άξονας θα στηριχτεί σε έδρανα κύλισης πρέπει να προβλεφθούν και να σχεδιαστούν.

Συνήθως για τον υπολογισμό των αξόνων προσδιορίζονται τα επικίνδυνα ή κρίσιμα σημεία, γίνεται για αυτά ο υπολογισμός της διαμέτρου με βάση την αντοχή ή την παραμόρφωση και στην συνέχεια γίνεται η διαμόρφωση του άξονα ανάλογα με τα άλλα στοιχεία που πρόκειται αυτός να φέρει.

Λειτουργικές παράμετροι:

Παραμόρφωση και ακαμψία

- Καμπτική παραμόρφωση
- Στρεπτική παραμόρφωση
- Κλίση στα έδρανα και στοιχεία επί του άξονα.
- Διατμητικές παραμορφώσεις οφειλόμενες σε εγκάρσια φόρτιση αξόνων μικρού μήκους.

Τάση και αντοχή

- Στατική αντοχή
- Αντοχή σε κόπωση
- Αξιοπιστία

Στους άξονες τοποθετούνται σταθερά ή περιστρεφόμενα τεμάχια όπως τροχαλίες οδοντωτοί τροχοί, τύμπανα κλπ. Μπορούν να είναι ακίνητοι και να περιστρέφονται τα τεμάχια που εδράζονται επάνω τους ή να περιστρέφονται και αυτοί μαζί με τα τεμάχια. Οι άξονες καταπονούνται μόνο σε κάμψη και δεν μεταφέρουν ροπή στρέψεως. Στις άτρακτους τοποθετούνται επίσης, όπως και στους άξονες, ίδια τεμάχια. Οι άτρακτοι όμως περιστρέφονται πάντοτε και μεταφέρουν απαραίτητως ροπή στρέψεως. Καταπονούνται σε κάμψη και σε στρέψη. Γενικά άξονες και άτρακτοι κατασκευάζονται από χάλυβα St42 ή St50, ενώ για υψηλές καταπονήσεις χρησιμοποιείται St60. Για ακόμα μεγαλύτερες απαιτήσεις χρησιμοποιούνται επίσης C35, 40Mn4, 34Cr4, 41Cr4 και παρόμοια ενώ στις ενώ στις κατασκευές οχημάτων 16MnCr5, 20MnCr5, 18CrNi8 και παρόμοια. Τα χάλυβδοκράματα είναι πολύ ευαίσθητα στην ενέργεια των εντόμων. Για αυτό όταν

χρησιμοποιούνται σε δυναμικές καταπονήσεις πρέπει η διαμόρφωση των τεμαχίων να είναι τέτοια ώστε να αποκλείει εντελώς ή να μειώνει στο ελάχιστο την συγκέντρωση τάσεων.

Άξονες και άτρακτοι μπορούν να έχουν στο κέντρο μια κατά μήκος οπή, οπότε λέγονται κοίλοι ή διάτρητοι άξονες ή άτρακτοι. Διάτρητοι άξονες ή άτρακτοι με μια διάμετρο 0,5d ζυγίζουν 25% λιγότερο αλλά διαθέτουν ακόμη περίπου 95% της ροπής αντιστάσεως. Άξονες ή άτρακτοι που περιστρέφονται με υψηλό αριθμό στροφών (άνω των 1500 RPM) πρέπει να είναι άκαμπτοι και δυναμικά ζυγοσταθμισμένοι.

Άξονες η άτρακτοι ασφαρίζονται έναντι αξονικών μετατοπίσεων με διαβαθμίσεις ή με ελατηριωτές ασφάλειες. Η καταπόνηση των περιστρεφόμενων αξόνων ή ατράκτων σε εναλλασσόμενη κάμψη προκαλεί σε όλες τις εγκοπές, σφηνοδρόμους και διαβαθμίσεις κίνδυνο θραύσεως από δυναμική καταπόνηση λόγω συγκεντρώσεως τάσεων. Οι αιχμές των τάσεων μπορούν να μειωθούν σημαντικά και η ροή της δυνάμεως μπορεί να γίνει ομαλότερη με κατάλληλη διαμόρφωση των αξόνων ή ατράκτων.

Στροφείς είναι κυλινδρικά, κωνικά ή σφαιρικά σώματα σε άξονες ή ατράκτους που περιστρέφονται ή ακινητούν μέσα σε έδρανα (περιστρεφόμενα ή σταθεροί στροφείς). Επίσης είναι άκρα ατράκτων που χρησιμεύουν για τη μετάδοση κινήσεως. Φορτίζονται κάθετα προς τον άξονα τους και φέρουν διαβαθμίσεις για την παραλαβή των συνήθως μικρών αξονικών δυνάμεων

Γεωμετρία: Οι άξονες γενικά έχουν την γεωμετρία ενός κυλίνδρου με διαφορετικές διαμέτρους κατά μήκος. Οι διαφορετικές διαμέτροι κάθε βήματος χρησιμοποιούνται για να εξασφαλίσουν με ακρίβεια την ακτινική θέση των εδράνων, των γραναζιών τροχαλιών κλπ. Οι μεταβολές διαμέτρων κάθε βήματος χρησιμοποιούνται για να εξασφαλίσουν με ακρίβεια την αξονική θέση των εδράνων, γραναζιών τροχαλιών κλπ.

Υλικά αξόνων: Οι άξονες κατασκευάζονται συνήθως από χάλυβα γενικής χρήσεως η ειδικούς σκληρυμένους χάλυβες ανάλογα με την εφαρμογή.

1.2 ΕΔΡΑΝΑ

Τα έδρανα κύλισης ή τριβείς αποτελούν φορείς στήριξης και οδήγησης κινούμενων μηχανολογικών μερών, όπως είναι οι άξονες και οι άτρακτοι, είναι δηλαδή στοιχεία που επιτρέπουν τη στήριξη περιστρεφόμενων στοιχείων σε ακίνητα στοιχεία. Γενικά έδρανο στη μηχανολογία λέγεται το στοιχείο μιας μηχανής όπου στηρίζεται ένας άξονας και σκοπεύει στη μεταβίβαση προς το έδαφος ή προς άλλες κατασκευές του φορτίου που εφαρμόζεται σε αυτόν. Αποτελούνται γενικά από δύο ομόκεντρες στεφάνες που χωρίζονται με γωνιακά ισαπέχουσες σφαίρες ή κυλίνδρους. Τα έδρανα εν γένει χρησιμεύουν σαν «υποδοχείς» των αξόνων και των ατράκτων, ενώ επιτρέπουν την σχετική κίνηση μεταξύ δύο κομματιών προς μία ή περισσότερες κατευθύνσεις με την ελάχιστη τριβή και παράλληλα αποτρέπουν την κίνηση προς την κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου φορτίου.

Τα έδρανα λοιπόν, παραλαμβάνουν τις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την λειτουργία των μηχανών και τις μεταφέρουν στα σταθερά τους μέρη όπως τα θεμέλια τα κιβώτια μειωτήρων κλπ.. Τα έδρανα λιπαίνονται για να διατηρούνται όσο πιο χαμηλά γίνεται οι απώλειες των τριβών και οι θερμοκρασίες.

Το μέγεθος της τριβής εμφανίζεται είτε ως τριβή κίνησης (που εμποδίζει την αντίθετης κατεύθυνσης σχετική κίνηση δύο επιφανειών), είτε ως τριβή ακινησίας στην περίπτωση που το εμπόδιο της τριβής είναι τέτοιου μεγέθους που καθιστά αδύνατη την κίνηση.

Τα έδρανα χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: στα έδρανα **ολίσθησης** ή «**κουζινέτα**» (στην περίπτωση που αποτελούνται από δύο χωριστά τεμάχια) και στα **έδρανα κύλισης** ή «**ρουλεμάν**». Εκείνο το τμήμα ενός στοιχείου που στηρίζεται σε ένα έδρανο (συνήθως κάποιος άξονας) ονομάζεται στροφέας. Ένα έδρανο ολίσθησης αποτελείται από το σώμα, το κάλυμμα, τον τριβέα, το σύστημα λίπανσης και το σύστημα στεγανότητας για τη διατήρηση του λιπαντικού μέσα στο έδρανο. Στα έδρανα ολίσθησης ο στροφέας περιστρέφεται ή ολισθαίνει μέσα στον τριβέα (συνήθως ένα κέλυφος ή περίβλημα). Ανάμεσα στο στροφέα και τον τριβέα υπάρχει το λιπαντικό που ελαττώνει την τριβή(ολίσθησης) που αναπτύσσεται κατά την περιστροφή και τη φθορά, το οποίο υλικό που μπορεί να είναι στερεό, υγρό η αέριο. Αντίθετα, στα έδρανα κύλισης όπου αναπτύσσεται τριβή κύλισης, επιτυγχάνεται περιστροφή του στροφέα ως προς τον εξωτερικό δακτύλιο του εδράνου με την κύλιση των στοιχείων κύλισης.

Στην περίπτωση της τριβής ολίσθησης εμφανίζονται τρεις καταστάσεις τριβής. Η ξηρή τριβή με ή χωρίς ενδιάμεσα υλικά, κατά την οποία τα στερεά σώματα έρχονται σε άμεση επαφή ή πάνω στις επιφάνειές τους βρίσκεται στρώση ξένων σωμάτων ή στερεών λιπαντικών σωμάτων. Η υγρή τριβή κατά την οποία οι δύο τριβόμενες επιφάνειες δεν έρχονται απευθείας σε επαφή αλλά μεσολαβεί ένα στρώμα φέροντος υγρού και μέσω του ιξώδους του δημιουργείται τριβή. Τέλος, υπάρχει η μικτή τριβή η οποία δημιουργείται όταν υπάρχει εν μέρει τριβή στερεού σώματος και εν μέρει υγρού. Εάν η απαραίτητη πίεση δημιουργείται μέσω της κίνησης η τριβή ονομάζεται υδροδυναμική, ενώ αν αναπτύσσεται με αντλία ονομάζεται υδροστατική.

Σκοπός των εδράνων γενικά είναι να στηρίζουν τις ατράκτους, τους άξονες και γενικά οποιαδήποτε άλλα περιστρεφόμενα ή ταλαντευόμενα στοιχεία μηχανών ώστε να επιτυγχάνεται η περιστροφή τους. Εάν δεν υπήρχαν τα έδρανα, η περιστροφή της ατράκτου στις θέσεις στήριξής της θα προκαλούσε λόγω τριβής, διαστολή , ακινητοποίηση και τελικά αστοχία-θραύση της ατράκτου. Από τις δυνάμεις και ροπές φορτίσεως των στηριζόμενων στοιχείων δημιουργούνται στα έδρανα εγκάρσιες και αξονικές δυνάμεις στηρίξεως. Δηλαδή μεταβιβάζουν τις δυνάμεις από την άτρακτο στη βάση της μηχανής.

Όταν ένα έδρανο παραλαμβάνει μόνο εγκάρσιες δυνάμεις, τότε ονομάζεται εγκάρσιο έδρανο. Όταν παραλαμβάνει μόνο αξονικές, τότε ονομάζεται αξονικό ή ωστικό έδρανο. Εκείνο το τμήμα ενός στοιχείου που στηρίζεται σε ένα έδρανο είναι πάντοτε κυλινδρικό και ονομάζεται στροφέας. Ενώ ο στροφέας περιστρέφεται ή ταλαντεύεται ανάλογα με την κίνηση του στοιχείου, το έδρανο μένει κατά κανόνα ακίνητο. Επίσης σκοπός των εδράνων είναι να ευθυγραμμίζουν την άτρακτο, να επιτρέπουν μικρές κλίσεις της ατράκτου ως προς τον αρχικό άξονα περιστροφής και ένας ακόμη σκοπός των εδράνων είναι να επιτρέπουν αξονική μετατόπιση της ατράκτου ώστε να παραλαμβάνονται θερμικές συστοδιαστολές.

Μεταξύ στροφέα και εδράνου υπάρχει πάντα μια σχετική κίνηση και επομένως μεταξύ τους αναπτύσσεται πάντα τριβή.

Όταν ο στροφέας ολισθαίνει μέσα στο έδρανο, τότε το έδρανο ονομάζεται **έδρανο ολισθήσεως**. Όταν ο στροφέας κυλιέται πάνω σε σώματα κύλισεως, τότε το έδρανο ονομάζεται **έδρανο κύλισεως**.

Αξίζει επίσης να αναφέρουμε ότι το ποσό ενέργειας που χάνεται κατά την περιστροφή των εδράνων οφείλεται στην κατακόρυφη δύναμη, στην ποιότητα των

συνεργαζόμενων επιφανειών και στην λίπανση. Οι σκοποί που επιτελούν τα έδρανα είναι:

1. Να επιτρέπουν την περιστροφή της ατράκτου που στηρίζουν.
2. Μεταβιβάζουν τις δυνάμεις (αξονικές και ακτινικές) από την άτρακτο προς την βάση της μηχανής.
3. Επιτρέπουν ίσως αξονική μετατόπιση της ατράκτου, ώστε να παραλαμβάνονται οι μετατοπίσεις λόγω διαστολής τους.
4. Φέρουν αγωγούς-υποδοχές λίπανσης, ώστε να διατηρούν χαμηλές θερμοκρασίες κατά την συνεργασία τους με την άτρακτο.
5. Ορισμένοι τύποι επιτρέπουν την περιστροφή της ατράκτου με μικρά σφάλματα ευθυγράμμισης.
6. Επιτρέπουν μικρές κλίσεις της ατράκτου ως προς τον αρχικό άξονα περιστροφής της.

Τα υλικά κατασκευής των αξόνων-ατράκτων ποικίλλουν ανάλογα με τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά σε συνάρτηση με τις δυνάμεις που φέρουν. Συνήθως για την κατασκευή αξόνων χρησιμοποιούνται χάλυβα (κοινώς ασάλι το οποίο είναι κράμα σιδήρου-άνθρακα) με αντοχή 50 kcr/mm² ή 60kcr/mm². Σε ειδικές κατασκευές μεγάλων απαιτήσεων είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν χάλυβες καλύτερης ποιότητας. Αυτοί είναι κράματα χαλύβων με Cr, Ni, Mg, Mo, W, V, Ti, Co σε διάφορες περιεκτικότητες. Χαρακτηριστικό τους γνώρισμα είναι ότι μπορούν να υποστούν θερμικές κατεργασίες όπως «Μαρτενσιτική βαφή»(δηλαδή οι χάλυβες έχουν την χαρακτηριστική ιδιότητα να αποκτούν εξαιρετικά μεγάλες αντοχές, όταν υποστούν απότομη ψύξη από μεγάλη θερμοκρασία στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος υπό ορισμένες προϋποθέσεις (μαρτενσιτική βαφή) και έτσι να αποκτήσουν μεγαλύτερη αντοχή και επιφανειακή σκληρότητα, παράλληλα όμως γίνονται και περισσότερο εύθραυστοι σε κρουστικά φορτία.

Τα έδρανα λιπαίνονται για να διατηρούνται όσο το δυνατόν πιο χαμηλά οι απώλειες τριβών και οι θερμοκρασίες. Υπενθυμίζουμε ότι το μέγεθος της τριβής εμφανίζεται είτε ως τριβή κίνησης (που εμποδίζει την αντίθετης κατεύθυνσης σχετική κίνηση δύο επιφανειών) είτε ως τριβή ακινησίας στην περίπτωση που το εμπόδιο της τριβής είναι τέτοιου μεγέθους που καθιστά αδύνατη την κίνηση.

1.2.1 Ανάλυση εδράνων ως στοιχεία μηχανής.

Τα σύγχρονα αντιτριβικά έδρανα οποιασδήποτε κλάσης ακριβείας είναι τα αποτελέσματα πολλών εκτεταμένων προσπαθειών στο σχεδιασμό, στη μεταλλουργία και στη κατασκευαστική μηχανική. Τα μεγάλα φορτία, η διάρκεια ζωής και οι ικανότητες ταχύτητας περιστροφής που είναι διαθέσιμες προμηθεύουν στο σχεδιαστή μια μεγάλη ελευθερία στην επιλογή της τελικής μορφής του εδράνου. Για να λάβουμε αυτές τις ικανότητες, τα έδρανα έχουν γίνει συναρμογές με σχετικά μεγάλη ακρίβεια και ως εκ τούτου είναι ευπαθή σε φθορές. Μετά από κακομεταχείριση και λανθασμένη συντήρηση οι πιο πιθανές αιτίες αστοχίας του εδράνου είναι η μικρή ταχύτητα περιστροφής, η υπερφόρτιση και ο μη ικανοποιητικός σχεδιασμός κατά τη συναρμολόγηση. Η σχετική ταχύτητα μεταξύ του περιστρεφόμενου στοιχείου και της στεφάνης έχει αναγνωρισθεί ευρέως σαν ένας κύριος παράγοντας για τη δημιουργία και τη διατήρηση της ταινίας του λιπαντικού.

Συνεπώς η επιτρεπόμενη ταχύτητα συνδέθηκε με το επιτρεπόμενο φορτίο σαν μια βασική παράμετρος στον επιτυχή σχεδιασμό και λειτουργία των εδράνων. Η κατασκευή εδράνων ακριβείας, οποιουδήποτε επιπέδου πάνω από αυτό των πατινιών, εξαρτάται αυστηρά από το ταλέντο και την ανάγκη έρευνας και δραστηριότητας ανάπτυξης αφού ο αριθμός των κατασκευαστών είναι μάλλον μικρός. Αυτές οι εταιρίες οργάνωσαν τον A.F.B.M.A. για να παρουσιάσουν στον χρήστη δεδομένα εδράνων για τη λειτουργία και μεθόδους υπολογισμού του φορτίου και της διάρκειας ζωής. Έχουν γίνει αποδεκτές συγκεκριμένες πρακτικές παράμετροι και επίπεδα συντηρητισμού σαν αποτέλεσμα εκτίμησης πολλών συσσωρευμένων δεδομένων.

Αυτές οι παράμετροι για τον υπολογισμό της λειτουργίας των εδράνων είναι:

1) Η βασική εκτίμηση του φορτίου, C, ορισμένο σαν το φορτίο το οποίο θα αντέξει για 10⁶ περιστροφές της εσωτερικής στεφάνης κατά το 90% ενός γκρουπ σχεδόν παρόμοιων εδράνων.

2) Η μέση ζωή ενός γκρουπ εδράνων, L₅₀, ορισμένη σαν τη ζωή που είναι το αποτέλεσμα μιας κατά 50% επιζώσας αναλογίας.

3) Η εκτίμηση ζωής ή καταλόγου, L₁₀, ορισμένη σαν τη ζωή που είναι το αποτέλεσμα μιας κατά 90% επιζώσας αναλογίας.

Τα αποτελέσματα των τυποποιημένων υπολογισμών για τη διάρκεια ζωής και το φορτίο, συμπεριλαμβανομένων διαφόρων παραγόντων καταλόγου, χαρακτηρίζονται από ένα μεγάλο βαθμό συντηρητισμού· η εγκυρότητα αυτών των αποτελεσμάτων υποστηρίζεται από ένα μεγάλο ποσοστό δεδομένων και πείρας. Είναι διαθέσιμες διάφορες διαδικασίες για τη μεταχείριση αυτής της «μη τυποποιημένης» απαίτησης, εξαρτώμενες από τον τύπο της κατάστασης του προβλήματος. Η συνηθισμένη παραδοχή είναι ότι η αστοχία των εδράνων οφείλεται στην κόπωση. Αφού τα τελευταία είναι τυχαία στη φύση, θα τείνουν να ακολουθούν στατιστικές προβλέψεις· αλλά αφού η αστοχία των εδράνων δεν πραγματοποιείται σε μια σταθερή αναλογία, η βασική κατανομή του Poisson παραβλέπεται προς όφελος του Weibull, εκφρασμένης σαν:

$$P_s = \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right)^\beta \quad (1.1)$$

όπου: P_s= πιθανότητα επιβίωσης του εδράνου χωρίς αστοχία για δεδομένο χρόνο.

t= χρόνος

θ = πολλαπλασιαστής για τη σχεδιαστική ζωή (σταθερά).

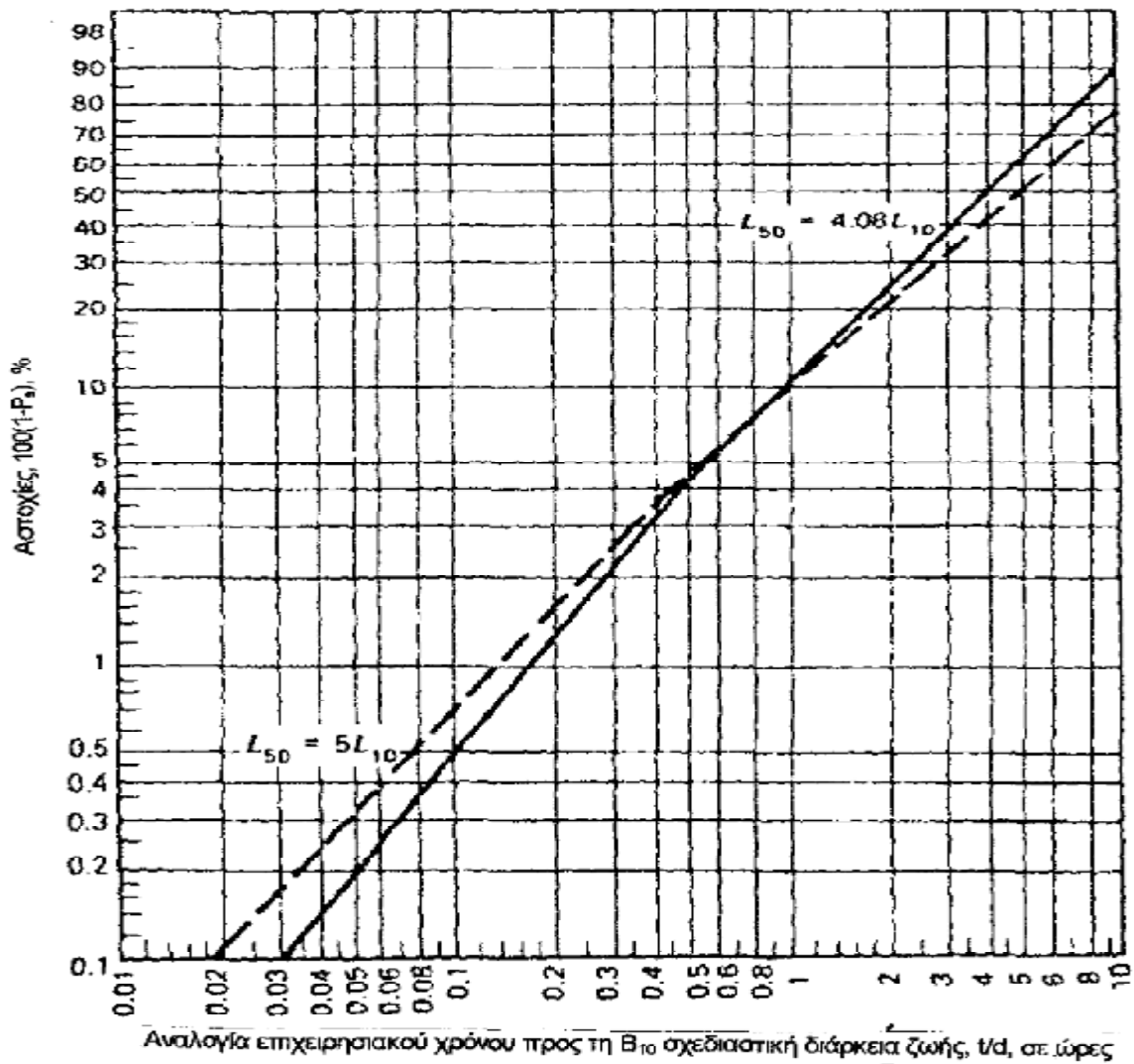
β= λογαριθμικός εκθέτης λειτουργίας του Weibull.

Αν β=1 τότε έχουμε την εξίσωση του Poisson.

Η καμπύλη του Weibull δημιουργείται στις συντεταγμένες της επί τοις εκατό αστοχίας (τεταγμένη) και της αναλογίας του επιχειρησιακού χρόνου στη B₁₀ σχεδιασμένη ζωή (τετμημένη). Είναι διαθέσιμες δύο τιμές τεταγμένων από τα δεδομένα για τη ζωή, P_s=0.90 και P_s=0.50 είναι δύο γνωστές ανταποκρινόμενες τιμές τετμημένων για κάθε τεταγμένη. Οι δύο καμπύλες σχεδιάστηκαν στο Σχήμα 1.1. Η πιθανότητα επιβίωσης του εδράνου, για την οποία η μέση ζωή των 5 (ή 4.08) φορές η B₁₀ σχεδιαστική ζωή d, έχει ήδη καθοριστεί και δίνεται από το τύπο:

$$\frac{t}{d} = (9.49 \cdot \log_e P)^{0.746} \quad \text{για } t/d = 4.08 \cdot B_{10} \quad (1.2)$$

$$\frac{t}{d} = (9.49 \cdot \log_e P)^{0.856} \text{ για } t/d = 5 \cdot B_{10} \quad (1.3)$$



Σχήμα 1.1: Διάγραμμα του Weibull για την επιχειρησιακή ζωή των εδράνων

Η απαιτούμενη σχεδιαστική ζωή είναι τότε $d = \frac{t}{(t/d)}$.

Φυσιολογικά η αξιοπιστία P_s και ο απαιτούμενος χρόνος t είναι γνωστά για ευκολία στον καθορισμό της σχεδιαστικής ζωής έχουν τοποθετηθεί οι καμπύλες και ο Πίνακας 1.1.

Πίνακας 1.1: Αναλογία του επιχειρησιακού χρόνου προς τη B10 σχεδιαστική διάρκεια ζωής για διάφορες πιθανότητες επιβίωσης

Πιθανότητα επιβίωσης για χρόνο t P_s	Αναλογία επιχειρησιακού χρόνου προς τη σχεδιαστική διάρκεια ζωής	
	t/d για μέση ζωή=4.08d	t/d για μέση ζωή=5d
0.995	0.1030	0.0740
0.99	0.1785	0.1395
0.98	0.2910	0.2440
0.97	0.396	0.3460
0.96	0.492	0.4445
0.95	0.584	0.5405
0.94	0.672	0.6341
0.93	0.756	0.7261
0.92	0.840	0.8191
0.91	0.921	0.9101
0.90	1.000	1.000
0.85	1.383	1.450
0.80	1.750	1.900
0.75	2.120	2.364
0.70	2.435	2.635
0.65	2.860	3.331
0.60	3.250	3.850
0.55	3.600	4.340
0.50	4.080	5.000
0.45	4.540	5.650
0.40	5.03	6.345
0.35	5.56	7.150
0.30	6.16	8.040
0.25	6.84	9.040
0.20	7.65	10.06
0.15	8.64	11.80
0.10	10.00	14.00
0.05	12.40	17.55
0.01	16.40	25.15

Επίσης θα πρέπει να αναφερθεί και μια άλλη απαίτηση, δηλαδή η σχέση της αξιοπιστίας και του ισοδύναμου φορτίου, σε μια απαιτούμενη διάρκεια ζωής με την ταξινόμηση του καταλόγου των υπολογισμών του βασικού φορτίου. Η εξίσωση του Weibull ξαναγράφεται ως εξής:

$$\frac{R_e}{c} = \left(\frac{\theta}{L}\right)^{\frac{1}{a}} \cdot \left(\ln \cdot \frac{1}{P_s}\right)^{\frac{1}{a \cdot b}} \quad (1.4)$$

Όπου: R_e = ισοδύναμο ακτινικό φορτίο σε kg.

C = υπολογισμός βασικού φορτίου σε kg.

θ = εκθετική παράμετρος, όπως στην Σχέση1.1.

L = διάρκεια ζωής σε εκατομμύρια περιστροφές.

P_s = αξιοπιστία η πιθανότητα επιβίωσης, όπως στην Σχέση1.1.

a, b = εκθετικές σταθερές.

Για μέση διάμετρο στον υπολογισμό μιας διάρκειας ζωής της τάξης του 5 και με $P_s=0.50$ και 0.10 η θ εκτιμήθηκε σαν 6.84 και η β σαν 1.17. Για ένσφαιρα έδρανα, $a=3.00$ ενώ για βαρελοειδή έδρανα $a=3.33$. Τότε η εξίσωση(Σχέση1.4) γίνεται:

$$\frac{Re}{c} = \frac{1.898}{1^{0.333}} \cdot \left(\ln \frac{1}{P_s} \right)^{0.285} \quad (1.5)$$

$$\frac{Re}{c} = \frac{1.870}{1^{0.3}} \cdot \left(\ln \frac{1}{P_s} \right)^{0.257} \quad (1.6)$$

για ένσφαιρα και βαρελοειδή έδρανα αντίστοιχα. Οι Σχέσεις 1.5 και 1.6 έχουν γραφική παράσταση όπως στο Σχήμα 1.2 και είναι εμφανής η ομοιότητα με το Σχήμα 1.1. Στο τελευταίο η αξιοπιστία σχετίζεται με την αναλογία των διαρκειών ζωής, ενώ στο προηγούμενο η απαιτούμενη ζωή σχετίζεται με την αναλογία φορτίων για ένα συγκεκριμένο διάστημα αξιοπιστίας. Τα Σχήματα 1.2α και 1.2β είναι ιδιαίτερα χρήσιμα γιατί συνδέουν όλες τις φυσιολογικά απαιτούμενες παραμέτρους και έχουν προστεθεί δεδομένα στις καμπύλες στην περιοχή όπου $P_s > 0.90$ όπου η κατανομή του Weibull γίνεται μη ακριβής. Αναφορικά στη κλασσική σχέση του Σχήματος 1.3, αν θα πρέπει να αυξηθεί η αξιοπιστία, θα πρέπει να μειωθεί η πιθανή διάρκεια ζωής.

1.2.2 Επίδραση του φορτίου πριν την λειτουργία στη διάρκεια ζωής του εδράνου.

Οι λόγοι για τους οποίους έχουμε πιο πολλές εφαρμογές με έδρανα με φορτίο πριν τη λειτουργία, είναι ότι αυτή η κατάσταση αυξάνει την ακαμψία του εδράνου και μειώνει την απώλεια κίνησης και του παιξίματος. Η προφόρτιση, είτε αξονική, είτε ακτινική επηρεάζει εξίσου τη διάρκεια ζωής γιατί η περιφερειακή φόρτιση είναι τόξο του εδράνου που είναι μια λειτουργία του συνολικού φορτίου. Όσο μακρύτερο είναι το τόξο φόρτισης, τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των κυλιόμενων στοιχείων, πάνω στα οποία κατανέμεται το συνολικό φορτίο και συνεπώς μειώνεται το φορτίο σε κάθε στοιχείο. Το κατάλληλο φορτίο πριν τη λειτουργία για μέγιστη διάρκεια ζωής είναι αυτό το φορτίο το οποίο μαζί με το εφαρμοζόμενο θα εκτείνουν το τόξο ακριβώς στις 180°. Ένα επιπρόσθετο φορτίο πριν τη λειτουργία απλώς θα αυξήσει την τάση σε κάθε στοιχείο και θα μειώσει τη διάρκεια ζωής. Το μήκος του περιφερειακού τόξου ή της «ζώνης φόρτισης» λαμβάνεται με τη μορφή της προβολής του στη βηματική διάμετρο, ϵ , με ταυτόχρονη λύση.

$$F = Z \cdot K \cdot J \cdot \left(\delta \cdot \frac{c}{2} \right)^n \quad (1.7)$$

$$\epsilon = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{c}{2\delta} \right) \quad (1.8)$$

όπου: F = το εφαρμοζόμενο φορτίο.

Z = ο αριθμός σφαιρών ή ροδελών.

K = η σταθερά προβολής που ορίζεται παρακάτω.

c = η διαμετρική χάρη.

J = ο παράγοντας ακτινικού φορτίου που δίνεται από το Σχήμα 1.4.

n = εκθέτης=1.5 για έδρανα με σφαίρες και 1.1 για έδρανα με ροδέλες.

Η σταθερά προβολής για ένσφαιρα έδρανα είναι:

$$K = 1.53 \cdot 10^7 \cdot D^{0.5} \quad (1.9)$$

Και για έδρανα με ροδέλες είναι:

$$K=5.28 \cdot 10^6 \cdot L_r^{0.89} \quad (1.10)$$

όπου: D=διάμετρος σφαιρών.
L_r=μήκος επίδρασης των ροδελών.

Οι Σχέσεις 1.7 και 1.8 λύνονται ως προς ε:

- 1) Υποθέτουμε μια τιμή για το ε με σωστή πρακτική σχεδιασμού το ε είναι συνήθως μεταξύ 0.5 και 1.0.
- 2) Βρίσκουμε το J στο Σχήμα 1.4.
- 3) Λύνουμε την σχέση 1.7 ως προς δ.
- 4) Αντικαθιστούμε το δ στην Σχέση 1.8 και λύνουμε ως προς ε.

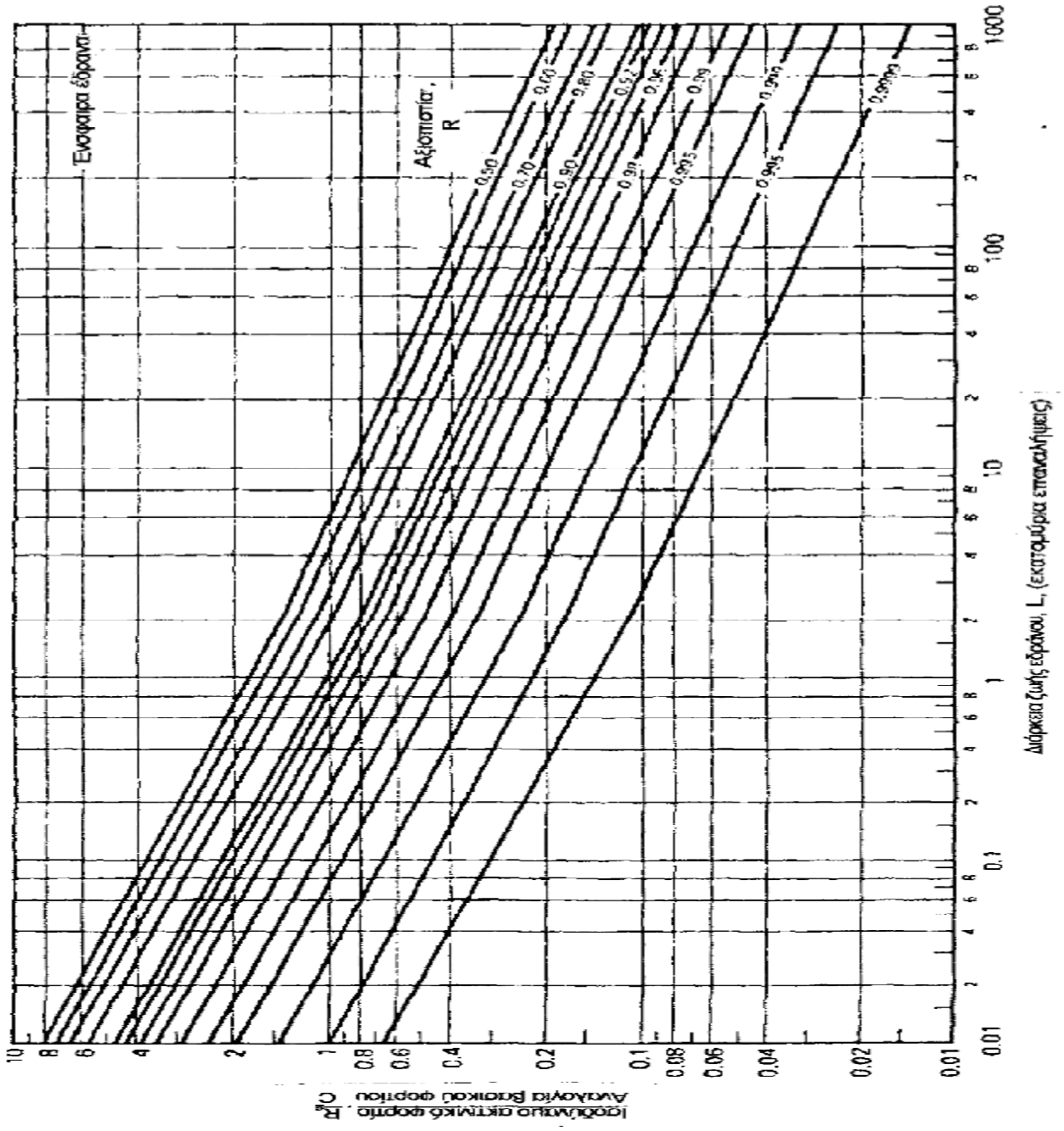
Συγκρίνουμε το ε με την υποτιθέμενη αρχική τιμή και επαναλαμβάνουμε μέχρις ότου η διαφορά είναι μικρότερη από 0.01.

Η σχέση μεταξύ του ε και του παράγοντα ρύθμισης ζωής λ δίνεται στο Σχήμα 1.5 εφαρμόζεται στο L₁₀ ή στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής σε κόπωση από τις σχέσεις 1.11 και 1.12:

$$\text{Για ένσφαιρα έδρανα: } L_{10} = \frac{10^6 \cdot \lambda}{60 \cdot N} \cdot \left(\frac{C}{F}\right)^3 \quad (1.11)$$

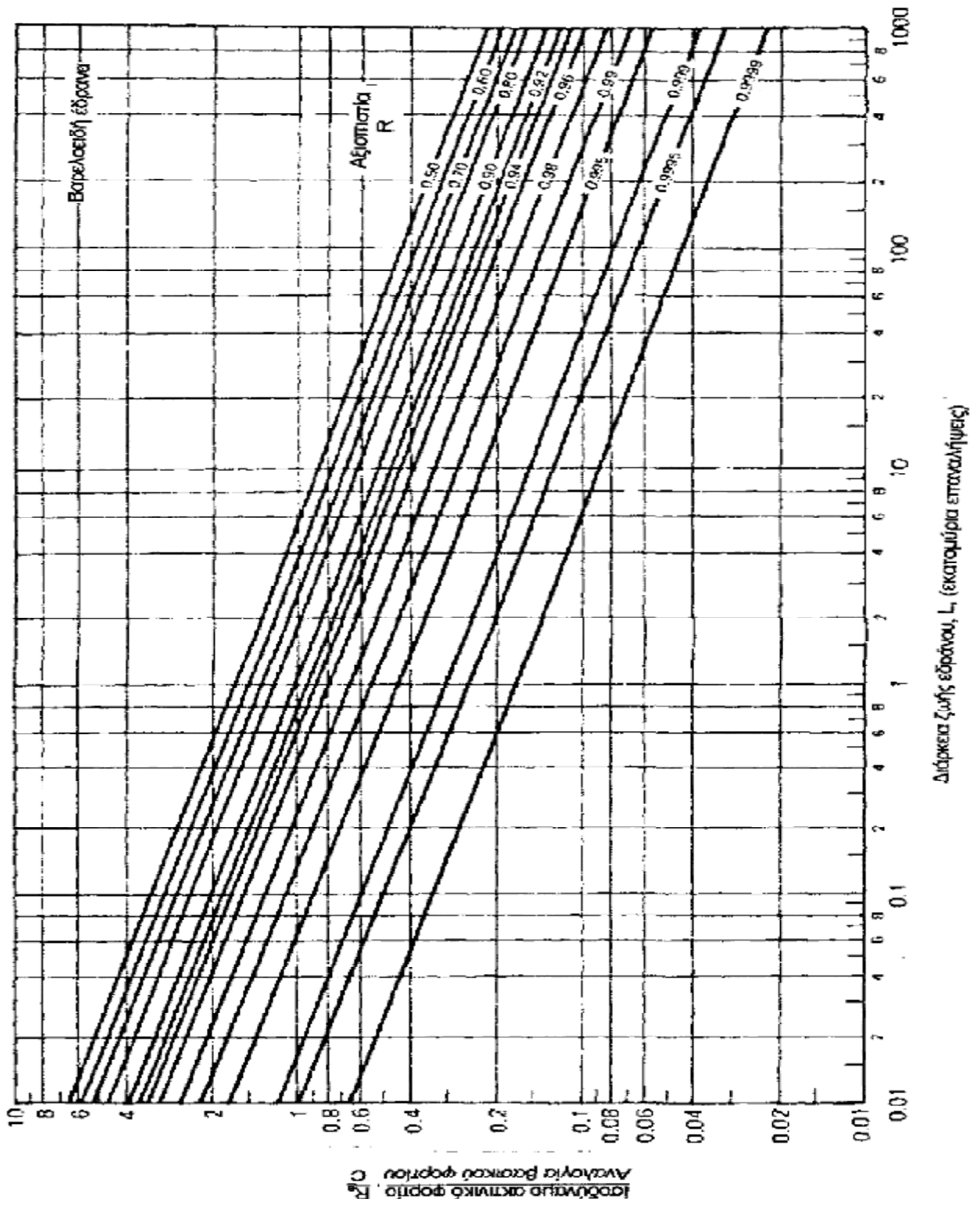
$$\text{Για έδρανα με ροδέλες: } L_{10} = \frac{10^6 \cdot \lambda}{60 \cdot N} \cdot \left(\frac{C}{F}\right)^{10/3} \quad (1.12)$$

Βασικά το λ υπολογίζεται για την επίδραση στη διάρκεια ζωής σε κόπωση της διαμετρικής χάρης, είτε θετική, είτε αρνητική. Σε έδρανα χωρίς φορτίο πριν τη λειτουργία οι διαμετρικές χάρες είναι θετικές και οι αντιπροσωπευτικές τιμές του λ είναι από 0.7 ως 1.0 συνεπώς το λ εξαιτίας της τιμής του, συχνά καλείται παράγοντας μείωσης. Για έδρανα με φορτίο πριν τη λειτουργία παίρνουμε εύκολα τιμές μεγαλύτερες της μονάδας, υποδεικνύοντας έτσι τα πλεονεκτήματα του κατάλληλου φορτίου πριν τη λειτουργία, αλλά θα πρέπει να σημειωθεί ότι αυξάνοντας το φορτίο πριν τη λειτουργία πάνω από ε~1,0 το λ αρχίζει να μειώνεται γρήγορα υποδεικνύοντας την αρκετά μικρότερη ζωή όταν έχουμε υπερβολικά μεγάλο φορτίο πριν τη λειτουργία.



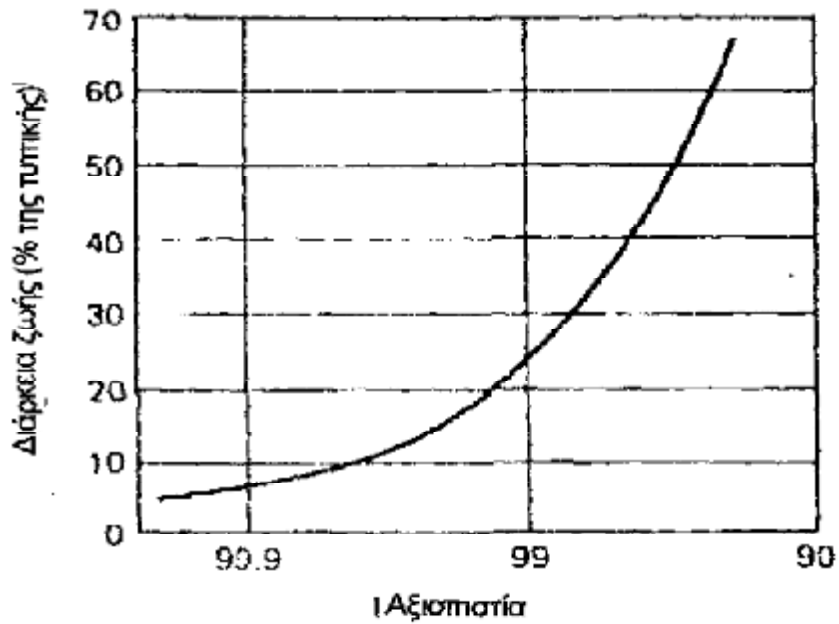
(α)

(α')

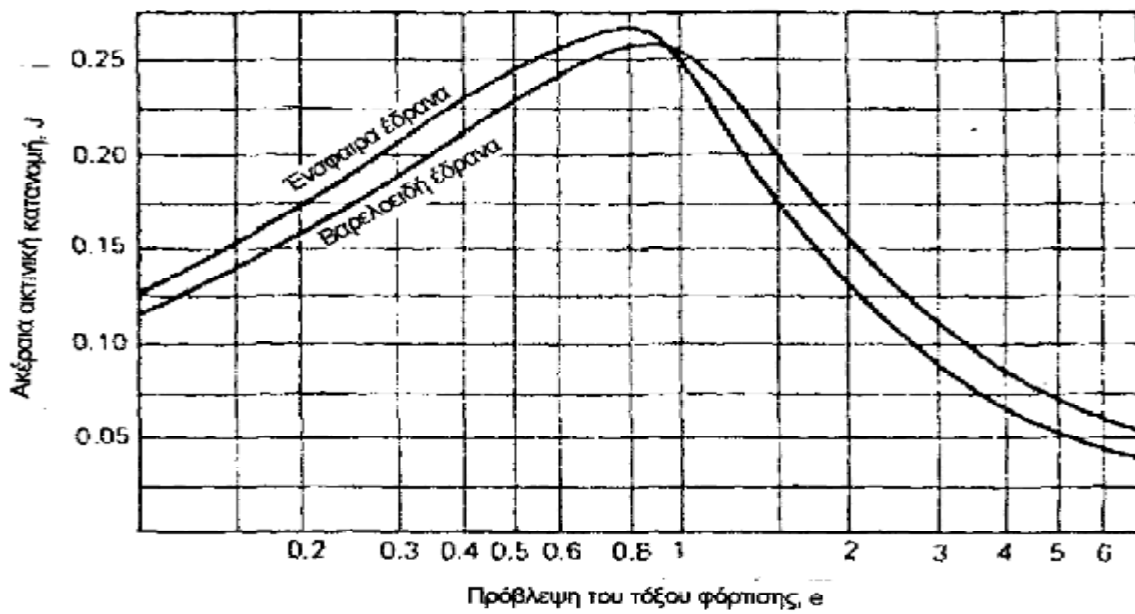


(β)

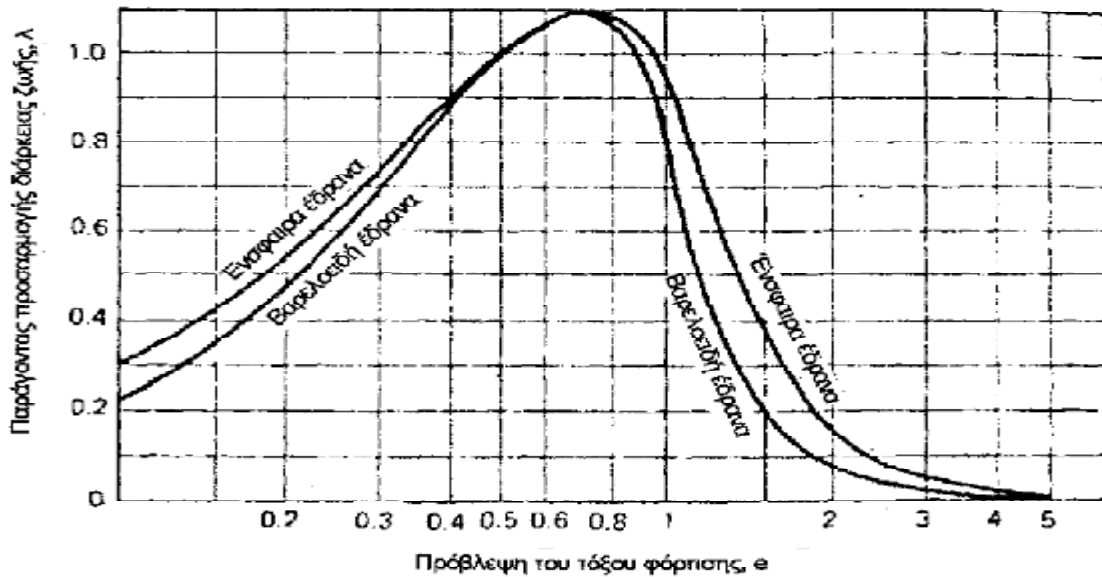
Σχήμα 1.2: Καμπύλες ζωής για αντιτριβικά (α) ένσφαιρα και (β) βαρελοειδή έδρανα



Σχήμα1.3: Διάρκεια ζωής σε κόπωση του εδράνου συναρτήσει της αξιοπιστίας



Σχήμα1.4: Ακτινικός παράγοντας φορτίου, J συναρτήσει της ζώνης προβολής της φόρτισης, e. Για καλύτερα αποτελέσματα είναι καλό να σχεδιάσουμε με $0.5 < e < 0.9$.



Σχήμα 1.5: Παράγοντας μείωσης της διάρκειας ζωής σε κόπωση, λ συναρτήσει του ϵ . Αφού οι πιο επιθυμητές τιμές του λ είναι μεγαλύτερες του 1, το ϵ θα πρέπει να είναι μεταξύ 0.5 και 0.9.

Το ποσό του κατάλληλου φορτίου πριν τη λειτουργία το βρίσκουμε εξαναγκάζοντας δύο διπλά έδρανα, που βρίσκονται πάνω στον ίδιο άξονα, να απορροφήσουν ένα επιβαλλόμενο ποσό αξονικής αντιστάθμισης μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών στεφανών τους. Η αντιστάθμιση μπορεί να πραγματοποιηθεί με αξονική προβολή του προσώπου της μιας στεφάνης προσθέτοντας μια σφήνα ή αν πρόκειται για έδρανα που βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση, χρησιμοποιούμε έναν εσωτερικό και έναν εξωτερικό αποστάτη με ελαφρώς διαφορετικά μήκη. Σαν παράδειγμα υπολογισμού του ποσού του φορτίου ή της αξονικής απόκλισης, θεωρούμε το συνηθισμένο ζευγάρι των γωνιακών ένσφαιρων εδράνων επαφής που φαίνονται στο Σχήμα 1.6. Συμπεριλαμβανομένου και του εφαρμοζόμενου ωστικού φορτίου T , η συνθήκη ισορροπίας απαιτεί ότι:

$$T = F_1 \cdot F_2 \quad (1.13)$$

όπου τα F_1 και F_2 είναι τα ωστικά φορτία στα έδρανα 1 και 2. Χωρίς φορτίο πριν τη λειτουργία ισχύει $F_1 = F_2$. Οι Σχέσεις 1.11 και 1.12 συσχετίζουν την αξονική αντιστάθμιση δ και το φορτίο πριν τη λειτουργία F :

$$F_j = Z \cdot D \cdot G \cdot \sin a \cdot \left(\frac{\cos a_0}{\cos a} - 1 \right)^{1.5} \quad (1.14)$$

$$\delta_j = B \cdot D \cdot \left[- \frac{\sin(a - a_0)}{\cos a} \right] \quad (1.15)$$

όπου: a_0 = αρχική γωνία επαφής κάτω από μηδενικό φορτίο.

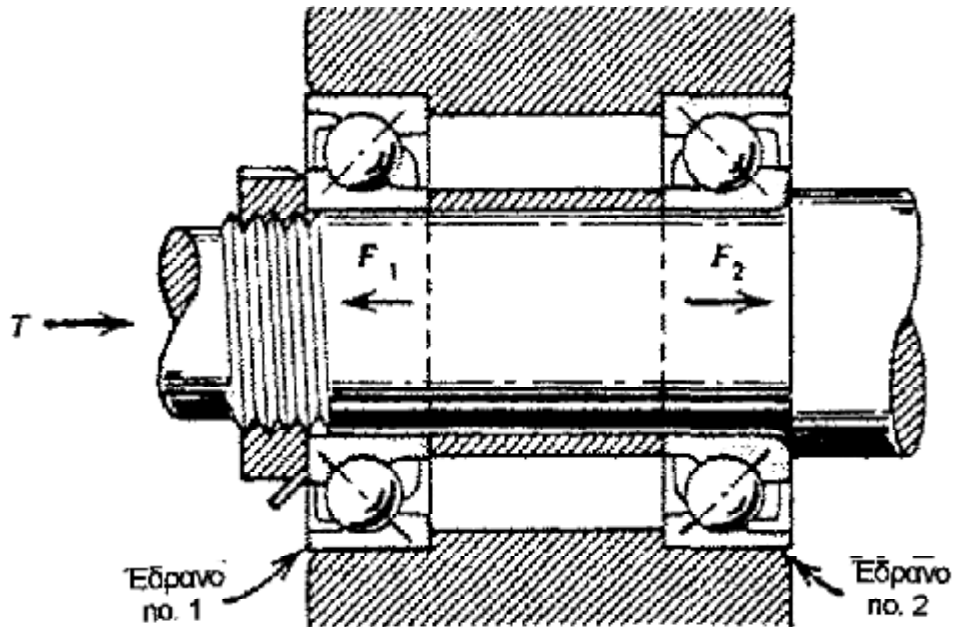
a = τελική γωνία επαφής κάτω από μηδενικό φορτίο.

G = σταθερά αξονικής απόκλισης συσχετιζόμενη με το B από την καμπύλη του Σχήματος 1.7.

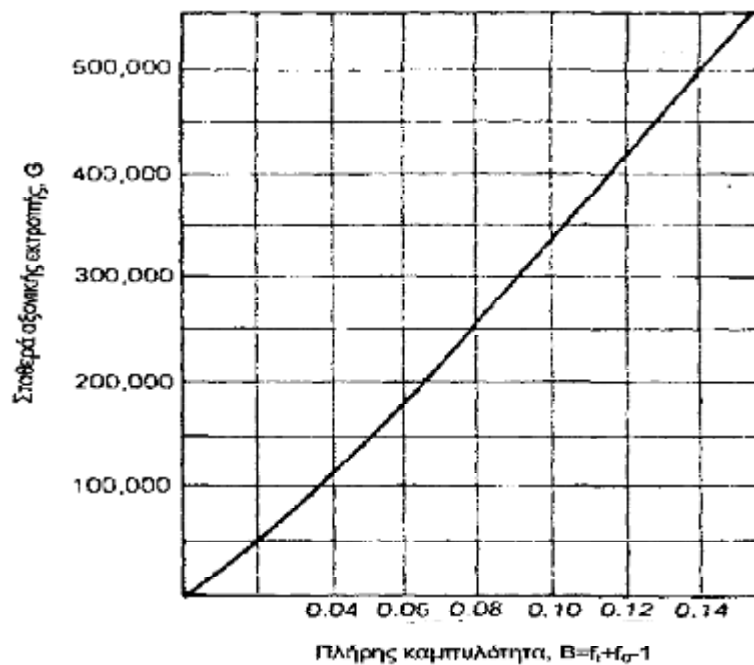
B = σταθερά που αποκομίζεται από τις εσωτερικές και εξωτερικές καμπυλότητες των στεφανών των εδράνων f_i και f_0

$$B=f_1+f_0-1 \quad (1.16)$$

Ο δείκτης j σχετίζεται με το συγκεκριμένο αριθμό εδράνου 1 ή 2 σε ένα διπλό σετ.



Σχήμα1.6: Σετ διπλών εδράνων με προφόρτιση στο οποίο εφαρμόζεται ένα εξωτερικό θλιπτικό φορτίο



Σχήμα 1.7: Σταθερά αξονικής εκτροπής, G , συναρτήσει των καμπυλοτήτων των εσωτερικών και εξωτερικών αυλακιών των σφαιρών, f_i και f_o

Οι τιμές των Z , D και α_0 στις παραπάνω εξισώσεις μπορούν να ληφθούν από τους κατασκευαστές των εδράνων. Το αξονικό φορτίο πριν τη λειτουργία, F , συνήθως είναι γνωστό ή υποτίθεται από τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Από το Σχήμα 1.7 παίρνουμε μια τιμή για το G βασισμένη για την ήδη υπολογισμένη τιμή του B (από την (Σχέση 1.16) από τον πίνακα του Σχήματος 1.8 παίρνουμε άλλους ενδιαφέροντες παράγοντες όπως:

1) Υπολογίζουμε μια σταθερά t από τους γνωστούς παράγοντες στο πρώτο μέλος της εξίσωσης 1.1 κάνοντας το t ίσο με:

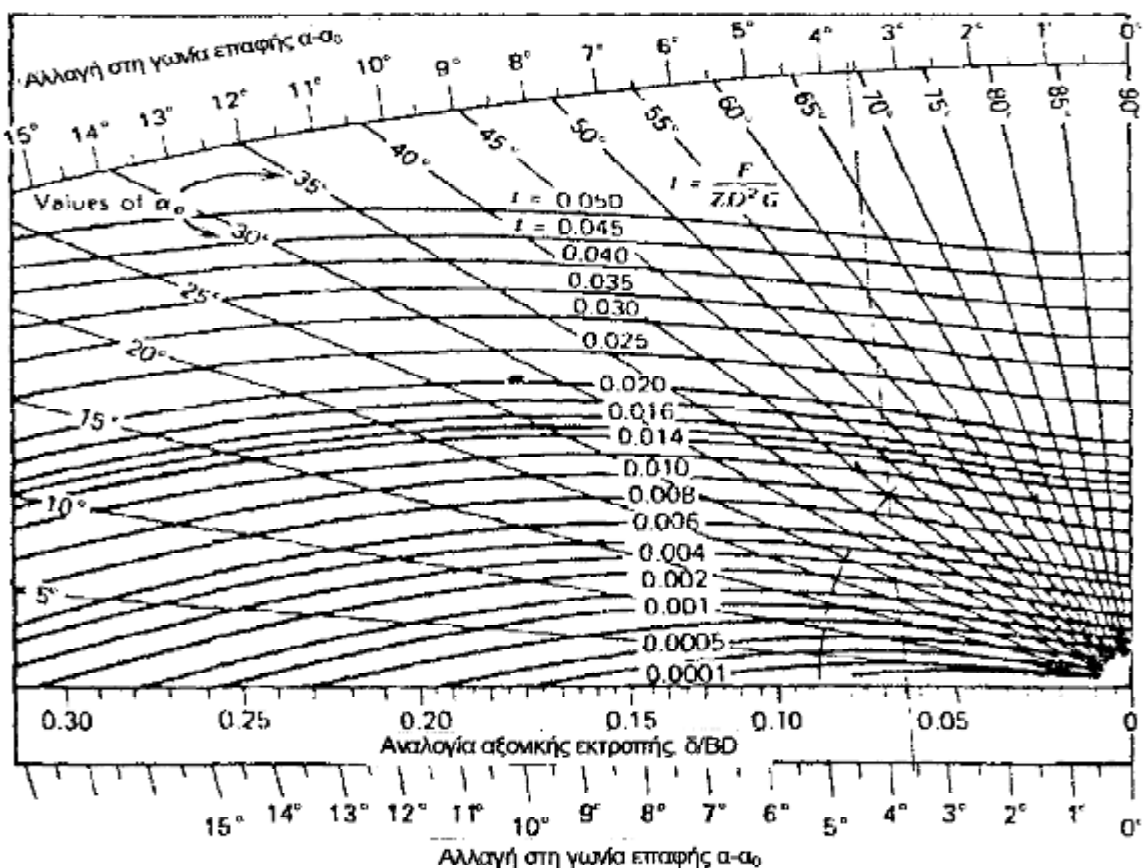
$$t = \frac{F}{Z \cdot D^2 \cdot G} \quad (1.17)$$

2) Στο Σχήμα 1.8 προσδιορίζουμε το σημείο τομής της γραμμής του t και της ακτινικής γραμμής της α_0 . Στις καμπύλες για παράδειγμα είναι $t=0,01$ και $\alpha_0=40^\circ$.

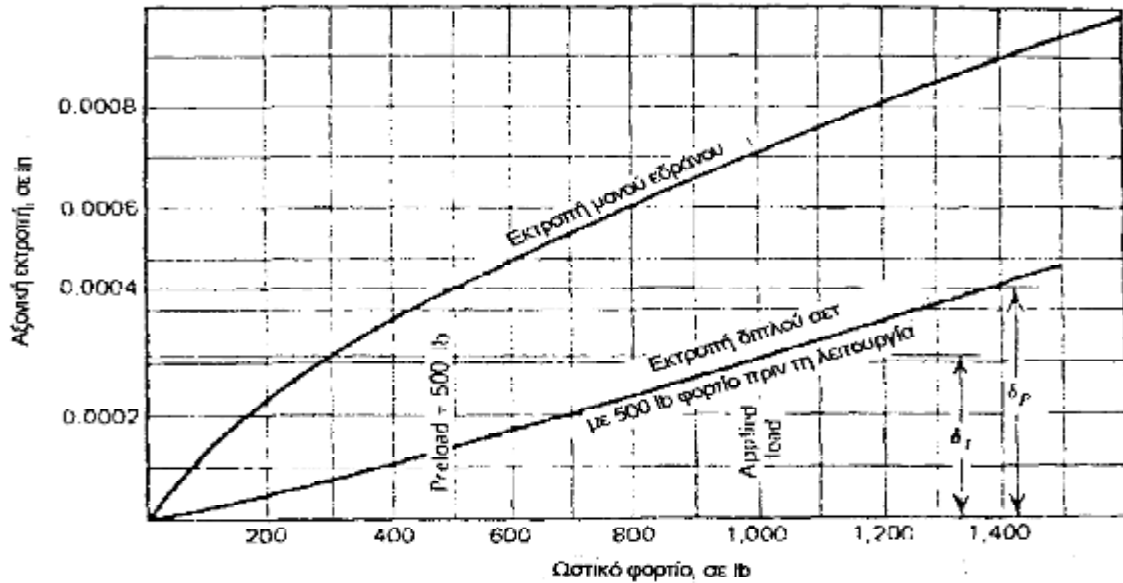
3) Διαμέσου του προσδιορισμένου σημείου στρέφουμε σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιού χεριού.

4) Στο σημείο τομής αυτού του τόξου και της γραμμής των τετμημένων (όπου $\alpha_0=0$), προσδιορίζουμε την τιμή του $\delta/B \cdot D$.

5) Ευθυγραμμίζουμε ένα κανόνα (χάρακα) διαμέσου της τομής του t και της α_0 έτσι ώστε ο κανόνας να είναι παράλληλος με παρόμοια αριθμημένα σημεία πάνω και κάτω των κλιμάκων του $\alpha-\alpha_0$.



Σχήμα 1.8: Σχεδιαστικός χάρτης για τον υπολογισμό της αξονικής εκτροπής, δ , υπό φορτίο και η αποτελεσματική αλλαγή στη γωνία επαφής α



Σχήμα 1.9: Αξονική εκτροπή συναρτήσει του θλιπτικού φορτίου για απλούς υπολογισμούς

Πίνακας 1.2: Υπολογισμοί φορτίου-εκτροπής για τις εφαρμογές

ΠΙΝΑΚΑΣ Α				
F_1	$T = F_1 / ZD^2G$	δ_1 / BD	$\alpha_1 - \alpha_0$	δ_1
200	0.0005	0.012	0.5	0.00024
400	0.0010	0.019	0.8	0.00038
600	0.0015	0.025	1.05	0.00050
800	0.0019	0.029	1.2	0.00058
1000	0.0024	0.034	1.4	0.00068
1200	0.0029	0.039	1.6	0.00078
1400	0.0034	0.044	1.8	0.00088
1600	0.0039	0.049	2.0	0.00098

ΠΙΝΑΚΑΣ Β					
δ_1	$\delta_p + \delta_1$	F_1	$\delta_p - \delta_1$	F_2	T
0.0001	0.00054	670	0.00034	340	330
0.0002	0.00064	870	0.00024	200	670
0.0003	0.00074	1070	0.00014	100	970
0.0004	0.00084	1290	0.00004	20	1270

ΠΙΝΑΚΑΣ Γ						
δ_1	$\delta_p + \delta_1$	F_1	$2F_1$	$\delta_p - \delta_1$	F_2	T
0.0001	0.00038	400	800	0.00034	340	460
0.0002	0.00048	570	1140	0.00024	200	940
0.0003	0.00058	760	1520	0.00014	100	1420

ΠΙΝΑΚΑΣ Δ						
Γωνία επαφής	20	25	30	35	40	
Παράγοντας Υ (επίδραση της προφόρτισης στη διάρκεια ζωής του εδράνου)	1,00	0,87	0,76	0,66	0,57	

1.2.3 Επιδράσεις της ταχύτητας, της λίπανσης και των υλικών

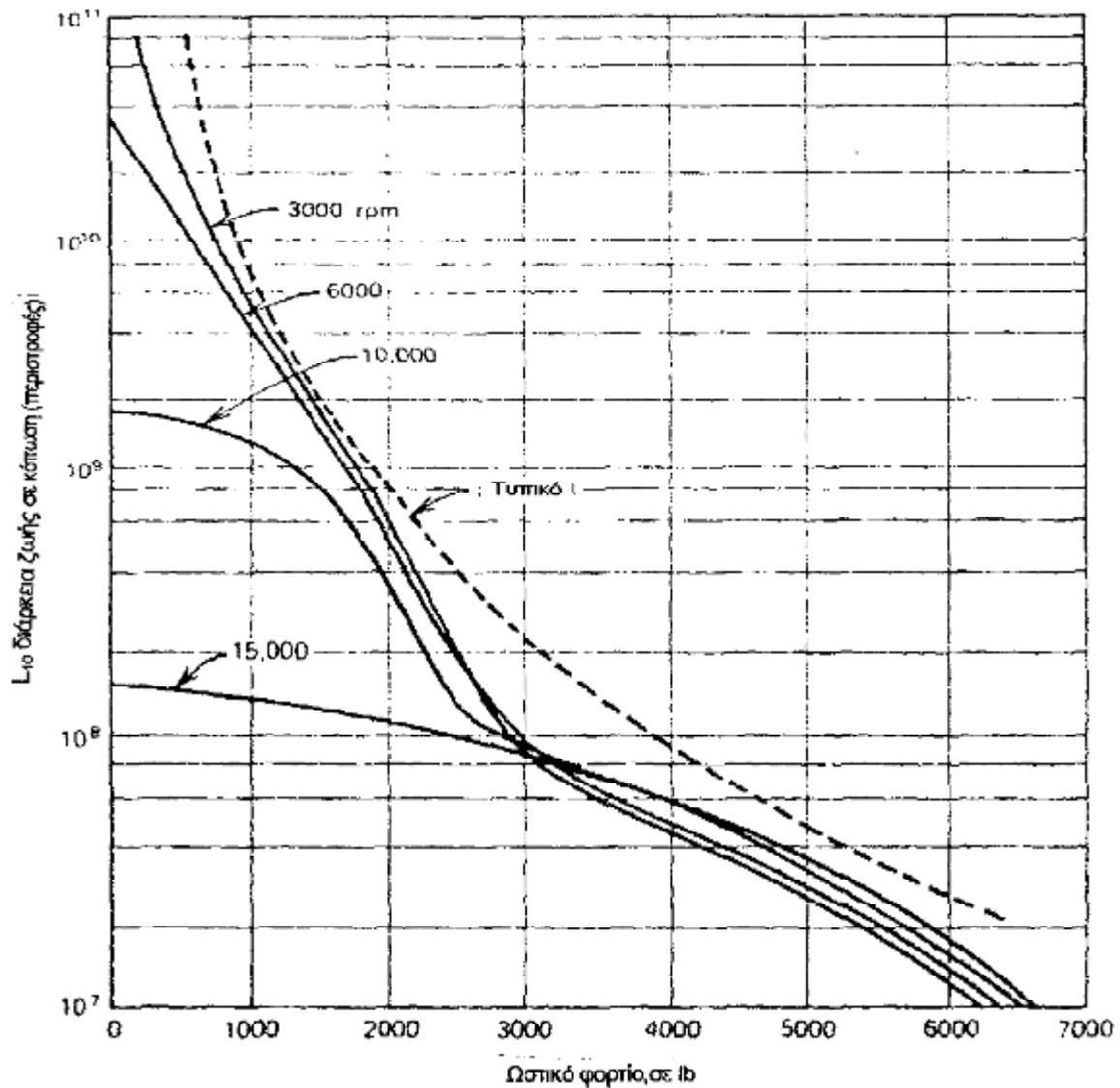
Οι επιδράσεις αυτών των παραμέτρων στη διάρκεια ζωής σε κόπωση των εδράνων με σφαίρες και με ροδέλες, συνδέεται με ένα πολύπλοκο θέμα. Υπάρχουν δύο γενικά επίπεδα αντιμετώπισης του προβλήματος: 1) ο συντηρητικός υπολογισμός με το χέρι των κύριων φορτίων, των εκτροπών και ούτω καθεξής, οδηγώντας σε μια εκτίμηση διάρκειας ζωής χωρίς μεγάλη ακρίβεια, που συχνά ακολουθείται από ένα άφθονο (μεγάλο) συντελεστή ασφαλείας, όπως για παράδειγμα τρία (3) για το φορτίο και δέκα (10) για τη διάρκεια ζωής· και 2) η πιο περιεκτική και σοφιστική προσέγγιση για να συμπεριέχει τις επιδράσεις της φυγόκεντρου δύναμης στη γωνία επαφής και τις γυροσκοπικές στιγμές των σφαιρών. Ο Harris υποδεικνύει ότι η εκτίμηση ενός εδράνου υψηλής ταχύτητας που καταπονείται από θλιπτική μησυνεπίπεδη φόρτιση απαιτεί τη λύση ενός συστήματος με περισσότερες από 85 μη γραμμικές εξισώσεις, που είναι μια δουλειά για υπολογιστή. Τα σχεδιαστικά προβλήματα εδράνων προσπαθούν τις περισσότερες φορές να κατασκευάσουν ένα έδρανο για μεγάλες ταχύτητες και φορτία, συναρμολογούμενα σε μια υποδοχή άγνωστης αντοχής. Αυτή η κατάσταση περιέχει ένα σημαντικό ενδεχόμενο για ολική αστοχία.

Η επίδραση της αυξανόμενης ταχύτητας στη διάρκεια ζωής είναι βασικά μια αύξηση στο φορτίο λειτουργίας και της χάρης εξαιτίας της φυγόκεντρης δύναμης, με μια αντίστοιχη μείωση της ζώνης φόρτισης. Επίσης αυξανόμενης της ταχύτητας, αλλάζουν οι γωνίες επαφής και πιο συγκεκριμένα αυξάνονται στο εσωτερικό αυλάκι και μειώνονται στο εξωτερικό. Τα έδρανα γωνιακής επαφής είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα σε αυτή την επίδραση και στην ακραία περίπτωση μη συμμετρικής φόρτισης μπορεί να έχουμε διαφορετικές γωνίες επαφής και φορτία στις σφαίρες σε κάθε θέση της σφαίρας στην ακτινική διαδρομή. Το Σχήμα 1.10 απεικονίζει τη μεταβολή της L10 διάρκειας ζωής στην κόπωση για ένα δεδομένο έδρανο γωνιακής επαφής συναρτησείτης ταχύτητας περιστροφής και του φορτίου.

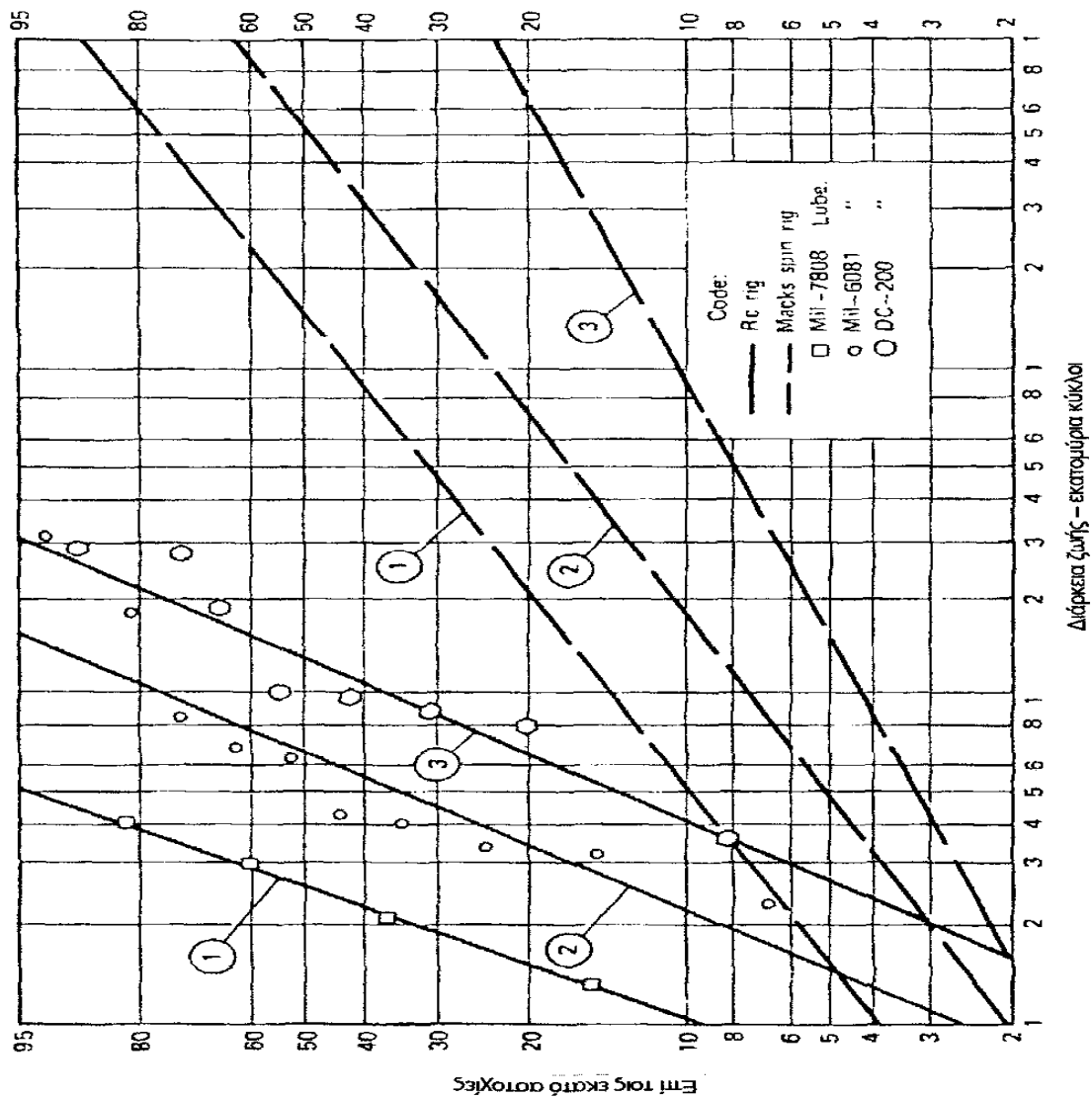
Η εκλογή του λιπαντικού του εδράνου και του χώρου γύρω του είναι συχνά μια μάλλον υποκειμενική πράξη, αλλά επηρεάζεται από τις βασικές έννοιες ότι η τριβή του λιπαντικού θα πρέπει να είναι συγκεκριμένης αντοχής ώστε να διαχωρίζεται στοιχεία και συγκεκριμένου πάχους για να απορροφήσει τη σκληρότητα των επιφανειών. Εξασφαλίζοντας αυτές τις ουτοπικές καταστάσεις τα έδρανα θα έχουν πολύ εκτεταμένες διάρκειες ζωής. Εντούτοις σε πραγματικές περιπτώσεις είναι δύσκολο να έχουμε λίπανση πλήρους ταινίας με διάρκειες ζωής στο 100% ή και περισσότερο από τους τυποποιημένους υπολογισμούς. Η γραφική παράσταση του Weibull, του Σχήματος 1.11 δείχνει τη σχετική υπεροχή τριών κοινών λιπαντικών. Οι αριθμητικές διαφορές που παίρνουμε από τις δύο δοκιμές δίνουν έμφαση στη δυσκολία των δοκιμών των λιπαντικών και στο γεγονός ότι μπορούν να ληφθούν λίγο διαφορετικές ζωές από το ίδιο το έδρανο και το ίδιο λιπαντικό για διαφορετικές φορτίσεις. Η θερμοκρασία είναι πιθανώς η πιο σημαντική περιβαλλοντολογική παράμετρος για να επηρεάζει τη διάρκεια ζωής του εδράνου αλλάζοντας τις ιδιότητες του λιπαντικού. Η μείωση των υπολογισμένων φορτίων στις B10 και B50 διάρκειες ζωής σε θερμοκρασία δωματίου και στους 723°C, είναι σημαντική, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.3. Τα δεδομένα λήφθηκαν με σφαίρες εδράνων 45mm και οι υπολογισμοί εκφράζονται στο επί τοις εκατό της βασικής ικανότητας για φυσιολογικά λιπανόμενο 52100 χάλυβα. Το λιπαντικό σε θερμοκρασία δωματίου ήταν ένα λάδι με μεταλλική βάση και στους 723°C ένας συνθετικός διεστέρας.

Η χρησιμοποίηση στερεών λιπαντικών και ιδιαίτερα γραφίτη και διθειικού μολύβδου είχε λογική επιτυχία σε θερμοκρασίες δωματίου και υψηλότερες.

Τα γενικά αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι ο διθειικός μόλυβδος (MoS_2) προμηθεύει μεγαλύτερη ζωή από το γραφίτη περίπου μιας τάξης μεγέθους. Πολύ σημαντικό είναι ο τύπος του λιπαντικού. Το μέγεθος των μορίων θα πρέπει να είναι μικρότερης τάξης των μικρών και τα μόρια θα πρέπει να βρίσκονται σε ένα συντηρητικό λιπαντικό. Οι ξηρές σκόνες δεν βελτιώνουν τη διάρκεια ζωής και τα υδατικά και αλκοολούχα αιωρήματα έχουν δείξει μείωση στη ζωή. Συγκεκριμένα αιωρήματα που επεκτείνουν τη ζωή είναι: το MoS_2 σε αφρισμένη σιλικόνη και η πάστα MoS_2 σε μεταλλικό λάδι και γραφίτη σε αναλογία 10% σε μεταλλικό λάδι. Φαίνεται να υπάρχει κάποια προτίμηση για το MoS_2 έναντι του γραφίτη ειδικότερα για χρήση εν κενό.



Σχήμα 1.10: Η επίδραση της ταχύτητας και του θλιπτικού φορτίου σε έδρανο με γωνία επαφής



Σχήμα 1.11: Διάγραμμα του Weibull με δεδομένα σε κόπωση σε ένα M1 χάλυβα

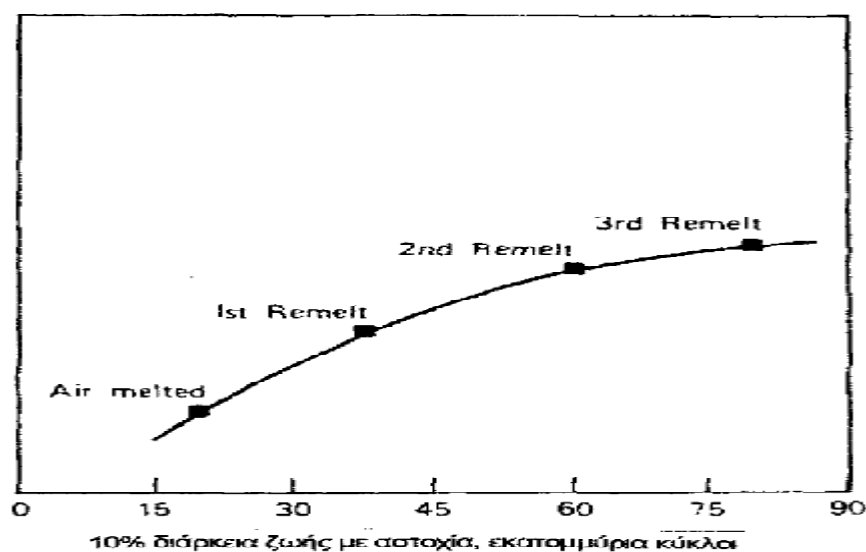
Πίνακας 1.3: Επίδραση της θερμοκρασίας στην αναλογία φορτίου του εδράνου

Υλικό εδράνου	Πρακτική λιωσίματος	Θερμοκρασία, σε °C	% αναλογία του βασικού φορτίου	
			10% ζωή	50% ζωή
M-1	Βασικό τόξο	Δωματίου	83	91
M-1	Βασικό τόξο	218	60	54
M-10	Βασικό τόξο	Δωματίου	77	70
M-10	Βασικό τόξο	218	64	64
M-1	Επαγωγικό κενό	Δωματίου	132	122
M-1	Επαγωγικό κενό	218	64	77
M-50	Με ηλεκτρόδιο σε κενό	Δωματίου	144	126
M-50	Με ηλεκτρόδιο σε κενό	218	93	100

Η ζωή σε κόπωση ενός εδράνου θεωρούμενο σαν συναρμογή συσχετίζεται με δεδομένα διάρκειας ζωής του υλικού και μόνο. Τα διαθέσιμα υλικά για αντιτριβικά έδρανα παρουσιάζουν πολύ καλές ιδιότητες. Οι προσπάθειες για βελτίωση της σύνθεσης και της ποιότητας των υλικών είχαν σαν αποτέλεσμα τα κράματα μεγάλης ποιότητας που παράγονται με λιώσιμο με καταναλώσιμο ηλεκτρόδιο εν κενό με εξαέρωση εν κενό. Η επίδραση αυτών των κραμάτων στο σχεδιασμό εδράνων ήταν τέτοια ώστε να επιτρέψει μια αύξηση στη βασική L_{10} διάρκεια ζωής από 500 σε 1500 ώρες ή από 1 σε 3×10^6 περιστροφές στον αρχικό υπολογισμό των φορτίων. Το αποτέλεσμα του λιωσίματος εν κενό ήταν να μειώνεται η περιεκτικότητα σε ξένα σώματα. Συνεπώς, ο αριθμός των πυρήνων για λακκούβες, κοψίματα, ξεφλουδίσματα και ρωγμές μειώνεται και η διάρκεια ζωής σε κόπωση αυξάνεται. Ο Πίνακας 1.4 εκφράζει τη σχέση μεταξύ του μεγέθους και του αριθμού των ξένων σωμάτων και της B_{10} διάρκειας ζωής. Το Σχήμα 1.12 συσχετίζει αυτή τη ζωή με τον αριθμό των λιωσιμάτων.

Πίνακας 1.4: Σχέση μεταξύ της περιεκτικότητας σε ξένα σώματα και της B_{10} διάρκειας ζωής των βαρελοειδών εδράνων

Προμηθευτής	Επίπεδο μεγέθους ξένων σωμάτων							B_{10} ζωή, σε ώρες
	2	3	4	5	6	7	8	
A	4.0	3.1	1.6	0.7	0.5	0.3	0.2	58
B	7.4	3.2	1.0	0.4	0.2	0.2	0.1	64
C	4.0	1.2	0.7	0.4	0.2	0.1	0.1	153
D	6.5	2.0	0.7	0.2	0.1	0	0	265
E	3.0	1.0	0.4	0.1	0	0	0	247
F	1.0	0.1	0	0	0	0	0	512
G	0.8	0.1	0.1	0	0	0	0	Στη δοκιμή
H	0.2	0	0	0	0	0	0	500+



Σχήμα 1.12: Η επίδραση των αριθμών των λιωσιμάτων στην αστοχία των εδράνων στο χάλυβα 52100

1.2.4 Έδρανα με μανίκια

Τα έδρανα αυτού του τύπου που χρησιμοποιούν υγρή λίπανση και λειτουργούν κάτω από τα 833 Hz δεν φαίνεται να έχουν γίνει αντικείμενο εκτεταμένων μελετών σε κόπωση σύμφωνα με τους αντιτριβικούς τύπους. Αποδεχόμενοι την αναπόφευκτη φθορά εξαιτίας της τριβής ολισθήσεως, ένα κατάλληλα σχεδιασμένο και λιπαινόμενο έδρανο με μανίκια θα περιστρέφεται απεριόριστα κάτω από το υπολογισμένο φορτίο. Η μετατόπιση του άξονα που είναι αποτέλεσμα της φθοράς είναι συνήθως αποδεκτή και μικραίνει με την αφαίρεση των σφηνών.

Η αντοχή σε κόπωση του υλικού του μανικιού δεν φαίνεται να είναι και πολύ σημαντική. Μπορεί να λειτουργήσει ένας μηχανισμός κόπωσης αν μπουν θραύσματα μέσα στο έδρανο. Η είσοδος του μανικιού θα συμβεί μόλις πιεστεί από τον άξονα ένα σκληρότερο ξένο κομματάκι (μεταλλικά γρέζια, σκόνη, διοξείδιο του πυριτίου κ.α.). Αν και η σκόνη θεωρείται συνήθως η κύρια αιτία καταπόνησης του εδράνου, είναι αδύνατο να σχεδιάσουμε γι' αυτό το λόγο ένα μηχανισμό αστοχίας, εξαιτίας της έλλειψης γνώσης της τοπικής τάσης, της τιμής του kt , του αριθμού των σωματιδίων, της συχνότητας εφαρμογής των τάσεων κ.α. Ιδιαίτερα το τελευταίο δεν έχει καμία σχέση με την ταχύτητα του άξονα. Ο όρος «καταπόνηση» χρησιμοποιήθηκε παραπάνω για διάκριση από τον όρο «αστοχία», γιατί τα έδρανα με μανίκια έχουν συνήθως μια μεγάλη επιχειρησιακή περίοδο από την αρχή της λειτουργίας ως την κατάρρευση. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου μπορεί να υπάρξει μια αύξηση στην θερμοκρασία και την τριβή εξαιτίας της απώλειας ευθυγράμμισης του άξονα.

Για την ελαχιστοποίηση της δυσλειτουργίας ή της αστοχίας των εδράνων μπορούν να χρησιμοποιηθούν συγκεκριμένες σχεδιαστικές πρακτικές:

1) Η γεωμετρία και το τελείωμα του άξονα θα πρέπει να είναι κατάλληλα ώστε να επιτρέπουν λίπανση με ταινία. Η ομοκεντρία και η ταινία θα πρέπει να είναι ελεγχόμενες.

2) Τα σημεία που θα τοποθετηθεί το έδρανο θα πρέπει να είναι αρκετά σκληρά για να φέρουν τα φορτία του μανικιού και του άξονα μέσα στην επιτρεπόμενη απόκλιση το τελείωμα θα πρέπει να είναι πολύ καλό ώστε να μην επηρεάζει το πάχος του μανικιού, ειδικότερα σε λεπτά μανίκια και κελύφη.

3) Το πάχος του τοιχώματος του μανικιού πρέπει να είναι κατάλληλο για να φέρει το θλιπτικό φορτίο μέσα στην επιτρεπόμενη απόκλιση. Για να είναι αποτελεσματικό το τοίχωμα του μανικιού και τα σημεία τοποθέτησης θα πρέπει να σχεδιάζονται μαζί.

4) Η αναλογία μήκους/διαμέτρου (L/D). Η εκτίμηση πολλών δεδομένων οδήγησε στην ποικιλία των τιμών του Πίνακα 1.4 με τον κανόνα του αντίχειρα οδηγού.

Πίνακας 1.4: Επιλογή μεθόδου λίπανσης

L/D	Ταχύτητα, σε rpm	Φορτίο, σε kg/mm^2	Μέθοδος λίπανσης
1.0-3.0	1000	14.7	Γράσο
0.7-1.3	2500	1.5	Πιπίλισμα ή πίεση
0.2-1.0	2000-4000	1.5-3.7	Πιπίλισμα ή πίεση
0.2-0.4	4000-10000	Μικρό	Πίεση
0.3-max	10000	Μικρό	Πίεση

1.3 ΡΟΥΛΕΜΑΝ

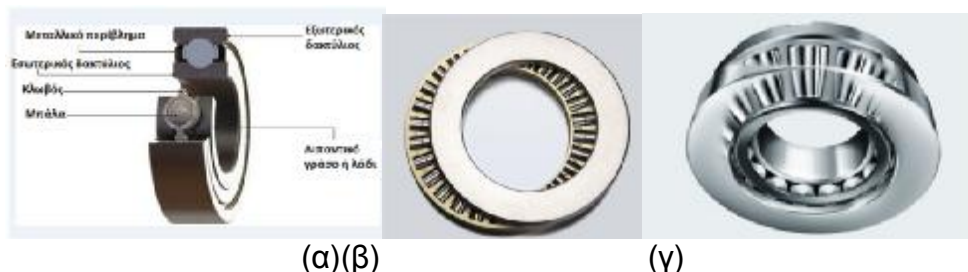
Για τα ρουλεμάν αυτό που παίζει ρόλο είναι η τριβή κύλισης. Προς το σκοπό αυτό υπολογίζεται ακόμα και η τριβή εκκίνησης κατά την αρχή της κίνησης και η τριβή τερματισμού στο τέλος της κίνησης. Στην τριβή της κίνησης των ρουλεμάν έχουμε δύο περιπτώσεις: την τριβή κύλισης και την τριβή κυλινδραρίσματος.

Η τριβή κύλισης εμφανίζεται όταν δύο ελαστικά σώματα (π.χ από χάλυβα) κυλίνονται το ένα πάνω στο άλλο. Δια μέσου της ελαστικής παραμόρφωσης δημιουργείται από το θεωρητικό σημείο επαφής ή τη γραμμή επαφής μια επιφανειακή επαφή η οποία μάλιστα στην ελεύθερη κύλιση δυο σωμάτων μεταξύ οδήγησης δίνει ένα ποσοστό ολίσθησης. Η τριβή κυλινδραρίσματος εμφανίζεται όταν δύο σώματα κυλίνονται το ένα επί του άλλου, όπου υπάρχουν και ποσοστά κύλισης και ποσοστά ολίσθησης με βάση τους βασικούς νόμους της μηχανικής. Τριβή κυλινδραρίσματος έχουμε χαρακτηριστικά στα έδρανα κύλισης και στις πλευρές των γραναζιών.

Τα ρουλεμάν με σφαιρίδια, με κυλινδρίσκους και με βελόνες λέγονται κυλινδροτριβείς. Οι κυλινδροτριβείς αποτελούνται από τους κυλιόμενους δακτυλίους ή τους κυλιόμενους δίσκους, τα σώματα κύλισης που μπορούν να είναι σφαιρικά, κυλινδρικά, κωνοειδή η βαρελοειδή και συνήθως μάλιστα να καλύπτονται από έναν κλωβό. Ο κλωβός εμποδίζει μια αμοιβαία επαφή των σωμάτων κύλισης. Τα δακτυλιοειδή έδρανα έχουν έναν εσωτερικό και έναν εξωτερικό δακτύλιο ανάμεσα στους οποίους «ρολλάρουν» τα σώματα κύλισης. Τα σώματα κύλισης και οι τροχιές κύλισης έχουν σκληρυνθεί, τροχισθεί και λειανθεί. Για την κατασκευή των κλωβών χρησιμοποιείται συνήθως χαλυβδολαμαρίνα και σπανιότερα ορείχαλκος, ελαφρύ μέταλλο η συνθετική ύλη.

1.3.1. Τύποι ρουλεμάν

Ανάλογα με την διεύθυνση της δύναμης την οποία δέχεται ένα έδρανο κύλισης κατά την λειτουργία του διακρίνουμε δύο βασικές κατηγορίες ρουλεμάν. Τα εγκάρσια ρουλεμάν(ακτινικά έδρανα)(Σχήμα 1.3α) και τα κατά μήκος ρουλεμάν (αξονικά έδρανα)(Σχήμα 1.3β). Υπάρχουν επίσης τα ακτινικά αυλακωτά ρουλεμάν που δέχονται δυνάμεις και προς τις δύο διευθύνσεις (Σχήμα 1.3γ). Στα ακτινικά έδρανα τα σώματα κύλισης κινούνται μεταξύ δακτυλίων, ενώ στα αξονικά μεταξύ δίσκων.



Σχήμα 1.13: Έδρανο (α) ακτινικό,(β) αξονικό και (γ) συνδυαστικό.

Ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες της κάθε εφαρμογής προκύπτει η ανάγκη για σχεδιασμό διαφόρων μορφών ρουλεμάν. Έτσι λοιπόν υπάρχουν αυλακωτά ακτινικά ρουλεμάν καθώς και βελονοειδή ρουλεμάν τα οποία συναντώνται και με πλευρικούς δίσκους είτε επικάλυψης είτε στεγανότητας. Οι πρώτοι εμποδίζουν μια βλάβη του συστήματος κύλισης από ξένα σώματα, οι δεύτεροι εμποδίζουν την έξοδο του γράσου από το έδρανο. Με τους δίσκους αυτούς εξοικονομούνται παρεμβύσματα σε άλλα σημεία. Για απλό αξονικό προσδιορισμό των εξωτερικών δακτυλίων μπορούν αυτά να παραδοθούν και με κυκλικές αύλακες για συνεκτικές ροδέλες.

Από τους διάφορους τύπους ρουλεμάν αξίζει να δώσουμε έμφαση στα βελονοειδή ρουλεμάν (Σχήμα 1.15). Τα βελονοειδή ρουλεμάν είναι αξιόλογα λόγω του απαιτούμενου μικρού χώρου τοποθέτησης έναντι των σφαιρικών και κυλινδρικών ρουλεμάν και της σχετικά μεγάλης φόρτισης τους. Αν τα βελονοειδή έδρανα έχουν εσωτερικό δακτύλιο, οι βελόνες κινούνται άμεσα πάνω σε ένα σκληρυμένο, ρεκτιφιαρισμένο και στιλβωμένο δρομέα, διότι έτσι τα έδρανα χρειάζονται ακόμα λιγότερο χώρο. Ένας άλλος τύπος ρουλεμάν, τα ρουλεμάν με κωνικούς κυλινδρικούς, μπορούν να αποσυναρμολογηθούν και ο εσωτερικός και ο εξωτερικός δακτύλιος να τοποθετηθούν χωριστά. Αυτό τα καθιστά συμφερότερα για μονταρίσματα σε σειρά. Τέλος μια ιδιαίτερη κατασκευαστική μορφή αποτελούν τα έδρανα τεσσάρων σημείων. Αυτά μπορούν να δεχτούν τις δυνάμεις σε τέσσερα σημεία και έτσι επιτυγχάνουν μια υψηλή σταθερότητα. Στα έδρανα αυτά ο εσωτερικός δακτύλιος είναι χωρισμένος. Έτσι μπορούν να τοποθετηθούν πολλά σφαιρίδια, τα οποία σε συνδυασμό με τα ψηλά ερείσματα των δακτυλίων προσδίδουν στα ρουλεμάν αυτά μεγάλη ικανότητα έδρασης.



Σχήμα 1.15:Βελονοειδές ρουλεμάν

Τέλος ένας αρκετά σημαντικός τύπος ρουλεμάν είναι τα βαρελοειδή ρουλεμάν (Σχήμα 1.16). Τα κλασσικά βαρελοειδή ρουλεμάν έχουν σφικτήρα. Ένας ξεχωριστός τύπος βαρελοειδών ρουλεμάν είναι τα διαιρούμενα βαρελοειδή ρουλεμάν. Αυτά έχουν κυλινδρική οπή και οι δύο δακτύλιοί τους (εσωτερικός και εξωτερικός) καθώς και το συγκρότημα κλωβού διαιρούνται σε δύο τμήματα. Οι διαιρεμένοι δακτύλιοι συνδέονται μεταξύ τους με κοχλίες. Ένα σύνηθες κατασκευαστικό στοιχείο των διαιρούμενων βαρελοειδών ρουλεμάν είναι οι ενσωματωμένοι ασφαλιστικοί δακτύλιοι. Συνήθως οι εσωτερικοί ημιδακτύλιοι είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους με κοχλίες συναρμολόγησης. Αυτό που πρέπει τελικά να τονιστεί είναι ότι η εσωτερική σχεδίαση των διαιρούμενων βαρελοειδών ρουλεμάν είναι τέτοια ώστε τα ρουλεμάν αυτά να έχουν τη μέγιστη δυνατότητα παραλαβής φορτίου.



Σχήμα 1.16:Βαρελοειδές ρουλεμάν διπλής σειράς

Ένα άλλο πρόβλημα συντήρησης των ρουλεμάν προκύπτει από την καταπόνησή τους σε διάβρωση. Τα ρουλεμάν χρησιμοποιούνται σε μια ευρεία γκάμα μηχανισμών σε βιομηχανικές παραγωγικές διαδικασίες. Για το λόγο αυτό βρίσκονται σε επαφή με μια μεγάλη γκάμα ρευστών τα οποία έχουν λιγότερο ή περισσότερο διαβρωτικές ιδιότητες, όπως το νερό, τα οξέα, οι βάσεις και διάφορα αέρια. Οι κατασκευαστές των ρουλεμάν έχουν εξοπλίσει τα σύγχρονα ρουλεμάν με μηχανισμούς στεγανοποίησής τους από τα διαχειριζόμενα στη παραγωγική διαδικασία ρευστά, ωστόσο ορισμένα από αυτά είναι ιδιαίτερα δραστικά και έτσι είναι αναγκαία η λήψη επιπλέον μέτρων. Επειδή στις περιπτώσεις αυτές τα ρουλεμάν υφίστανται μια σύνθετη καταπόνηση μηχανική και χημική τα μέτρα αυτά δεν συνίστανται στην επίστρωση με ειδικές ρητίνες της καταπονούμενης σε διάβρωση μεταλλικής επιφάνειας, αλλά μπορεί να αφορούν στη χρησιμοποίηση ειδικών υλικών κατά την κατασκευή των ρουλεμάν, στην κατάλληλη μηχανική προετοιμασία των καταπονούμενων επιφανειών καθώς επίσης και στη χρησιμοποίηση εξελεγμένων λιπαντικών στα οποία περιλαμβάνονται και στερεά. Οι συνηθέστερες περιπτώσεις βιομηχανικής παραγωγής, όπου απαιτείται η προστασία των εδράνων κύλισης από διάβρωση συναντώνται στη χημική βιομηχανία και τη βιομηχανία τροφίμων, στη χαλυβουργία καθώς και στην βιομηχανία κατασκευής ημιαγωγών.

Για όλους τους παραπάνω λόγους είναι σκόπιμο να εντάσσεται η συντήρηση των ρουλεμάν μιας βιομηχανικής μονάδας σε ένα πρόγραμμα διαγνωστικής συντήρησης. Σήμερα αυτή η υπηρεσία διατίθεται από εταιρείες του χώρου και επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση ειδικής τεχνολογίας οργάνων ελέγχου λειτουργίας των ρουλεμάν και διαγνωστικής συντήρησής τους, τα οποία παρακολουθούν τη αδιαλείπτως τη λειτουργία των μηχανημάτων που φέρουν ρουλεμάν. Η διαγνωστική συντήρηση των ρουλεμάν εξασφαλίζει την απρόσκοπτη λειτουργία των μηχανημάτων της παραγωγής, και αποτελεί κρίσιμη διαδικασία για τις περιπτώσεις εκείνων των γραμμών παραγωγής όπου η ζημιά ενός ρουλεμάν μπορεί να προκαλέσει διακοπή όλης της γραμμής παραγωγής με συνέπεια σοβαρή οικονομική ζημία για την εταιρεία.

Στους κυλινδροτριβείς το μέγεθος της δύναμης τριβής είναι κατά μέσο όρο 25-50% χαμηλότερο από το αντίστοιχο μέγεθος τριβής στα έδρανα ολίσθησης. Οι κυλινδροτριβείς λοιπόν ζεσταίνονται λιγότερο κι έτσι όταν εργάζονται παρουσιάζουν μικρότερες απώλειες ενέργειας. Αυτό δεν είναι το μοναδικό πλεονέκτημά τους. Κινούνται ακόμη με μικρότερο τζόγο και συνεπώς με μεγαλύτερη ακρίβεια πράγμα ιδιαίτερα σημαντικό για τις ηλεκτρικές μηχανές και τις εργαλειομηχανές. Επίσης απαιτούν μικρό χώρο και δεν απαιτούν συντήρηση με λιπαντική ύλη. Τέλος η διεθνής τους τυποποίηση εξασφαλίζει την εναλλακτικότητα γεγονός που τους κάνει εξαιρετικά

εύχρηστους. Στα μειονεκτήματά τους πρέπει να καταγραφούν η ευπάθειά τους όταν δέχονται κρουστικές φορτίσεις και η θορυβώδης κίνηση τους, ιδιαίτερα όταν τους συγκρίνουμε με τα απλά έδρανα. Έχουν γενικά μεγαλύτερο κόστος από τα απλά έδρανα. Χρειάζονται διατρήσεις στο περίβλημα και στροφείς με περιορισμένες ανοχές.

Τέλος η τοποθέτηση των απλών κυλινδροτριβέων είναι δυσκολότερη από την τοποθέτηση των τεμαχιστών απλών εδράνων. Οι διάφοροι τύποι των ρουλεμάν εμφανίζουν ορισμένα ιδιαίτερα πλεονεκτήματα που τους καθιστούν κατάλληλους για συγκεκριμένες εφαρμογές. Για παράδειγμα ο ενδιαφέρον τύπος των διαιρούμενων βαρελοειδών ρουλεμάν μπορεί να καλύψει μια μεγάλη γκάμα ξεχωριστών εφαρμογών. Γενικά η χρήση τους αφορά μηχανήματα και εγκαταστάσεις όπου είτε η αξονική πρόσβαση στο σημείο τοποθέτησης του ρουλεμάν δεν είναι δυνατή, είτε ο ελεύθερος χώρος για το μοντάρισμα είναι εξαιρετικά περιορισμένος.

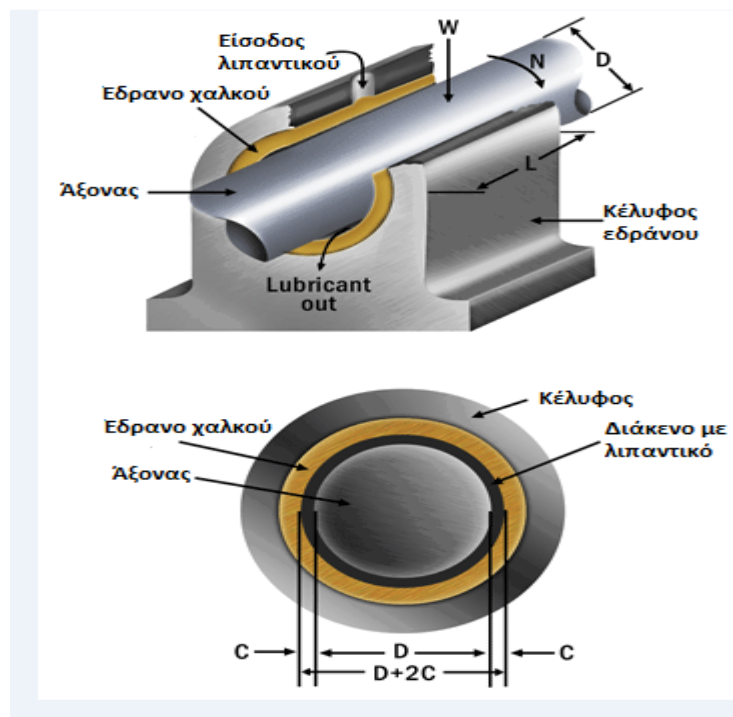
Τα διαιρούμενα βαρελοειδή ρουλεμάν χρησιμοποιούνται επίσης σε κατασκευές όπου η αποσυναρμολόγηση και αφαίρεση βαριών κιβωτίων μετάδοσης κίνησης είναι δυσχερής καθώς και σε εγκαταστάσεις όπου για λειτουργικούς λόγους ενδείκνυται το άνοιγμα και ο έλεγχος των ρουλεμάν σε σχετικά σύντομα χρονικά διαστήματα. Με βάση τα παραπάνω χαρακτηριστικά των διαιρούμενων βαρελοειδών ρουλεμάν, αυτά καθίστανται κατάλληλα για μια ευρεία γκάμα ξεχωριστών και σημαντικών για τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις εφαρμογών. Χρησιμοποιούνται λοιπόν στα χαλυβουργεία, στη ναυπηγική, σε μονάδες παραγωγής μη σιδηρούχων μετάλλων, σε μονάδες παραγωγής κι επεξεργασίας πετροχημικών και σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρισμού. Παράλληλα βρίσκουν πιο κλασσικές εφαρμογές σε συστήματα μετάδοσης κίνησης, σε συστήματα μεταφορικών ταινιών, σε ραουλόδρομους, σε ενδιάμεσους άξονες και σε άξονες με σύνδεσμο καρτάν.

Μια κατηγορία ρουλεμάν που συναντά πολλές εφαρμογές είναι τα βελονοειδή ρουλεμάν. Τα βελονοειδή ρουλεμάν λόγω του μικρού χώρου που απαιτείται για την τοποθέτηση τους έχουν προβάδισμα έναντι των σφαιρικών και κυλινδρικών ρουλεμάν σε μια σειρά εφαρμογών. Εδώ και αρκετές δεκαετίες αξιοποιούνται σε σημαντικές εφαρμογές, όπως στη μπιέλα πολύστροφων βενζινοκινητήρων, στις ατράκτους ηλεκτρικών συσκευών, στις πλήμνες ηλεκτρομαγνητικών ζεύξεων, στους οδοντωτούς τροχούς εργαλειομηχανών, σε τροχαλίες ιμάντων κλπ. Τέλος ένας άλλος ενδιαφέρων τύπος ρουλεμάν που συναντά σημαντικές εφαρμογές είναι τα ρουλεμάν με κωνικούς κυλινδρίσκους. Αυτά παρέχουν το πλεονέκτημα της δυνατότητας ρύθμισης του ακτινικού και αξονικού τζόγου λειτουργίας. Μπορούν να αποσυναρμολογηθούν και να τοποθετηθούν ξεχωριστά ο εσωτερικός και ο εξωτερικός δακτύλιος. Το γεγονός αυτό τα καθιστά καταλληλότερα για μονταρίσματα στη σειρά. Τα ρουλεμάν αυτά προτιμώνται σαν ακτινικά και αξονικά φορτιζόμενα έδρανα για εδράσεις τροχών και ατράκτων στην κατασκευή αυτοκινήτων και εργαλειομηχανών.

2.ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΔΡΑΝΩΝ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ,ΚΥΛΙΣΗΣ ΚΑΙ ΩΣΤΙΚΩΝ

2.1 ΕΔΡΑΝΑ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

Τα έδρανα ολίσθησης (Σχήμα 2.1) είναι γενικά στοιχεία αποτελούμενα από δύο επιφάνειες σε κίνηση, ανάμεσα στις οποίες παροχετεύεται λιπαντικό για την μείωση των αναπτυσσόμενων τριβών και απαγωγή της δημιουργούμενης θερμότητας. Τα πλέον συνήθη έδρανα είναι τα κυλινδρικά έδρανα ολίσθησης, φέροντα περιστρεφόμενους άξονες και ακτινικά φορτία. Αποτελούνται από ένα χιτώνιο από ειδικό μέταλλο (αντιτριβικά χιτώνια από μπρούντζο, από κράμα κασσιτέρου-χαλκού και αντιμονίου ή από μη μεταλλικά πολυμερή), στηριζόμενο στο εσωτερικό μιας βάσης ολόσωμης ή διαιρούμενης εντός της οποίας εισέρχεται ο άξονας της μηχανής, και μια οπή από όπου εισέρχεται το λιπαντικό. Εντός του χιτωνίου συνήθως χαράσσονται εγκοπές κατάλληλης γεωμετρίας, έτσι ώστε να υποβοηθείται η ομοιόμορφη κατανομή του λιπαντικού στην επιφάνεια του εδράνου. Το χιτώνιο που τοποθετείται στην ολόσωμη βάση, λέγεται αντιτριβικός δακτύλιος (κουζινέτο). Εκτός από τα κυλινδρικά υπάρχουν και ελλειπτικά έδρανα, και έδρανα κυκλικών τομών. Όλα τα ανωτέρω παραλαμβάνουν εγκάρσια φορτία.



Σχήμα: 2.1 Απεικόνιση εδράνου ολίσθησης

Τα **αξονικά έδρανα ολίσθησης** παραλαμβάνουν τα αξονικά φορτία που αναπτύσσονται σε περιστρεφόμενους άξονες. Η εισαγωγή λιπαντικών μεταξύ τριβομένων επιφανειών, έχει ευεργετικά αποτελέσματα πάνω στο συντελεστή τριβής. Τα λιπαντικά μπορεί να είναι σε στερεά, υγρή ή αέρια μορφή.

Τα **λιπαντικά** που χρησιμοποιούνται για την λίπανση των εδράνων ολίσθησης: Ορυκτά λιπαντικά (πετρελαίου): Είναι κατάλληλα για βασικές ανάγκες λίπανσης. Πρόσθετα βελτιώνουν τις ιδιότητες και τη συμπεριφορά τους. Σε υψηλές θερμοκρασίες μειώνεται η λιπαντική ικανότητά τους.

Κατά την διαπραγμάτευση και το σχεδιασμό των εδράνων ολίσθησης μας ενδιαφέρει ο προσδιορισμός της κατανομής της πίεσης που αναπτύσσεται στο λιπαντικό κατά τη λειτουργία. Το ολοκλήρωμα της πίεσης πάνω στην επιφάνεια του εδράνου μας δίνει την ικανότητα παραλαβής φορτίου του εδράνου. Για τον υπολογισμό της κατανομής της πίεσης χρησιμοποιούμε την θεωρία της λίπανσης.

2.1.1 Είδη λίπανσης

Διακρίνουμε τα εξής είδη λίπανσης:

Υδροδυναμική λίπανση: Κατά τη λίπανση αυτή οι φέρουσες τα φορτία επιφάνειες διαχωρίζονται μεταξύ τους από ένα σχετικά παχύ στρώμα λιπαντικού, ούτως ώστε να αποφεύγεται επαφή μετάλλου με μέταλλο. Η θέση ισορροπίας του εδράνου βρίσκεται με την εφαρμογή των νόμων της ρευστομηχανικής. Κατά την υδροδυναμική λίπανση δεν είναι απαραίτητη η εισαγωγή του λιπαντικού υπό πίεση, αλλά η ύπαρξη συνεχούς ροής λιπαντικού. Η πίεση του φιλμ του λιπαντικού δημιουργείται από την κινούμενη επιφάνεια του άξονα, που ωθεί το λιπαντικό, με αρκετά υψηλή ταχύτητα, μέσα στη περιοχή όπου το λιπαντικό δημιουργεί την δυνατότητα αποχωρισμού των επιφανειών παραλαμβάνοντας τα επιβαλλόμενα φορτία.

Υδροστατική λίπανση: Αυτό το είδος λίπανσης έχουμε, όταν διοχετεύουμε λιπαντικό μεταξύ επιφανειών οι οποίες κινούνται μεταξύ τους με μικρές ή μηδενικές ταχύτητες, υπό πίεση της τάξης του μεγέθους 0.7 έως 70 MPa, με την βοήθεια αντλίας. Όταν η λίπανση λοιπόν αυτή εφαρμοστεί σωστά εκπληρώνει την αποστολή της, που είναι η αποφυγή της επαφής μετάλλου με μέταλλο στη διεπαφή των στοιχείων. Υδροστατική λίπανση εφαρμόζουμε για τον διαχωρισμό επιφανειών υπό φόρτιση, κινουμένων με μικρές ή μηδενικές ταχύτητες, ακόμα και σε κυλινδρικά έδρανα ολίσθησης που λειτουργούν σε χαμηλές στροφές (κατά την έναρξη η λήξη της λειτουργίας) και ως εκ τούτου βρίσκονται εκτός της περιοχής της υδροδυναμικής λίπανσης.

Ελαστουδροδυναμική λίπανση: Είναι η λίπανση που δημιουργείται όταν εισάγεται λιπαντικό μεταξύ κυλιόμενων στερεών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η λίπανση συνεργαζομένων οδοντωτών τροχών (κυλιόμενοι κύλινδροι) και η λίπανση εδράνων κυλίσεως(κυλιόμενες σφαίρες σε κυλινδρική επιφάνεια). Η λίπανση αυτή αντιμετωπίζεται μαθηματικά με την θεωρία επαφής κατά Hertz και την ρευστομηχανική.

Οριακή λίπανση: Η αύξηση του φορτίου, η μείωση της ταχύτητας των κινούμενων επιφανειών, η αύξηση της θερμοκρασίας του λιπαντικού που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του ιξώδους, η μείωση της ροής του λιπαντικού, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του πάχους του λιπαντικού σε διαστάσεις συγκρίσιμες με την τραχύτητα των επιφανειών, σε διαστάσεις μοριακού πάχους. Η κατάσταση αυτή αποτελεί την οριακή λίπανση. Η μετάβαση από την υδροδυναμική στην οριακή λίπανση διαχωρίζεται από μια σύνθετη κατάσταση που ονομάζεται μικτή υδροδυναμική-οριακή λίπανση.

Στερεά λίπανση: Εκτός από τα υγρά ή αέρια λιπαντικά σε ειδικές συνθήκες λειτουργίας ενδέχεται να χρησιμοποιηθούν και στερεά λιπαντικά (πχ. Σκόνη γραφίτη, σκόνη διθειούχου μολυβδένιου κλπ.) Ως ειδικές συνθήκες ευνοούνται οι εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες, όπου τα υγρά λιπαντικά δεν διατηρούν τις ιδιότητές τους.

2.1.2 Μέρη εδράνου ολίσθησης

Ένα έδρανο ολισθήσεως αποτελείται από τα εξής μέρη:

1. Το σώμα του εδράνου που είναι το εξάρτημα που στο εσωτερικό του φέρει τον τριβέα και αρκετές φορές αποτελεί ταυτόχρονα και βάση στήριξης όλης της έδρασης. Αυτό διαμορφώνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορεί να δεχθεί τα υπόλοιπα μέρη αλλά και να μπορεί να εδράζει σε κάποιο μέρος μιας μηχανής. Το σώμα του τριβέα συνήθως είναι κατασκευασμένο από χυτοσίδηρο, αλουμίνιο ή ειδικό πλαστικό.

2. Το κάλλυμα. Αυτό υπάρχει αν το έδρανο είναι διαιρούμενο. Σε περίπτωση που έδρανο είναι ολόσωμο, τότε το κάλλυμα είναι αναπόσπαστο τμήμα του σώματος.

3. Τον τριβέα. Είναι το τμήμα του εδράνου που έρχεται σε επαφή με το στροφέα της ατράκτου για αυτό απαιτείται και η λίπανσή του. Η λίπανση συνήθως γίνεται με ορυκτέλαιο και στην περίπτωση των αυτολίπαντων τριβέων ολίσθησης με γραφίτη. Είναι κατασκευασμένος από διάφορα υλικά όπως χυτοσίδηρο, μπρούντζο, ορείχαλκο, ψευδάργυρο αλλά και συνθετικά υλικά.

4. Το Σύστημα λιπάνσεως. Με αυτό τροφοδοτούμε τις επιφάνειες ολισθήσεως τριβέα και στροφέα με κατάλληλο λιπαντικό, ώστε να μειώσουμε τον συντελεστή τριβής.

5. Το σύστημα στεγανότητας. Με αυτό εμποδίζουμε την έξοδο του λιπαντικού από το έδρανο.

6. Τους κοχλίες συσφίξεως του καλύμματος στο σώμα. Το πλέον ευαίσθητο μέρος είναι ο τριβέας. Στην κατασκευή του πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στα εξής:

- Στο υλικό του τριβέα
- Στην ποιότητα επιφάνειας του τριβέα.
- Στον τρόπο λίπανσης αυτού. Πολλές φορές κάνουμε στις επιφάνειες επαφής του με τον στροφέα κατάλληλες αυλακώσεις για την κυκλοφορία του λαδιού.
- Στις διαστάσεις του.

Ο τριβέας κατασκευάζεται άλλοτε μονοκόμματος και άλλοτε διαιρούμενος. Μερικές φορές γίνεται από δύο διαφορετικά υλικά. Ένα υλικό ακριβό, με μικρό πάχος και με συγκεκριμένες ιδιότητες, και ένα δεύτερο υλικό φθηνό, που χρησιμοποιείται σαν στήριγμα του πρώτου. Το υλικό με τις συγκεκριμένες ιδιότητες, που συχνά το λέμε μέταλλο, είναι αυτό που θα έρθει σε επαφή με τον στροφέα.

Το κάτω μέρος της βάσης του σώματος διαμορφώνεται έτσι ώστε να πατά μόνο σε ένα περιφερειακό τμήμα. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται καλύτερη έδραση, γιατί αυξάνει η πίεση στις επιφάνειες επαφής και αποφεύγεται ο κίνδυνος ανομοιόμορφης έδρασης από στρεβλές επιφάνειες.

2.1.3 Χαρακτηριστικά των εδράνων ολίσθησης

Η εσωτερική διάμετρος του δακτυλίου ενός εδράνου ολίσθησης είναι λίγαδέκατα ή και χιλιοστά του χιλιοστού(mm) ακόμη μεγαλύτερη από την εξωτερική διάμετρο του στροφέα. Ο στροφέας τοποθετείται έτσι εύκολα μέσα στο δακτύλιο, με τον οποίο έχει συναρμογή ελεύθερης ολισθήσεως. Στο διάκενο μεταξύ δακτυλίου στροφέα τοποθετείται λιπαντικό σε στερεή, υγρή ή και αέρια κατάσταση ώστε με τη δημιουργία λιπάνσεως να αποφεύγεται η φθορά ολισθήσεως. Τα τεχνικώς περισσότερα ενδιαφέροντα λιπαντικά είναι τα υγρά και από αυτά τα ορυκτέλαια.

Η επιδίωξη του μελετητή ενός εδράνου ολίσθησης είναι η σωστή εκλογή του ουλικού και των διαστάσεων του εδράνου και του κατάλληλου λιπαντικού, ώστε αφενός μεν η φθορά να είναι περιορισμένη και αφετέρου δε η θερμότητα που παράγεται με την τριβή να απάγεται στο περιβάλλον, έτσι ώστε να μην καταστραφεί το έδρανο από ενδεχόμενη υπερθέρμανση. Η φόρτιση των εδράνων από ροπές, οι οποίες μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα στη λειτουργία τους, πρέπει οπωσδήποτε να αποφεύγεται. Γι' αυτό τολόγο η στήριξη ενός στοιχείου γίνεται πάντοτε τουλάχιστον με δύο ή και περισσότερα έδρανα.

Όσον αφορά την τοποθέτηση των εδράνων ολίσθησης αυτό που ισχύει είναι ότι τόσο τα έδρανα ολίσθησης όσο και τα έδρανα κύλισης πρέπει να τοποθετηθούν με κατάλληλο τρόπο, ώστε να λειτουργούν χωρίς προβλήματα μετά την εφαρμογή τους στους μηχανισμούς. Σημαντικό πρόβλημα της σωστής τοποθέτησης είναι η διατήρηση ομοιόμορφου και κατάλληλου μεγέθους «διακένου λειτουργίας» μετά την συναρμολόγηση του εδράνου. Το διάκενο επιτρέπει την ελεύθερη σχετική κίνηση στροφέα εδράνου σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Στα σημεία τοποθέτησης των εδράνων κυριαρχούν συναρμογές σύσφιξης οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση των δακτυλίων του εδράνου μετά τη τοποθέτηση.

2.1.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των εδράνων ολίσθησης

Τα έδρανα ολισθήσεως έχουν συγκριτικά με τα έδρανα κυλίσεως τα εξής πλεονεκτήματα:

1. Η σύνθεσή τους είναι πολύ απλή και δεν περιορίζουν τον σχεδιασμό μιας κατασκευής. (Διαιρετά και αδιαιρετά έδρανα).

2. Κατασκευάζονται με πολύ μικρή χάρη και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη μεγάλης και μέγιστης ακρίβειας κινήσεως των στοιχείων μηχανημάτων. (Έδραση κύριων ατράκτων εργαλειομηχανών μέγιστης ακρίβειας).

3. Όταν λειτουργούν στην περιοχή της υγρής τριβής έχουν πολύ μικρό συντελεστή τριβής (μ) και μηδενική φθορά με αποτέλεσμα η διάρκεια ζωής τους είναι απεριόριστη.

4. Το υδροδυναμικό ή υδροστατικό στρώμα λιπαντικού, το οποίο σε περίπτωση υγρής τριβής δημιουργείται μεταξύ στροφέα και εδράνου μπορεί να αποσβένει ταλαντώσεις, να απομονώνει θορύβους και να παραλάβει κρουστικά φορτία χωρίς δυσάρεστα επακόλουθα.

5. Μπορούν να παραλάβουν πολύ υψηλά φορτία και να λειτουργήσουν σε πολύ υψηλούς αριθμούς στροφών.

6. Είναι λιγότερο ευαίσθητα στη σκόνη και στις άλλες μικρο ακαθαρσίες.

Τα εξής μειονεκτήματα :

1. Η σχετικά μεγάλη ποσότητα λιπαντικού, που χρειάζεται για τη σωστή λειτουργία τους.
2. Η ανάγκη υπάρξεως ενός ακόμα υποτυπώδους συστήματος λιπάνσεως.
3. Η ανάγκη τακτικής επιθεώρησης και συντήρησης.
4. Η ανάγκη χρησιμοποίησης ειδικών δακτυλίων που μόνο σε ορισμένες διαστάσεις κατασκευάζονται σε σειρά.
5. Ο υψηλός συντελεστής τριβής εκκινήσεως.

2.1.5 Φθορές στα έδρανα ολίσθησης

Τα έδρανα ολίσθησης αποτελούν εκείνο το μηχανολογικό εξάρτημα των βιομηχανικών εγκαταστάσεων που δέχεται ίσως τις πλέον μακρόχρονες και έντονες δυναμικές καταπονήσεις. Είναι φυσικό λοιπόν να υφίστανται μεγάλη μηχανική φθορά. Τα έδρανα ολίσθησης χρησιμοποιούνται σε μια ευρεία γκάμα μηχανισμών στις βιομηχανικές παραγωγικές διαδικασίες. Για το λόγο αυτό βρίσκονται σε επαφή με μια μεγάλη ποικιλία ρευστών τα οποία έχουν λιγότερο ή περισσότερο διαβρωτικές ιδιότητες, όπως το νερό, τα οξέα, οι βάσεις και διάφορα αέρια. Οικατασκευαστές έχουν εξοπλίσει τα σύγχρονα έδρανα ολίσθησης με μηχανισμούς στεγανοποίησής τους από τα διαχειριζόμενα στη παραγωγική διαδικασία ρευστά, ωστόσο ορισμένα από αυτά είναι ιδιαίτερα δραστικά και έτσι είναι αναγκαία η λήψη επιπλέον μέτρων.

Επειδή στις περιπτώσεις αυτές τα έδρανα ολίσθησης υφίστανται μια σύνθετη καταπόνηση μηχανική και χημική, τα μέτρα αυτά δεν συνίστανται στην επίστρωση με ειδικές ρητίνες της καταπονούμενης σε διάβρωση μεταλλικής επιφάνειας, αλλά μπορεί να αφορούν στη χρησιμοποίηση ειδικών υλικών κατά την κατασκευή των εδράνων ολίσθησης, στην κατάλληλη μηχανική προετοιμασία των καταπονούμενων επιφανειών καθώς επίσης και στη χρησιμοποίηση εξελιγμένων λιπαντικών στα οποία περιλαμβάνονται και στερεά. Οισυνθετικές περιπτώσεις βιομηχανικής παραγωγής, όπου απαιτείται η προστασία των εδράνων ολίσθησης από διάβρωση συναντώνται στη χημική βιομηχανία και τη βιομηχανία τροφίμων, στη χαλυβουργία καθώς και στην βιομηχανία κατασκευής ημιαγωγών.

Εξαιτίας των παραπάνω είναι σημαντική η προσέγγιση της διάρκειας ζωής τους και η ένταξη των διαδικασιών συντήρησης τους σε ιδιαίτερα μελετημένα προγράμματα διαγνωστικής συντήρησης. Στα έδρανα ολίσθησης η διάρκεια ζωής υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας περιορίζεται είτε από την κόπωση του υλικού είτε από ένα ανώτατο επιτρεπόμενο όριο φθοράς των επιφανειών ολίσθησης με τον άξονα. Η εκλογή του κατάλληλου είδους και μεγέθους του εδράνου καθορίζεται από το είδος και το μέγεθος της φορτίσεως που παραλαμβάνει, από την ταχύτητα περιστροφής του άξονα και τέλος από ειδικές συνθήκες λειτουργίας όπως το είδος λιπάνσεως, τη θερμοκρασία λειτουργίας, τις αυξομειώσεις του ονομαστικού φορτίου κ.τ.λ.

Ο υπολογισμός της αντοχής των εδράνων ολίσθησης χωρίζεται σε δύο είδη, στο δυναμικό και το στατικό υπολογισμό αντοχής. Ο υπολογισμός δυναμικής αντοχής εκτελείται στα έδρανα εκείνα, που η ταχύτητα περιστροφής τους είναι μεγαλύτερη από 20 περίπου στροφές ανά λεπτό. Ο υπολογισμός στατικής αντοχής

εφαρμόζεται στα έδρανα που είτε δεν περιστρέφονται είτε ο αριθμός στροφών τους είναι μικρότερος από 20 στροφές το λεπτό.

2.2 ΕΔΡΑΝΑ ΚΥΛΙΣΗΣ

Τα έδρανα είναι στοιχεία της μηχανής που επιτρέπουν στα εξαρτήματα να κινούνται το ένα σε σχέση με το άλλο. Χωρίς έδρανο κύλισης - ρουλεμάν (Σχήμα 2.2) τα πάντα θα ακινητοποιηθούν συμπεριλαμβανομένων και των ανθρώπων, των οποίων οι αρθρώσεις αποτελούνται από έδρανα ολίσθησης με επαφή. Υπάρχουν δύο τύποι εδράνων, επαφής και μη επαφής.

Τα ρουλεμάν τύπου επαφής έχουν μηχανική επαφή μεταξύ των στοιχείων και περιλαμβάνουν έδρανα ολίσθησης, κύλισης και έδρανα κάμψης. Η μηχανική επαφή σημαίνει ότι η δυσκαμψία κάθετα προς την κατεύθυνση μπορεί να είναι πολύ υψηλή, αλλά η φθορά η ακόμα και η κόπωση μπορεί να περιορίσει τη ζωή τους.

Τα ρουλεμάν μη επαφής αφορούν εξωτερικής πίεσης, υδροδυναμικού ρευστού (υγρό, αέριο ή ενδιάμεσης φάσης) και μαγνητικά ρουλεμάν. Η έλλειψη μηχανικής επαφής σημαίνει ότι η στατική τριβή μπορεί να εξαλειφθεί, ωστόσο υπάρχει αντίσταση λόγω ιξώδους τριβής όταν υπάρχουν ρευστά. Ωστόσο η διάρκεια ζωής μπορεί να είναι πρακτικά άπειρη εάν οι εξωτερικές μονάδες ισχύος που απαιτούνται για την λειτουργία τους παραλείπονται. Κάθε τύπος των ρουλεμάν έχει τα δικά του τμήματα εξειδίκευσης σε κάθε περιοχή και έτσι οι μηχανικοί σχεδιασμού θα πρέπει να είναι εξοικειωμένοι με τους διαφορετικούς τύπους ρουλεμάν καθώς επίσης με τις εφαρμογές και τους περιορισμούς τους.

Όπως και με όλους τους τύπους μηχανικών εξαρτημάτων, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τις βασικές αρχές λειτουργίας των διαφορετικών τύπων ρουλεμάν, έτσι ώστε να μπορέσουμε να επιλέγουμε το σωστό για την εκάστοτε εφαρμογή.

Πράγματι, οι βασικές αρχές σχεδιασμού είναι πολύ μεγάλης σημασίας όσον αφορά στην κατάλληλη χρήση των ρουλεμάν στις μηχανές. Η αρχή της αμοιβαιότητας είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στο σχεδιασμό συστημάτων ρουλεμάν. Κάθε φορά που σχεδιάζουμε ένα ρουλεμάν θα πρέπει να επαναπροσδιορίσουμε το σχεδιασμό του, φτιάχνοντας κάτι τελείως διαφορετικό, συγκρίνοντας το στη συνέχεια με την αρχική ιδέα.

Για ποιον λόγο κάποιοι πολιτισμοί ανακάλυψαν τα ρουλεμάν ενώ άλλοι όχι; Αυτοί που τα χρησιμοποίησαν κατάφεραν να κινούνται γρηγορότερα, και δεν έχουν σταματήσει μέχρι σήμερα. Αυτοί που χρησιμοποιούν καλύτερα ρουλεμάν, κινούνται ακόμα πιο γρήγορα, με μηχανές μεγαλύτερης ακρίβειας, οι οποίες αυξάνουν την παραγωγικότητα, δίνοντας τους πλεονεκτήματα στην αγορά. Το μέλλον ανήκει σε αυτούς που μπορούν και κινούνται γρήγορα αλλά και με ακρίβεια!



Σχήμα 2.2: Έδρανο κύλισης

Τα έδρανα κύλισης γενικά αποτελούνται από δύο δακτυλίους ή δίσκους στο εσωτερικό και στο εξωτερικό, διαμορφωμένοι έτσι ώστε ανάμεσα τους να οδηγούνται στοιχεία κύλισης. Ο εσωτερικός δακτύλιος στερεώνεται πάνω στην άτρακτο, ενώ ο εξωτερικός (δακτύλιος της έδρας) στηρίζεται πάνω στη λεία επιφάνεια της βάσης του εδράνου. Τα στοιχεία κυλίσεως μπορούν να έχουν μορφή σφαίρας, κυλίνδρου, βαρελοειδούς κυλίνδρου, κόλουρου κώνου, βαρελοειδούς κόλουρου κώνου ή βελόνας.

Έτσι διακρίνουμε, ανάλογα με τη μορφή των στοιχείων κυλίσεως:

- Σφαιρικά ή ένσφαιρα έδρανα κύλισης
- Κυλινδρικά έδρανα κύλισης
- Κωνικά έδρανα κύλισης
- Βαρελοειδή έδρανα κύλισης
- Βελονοειδή έδρανα κύλισης

Σε όλα τα είδη, τα στοιχεία κύλισης συγκρατούνται μέσω ενός κλωβού σε ορισμένη απόσταση μεταξύ τους, που σε περίπτωση σφαιρικών σωμάτων κυλίσεως διακρίνονται σε δακτυλιοειδή, δισκοειδή και σε λοξά. Ανάλογα με τη διεύθυνση της δύναμης και τις ροπές φορτίσεως των στηριζόμενων στοιχείων, τα ρουλεμάν χωρίζονται σε:

- Εγκάρσια ή ακτινικά
- Αξονικά ή ωστικά έδρανα
- Έδρανα συνδυασμένης φόρτισης.

Τα εγκάρσια έδρανα είναι κατάλληλα να παραλαμβάνουν κυρίως εγκάρσια φορτία και έχουν πάντοτε δακτυλιοειδή μορφή, ενώ τα αξονικά παραλαμβάνουν μόνο αξονικά φορτία και έχουν δισκοειδή μορφή. Τα έδρανα συνδυασμένης φόρτισης μπορούν να παραλαμβάνουν και αξονικά και εγκάρσια φορτία και έχουν δακτυλιοειδή ή δισκοειδή μορφή. Τα ρουλεμάν επίσης διακρίνονται ανάλογα με το αν έχουν μία ή δύο σειρές σωμάτων κυλίσεως σε απλά, διπλά τριπλά ή τετραπλά (κωνικά ρουλεμάν). Τέλος ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους ονομάζονται σταθερά , κινητά ή αυτορυθμιζόμενα.

Στα αυτορυθμισμένα έδρανα, τα στοιχεία τους παρακολουθούν αυτόματα την παραμόρφωση του στροφέα, η οποία προκαλείται από τη φόρτιση της ατράκτου, ενώ τα σταθερά έδρανα χρησιμοποιούνται για ατράκτους οι οποίες και μετά τη φόρτισή τους παραμένουν απαραμόρφωτες ή παραμορφώνονται ασήμαντα.

Τα σταθερά ρουλεμάν τοποθετούνται ώστε να εξασφαλιστεί η σύμπτωση των γεωμετρικών αξόνων ατράκτου – στροφέα και μπορεί να είναι μονόσφαιρα, δίσφαιρα και κυλινδρικά. Τα αυτορυθμισμένα έδρανα κατασκευάζονται ως μονόσφαιρα, δίσφαιρα και βαρελοειδή και χρησιμοποιούνται όταν δεν είναι δεδομένη η μόνιμη σύμπτωση αξόνων ρουλεμάν και ατράκτου.

Για τα ρουλεμάν ,αυτό που παίζει ρόλο είναι η τριβή κύλισης. Προς το σκοπό αυτό υπολογίζεται ακόμα και η τριβή εκκίνησης κατά την αρχή της κίνησης και η τριβή τερματισμό στο τέλος της κίνησης. Στην τριβή της κίνησης των εδράνων κύλισης έχουμε δύο περιπτώσεις. Την τριβή κύλισης και την τριβή κυλινδρίσματος. Η τριβή κύλισης εμφανίζεται όταν δύο ελαστικά σώματα (π.χ. από χάλυβα) κυλίνονται το ένα πάνω στο άλλο. Μέσω της ελαστικής παραμόρφωσης δημιουργείται από το θεωρητικό σημείο επαφής ή τη γραμμή επαφής μια επιφανειακή επαφή, η οποία μάλιστα στην ελεύθερη κύλιση δύο στοιχείων μεταξύ τροχιών οδήγησης δίνει ένα ποσοστό ολίσθησης. Η τριβή κυλινδρίσματος εμφανίζεται όταν δύο σώματα κυλίνονται το ένα επί του άλλου, όπου υπάρχουν και ποσοστά κύλισης και ποσοστά ολίσθησης με βάση τους βασικούς νόμους της μηχανικής.

Από τους διάφορους τύπους των εδράνων κύλισης αξίζει να δοθεί έμφαση στα βελονοειδή. Τα βελονοειδή έδρανα κύλισης είναι αξιόλογα λόγω του μικρού απαιτούμενου χώρου τοποθέτησης έναντι των σφαιρικών και κυλινδρικών εδράνων κύλισης και της σχετικά μεγάλης φόρτισής τους. Τα Κωνικά ρουλεμάν είναι μοναδικά σχεδιασμένα στο να διαχειρίζονται ταυτόχρονα αξονικά και ακτινικά φορτία. Αποτελούνται από τέσσερα διαφορετικά εξαρτήματα: την θήκη, τον κώνο, τα στοιχεία κύλισης και τον κλωβό. Η ιδιαιτερότητα της κατασκευής των κωνικών ρουλεμάν είναι η γωνία εφαρμογής των στοιχείων κύλισης στους κλωβούς σύμφωνα με την οποία διαφοροποιούνται το μέγεθος των αξονικών και ακτινικών φορτίων που αυτά μπορούν να δεχτούν. Τα βαρελοειδή ρουλεμάν έχουν δυο σειρές βαρελάκια με μια κοινή τροχιά κύλισης στο εξωτερικό δαχτυλίδι και δυο ξεχωριστές τροχιές κύλισης στο εσωτερικό. Τα βαρελοειδή ρουλεμάν είναι ιδανικά για εφαρμογές με μεγάλα ακτινικά φορτία σε συνδυασμό με μεγάλα αξονικά φορτία και προς τις δύο κατευθύνσεις. Αυτός ο σχεδιασμός τα κάνει αναντικατάστατα σε πολύ απαιτητικές εφαρμογές. Τα κυλινδρικά ρουλεμάν είναι ρουλεμάν που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές με πολύ μεγάλα ακτινικά φορτία. Τα επιπλέον χαρακτηριστικά τους διαφοροποιούνται ανάλογα με τον τύπο κατασκευής τους.

Τα απλά σφαιρικά ρουλεμάν(ή μονόσφαιρα) έχουν πολλαπλές εφαρμογές. Είναι απλά στο σχεδιασμό, διασπώνται και είναι κατάλληλα για υψηλές ή ακόμα και πολύ υψηλές ταχύτητες, είναι ανθεκτικά στη λειτουργία τους και απαιτούν μικρή συντήρηση. Μια ιδιαίτερη κατασκευαστική μορφή απλών ένσφαιρων ρουλεμάν αποτελούν τα έδρανα τεσσάρων σημείων. Αυτά μπορούν να δεχτούν τις δυνάμεις σε τέσσερα σημεία και έτσι επιτυγχάνουν μια υψηλή σταθερότητα. Στα έδρανα αυτά ο εσωτερικός δακτύλιος είναι χωρισμένος. Έτσι μπορούν να τοποθετηθούν πολλά σφαιρίδια ,τα οποία σε συνδυασμό με τα ψηλά ερείσματα των δακτυλίων προσδίδουν στα ρουλεμάν αυτά μεγάλη ικανότητα έδρασης. Τα μονόσφαιρα ρουλεμάν είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα ρουλεμάν και διατίθενται σε διάφορους τύπους και μεγέθη.

2.2.1 Βασικές μορφές εδράνων κύλισης

Στις βασικές μορφές των εδράνων κυλίσεως(σφαιρικά, κυλινδρικά, κωνικά , βαρελοειδή και βελονοειδή) υπάγονται και παραλλαγές αυτών με διαφορετικές

ιδιότητες από τις οποίες προκύπτει και διαφορετική χρησιμοποίηση. Παρακάτω υπάρχει για το καθένα περιγραφή και ιδιότητές του κλπ.

Τριβείς μονόσφαιροι με βαθύ αυλάκι, έχουν την απλούστερη κατασκευή και χρησιμοποιούνται περισσότερο από κάθε άλλον. Αντέχουν σε μεγάλα ακτινικά και αξονικά φορτία και πολλές φορές αντικαθιστούν καλύτερα τους καθαυτό αξονικούς τριβείς(αξονικά έδρανα). Αντέχουν σε μεγάλες ταχύτητες καμιά φορά δε και σε εξαιρετικά μεγάλο αριθμό στροφών. Οι μονόσφαιροι τριβείς διατίθενται και με κωνική οπή, με μια η δύο προφυλακτικές πλάκες. Οι τριβείς αυτοί δεν είναι λυόμενοι, ο δε εσωτερικός τους δακτύλιος δεν αυτορυθμίζεται σχετικά με τον εξωτερικό, απαιτούν επομένως απόλυτα ευθυγραμμισμένη έδραση

Τριβείς μονόσφαιροι, λυόμενοι, γωνιώδους επαφής, ο εξωτερικός τους δακτύλιος φέρει εσωτερική προεξοχή, μονόπλευρη, για τροχιά γωνιώδους επαφής που επιτρέπει την εξάρμοσή του, ενώ ο εσωτερικός δακτύλιος έχει την ίδια μορφή με τους μονόσφαιρους τριβείς με βαθύ αυλάκι. Μπορούν να δεχθούν ακτινικά και αξονικά φορτία μόνο προς μία κατεύθυνση. Τοποθετούνται πάντοτε κατά ζεύγη με αντίθετη φορά και ρυθμίζονται με περιορισμένο διάκενο, απαραίτητο για την ομαλή λειτουργία τους.

Τριβείς σταθεροί μονόσφαιροι γωνιακής επαφής, οι επιφάνειες των δακτυλιδιών, επάνω στα οποία κυλούν οι σφαίρες, έχουν τέτοια κατατομή, ώστε να εφάπτονται σε διάμετρο που δεν είναι κάθετη προς τον στροφέα, δηλαδή η φορά των φορτίων μεταξύ των σφαιρών και των τροχιών των δακτυλίων καθορίζεται με μία ευθεία γραμμή που περνά από τα σημεία επαφής υπό μια γωνία ως προς τον οριζόντιο άξονα περιστροφής. Οπότε όταν δέχονται οι σφαίρες αξονικά φορτία έχουν επαφή στα πλάγια και λειτουργούν κανονικά. Γι' αυτό το λόγο τα ρουλεμάν αυτά αναλαμβάνουν μεγάλα αξονικά φορτία προς μια κατεύθυνση, αλλά για να λειτουργούν καλά πρέπει να υπάρχει πάντα αξονική πίεση. Κατά κανόνα τοποθετούνται κατά ζεύγη με αντίθετη πάντοτε φορά και ανάλογη ρύθμιση προς μια κατεύθυνση, αλλά για να λειτουργούν καλά πρέπει να υπάρχει πάντα αξονική πίεση. Κατά κανόνα τοποθετούνται κατά ζεύγη με αντίθετη πάντοτε φορά και ανάλογη ρύθμιση.

Τριβείς σταθεροί, δίσφαιροι, γωνιώδους επαφής, είναι ο τύπος που συνδυάζει δύο μονόσφαιρους τριβείς γωνιώδους επαφής με αντίθετες κατευθύνσεις σε ένα τριβέα. Εκτός από τα ακτινικά φορτία, μπορούν να δεχθούν μεγάλα αξονικά φορτία και από τις δύο πλευρές τους. Ειδικά, είναι κατάλληλοι σαν τριβείς για απόλυτη και ακριβή συγκράτηση του άξονα και από τις δύο κατευθύνσεις. Κατασκευάζονται και τοποθετούνται με μηδαμινό ή ανύπαρκτο ακτινικό διάκενο.

Τριβείς δίσφαιροι αυτορρυθμιστοί, οι οποίοι φέρουν σημαντικά αξονικά φορτία και επιτρέπουν μικρή κλίση της στρεφόμενης ατράκτου σε σχέση με τον εξωτερικό δακτύλιο. Ο εσωτερικός δακτύλιος αυτών των ρουλεμάν έχει δύο αυλάκια για τις τροχιές των δύο σειρών σφαιρών και μόνο μια τροχιά, σφαιρικής μορφής κοινή για δύο σειρές σφαιρών, στον εξωτερικό δακτύλιο. Η μορφή αυτή επιτρέπει στον ένα από τους δύο δακτυλίους να ταλαντεύεται σε σχέση με τον άλλο και κατά συνέπεια να είναι ανεπηρέαστοι από τις κάμψεις των αξόνων ή λανθασμένες ευθυγραμμίσεις αξόνων και εδρών. Οι συνθήκες επαφής των σφαιρών επάνω στη σφαιρική επιφάνεια της τροχιάς περιστροφής του εξωτερικού δακτυλίου, είναι σαφώς δυσμενέστερες σε σύγκριση με τους μονόσφαιρους τριβείς με βαθύ αυλάκι. Το μειονέκτημα αυτό αντιμετωπίζεται κατά μεγάλο ποσοστό με μεγαλύτερο αριθμό σφαιρών που φέρουν αυτοί οι τριβείς. Δίσφαιρο αυτορρυθμιζόμενο ρουλεμάν έχει φορτία αντοχής ελαφρώς μικρότερα σε σύγκριση με τριβέα μονόσφαιρο με βαθύ

αυλάκι και ίδιες ακριβώς διαστάσεις. Στο εξής όταν γίνεται λόγος για έδρανα κύλισης θα εννοούνται τα απλά ένσφαιρα έδρανα κύλισης.

Τυποποίηση Εδράνων Κύλισης Το ευρύ πεδίο εφαρμογών των ρουλεμάν, δημιούργησε την ανάγκη διεθνούς τυποποίησης τους, έτσι ώστε οι κοινές διαστάσεις να μπορούν, να υιοθετηθούν σε παγκόσμια κλίμακα. Αυτό συνέβαλε πολύ στη μείωση του κόστους κατασκευής και στην βελτίωση της ποιότητας των ρουλεμάν. Επίσης έτσι μπορεί να αντιμετωπιστεί το βασικό πρόβλημα της εναλλακτικότητας τους. Η τυποποίηση των ρουλεμάν είναι υπό αρμοδιότητα της Τεχνικής Επιτροπής "TC 4" του Διεθνούς Οργανισμού Τυποποίησης (ISO). Οι διαστάσεις τους είναι τυποποιημένες κατά πρότυπα ISO 15,104. Τα αντιστοιχία γερμανικά είναι: DIN 616 (Deutsches Institut für Normung). Οι δε διαστάσεις είναι ταξινομημένες κατά τέτοιο τρόπο ώστε σε κάθε εσωτερική διάμετρο να αντιστοιχούν πολλές εξωτερικές και πολλά πλάτη. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η κάλυψη μιας μεγάλης περιοχής φόρτισης για έδρανα με την ίδια εσωτερική διάμετρο και μορφή.

Τριβείς κυλινδρικοί Οι κύλινδροι και οι τροχιές περιστροφής τους έχουν μορφή κυλινδρική. Για ορισμένες εφαρμογές και κατά την λείανση, δίνεται μια πολύ ελαφρά κυρτότητα στις επιφάνειες κυλίσεως που επιτρέπει ελαφρότατες ταλαντεύσεις του ενός δακτυλίου ως προς τον άλλο. Κάθε κυλινδρικός τριβέας κατασκευάζεται με προεξοχή προς το εσωτερικό μέρος του εξωτερικού δακτυλίου η το εξωτερικό του εσωτερικού δακτυλίου, όπου και η τροχιά περιστροφής και οδηγήσεως των κυλίνδρων. Ο αριθμός των προεξοχών είναι δύο, τρεις ή τέσσερις. Δύο μαζί προεξοχές προβλέπονται ή στον εσωτερικό (τύπου N) ή στον εξωτερικό (τύπος NU) δακτύλιο. Αξονική μετακίνηση του ενός από τους δακτυλίους είναι δυνατή και στους δύο τύπους και εκ κατασκευής θεωρούνται σαν τριβείς «αξονικής μετακινήσεως» (ελεύθεροι). Παρουσιάζουν δε και οι δύο το πλεονέκτημα της σταθερής συναρμώσεως και των δύο δακτυλίων. Σε ορισμένες προκαθορισμένες εφαρμογές, οι τριβείς τύπου N μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς τον εξωτερικό δακτύλιο ή και αντίστροφα ο τύπος NU χωρίς τον εσωτερικό δακτύλιο, οπότε οι επιφάνειες κυλίσεως των κυλίνδρων, έδρες ή άξονες, πρέπει να είναι βαμμένες και λειασμένες. Τέτοιες εφαρμογές εξοικονομούν χώρο και οι τριβείς χαρακτηρίζονται με τα γράμματα RN και RNU. Ο τύπος NU κατασκευάζεται και με εσωτερικό δακτύλιο με μονόπλευρη προεξοχή οπότε έχουμε τον τύπο NJ που δέχεται και αξονικά φορτία από μία κατεύθυνση. Οι τριβείς αυτοί χρησιμοποιούνται κατά ζεύγη αντίθετα σε κοντούς άξονες.

Ο εσωτερικός δακτύλιος μπορεί να φέρει και δεύτερη προεξοχή υπό μορφή ιδιαίτερου δακτυλίου σταθεροποίησεως, οπότε δημιουργείται ο τύπος NUP. Τέλος ο τύπος NJ, εφοδιασμένος με δακτύλιο με λαιμό αντιστηρίξεως ΗJ δίνει τον τύπο τριβέα NH. Οι τριβείς τύπου NUP και NH έχουν τέσσερις προεξοχές και δέχονται φορτία τόσο ακτινικά όσο και αξονικά, χαρακτηρίζονται δε σαν τριβείς «αξονικής ακινησίας» (σταθεροί). Όλοι οι κυλινδρικοί τριβείς είναι λυόμενοι ως προς τον ένα από τους δύο δακτυλίους τους. Η κατασκευή αυτή διευκολύνει την τοποθέτηση και εξαγωγή τους χωρίς ειδική ρύθμιση εκ των υστέρων, υπό τον όρο απόλυτης ευθυγραμμίσεως εδρών και αξόνων. Αν ο τύπος του τριβέα συνοδεύεται από το γράμμα «α», οι λυόμενοι δακτύλιοι είναι εναλλακτικοί μεταξύ των διαφόρων τριβέων με τις ίδιες διαστάσεις. Αν αντίθετα φέρουν τα γράμματα «NA» δεν είναι δυνατή εναλλακτικότητα.

Τριβείς Κωνικοί: Οι επιφάνειες των δακτυλίων και των στοιχείων που κυλίνουν έχουν κωνική μορφή. Οι κωνικοί κύλινδροι οδηγούνται από το μέρος της μεγαλύτερης διαμέτρου και από προεξοχή στον εσωτερικό δακτύλιο, πλούσια υπολογισμένη. Οι κωνικοί τριβείς μεταφέρουν συνδυασμένα ακτινικά και αξονικά φορτία και επιτρέπουν ρύθμιση ακριβείας του διακένου, τόσο αξονικά όσο και

ακτινικά. Ο εξωτερικός δακτύλιος είναι λυόμενος, και διευκολύνει την τοποθέτηση και την εξαγωγή.

Βελονοειδή φέρουν τεράστια ακτινικά φορτία αλλά όχι αξονικά. Έχουν πλεονεκτήματα χρήσης σε μικρού μεγέθους κατασκευές ή όπου περιορίζεται η εξωτερική διάσταση του εδράνου.

Τριβείς αξονικοί: Αποτελούνται από δύο επίπεδους δακτυλίους και σφαιροκλωβό. Οι σφαίρες κυλίνονται επάνω στις τροχιές που υπάρχουν σε κάθε δακτύλιο. Οι τροχιές κυλίσεως έχουν διάταξη που φέρνει την κατεύθυνση του φορτίου ανάμεσα στις σφαίρες και τις τροχιές περιστροφής, απόλυτα παράλληλη με τον άξονα. Διακρίνονται σε τριβείς απλής ενέργειας, όπου ο ένας δακτύλιος, ο μεσαίος στερεώνεται στον άξονα και οι δύο στην έδρα. Οι αξονικοί τριβείς μεταφέρουν μόνο μεγάλα αξονικά φορτία και κανένα ακτινικό. Επειδή η φυγόκεντρη δύναμη επάνω στις σφαίρες είναι πολύ μεγάλη, δεν είναι κατάλληλοι για μεγάλες ταχύτητες. Οι συνηθισμένοι τύποι έχουν επίπεδους δακτυλίους και κατά συνέπεια τα μέρη που εδράζονται πρέπει να είναι αυστηρά παράλληλα προς τον άξονα. Για ειδικές περιπτώσεις υπάρχουν αξονικοί τριβείς με τον ένα ή τους δύο δακτυλίους σφαιρικούς με σφαιρικό υποδακτύλιο, που έχουν το πλεονέκτημα να αυτορυθμίζονται.

Τριβείς αξονικοί με βαρελίσκους: Οι αξονικοί τριβείς με βαρελίσκους μεταφέρουν πολύ μεγάλα αξονικά φορτία. Συγχρόνως όμως επειδή η θέση των βαρελίσκων είναι επικλινής δέχονται και σημαντικά ακτινικά φορτία. Η τροχιά κυλίσεως του κάτω δακτυλίου είναι σφαιρική και τα στοιχεία κυλίσεως βαρελίσκοι. Λόγω κατασκευής οι δακτύλιοι αυτορυθμίζονται ο ένας προς τον άλλο και κατά συνέπεια δεν επηρεάζονται από λάθη ευθυγραμμίσεως.

2.2.2 Υπολογισμός εδράνων κύλισης.

Γενικά για να δούμε τι χρειάζεται για να υπολογίσουμε ένα έδρανο κύλισης πρέπει να γνωρίζουμε τους παρακάτω όρους οι οποίοι βέβαια εμφανίζονται και στους οδηγούς επιλογής ρουλεμάν των κατασκευαστικών εταιριών.

Αυτά είναι:

Διάρκεια ζωής L_h : είναι ο αριθμός των στροφών του εδράνου κύλισης, μέχρι να πάψει να λειτουργεί ομαλά (κόπωση δακτυλίων η στοιχείων κύλισης).

Δυναμικό φορτίο C : είναι το σταθερό φορτίο κάτω από την επίδραση του οποίου το ρουλεμάν μπορεί να επιτύχει διάρκεια ζωής 1.000.000 στροφών.

Ισοδύναμο δυναμικό φορτίο P : είναι το πιθανό (υποθετικό) φορτίο που, εάν επιδρούσε στο ρουλεμάν, θα είχε διάρκεια ζωής ίση με αυτή που επιτυγχάνεται με το πραγματικό του φορτίο.

Στατικό φορτίο C_0 : είναι το σταθερό φορτίο που προκαλεί στο ακίνητο έδρανο παραμόρφωση, ίση με το 0.01% της διαμέτρου του στοιχείου κύλισης του εν λόγω εδράνου.

Ισοδύναμο φορτίο P_0 : είναι το πιθανό (υποθετικό) φορτίο που προκαλεί όταν στοιχεία κύλισης και στους δακτυλίους του εδράνου την ίδια παραμόρφωση με αυτή που προκαλείται από το πραγματικό φορτίο.

2.2.3 Υλικά Κατασκευής Εδράνων Κύλισης

Ως υλικό χρησιμοποιείται σκληρυμένος χρωμιούχος ή χρωμονικελιούχος χάλυβας. Απαιτείται όμως πλήρης ομοιογένεια και καθαρότητα του υλικού. Οι σφαίρες αποκόπτονται από χαλύβδινη στρογγυλή ράβδο, διαμορφώνονται εν θερμό(οι μεγάλες) ή εν ψυχρώ και κατόπιν προλειαίνονται, σκληρύνονται, λειαίνονται και γυαλίζονται. Απαραίτητος είναι ένας λεπτομερής έλεγχος για την ακρίβεια των διαστάσεων και την εμφάνιση έστω και ελάχιστων ρωγμών. Οι σκληρυμένοι και λειασμένοι δακτύλιοι κατασκευάζονται και όπως οι σφαίρες από ειδικό χάλυβα αρίστης ποιότητας και υψηλής αντοχής. Οι κλωβοί για μικρούς τριβείς, κατασκευάζονται από χαλύβδινο ή ορειχάλκινο έλασμα. Για μεγαλύτερους τριβείς κατασκευάζονται από χάλυβα ορείχαλκο, ή αλουμίνιο με κατεργασίες αφαίρεσης υλικού. Για αθόρυβη λειτουργία χρησιμοποιείται ακόμη και συνθετικό υλικό.

2.2.4 Λίπανση εδράνων κύλισης

Ο κυριότερος σκοπός λίπανσης στα έδρανα κυλίσεως είναι να μειώσει τη φθορά λόγω τριβής κάθε στοιχείου του. Τα λιπαντικά δημιουργούν ένα λεπτό στρώμα το οποίο διαχωρίζει τις επιφάνειες κυλίσεως και ολισθήσεως, έτσι ώστε να έχουμε όσο το δυνατόν λιγότερη επαφή μεταξύ των μεταλλικών μερών του ρουλεμάν. Εκτός αυτού, το λιπαντικό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απαγωγή θερμότητας από το εργαζόμενο ρουλεμάν. Για παράδειγμα, σε μία εφαρμογή όπου έχουμε λειτουργία σε υψηλές στροφές, θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε ένα σύστημα κυκλοφορίας λαδιού με το οποίο θα απάγουμε την θερμότητα. Μια άλλη λειτουργία του λιπαντικού, είναι ότι εμποδίζει σκόνη και λοιπά ξένα σώματα από το να εισέλθουν στο ρουλεμάν. Επίσης προστατεύει τα μέρη του ρουλεμάν από διάβρωση-σκουριά, απορροφά κρουστικά φορτία και βοηθά στην ομοιόμορφη κατανομή των φορτίσεων στην επιφάνεια κυλίσεως. Κατά την λίπανση απαιτείται προσοχή στα εξής σημεία: Τα λιπαντικά αλλοιώνονται σε αυξημένες θερμοκρασίες, οπότε πρέπει οι διατάξεις να σχεδιάζονται ώστε η θερμοκρασία λειτουργίας να είναι όσο το δυνατόν πιο χαμηλή. Επειδή το λεπτό στρώμα του λιπαντικού που σχηματίζεται, είναι ευαίσθητο στην θερμότητα, πρέπει να επιλέγεται τέτοιο ιξώδες, ώστε να διατηρεί τις λιπαντικές του ιδιότητες. Η λίπανση των ρουλεμάν γίνεται είτε με γράσο είτε με λάδι.

Η λίπανση δεν παίζει τόσο σπουδαίο ρόλο στα έδρανα κυλίσεως όσο στα έδρανα ολισθήσεως στα οποία η εκλογή του κατάλληλου λιπαντικού είναι μεγάλης σπουδαιότητας. Στις συνήθεις εφαρμογές των εδράνων κυλίσεως μπορεί η λίπανση να γίνει είτε με λίπος είτε με ορυκτέλαιο, χωρίς να έχει το ένα είδος λιπάνσεως πλεονεκτήματα η μειονεκτήματα έναντι του άλλου. Και τα δύο είδη λιπαντικού εξασφαλίζουν με την ίδια αποτελεσματικότητα την απαιτούμενη λίπανση μεταξύ των σωμάτων κυλίσεως και των αυλάκων κυλίσεως ή του κλωβού.

Όμως υπάρχουν περιπτώσεις, στις οποίες προτιμάται το ένα η το άλλο είδος λιπάνσεως για συγκεκριμένους λόγους. Η λίπανση με ορυκτέλαιο προτιμάται στις εξής περιπτώσεις.

A) Όταν η ποσότητα θερμότητας, που παράγεται, από την τριβή του εδράνου ή που διοχετεύεται στο έδρανο από άλλα στοιχεία, είναι τόσο μεγάλη, ώστε να υπάρχει κίνδυνος υπερθερμάνσεως. Στην περίπτωση αυτή μπορεί το ορυκτέλαιο να τεθεί με ειδική αντλία σε αναγκαστική κυκλοφορία, για να απομακρυνθεί έτσι η

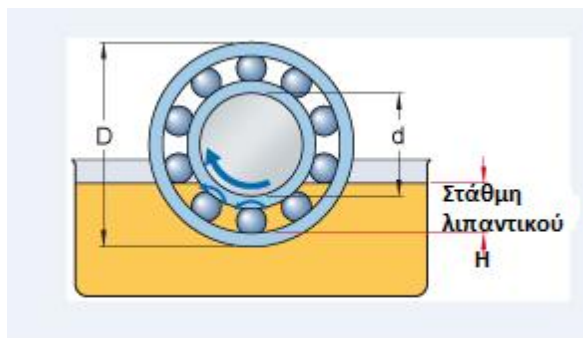
ποσότητα εκείνη της θερμότητας, που μπορεί να προκαλέσει επικίνδυνη ανύψωση της θερμοκρασίας του εδράνου. Σε ακραίες περιπτώσεις στο σύστημα αναγκαστικής κυκλοφορίας παρεμβάλλεται και ειδική συσκευή ψύξεως.

Β) Όταν η λίπανση ενός μηχανήματος, στο οποίο περιλαμβάνονται τα έδρανα, γίνεται με ορυκτέλαιο, όπως π.χ. στους μειωτήρες οδοντωτών τροχών, τότε είναι ευνόητο ότι και η λίπανση των εδράνων πρέπει να γίνει με το ίδιο ορυκτέλαιο, διότι δεν θα συνέφερε οικονομικά η στεγανοποίηση και λίπανση τους με λίπος.

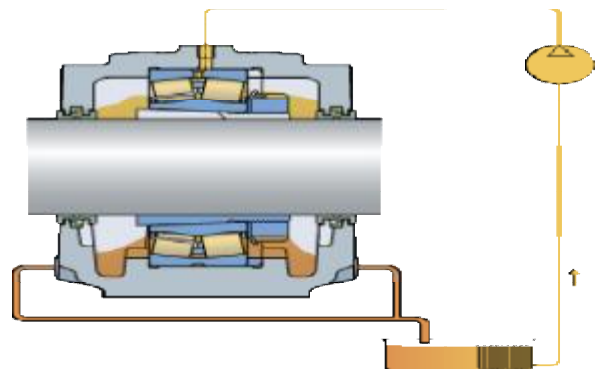
Γ) Όταν η θέση, στην οποία έχει τοποθετηθεί ένα έδρανο, δεν είναι εύκολα προσιτή και παρόλα αυτά πρέπει σε ορισμένα διαστήματα να γίνεται μια συντήρηση και αλλαγή του λιπαντικού εδράνου αυτού, τότε το λάδι είναι προτιμότερο από το λίπος.

Στην περίπτωση αυτή μπορεί το λάδι σαν ρευστό υλικό να απομακρυνθεί και ανανεωθεί με την βοήθεια οπών, που έχουν προβλεφθεί ειδικά για αυτό τον σκοπό. Επίσης μπορεί εύκολα να ελεγχθεί και η ποσότητα λαδιού, που περιέχεται σε ένα έδρανο με την βοήθεια μιας οπής, που έχει κατασκευασθεί στο ύψος της απαιτούμενης στάθμης του λαδιού και καλύπτεται από ένα διαφανές πώμα.

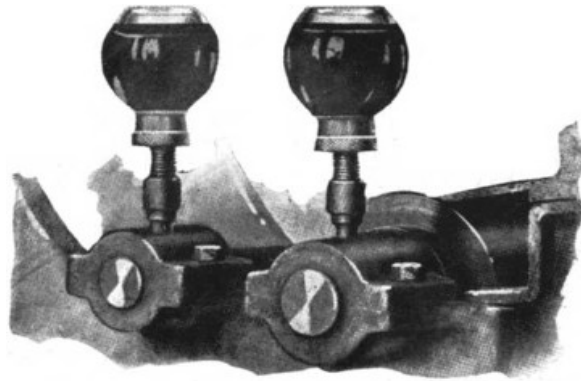
Όταν το λιπαντικό ενός εδράνου κυλίσεως είναι ορυκτέλαιο, τότε υπάρχει βασικά η δυνατότητα εκλογής μεταξύ τριών τρόπων λιπάνσεως: της λιπάνσεως λουτρού (Σχήμα 2.3) της λιπάνσεως αναγκαστικής κυκλοφορίας (Σχήμα 2.4) και της λιπάνσεως με νεφέλωμα ορυκτελαίου. Σε περίπτωση λιπάνσεως λουτρού η στάθμη του λαδιού σε κατάσταση ηρεμίας του εδράνου πρέπει το πολύ να φθάνει μέχρι το μέσον του κατώτερου σώματος κυλίσεως. Για τον έλεγχο αυτής της στάθμης χρησιμοποιούνται οπές με διαφανή πώματα η απλώς οπές υπερχειλίσεως και ειδικοί κοχλίες- πώματα. Σε περίπτωση λιπάνσεως αναγκαστικής κυκλοφορίας πρέπει η οπή εξόδου του λαδιού να έχει μεγαλύτερη διατομή από την οπή εισόδου του λαδιού στο έδρανο έτσι ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος υπερπληρώσεως του εδράνου με λάδι και υπερθερμάνσεως του από αυτό τον λόγο. Η λίπανση με νεφέλωμα ορυκτελαίου χρησιμοποιείται σε εξαιρετικές περιπτώσεις πολύ υψηλών ταχυτήτων περιστροφής.



Σχήμα 2.3: Λίπανση λουτρού



Σχήμα 2.4: Λίπανση αναγκαστικής κυκλοφορίας



Two bottle oilers mounted on bearings where cleanliness is demanded.

Σχήμα 2.5 Λίπανση σταγόνων

Τέλος σαν τέταρτος τρόπος λιπάνσεως με ορυκτέλαιο χρησιμοποιείται και η λίπανση σταγόνων κατά την οποία το λιπαντικό διοχετεύεται στο έδρανο από ένα λιπαντήρα σταγόνων (Σχήμα 2.5) και μέσω κατάλληλων οπών και αυλάκων. Η ροή του λιπαντικού σε αυτή την περίπτωση δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 10 σταγόνες την ώρα το πολύ.

Στα έδρανα κυλίσεως το ιξώδες του λιπαντικού έχει δευτερεύουσα σημασία. Η λίπανση με λίπος είναι γενικά απλούστερη, διότι η στεγανοποίηση τους είναι ευκολότερη και φθηνότερη. Τις περισσότερες φορές αρκεί η στεγανοποίηση διάκενου η ένας στεγανοποιητικός δακτύλιος από πύλημα (κετσέ),

Η απαιτούμενη ποσότητα του λίπους πρέπει να γεμίζει το μισό του κενού χώρου του εδράνου, για να μην υπάρχει κίνδυνος υπερθερμάνσεως του εδράνου.

Ένα λίπος χάνει τη λιπαντική του ικανότητα, όταν η περιεκτικότητά του σε ακαθαρσίες ξεπεράσει ένα επικίνδυνο ποσοστό. Το τέλος της διάρκειας ζωής ενός λίπους μπορεί έτσι να διαπιστωθεί πρακτικά από τη σημαντική αλλαγή του χρώματος του λόγω της περιεκτικότητας αυτής σε ακαθαρσίες.

Προσοχή χρειάζεται στην αλλαγή λιπαντικού ενός εδράνου, που λιπαίνεται με λίπος διότι στην περίπτωση αυτή πρέπει το μεταχειρισμένο λίπος να απομακρυνθεί τελείως από το έδρανο. Το καλύτερο από όλα είναι το έδρανο να αποσυναρμολογηθεί από την θέση λειτουργίας του και να πλυθεί με επιμέλεια έτσι ώστε να απομακρυνθεί κάθε ίχνος μεταχειρισμένου λίπους προτού λιπανθεί πάλι και συναρμολογηθεί στην θέση λειτουργίας του. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται ο κίνδυνος να αναμειχθούν το μεταχειρισμένο και το καινούργιο που μπορεί να είναι διαφορετικής συστάσεως. Μια τέτοια ανάμειξη μπορεί να οδηγήσει σε μια χημική αντίδραση με αποτέλεσμα την αποσύνθεση του νέου λίπους και την απώλεια της λιπαντικής του ικανότητας.

Υπάρχουν πίνακες για την εκλογή του είδους του λιπαντικού και του τρόπου λιπάνσεως διάφορων πρακτικών εφαρμογών, Τα τέσσερα βασικά μεγέθη λειτουργίας ενός εδράνου κυλίσεως τα οποία έχουν άμεση σχέση με την λίπανση και το ιξώδες του λιπαντικού είναι τα εξής:

1) Το μέγεθος ενός εδράνου το οποίο χαρακτηρίζεται κυρίως από την διάσταση της εξωτερικής διαμέτρου D . Όσο μεγαλύτερη η διάμετρος D τόσο υψηλότερη πρέπει να είναι κατά κανόνα η τιμή του ιξώδους του χρησιμοποιημένου λιπαντικού.

2) Ο αριθμός στροφών n ενός εδράνου είναι ανάλογος της απώλεια ισχύος. Όσο υψηλότερος είναι ο αριθμός στροφών και επομένως η ταχύτητα κινήσεως των

σωμάτων κυλίσεως, τόσο χαμηλότερη πρέπει να είναι η τιμή του ιξώδους του λιπαντικού, ώστε η αντίσταση έναντι της περιστροφής του εδράνου, δηλαδή η τριβή και επομένως η παραγόμενη θερμότητα να είναι κατά το δυνατόν χαμηλή.

3) Με την αύξηση του φορτίου P ενός εδράνου αυξάνεται και η πίεση επιφάνειας, που αναπτύσσεται μεταξύ σωμάτων κυλίσεως και τροχιών κυλίσεως. Όσο υψηλότερη είναι η αναπτυσσόμενη πίεση επιφάνειας, τόσο υψηλότερο πρέπει να είναι και η τιμή του ιξώδους του λιπαντικού, ώστε η φθορά των εφραπτόμενων επιφανειών να είναι κατά το δυνατόν περιορισμένη.

4) Η θερμοκρασία λειτουργίας t ενός εδράνου είναι επίσης ένα χαρακτηριστικό μέγεθος διότι αφενός μεν το ιξώδες του λιπαντικού είναι αντιστρόφως ανάλογο της θερμοκρασίας και αφετέρου κάθε λιπαντικό διατηρεί τις λιπαντικές του ιδιότητες μόνο όταν η θερμοκρασία λειτουργίας του κυμαίνεται μέσα σε ένα συγκεκριμένο πεδίο θερμοκρασιών.

2.3 ΩΣΤΙΚΑ ΕΔΡΑΝΑ

Η λειτουργία των εδράνων μιας μηχανής είναι να επιτρέπουν την περιορισμένη σχετική κίνηση των στερεών μερών. Γενικά τα έδρανα διακρίνονται σε έδρανα ολίσθησης και έδρανα κύλισης. Στα έδρανα διακρίνουμε ένα στρεφόμενο στοιχείο, που λέγεται στροφέας και ένα σταθερό που λέγεται τριβέας. Το έδρανο ολίσθησης που είναι σχεδιασμένο για να παραλαμβάνει αξονικά φορτία λέγεται ωστικό έδρανο. Τα ακτινικά και τα ωστικά έδρανα διακρίνονται σε έδρανα κύλισης και έδρανα ολίσθησης. Οι αντικειμενικοί στόχοι τους είναι η παραλαβή ακτινικών – αξονικών φορτίων, ή ελαχιστοποίηση της τριβής μεταξύ των κινούμενων μερών, η μείωση των ταλαντώσεων και του θορύβου, και η αντοχή σε κρουστικά φορτία.

Μια περίπτωση που χρησιμοποιούμε ωστικά έδρανα (Σχήμα 2.6) είναι για την παραλαβή των ακτινικών και ωστικών φορτίων του αξονικού συστήματος ενός πλοίου όπου χρησιμοποιούνται ακτινικά και ωστικά έδρανα ολίσθησης. Συγκεκριμένα τα ωστικά φορτία παραλαμβάνονται από το ωστικό έδρανο, το οποίο είναι συνήθως τύπου Michel, και περιλαμβάνει έναν αριθμό από πέλματα σχήματος κυκλικού τομέα, κυκλικά διατεταγμένα. Η διάταξη αυτή δημιουργεί περιοχές με γεωμετρία σφήνας μεταξύ των πελμάτων και του περιστρεφόμενου άξονα, οι οποίες σωρεύουν λιπαντικό, το οποίο αναπτύσσει πίεση και δεν επιτρέπει την επαφή μετάλλου με μέταλλο μειώνοντας σημαντικά την φθορά των σχετικών στοιχείων.



Σχήμα 2.6: Ωστικό έδρανο

Τα αξονικά/ωστικά, δέχονται φορτία παράλληλα με τον άξονα της ατράκτου (αξονικά) και έχουν δισκοειδή μορφή. Οι σφαίρες βρίσκονται σε αυλάκι ανάμεσα στον δίσκο ατράκτου και στον δίσκο κιβωτίου. Τα ένσφαιρα ωστικά ρουλεμάν μπορούν να διαχειριστούν αξονικά φορτία. Διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- Μονής σειράς, τα οποία μπορούν να δεχθούν αξονικά φορτία μίας μόνο κατευθύνσεως.
- Διπλής σειράς που δέχονται φορτία και προς τις δύο κατευθύνσεις.

Τα ωστικά ρουλεμάν δεν είναι κατάλληλα για λειτουργία σε υψηλές στροφές καθώς το λιπαντικό αποβάλλεται λόγω φυγοκέντρου. Όταν χρησιμοποιούνται σε οριζόντια άτρακτο ένα ελάχιστο αξονικό φορτίο πρέπει να εφαρμόζεται. Επίσης κατά την τοποθέτησή τους χρειάζεται προσοχή ώστε να αποφευχθεί ζημιά στην διάταξη δίσκων και σφαιρών. Άλλη μια διάκριση είναι αν η βάση τους είναι επίπεδη ή σφαιρική.

3.ΒΛΑΒΕΣ ΕΔΡΑΝΩΝ

Τα έδρανα ολίσθησης αποτελούν εκείνο το μηχανολογικό εξάρτημα των βιομηχανικών εγκαταστάσεων που δέχεται ίσως τις πλέον μακρόχρονες και έντονες δυναμικές καταπονήσεις. Είναι φυσικό λοιπόν να υφίστανται μεγάλη μηχανική φθορά. Τα έδρανα ολίσθησης χρησιμοποιούνται σε μια ευρεία γκάμα μηχανισμών στις βιομηχανικές παραγωγικές διαδικασίες. Για το λόγο αυτό βρίσκονται σε επαφή με μια μεγάλη ποικιλία ρευστών τα οποία έχουν λιγότερο ή περισσότερο διαβρωτικές ιδιότητες, όπως το νερό, τα οξέα, οι βάσεις και διάφορα αέρια.

Οι κατασκευαστές έχουν εξοπλίσει τα σύγχρονα έδρανα ολίσθησης με μηχανισμούς στεγανοποίησής τους από τα διαχειριζόμενα στη παραγωγική διαδικασία ρευστά, ωστόσο ορισμένα από αυτά είναι ιδιαίτερα δραστικά και έτσι είναι αναγκαία η λήψη επιπλέον μέτρων. Επειδή στις περιπτώσεις αυτές τα έδρανα ολίσθησης υφίστανται μια σύνθετη καταπόνηση μηχανική και χημική, τα μέτρα αυτά δεν συνίστανται στην επίστρωση με ειδικές ρητίνες της καταπονούμενης σε διάβρωση μεταλλικής επιφάνειας, αλλά μπορεί να αφορούν στη χρησιμοποίηση ειδικών υλικών κατά την κατασκευή των εδράνων ολίσθησης, στην κατάλληλη μηχανική προετοιμασία των καταπονούμενων επιφανειών καθώς επίσης και στη χρησιμοποίηση εξελιγμένων λιπαντικών στα οποία περιλαμβάνονται και στερεά. Οι συνηθέστερες περιπτώσεις βιομηχανικής παραγωγής, όπου απαιτείται η προστασία των εδράνων ολίσθησης από διάβρωση συναντώνται στη χημική βιομηχανία και τη βιομηχανία τροφίμων, στη χαλυβουργία καθώς και στην βιομηχανία κατασκευής ημιαγωγών.

Εξαιτίας των παραπάνω είναι σημαντική η προσέγγιση της διάρκειας ζωής τους και η ένταξη των διαδικασιών συντήρησής τους σε ιδιαίτερα μελετημένα προγράμματα διαγνωστικής συντήρησης. Στα έδρανα ολίσθησης η διάρκεια ζωής υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας περιορίζεται είτε από την κόπωση του υλικού είτε από ένα ανώτατο επιτρεπόμενο όριο φθοράς των επιφανειών ολίσθησης με τον άξονα. Η εκλογή του κατάλληλου είδους και μεγέθους του εδράνου καθορίζεται από το είδος και το μέγεθος της φορτίσεως που παραλαμβάνει, από την ταχύτητα περιστροφής του άξονα και τέλος από ειδικές συνθήκες λειτουργίας όπως το είδος λιπάνσεως, τη θερμοκρασία λειτουργίας, τις αυξομειώσεις του ονομαστικού φορτίου κ.τ.λ. Ο υπολογισμός της αντοχής των εδράνων ολίσθησης χωρίζεται σε δύο είδη, στο δυναμικό και το στατικό υπολογισμό αντοχής. Ο υπολογισμός δυναμικής αντοχής εκτελείται στα έδρανα εκείνα, που η ταχύτητα περιστροφής τους είναι μεγαλύτερη από 20 περίπου στροφές ανά λεπτό. Ο υπολογισμός στατικής αντοχής εφαρμόζεται στα έδρανα που είτε δεν περιστρέφονται είτε ο αριθμός στροφών τους είναι μικρότερος από 20 στροφές το λεπτό.

3.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ

Σήμερα οι βιομηχανίες έρχονται να αντιμετωπίσουν όλο και περισσότερες και πιο έντονες συνθήκες ανταγωνισμού λόγω της παγκοσμιοποίησης των αγορών. Έτσι

λοιπόν για να διασφαλίσουν την αναπτυξιακή τους πορεία θα πρέπει να βελτιώνονται, να εξελίσσονται και να καινοτομούν, σε ρυθμούς πιο γρήγορους από τον ανταγωνισμό σε όλους τους τομείς, δηλαδή σε όλο το φάσμα των δραστηριοτήτων τους το οποίο βέβαια εξαρτάται από την ικανότητά της κάθε βιομηχανίας να βλέπει πιο μπροστά από την εποχή της. Με βάση αυτό τον στόχο, στα πλαίσια του γενικότερου σχεδιασμού τους, οι βιομηχανίες επισημαίνουν τον τομέα της συντήρησης σαν μια από τις κεντρικές δραστηριότητες τους, η αναβάθμιση του οποίου μπορεί να οδηγήσει σε περαιτέρω πρόοδο του συνόλου των επιχειρήσεων. Οι σύγχρονες μέθοδοι συντήρησης περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα τεχνικών και δραστηριοτήτων. Οι θεωρούμενες παραδοσιακές μέθοδοι συντήρησης κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες : (α) τη διορθωτική συντήρηση και (β) την προληπτική συντήρηση.

Η λογική της διορθωτικής συντήρησης είναι ιδιαίτερα απλή. Ο εξοπλισμός λειτουργεί συνέχεια και συντηρείται μόνο όταν παρουσιασθεί βλάβη. Σε πρώτο επίπεδο, η πρακτική εμφανίζεται λογική και δύναται να είναι αποτελεσματική, εάν ο εξοπλισμός είναι καινούργιος ή η διακοπή της λειτουργίας του δεν είναι σημαντική για την παραγωγική διαδικασία. Σε αντίθετη περίπτωση, αποτελεί την πιο ακριβή μορφή συντήρησης. Τα κύρια κόστη που συνεπάγεται είναι η διατήρηση υψηλού αποθέματος ανταλλακτικών, το υψηλό εργατικό κόστος αποκατάστασης, οι μεγάλοι νεκροί χρόνοι και η μικρή διαθεσιμότητα της παραγωγικής εγκατάστασης.

Η βασική ιδέα της προληπτικής συντήρησης είναι η ένταξη των διαδικασιών συντήρησης σε ένα χρονικά προγραμματιζόμενο πλαίσιο. Οι δραστηριότητες συντήρησης προγραμματίζονται είτε με βάση τις ώρες λειτουργίας ενός μηχανικού στοιχείου, είτε με βάση το συνολικό χρονικό διάστημα από την προμήθεια του. Η λογική της προληπτικής συντήρησης βασίζεται στο γεγονός ότι οι ρυθμοί φθοράς του εξοπλισμού ακολουθούν μια πορεία στην οποία ο μόνος παράγοντας που ουσιαστικά επιδρά είναι ο χρόνος. Τα διαστήματα της συντήρησης προκαθορίζονται είτε, κυρίως, από εμπειρία του κατασκευαστή του συγκεκριμένου εξοπλισμού, είτε, σε μικρότερο βαθμό, από την συστηματική τήρηση αρχείων στην εγκατάσταση. Με αυτόν τον τρόπο, θεωρητικά, οι διαδικασίες συντήρησης μπορούν να προγραμματισθούν σε νεκρούς χρόνους λειτουργίας και τα απαραίτητα ανταλλακτικά να παραγγελθούν σε κατάλληλο χρονικό διάστημα.

Στην πράξη, η εφαρμογή αυτής της πρακτικής συναντά πολλά προβλήματα. Σε πολλές περιπτώσεις, η διαφοροποίηση των συνθηκών λειτουργίας του εξοπλισμού από τις προδιαγεγραμμένες, οδηγεί σε πρόωρες αποτυχίες του μηχανολογικού εξοπλισμού. Σε πολλές κατηγορίες εξοπλισμού δεν υπάρχουν δεδομένα για τις σχετικές επιτρεπτές ώρες λειτουργίας. Δεδομένου του συντηρητικού υπολογισμού των επιτρεπτών ωρών λειτουργίας του εξοπλισμού από τους κατασκευαστές, το κόστος συντήρησης αυξάνεται αναίτια. Τα επιβαλλόμενα διαστήματα επισκευής δεν συμπίπτουν ή καθυστερούν αδικαιολόγητα το συνολικό προγραμματισμό της παραγωγής.

Σαν αποτέλεσμα των προβλημάτων των παραδοσιακών μορφών συντήρησης, τουλάχιστον το 33% του συνολικού κόστους συντήρησης οφείλεται σε μη απαραίτητες ή αναποτελεσματικές δράσεις συντήρησης. Πέρα από την επίδραση στο κόστος, τουλάχιστον εξίσου σημαντική είναι η επίδραση της αναποτελεσματικής συντήρησης σε ένα άλλο σύνολο πρόσθετων παραγωγικών απαιτήσεων, όπως ασφάλεια προσωπικού και εγκαταστάσεων, μείωση περιβαλλοντικών επιπτώσεων, παραγωγή προϊόντων ποιότητας κλπ. Κύρια αίτια για την αναποτελεσματική συντήρηση αποτελεί η έλλειψη πραγματικών δεδομένων, με τα οποία δύναται να

δικαιολογηθεί με πραγματικά τεκμηριωμένα ποσοτικά κριτήρια η λήψη απόφασης για την ανάγκη επισκευής ή συντήρησης.

Με αυτόν τον στόχο, έχει αναπτυχθεί διεθνώς ένα σύγχρονο πλαίσιο μεθόδων και τεχνολογιών για την σταδιακή μετατόπιση του ρόλου της συντήρησης από τις παραδοσιακές διαδικασίες επισκευής-αποκατάστασης σε διαδικασίες πρόληψης-πρόβλεψης, σκοπεύοντας τελικά στην αύξηση της διαθεσιμότητας της εγκατάστασης. Οι μέθοδοι αυτές εντάσσονται σε μία κύρια κατηγορία : την προβλεπτική συντήρηση.

Η προβλεπτική συντήρηση θεωρείται σήμερα μία φιλοσοφία συντήρησης, που στηρίζεται σε μία ουσιαστική εκτίμηση της πραγματικής φυσικής κατάστασης του εξοπλισμού, με στόχο τη σταδιακή μετατόπιση των εργασιών συντήρησης από εργασίες αποκατάστασης-επισκευής βλαβών σε διαδικασίες πρόληψης-πρόβλεψης. Σύμφωνα με σχετικές διεθνείς έρευνες, από την υλοποίηση προγραμμάτων προβλεπτικής συντήρησης σε βιομηχανίες, προέκυψαν σημαντικά οφέλη, που συνοψίζονται στα ακόλουθα αποτελέσματα :

- Μείωση του κόστους συντήρησης κατά 50-80%
- Μείωση των καταστροφών μηχανών κατά 50-60%
- Μείωση των αποθεμάτων ανταλλακτικών κατά 20-30%
- Μείωση του νεκρού χρόνου των μηχανών κατά 50-80%
- Μείωση του κόστους υπερωριών κατά 20-50%
- Αύξηση της διάρκειας ζωής των μηχανών κατά 20-40%
- Αύξηση της παραγωγικότητας κατά 20-30%
- Αύξηση κερδών κατά 25-60%

3.2 ΚΑΚΗ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗ

Γενικά

Η κακή ευθυγράμμιση αποτελεί μία από τις πιο συνηθισμένες βλάβες στρεφόμενων μηχανών και εμφανίζεται στη σύνδεση των αξόνων δυο διαφορετικών μηχανών.

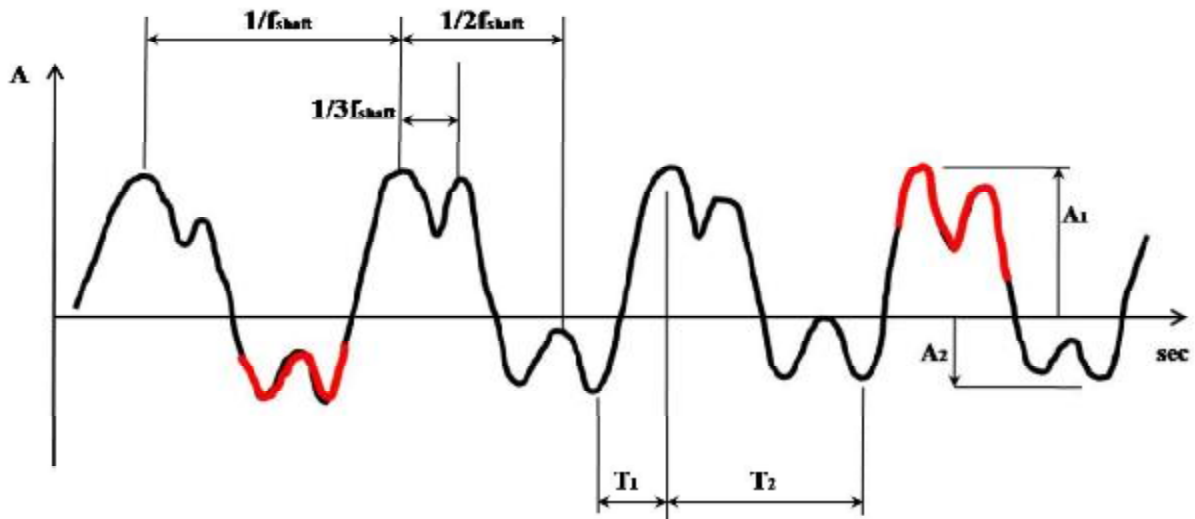
Αιτίες

Βασικές αιτίες της εμφάνισης της κακής ευθυγράμμισης είναι:

- Η αύξηση της θερμοκρασίας της στρεφόμενης μηχανής
- Η εσφαλμένη τοποθέτηση/σύνδεση των αξόνων
- Η υποχώρηση των εδράσεων της μηχανής
- Η εξωτερική φόρτιση

Μηχανισμός Βλάβης

Η κυματομορφή της απόκρισης μιας μηχανής με κακή ευθυγράμμιση (Σχήμα 3.1)εμφανίζει περιοδικότητες τις αρμονικές συνιστώσες της ταχύτητας περιστροφής του άξονα λόγω του μεγάλου συντελεστή ελαστικότητας του, προκαλεί την ανάπτυξη ισχυρών καμπτικών δυνάμεων (ροπών) στον άξονα, οι οποίες με την σειρά τους δημιουργούν ισχυρές διεγέρσεις στα έδρανα στην ακτινική και στην αξονική κατεύθυνση. Στην συνέχεια, τα έδρανα παράγουν δυνάμεις αντίδρασης που σκοπό έχουν να «προστατέψουν» τον άξονα περιορίζοντας το πλάτος της ταλάντωσής του.



Σχήμα 3.1: Χρονική κυματομορφή απόκρισης μηχανής με κακή ευθυγράμμιση

3.3 ΑΖΥΓΟΣΤΑΘΜΙΑ

Γενικά

Η αζυγοσταθμία αποτελεί μια από τις πιο συνηθισμένες βλάβες στρεφόμενων μηχανών και εμφανίζεται λόγω ανομοιομόρφης κατανομής της μάζας ενός μηχανικού στοιχείου, όπως άξονας, πτερωτή, κλπ.

Αιτίες

Βασικές αιτίες της εμφάνισης της αζυγοσταθμίας είναι:

- § 1) Ατέλειες του υλικού του μηχανικού στοιχείου
- § 2) Φθορές κατά τη λειτουργία της μηχανής
- § 3) Επικαθήσεις πρόσθετων υλικών σε κάποιο μηχανικό στοιχείο
- § 4) Εσφαλμένες ενέργειες στη συντήρηση της μηχανής

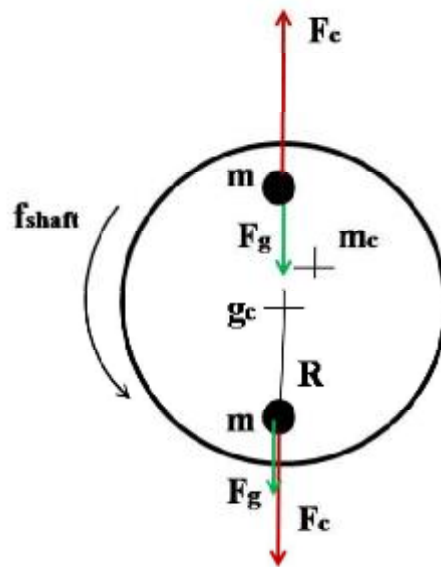
Μηχανισμός βλάβης

Η ανομοιομορφία στην κατανομή της μάζας ενός μηχανικού στοιχείου, που εμφανίζεται από τις παραπάνω αιτίες, προκαλεί την ανάπτυξη φυγόκεντρων δυνάμεων F_c οι οποίες στρέφονται με την ταχύτητα του άξονα περιστροφής f_{shaft} (Σχήμα 3.2).

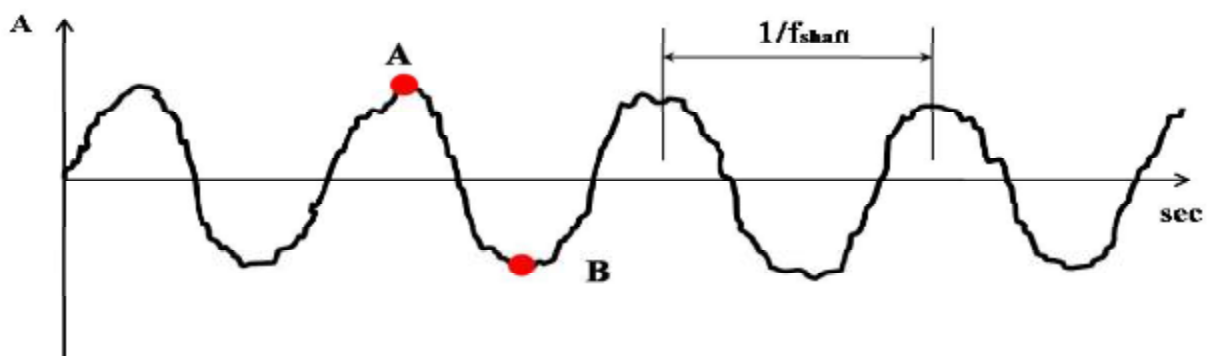
Λόγω της ανομοιομορφίας στην κατανομή της μάζας το γεωμετρικό κέντρο (ή κέντρο περιστροφής) g_c δεν ταυτίζεται με το κέντρο μάζας m_c . Η φυγόκεντρος δύναμη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2, αναπτύσσεται στο σημείο που παρουσιάζεται η επιπλέον μάζα m , έχει φορά από το κέντρο περιστροφής προς την περιφέρεια του άξονα και είναι ανάλογη του τετραγώνου της κυκλικής συχνότητας περιστροφής του άξονα, δηλαδή $F_c = mR\omega^2$. Στη φυγόκεντρο δύναμη προστίθεται διανυσματικά και το βάρος F_g της μάζας m (Σχήμα 3.2). Επομένως, μεταβολές της ταχύτητας περιστροφής του άξονα προκαλεί ανάλογες μεταβολές του πλάτους της ταλάντωσης του μηχανικού στοιχείου.

Κυματομορφή απόκρισης

Η αζυγοσταθμία εκδηλώνεται με την αύξηση του πλάτους των κραδασμών της μηχανής στην ταχύτητα περιστροφής του άξονα. Έτσι η χρονική κυματομορφή του μετρούμενου σήματος είναι ημιτονοειδής ταλάντωση (Σχήμα 3.3), πάνω στην οποία «μεταφέρονται» ο θόρυβος και οι δονήσεις των «υγείων» μηχανικών στοιχείων της μηχανής. Η ταλάντωση αποκτά το μέγιστο πλάτος της όταν το βάρος της πρόσθετης μάζας m αθροίζεται με την φυγόκεντρη δύναμη (Σχήμα 3.2). Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η μέγιστη δόνηση στο σημείο A. Η ελάχιστη τιμή της απόκρισης της μηχανής συναντάται στην κατακόρυφη θέση τη στιγμή που το βάρος της μάζας m αφαιρείται ολόκληρο από τη φυγόκεντρη δύναμη (Σχήμα 3.2). Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η ελάχιστη τιμή της ταλάντωσης στο σημείο B. Ανάλογα με το πλάτος του διανύσματος του βάρους της μάζας m στα διάφορα σημεία περιστροφής, μειώνεται το πλάτος της φυγόκεντρης δύναμης και της ταλάντωσης του άξονα.



Σχήμα 3.2: Ανάπτυξη φυγόκεντρων δυνάμεων στην αζυγοσταθμία



Σχήμα 3.3: Χρονική κυματομορφή απόκρισης μηχανής με αζυγοσταθμία

3.4 ΦΘΑΡΜΕΝΟΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΣ ΔΑΚΤΥΛΙΟΣ ΡΟΥΛΕΜΑΝ

Γενικά

Ο εξωτερικός δακτύλιος του ρουλεμάν εφαρμόζει σταθερά στη “φωλιά” της έδρασης σε αντίθεση με τον εσωτερικό δακτύλιο που περιστρέφεται με τη συχνότητα περιστροφής του άξονα στον οποίο εδράζεται το ρουλεμάν. Η φθορά στον εξωτερικό δακτύλιο εμφανίζεται εντός της ζώνης φόρτισης διότι εκτός της ζώνης οι δυνάμεις που ασκούνται στις μεταλλικές επιφάνειες των στοιχείων κύλισης και των δακτυλίων του ρουλεμάν είναι αμελητέες ή πολύ μικρές σε σχέση με αυτές που αναπτύσσονται στη ζώνη φόρτισης.

Αιτίες

Βασικές αιτίες της εμφάνισης της φθοράς του εξωτερικού δακτυλίου του ρουλεμάν είναι:

- Κακή αζυγοσταθμία
- Αζυγοσταθμία
- Εσφαλμένη τοποθέτηση
- Εξωτερική φόρτιση
- Ελλιπής λίπανση
- Αστοχία υλικού

Μηχανισμός βλάβης

Σε ένα φθαρμένο ρουλεμάν, κάθε φορά που τα στοιχεία κύλισης έρχονται σε επαφή με τη φθορά/ελάττωμα στον εξωτερικό δακτύλιο (Σχήμα 3.4), προκαλεί μια κρούση που διεγείρει κάποια/ες ιδιοσυχνότητα/ες του ρουλεμάν ή και της μηχανής. Η ένταση (το πλάτος) των επαναλαμβανόμενων κρούσεων είναι σχεδόν ίση, καθώς η θέση της φθοράς, η οποία εντοπίζεται πάντα εντός της ζώνης φόρτισης (Σχήμα 3.5), δεν αλλάζει εφόσον ο εξωτερικός δακτύλιος είναι ακίνητος, δηλαδή οι δυνάμεις που εφαρμόζονται στην περιοχή της φθοράς είναι σχεδόν σταθερές. Στην συνέχεια, ο παραγόμενος κρουστικός παλμός αποσβένει καθώς μεταδίδεται μέσα στο σώμα της μηχανής (Σχήμα 3.5), δηλαδή μειώνεται το πλάτος του δίχως να επηρεάζονται οι συχνότητες των συνιστωσών που τον συνθέτουν.

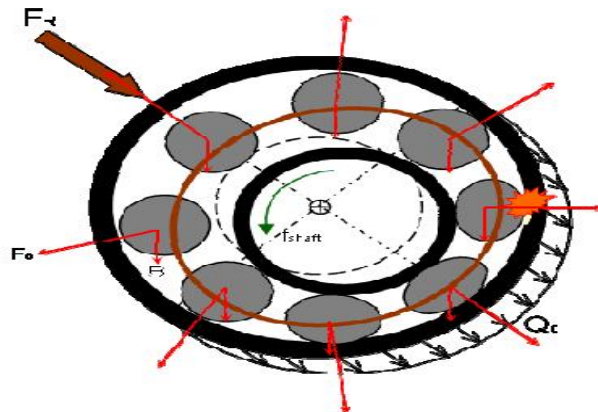
Στα αρχικά στάδια της βλάβης (μικρή έκταση και μέγεθος), οι κρουστικοί παλμοί είναι ιδιαίτερα σύντομοι, έχοντας έτσι υψηλό εύρος συχνοτήτων. Έτσι οι κραδασμοί είναι αιχμηροί και το φάσμα περιλαμβάνει υψηλές διεγερόμενες ιδιοσυχνότητες. Η χειροτέρευση της φθοράς αυξάνει την ένταση (πλάτος) των κρουστικών επαφών των στοιχείων κύλισης με την φθαρμένη επιφάνεια του εξωτερικού δακτυλίου του ρουλεμάν. Επίσης οι γεωμετρικές μεταβολές που υφίσταται η φθαρμένη επιφάνεια μπορούν να μετατοπίσουν τις διεγερόμενες ιδιοσυχνότητες σε διαφορετικές ζώνες του πεδίου συχνότητας. Στο τελικό στάδιο όταν η φθορά έχει εξελιχθεί σημαντικά, μειώνεται η αιχμηρότητα των κρούσεων και αυξάνεται ο θόρυβος. Η χειροτέρευση της φθοράς προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του ρουλεμάν.



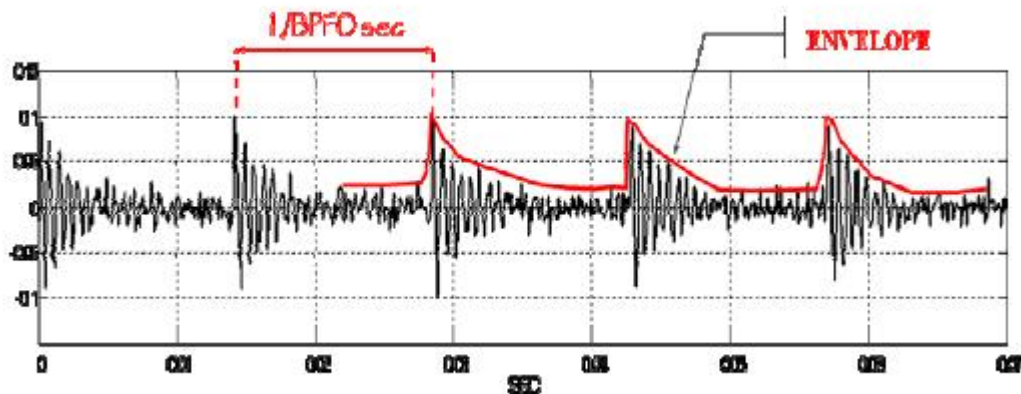
Σχήμα 3.4: Ρουλεμάν με φθορά στον εξωτερικό δακτύλιο

Κυματομορφή απόκρισης

Η απόκριση ενός ρουλεμάν με φθαρμένο εξωτερικό δακτύλιο είναι διαμορφωμένη κατά πλάτος (περιοδικά μεταβλητό πλάτος) (γράφημα 3.4.1). Η διεγερόμενη ιδιοσυχνότητα f_n από τις κρούσεις είναι η συνιστώσα της οποίας το πλάτος διαμορφώνεται (μεταβάλλεται), και η ταλάντωση που παράγεται από τον ρυθμό περάσματος των στοιχείων κύλισης από την φθαρμένη επιφάνεια του εξωτερικού δακτυλίου (1/BPFO...Ballpassfrequencyouter) είναι η συνιστώσα που διαμορφώνει περιοδικά το πλάτος. Έτσι η χρονική κυματομορφή του μετρούμενου σήματος αποτελείται από μία σειρά από κρουστικούς παλμούς ίσης έντασης. Κάθε κρουστικός παλμός εμφανίζει περιοδικότητα/τες ίση/ες με την/ις ιδιοσυχνότητα/τες που διεγείρεται/ονται ($1/f_n$) (Σχήμα 3.6)



Σχήμα 3.5: Μηχανισμός δόνησης ρουλεμάν με φθορά στον εξωτερικό δακτύλιο



Σχήμα 3.6: Χαρακτηριστική κυματομορφή μετρούμενου σήματος σε ένσφαιρο τριβέα με φθαρμένο εξωτερικό δακτύλιο.

3.5 ΦΘΑΡΜΕΝΟΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΣ ΔΑΚΤΥΛΙΟΣ ΡΟΥΛΕΜΑΝ

Γενικά

Ο εσωτερικός δακτύλιος του ρουλεμάν εφαρμόζει σταθερά στον άξονα περιστροφής στον οποίο εδράζεται το ρουλεμάν. Η φθορά στον εσωτερικό δακτύλιο περιστρέφεται με την ταχύτητα περιστροφής του άξονα και εμφανίζεται περιοδικά εντός και εκτός της ζώνης φόρτισης. Οι κρούσεις εντός της ζώνης φόρτισης είναι έντονες, ενώ εκτός αυτής σχεδόν αμελητέες.

Αιτίες

Βασικές αιτίες της εμφάνισης της φθοράς του εσωτερικού δακτυλίου του ρουλεμάν είναι:

- Κακή ευθυγράμμιση
- Αζυγοσταθμία
- Εσφαλμένη τοποθέτηση
- Εξωτερική φόρτιση
- Ελλιπής λίπανση
- Αστοχία υλικού

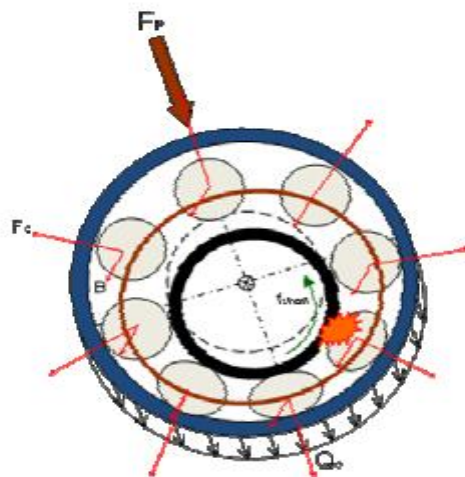
Μηχανισμός βλάβης

Σε ένα φθαρμένο ένσφαιρο τριβέα, κάθε φορά που τα στοιχεία κύλισης έρχονται σε επαφή με τη φθορά/ελάττωμα στον εσωτερικό δακτύλιο (Σχήμα 3.7), προκαλείται μια κρούση (Σχήμα 3.8) που διεγείρει κάποια/ες ιδιοσυχνότητα/ες της μηχανής. Ο κρουστικός παλμός αποσβένει καθώς μεταδίδεται μέσα στο σώμα της μηχανής και επαναλαμβάνεται στην επόμενη κρούση (Σχήμα 3.9). Ο κρουστικός παλμός εμφανίζει περιοδικότητα/τες ίση/ες με την/ις ιδιοσυχνότητα/ες $1/f_n$ που διεγείρεται/ονται. Το μετρούμενο σήμα είναι διαμορφωμένο κατά πλάτος. Η ιδιοσυχνότητα είναι η συνιστώσα, της οποίας το πλάτος διαμορφώνεται (μεταβάλλεται) και ο ρυθμός περάσματος των σφαιρών από τη φθαρμένη επιφάνεια του εσωτερικού δακτυλίου και η ταχύτητα περιστροφής του άξονα στον οποίο εδράζεται το ρουλεμάν είναι οι συνιστώσες που διαμορφώνουν περιοδικά το πλάτος, δηλαδή το μετρούμενο σήμα είναι διπλά διαμορφωμένο κατά πλάτος από (α) τη

συχνότητα BPF1 που είναι υπεύθυνη για την επανεμφάνιση της ιδιοσυχνότητας μετά από κάθε κρούση (Σχήμα 3.9 κόκκινη κυματομορφή) και (β) τη συχνότητα f_{shaft} που είναι υπεύθυνη για τις μεταβολές του πλάτους των κρουστικών παλμών συναρτήσει της θέσης κρούσης (Σχήμα 3.9 μπλε κυματομορφή). Η φθορά μετακινείται εντός και εκτός της ζώνης φόρτισης (Σχήμα 3.8). Οι δυνάμεις που εφαρμόζονται στην περιοχή της κρούσης δεν είναι ίδιες καθώς ο εσωτερικός δακτύλιος μεταφέρει τη φθορά εντός και εκτός της ζώνης φόρτισης. Έτσι, η ένταση των κρούσεων είναι μέγιστη κοντά στο κέντρο της ζώνης φόρτισης και μειώνεται προς τα άκρα της, ενώ εκτός της ζώνης φόρτισης οι κρούσεις είναι ασθενείς (Σχήμα 3.9).



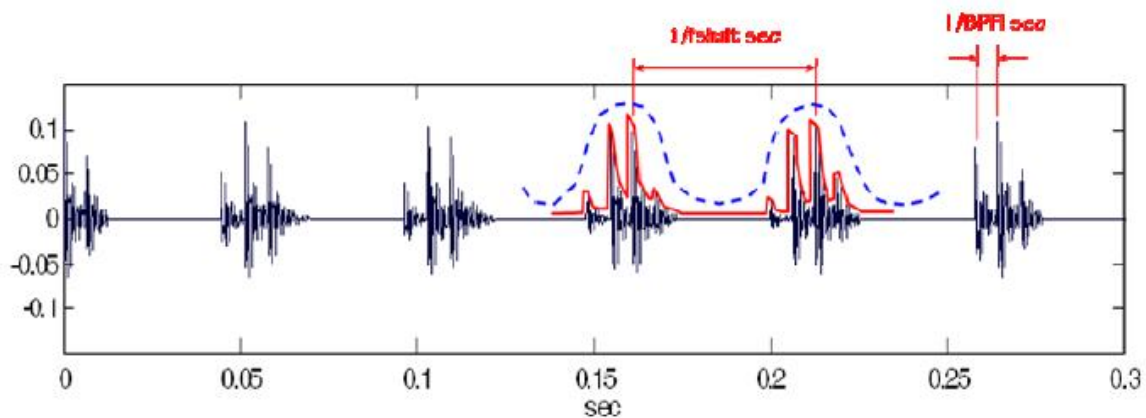
Σχήμα 3.7: Εσωτερικός δακτύλιος ρουλεμάν



Σχήμα 3.8: Μηχανισμός δόνησης ρουλεμάν με φθορά στον εσωτερικό δακτύλιο

Κυματομορφή απόκρισης

Η απόκριση ενός ρουλεμάν με φθαρμένο εσωτερικό δακτύλιο είναι διπλά διαμορφωμένη κατά πλάτος (Σχήμα 3.9). Έτσι, η διεγερόμενη από τις κρούσεις ιδιοσυχνότητα f_n είναι η συνιστώσα της οποίας το πλάτος διαμορφώνεται (μεταβάλλεται), και οι ταλαντώσεις που παράγονται από (α) τον ρυθμό περάσματος των στοιχείων κύλισης από την φθαρμένη επιφάνεια του εσωτερικού δακτυλίου ($1/BPF1...Ballpassfrequencyinner$) και (β) τη συχνότητα περιστροφής του εσωτερικού δακτυλίου f_{shaft} είναι οι συνιστώσες που διαμορφώνουν περιοδικά το πλάτος. Έτσι, η χρονική κυματομορφή του μετρούμενου σήματος αποτελείται από μια σειρά από αποσβενόμενους κρουστικούς παλμούς διαφορετικής έντασης ανάλογα με το σημείο που συμβαίνει η κρούση.



Σχήμα 3.9: Χαρακτηριστική κυματομορφή μετρούμενου σήματος σε ένσφαιρο τριβέα με φθαρμένο εσωτερικό δακτύλιο.

3.6 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΧΑΛΑΡΟΤΗΤΑ

Γενικά

Η χαλαρότητα στη σύνδεση ενός μηχανικού στοιχείου της μηχανής προκαλεί κρούσεις και τριβές με συχνότητα εμφάνισης ίση με κάποια αρμονική της συχνότητα περιστροφής της μηχανής.

Αιτίες

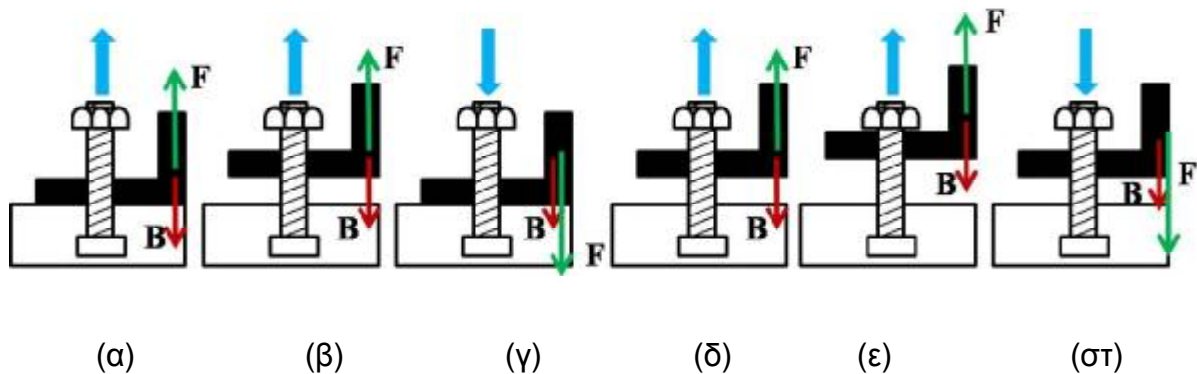
Βασικές αιτίες της εμφάνισης της μηχανικής χαλαρότητας είναι η χαλαρή σύσφιξη και έδραση των διαφόρων μηχανικών στοιχείων της μηχανής. Μεταβολή του φορτίου προκαλεί αντιστρόφως ανάλογη μεταβολή της ταλάντωσης του μηχανικού στοιχείου.

Μηχανισμός βλάβης

Ανάλογα με τη φύση του χαλαρού μηχανικού στοιχείου που δονείται και το πώς αλληλεπιδρά με την αζυγοσταθμία της μηχανής, η απόκριση συνθέτεται από $2/f_{\text{shaft}}$ ή $1/f_{\text{shaft}}$ αρμονικές ταλαντώσεις.

Στο Σχήμα 3.10 παρουσιάζεται ένας κύκλος ταλάντωσης ενός μηχανικού στοιχείου (βάση στήριξης εδράνου, μαύρο '___I' λόγω της χαλαρής σύσφιξης της βίδας. Σε μια περιστροφή του άξονα της μηχανής πραγματοποιείται ένας κύκλος ($1/T$) της ταλάντωσης του χαλαρού μηχανικού στοιχείου (Σχήμα 3.10α, β και γ). Η δύναμη F προκαλεί την ανοδική κίνηση του μηχανικού στοιχείου. Η συνολική δύναμη ανόδου του στοιχείου ελαττώνεται σε $F-B$ (B : βάρος στοιχείου). Το μηχανικό στοιχείο δεν ταλαντώνεται έως την κεφαλή της βίδας σε αυτή την $1^{\text{η}}$ περιστροφή του άξονα. Στον επόμενο κύκλο, η ανοδική κίνηση διακόπτεται απότομα και βίαια (κρούση) από το κεφάλι της βίδας που αποτελεί το άνω όριο. Για το λόγο αυτό «ψαλιδίζεται» η κορυφή (μέγιστο πλάτος) της ταλάντωσης (Σχήμα 3.11). Ο δεύτερος κύκλος ταλάντωσης του μηχανικού στοιχείου παρουσιάζεται στα Σχήματα 3.10δ, ε και στ. Τη στιγμή αυτή ολοκληρώνεται η δεύτερη περιστροφή του άξονα της μηχανής από την έναρξη της ταλάντωσης του μηχανικού στοιχείου. Η συνολική δύναμη καθόδου του μηχανικού στοιχείου αυξάνεται $F+B$.

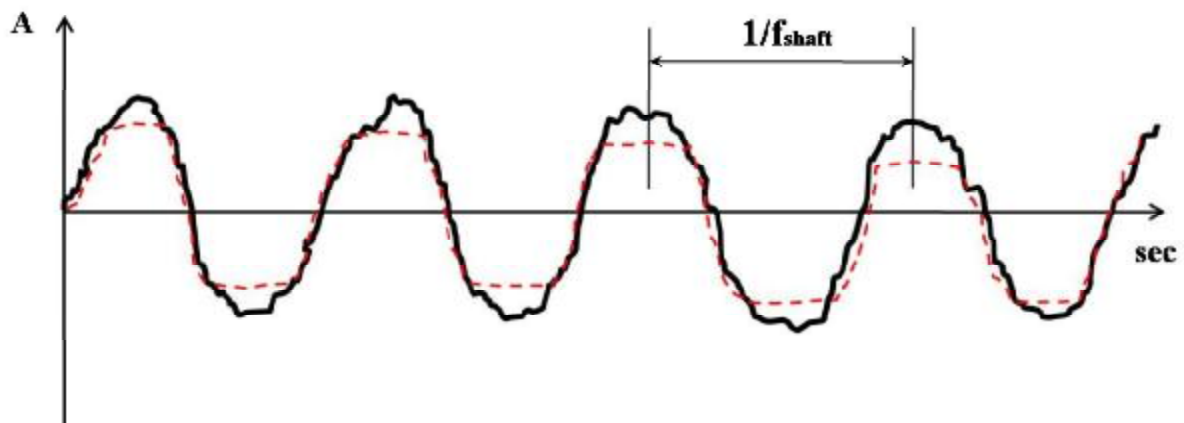
Έτσι κατά τη διάρκεια δύο κύκλων ταλάντωσης του άξονα της μηχανής προκαλείται ένα 'κτυπήματα' του χαλαρού μηχανικού στοιχείου στο άνω όριο με περιοδικότητα $2(1/f_{shaft})$. Η κυματομορφή της ταλάντωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.11.



Σχήμα 3.10: Μηχανική χαλαρότητα μηχανής

Κυματομορφή απόκρισης

Η κυματομορφή απόκρισης μιας μηχανής με μηχανική χαλαρότητα είναι σύνθεση ημιτονοειδών αρμονικών συνιστωσών με βασικές περιοδικότητες $1/(f_{shaft})$ και $2(1/f_{shaft})$. Τα πλάτη των κορυφών είναι «ψαλιδισμένα» λόγω της απότομης διακοπής της ταλάντωσης του χαλαρού μηχανικού στοιχείου (Σχήμα 3.11).



Σχήμα 3.11: Ψαλιδισμός απόκρισης μηχανής με μηχανική χαλαρότητα

3.7ΣΤΡΟΒΙΛΙΣΜΟΣ ΡΕΥΣΤΟΥ ΚΟΥΖΙΝΕΤΟΥ

Γενικά

Ο στροβιλισμός του λιπαντικού του κουζινέτου εμφανίζεται κάτω από ειδικές συνθήκες παρεμποδίζοντας την περιστροφική κίνηση του άξονα της μηχανής.

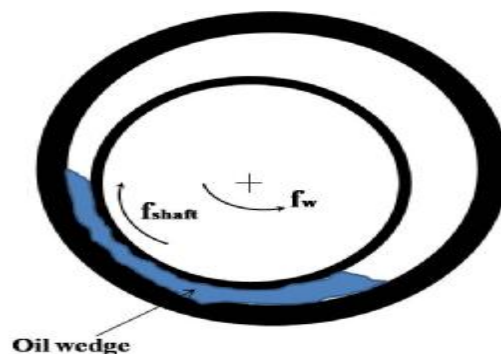
Αιτίες

Βασικές αιτίες της εμφάνισης του στροβιλισμού του ρευστού σε ένα κουζινέτο είναι:

- Το χαμηλό φορτίο σε συνδυασμό με την υψηλή ταχύτητα περιστροφής του άξονα.
- Ο σχεδιασμός και ο τύπος του κουζινέτου.

Μηχανισμός βλάβης

Υποτίθεται ότι μια μηχανή λειτουργεί με σχετικά υψηλές στροφές (f_{shaft}) υπό χαμηλό φορτίο. Στην περίπτωση ξαφνικής και σύντομης χρονικά μεταβολής του φορτίου, ο άξονας του κουζινέτου βιώνει ένα έντονο τράνταγμα. Συνέπεια αυτής της διαδικασίας είναι η επιπρόσθετη φόρτιση του λιπαντικού του κουζινέτου. Η φυσική αντίδραση του λιπαντικού, ως αποτέλεσμα των επιπλέον ασκούμενων δυνάμεων, αναγκάζει τον άξονα να κινηθεί σε αντίθετη κατεύθυνση («πατινάρει») γύρω από το κουζινέτο από αυτή της περιστροφής του. Έτσι όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.12, ο άξονας τείνει να περιστραφεί σε αντίθετη κατεύθυνση από την περιστροφή του με συχνότητα f_w



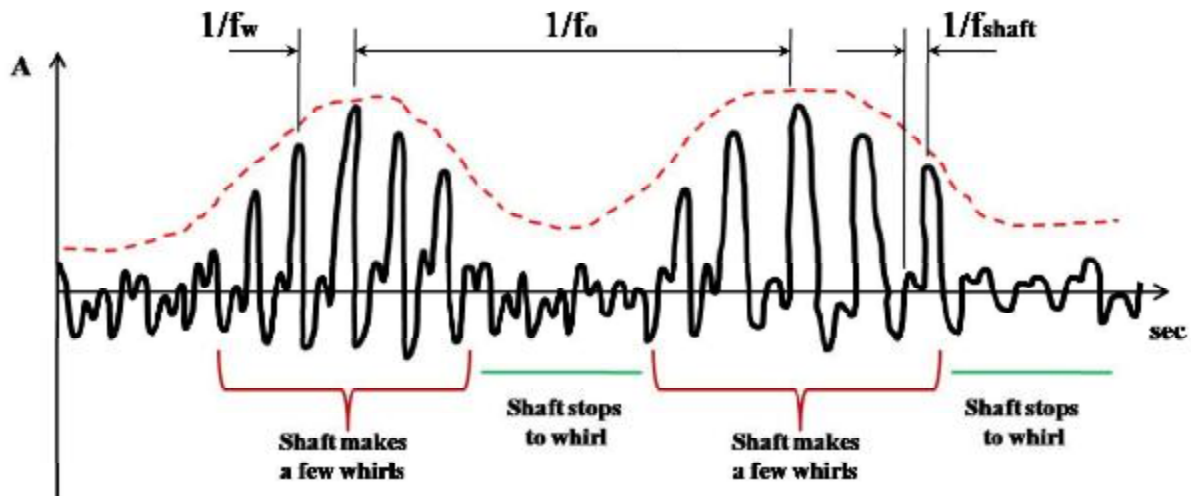
Σχήμα 3.12: Κουζινέτο

Έτσι ο στροβιλισμός του λιπαντικού συμβαίνει όταν ο άξονας πιέζει το λιπαντικό εμπρός του λόγω των πρόσθετων δυνάμεων. Το δε λιπαντικό με τη σειρά του δρα σαν 'σφήνα' που αντιστέκεται και παρεμποδίζει την περιστροφική του κίνηση. Ο άξονας στην προσπάθειά του να υπερβεί το 'εμπόδιο' για να συνεχίσει την προκαθορισμένη πορεία του, 'πατινάρει' στο λιπαντικό με μια ταχύτητα f_w αντίθετης κατεύθυνσης από την ταχύτητα περιστροφής f_{shaft} . Η συχνότητα στροβιλισμού f_w του λιπαντικού κυμαίνεται από 40% έως 50% της συχνότητας περιστροφής f_{shaft} . Ο στροβιλισμός του λιπαντικού δεν είναι διαρκής και συνεχόμενος, αλλά περιοδικός προκαλώντας θόρυβο που ακούγεται σαν 'χτύπημα'. Δηλαδή, για μερικές περιστροφές του άξονα εμφανίζεται ο στροβιλισμός του λιπαντικού, ο οποίος στη συνέχεια διακόπτεται για λίγες περιστροφές του άξονα και η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται περιοδικά.

Κυματομορφή απόκρισης

Η ταλάντωση του άξονα του κουζινέτου καταγράφεται ως μια ημιτονοειδής κυματομορφή με περιοδικότητα $1/f_{\text{shaft}}$. Στην περίπτωση όμως, που οι συνθήκες ευνοήσουν τη δημιουργία στροβιλισμού του λιπαντικού, εμφανίζεται μια νέα ταλάντωση με διπλάσια περίπου περιοδικότητα από την προαναφερθείσα ταλάντωση, δηλαδή $f_w = (0.4 \text{ έως } 0.5) \times f_{\text{shaft}}$. Η νεοεμφανιζόμενη ταλάντωση με μεγιστοποιείται περιοδικά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.13, με συχνότητα f_o , η οποία εκτιμάται εμπειρικά στα 7 Hz περίπου. Έτσι, η απόκριση του κουζινέτου εμφανίζει ημιτονοειδή κυματομορφή, της οποίας το πλάτος κάθε 2^n (σχεδόν) κορυφή αυξάνεται

σταδιακά μέχρι μια μέγιστη τιμή και με μια σταθερή περιοδικότητα που καθορίζεται από την εμφάνιση και τη διακοπή του στροβιλισμού του λιπαντικού (Σχήμα 3.13).



Σχήμα 3.13: Απόκριση κουζινέτου που εμφανίζει στροβιλισμό ρευστού

3.8 ΦΘΑΡΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΥΛΙΣΗΣ ΡΟΥΛΕΜΑΝ

Γενικά

Τα στοιχεία κύλισης συγκρατούνται από τον κλωβό και περιστρέφονται όλα μαζί με σταθερή ταχύτητα. Επίσης κάθε στοιχείο κύλισης περιστρέφεται και γύρω από τον άξονα του. Η ένταση των κρούσεων του φθαρμένου στοιχείου κύλισης στις μεταλλικές επιφάνειες του εσωτερικού και του εξωτερικού μεταβάλλεται περιοδικά εντός και εκτός της ζώνης φόρτισης. Οι κρούσεις εντός της ζώνης φόρτισης είναι έντονες, ενώ εκτός αυτής σχεδόν αμελητέες.

Αιτίες

Βασικές αιτίες της εμφάνισης της φθοράς των στοιχείων κύλισης ενός ρουλεμάν είναι:

- Εξωτερική φόρτιση
- Ελλειπής λίπανση
- Αστοχία υλικού

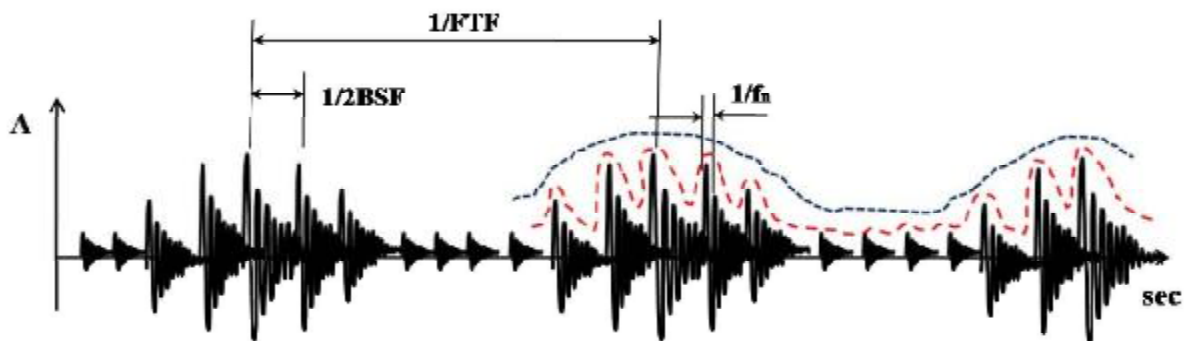
Μηχανισμός βλάβης

Η φθαρμένη επιφάνεια του στοιχείου κύλισης λόγω της περιστροφής γύρω από τον άξονα του έρχεται σε επαφή με τον εσωτερικό και τον εξωτερικό δακτύλιο προκαλώντας κρούσεις που διεγείρουν κάποια ιδιοσυχνότητα. Ο χρόνος περιστροφής του στοιχείου κύλισης γύρω από τον άξονα του είναι $1/BSFsec$ (Ballspinfrequency) (Παράρτημα Ε). Ο δε χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ δύο κρούσεων κύλισης, μια στον εξωτερικό και μια στον εσωτερικό δακτύλιο, είναι $1/2BSFsec$. Στη συνέχεια, ο κρουστικός παλμός αποσβένει καθώς μεταδίδεται μέσα στο σώμα της μηχανής και 'ξαναγεννιέται' στην επόμενη κρούση. Ο κρουστικός παλμός εμφανίζει περιοδικότητα ίση με την ιδιοσυχνότητα $1/f_n$ που διεγείρεται. Το μετρούμενο σήμα είναι διαμορφωμένο κατά πλάτος. Η ιδιοσυχνότητα είναι φέρουσα συνιστώσα, της οποίας το πλάτος διαμορφώνεται (μεταβάλλεται). Ο ρυθμός κρούσης

του φθαρμένου στοιχείου κύλισης στις επιφάνειες των δακτυλίων ($1/2BSF$) και η ταχύτητα περιστροφής του κλωβού ($1/FTF$) (Fundamentaltrainfrequency) (Παράρτημα Ε), στον οποίο συγκρατούνται τα στοιχεία κύλισης, διαμορφώνουν περιοδικά το πλάτος της φέρουσας συνιστώσας. Δηλαδή, το μετρούμενο σήμα είναι διπλά διαμορφωμένο κατά πλάτος από: (α) τη συχνότητα $2BSF$ που είναι υπεύθυνη για την επανεμφάνιση της ιδιοσυχνότητας μετά από κάθε κρούση (Σχήμα 3.14, κόκκινη κυματομορφή) και (β) τη συχνότητα FTF , που είναι υπεύθυνη για τις μεταβολές του πλάτους των κρουστικών παλμών συναρτήσει της θέσης κρούσης (γράφημα 3.8.1, μπλε κυματομορφή). Το φθαρμένο στοιχείο κύλισης μετακινείται εντός και εκτός της ζώνης φόρτισης. Οι δυνάμεις που εφαρμόζονται στην περιοχή της κρούσης δεν είναι οι ίδιες καθώς ο κλωβός που φέρει το φθαρμένο στοιχείο κύλισης μεταφέρει τη φθορά εντός και εκτός της ζώνης φόρτισης. Έτσι, η ένταση των κρούσεων είναι μέγιστη κοντά στο κέντρο της ζώνης φόρτισης και μειώνεται προς τα άκρα της, ενώ εκτός της ζώνης φόρτισης οι κρούσεις είναι ασθενείς.

Κυματομορφή απόκρισης

Η απόκριση ενός ρουλεμάν με φθαρμένο στοιχείο κύλισης είναι διπλά διαμορφωμένη κατά πλάτος (Σχήμα 3.14). Η διεγερόμενη από τις κρούσεις ιδιοσυχνότητα f_n είναι η συνιστώσα, της οποίας το πλάτος διαμορφώνεται. Οι ταλαντώσεις που παράγονται από: (α) τον ρυθμό κρούσης του φθαρμένου στοιχείου κύλισης στις επιφάνειες των δακτυλίων του ρουλεμάν και (β) τη συχνότητα περιστροφής του κλωβού είναι οι συνιστώσες που διαμορφώνουν περιοδικά το πλάτος. Έτσι, η χρονική κυματομορφή του μετρούμενου σήματος αποτελείται από μια σειρά από αποσβενόμενους κρουστικούς παλμούς διαφορετικής έντασης ανάλογα με το σημείο που συμβαίνει η κρούση. Κάθε κρουστικός παλμός εμφανίζει περιοδικότητα/τες ίση/ες με την/ις ιδιοσυχνότητα/ες $1/f_n$ που διεγείρεται/ονται (Σχήμα 3.14).



Σχήμα 3.14: Απόκριση ρουλεμάν με φθαρμένα στοιχεία κύλισης

3.9 ΑΝΕΠΑΡΚΗΣ ΛΙΠΑΝΣΗ ΡΟΥΛΕΜΑΝ

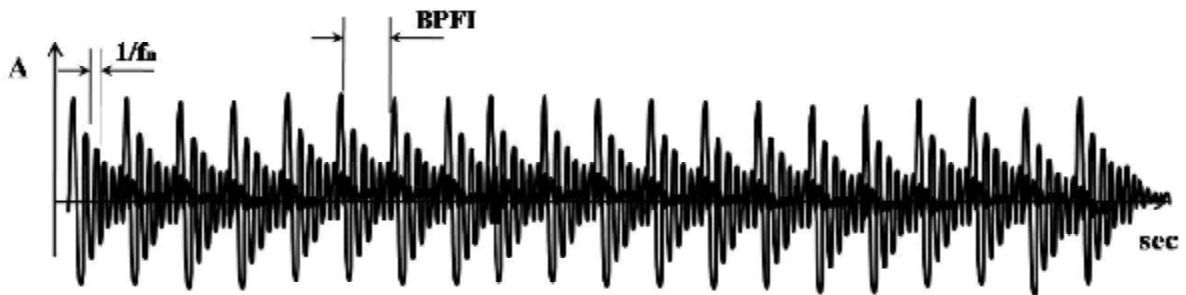
Γενικά

Η ανεπαρκής λίπανση σε ένα ρουλεμάν προκαλεί κρούσεις και φθορά.

Μηχανισμός βλάβης και κυματομορφή απόκρισης

Λόγω της ανεπαρκούς λίπανσης το στρώμα λιπαντικού γίνεται λεπτότερο ανάμεσα στα στοιχεία κύλισης και τις μεταλλικές επιφάνειες του εξωτερικού και εσωτερικού δακτυλίου. Λόγω βαρύτητας και των συνθηκών που επικρατούν στο ρουλεμάν, το στρώμα λιπαντικού είναι λεπτότερο ανάμεσα στα στοιχεία κύλισης και τον εσωτερικό δακτύλιο. Έτσι, τα στοιχεία κύλισης κτυπούν την μεταλλική επιφάνεια του εσωτερικού δακτυλίου. Κάθε κρούση διεγείρει μια ιδιοσυχνότητα του ρουλεμάν ή της μηχανής. Επομένως, πηγή των κρούσεων είναι η ταλάντωση με περιοδικότητα $1/BPFL$.

Η απόκριση ενός ρουλεμάν με ανεπαρκή λίπανση είναι διαμορφωμένη κατά πλάτος (Σχήμα 3.15). Η διεγερόμενη ιδιοσυχνότητα f_n από τις κρούσεις είναι η συνιστώσα, της οποίας το πλάτος διαμορφώνεται, και η ταλάντωση που παράγεται από την κρούση των στοιχείων κύλισης με την επιφάνεια του εσωτερικού δακτυλίου είναι η συνιστώσα που διαμορφώνει περιοδικά το πλάτος. Έτσι, η χρονική κυματομορφή του μετρούμενου σήματος αποτελείται από μια σειρά από κρουστικούς παλμούς ίσης σχεδόν έντασης. Κάθε κρουστικός παλμός εμφανίζει περιοδικότητα ίση με την ιδιοσυχνότητα που διεγείρεται ($1/f_n$) (Σχήμα 3.15).



Σχήμα 3.15: Απόκριση σήματος από ρουλεμάν με ανεπαρκή λίπανση.

4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΟ ANSYS

4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ ANSYS

Το πρόγραμμα Ansys, είναι ένα πρόγραμμα το οποίο υποστηρίζει μηχανολογικές προσομοιώσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς και λειτουργίας των προϊόντων που σχεδιάζουμε κάτω από πραγματικές συνθήκες. Η εταιρεία εξελίσσει συνεχώς λύσεις προσομοίωσης, αναπτύσσοντας και αποκτώντας καινοτόμες τεχνολογίες τις οποίες ενσωματώνει σε μία ενοποιημένη πλατφόρμα προσομοίωσης που επιτρέπει στους μηχανικούς να εκτελούν πολύπλοκες προσομοιώσεις που περιλαμβάνουν την αλληλεπίδραση με ανώτερη φυσική. Επιπλέον, το πρόγραμμα παρέχει συστήματα υπηρεσιών που ελέγχουν τις διαδικασίες προσομοίωσης και τα δεδομένα – οι μηχανικοί και όσοι αναπτύσσουν προϊόντα με το πρόγραμμα αυτό, περνούν τον περισσότερο χρόνο εστιάζοντας στο σχεδιασμό και τη βελτίωση των προϊόντων παρά στην αναζήτηση δεδομένων.

Η εταιρεία ιδρύθηκε το 1970 και απασχολεί περίπου 2600 υπαλλήλους, οι περισσότεροι από τους οποίους είναι εξειδικευμένοι μηχανικοί σε πεδία όπως ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, υπολογιστική ρευστοδυναμική, ηλεκτρονική και ηλεκτρομαγνητική και βελτιστοποίηση σχεδιασμού. Το προσωπικό αποτελείται από τους περισσότερους κατόχους master και Ph.D μηχανικούς από οποιονδήποτε άλλο πάροχο προγραμμάτων προσομοίωσης. Η Ansys επανεπενδύει το 15% των κερδών της κάθε χρόνο στην συνεχή τελειοποίηση του προϊόντος της.

Το λογισμικό Ansys δίνει στον χρήστη την δυνατότητα υλοποίησης:

- Ø **1^ο στάδιο:** Κατασκευή της γεωμετρίας
- Ø **2^ο στάδιο:** Ορισμό των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων των υλικών και επιλογή του είδους των πεπερασμένων στοιχείων.
- Ø **3^ο στάδιο:** Διακριτοποίηση της γεωμετρίας σε πεπερασμένα στοιχεία και επιβολή των οριακών συνθηκών.
- Ø **4^ο στάδιο:** Επιλογή του τρόπου επίλυσης του προβλήματος (γραμμικό- μη γραμμικό-μεταβατικό-υπολογισμός ιδιοσυχνοτήτωνκ.α.) και επίλυση

Χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι κάποια από τα προαναφερθέντα στάδια δεν μπορούν να υλοποιηθούν σε άλλα περιβάλλοντα και τα αποτελέσματα τους να εισαχθούν, στη συνέχεια, στο Ansys. Τα στάδια μπορούν να υλοποιηθούν με πολλές μεθοδολογίες εντός του περιβάλλοντος του Ansys. Ενδεικτικά θα αναφέρουμε ορισμένες επιλογές ώστε να γίνει κατανοητή η πολύπλευρη αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων.

1^ο στάδιο: Κατασκευή γεωμετρίας

Η κατασκευή της γεωμετρίας μέσα στο περιβάλλον του ANSYS μπορεί να γίνει, γενικά, με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι να δημιουργηθούν διαδοχικά σημεία (Keypoints), γραμμές (lines), επιφάνειες (areas) και τέλος όγκοι (volumes). Ο δεύτερος τρόπος είναι να κατασκευασθούν όγκοι ή επιφάνειες είτε από σημεία, χωρίς την δημιουργία γραμμών, είτε απευθείας ορίζοντας τις διαστάσεις τους. Το τελευταίο

μπορεί να φανεί πολύ εύχρηστο σε περιπτώσεις που θέλουμε να κατασκευάσουμε γνωστά γεωμετρικά σχήματα, όπως κύκλους, κυλίνδρους, ορθογώνια, ορθογώνια παραλληλεπίπεδα κ.α.

Στην περίπτωση που η γεωμετρία δημιουργηθεί σε άλλο σχεδιαστικό περιβάλλον η εισαγωγή της ANSYS γίνεται με την μορφή αρχείου *.igs. Τέλος η κατασκευή της γεωμετρίας μπορεί να γίνει στον προεπεξεργαστή κάποιου άλλου προγράμματος που δίνει αρχείο εισόδου για περιβάλλον ANSYS. Το αρχείο αυτό ονομάζεται ουδέτερο αρχείο. Η επιλογή της κατασκευής της γεωμετρίας σε άλλο περιβάλλον μπορεί να είναι πολύεγκυστική, ιδιαίτερα για όσους γνωρίζουν κάποιο σχεδιαστικό πρόγραμμα, αλλά πρέπει να δείχνουμε ιδιαίτερη προσοχή κατά την επιλογή της παραμέτρου της ανοχής (tolerance) όταν πρόκειται για *.igs, και να επιβεβαιώνουμε ότι όλα τα στοιχεία που μας ενδιαφέρουν έχουν εισαχθεί σωστά, διαφορετικά πρέπει να γίνεται επιδιόρθωση της γεωμετρίας.

Ένα συνηθισμένο πρόβλημα από την εισαγωγή γεωμετρίας στο ANSYS από εξωτερικό πρόγραμμα είναι ότι το μοντέλο μπορεί να εμφανίζει το φαινόμενο ύπαρξης διπλών γραμμών η σημείων. Τότε πρέπει να γίνει συγχώνευση αυτών με την εντολή merge με την οποία θα ασχοληθούμε αργότερα. Τέλος μπορεί παρότι στο ουδέτερο αρχείο η γεωμετρία είναι με τη μορφή όγκου όταν γίνει εισαγωγή να μην είναι σωστή ή να λείπουν επιφάνειες, τότε πρέπει να γίνει επιδιόρθωση.

2^ο στάδιο: Ορισμός των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων των υλικών και επιλογή του είδους των πεπερασμένων στοιχείων

Οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των υλικών είναι μονοσήμαντα ορισμένες αλλά θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή όσον αφορά τις μονάδες. Πρέπει να γνωρίζουμε ότι όλες οι μονάδες είναι στο SI εκτός αν τις ορίσουμε εμείς διαφορετικά. Δεν συνιστάται να γίνει αλλαγή μονάδων γιατί υπάρχει σημαντικός κίνδυνος λάθους. Οι ιδιότητες που πρέπει να οριστούν εξαρτώνται από την ιδιαιτερότητα των υλικών αλλά και από το είδος της επίλυσης που μας ενδιαφέρει να κάνουμε.

Η επιλογή του είδους των πεπερασμένων στοιχείων εξαρτάται από την επίλυση που θα κάνουμε, αυτό δεν σημαίνει ότι δεν έχουμε τη δυνατότητα αλλαγής τους στη συνέχεια. Το σημαντικό είναι να έχουμε καταλήξει στη διάσταση τους και στο είδος της καταπόνησης.

3^ο στάδιο: Διακριτοποίηση της γεωμετρίας σε πεπερασμένα στοιχεία και επιβολή των οριακών συνθηκών.

Αφού έχει γίνει η επιλογή του στοιχείου μένει η διακριτοποίηση της γεωμετρίας. Η πιο απλή δυνατότητα είναι να γίνει χρησιμοποιώντας τις επιλογές που προσφέρει το πρόγραμμα. Οι επιλογές αυτές είναι αυτόματη δημιουργία πλέγματος (δεν προτείνεται στις περισσότερες περιπτώσεις), ορισμός διαμερίσεων σε γραμμές η ορισμός μεγέθους στοιχείων (μέγιστο μέγεθος πλευράς η ακμής) καθώς και η επιλογή του smartsize η οποία κάνει προσαρμογή του πλέγματος στη γεωμετρία, δηλαδή μικραίνει τα στοιχεία σε περιοχές απότομης αλλαγής της γεωμετρίας και το αραιώνει στο εσωτερικό των επιφανειών και των όγκων όπου δεν υπάρχει ιδιαίτερα ανάγκη για λεπτή διαμέριση. Αφού καταλήξουμε στις παραπάνω επιλογές ακολουθεί η δημιουργία του πλέγματος.

Γενικά οι δυνατότητες του προγράμματος είναι πάρα πολλές και μπορούν να δώσουν πάρα πολλά και πολύ διαφορετικά μεταξύ τους αποτελέσματα ανάλογα με τις παραμέτρους που θα ορίσουμε. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορεί το πρόγραμμα να

γνωρίζει τις ιδιαιτερότητες του προβλήματος του προβλήματος που καλούμαστε να επιλύσουμε, την ακρίβεια ή και το χρόνο επίλυσης που επιθυμούμε, άρα πρέπει να επέμβουμε στις προεπιλογές που έχει.

Η επιβολή των οριακών συνθηκών μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους. Οι διαφοροποιήσεις εντοπίζονται στα σημεία όπου μπορούν αυτές να επιβληθούν. Μπορούν να επιβληθούν είτε σε γεωμετρικά στοιχεία (σημεία, γραμμές, επιφάνειες) είτε σε στοιχεία του πλέγματος (κόμβους, στοιχεία). Όταν επιβάλλονται σε γεωμετρικά στοιχεία γίνεται αυτόματα η μεταφορά τους σε στοιχεία του πλέγματος πριν από την επίλυση.

4^ο στάδιο: Επιλογή του τρόπου επίλυσης του προβλήματος (γραμμικό-μη γραμμικό-μεταβατικό-υπολογισμός ιδιοσυχνοτήτων κ.α.) και επίλυση.

Η επιλογή του τρόπου επίλυσης έχει να κάνει με τις απαιτήσεις του προβλήματος. Συνήθως μια γραμμική στατική ανάλυση μικρών μετατοπίσεων καλύπτει τις ανάγκες μας. Παρόλα αυτά είναι δυνατό να θέλουμε να διερευνήσουμε κάποιο μεταβατικό φαινόμενο ή τα υλικά που χρησιμοποιούνται να έχουν μη γραμμική συμπεριφορά. Ακόμα συμβαίνει συχνά όταν αντιμετωπίζουμε προβλήματα λυγισμού και πτύχωσης τα οποία είναι μη γραμμικά.

Όσον αφορά την επίλυση προσφέρονται πολλές δυνατότητες οι οποίες έχουν να κάνουν με διαφορετικούς αλγόριθμους επίλυσης, που δεν θα δώσουν διαφορετικό αποτέλεσμα, αλλά θα έχουν διαφορετικό χρόνο επίλυσης. Υπάρχουν επιλύτες που χρησιμοποιούν περισσότερο τον σκληρό δίσκο για ενδιάμεσα αρχεία ή την φυσική μνήμη. Είναι προφανές ότι αφού η ταχύτητα της μνήμης είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή του σκληρού δίσκου αυτή η μέθοδος είναι και πιο γρήγορη. Υπάρχει όμως η περίπτωση να μην υπάρχει διαθέσιμη η απαιτούμενη για το πρόβλημα φυσική μνήμη ή για ορισμένες ειδικές περιπτώσεις να μην είναι όλοι οι επιλύτες ικανοί να αντιμετωπίσουν τη φύση του προβλήματος.

5^ο στάδιο: Ανάγνωση και γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων.

Τα αποτελέσματα μετά από την επίλυση καταγράφονται σε ένα αρχείο (*.rst). Η ανάγνωση τους είναι ένα ζήτημα που χρίζει ιδιαίτερης προσοχής. Υπάρχουν πολλοί τρόποι να δει κάποιος τα αποτελέσματα. Ενδεικτικά αναφέρουμε τα αποτελέσματα στους κόμβους (NodalSolution) και τα αποτελέσματα στα στοιχεία (ElementSolution). Στους κόμβους δίνεται η τιμή του μέσου όρου που προκύπτει από τα πεπερασμένα στοιχεία έχουμε μία τιμή ανά στοιχείο.

Ακόμα, υπάρχει και η επιλογή του ElementTable μέσω του οποίου μπορούμε να κάνουμε ομαλοποίηση των αποτελεσμάτων βγάζοντας μέσους όρους (ElementTableAverage). Η τελευταία επιλογή προτείνεται σε περιπτώσεις όπου έχουμε συγκεντρωμένα φορτία και μπορεί να δημιουργηθούν τοπικά μέγιστα που δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

4.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΟ ANSYS-WORKBENCH

Το πρόγραμμα Ansys-WorkBench της εταιρίας Ansys Inc. με έδρα τις Η.Π.Α είναι ένας κώδικας που επιτρέπει την επίλυση μοντέλων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Χρησιμοποιείται στα περισσότερα πανεπιστημιακά

ιδρύματα της Ευρώπης και περισσότερο της Αμερικής, καθώς και σε βιομηχανίες που επιλύουν αντίστοιχα προβλήματα. Τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων, ένα από τα οποία είναι και το Ansys-WorkBench, στην αρχική τους μορφή είχαν μόνο γραμμή εντολών όπου γίνονταν όλες οι ενέργειες που ήθελε ο χρήστης. Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν τα παραθυρικά περιβάλλοντα και έτσι δόθηκε η δυνατότητα να κατασκευάζονται μοντέλα με τη χρήση αυτών πολύ πιο απλά και εύκολα. Για την παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται η έκδοση Ansys- WorkBench 14.5. Το Ansys-WorkBench, Inc είναι ένα λογισμικό προσομοίωσης προβλημάτων για μηχανικούς (CAE, ComputedAidedEngineering). Το λογισμικό Ansys-WorkBench είναι δυνατό να μοντελοποιήσει προβλήματα οποιοδήποτε σχεδόν μηχανολογικό πρόβλημα και χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανικών εταιρειών για παράδειγμα σε εταιρείες αυτοκινητοβιομηχανίας και αεροναυπηγικής.

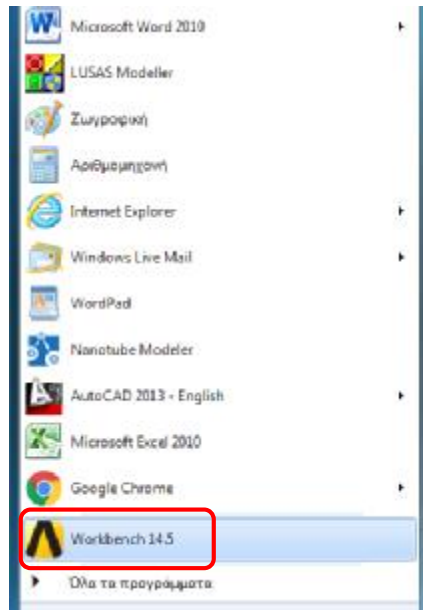
Με τη βοήθεια του προγράμματος Ansys-WorkBench μοντελοποιείται οποιαδήποτε κατασκευή με πεπερασμένα στοιχεία. Οι εργασίες που θα εκτελεστούν στο Ansys-WorkBench στα πλαίσια της επίλυσης του προβλήματος, διαχωρίζονται στα εξής διακριτά στάδια:

1. Επιλογή είδους ανάλυσης
2. Ορισμός των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων των υλικών.
3. Κατασκευή της γεωμετρίας του εξεταζόμενου δοκιμίου.
4. Ορισμός συνοριακών συνθηκών (στηρίξεων, επαφής, φορτίων κλπ.)
5. Επιλογή του είδους των πεπερασμένων στοιχείων και διακριτοποίηση της γεωμετρίας σε πεπερασμένα στοιχεία.
6. Επιλογή του τρόπου επίλυσης του προβλήματος (γραμμικό, μη γραμμικό, μεταβατικό, υπολογισμός ιδιοσυχνοτήτων) και επίλυση.
7. Ανάγνωση και γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων.

παρακάτω γίνεται προσπάθεια να εξηγηθεί λεπτομερώς πως δημιουργείται ένα πλήρες μοντέλο στατικής ανάλυσης ενός ένσφαιρου ρουλεμάν. Προφανώς η ίδια διαδικασία ακολουθείται για την μοντελοποίηση ενός βαρελοειδούς ρουλεμάν.

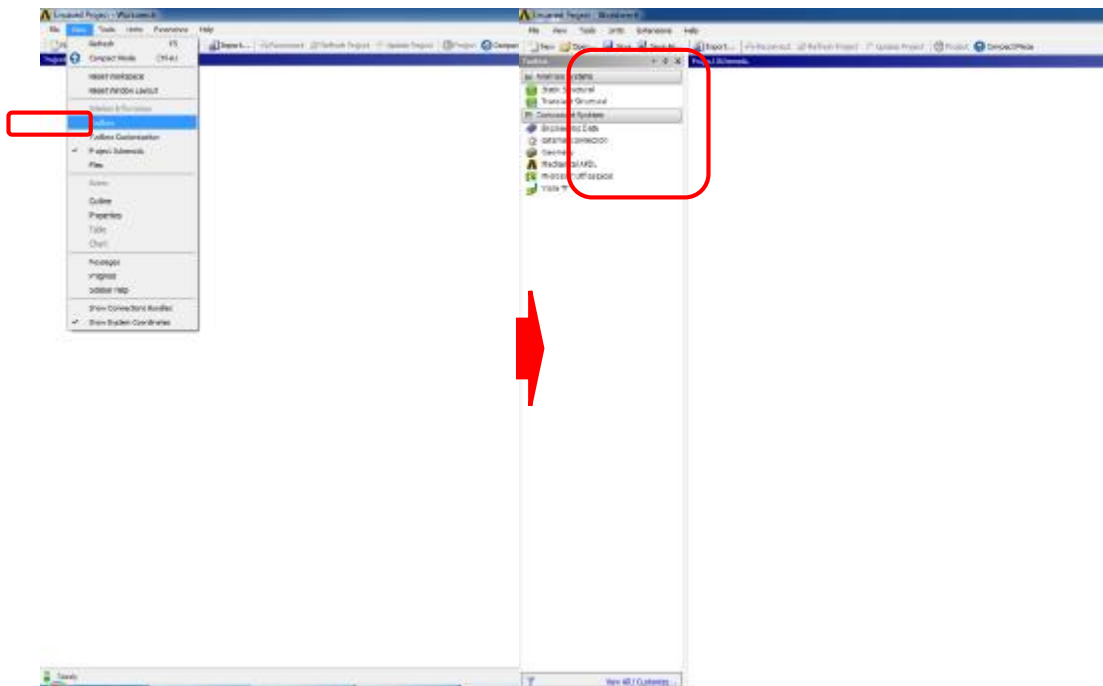
4.3ΒΗΜΑΤΑ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣΣΤΟ ANSYS-WORKBENCH

Από το αρχικό μενού επιλέγουμε την έναρξη του προγράμματος (Σχήμα 4.1).



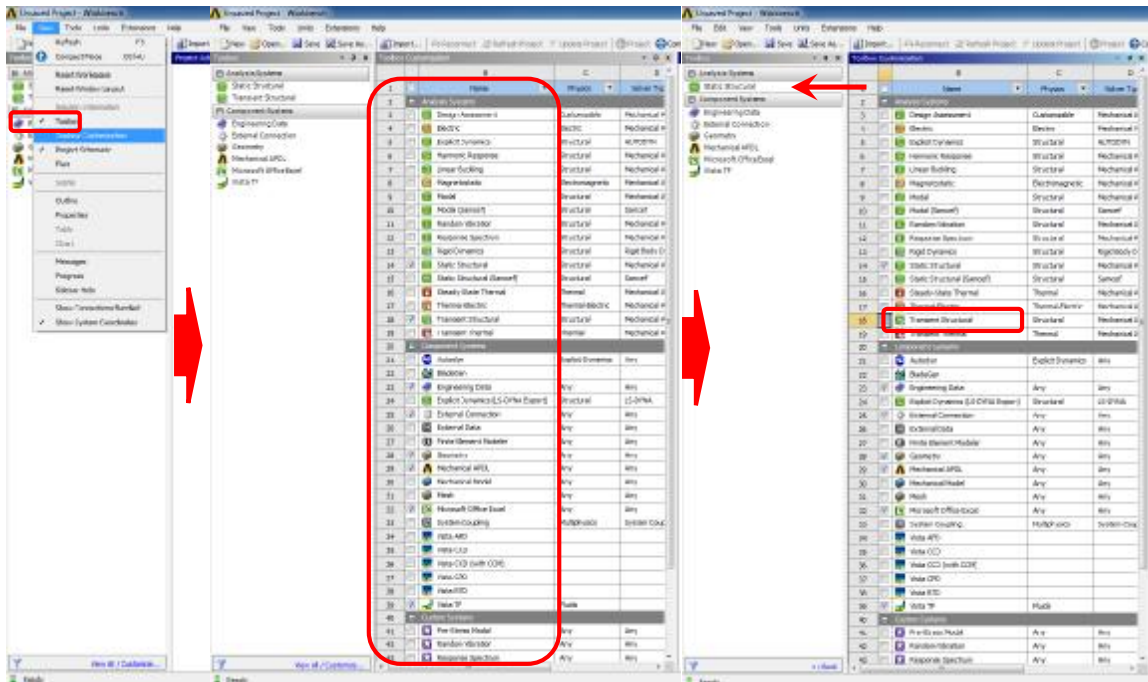
Σχήμα 4.1 Βήμα 1 διαδικασίας μοντελοποίησης

Από το βασικό μενού του προγράμματος επιλέγουμε το άνοιγμα των εργαλειοθηκών και έτσι εμφανίζεται το βασικό μενού (Σχήμα 4.2).



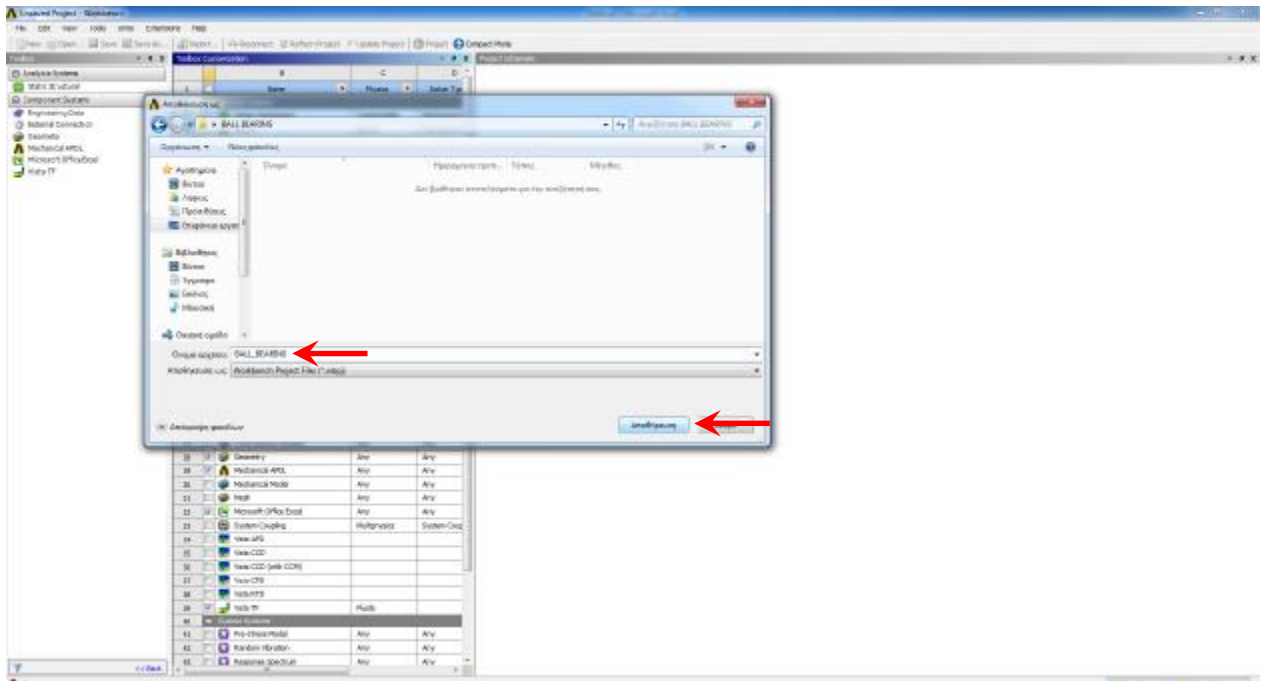
Σχήμα 4.2: Βήμα 2 διαδικασίας μοντελοποίησης

Από το βασικό μενού επιλέγουμε τον εμπλουτισμό της εργαλειοθήκης προκειμένου να εμφανιστούν όλες οι πιθανές επιλογές ανάλυσης (Σχήμα 4.3). Παρατηρούμε ότι αφού ξεκλικάρουμε την επιλογή «TransientStructural» (δυναμική δομική), στο αριστερό άκρο παραμένει μόνο η επιλογή «StaticStructural» (στατική δομική) που επιθυμούμε να εκτελέσουμε.

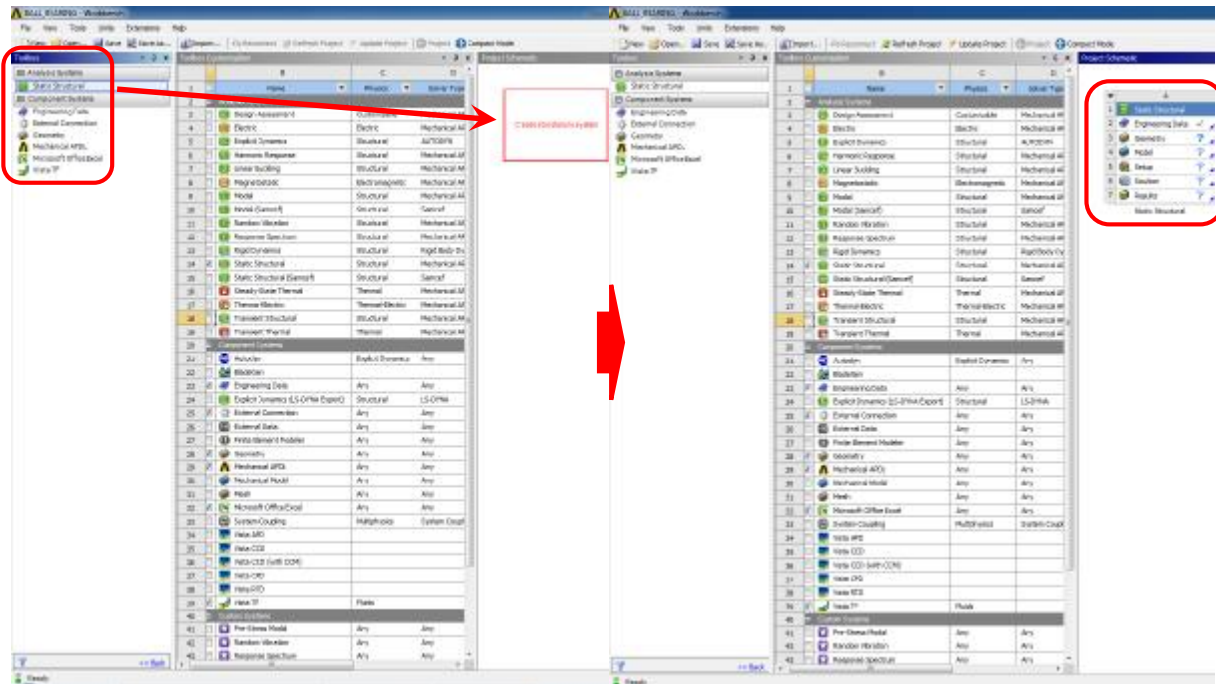


Σχήμα 4.3:Βήμα 3 διαδικασίας μοντελοποίησης

Αφού σώσουμε τη project ως “ball_bearing(Σχήμα 4.4) σέρνουμε με το ποντίκι (draganddrop) το αριστερό μενού στη δεξιά περιοχή εργασίας (Σχήμα 4.5).Από το μενού που δημιουργείτε πλέον στα δεξιά του προγράμματος μπορούμε να ξεκινήσουμε το μοντέλο καθώς και να ελέγξουμε πλήρως και να τροποποιήσουμε όλα τα στάδια μοντελοποίησης.

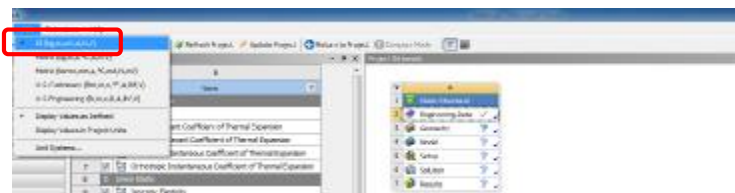


Σχήμα 4.4:Βήμα 4 διαδικασίας μοντελοποίησης



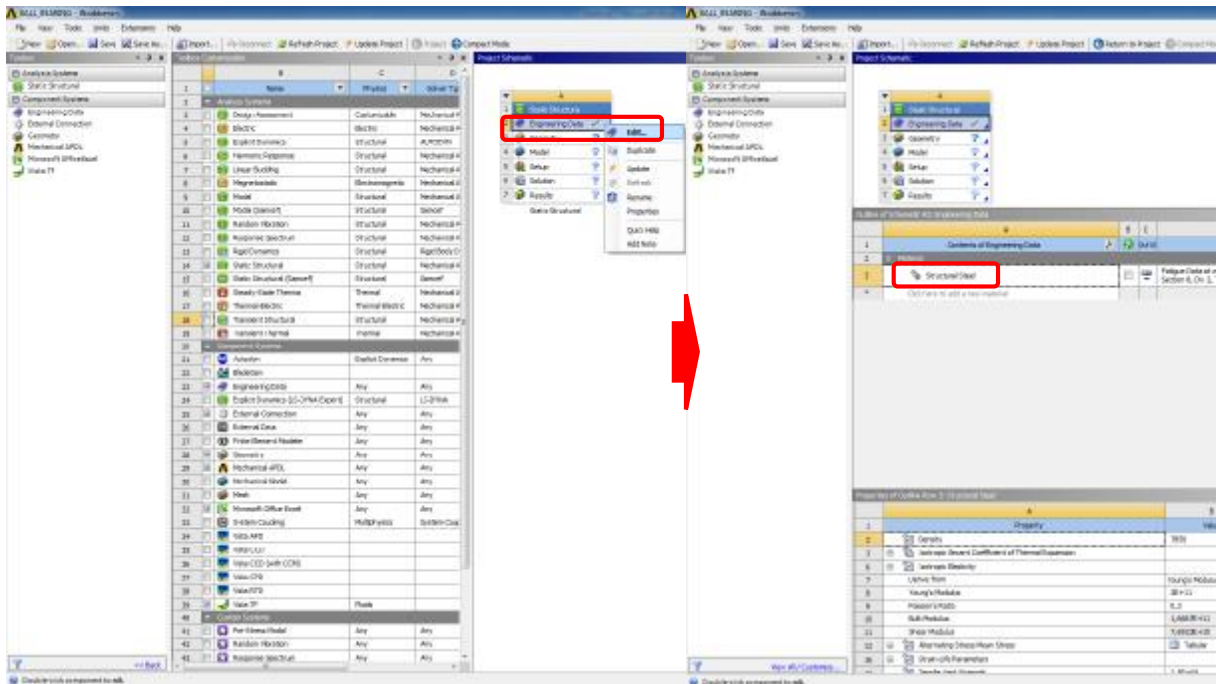
Σχήμα 4.5: Βήμα 5 διαδικασίας μοντελοποίησης

Εξ αρχής, δε ξεκινάμε να ορίσουμε ως μονάδες ανάλυσης αυτές του διεθνούς συστήματος SI (Σχήμα 4.6).



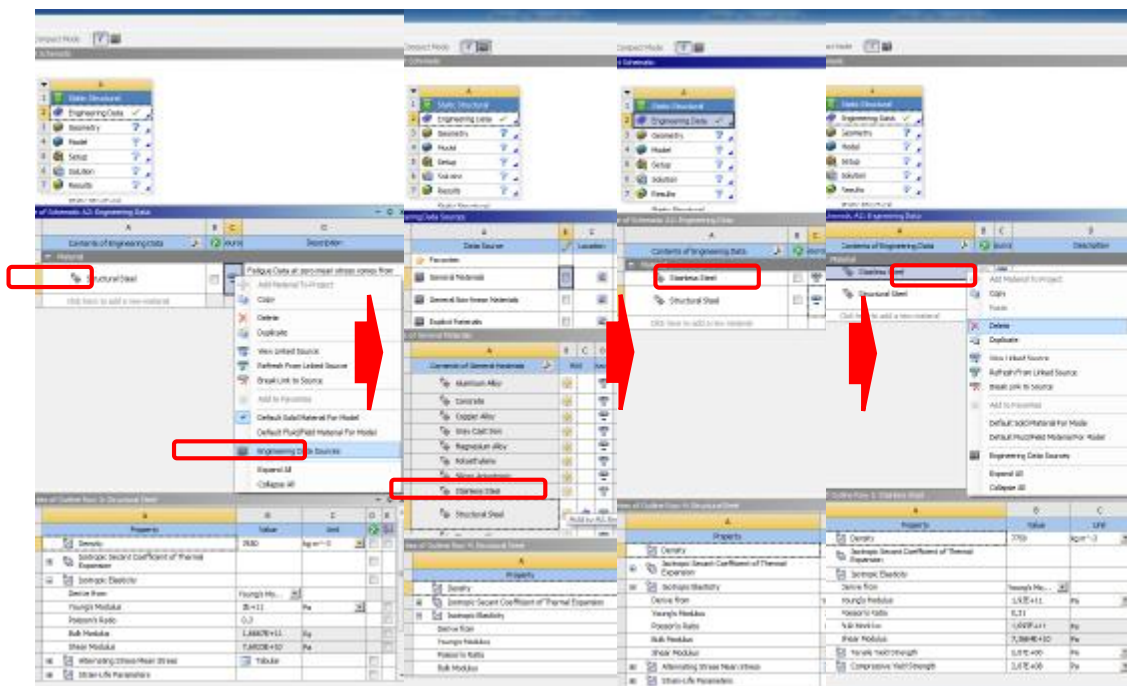
Σχήμα 4.6: Βήμα 6 διαδικασίας μοντελοποίησης

Πηγαίνουμε στη γραμμή «EngineeringData» προκειμένου να μεταβάλουμε αν το επιθυμούμε τις ιδιότητες των υλικών που θα χρησιμοποιήσουμε (Σχήμα 4.7). Κάνοντας «Edit» μπορούμε να δούμε όλες τις επιμέρους ιδιότητες ενός δομικού χάλυβα «StructuralSteel» όπως αυτές υπάρχουν στη βιβλιοθήκη του προβλήματος.



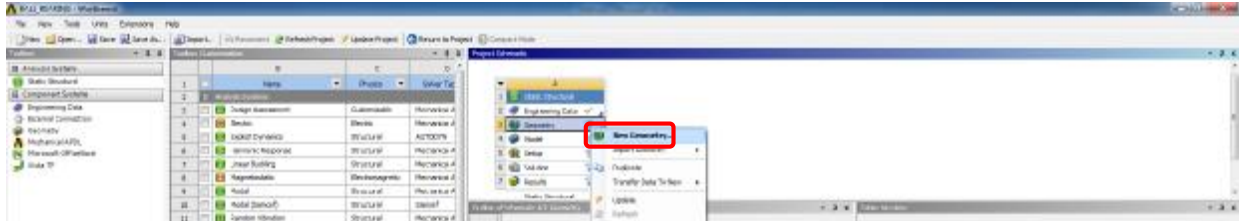
Σχήμα 4.7: Βήμα 7 διαδικασίας μοντελοποίησης

Αν το επιθυμούμε μπορούμε να φορτώσουμε και άλλα υλικά από την βιβλιοθήκη για μελλοντική επιλογή και χρήση. Στο Σχήμα 4.8 φαίνεται πως φορτώνεται από την βιβλιοθήκη το υλικό «StainlessSteel» (ανοξειδωτος χάλυβας) αλλά και πως σβήνεται τελικά αυτό από τις επιλογές μας για να παραμείνει ως μοναδικό υλικό το «StructuralSteel» (δομικός χάλυβας).

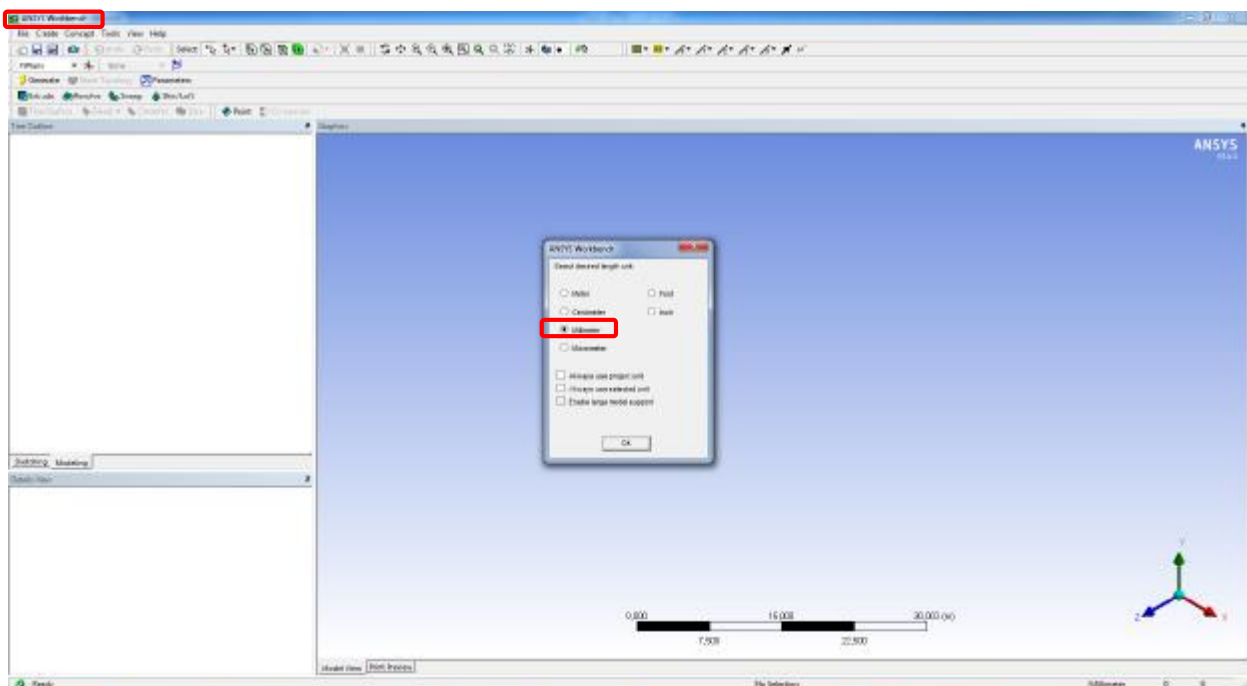


Σχήμα 4.8: Βήμα 8 διαδικασίας μοντελοποίησης

Στη συνέχεια από το δεξιό μενού μοντελοποίησης επιλέγουμε να δημιουργήσουμε «νέα γεωμετρία» (Newgeometry) (Σχήμα 4.9). Με τον τρόπο αυτό ανοίγει το υποπρόγραμμα σχεδιασμού και μεταβολής γεωμετρίας το οποίο, για λόγους ευκολίας μηχανολογικής σχεδίασης, το θέτουμε να δουλεύει σε χιλιοστά (Σχήμα 4.10).

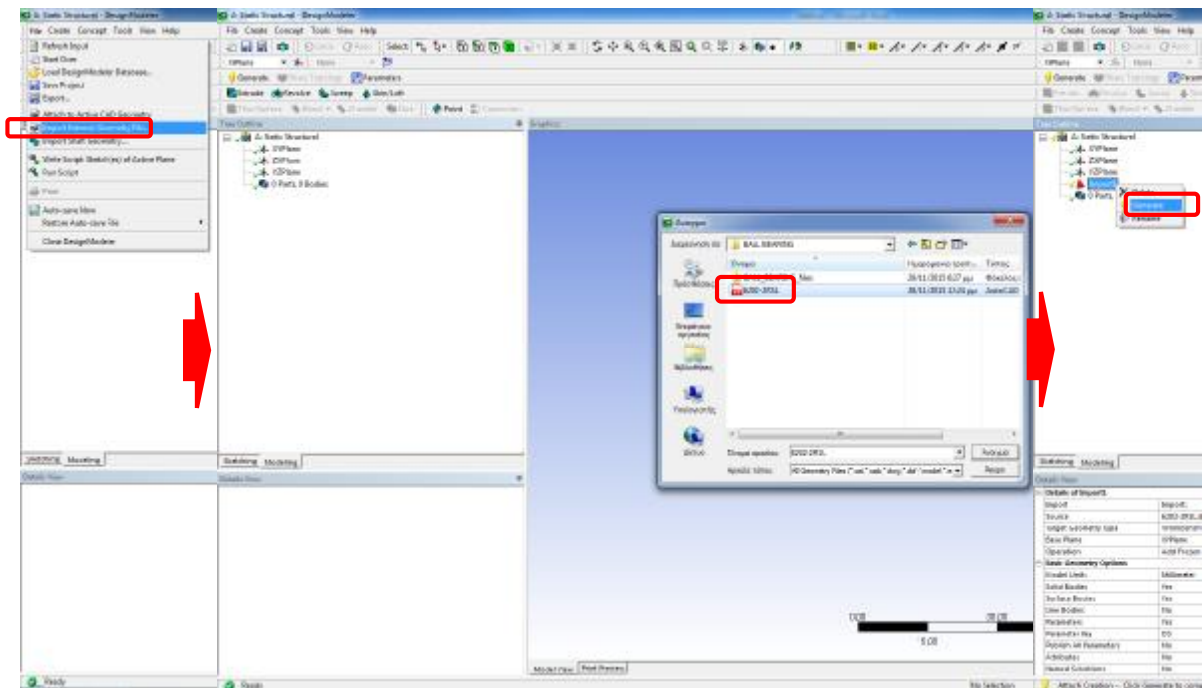


Σχήμα 4.9 Βήμα 9 διαδικασίας μοντελοποίησης



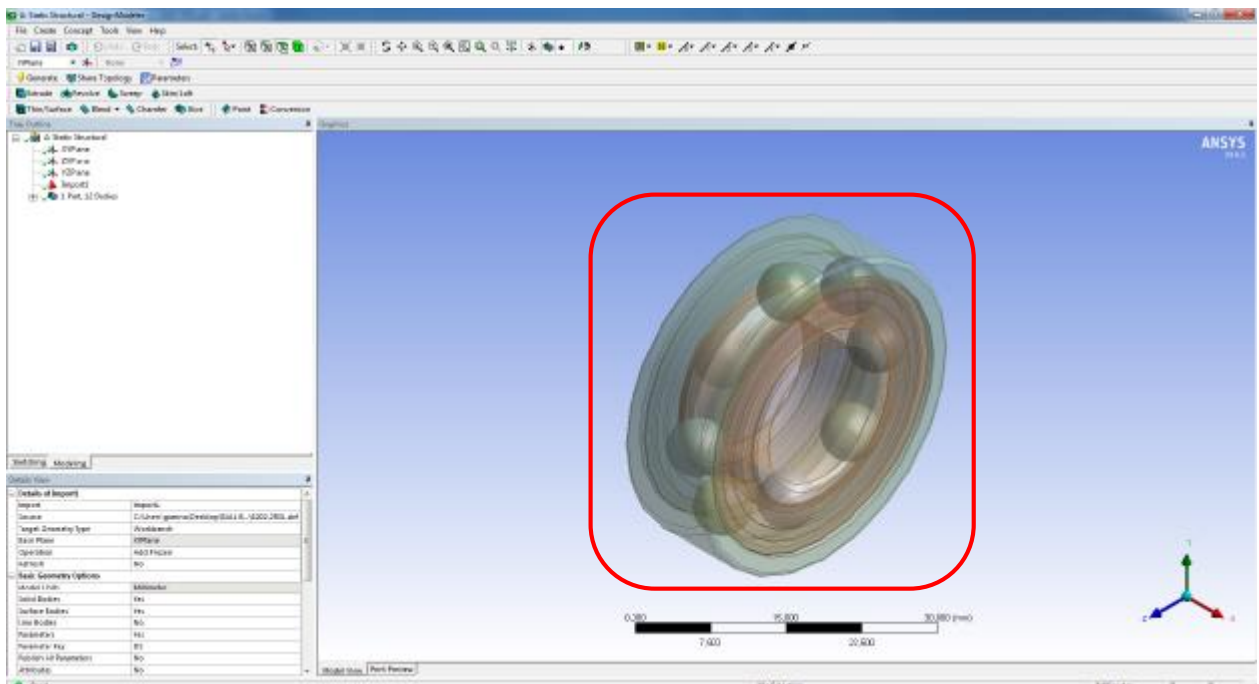
Σχήμα 4.10: Βήμα 10 διαδικασίας μοντελοποίησης

Από το πρόγραμμα αυτό εισάγουμε (Import) έτοιμη τη γεωμετρία ρουλεμάν που επιθυμούμε να μοντελοποιήσουμε από ένα αρχείο AutoCAD προέκτασης dxf (Σχήμα 4.11).



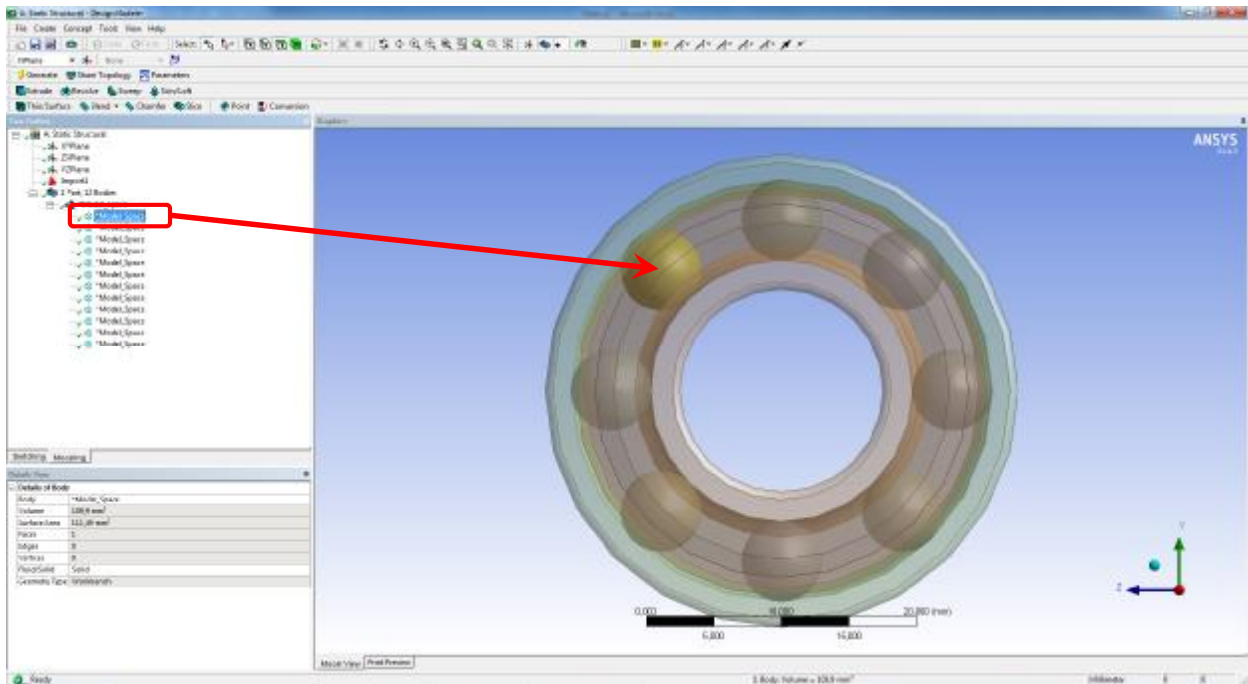
Σχήμα 4.11:Βήμα 11 διαδικασίας μοντελοποίησης

Με την εντολή «Generate» εμφανίζεται η γεωμετρία σε mm(Σχήμα 4.12).



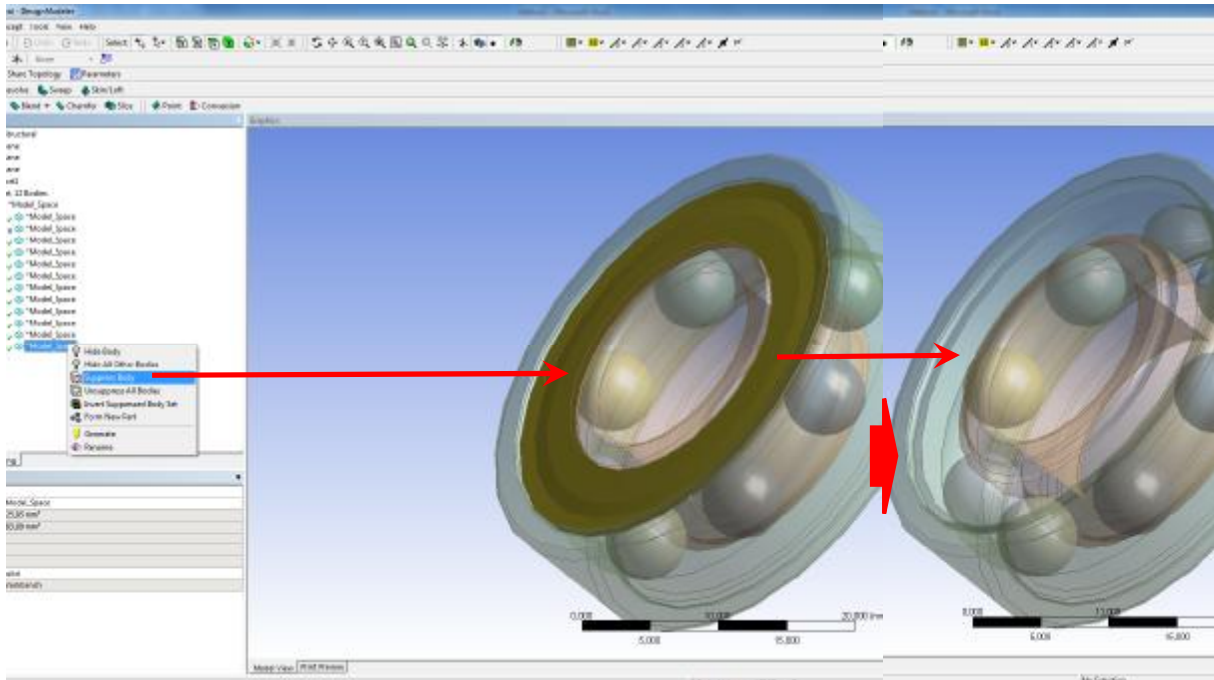
Σχήμα 4.12:Βήμα 12 διαδικασίας μοντελοποίησης

Από το αριστερό μενού μπορούμε να επιλέξουμε οπουδήποτε μέρος (Part) του ρουλεμάν που επιθυμούμε (Σχήμα 4.13).



Σχήμα 4.13:Βήμα 13 διαδικασίας μοντελοποίησης

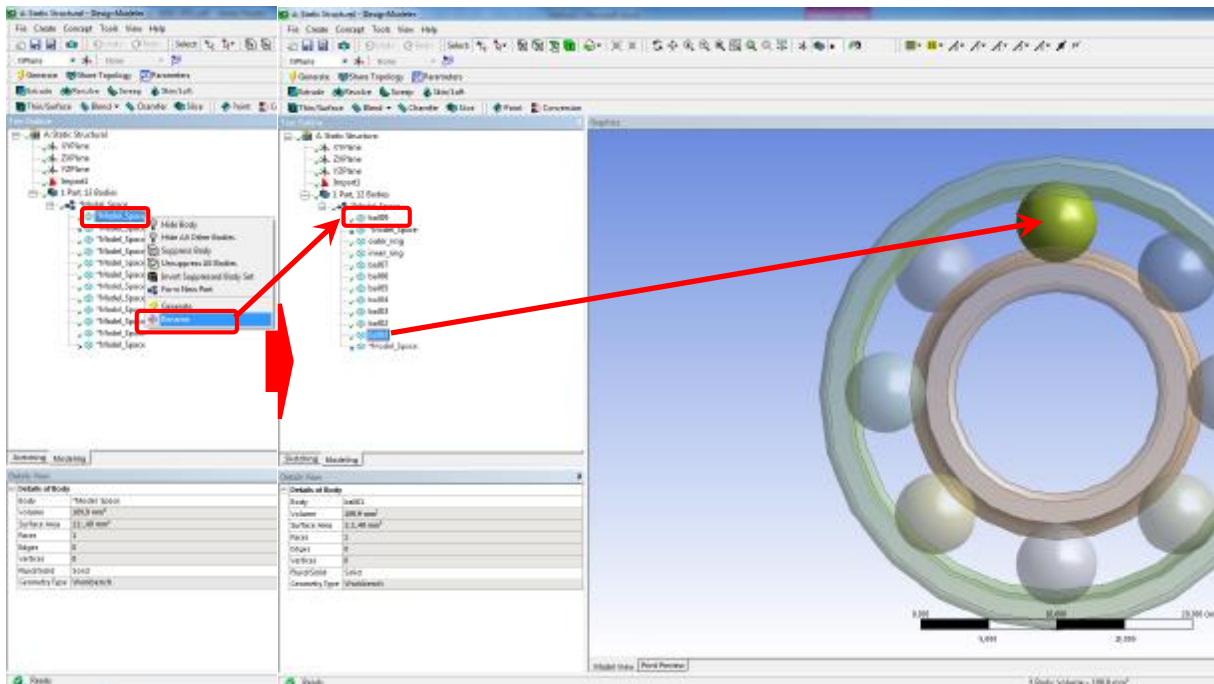
Από το αριστερό μενού αποκρύπτομαι τα δύο πλευρικά στεγανοποιητικά του ρουλεμάν (Suppress) αφού αυτά δε πρόκειται να παίξουν κάποιο ρόλο στη στατικής ανάλυση του ρουλεμάν (Σχήμα 4.14).



Σχήμα 4.14:Βήμα 14 διαδικασίας μοντελοποίησης

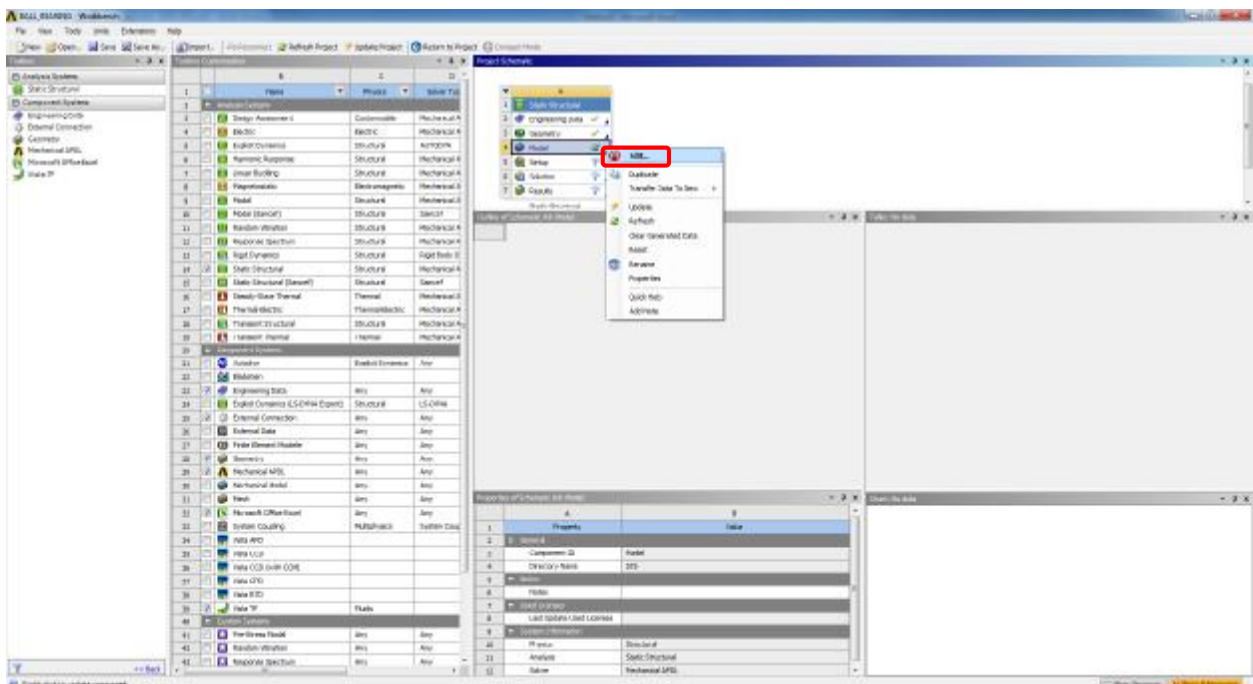
Για λόγους διευκόλυνσης της διαδικασίας μοντελοποίησης κάνουμε, από το αριστερό μενού, μετονομασία (Rename) έκαστου μέρους του ρουλεμάν π.χ. μία

από τις σφαίρες τη μετονομάζουμε σε ball08ενώ το εσωτερικό και τον εξωτερικό δακτύλιο του ρουλεμάν σε inner_ring και outer_ring, αντιστοίχως(Σχήμα 4.15).

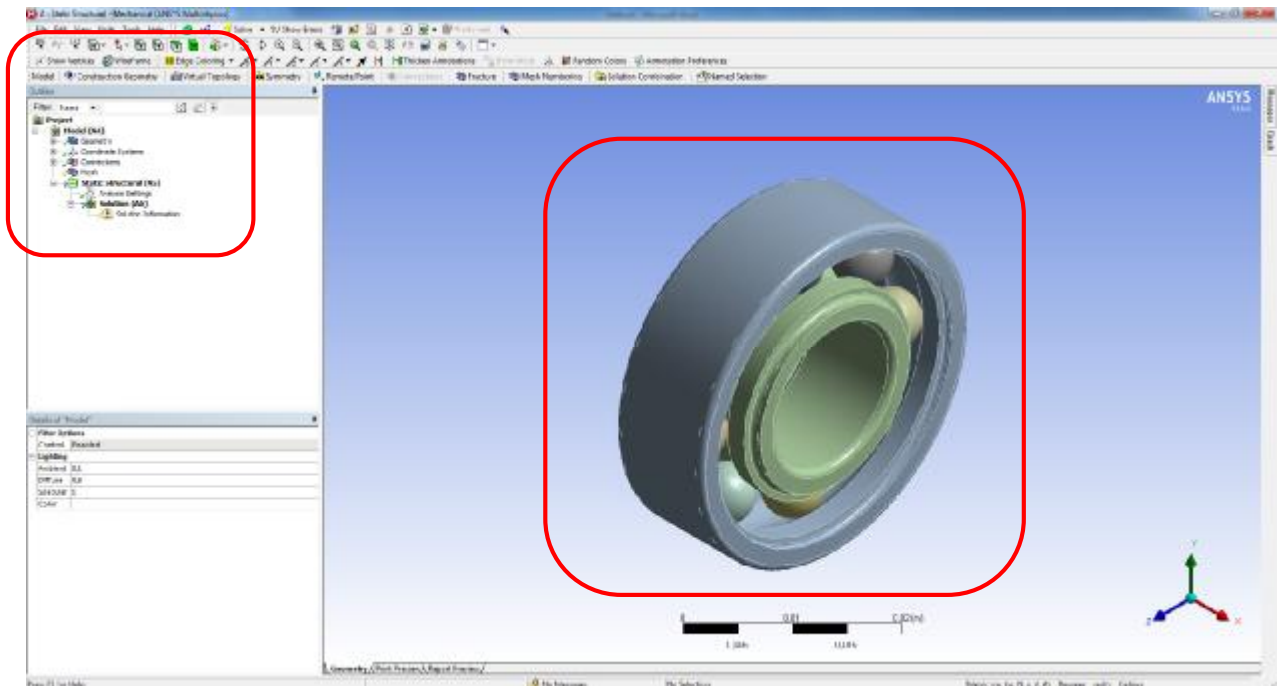


Σχήμα 4.15:Βήμα 15 διαδικασίας μοντελοποίησης

Κατόπιν, αφού έχουμε ολοκληρώσει όλες τις μεταβολές που επιθυμούμε όσον αφορά τη γεωμετρία, επιστρέφουμε στο βασικό μενού του Ansys-Workbench και κάνουμε δεξί κλικ στη επιλογή «Model» (μοντέλο) και πατάμε «Edit» (μεταβολή) (Σχήμα 4.16). Με τον τρόπο αυτό ανοίγει ένα νέο περιβάλλον εργασίας (Σχήμα 4.17), το υποπρόγραμμα «Modeler»,στο οποίο μπορούμε να ολοκληρώσουμε το μοντέλο μας με βάση τη τελική γεωμετρία που υιοθετήσαμε στα προηγούμενα βήματα.

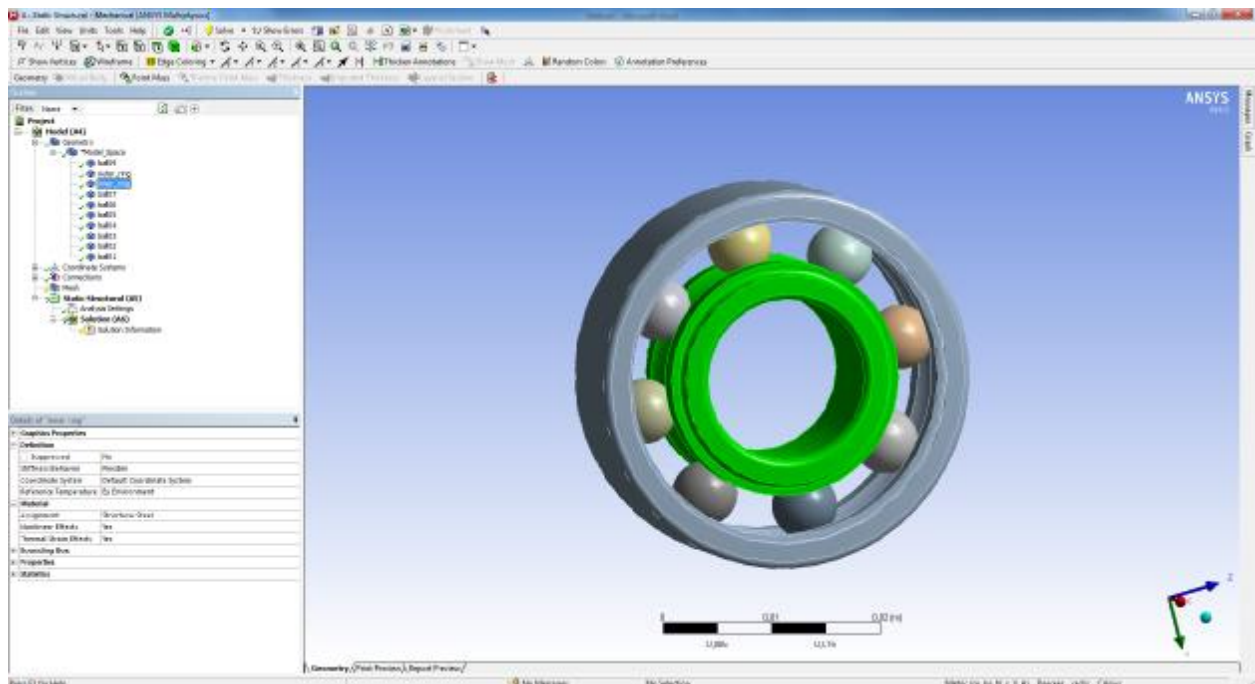


Σχήμα 4.16:Βήμα 16 διαδικασίας μοντελοποίησης



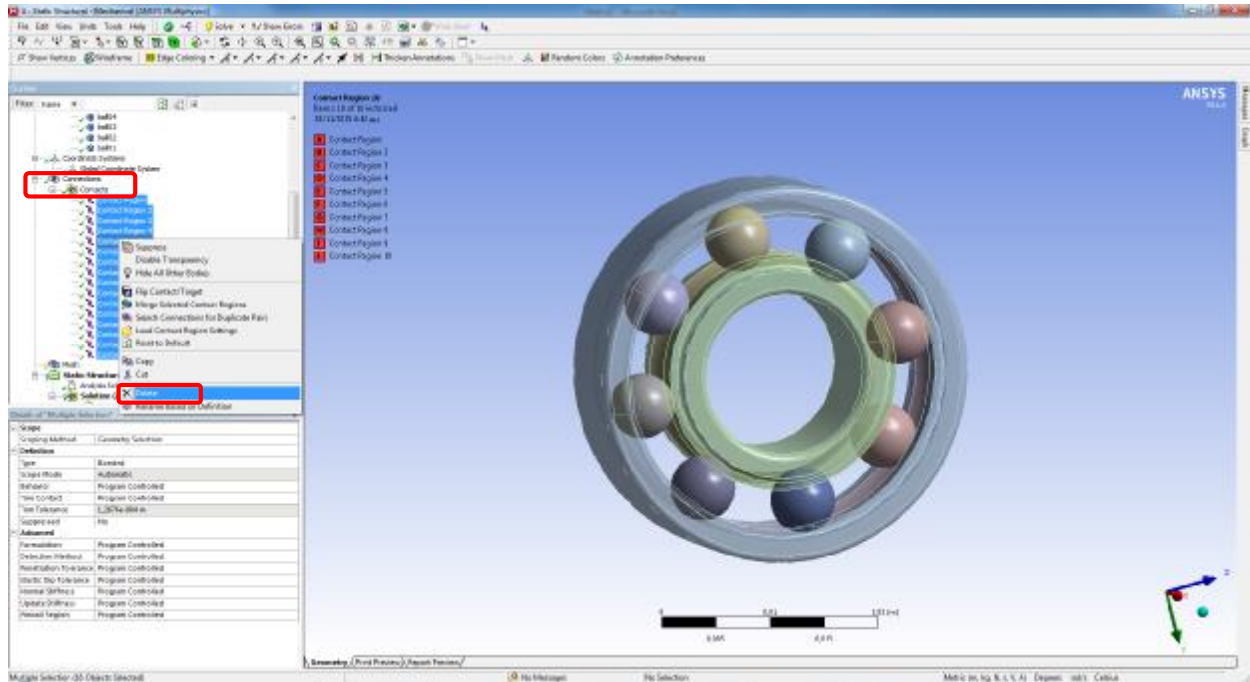
Σχήμα 4.17: Βήμα 17 διαδικασίας μοντελοποίησης

Στο νέο αυτό υποπρόγραμμα μπορούμε να επιλέξουμε κάθε μέρος του ρουλεμάν και με δεξί κλικ (Σχήμα 4.18) να αλλάξουμε το υλικό κατασκευής του. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα αυτό δε χρειάζεται διότι έχουμε κρατήσει τελικά ένα μοναδικό υλικό (StructuralSteel) στην επιλογή «EngineeringData», και έτσι το συγκεκριμένο υλικό έχει γίνει προεπιλογή αυτόματα για όλα τα μέρη του ρουλεμάν.



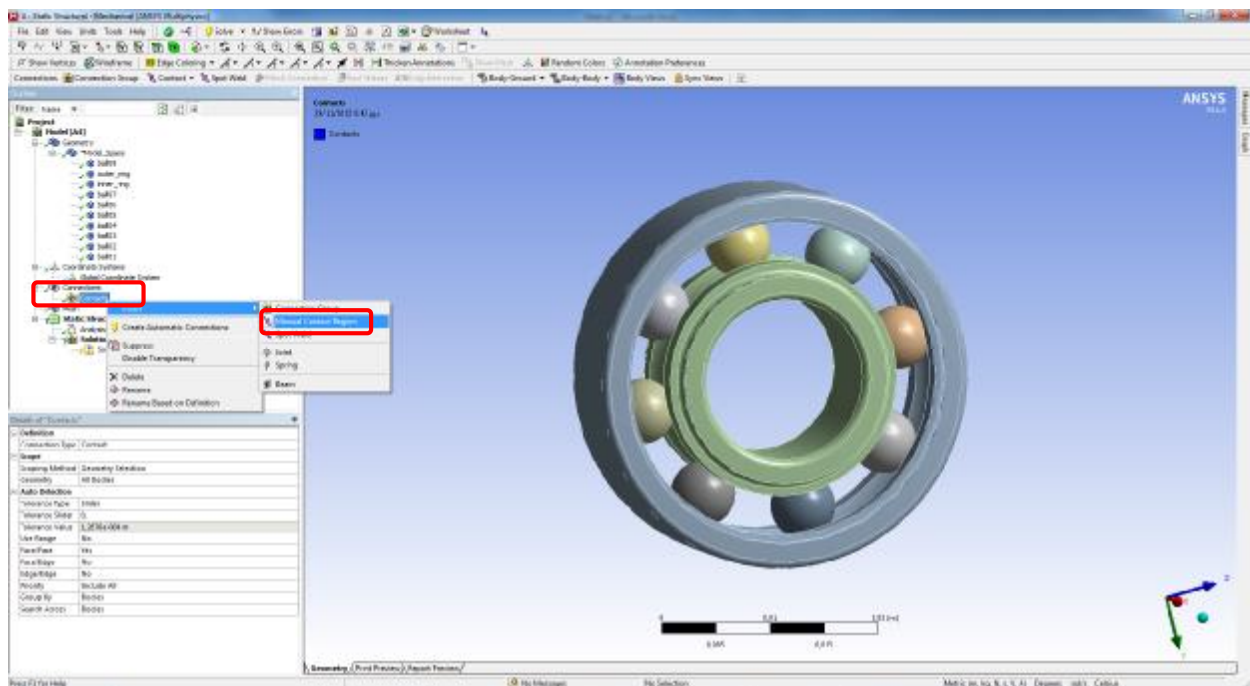
Σχήμα 4.18: Βήμα 18 διαδικασίας μοντελοποίησης

Εν συνεχεία, σβήνουμε (κάνουμε «Delete») όλα τα δεδομένα (κατάλοιπα από το AutoCadaρχείο που έγινε «import») που υπάρχουν στο αριστερό μενού και συγκεκριμένα στην επιλογή «Connections/Contacts» (Συνδέσεις/Επαφές) (Σχήμα 4.19).



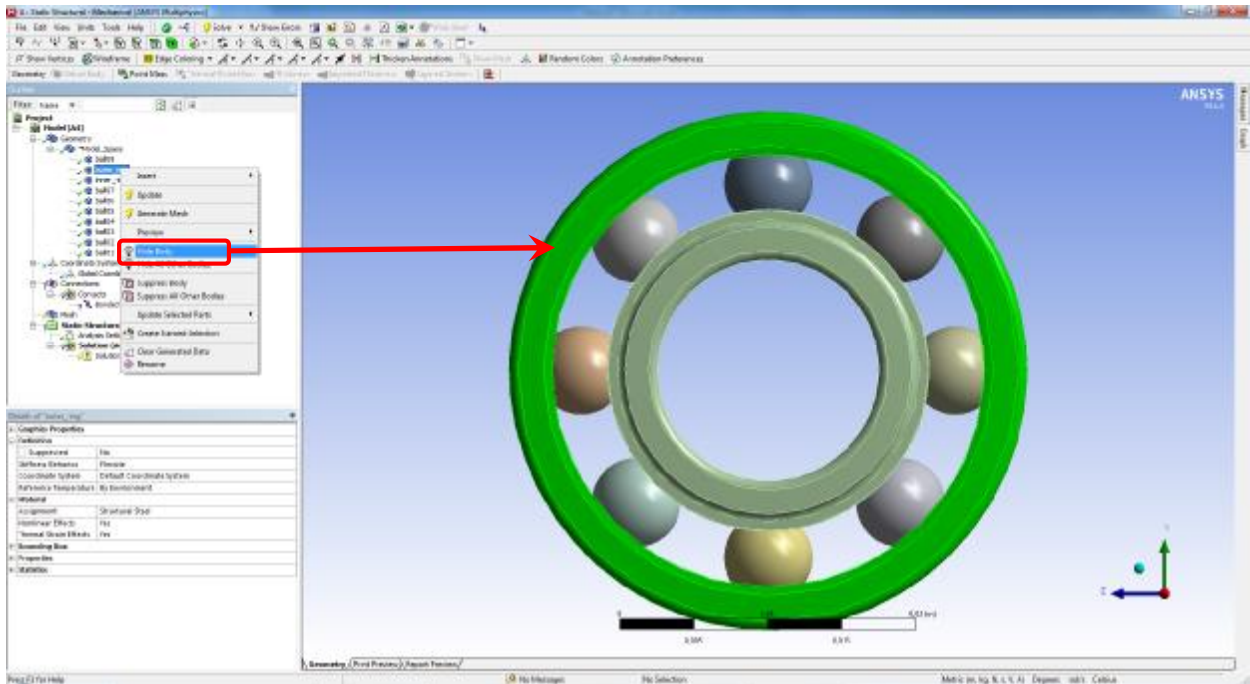
Σχήμα 4.19: Βήμα 19 διαδικασίας μοντελοποίησης

Έπειτα, προκειμένου να ορίσουμε τις επαφές μεταξύ εσωτερικού δακτυλίου και σφαιρών κάνουμε τα εξής: Με δεξιά κλικ στην επιλογή «Contacts» επιλέγουμε «insert» (εισαγωγή) και «ManualContactRegion» (περιοχή επαφής χειρωνακτικώς) (Σχήμα 4.20).



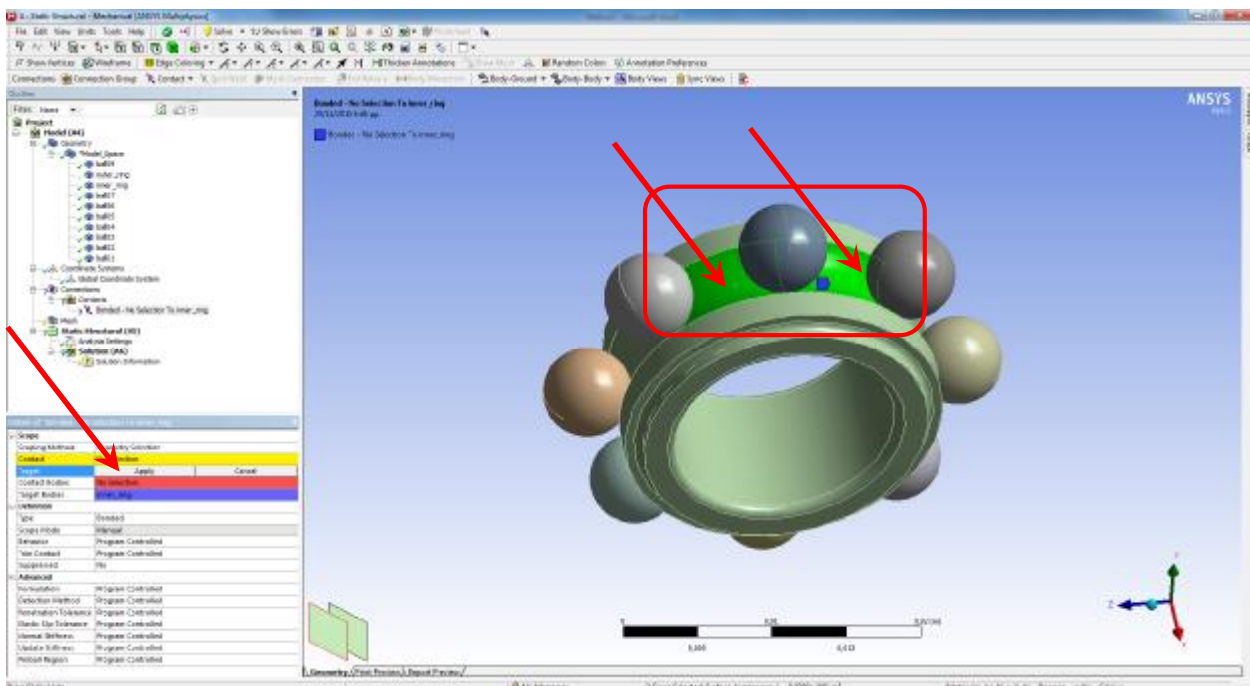
Σχήμα 4.20: Βήμα 20 διαδικασίας μοντελοποίησης

Για εύκολο θέαση και ορισμό των περιοχών επαφήςστη παρούσα φάση, επιλέγουμε και κρύβουμε (επιλογή «HideBody») τον εξωτερικό δακτύλιο (Σχήμα 4.21).

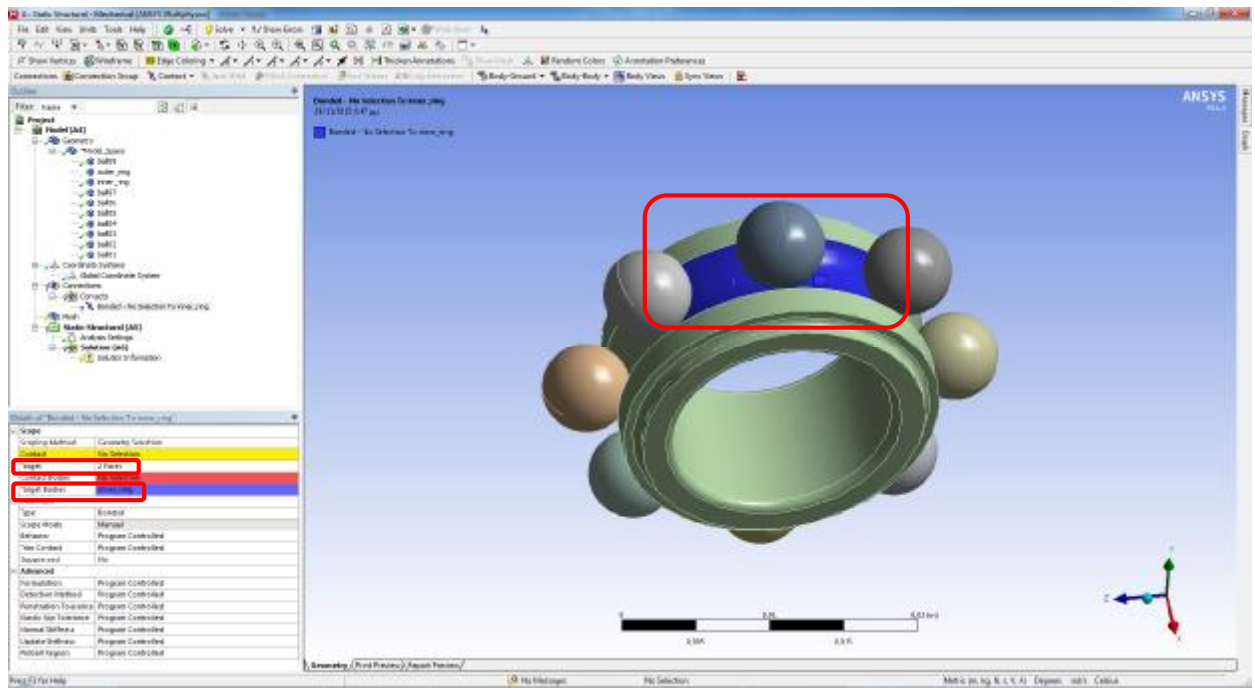


Σχήμα 4.21:Βήμα 21 διαδικασίας μοντελοποίησης

Επιλέγουμε τις δύο επιφάνειες (πατώντας Ctrl) του εσωτερικού δακτυλίου που πρόκειται να βρεθούν σε επαφή με σφαίρα 1 (ball01) και πατάμε «Apply» (εφαρμογή) στην επιλογή «Target»(στόχος) (Σχήμα 4.22).Το αποτέλεσμα αυτού του βήματος φαίνεται στο Σχήμα 4.23.

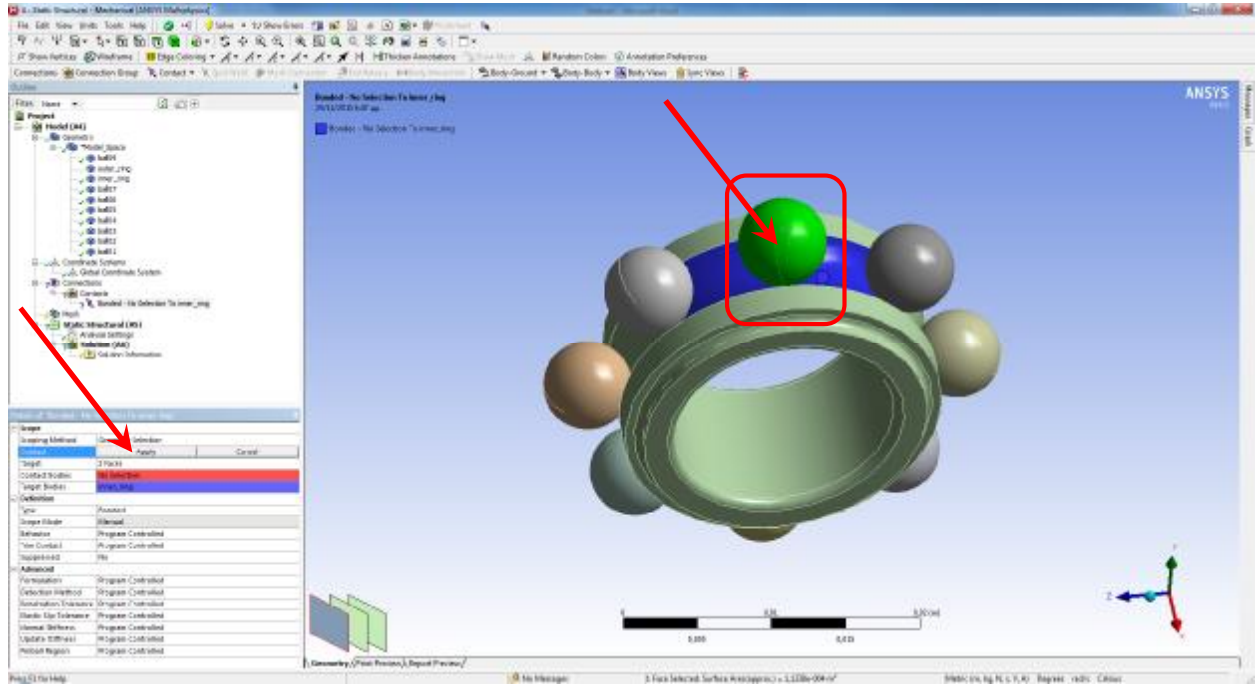


Σχήμα 4.22:Βήμα 22 διαδικασίας μοντελοποίησης

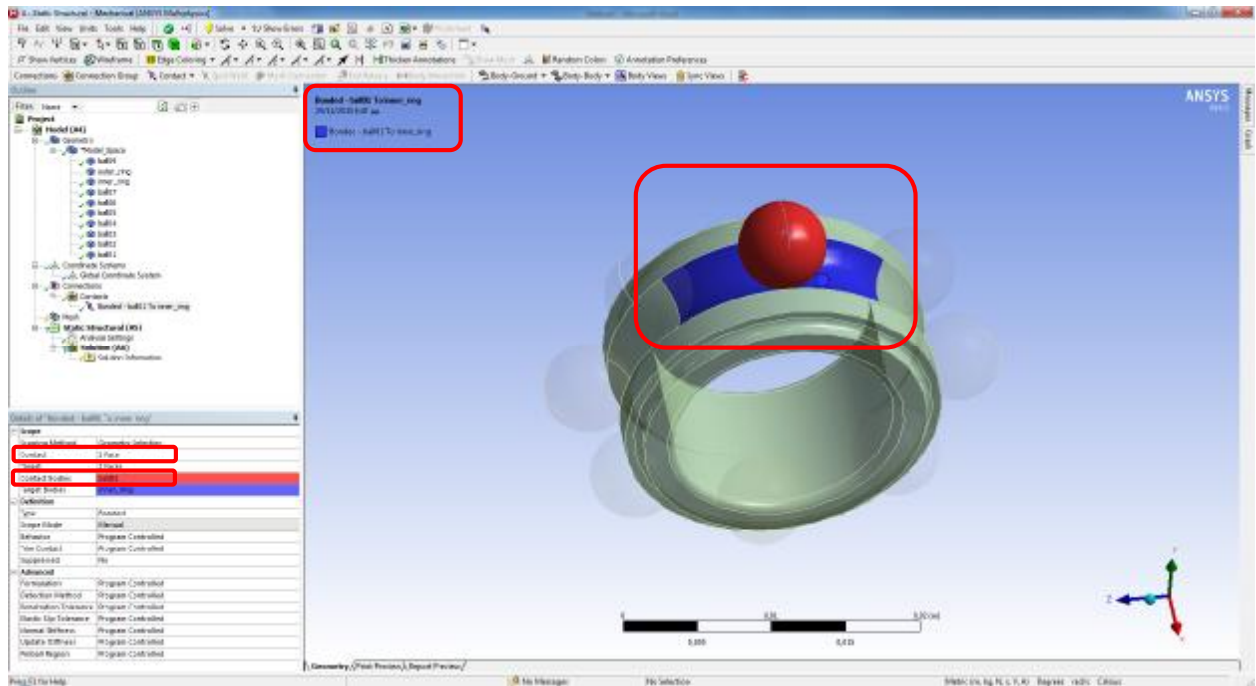


Σχήμα 4.23:Βήμα 23 διαδικασίας μοντελοποίησης

Επιλέγουμε την επιφάνεια της σφαίρας 1 που πρόκειται να βρεθεί σε επαφή με τις επιφάνειες «Target» που ορίσαμε πριν και πατάμε «Apply» (εφαρμογή) στην επιλογή «Contact»(Επαφή) (Σχήμα 4.24).Το αποτέλεσμα αυτού του βήματος φαίνεται στο Σχήμα 4.25. Με αυτή διαδικασία ουσιαστικά ορίσαμε που πρέπει το πρόγραμμα να δημιουργήσει κατάλληλα στοιχεία προσομοίωσης της αντίστοιχης επαφής.

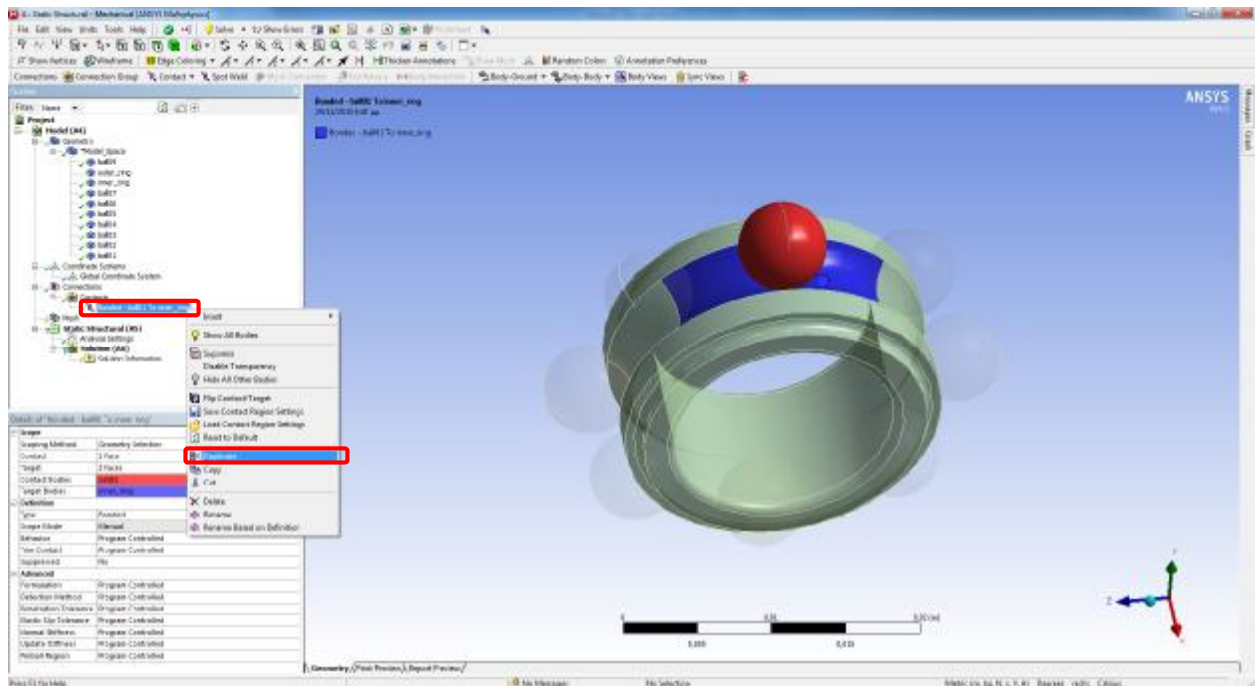


Σχήμα 4.24:Βήμα 24 διαδικασίας μοντελοποίησης

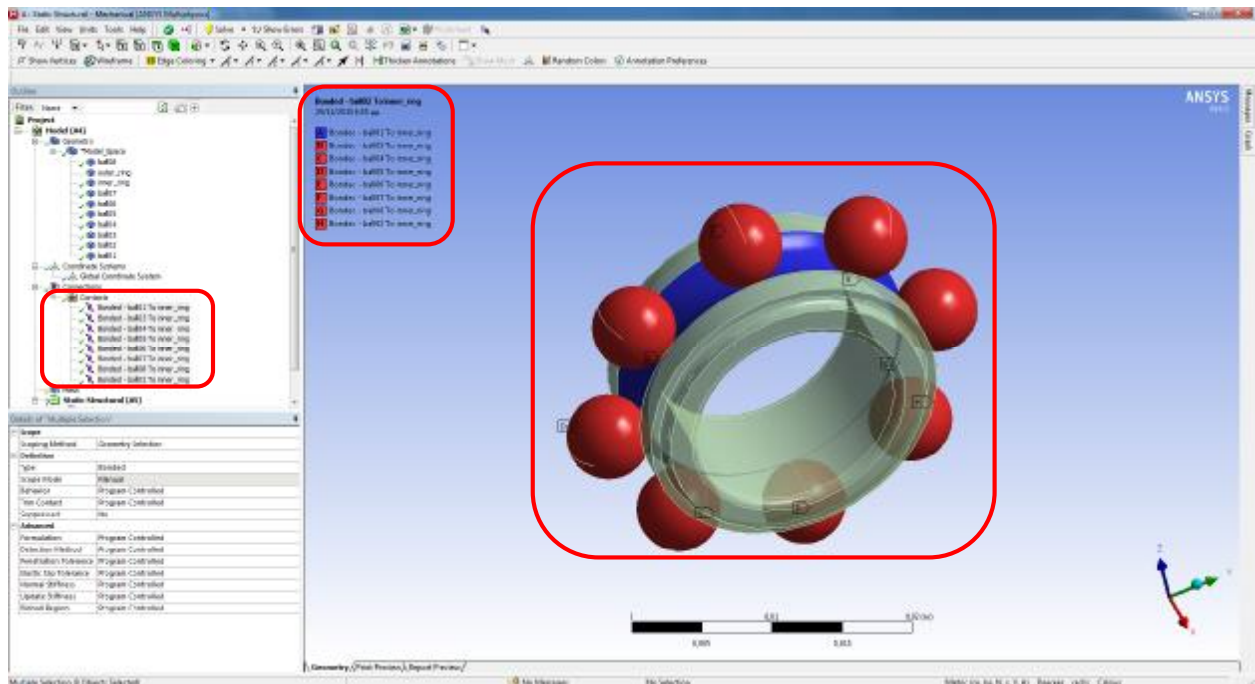


Σχήμα 4.25: Βήμα 25 διαδικασίας μοντελοποίησης

Προφανώς πρέπει να ορίσουμε τις αντίστοιχες περιοχές επαφής του εσωτερικού δακτυλίου με τις υπόλοιπες σφαίρες. Ένα εύκολος τρόπος είναι να κάνουμε 7 φορές διπλασιασμό (Duplicate) του στοιχείου που δημιουργήσαμε στο αριστερό μενού (Σχήμα 4.26) και έπειτα διόρθωση των νέων στοιχείων που δημιουργούνται προκειμένου αυτά να ανταποκρίνονται στις υπόλοιπες 7 περιοχές επαφής μεταξύ των υπολειπόμενων 7 σφαιρών και των αντίστοιχων επιφανειών του εσωτερικού δακτυλίου. Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας απεικονίζονται στο Σχήμα 4.27.

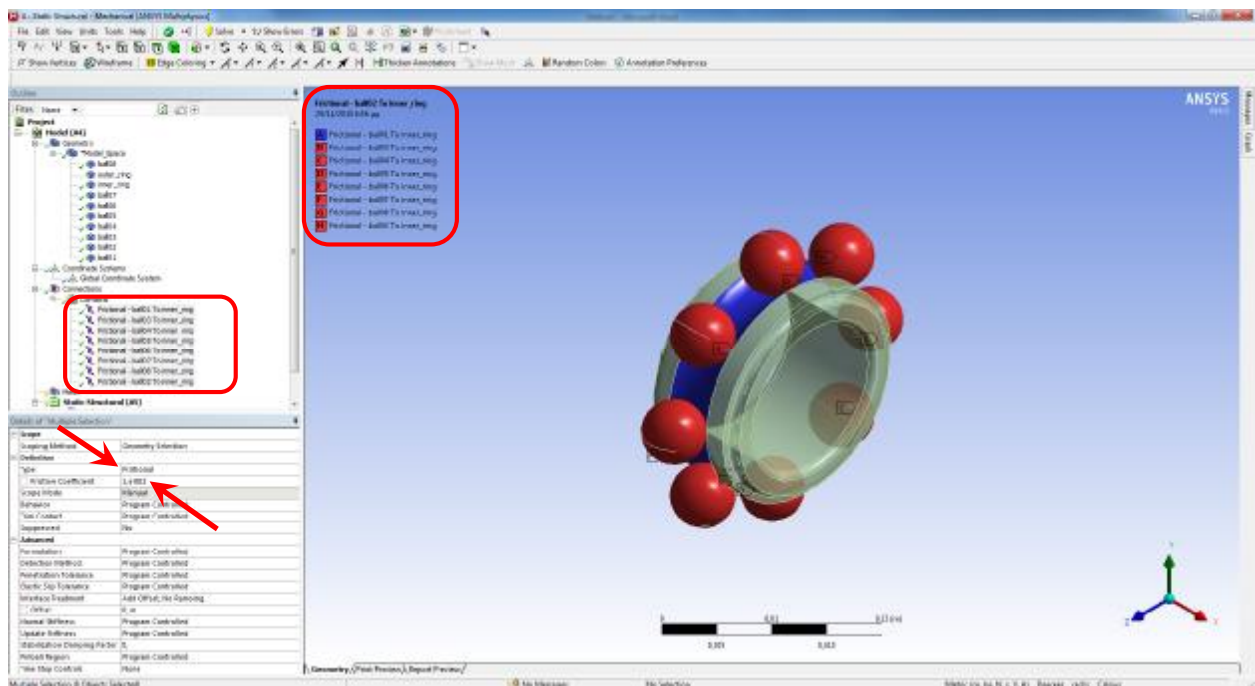


Σχήμα 4.26: Βήμα 26 διαδικασίας μοντελοποίησης



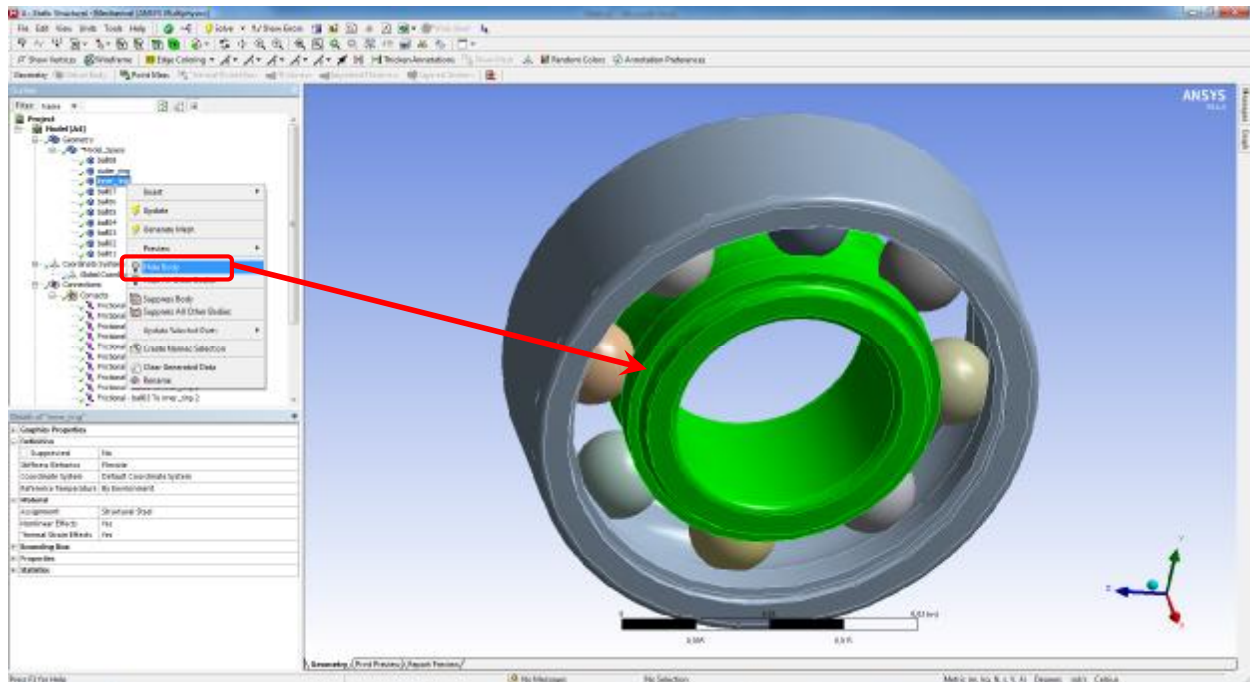
Σχήμα 4.27: Βήμα 27 διαδικασίας μοντελοποίησης

Στο σημείο αυτό δε ξεχνάμε να μεταβάλουμε όλα τα στοιχεία επαφής που δημιουργήσαμε από «bonded» (σταθερή επαφή) σε «Frictional» (επαφή με τριβή) ανοίγοντας κάθε καρτέλα στοιχείου και χρησιμοποιώντας ένα μικρό συντελεστή τριβής ίσο με 0.01 (Σχήμα 4.27).



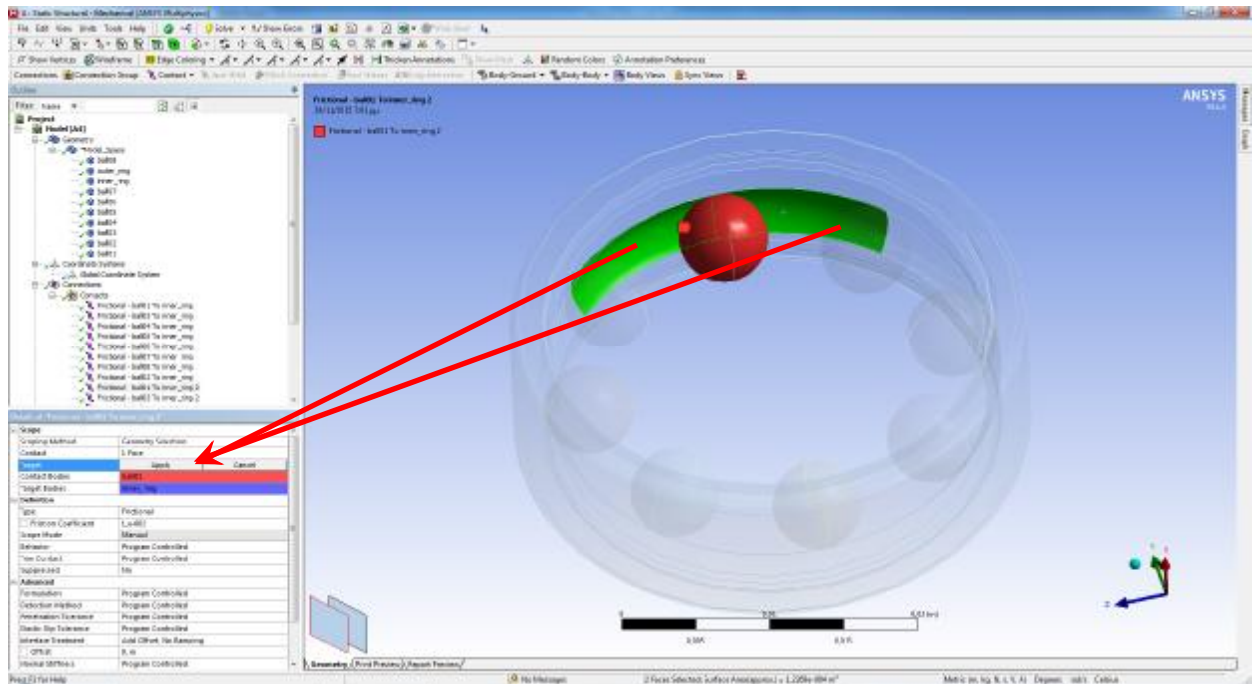
Σχήμα 4.28: Βήμα 28 διαδικασίας μοντελοποίησης

Είναι προφανές ότι τώρα πρέπει να ορίσουμε τις αντίστοιχες περιοχές επαφής του εξωτερικού δακτυλίου με τις σφαίρες. Για εύκολο θέαση και ορισμό των περιοχών επαφήςστη παρούσα φάση, επιλέγουμε και κρύβουμε (επιλογή «HideBody») τον εσωτερικό δακτύλιο (Σχήμα 4.29).

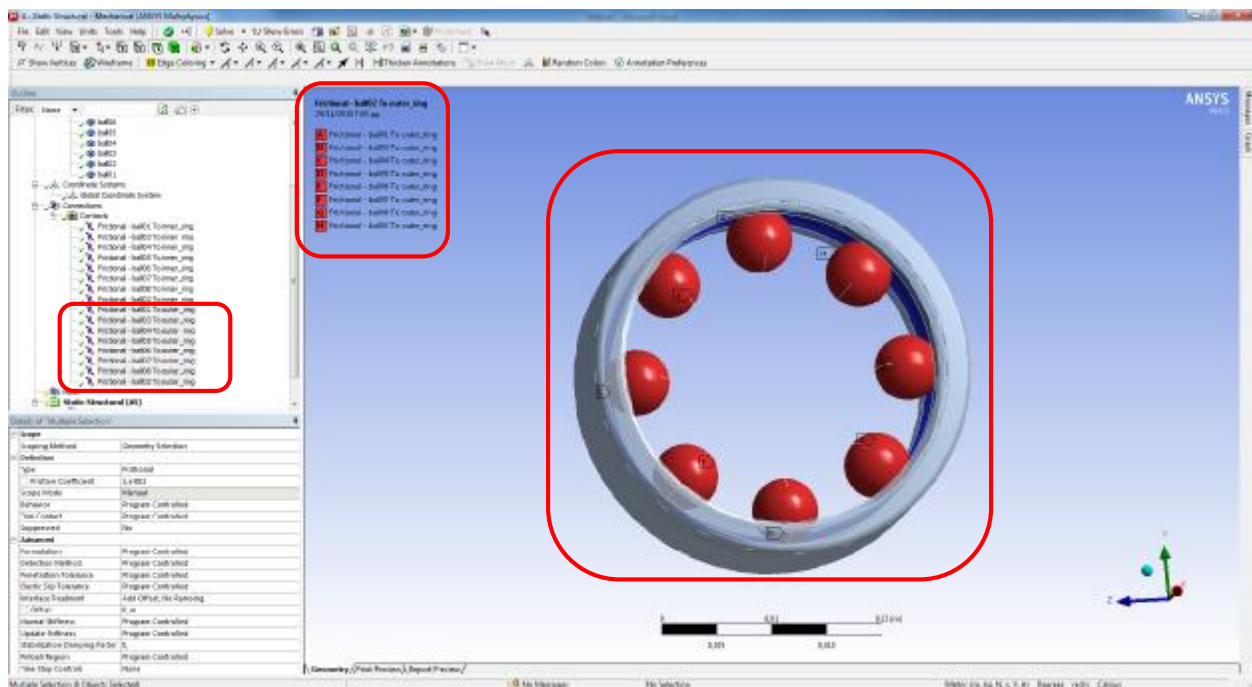


Σχήμα 4.29: Βήμα 29 διαδικασίας μοντελοποίησης

Προκειμένου να ορίζουμε αυτές τις επαφές είναι εύχρηστο να κάνουμε διπλασιασμό (Duplicate) των 8 στοιχείων που δημιουργήσαμε προηγουμένως στο αριστερό μενού επαφής και έπειτα να διορθώσουμε τα νέα στοιχεία που δημιουργούνται προκειμένου αυτά να ανταποκρίνονται στις 8 περιοχές επαφής μεταξύ των 8 σφαιρών και των αντίστοιχων επιφανειών του εξωτερικού δακτυλίου. Στο Σχήμα 4.30 φαίνεται πως επιλέγοντας τις επιφάνειες εξωτερικού δακτυλίου (outer_ring) που έρχονται σε επαφή με τη σφαίρα 08 (ball01) και πατώντας «Apply» στην επιλογή «Target», τελικά αντικαθιστούμε τις επιφάνειες εσωτερικού δακτυλίου με τις αντίστοιχες του εξωτερικού. Επαναλαμβάνοντας αυτή τη διαδικασία και για τα 8 αντιγραμμένα στοιχεία ολοκληρώνεται ο ορισμός όλων των επαφών μεταξύ των σφαιριδίων του ρουλεμάν και του εξωτερικού δακτυλίου (Σχήμα 4.31).

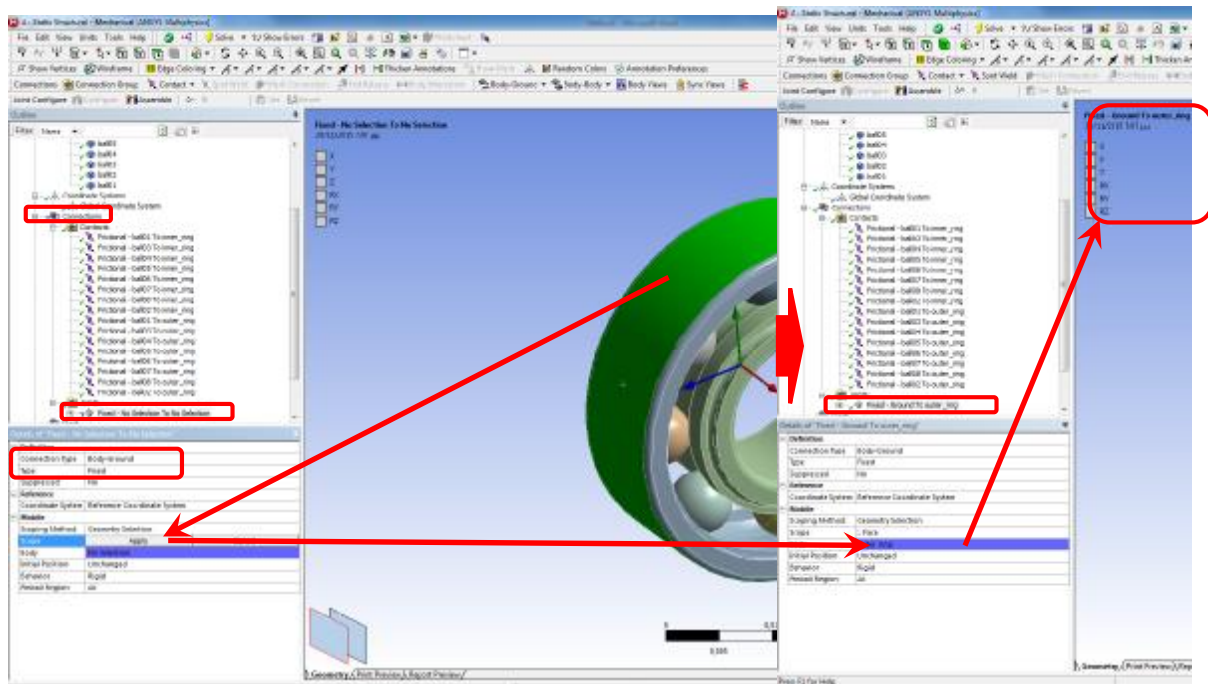


Σχήμα 4.30 Βήμα 30 διαδικασίας μοντελοποίησης



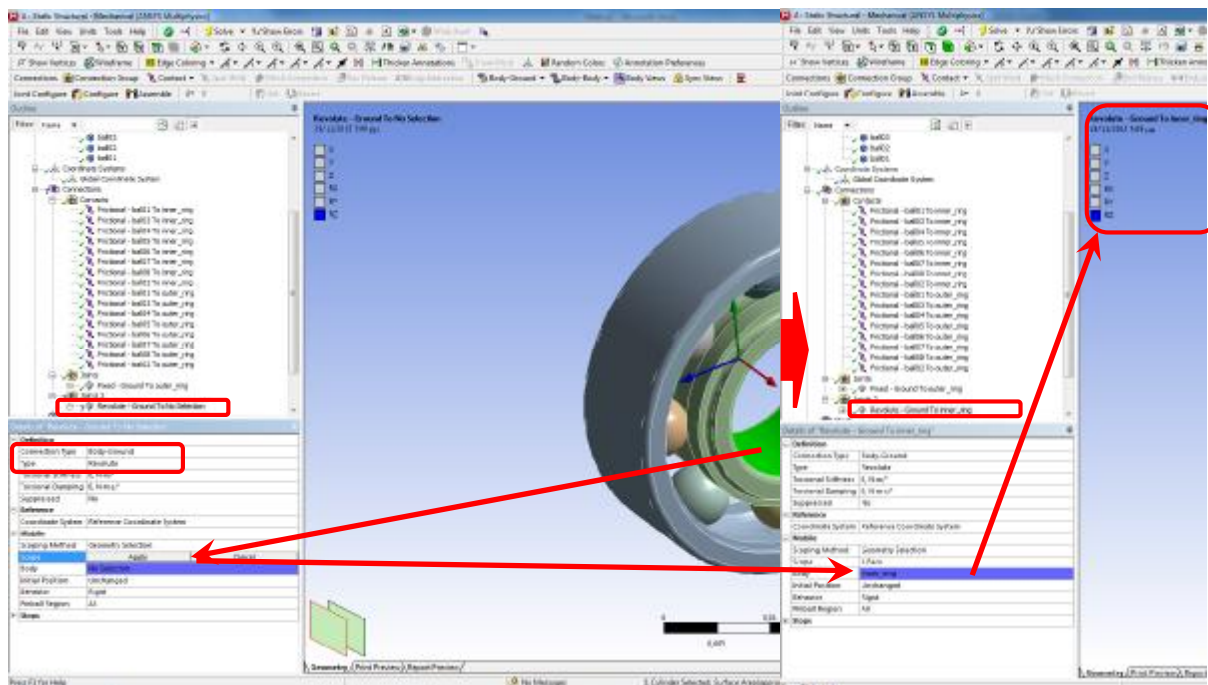
Σχήμα 4.31: Βήμα 31 διαδικασίας μοντελοποίησης

Έπειτα, προκειμένου να ορίσουμε την πάκτωση της εξωτερικής επιφάνειας του εξωτερικού δακτυλίου κάνουμε τα εξής: Με δεξί κλικ στην επιλογή «Connections» επιλέγουμε «Insert» (εισαγωγή), «Joints» (συνδέσεις), «Body to Ground» (σώμα σε έδαφος) και «Fixed» (πακτωμένο) (Σχήμα 4.32).



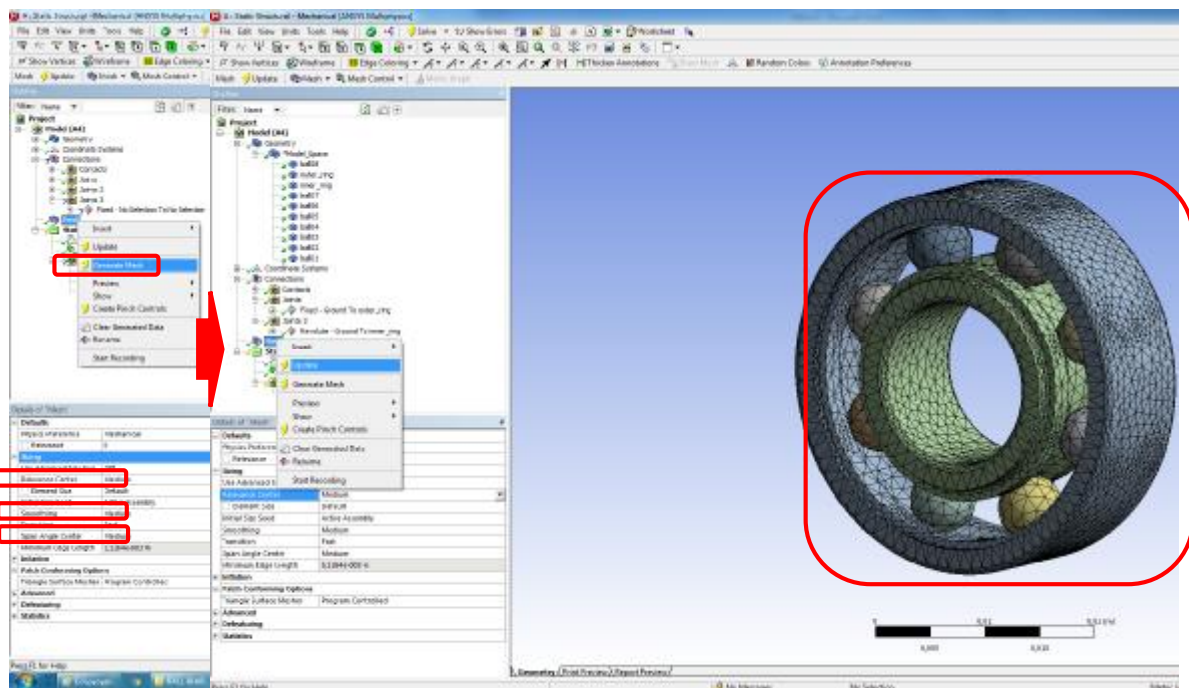
Σχήμα 4.32: Βήμα 32 διαδικασίας μοντελοποίησης

Εν συνεχεία, προκειμένου να ορίσουμε την περιστροφή της εσωτερικής επιφάνειας του εσωτερικού δακτυλίου κάνουμε τα εξής: Με δεξί κλικ στην επιλογή «Connections» επιλέγουμε «Insert» (εισαγωγή), «Joints» (συνδέσεις), «BodytoGround» (σώμα σε έδαφος) και «Revolute» (περιστροφή) (Σχήμα 4.33).



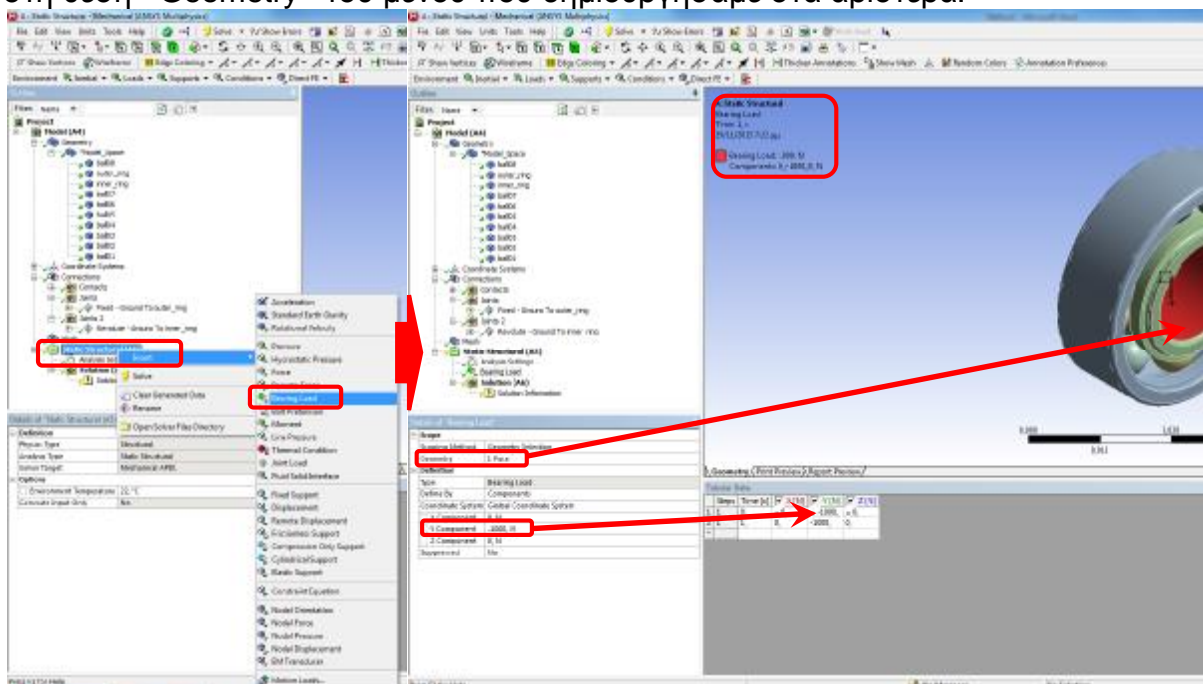
Σχήμα 4.33: Βήμα 33 διαδικασίας μοντελοποίησης

Προκειμένου να ορίσουμε τη διακριτοποίηση (mesh): Με δεξί κλικ στην επιλογή «Mesh» επιλέγουμε «Generate» (παράγω) χρησιμοποιώντας τις μέσες επιλογές (Medium) πυκνότητας και ποιότητας χωρισμού σε στοιχεία (Σχήμα 4.34).



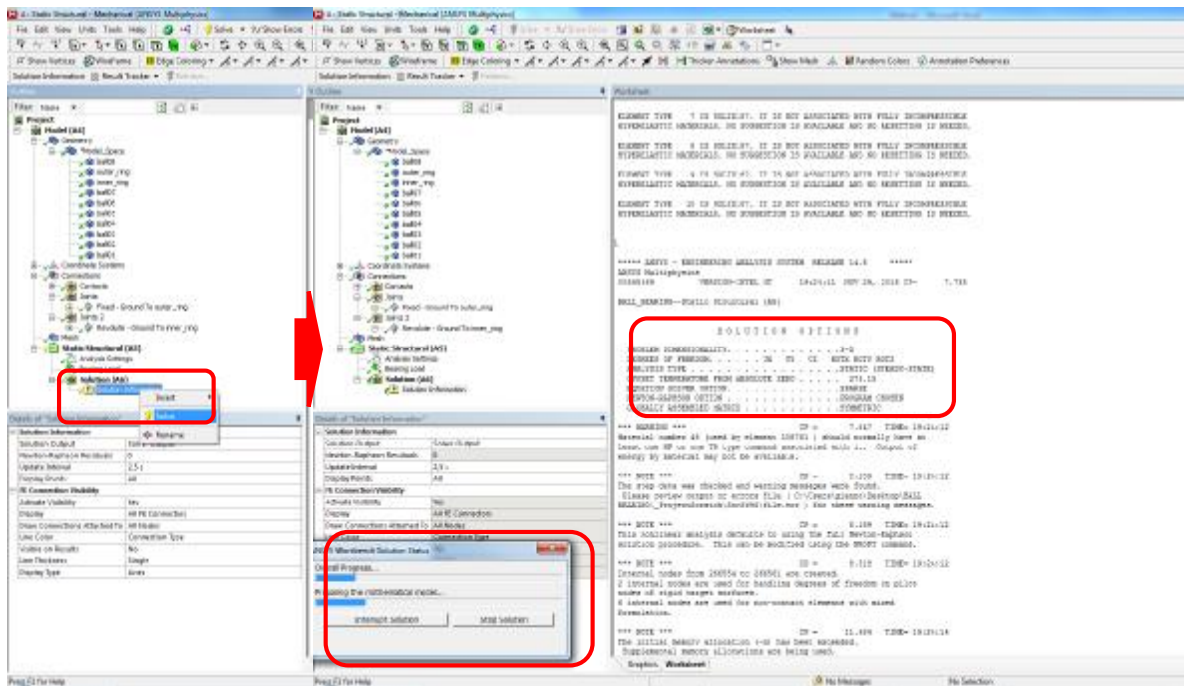
Σχήμα 4.34: Βήμα 34 διαδικασίας μοντελοποίησης

Έπειτα, για να ορίσουμε ένα βάρος 1KN στο ρουλεμάν κάνουμε τα εξής: Με δεξί κλικ στην επιλογή «StaticStructural» επιλέγουμε «Insert» (εισαγωγή), «BearingLoad» (φορτίο ρουλεμάν), «Components» (συνιστώσες) και στη θέση «YComponent» (Υσυνιστώσα) πληκτρολογούμε -1000N (Σχήμα 4.35). Προφανώς, επιλέγουμε την εσωτερική επιφάνεια του εσωτερικού δακτυλίου και κάνουμε Apply στη θέση «Geometry» του μενού που δημιουργήσαμε στα αριστερά.



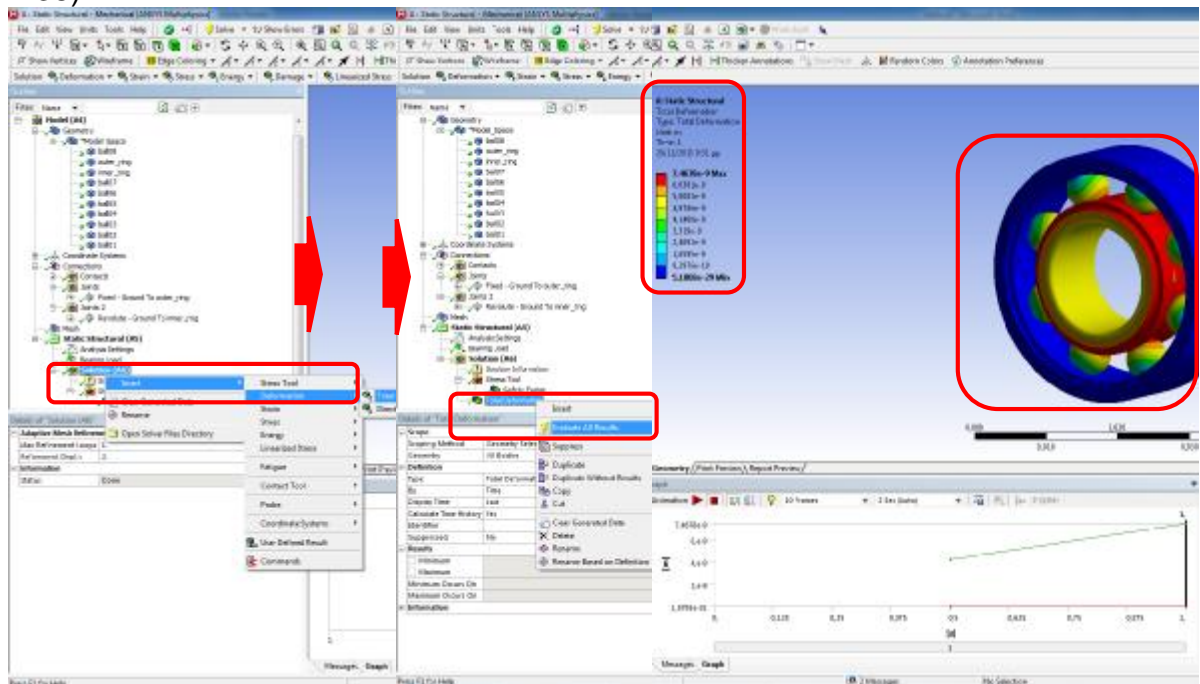
Σχήμα 4.35: Βήμα 35 διαδικασίας μοντελοποίησης

Προχωράμε στην επίλυση με δεξί κλικ στην επιλογή «SolutionInformation»(πληροφορία επίλυσης) και επιλέγοντας «Insert»(εισαγωγή) και «Solve» (λύσε), οπότε και ξεκινάει ο αλγόριθμος επίλυσης (Σχήμα 4.36).



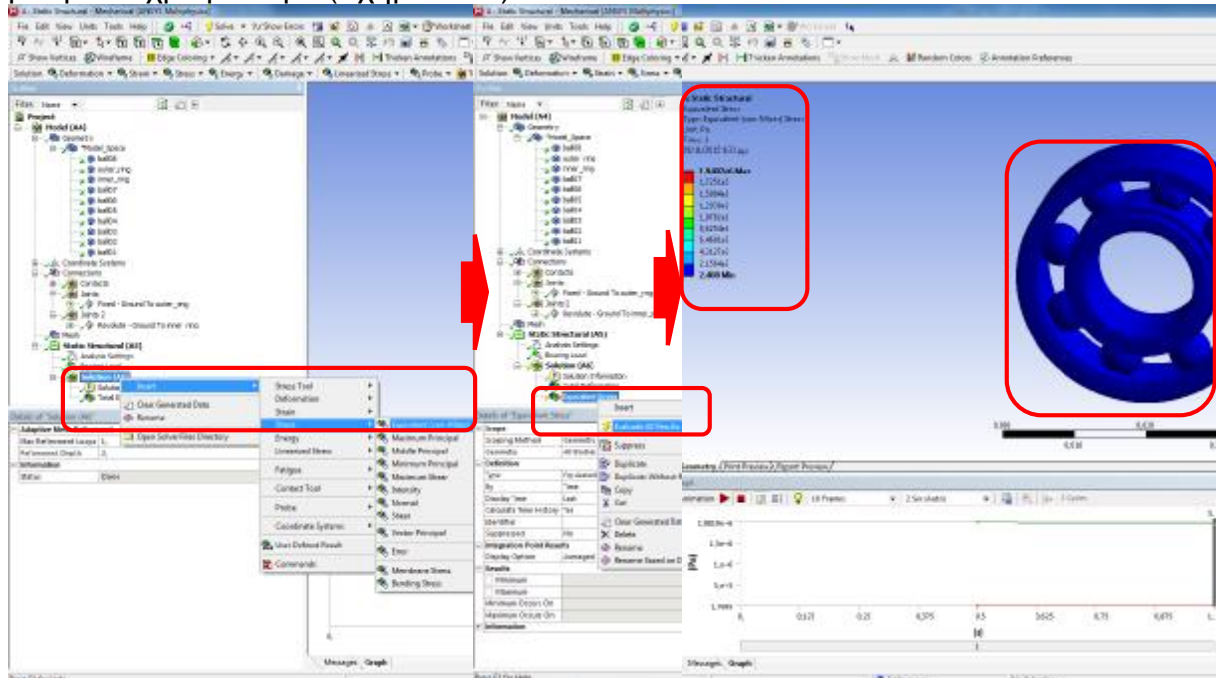
Σχήμα 4.36:Βήμα 36 διαδικασίας μοντελοποίησης

Έπειτα, προκειμένου να δούμε το περίγραμμα συνολικής μετατόπισης στο ρουλεμάν κάνουμε δεξί κλικ στη θέση «Solution» (λύση),επιλέγουμε «Insert» (εισαγωγή), «Deformation» (μετατόπιση) και «Total» (ολική). Έτσι δημιουργείται ένα στοιχείο με τίτλο «TotalDeformation» στο οποίο με δεξί κλικ και πατώντας «Evaluate» (υπολόγισε) προκύπτει το αντίστοιχο περίγραμμα με βαθμωτό χρωματισμό (Σχήμα 4.38).



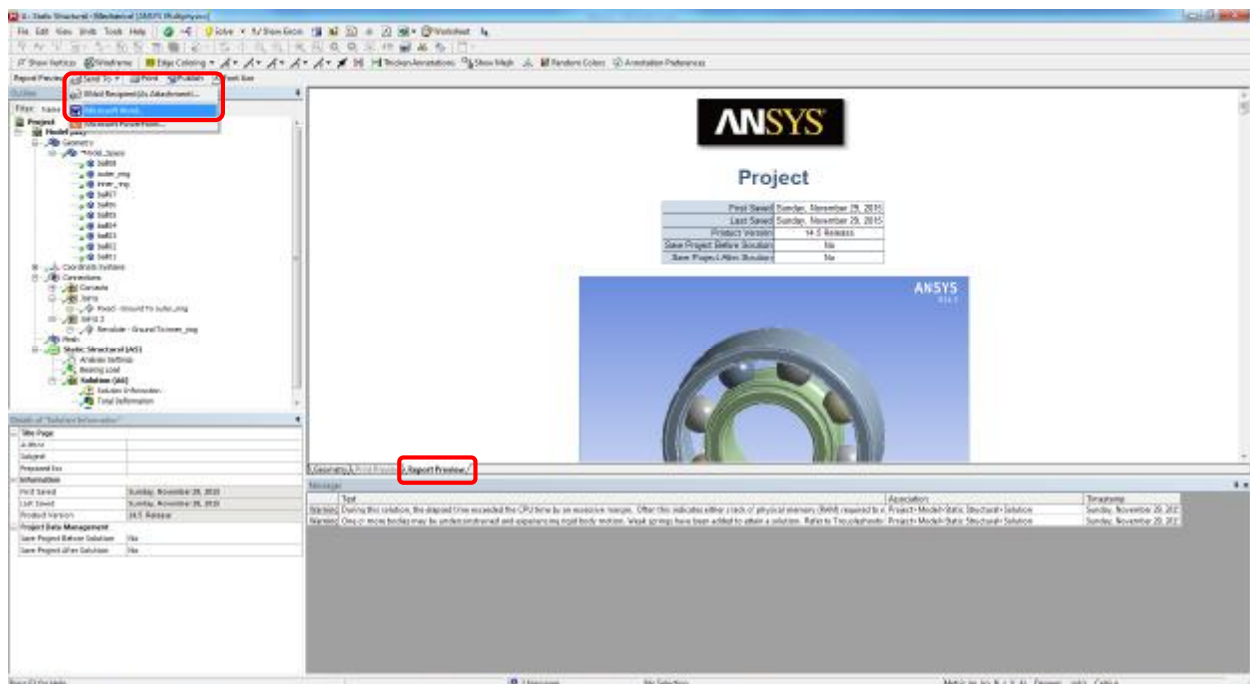
Σχήμα 4.38:Βήμα 38 διαδικασίας μοντελοποίησης

Έπειτα, προκειμένου να δούμε το περίγραμμα ισοδύναμης τάσης vonMisesκάνουμε δεξί κλικ στη θέση «Solution» (λύση),επιλέγουμε «Insert» (εισαγωγή), «Stress» (τάση) και «Equivalent (von-Mises)» (ισοδύναμης von-Mises). Έτσι δημιουργείται ένα στοιχείο με τίτλο «EquivalentStress» στο οποίο με δεξί κλικ και πατώντας «Evaluate» (υπολόγισε) προκύπτει το αντίστοιχο περίγραμμα με βαθμωτό χρωματισμό (Σχήμα 4.39).



Σχήμα 4.39:Βήμα 39 διαδικασίας μοντελοποίησης

Η τεχνική έκθεση της ανάλυσης δύναται να αποθηκευθεί σε μορφή officeεπιλέγοντας από το βασικό οριζόντιο μενού «ReportPreview» (επισκόπηση έκθεσης), «SendTo»(στείλε σε) και «MicrosoftWord»(Σχήμα 4.40).



Σχήμα 4.40:Βήμα 40 διαδικασίας μοντελοποίησης

5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΔΡΑΝΩΝ ΚΥΛΙΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μοντελοποίηση των εξεταζόμενων εδράνων κύλισης με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων. Για την στατική και δυναμική ανάλυση των εδράνων υιοθετήθηκαν δύο γεωμετρίες ρουλεμάν ενός ένσφαιρου και ενός βαρελοειδούς.

5.1 ΥΛΙΚΑ

Για όλα τα στοιχεία και των δύο ρουλεμάν χρησιμοποιήθηκε δομικός χάλυβας με μέτρο ελαστικότητας $E = 2 \times 10^{11} \text{ Pa}$, λόγο Poisson $\nu = 0.3$ και πυκνότητα $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$. Επίσης το όριο διαρροής σε θλίψη και εφελκυσμό του εν λόγω υλικού θεωρήθηκε ίσο με $s_{yc} = 2.5 \times 10^8 \text{ Pa}$ και $s_{yt} = 4.6 \times 10^8 \text{ Pa}$, αντίστοιχα. Οι ιδιότητες που ελήφθησαν για τα στοιχεία των δύο ρουλεμάν παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1.

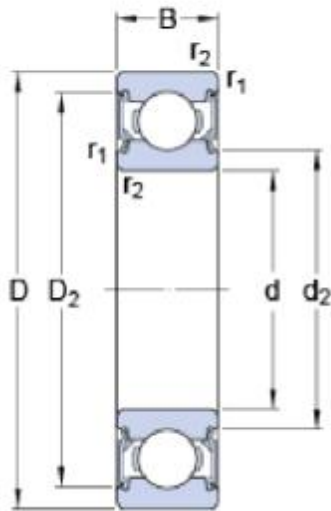
Πίνακας 5.1: Ιδιότητες υλικού που χρησιμοποιήθηκαν κατά την ανάλυση

Πυκνότητα kg/m^3	7850
Όριο διαρροής σε θλίψη (Pa)	2.5×10^8
Όριο διαρροής σε εφελκυσμό (Pa)	4.6×10^8
Μέτρο ελαστικότητας (Pa)	2×10^{11}
Λόγος Poisson	0.3

5.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

Η γεωμετρία και οι αντίστοιχες διαστάσεις του ένσφαιρου και του βαρελοειδούς εδράνου κύλισης που μελετήθηκε στη παρούσα πτυχιακή απεικονίζονται στα Σχήματα 5.1 και 5.2, αντιστοίχως. Και τα δύο ρουλεμάν είναι της εταιρίας SKF (www.skf.com) και επιλέχθηκαν έτσι ώστε να έχουν κοινή εσωτερική διάμετρο d , εξωτερική διάμετρο D και πλάτος B . Η επιλογή παρεμφερούς γεωμετρίας έγινε ούτως ώστε η μηχανική συμπεριφορά των δύο ρουλεμάν να είναι συγκρίσιμη.

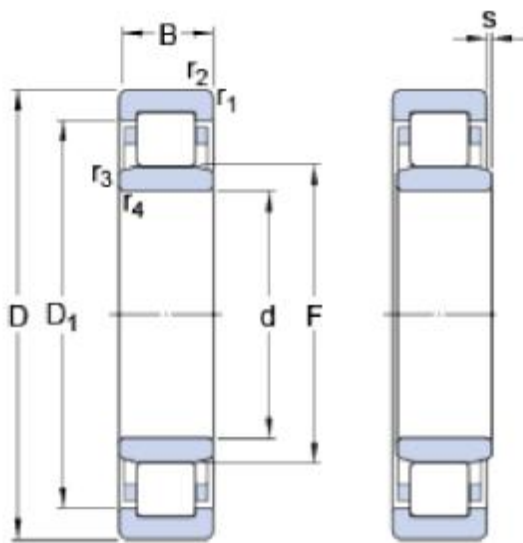
6202-2RSL



d		15	mm
D		35	mm
B		11	mm
d ₂	≈	18.6	mm
D ₂	≈	30.35	mm
r _{1,2}	min.	0.6	mm

Σχήμα 5.1: Τυποποιημένη γεωμετρία του ένσφαιρου ρουλεμάν της SKF με τη κωδική ονομασία 6202-2RSL

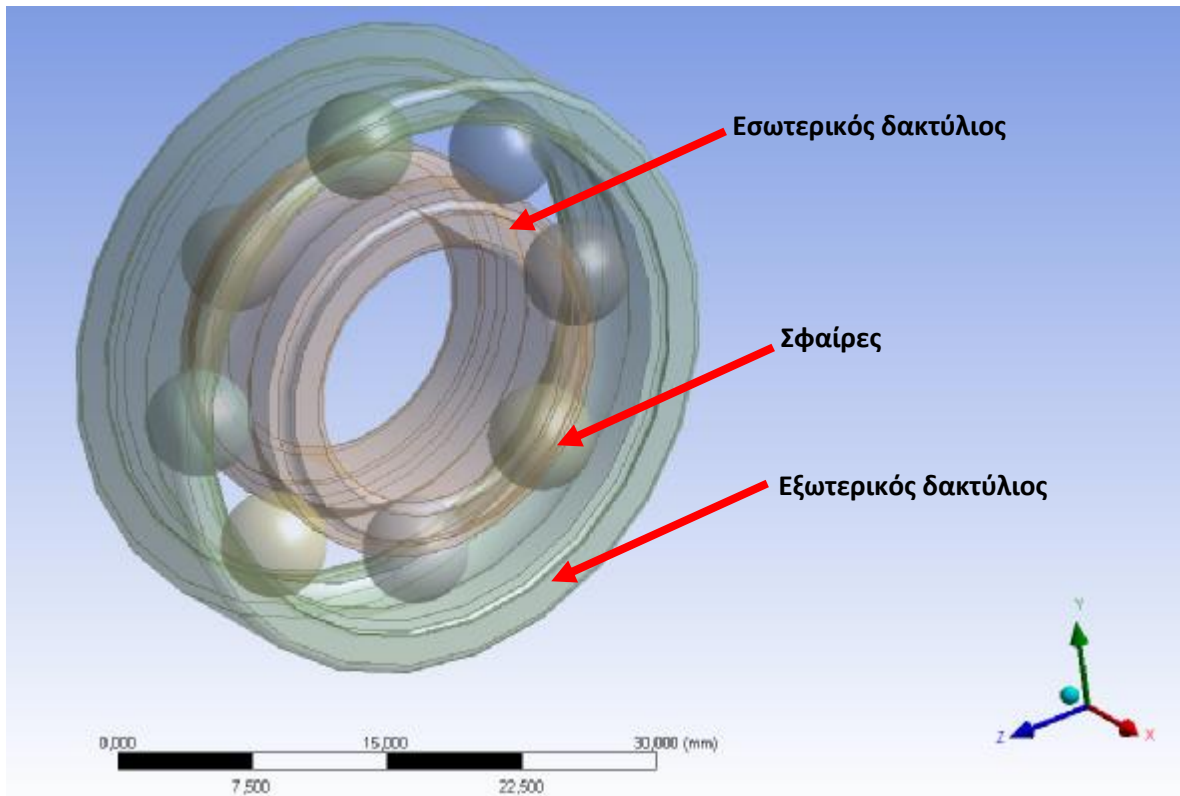
NU 202 ECP



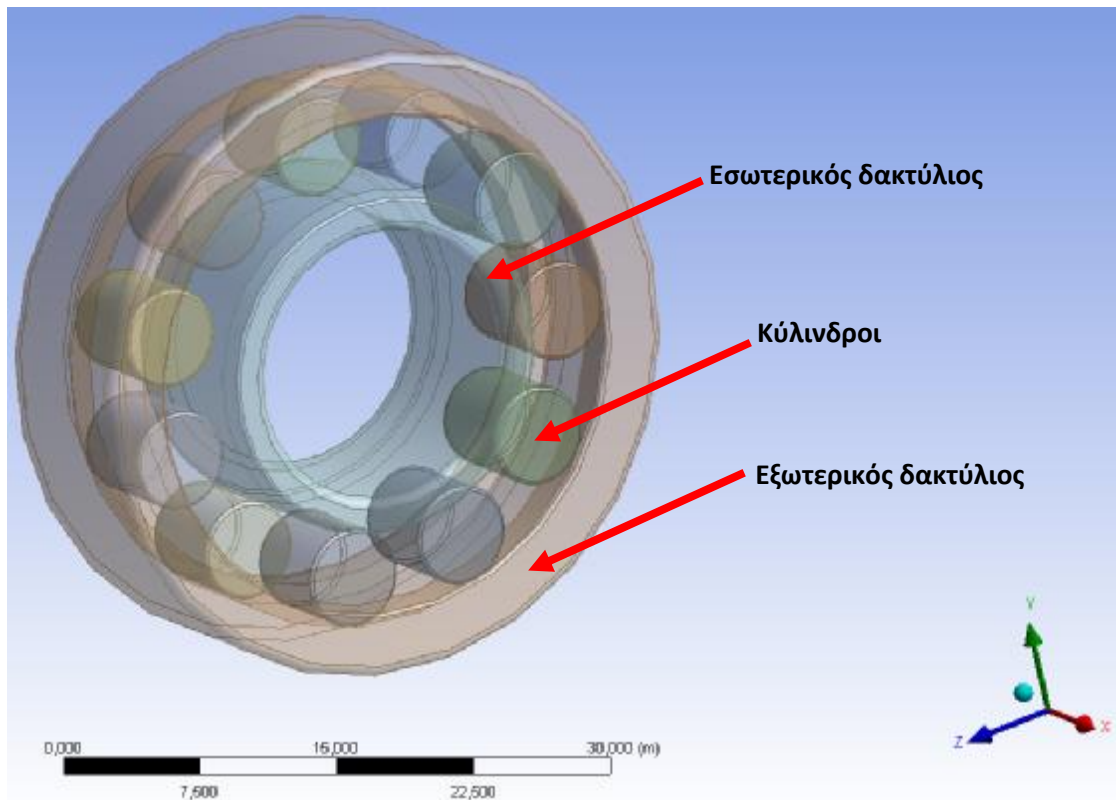
d		15	mm
D		35	mm
B		11	mm
D ₁	≈	27.7	mm
F		19.3	mm
r _{1,2}	min.	0.6	mm
r _{3,4}	min.	0.3	mm
s		1	mm

Σχήμα 5.2: Τυποποιημένη γεωμετρία του βαρελοειδούς ρουλεμάν της SKF με τη κωδική ονομασία 6202-2RSL

Οι γεωμετρίες των δύο μοντέλων όπως αυτές αναπτύχθηκαν στο Ansys-Workbench παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.3 και 5.4, αντιστοίχως.



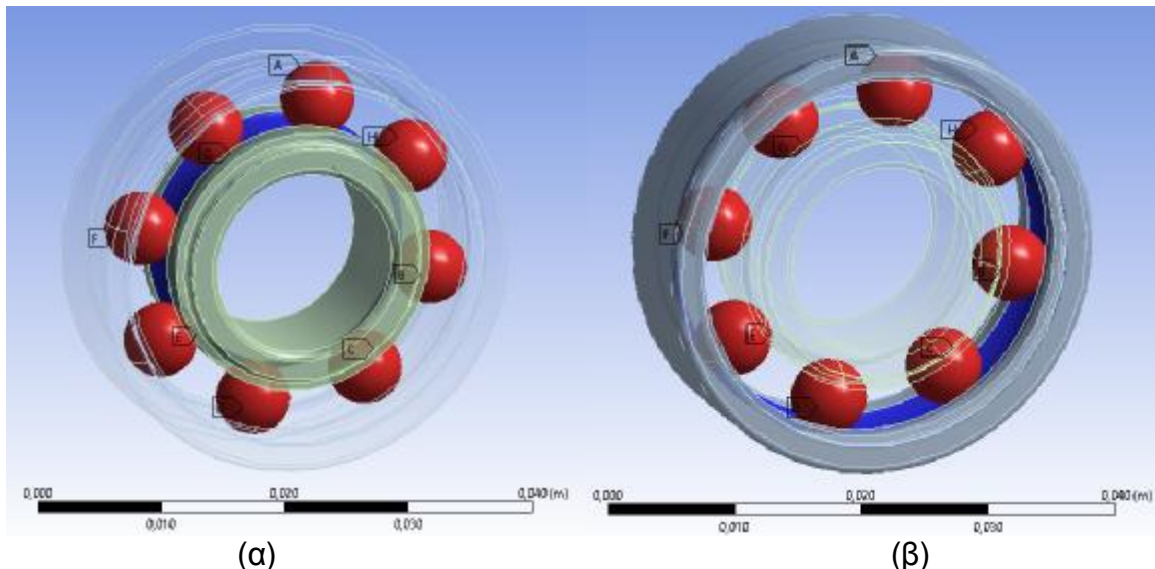
Σχήμα 5.3:Γεωμετρία μοντελοποίησης του ένσφαιρου ρουλεμάν



Σχήμα 5.4:Γεωμετρία μοντελοποίησης του βαρελοειδούς ρουλεμάν

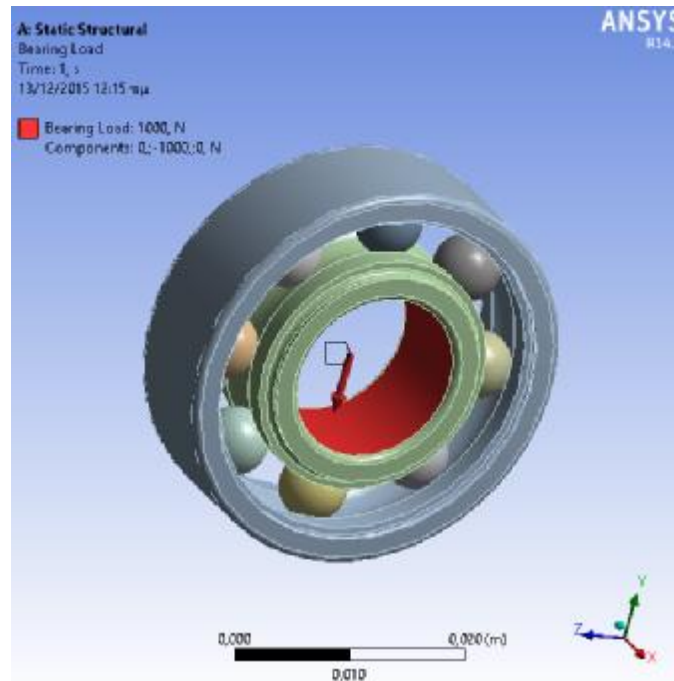
5.3ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΠΑΦΗΣ, ΦΟΡΤΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

Για την προσομοίωση της επαφής μεταξύ των στοιχείων κύλισης (δηλαδή των σφαιρών για το ένσφαιρο ρουλεμάν και των κυλίνδρων για το βαρελοειδές ρουλεμάν) και των εξωτερικών και εσωτερικών δακτυλίων θεωρήθηκε ότι υφίσταται επαφή με τριβή. Το συγκεκριμένο είδος επαφής οδηγεί στην ανάπτυξη διατμητικών δυνάμεων μεταξύ των επιφανειών που έρχονται σε επαφή ενώ δύναται να δημιουργηθούν στις επιφάνειες αυτές περιοχές προσκόλλησης ή διολίσθησης ή και συνδυασμός αυτών των δύο. Επιπλέον, μπορεί να υπάρξει η μετάβαση από συνθήκη προσκόλλησης σε διολίσθηση αν το μέγεθος των διατμητικών δυνάμεων υπερβεί κάποια τιμή ή και αντίστροφα. Η έκταση των περιοχών προσκόλλησης και διολίσθησης είναι εξαρτώμενες του φορτίου και έτσι δεν είναι δυνατό να είναι εξαρχής γνωστές. Το γεγονός αυτό προσδίδει στο πρόβλημα της επαφής έντονη μη γραμμική φύση. Στις περιοχές προσκόλλησης τα σημεία των επιφανειών παραμένουν ενωμένα και η συνέχεια των μετατοπίσεων διατηρείται και στην κάθετη αλλά και στην εφαπτομενική διεύθυνση. Οι περιοχές διολίσθησης χαρακτηρίζονται από την εμφάνιση δυνάμεων τριβής. Στις περιοχές διολίσθησης, υπό την παρουσία δυνάμεων τριβής, η σχετική μετακίνηση των επιφανειών μειώνεται με την αύξηση του συντελεστή τριβής και η συνέχεια των μετατοπίσεων διατηρείται μόνο κατά τη κάθετη στην επιφάνεια επαφής διεύθυνση. Στη παρούσα πτυχιακή για την προσομοίωση του φαινομένου της επαφής χρησιμοποιείται ο κλασικός νόμος τριβής του Coulomb και έτσι η τιμή της δύναμη τριβής ισούται με τη κάθετη θλιπτική δύναμη πολλαπλασιασμένη με το συντελεστή τριβής του Coulomb ο οποίος λαμβάνεται ίσος με $m = 0.01$. Οι υποψήφιες επιφάνειες επαφής που ορίζουμε στο μοντέλο ένσφαιρου ρουλεμάν απεικονίζονται στο Σχήμα 5.5. Στο Σχήμα 5.5α φαίνονται οι επιφάνειες επαφής μεταξύ σφαιρών και εσωτερικού δακτυλίου ενώ στη Σχήμα 5.5β φαίνονται οι επιφάνειες επαφής μεταξύ σφαιρών και εξωτερικού δακτυλίου.



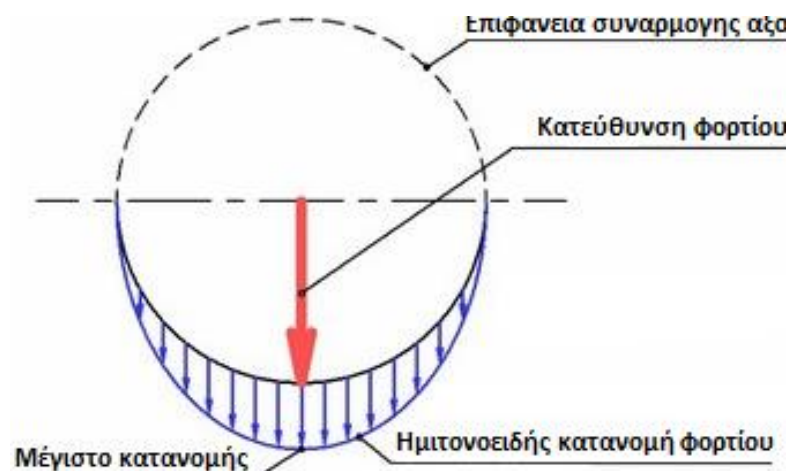
Σχήμα 5.4:Υποψήφιες επιφάνειες επαφής μεταξύ σφαιρών και (α) εσωτερικού δακτυλίου και (β) εξωτερικού δακτυλίου για τη περίπτωση του ένσφαιρου ρουλεμάν

Όσον αφορά το επιβαλλόμενο φορτίο και στα δύο υπό εξέταση ρουλεμάν, θεωρήθηκε ότι αυτό δρα κατακόρυφως προς τα κάτω και ότι είναι ίσο με $F_y = -1000\text{N}$ (Σχήμα 5.5.).



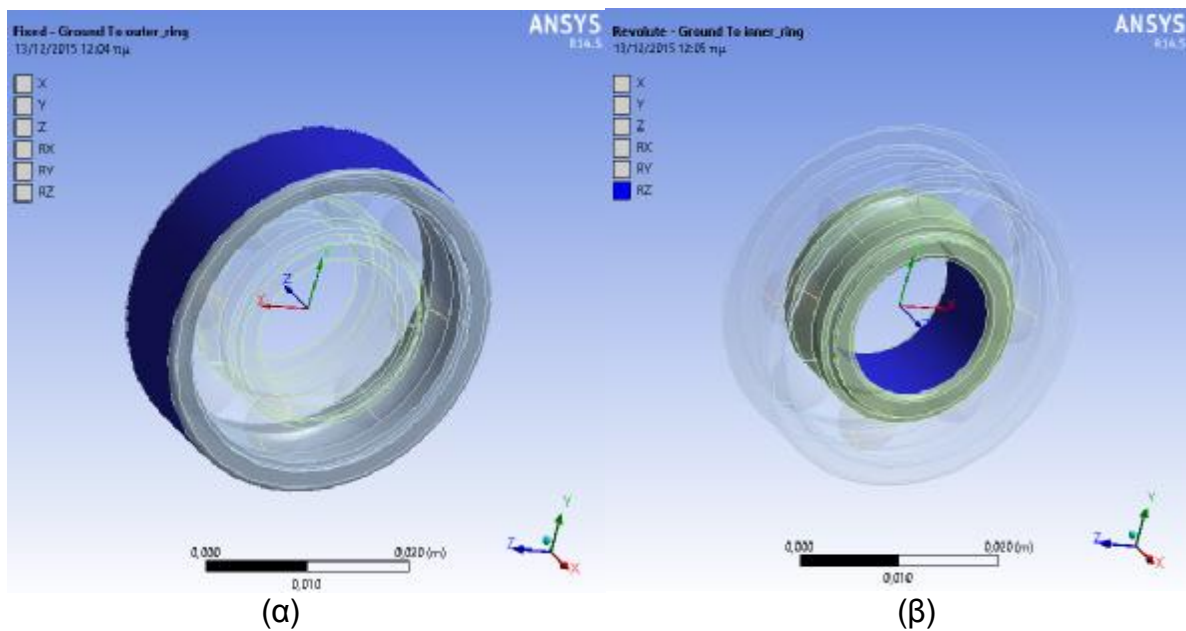
Σχήμα 5.5:Κατακόρυφο φορτίο στην εσωτερική επιφάνεια του εσωτερικού δακτυλίου του ρουλεμάν

Το φορτίο αυτό θεωρήθηκε ότι ασκείται στη εσωτερική επιφάνεια του εσωτερικού δακτυλίου στην επιφάνεια δηλαδή συναρμογής ενός πιθανού άξονα. Επιπλέον προκειμένου το φορτίο να αποδίδει ρεαλιστικά τη μεταβίβαση του από τον υποτιθέμενο άξονα στον εσωτερικό δακτύλιο χρησιμοποιήθηκε η ημιτονοειδής κατανομή που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.6.



Σχήμα 5.6:Ημιτονοειδής κατανομή φορτίου στην εσωτερική επιφάνεια του εσωτερικού δακτυλίου του ρουλεμάν

Τέλος όσον αφορά στις στηρίξεις εφαρμόζεται πάκτωση δηλαδή δεσμεύονται όλοι οι βαθμοί ελευθερίας ($u_x = u_y = u_z = rot_x = rot_y = rot_z = 0$, Σχήμα 5.7α). στην εξωτερική επιφάνεια του εξωτερικού δακτυλίου ενώ στην εσωτερική επιφάνεια δεσμεύονται όλοι οι βαθμοί ελευθερίας εκτός τον βαθμό ελευθερίας αξονικής περιστροφής ($u_x = u_y = u_z = rot_x = rot_y = 0$, Σχήμα 5.7β).

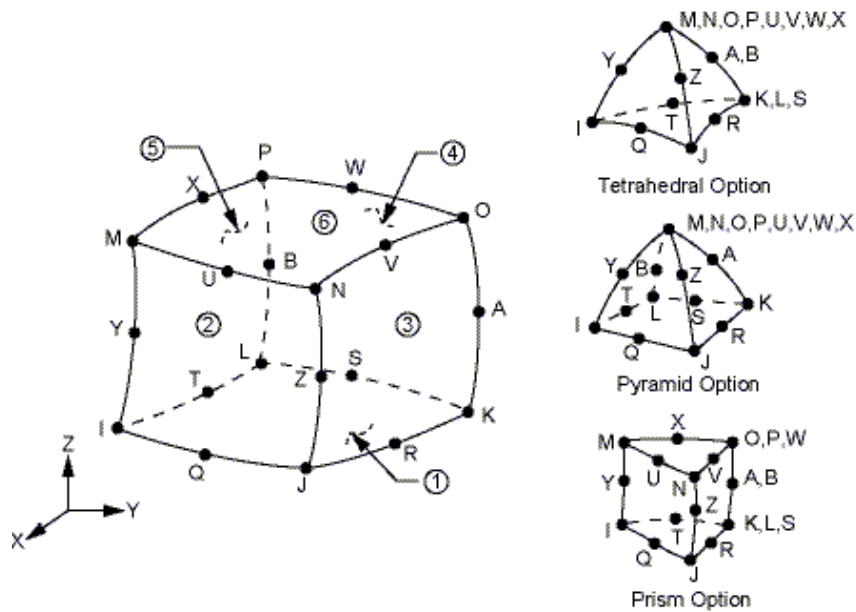


Σχήμα 5.7: Περιορισμοί που επιβάλλονται στον (α) εξωτερικό δακτύλιο και (β) εσωτερικό δακτύλιο

5.4 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ

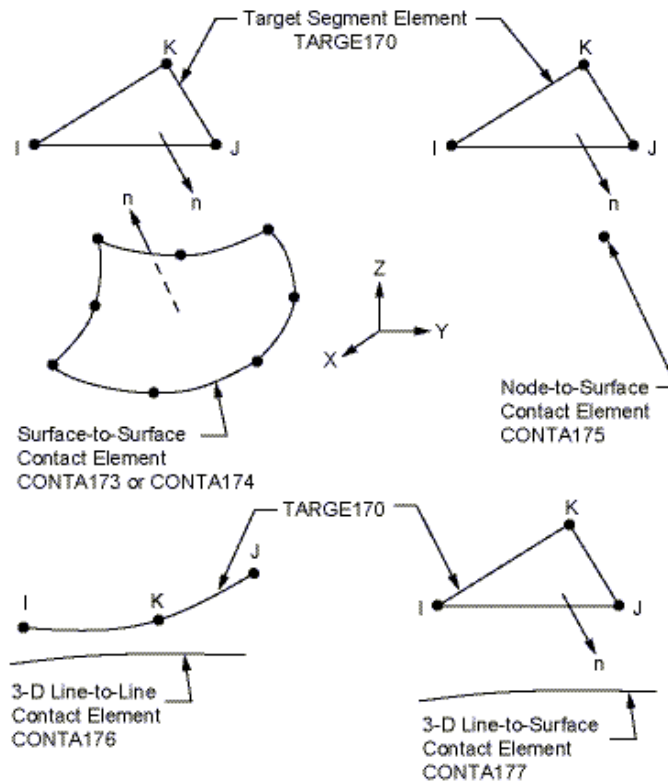
Στο αυτή τη παράγραφο παρατίθενται κάποιες πληροφορίες σχετικά με το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε για κάθε μοντέλο.

Το πεδίο ορισμού των ρουλεμάν θα πρέπει να διαχωρισθεί σε πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων. Το κάθε μέλος των ρουλεμάν διακριτοποιείται με πλέγμα δευτεροβάθμιων, πεπερασμένων στοιχείων όγκου SOLID175. Τα στοιχεία αυτά διαθέτουν 3 βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο (3 μετατοπίσεις) και η μορφή τους απεικονίζεται στο Σχήμα 5.8.

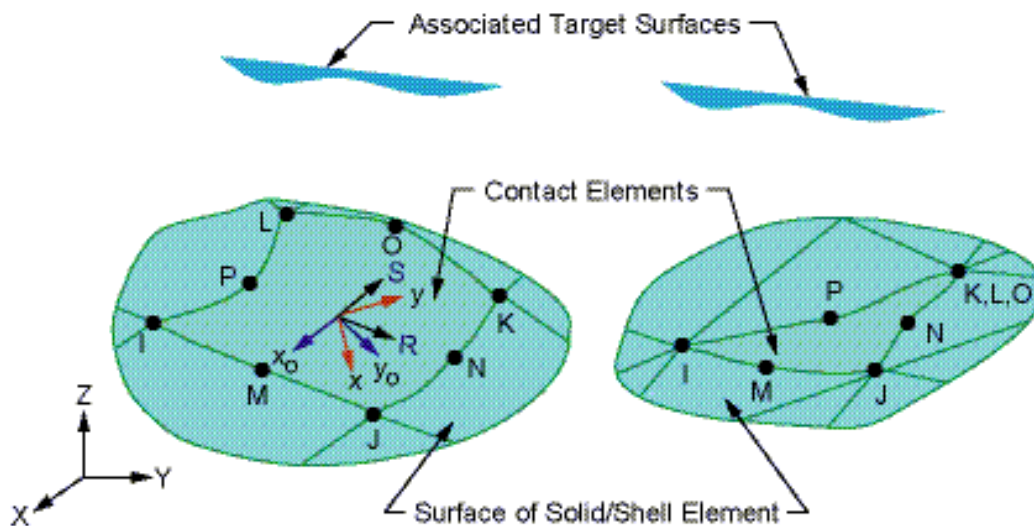


Σχήμα 5.8: Υιοθετούμενα πεπερασμένα στοιχεία όγκου

Για την προσομοίωση της επαφής των επιφανειών των επιφανειών των στοιχείων κύλισης των ρουλεμάν χρησιμοποιήθηκαν επιφανειακά στοιχεία TARGE170 (Σχήμα 5.9) ενώ στους εσωτερικούς και εξωτερικούς δακτυλίους τα στοιχεία CONTA174 (Σχήμα 5.10).

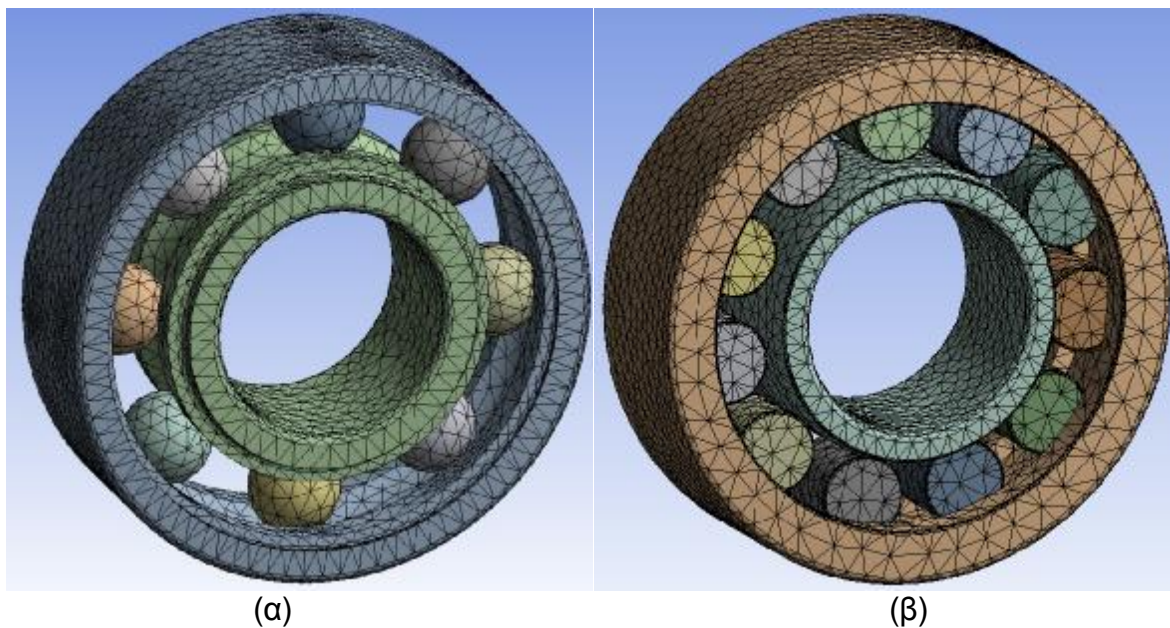


Σχήμα 5.9: Υιοθετούμενα πεπερασμένα στοιχεία TARGE170 για τις επιφάνειες επαφής των στοιχείων κύλισης (σφαιρών και κυλίνδρων των ρουλεμάν)



Σχήμα 5.10: Υιοθετούμενα πεπερασμένα στοιχεία CONTACT174 για τις επιφάνειες επαφής στους εσωτερικούς και εξωτερικούς δακτυλίους

Τα Σχήματα 5.11α και β απεικονίζουν τα πλέγματα στοιχείων για το ένσφαιρο και το βαρελοειδές ρουλεμάν, αντίστοιχα. Γενικά, όπως άλλωστε φαίνεται από σχήματα, για λόγους ακρίβειας της αριθμητικής λύσης επιλέχθηκαν πυκνές διακριτοποιήσεις και για τα δύο μοντέλα.



Σχήμα 5.11: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων για το (α) ένσφαιρο και (β) βαρελοειδές ρουλεμάν.

5.5 ΕΠΙΛΥΣΗ

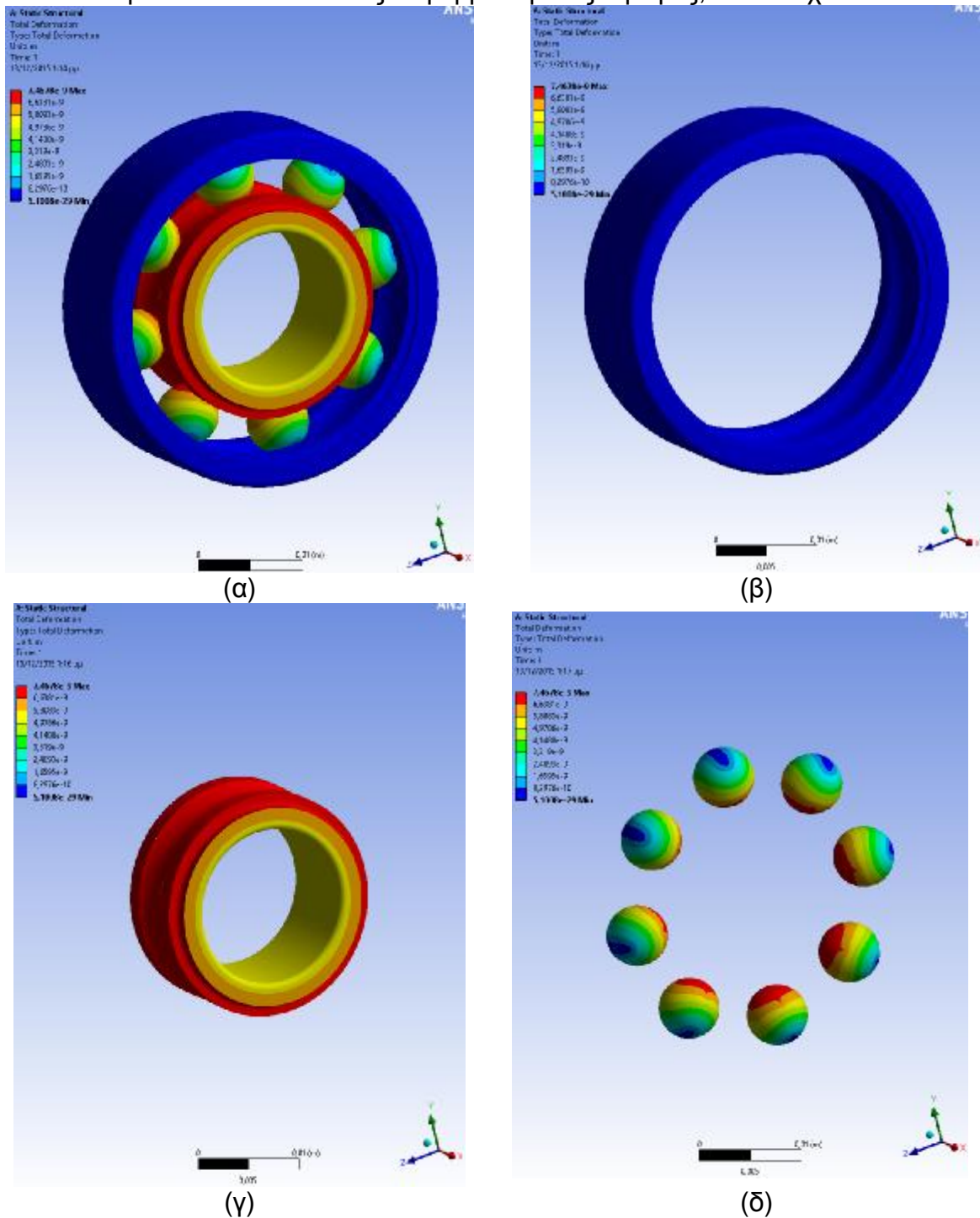
Προκειμένου να μελετηθεί η μηχανική συμπεριφορά των δύο ρουλεμάν χρησιμοποιήθηκαν αυτοματοποιημένοι αλγόριθμοι επίλυσης μη γραμμικών προβλημάτων οι

οποίοι βασίζονται στην επαναληπτική διαδικασία Newton-Raphson. Ένεκα της μη γραμμικότητας του φαινομένου της επαφής στο εξεταζόμενο πρόβλημα, η διαδικασία επίλυσης ήταν υποχρεωτικά επαναληπτική ούτως ώστε σε κάθε στάδιο της να καταστεί εφικτός ο προσδιορισμός τόσο της έκτασης όσο και του είδους της επαφής και να υπάρξει έτσι σύγκλιση της τελικής απόκρισης των ρουλεμάν.

6. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

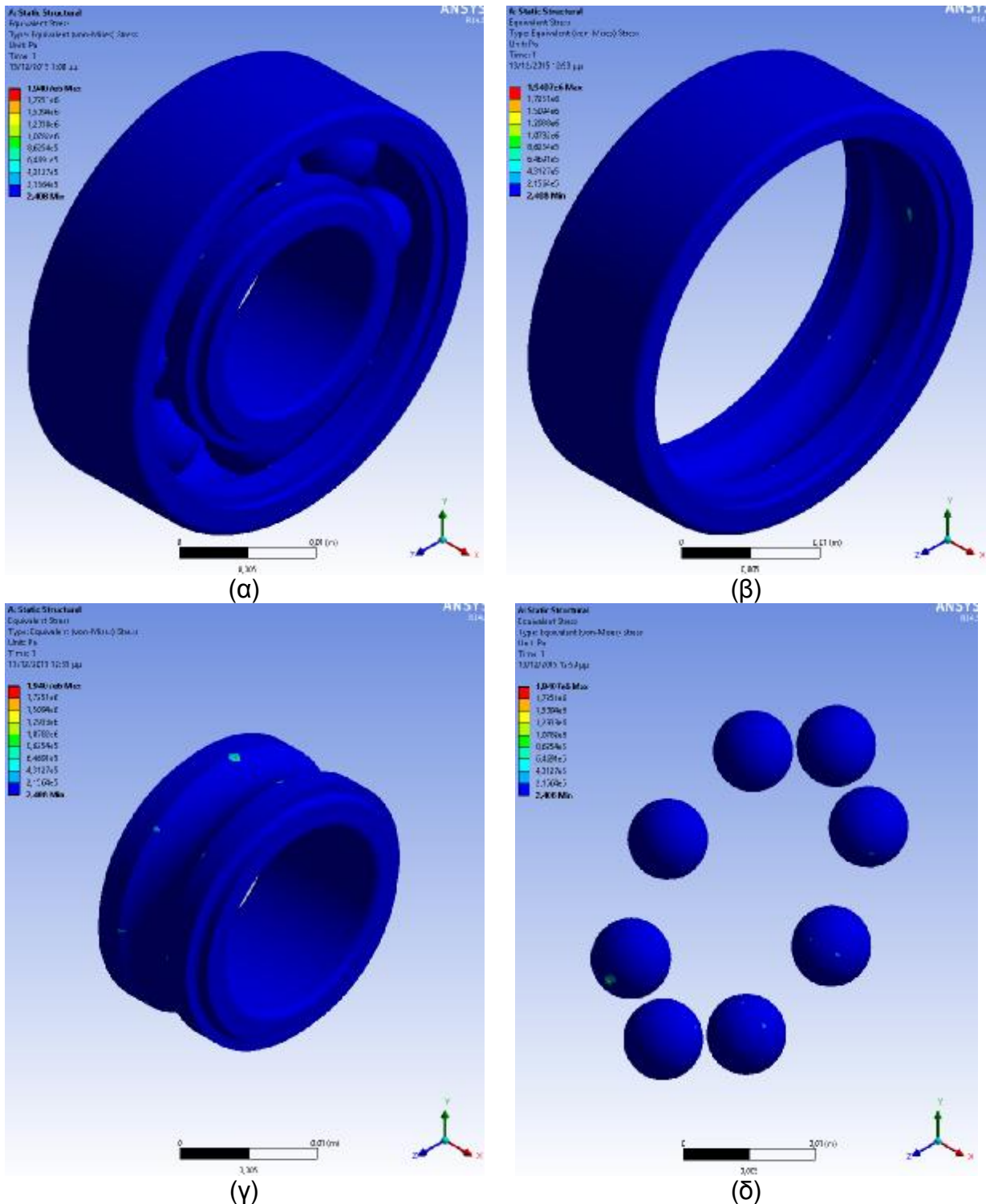
6.1 ΕΝΣΦΑΙΡΟ ΕΔΡΑΝΟ ΚΥΛΙΣΗΣ

Τα Σχήματα 6.1α, β, γ και δ περιέχουν περιγράμματα του μέτρου της συνισταμένης μετατόπισης σε όλο το ένσφαιρο ρουλεμάν, στον εξωτερικό δακτύλιο, στον εσωτερικό δακτύλιο και στις παρεμβαλλόμενες σφαίρες, αντίστοιχα.



Σχήμα 6.1: Περιγράμματα συνισταμένης μετατόπισης (α) στο ένσφαιρο ρουλεμάν, (β) στον εξωτερικό δακτύλιο, (γ) στον εσωτερικό δακτύλιο και (δ) στις σφαίρες

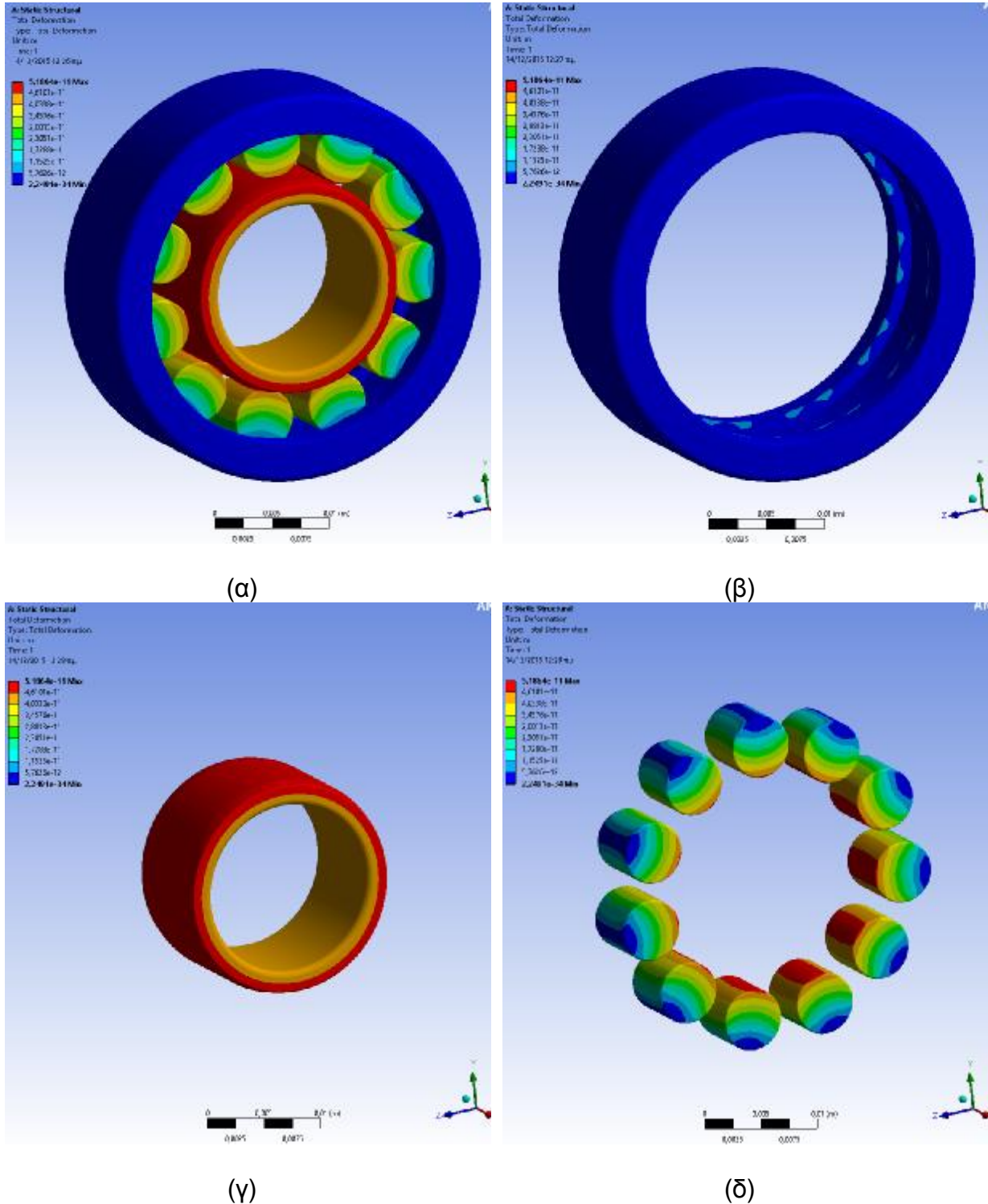
Παρομοίως, τα Σχήματα 6.2α, β, γ και δ περιέχουν περιγράμματα της ισοδύναμης τάσης vonMises σε όλο το ένσφαιρο ρουλεμάν, στον εξωτερικό δακτύλιο, στον εσωτερικό δακτύλιο και στις σφαίρες, αντίστοιχα.



Σχήμα 6.2: Περιγράμματα ισοδύναμης τάσης vonMises (α) στο ένσφαιρο ρουλεμάν, (β) στον εξωτερικό δακτύλιο, (γ) στον εσωτερικό δακτύλιο και (δ) στις σφαίρες

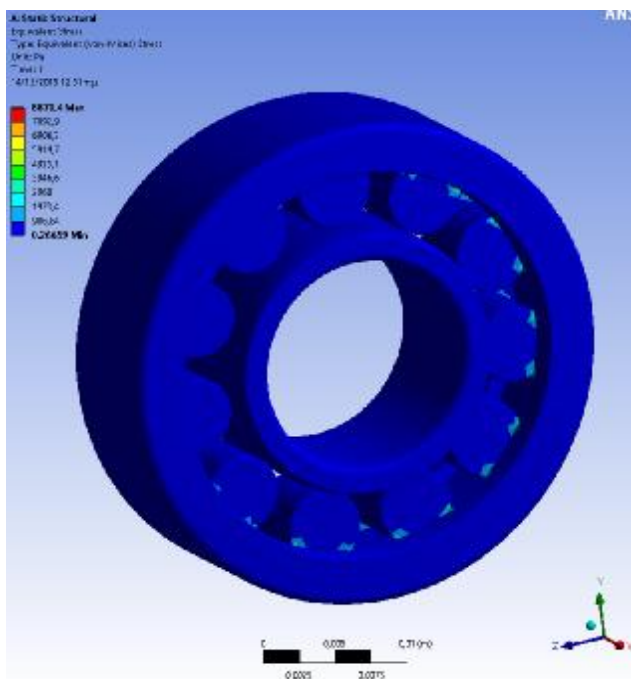
6.2 ΒΑΡΕΛΟΕΙΔΕΣ ΕΔΡΑΝΟ ΚΥΛΙΣΗΣ

Τα Σχήματα 6.3α, β, γ και δ περιέχουν περιγράμματα του μέτρου της συνισταμένης μετατόπισης σε όλο το βαρελοειδές ρουλεμάν, στον εξωτερικό δακτύλιο, στον εσωτερικό δακτύλιο και στους παρεμβαλλόμενους κυλίνδρους, αντίστοιχα.

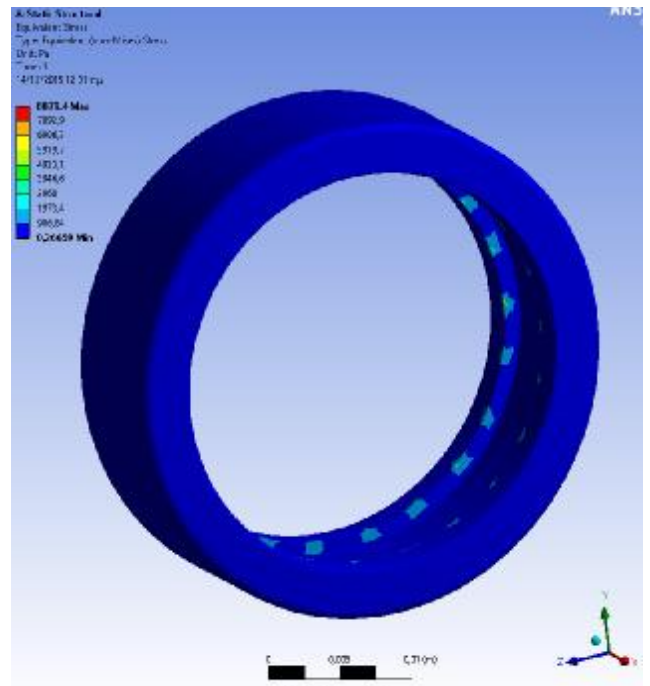


Σχήμα 6.3: Περιγράμματα συνισταμένης μετατόπισης (α) στο βαρελοειδές ρουλεμάν, (β) στον εξωτερικό δακτύλιο, (γ) στον εσωτερικό δακτύλιο και (δ) στις σφαίρες

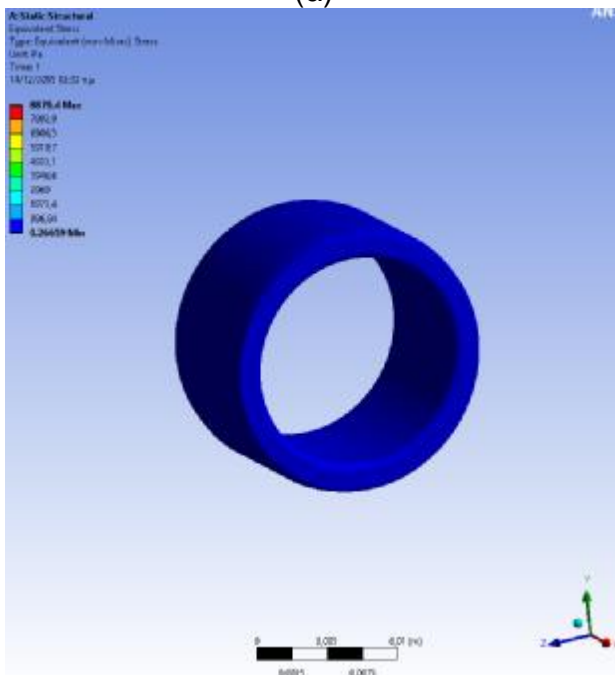
Παρομοίως, τα Σχήματα 6.4α, β, γ και δ περιέχουν περιγράμματα της ισοδύναμης τάσης vonMises σε όλο το ένσφαιρο ρουλεμάν, στον εξωτερικό δακτύλιο, στον εσωτερικό δακτύλιο και στις σφαίρες, αντίστοιχα.



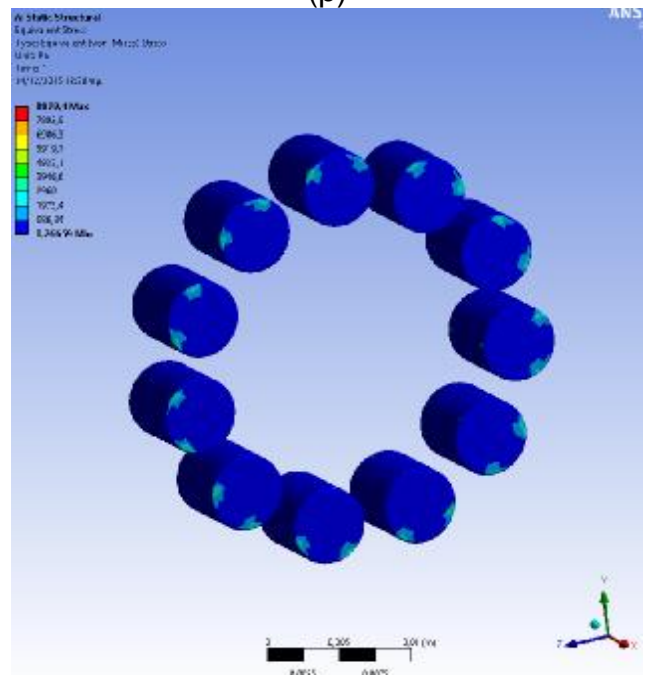
(α)



(β)



(γ)

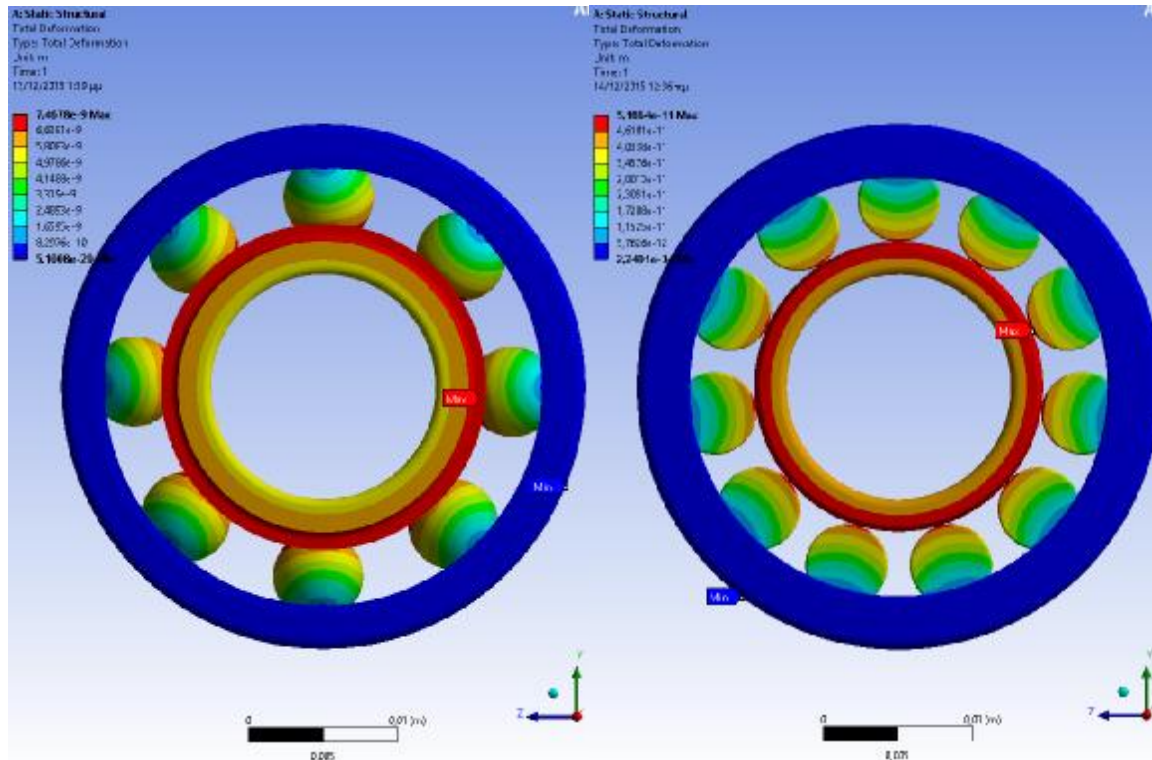


(δ)

Σχήμα 6.4: Περιγράμματα ισοδύναμης τάσης vonMises (α) στο βαρελοειδές ρουλεμάν, (β) στον εξωτερικό δακτύλιο, (γ) στον εσωτερικό δακτύλιο και (δ) στις σφαίρες

6.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΝΣΦΑΙΡΟΥ ΚΑΙ ΒΑΡΕΛΟΕΙΔΟΥΣ ΕΔΡΑΝΟΥ ΚΥΛΙΣΗΣ

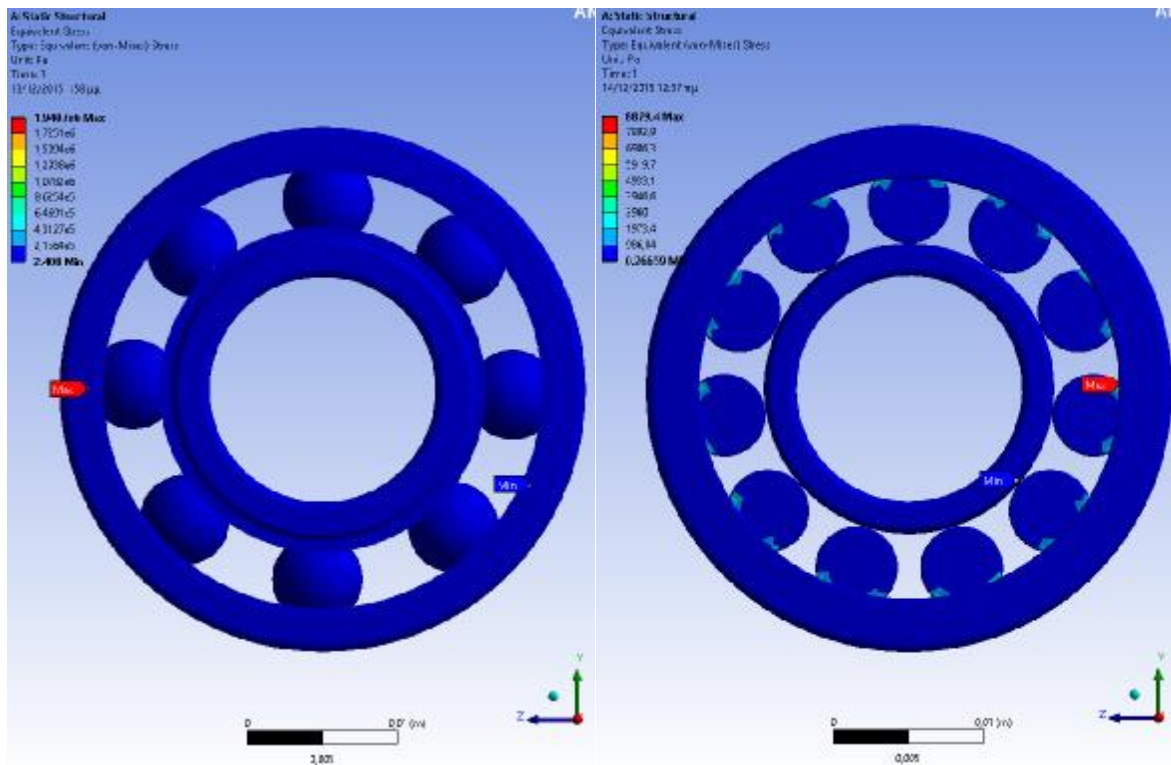
Τα Σχήματα 6.5α και β παρουσιάζουν τόσο τα περιγράμματα όσο και τις θέσεις των μέγιστων τιμών του μέτρου της συνισταμένης μετατόπισης του ένσφαιρου και βαρελοειδούς ρουλεμάν, αντιστοίχως. Εύκολα μπορεί να διαπιστώσει κανείς ότι το βαρελοειδές έδρανο παρέχει μεγαλύτερη δυσκαμψία σε σχέση με το ένσφαιρο ίδιων κύριων διαστάσεων.



(α) (β)

Σχήμα 6.5: Μέγεθος και θέση μέγιστου μέτρου συνισταμένης μετατόπισης (α) στο ένσφαιρο ρουλεμάν και (β) στο βαρελοειδές ρουλεμάν κάτω από τις ίδιες συνθήκες φόρτισης

Παρομοίως τα Σχήματα 6.7α και β παρουσιάζουν τόσο τα περιγράμματα όσο και τις θέσεις των μέγιστων τιμών της ισοδύναμης τάσης vonMises του ένσφαιρου και βαρελοειδούς ρουλεμάν, αντιστοίχως. Και εδώ παρατηρείται ότι οι μέγιστες τάσεις που εμφανίζονται στο βαρελοειδές ρουλεμάν είναι κατά πολύ μικρότερες σε σχέση με αυτές που έχουμε στη περίπτωση του ένσφαιρου ρουλεμάν. Αυτό αποδεικνύει και τη μεγαλύτερη ασφάλεια που παρέχει το βαρελοειδές έδρανο κύλισης.



(α) (β)

Σχήμα 6.5: Μέγεθος και θέση μέγιστης ισοδύναμης τάσης vonMises (α) στο ένσφαιρο ρουλεμάν και (β) στο βαρελοειδές ρουλεμάν κάτω από τις ίδιες συνθήκες φόρτισης

Η σύγκριση των δύο ρουλεμάν κάτω από κοινή στατική φόρτιση συνοψίζεται στον πίνακα 6.1. Η ανωτερότητα της μηχανικής συμπεριφοράς του βαρελοειδούς ρουλεμάν είναι εμφανής. Αυτό οφείλεται τόσο στα περισσότερα εσωτερικά στοιχεία κύλισης που διαθέτει όσο και στις μεγαλύτερες επιφάνειες επαφής που παρέχει μεταξύ των κυλίνδρων και των δύο δακτυλίων του.

Πίνακας 6.1: Σύγκριση μέγιστης μετατόπισης και ισοδύναμη τάσης μεταξύ ένσφαιρου και βαρελοειδούς ρουλεμάν.

Έδρανο κύλισης	Ένσφαιρο	Βαρελοειδές
Εξωτερικός δακτύλιος	Πάκτωση	Πάκτωση
Εσωτερικός δακτύλιος	Πάκτωση με ελεύθερη αξονική περιστροφή	Πάκτωση με ελεύθερη αξονική περιστροφή
Κατακόρυφο Φορτίο (N)	-1000	-1000
Μέγιστη τάση vonMises (Pa)	1.9×10^6	8.9×10^4
Μέγιστη ολική μετατόπιση (m)	7.5×10^{-9}	5.2×10^{-11}

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη παρούσα πτυχιακή υιοθετήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και συγκεκριμένα το δημοφιλές επαγγελματικό πακέτο πεπερασμένων στοιχείων Ansys-Workbench για την προσομοίωση της στατικής συμπεριφοράς εδράνων κυλίσεως. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, αποτελεί ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για ένα μηχανικό, διότι επιτρέπει σε αυτόν να μελετήσει τη συμπεριφορά οποιασδήποτε κατασκευής και να προβεί σε αλλαγές σε περίπτωση που ο σχεδιασμός δεν είναι επαρκής. Έτσι, δεν απαιτείται η κατασκευή δοκιμών και η διενέργεια καταστροφικών πειραματικών μελετών η οποία είναι συνήθως δαπανηρή, πολύπλοκη παράλληλα απαιτεί και τη χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού αλλά και προσωπικού.

Πρώτος και κύριος στόχος της παρούσας πτυχιακής ήταν να υπάρξει εξοικείωση με ένα εξαιρετικά χρήσιμο επαγγελματικό πακέτο πεπερασμένων στοιχείων το οποίο αποτελεί ένα εξαιρετικά σημαντικό εργαλείο για το μελλοντικό μηχανικό. Δεύτερος στόχος ήταν να υπάρξει εμβάθυνση στη κατανόηση της λειτουργίας και της μηχανικής συμπεριφοράς των εδράνων κύλισης τα οποία είναι και από τα βασικότερα Στοιχεία Μηχανών και τα οποία χρησιμοποιούνται κατά κόρον ακόμα και στις απλοϊκότερες μηχανολογικές κατασκευές. Στόχος της εργασίας ήταν επίσης να δοθούν οι βασικές κατευθύνσεις σε κάποιον επόμενο σπουδαστή που θα μελετήσει το παρόν τεύχος να μελετήσει οποιοδήποτε μηχανολογικό πρόβλημα με τη χρήση του Ansys-Workbench.

Η πτυχιακή εστιάσθηκε στην αριθμητική ανάλυση της στατικήςμηχανικής συμπεριφοράς ενός ένσφαιρου και ενός βαρελοειδούς εδράνου κυλίσεως, ίδιων εξωτερικών διαστάσεων και κάτω από τις ίδιες συνθήκες φόρτισης και στήριξης. Το χρονικό πρόβλημα δεν αποτέλεσε αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής λόγω του υψηλότερου υπολογιστικού του κόστους που θα απαιτούσε.

Το πρόβλημα που διερευνήθηκε ήταν ισχυρά μη γραμμικό και δεν ήταν δυνατή η αναλυτική του προσέγγιση του, διότι η μελέτη εμπειρείχε το φαινόμενο της επαφής με τριβή. Η μοντελοποίηση βασίστηκε κυρίως στη χρήση τρισδιάστατων στοιχείων όγκου αλλά και επιφανειακών στοιχείων επαφής με τριβή στις υποψήφιες επιφάνειες επαφής μεταξύ των κυλιόμενων στοιχείων και των δακτυλίων των εδράνων. Στόχος ήταν η εξαγωγή καίριων συμπερασμάτων όσον αφορά την δυσκαμψία και την αντοχή των δύο ρουλεμάν.

Από τα αριθμητικά αποτελέσματα εξάχθηκαν κάποια σημαντικά συμπεράσματα. Συγκεκριμένα κάτω από κοινές στατικές εγκάρσιες καταπονήσεις:

- Τα βαρελοειδή έδρανα κύλισης παρουσιάζουν μικρότερες μετατοπίσεις και άρα μεγαλύτερη εγκάρσια δυσκαμψία σε σχέση με αντίστοιχα ένσφαιρα ιδίων διαστάσεων.
- Τα βαρελοειδή έδρανα κύλισης παρουσιάζουν μικρότερες εσωτερικές τάσεις και άρα μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με αντίστοιχα ένσφαιρα έδρανα ιδίων διαστάσεων.

Η παρούσα εργασία βοήθησε στην καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς ενός εδράνου κύλισης. Μια μελλοντική μελέτη σε παρόμοιο πεδίο, θα έχει ένα πολύ καλό υπόβαθρο για την συγγραφέα λόγω της παρούσας εργασίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1.Γ. Αυγερινός, Στοιχεία Μηχανών, Εκδόσεις Πλαίσιο, Αθήνα, 1970
- 2.Δρ. Π. Α. Βουθούνης , “Τεχνική Μηχανική, αντοχή των υλικών”, Ελληνικές Τεχνολογικές Εκδόσεις, Αθήνα 1993
- 3.Γ.Γ. Γκρος, “Αντοχή Υλικών”, Εκδόσεις Ιδρύματος Ευγενίδου, Αθήνα, 2002
- 4Γραϊκούση Ρ. «Στοιχεία Μηχανών ΙΙ» στοιχεία περιστροφικής κίνησης ‘Εκδόσεις Γιαχούδη’
- 5.Ρ. Γραϊκούση, Στοιχεία Μηχανών, Θεσσαλονίκη, 1977
- Κανάραχος Α., Αντωνιάδης Ι., ‘Δυναμική Μηχανών ‘1998, Παπασωτηρίου
- 6.Λ. Λαζαρίδης, Στοιχεία Μηχανών, Εκδόσεις Ιδρύματος Ευγενίδου, Αθήνα, 1985
- 7.Στεργίου Ιωαν. «Στοιχεία μηχανών Ι» έκδοση 2000 Ο.Ε.Δ.Β.Α
- 8.Ι. Κ. Στεργίου, Κ. Ι. Στεργίου, Στοιχεία Μηχανών, Σύγχρονη Εκδοτική, Αθήνα, 2003
9. James I. Taylor, ‘The Gear Analysis Handbook’, 2000, The Vibration Institute, VCI
10. Victor Wowk, ‘Machinery Vibration’, 1991, McGraw-Hill Inc.
11. James I. Taylor, ‘The Vibration Analysis Handbook’, 1994, The Vibration Institute, VCI
12. ‘IMI Sensors Catalog’, 2002, PCB Group Inc.
13. R. B. Randall, ‘Frequency Analysis’, 1987, 3rd Ed, Bruel & Kjaer.
14. Seminar C 40e, ‘Machine Diagnosis’, Brüel & Kjaer, Schenck.
15. James E. Berry, ‘Advanced Vibration Diagnostic and Reduction Techniques’, 1997, Technical Associates of Charlotte, P.C.
16. James E. Berry, ‘Vibration Analysis I’, Volume 1 and 2, 1997, Technical Associates of Charlotte, P.C., ENTEK IRD.
17. ‘Beginner’s Guide to Machine Vibration’, 2003, Commtest Instruments Ltd
18. Μαλιώτης Γ. (2009) Ρουλεμάν: Καρδιά κάθε μηχανής από το επιστημονικό περιοδικό «Μετάδοση Ισχύος», «Διάβρωση σε έδρανα κύλισης», <http://www.metadosi-ischios.gr/>
19. Σταύρος Μ. Πανάς, “Ανάλυση στοχαστικών σημάτων”, Υπηρεσία Δημοσιευμάτων ΑΠΘ, (2001).
20. Σταύρος Μ. Πανάς “Ψηφιακή Επεξεργασία Σήματος” , UNIVERSITY STUDIO PRESS, (2001).
21. <http://www.skf.com>
22. <http://web.mit.edu/2.75/fundamentals/FUNdaMENTALs%20Book%20pdf/FUNdaMENTALs%20Topic%2010.PDF>
23. <http://users.ntua.gr/cprovat/yliko/Notes%20for%20ANSYS.pdf>
24. <http://www.metadosi-ischios.gr/article.php?ID=95>
25. <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%88%CE%B4%CF%81%CE%B1%CE%BD%CE%BF>
26. http://keck.ucsf.edu/~schenk/Huang_etal98.pdf
27. www.mathworks.com
28. <http://www.bksv.com/doc/Bp1841.pdf>
29. <http://www.mech.upatras.gr/~papado/CAMD/work.files/Askisi-04.pdf>

30. <https://sites.google.com/site/stoixeia2/home/stoixeia/ball-bearings/9-kataskeuastes-rouleman>

31. Master's Degree in Numerical Simulation in Engineering with ANSYS Universidad Politécnica de Madrid – ANSYS

32. Γιούργα Ηλιάνα: "Προβλεπτική συντήρηση μηχανών με διάγνωση σφάλματος σε έδρανα κύλισης μέσω Ανάλυσης FFT", Διπλωματική εργασία, Θεσσαλονίκη 2012

33. Τσόλης Γεώργιος, "Ο μετασχηματισμός "Hilbert-Huang" , Διδακτορική διατριβή

34. Κωνσταντίνος Ροδόπουλος: "Σύγκριση μεθόδων εκτίμησης μεταβαλλόμενης ταχύτητας περιστροφής από μέτρηση κραδασμών", Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2011

35. ANSYS® Academic Research, Release 14.5