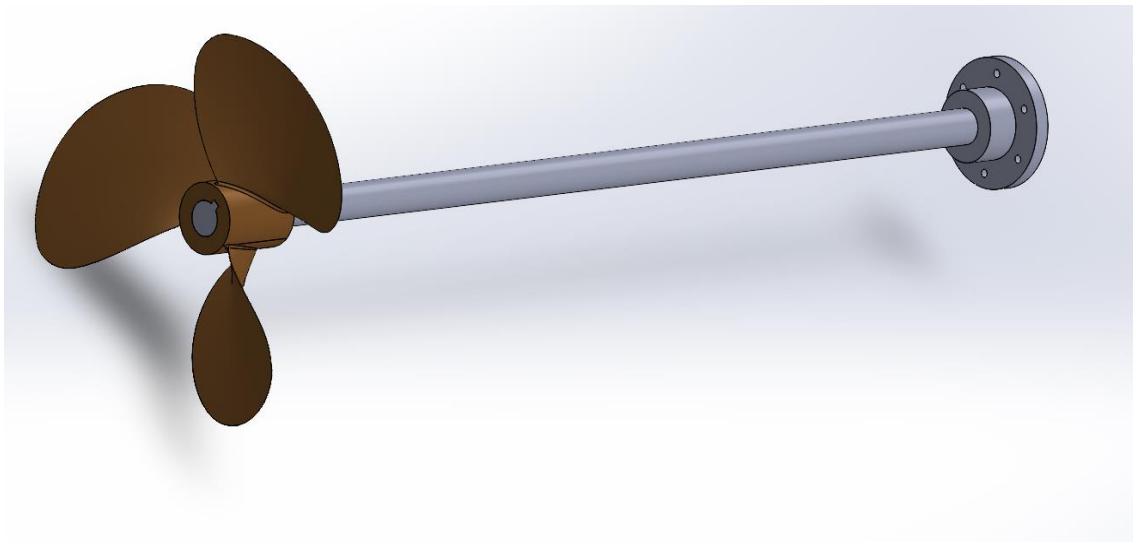




Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πολυτεχνική Σχολή

Διπλωματική Εργασία

*Ανάπτυξη Μοντέλου Πεπερασμένων Στοιχείων και Δυναμική
Ανάλυση Αξονικού Συστήματος Πρόωσης Μηχανότρατας.*



Επιβλέπων Καθηγητής:
Αραϊλόπουλος Αλέξανδρος

Φοιτητής : Μπάλτσας Διονύσιος
AEM:2187

KOZANH 2024

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ABSTRACT	5
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	6
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΜΑ -ΣΤΟΧΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	7
1.2 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΡΟΩΣΗΣ	8
1.2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΠΡΟΩΣΗΣ	8
1.2.2 ΥΨΗΛΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ ΝΑΥΤΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΝΤΙΖΕΛ.....	9
(HIGH - SPEED MARINE DIESEL ENGINES)	9
1.2.3 ΈΛΙΚΑ (ΠΡΟΠΕΛΑ).....	10
1.2.3.1 ΓΕΝΙΚΑ	10
1.2.3.2 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΛΙΚΑΣ	11
1.2.3.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΛΙΚΑΣ	11
1.2.4 ΑΞΟΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	15
2 ΘΕΩΡΙΑ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	19
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	19
2.2 ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	19
2.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	20
2.3.1 ΔΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ	22
2.4 ΤΡΟΠΟΙ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ ΡΟΤΟΡΑ	26
2.4.1 ΠΛΕΥΡΙΚΕΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ	27
2.4.2 ΣΤΡΕΠΤΙΚΕΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ	27
2.4.3 ΑΞΟΝΙΚΕΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ.....	28
2.5 ΕΞΙΣΩΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ	28
2.5.1 ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗ ΙΔΙΟΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	29
2.6 ΒΑΣΙΚΕΣ ΟΡΟΛΟΓΙΕΣ ΣΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΩΝ ΣΤΡΟΦΕΩΝ.....	30
2.6.1 ΣΤΡΟΒΙΛΙΣΜΟΣ	30
2.6.2 ΓΥΡΟΣΚΟΠΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ	31
2.6.3 ΑΠΟΣΒΕΣΗ	31
2.6.5 ΤΡΟΧΙΑ ΣΤΡΟΒΙΛΙΣΜΟΥ	33
2.6.6 ΚΡΙΣΙΜΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ	33
2.6.7 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ CAMBELL.....	34

3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΟΥ ΡΟΤΟΡΑ JEFFCOTT.....	37
3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΡΟΤΟΡΑ JEFFCOTT	37
3.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΟΥ ΡΟΤΟΡΑ JEFFCOTT ΣΤΟ ANSYS WORKBENCH.....	38
3.3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΟ MATLAB	40
3.4 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.....	40
3.5 ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	40
3.5.1 ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΜΗΛΕΝΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ	40
3.5.2 ΚΡΙΣΙΜΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ CABELL	41
4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΑΞΟΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΡΟΩΣΗΣ	46
4.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΗΚΑ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΤΟΥ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	46
4.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΑΞΟΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΡΟΩΣΗΣ.	46
4.2.1 ΈΛΙΚΑ	46
4.2.2 ΕΛΙΚΟΦΟΡΟΣ ΑΞΟΝΑΣ	48
4.2.3 ΦΛΑΝΤΖΑ.....	49
4.2.4 ΤΕΛΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ.....	50
4.3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΑΞΟΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΡΟΩΣΗΣ	50
4.3.1 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ	51
4.3.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΕΔΡΑΝΩΝ.....	52
4.4 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ (CONSTRAINTS).....	53
4.5 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΟ MATLAB	53
4.6 ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΡΟΩΣΗΣ.....	54
4.7 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ (FREQUENCY RESPONSE ANALYSIS)	61
5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	65
5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	65
5.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	66
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	67

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το σύστημα πρόωσης ενός πλοίου αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι για την αξιόπιστη και αποδοτική λειτουργία του και την κάλυψη των αναγκών στα ταξίδια του στη θάλασσα. Το κύριο μέρος του συστήματος πρόωσης του πλοίου είναι το αξονικό σύστημα, η σωστή μελέτη και ανάλυση συμβάλλει στη ασφαλή και αποδοτική λειτουργία του, όπως και στην αποφυγή βλαβών που μπορεί να οδηγήσουν στην απώλεια πρόωσης και ακυβερνησίας του πλοίου. Επιπρόσθετα, με δεδομένο ότι οι σύγχρονες διατάξεις πλοίων αποτελούνται από μεγάλα μήκη αξόνων για καλύτερη κατανομή του βάρους και από πολύστροφες υπερτροφοδοτούμενες μηχανές ντίζελ, όπως σε αυτή την περίπτωση, η μελέτη τους είναι σημαντική για την αποφυγή προβλημάτων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιήθηκε η μοντελοποίηση του αξονικού συστήματος πρόωσης σκάφους τύπου μηχανότρατας, αποτελούμενο από έναν πολύστροφο κινητήρα diesel, ο οποίος περιστρέφει μια έλικα σταθερού βήματος άμεσα συνδεδεμένη στον άξονα με μειωτήρα στροφών. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε η παραμετρική σχεδίαση στο λογισμικό Solidworks και η δυναμική ανάλυση σε ένα εύρος στροφών 0-300 rad/s ενός απλού δοκιμαστικού μοντέλου ρότορα του γνωστού ως «Jeffcott rotor» πεπερασμένων στοιχείων στο λογισμικό Ansys Workbench Student 2024 στηριζόμενο σε σταθερά έδρανα όπου έγινε η εξαγωγή των φυσικών συχνοτήτων, των ιδιομορφών, του διαγράμματος Cambell και των κρίσιμων ταχυτήτων. Επίσης, η ανάλυση έγινε και σε περιβάλλον Matlab για την επαλήθευση και αξιοπιστία των αποτελεσμάτων συμπεριλαμβάνοντας τα γυροσκοπικά φαινόμενα όπου παρατηρήσαμε ότι η απόκλιση των αποτελεσμάτων ήταν μικρότερη από 10%.

Στο επόμενο κομμάτι στη δυναμική ανάλυση του αξονικού συστήματος πρόωσης της μηχανότρατας, όπως προαναφέρθηκε, όπου αποτελείται από τον ελικοφόρο άξονα και από την έλικα. Σε πρώτη φάση πραγματοποιήθηκε η παραμετρική μοντελοποίηση του αξονικού συστήματος στο λογισμικό Solidworks με τα κατάλληλα εργαλεία του προγράμματος σε ξεχωριστά μέρη και ύστερα πραγματοποιήθηκε η συναρμολόγηση της γεωμετρίας. Στη συνέχεια, ακολουθεί η δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα Ansys Workbench όπου τοποθετήθηκαν στα σημεία στήριξης του άξονα τα ρουλεμάν και ορίστηκαν οι οριακές συνθήκες. Η δημιουργία του πλέγματος έγινε με την αυτοματοποιημένη λειτουργία που προσφέρει το πρόγραμμα Ansys Workbench και ύστερα από διάφορες αναλύσεις με διαφορετικά μεγέθη στοιχείων και ρυθμίσεις πλέγματος ορίστηκε τελικά στα 20 mm όπου δεν υπήρχε σημαντική αλλαγή στα αποτελέσματα.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε η δυναμική ανάλυση του συστήματος πρόωσης περιστρέφοντάς το στο εύρος λειτουργίας του κινητήρα από 0-1500 rpm και έγινε η εξαγωγή του διαγράμματος Cambell, των φυσικών συχνοτήτων, των ιδιομορφών και των κρίσιμων ταχυτήτων. Επίσης, όπως και στο μοντέλο του Jeffcott rotor έτσι και εδώ υλοποιήθηκε η ανάλυση του αξονικού συστήματος πρόωσης σε περιβάλλον Matlab σε απλοποιημένη μορφή και έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων. Όπως και στο δοκιμαστικό μοντέλο έτσι και σε αυτή την ανάλυση η απόκλιση ήταν κάτω του 11% κάτι που επιβεβαιώνει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Λέξεις-κλειδιά : μηχανότρατα, αξονικό σύστημα πρόωσης, πεπερασμένα στοιχεία, δυναμική ανάλυση.

ABSTRACT

The propulsion system of a ship is an integral part of its reliable and efficient operation, meeting the needs of its voyages at sea. The main component of the ship's propulsion system is the axial system, and its proper study and analysis contribute to its safe and efficient operation, as well as the prevention of failures that could lead to a loss of propulsion and steerability. Additionally, given that modern ship configurations consist of long shafts for better weight distribution and high-speed turbocharged diesel engines, as in this case, studying them is essential for avoiding problems.

In this thesis, the modeling of the axial propulsion system of a trawler-type vessel was carried out, consisting of a high-speed diesel engine that rotates a fixed-pitch propeller directly connected to the shaft with a speed reducer. Initially, parametric design was conducted in Solidworks software, and dynamic analysis was performed over a speed range of 0-300 rad/s on a simple test rotor model, known as the "Jeffcott rotor," using finite elements in Ansys Workbench Student 2024 software, supported on fixed bearings. The natural frequencies, modes, Cambell diagram, and critical speeds were extracted. Additionally, the analysis was also performed in Matlab for verification and reliability of the results, including gyroscopic effects, where we observed that the deviation of the results was less than 10%.

In the next part, the dynamic analysis of the axial propulsion system of the trawler was performed, as mentioned earlier, consisting of the propeller shaft and the propeller. In the first phase, the parametric modeling of the axial system was performed in Solidworks software using the appropriate program tools in separate parts, followed by the assembly of the geometry. Next, a finite element mesh was created in Ansys Workbench, where bearings were placed at the shaft's support points, and boundary conditions were defined. The mesh was created using the automated functionality provided by the Ansys Workbench program, and after various analyses with different element sizes and mesh settings, it was finalized at 20 mm, where no significant change in the results was observed.

Finally, the dynamic analysis of the propulsion system was carried out, rotating it within the engine's operating range of 0-1500 rpm, and the Cambell diagram, natural frequencies, modes, and critical speeds were extracted. As with the Jeffcott rotor model, the analysis of the axial propulsion system was also performed in Matlab in a simplified form, and the results were compared. As in the test model, the deviation in this analysis was below 11%, confirming the reliability of the results.

Key-words: trawler, axial propulsion system , finite element, dynamic analysis.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να αναφέρω ότι η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί έργο μεγάλης προσπάθειας από εμένα ώστε να καταφέρω να βγει αυτό το αποτέλεσμα κάτι το οποίο δεν θα ήταν εφικτό αν δεν είχα την κατάλληλη υποστήριξη και σωστή καθοδήγηση από τον επιβλέποντα καθηγητή μου τον κ. Αραϊλόπουλο Αλέξανδρο που τον ευχαριστώ θερμά για όλα και για την δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα. Επίσης, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ κυρίως στην οικογένεια μου για την υποστήριξη που είχα όλα αυτά τα χρόνια για να φτάσω ως εδώ και η οποία πίστεψε σε εμένα.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΜΑ -ΣΤΟΧΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Ένα σκάφος αποτελεί μια εξειδικευμένη κατασκευή που πρέπει να αντέχει αυτόνομα στο περιβάλλον του για παρατεταμένη διάρκεια, απαιτώντας ένα εξαιρετικά υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας. Κατά τα αρχικά στάδια της κατασκευής των σκαφών, οι μεθοδολογίες βασίζονταν σε σχετικά απλούς υπολογισμούς. Οι σχεδιαστές στράφηκαν στη χρήση απλών μοντέλων για την εκτίμηση των τάσεων που ασκούνται σε διάφορους τύπους σκαφών και τα αντίστοιχα εξαρτήματά τους. Κατά συνέπεια, λόγω των εγγενών χαρακτηριστικών ενός τέτοιου πλαισίου, το οποίο εκτίθεται διαρκώς σε κυμαινόμενα φορτία που προκαλούνται από το θαλάσσιο περιβάλλον και το μεταφερόμενο φορτίο, προέκυψε η επιτακτική ανάγκη προσδιορισμού μιας πληθώρας πρόσθετων παραμέτρων που είναι απαραίτητες για την αξιόπιστη κατασκευή και λειτουργία ενός πλοίου. Έτσι λοιπόν, με τις απαιτήσεις της σύγχρονης ναυτικής βιομηχανίας αλλά και όλων των μηχανολογικών κατασκευών για τη δημιουργία ελαφριών, ευέλικτων, στιβαρών και λειτουργικών κατασκευών οδήγησαν στην ανάπτυξη και βελτίωση καινοτόμων μεθόδων για την σχεδίαση και την κατασκευή τους.

Η επιλογή του συστήματος πρόωσης ενός σκάφους είναι ένα περίπλοκο εγχείρημα που απαιτεί εξειδικευμένες γνώσεις και πρακτική εμπειρία. Πριν οριστεί η τελική απόφαση, αξιολογούνται διεξοδικά διάφορες εναλλακτικές λύσεις, δεδομένου του πλήθους των παραγόντων που επηρεάζουν αυτή την κρίσιμη επιλογή. Το σύστημα πρόωσης του πλοίου κατέχει καίριο ρόλο στην οδήγηση του πλοίου στο θαλάσσιο περιβάλλον. Συνήθως, ένα σύστημα πρόωσης αποτελείται από τρία αναπόσπαστα στοιχεία: τον πρωτεύοντα κινητήρα, το αξονικό σύστημα και την έλικα. Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη μοντελοποίηση και στη δυναμική ανάλυση του αξονικού συστήματος, ένα θεμελιώδες σημείο εστίασης, το οποίο διευκολύνει τη μετάδοση ισχύος από την κύρια μηχανή πρόωσης «έξοδος» στην έλικα του πλοίου «κατανάλωση».

Ειδικότερα, η διπλωματική εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια:

Στο πρώτο κεφάλαιο που είναι η εισαγωγή γίνεται μια αναφορά στο θέμα, στο σκοπό της εργασίας και στα διάφορα μέρη που αποτελούν το σύστημα πρόωσης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, δίνεται έμφαση στη θεωρία που στηρίζεται η ανάλυση των περιστρεφόμενων κατασκευών στους τύπους και στις εξισώσεις αλλά και στη θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων με τα οποία δομείται η κατασκευή για να γίνει εφικτή η δυναμική ανάλυση. Επίσης, γίνεται μια σύντομη περιγραφή των όρων που περιγράφουν τα δυναμικά φαινόμενα του απλού μοντέλου ρότορα «Jeffcott Rotor», όπως είναι ο στροβιλισμός, οι ιδιομορφές, η απόσβεση, η τροχιά στροβιλισμού, τα γυροσκοπικά φαινόμενα και οι κρίσιμες ταχύτητες που προκύπτουν από το Cambell διάγραμμα.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται η παραμετρική σχεδίαση του απλού μοντέλου του Jeffcott Rotor που αναλύθηκε και επιλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο σε δύο εξαρτήματα στο ρότορα και στο δίσκο στο πρόγραμμα Solidworks, όπου στη συνέχεια γίνεται η συναρμολόγησή τους. Ο δίσκος τοποθετείται μακριά από τον μέσον του ρότορα για να δειχθεί το έντονο γυροσκοπικό φαινόμενο. Έπειτα το αρχείο CAD εισάγεται στο λογισμικό Ansys Workbench, όπου γίνεται η

διακριτοποίηση της γεωμετρίας μας σε πεπερασμένα στοιχεία (FEM), γίνεται επιλογή του υλικού και ορίζονται οι οριακές συνθήκες. Στο τελευταίο στάδιο γίνεται η ιδιομορφική ανάλυση του μοντέλου FEM και γίνεται σύγκριση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων, των ιδιομορφών και του διαγράμματος Cambell, με την αντίστοιχη ανάλυση του μοντέλου στο πρόγραμμα Matlab.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, περιγράφεται αναλυτικά η γεωμετρία του αξονικού συστήματος πρόωσης του σκάφους, τα χαρακτηριστικά του κινητήρα, καθώς και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση του. Επιπλέον, περιγράφεται η διαδικασία σχεδίασης του μοντέλου στο πρόγραμμα Solidworks σε διαφορετικά εξαρτήματα και η συναρμολόγηση τους. Έπειτα, παρατίθενται κάποιες εικόνες από το κάθε εξάρτημα ξεχωριστά και της τελικής γεωμετρίας της τρισδιάστατης κατασκευής. Στο επόμενο βήμα πραγματοποιείται η εισαγωγή της γεωμετρίας μας στο Ansys Workbench όπου γίνεται η επιλογή του υλικού των εξαρτημάτων και χωρίζεται η γεωμετρία σε όγκους μέσω του υποπρογράμματος Design Modeler του Ansys Workbench στις θέσεις στις οποίες θα συνδεθούν τα έδρανα στήριξης του άξονα. Εφόσον έχουν οριστεί οι οριακές συνθήκες του προβλήματος ακολουθεί η ιδιομορφική ανάλυση όπου γίνεται η εξαγωγή των ιδιοσυχνοτήτων, των ιδιομορφών και του διαγράμματος Cambell και γίνεται η αντίστοιχη διαδικασία και στο πρόγραμμα Matlab όπου γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων στο εύρος στροφών λειτουργίας του σκάφους από 0-1500 rpm. Τέλος πραγματοποιείται και η ανάλυση απόκρισης συχνότητας (Frequency Response Analysis) για εύρος συχνοτήτων 0-200 Hz που είναι και το εύρος των συχνοτήτων που έχουν εξαχθεί με την εφαρμογή των δυνάμεων ώσης και ροπής που παράγονται από την έλικα στον άξονα κατά την μέγιστη λειτουργία του και παρουσιάζονται τα διαγράμματα εύρους ταλάντωσης στο κάθε άξονα (x,y,z).

Στο πέμπτο κεφάλαιο, αναφέρονται κάποια συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση και η μελλοντική εργασία πάνω στο συγκεκριμένο θέμα της ναυτιλίας, τα αξονικά συστήματα, που στηρίζονται πάνω σε αυτού του τύπου αναλύσεις.

1.2 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΡΟΩΣΗΣ

1.2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΠΡΟΩΣΗΣ

Το γεγονός ότι στα αλιευτικά σκάφη όπου γίνεται η χρήση του συγκεκριμένου τύπου συστήματος πρόωσης γίνεται χρήση πολύστροφων υπερτροφοδοτούμενων μηχανών diesel γιατί απαιτείται ταχύτητα και γρήγοροι ελιγμοί σε αυτού του τύπου εργασίες.

Η ανάλυση για την εγκατάσταση του συστήματος πρόωσης ξεκινά με την επιλογή της κύριας μονάδας κίνησης. Η επιλογή του κινητήρα πρέπει να εξασφαλίζει την ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία του σκάφους με ελάχιστο κόστος λειτουργίας και κτήσης, εύκολη συντήρηση και μικρές διαστάσεις και βάρος ανά παραγόμενο ίππο. Η συνολική ισχύς του κινητήρα πρέπει να αντιστοιχεί στο 80% έως 90% της ονομαστικής ισχύος του, στις ονομαστικές στροφές λειτουργίας του. Σε περιπτώσεις όπου απαιτείται μεγάλη σταθερή ταχύτητα για παρατεταμένα χρονικά διαστήματα, ή υπάρχουν ακαθαρσίες στη γάστρα, ή το πλοίο πλέει υπό άσχημες καιρικές συνθήκες, προτιμάται η μέγιστη εγκατεστημένη ισχύς.

Για την κίνηση των αλιευτικών πλοίων, χρησιμοποιούνται έλικες με σταθερό ή μεταβλητό βήμα, οι οποίες στερεώνονται στο πρυμναίο άκρο του ελικοφόρου άξονα. Σε περιπτώσεις που απαιτείται υψηλή απόδοση ελιγμών, προστίθενται περισσότερες έλικες στο σύστημα. Η αλληλεπίδραση της έλικας με το θαλασσίνο νερό δημιουργεί την απαιτούμενη ώση για την κίνηση του πλοίου προς τα εμπρός και προς τα πίσω.

Τέλος, η ανάλυση της εγκατάστασης του συστήματος πρόωσης ολοκληρώνεται με τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του αξονικού συστήματος. Οι άξονες και τα έδρανα είναι σχεδιασμένα ειδικά για να αντέχουν στις καταπονήσεις που προκύπτουν από τις διάφορες συνθήκες πλεύσης και λειτουργίας του πλοίου.

1.2.2 ΥΨΗΛΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ ΝΑΥΤΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΝΤΙΖΕΛ (HIGH - SPEED MARINE DIESEL ENGINES)

Οι ναυτικοί κινητήρες ντίζελ υψηλών στροφών ή ευρέως διαδεδομένοι ως κινητήρες υψηλών στροφών κορμού με στροφές ανά λεπτό λειτουργίας πάνω από 1000 rpm όπως φαίνεται στην εικόνα 1.2.2.1 χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: σε υψηλής απόδοσης και βαρέως τύπου.

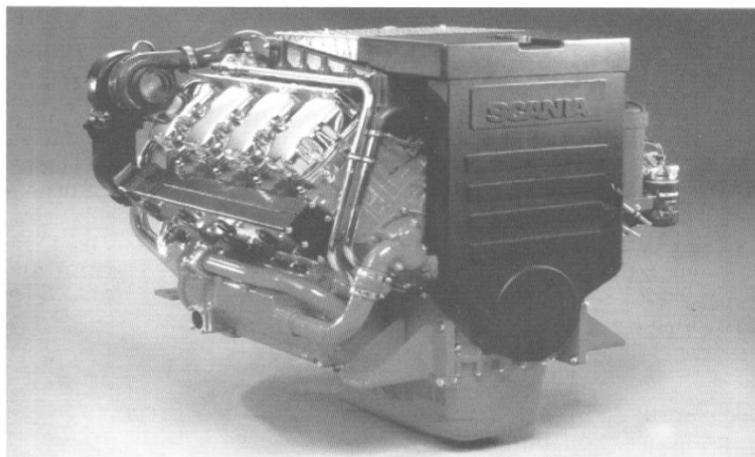
Οι υψηλών επιδόσεων κινητήρες βρήκαν εφαρμογή κυρίως στον στρατιωτικό τομέα, προκάλεσαν προβλήματα στην κατασκευή και τη συντήρησή τους λόγω της πολυπλοκότητας των σχεδιασμών τους. Στις εφαρμογές τους στον εμπορικό τομέα, ορισμένες φορές απογοήτευαν τους χρήστες, καθώς απαιτούσαν συχνές επισκευές και αντικαταστάσεις βασικών εξαρτημάτων.

Αν και αρχικά σχεδιάστηκαν για οχήματα και μηχανήματα εκτός δρόμου, οι κινητήρες υψηλής ταχύτητας βαρέως τύπου βρίσκουν εφαρμογή σε τομείς όπως στην ηλεκτροπαραγωγή και στις μηχανές έλξεως. Με μια πιο απλή και ανθεκτική σχεδίαση, που προσφέρει μέτριες τιμές μέσης πίεσης σε σύγκριση με τους ανταγωνιστές υψηλών επιδόσεων, επιτυγχάνεται υψηλή αναλογία βάρους/ισχύος. Ωστόσο, οι μεγαλύτεροι χρόνοι μεταξύ των συντηρήσεων και η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων τους τους καθιστούν πιο ελκυστικούς για το ευρύ κοινό.

Κατά την ανάπτυξη νέων μοντέλων, οι μηχανικοί κινητήρων υψηλής ταχύτητας προσέγγισαν βασικά τους ίδιους στόχους με τους συναδέλφους τους που ασχολούνται με χαμηλές και μεσαίες ταχύτητες: αξιοπιστία και ανθεκτικότητα. Αυτό σημαίνει εκτενείς περιόδους συντήρησης και μακροζωία εξαρτημάτων, με αποτέλεσμα χαμηλότερο κόστος συντήρησης, ευκολότερη εγκατάσταση και συντήρηση και χαμηλότερο βάρος. Επιπλέον, προσφέρουν βελτιωμένη απόδοση σε όλο το εύρος ισχύος, με υψηλότερη οικονομία καυσίμου και μειωμένες εκπομπές ρύπων. Η πρόοδος στην εξέλιξη των επιδόσεων μπορεί να παρατηρηθεί στις διαστάσεις των κυλίνδρων και την ταχύτητα των κινητήρων που απαιτείται για την παραγωγή ισχύος 200 kW ανά κύλινδρο. Το 1945, αυτό απαιτούσε 400 mm διάμετρο κυλίνδρου και ταχύτητα περίπου 400 στροφών/λεπτό. Το 1970, τα τυπικά χαρακτηριστικά ενός μέτριας ταχύτητας κινητήρα ήταν διάμετρος 300 mm και ταχύτητα 600 στροφών/λεπτό, ενώ για κινητήρες υψηλής ταχύτητας ήταν 250 mm και 1000 στροφές/λεπτό για την απόδοση 200 kW/κύλινδρο. Σήμερα, αυτή η απόδοση μπορεί να επιτευχθεί με έναν κινητήρα υψηλής απόδοσης διαμέτρου 200 mm και ταχύτητας 1500 στροφών/λεπτό. Τα ευέλικτα συστήματα παραγωγής (FMS) άλλαξαν τον τρόπο σχεδιασμού των κινητήρων. Η μείωση του κόστους

κατεργασίας οδήγησε σε ολοκληρωμένες δομικές διαμορφώσεις, με λιγότερα εξαρτήματα (μέχρι και 40% λιγότερα σε ορισμένα σχέδια) και βελτίωση της αξιοπιστίας, χαμηλότερο βάρος και πιο συμπαγείς διαστάσεις, χωρίς να υπάρχουν προβλήματα συντήρησης.

Το Σύστημα Ευέλικτης Παραγωγής (FMS) επέτρεψε την παροχή προσαρμοσμένων λύσεων στην αγορά χωρίς να αυξάνει το κόστος. Μεμονωμένοι κινητήρες μπορούν να βελτιστοποιηθούν στο εργοστάσιο για την ειδική εφαρμογή που απαιτείται. Η αυξημένη ζήτηση για μικρούς κινητήρες υψηλών ταχυτήτων σε προωθητικούς και βοηθητικούς ρόλους κατά τη δεκαετία του '90 ενίσχυσε την ανάπτυξη προηγμένων νέων σχεδίων για μαζική παραγωγή. Ειδικά, οι κινητήρες με διάμετρο περίπου 170 mm απέκτησαν ενδιαφέρον για τους κορυφαίους Ευρωπαίους και Αμερικανούς παραγωγούς, οι οποίοι σχημάτισαν συμμαχίες για να μοιραστούν τις ερευνητικές και αναπτυξιακές δραστηριότητες, καθώς και την παραγωγή και εμπορία. Μερικά από αυτά τα συνεργατικά σχέδια περιλάμβαναν τη συνεργασία της Cummins με την Wärtsilä Diesel και της MTU με τη Detroit Diesel Corporation. Τα νέα σχέδια κινητήρων υψηλών ταχυτήτων επωφελήθηκαν από καινοτομίες, όπως η ευέλικτη συναρμολόγηση, τα ηλεκτρονικά ελεγχόμενα συστήματα ψεκασμού καυσίμου, τα συστήματα καυσίμου με κοινή ράγα και τα προηγμένα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου και παρακολούθησης. (C Coulson Pounder and Woodyard, 2004, pp.760–761)



Εικόνα 1.2.2.1: Πολύστροφος κινητήρας ντίζελ Scania D116M. (C Coulson Pounder and Woodyard, 2004)

1.2.3 ΎΛΙΚΑ (ΠΡΟΠΕΛΑ)

1.2.3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Μια προπέλα αποτελεί μια κατασκευή που περιστρέφεται, μοιάζοντας με έναν ανεμιστήρα, και χρησιμοποιείται για να κινεί ένα πλοίο, εκμεταλλευόμενη τη δύναμη που δημιουργείται από την κύρια μηχανή του πλοίου. Η ενέργεια που μεταδίδεται μετατρέπεται από την περιστροφική κίνηση σε μια δύναμη που επιταχύνει το νερό προς τα πίσω, προκαλώντας το πλοίο να κινείται προς τα εμπρός. Η κίνηση του πλοίου βασίζεται στις αρχές του Bernoulli και του τρίτου νόμου του Νεύτωνα. Δημιουργείται μια διαφορά πίεσης μεταξύ της μπροστινής και της πίσω πλευράς της προπέλας, που οδηγεί σε επιτάχυνση του νερού πίσω από αυτή. Η κίνηση

που προκαλείται από την προπέλα μεταδίδεται στο πλοίο μέσω ενός συστήματος μετάδοσης, που περιλαμβάνει την περιστροφική κίνηση που δημιουργείται από τον άξονα της κύριας μηχανής, ενδιάμεσου άξονα και τα έδρανά του, τον άξονα του πρυμναίου σωλήνα και τα έδρανά του, καθώς και από την ίδια την προπέλα. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η δύναμη που ασκεί το ρευστό μπορεί να αναλυθεί σε μια δύναμη που δρα κατά μήκος του άξονα και σε μια αντίσταση που δρα περιφερειακά. Με το άθροισμα, συνεπώς, των περιφερειακών αντιστάσεων από κάθε πτερύγιο, υπολογίζεται η αντίσταση στρέψης της προπέλας, η οποία πρέπει να υπερνικηθεί από τη ροπή που παράγει ο κινητήρας για να αυξηθεί η ταχύτητα του πλοίου. (Anish Wankhede, 2019)

1.2.3.2 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΛΙΚΑΣ

Οι ναυτικές προπέλες παράγονται από υλικά που αντέχουν στη διάβρωση, καθώς λειτουργούν απευθείας στο θαλάσσιο περιβάλλον, το οποίο επιταχύνει τη διάβρωση. Τα υλικά που επιλέγονται για την κατασκευή τους είναι κυρίως κράματα αλουμινίου και ανοξείδωτου χάλυβα. Εναλλακτικά, χρησιμοποιούνται και άλλα υλικά, όπως κράματα νικελίου, αλουμινίου και χαλκού, τα οποία είναι ελαφρότερα κατά περίπου 10-15% από άλλα υλικά και έχουν μεγαλύτερη αντοχή. Η διαδικασία κατασκευής περιλαμβάνει την επισύναψη πτερυγίων στην πλήμνη ή το εξόγκωμα με συγκόλληση είτε σφυρηλάτηση σε ένα ενιαίο κομμάτι. Τα πτερύγια που κατασκευάζονται με σφυρηλάτηση είναι πιο αξιόπιστα και έχουν μεγαλύτερη αντοχή, αλλά είναι πιο δαπανηρά σε σχέση με αυτά που συγκολλούνται. Μια θαλάσσια έλικα αποτελείται από τμήματα ελικοειδών επιφανειών που συνεργάζονται για να περιστρέφονται μέσα στο νερό, εκμεταλλευόμενες το φαινόμενο του κοχλία. (Anish Wankhede, 2019)

1.2.3.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΛΙΚΑΣ

A) Με βάση τον αριθμό των πτερυγίων

Οι προπέλες μπορούν να έχουν διαφορετικό αριθμό πτερυγίων, από τρία έως έξι, ωστόσο οι πιο συνηθισμένες είναι αυτές με τρία ή τέσσερα πτερύγια. Η απόδοση μιας προπέλας είναι υψηλότερη όταν έχει λιγότερα πτερύγια, όπως δύο. Παρόλα αυτά, λόγω της ανάγκης για αντοχή και λόγω των υψηλών φορτίων που φέρουν τα σκάφη, καθώς και των δυσμενών καιρικών συνθηκών στη θάλασσα, οι προπέλες με δύο πτερύγια δεν χρησιμοποιούνται σε αυτά. (Anish Wankhede, 2019)

Η προπέλα με τρία πτερύγια έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Έχει χαμηλότερο κόστος κατασκευής συγκριτικά με άλλους τύπους.
- Συνήθως κατασκευάζεται από κράμα αλουμινίου.
- Παρουσιάζει ικανοποιητικές επιδόσεις σε υψηλές ταχύτητες.
- Η επιτάχυνση της είναι αποτελεσματική.
- Ο χειρισμός σε χαμηλές ταχύτητες δεν είναι τόσο αποδοτικός.

Μια προπέλα με τέσσερα πτερύγια χαρακτηρίζεται από τα εξής:

- Το κόστος κατασκευής είναι υψηλότερο σε σχέση με τις προπέλες με τρία πτερύγια.
- Συνήθως κατασκευάζονται από κράματα ανοξείδωτου χάλυβα.
- Διαθέτουν αυξημένη αντοχή και ανθεκτικότητα.
- Προσφέρουν καλή χειριστικότητα και επιδόσεις σε χαμηλές ταχύτητες.
- Έχουν καλύτερη ικανότητα να διατηρούν τη σταθερότητα σε ακραίες θαλάσσιες συνθήκες.
- Προσφέρουν καλύτερη οικονομία καυσίμου σε σύγκριση με άλλους τύπους προπελών.

Μια προπέλα με πέντε πτερύγια έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Το κόστος κατασκευής είναι υψηλότερο από τους άλλους τύπους προπελών.
- Οι κραδασμοί είναι ελάχιστοι σε σύγκριση με άλλους τύπους.
- Οι προπέλες με πέντε πτερύγια προσφέρουν μεγαλύτερη αντοχή σε άσχημες θαλάσσιες συνθήκες.

Όσον αφορά τις προπέλες με έξι πτερύγια:

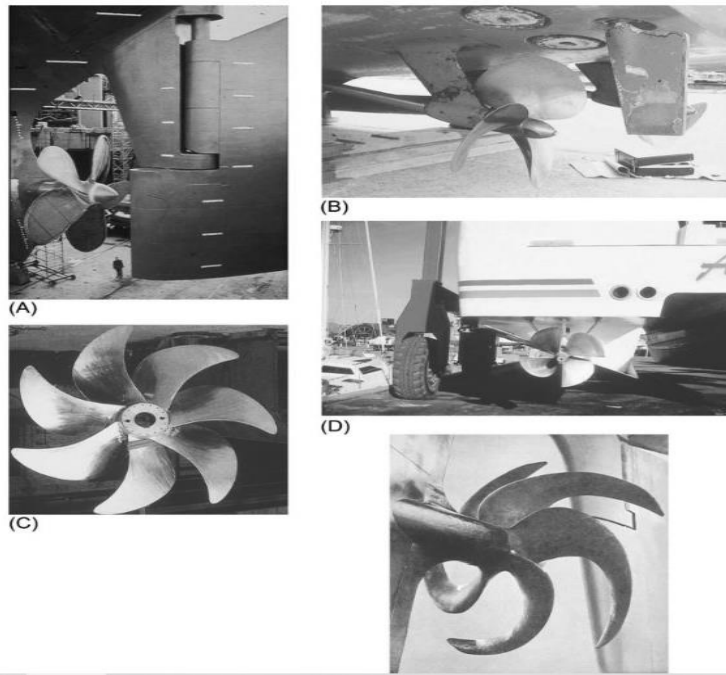
- Το κόστος κατασκευής είναι επίσης υψηλό.
- Οι κραδασμοί είναι ελάχιστοι σε σύγκριση με άλλους τύπους.
- Οι προπέλες με έξι πτερύγια προσφέρουν ακόμη μεγαλύτερη αντοχή σε δυσμενείς θαλάσσιες συνθήκες. Επιπλέον, με μια προπέλα έξι πτερυγίων, το πεδίο πίεσης πάνω από την προπέλα μειώνεται.

B) Κατηγοριοποίηση με βάση το βήμα

Οι ναυτικές έλικες χωρίζονται με βάση το βήμα τους σε δύο κατηγορίες σε σταθερού και μεταβλητού βήματος.

B1) Σταθερού Βήματος

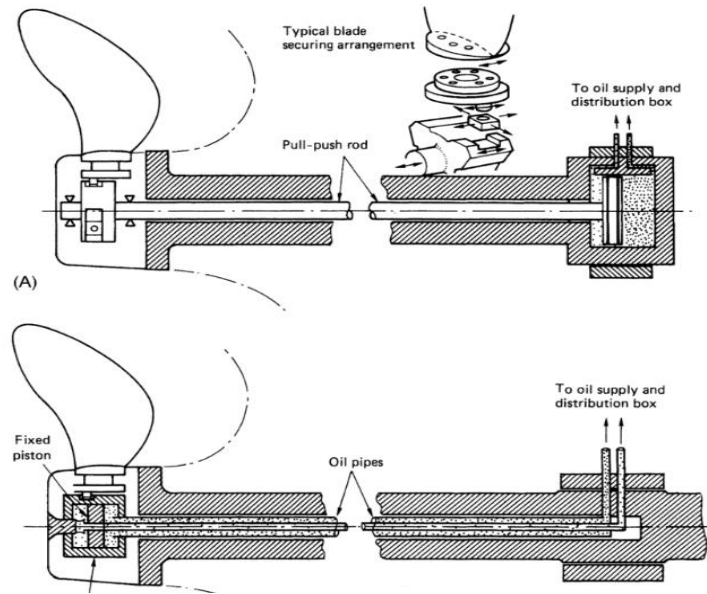
Στις έλικες σταθερού βήματος όπως φαίνεται στην εικόνα 1.2.3.1, τα πτερύγια είναι σταθερά συνδεδεμένα με την πλήμνη και δεν μπορούν να αλλάξουν θέση κατά τη διάρκεια της λειτουργίας. Αυτές οι έλικες είναι κατασκευασμένες από χυτά υλικά, συνήθως από κράμα χαλκού. Αν και οι έλικες αυτές είναι αξιόπιστες και στιβαρές, δεν διαθέτουν μηχανικές ή υδραυλικές συνδέσεις όπως οι έλικες ελεγχόμενου βήματος (CPP). Η κατασκευή, η εγκατάσταση και η λειτουργία τους είναι πιο οικονομικές συγκριτικά με τις CPP. Ωστόσο, η ευελιξία τους είναι περιορισμένη σε σύγκριση με τις CPP. Αυτοί οι τύποι ελίκων κατάλληλοι για πλοία που δεν έχουν υψηλές απαιτήσεις ευελιξίας. (Anish Wankhede, 2019)



Εικόνα 1.2.3.1 : Έλικες σταθερού βήματος. (Carlton, 2018)

B2) Μεταβλητού Βήματος

Στις προπέλες τύπου μεταβλητού βήματος 1.2.3.2, η προσαρμογή του βήματος είναι εφικτή μέσω μηχανικών και υδραυλικών μηχανισμών, επιτρέποντας την περιστροφή των πτερυγίων γύρω από τον κατακόρυφο άξονά τους. Αυτή η λειτουργία βοηθά στην επίτευξη σταθερής κίνησης των προωθητικών μηχανημάτων χωρίς την ανάγκη για μηχανισμό αναστροφής, καθώς το βήμα μπορεί να προσαρμοστεί ανάλογα με τις απαιτήσεις λειτουργίας. Αυτό βελτιώνει την ευελιξία και την απόδοση του συστήματος. Ωστόσο, η πιθανότητα διαρροής υδραυλικού λαδιού αποτελεί ένα από τα μειονεκτήματά τους, καθώς μπορεί να προκαλέσει ρύπανση από το λάδι. Επιπλέον, πρόκειται για ένα πολύπλοκο και δαπανηρό σύστημα, τόσο σε εγκατάσταση όσο και σε λειτουργία. Επιπρόσθετα, υπάρχει η πιθανότητα κόλλησης του βήματος σε μια θέση, προκαλώντας δυσκολίες στον έλεγχο του κινητήρα. Παρόλο που η έλικα Controlled Pitch προσφέρει ευελιξία στη ρύθμιση του βήματος των πτερυγίων, η απόδοσή της είναι ελαφρώς χαμηλότερη σε σύγκριση με μια αντίστοιχου μεγέθους έλικα Fixed Pitch. Αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη πλήμνη που απαιτείται για την ενσωμάτωση του μηχανισμού ρύθμισης του βήματος και των αντίστοιχων σωληνώσεων. (Anish Wankhede, 2019)



Εικόνα 1.2.3.2 : Έλικα μεταβλητού βήματος. (Carlton, 2018)

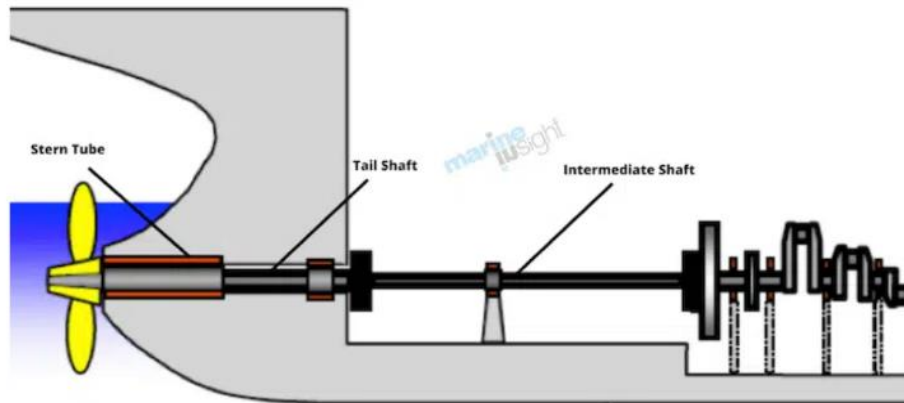
1.2.3.4 ΔΙΑΣΤΑΣΗ ΎΕΛΙΚΑΣ

Η διάμετρος μιας προπέλας συνήθως ορίζει την απόδοσή της, όμως η πραγματική διάσταση της προπέλας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένου (Anish Wankhede, 2019):

1. Του σχεδιασμού και της κατασκευής του πρυμναίου σώματος του πλοίου.
2. Της απαιτούμενης απόστασης μεταξύ του άκρου και του κύτους του πλοίου.
3. Της γενικής κατάστασης του φορτίου του πλοίου, όπως των δεξαμενόπλοιων και των bulkers, όπου οι προπέλες είναι συνήθως μικρότερες σε μέγεθος από αυτές των εμπορευματοκιβωτίων.
4. Το βύθισμα του πλοίου.

1.2.4 ΑΞΟΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Το αξονικό σύστημα αποτελείται από τον ενδιάμεσο άξονα, από τον ελικοφόρο άξονα και από τα έδρανα στήριξης, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.2.4.1.



Εικόνα 1.2.4.1: Διάταξη συστήματος πρόωσης. (Ajay Menon, 2020)

1.2.4.1 ΕΛΙΚΟΦΟΡΟΣ ΑΞΟΝΑΣ

Ο άξονας που στηρίζει την έλικα και βρίσκεται ένα μέρος του στο εσωτερικό της χοάνης είναι γνωστός ως ελικοφόρος άξονας. Στο πρόσθιο άκρο του, συνδέεται με τους ενδιάμεσους άξονες μέσω μιας ενσωματωμένης φλάντζας, ενώ το πίσω άκρο του φέρει μια διαμόρφωση που καταλήγει σε ένα κατάλληλο σπείρωμα. Η έλικα ταιριάζει στον άξονα με αντίστοιχη διαμόρφωση και σφίγγεται με ένα ανεξάρτητο περικόχλιο, το οποίο σφίγγει αντίθετα προς την κατεύθυνση περιστροφής της έλικας κατά την προώθηση. Η στρεπτική ροπή μεταφέρεται από τον ελικοφόρο άξονα στην έλικα μέσω τριβής λόγω της ισχυρής δύναμης σύσφιξης που παράγεται από το περικόχλιο. (Ajay Menon, 2020)

1.2.4.2 ΕΝΔΙΑΜΕΣΟΣ ΑΞΟΝΑΣ

Η διάταξη του συστήματος αξόνων περιλαμβάνει στο πίσω μέρος τον ελικοφόρο άξονα, ο οποίος συνδέεται με μια σειρά από ενδιάμεσους άξονες ανάλογα με το μήκος του σκάφους. Στο μπροστινό άκρο του συστήματος αξόνων ο ελικοφόρος άξονας συναντά τον άξονα του στροφαλοφόρου της κύριας μηχανής επιτρέποντας έτσι τη σύνδεση της έλικας με τη μηχανή. Οι ενδιάμεσοι άξονες έχουν φλάντζες στα άκρα τους και κατασκευάζονται από μαλακό σφυρηλατημένο χάλυβα. (Ajay Menon, 2020)

1.2.4.3 ΠΡΥΜΝΑΙΟΣ ΣΩΛΗΝΑΣ

Από τα διάφορα μέρη του πλοίου που συμβάλλουν στη στεγανότητα, ο πρυμναίος σωλήνας είναι το πιο ουσιώδης. Ο σωλήνας της πρύμνης είναι ένας κοίλος σωλήνας που συγκρατεί τον άξονα ο οποίος συνδέει τον κινητήρα με την προπέλα. Ο άξονας αυτός ονομάζεται ουραίος άξονας ή άξονας έλικας, όπως προαναφέρθηκε. Ο σωλήνας αυτός κατασκευάζεται είτε από χυτοσίδηρο είτε από μαλακό χάλυβα. Επειδή η προπέλα είναι πάντα βυθισμένη, ο πρυμναίος σωλήνας συνδέει το εσωτερικό του πλοίου (μηχανοστάσιο) απευθείας με το θαλασσινό νερό που περιβάλλει το πλοίο. Για αυτόν τον λόγο, χρειαζόμαστε πολύ αποτελεσματικά συστήματα στεγανοποίησης για να εμποδίσουμε την είσοδο θαλασσινού νερού στο εσωτερικό του πλοίου. Το καουτσούκ νιτριλίου είναι το καλύτερο υλικό για αυτή τη δουλειά. Αν δεν διατηρηθεί η στεγανή σφράγιση, το μηχανοστάσιο του πλοίου θα πλημμυρίσει γρήγορα, κάτι που μπορεί να οδηγήσει ακόμα και στη βύθιση του πλοίου.

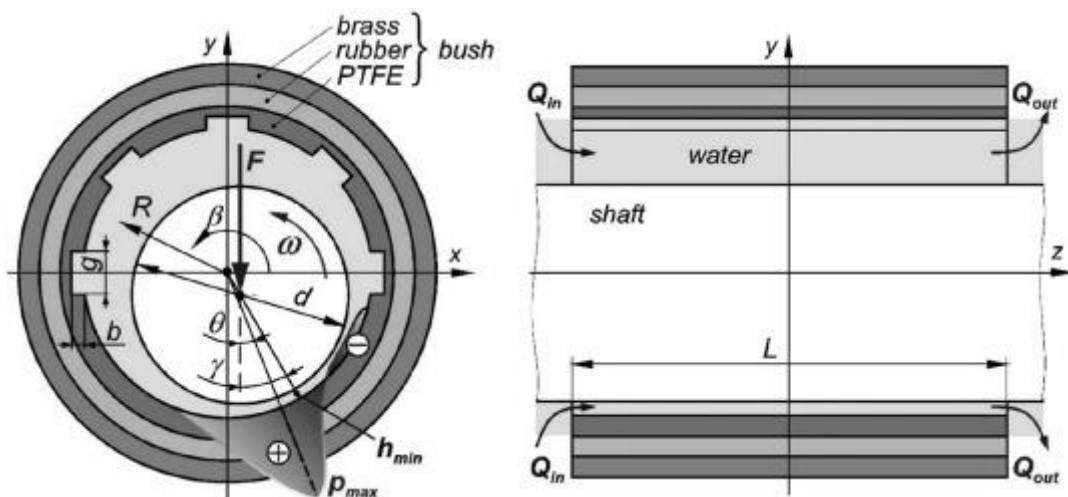
Ο πρυμναίος σωλήνας τοποθετείται στο πίσω μέρος του πλοίου. Το μπροστινό του άκρο στηρίζεται από το πρυμναίο διάφραγμα κορυφής, ενώ το πίσω άκρο υποστηρίζεται από το πρυμναίο πλαίσιο. Ο σωλήνας καταλήγει στο μηχανοστάσιο του πλοίου, συνήθως στο χαμηλότερο κατάστρωμα. Παράγοντες, όπως η τοποθέτηση των μηχανών, η απαραίτητη ισχύς, οι διαστάσεις του άξονα της προπέλας και οι μέθοδοι στεγανοποίησης καθορίζουν τις διαστάσεις και τις άλλες προδιαγραφές του πρυμναίου σωλήνα. Ο πρυμναίος σωλήνας στηρίζει το βάρος του άξονα της έλικας και της προπέλας. Το προεξέχον τμήμα του άξονα και της προπέλας ασκούν μια δύναμη προς τα κάτω. Αυτές οι καταπονήσεις μπορεί να αυξηθούν σημαντικά κατά τη διάρκεια κακοκαιρίας, καθώς ο σωλήνας πρέπει να λυγίσει μαζί με το κύτος του πλοίου, ενώ ταυτόχρονα υφίσταται μεγαλύτερες δυνάμεις από τον άξονα της έλικας και την προπέλα. Επίσης, οι διατάξεις στεγανοποίησης και οι προδιαγραφές του πρυμναίου σωλήνα πρέπει να εξασφαλίζουν ελάχιστη αντίσταση κατά την περιστροφή του άξονα της έλικας. Η ιδανική ποσότητα αντίστασης είναι αυτή που προκαλεί ελάχιστη έως μηδενική διαρροή, χωρίς να δημιουργεί υπερβολική τριβή στον άξονα, η οποία θα επηρεάζει την περιστροφή του.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι να ταξινομηθούν οι πρυμναίοι σωλήνες. Ωστόσο, η πιο διαδεδομένη μέθοδος βασίζεται στον τύπο λίπανσης. Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι: ο πρυμναίος σωλήνας, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.4.3.1 που λιπαίνεται με θαλασσινό νερό και ο πρυμναίος σωλήνας που λιπαίνεται με λάδι. Στον πρώτο τύπο πρυμναίου σωλήνα χρησιμοποιούμε θαλασσινό νερό και ξύλινα ρουλεμάν για τη λίπανση του άξονα. Το σκληρό ξύλο, προερχόμενο από το δέντρο *lignum vitae* «δέντρο της ζωής», τοποθετείται ανάμεσα στον σωλήνα και τον άξονα. Συγκριτικά με έναν σωλήνα που λιπαίνεται με λάδι, ο σωλήνας με λίπανση θαλασσινού νερού προσφέρει καλύτερη ψύξη και είναι πιο φιλικός προς το περιβάλλον.



Εικόνα 2.4.3.1: Πρυμναίος σωλήνας από ξύλο *lignum vitae* «δέντρο της ζωής». (*Lignum Vitae* | *Wood Bearings*, n.d.)

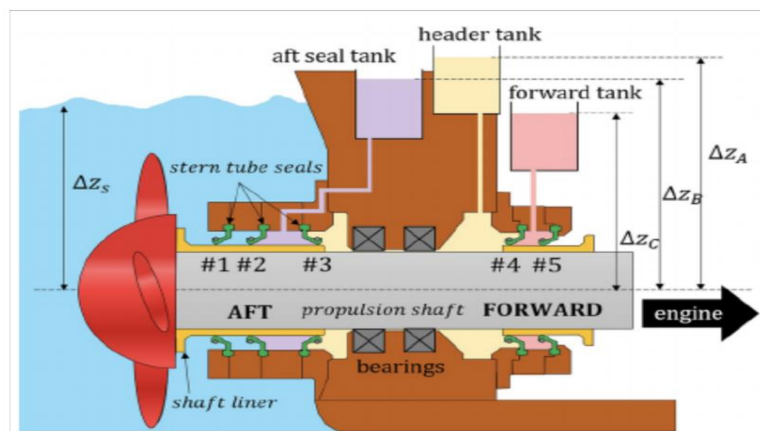
Όμως, ο πρυμναίος σωλήνας που λιπαίνεται με θαλασσινό νερό είναι γνωστό για τη σύντομη διάρκεια ζωής του λόγω της διαβρωτικής φύσης του θαλασσινού νερού. Ως εκ τούτου, απαιτεί συχνότερη συντήρηση και επισκευή σε σχέση με τους σωλήνες που λιπαίνονται με λάδι. Αυτός ο τύπος σωλήνα με ξύλο χρησιμοποιούνταν σε παλαιού τύπου σκάφη, αλλά πλέον επιστρέφουν λόγω της ανάπτυξης ανθεκτικότερων υλικών, όπως πολυμερή και σύνθετα υλικά, τα οποία λειτουργούν με θαλασσινή λίπανση, πληρούν τις απαιτήσεις για αντοχή και λειτουργικότητα, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.4.3.2. Σύγχρονα συστήματα χρησιμοποιούν επίσης, μηχανήματα καθαρισμού του θαλασσινού νερού για την εξάλειψη της διαβρωτικής φύσης του θαλασσινού νερού και τη βελτίωση της ανθεκτικότητας.



Εικόνα 2.4.3.2: Πρυμναίος σωλήνας από πολυμερή υλικά. (*Wodtke and Litwin*, 2021)

Στον δεύτερο τύπο πρυμναίου σωλήνα, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.4.3.3 το λάδι έχει χαμηλότερη πυκνότητα από το νερό, έχει υψηλό ιξώδες. Ενώ το νερό ρέει εύκολα, το λάδι δεν ρέει κρατώντας ένα λεπτό φιλμ υπό πίεση που αποτρέπει την επαφή μετάλλου με μέταλλο.

Αυτή η ιδιότητα είναι κρίσιμη για τον πρυμναίο σωλήνα. Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες του λαδιού επιτρέπουν την υδροδυναμική λίπανση ακόμη και σε χαμηλές ταχύτητες και υψηλά φορτία εδράνων. Έτσι, μεγάλα πλοία με χαμηλές στροφές του άξονα της προπέλας μπορούν να λειτουργούν αποτελεσματικά με λάδι. Ο πρυμναίος σωλήνας που χρησιμοποιεί λάδι για λίπανση έχει πολύ μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Ακόμα και με τις πιο προηγμένες τεχνολογίες χάλυβα, υπάρχει κάποιος κίνδυνος διαρροής λαδιού στη θάλασσα. Έχουν αναπτυχθεί, ωστόσο, λύσεις που μειώνουν τις επιπτώσεις αυτής της διαρροής με την πάροδο του χρόνου. Τα περιβαλλοντικά αποδεκτά λιπαντικά (EAL) μπορούν να αντικαταστήσουν τα ορυκτέλαια σε ορισμένα συστήματα, αν και οι οικονομικές τους δαπάνες μπορεί να είναι πολύ υψηλότερες, μπορεί να φτάνουν μέχρι και οκτώ φορές το κόστος των ορυκτών λαδιών. (F Xavier Borrás et al., 2021).



Εικόνα 2.4.3.3: Πρυμναίος σωλήνας λαδιού. (F Xavier Borrás et al., 2021)

1.2.5 ΈΔΡΑΝΟ ΓΡΑΜΜΗΣ

Τα έδρανα γραμμής του αξονικού συστήματος είναι ακτινικά έδρανα που υποστηρίζουν τους άξονες. Αντέχουν το βάρος όλων των εξαρτημάτων και υφίστανται βαριά, μεταβλητά φορτία. Κάθε έδρανο γραμμής αποτελείται από δύο μέρη: το επάνω τμήμα, το οποίο στερεώνεται με παξιμάδια ή βίδες, και το κάτω τμήμα, που είναι σταθερά τοποθετημένο στον πυθμένα του πλοίου. Οι εσωτερικές επιφάνειες πρέπει να είναι ακριβώς κατεργασμένες και σωστά ευθυγραμμισμένες για να αποφεύγεται η κάμψη του άξονα. Τέλος, κάθε έδρανο γραμμής πρέπει να ελέγχεται τακτικά, καθώς μπορεί να φθαρεί απρόβλεπτα.

2 ΘΕΩΡΙΑ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η δημιουργία μεθόδων για την ικανοποίηση των κριτηρίων αξιολόγησης της αποδοχής της στροφοδυναμικής σε βιομηχανικούς ρότορες απαιτεί μια ολοκληρωμένη κατανόηση της δυναμικής συμπεριφοράς του απλού μοντέλου ρότορα Jeffcott. Αυτό συνεπάγεται εμβάθυνση στο ιστορικό πλαίσιο των προηγούμενων μεθοδολογιών που χρησιμοποιήθηκαν στον τομέα αυτό, τη σχολαστική αξιολόγηση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων τους, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη διάφορα φυσικά χαρακτηριστικά, όπως τα γυροσκοπικά φαινόμενα, οι αστάθειες στροβιλισμού του ρότορα και το φαινόμενο της καμπύλης στο διάγραμμα Campbell. Οι έρευνες σχετικά με τα θέματα αυτά, με γνώμονα τους στόχους της διατριβής, εξετάστηκαν διεξοδικά και παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία.

2.2 ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Στον τομέα της δυναμικής των ροτόρων, μπορούμε να εξηγήσουμε πολλά φαινόμενα μέσω της δυναμικής ενός ρότορα Jeffcott που χρησιμοποιεί ένα απλό μοντέλο με μία μόνο μάζα. Αυτό το μοντέλο παρουσιάστηκε από τον Förppl το 1895 και ονομάστηκε Jeffcott, καθώς το 1919 αυτός προσέφερε την πρώτη εξήγηση της επιστήμης της δυναμικής των ροτόρων με μια γραφική και διαφωτιστική προσέγγιση. Στην πορεία, το μοντέλο Jeffcott προσαρμόστηκε σε πολλές παραλλαγές του, προσεγγίζοντας τις πρακτικές ανάγκες των ειδικών στη δυναμική των ροτόρων εκείνης της εποχής.

Πολλοί ρότορες που χρησιμοποιούνται στην πράξη, ιδιαίτερα αυτοί που σχεδιάστηκαν για τουρμπίνες ατμού/αερίου σε ηλεκτρικούς σταθμούς ισχύος ή για αεροστρόβιλους αεροπλάνων, δεν ήταν κατάλληλοι για το μοντέλο Jeffcott. Ένας λόγος είναι ότι η διάκριση μεταξύ του δίσκου και του άξονα είναι ασαφής στις τυπικές τουρμπίνες αεροσκαφών. Στον πρακτικό σχεδιασμό περιστρεφόμενων μηχανημάτων, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε ακριβώς τις φυσικές συχνότητες, τις ιδιομορφές και τις αντιδράσεις που προέρχονται από δυνάμεις σε πολύπλοκα συστήματα ροτόρων. Για αυτό παρουσιάστηκε η τεχνική από τον Prohl (1945) στα τέλη της δεκαετίας του 1930 και δημοσιεύτηκε το 1945 για την εκτίμηση της κρίσιμης ταχύτητας ενός άξονα τουρμπίνας. Αυτή η μέθοδος είναι παρόμοια με τη μέθοδο που δημοσιεύτηκε περίπου την ίδια περίοδο από τον Myklestad (1944) για τις φυσικές συχνότητες των φτερών των αεροσκαφών, αλλά αναπτύχθηκε ανεξάρτητα. Συνολικά, το έργο του Prohl και του Myklestad οδήγησε σε μια ευρύτερη μέθοδο, γνωστή τώρα ως μέθοδος μεταφοράς πίνακα (TMM).

Αυτή η τεχνική αποτελεί ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο για συστήματα με πολλούς ρότορες και έχει εξελιχθεί εντυπωσιακά από τη δεκαετία του 1960, χάρη στη συνεισφορά πολλών ερευνητών, όπως οι Lund και Orcutt (1967), Lund (1974) και Rao (1996). Η μέθοδος

μεταφοράς πίνακα (TMM) για ρότορες παραμένει εξίσου αποτελεσματική. Πράγματι, φαίνεται ακόμα να αποτελεί τη μέθοδο προτίμησης για τις περισσότερες βιομηχανικές αναλύσεις δυναμικής ροτόρων.

Μια άλλη αντιπροσωπευτική προσέγγιση που χρησιμοποιείται σε αυτό το πλαίσιο είναι η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Η εμφάνιση αυτής της μεθόδου στην επικεφαλίδα ενός άρθρου από τον Clough (1960) ήταν η πρώτη. Η πρώτη εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων σε ένα σύστημα ρότορα πραγματοποιήθηκε από τους Ruhl και Booker (1972). Στη συνέχεια, οι Nelson και McVaugh (1976) επέκτειναν τη χρήση της λαμβάνοντας υπόψη τη αδράνεια του ρότορα, το γυροσκοπικό φαινόμενο και την αξονική δύναμη. Σύντομα αναγνωρίστηκε ότι ο μεγάλος αριθμός κόμβων που απαιτείται για ακριβή κατανομή των δυνάμεων δημιουργούσε δυναμικά συστήματα που ήταν υπερβολικά μεγάλα για οικονομικούς υπολογισμούς. Η συμπύκνωση του αριθμού των βαθμών ελευθερίας με τη διαίρεσή τους σε κύριους και υποκείμενους βαθμούς ελευθερίας προστέθηκε από τον Guyan (1965). Άλλες τεχνικές δυναμικής συμπύκνωσης δημιουργήθηκαν από τους Uhrig (1966), Friswell και Mottershead (1996), Tiwari και Dharmaraju (2006) και Baur κ.ά. (2014). Μια συναφής τεχνική για τη δυναμική ανάλυση δομής, η οποία αποτελείται από διακριτά στοιχεία ή υποδομές με τη σύνθεση κύριων βαθμών ελευθερίας, παρουσιάστηκε από τον Hurty (1960) και χρησιμοποιήθηκε στη δυναμική των ροτόρων από τους Glasgow και Nelson (1980), Geradin και Kill (1984) και Crandall και Yeh (1986). Κάθε υποδομή αλληλεπιδρά μόνο μέσω των περιορισμών που τις υποβάλλονται. (Tiwari, 2017).

2.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, το πραγματικό συνεχές ή σώμα ύλης, όπως ένα στερεό, υγρό ή αέριο, διασπάται σε μικρότερες υποδιαίρεσεις που ονομάζονται στοιχεία. Αυτά τα στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους σε συγκεκριμένα σημεία, γνωστά ως κόμβοι ή κομβικά σημεία. Οι κόμβοι βρίσκονται συνήθως στα όρια των στοιχείων, όπου αυτά ενώνονται με τα γειτονικά τους στοιχεία. Επειδή η ακριβής μεταβολή των μεταβλητών πεδίου (όπως μετατόπιση, τάση, θερμοκρασία, πίεση ή ταχύτητα) μέσα στο συνεχές δεν είναι γνωστή, υποθέτουμε ότι αυτή η μεταβολή μέσα σε ένα πεπερασμένο στοιχείο μπορεί να προσεγγιστεί με μια απλή συνάρτηση. Αυτές οι προσεγγιστικές συναρτήσεις, που ονομάζονται και μοντέλα παρεμβολής, καθορίζονται από τις τιμές των μεταβλητών πεδίου στους κόμβους. Όταν διατυπώνονται οι εξισώσεις πεδίου, όπως οι εξισώσεις ισορροπίας, για όλο το συνεχές οι νέες άγνωστες ποσότητες είναι οι τιμές των μεταβλητών πεδίου στους κόμβους. Με την επίλυση των εξισώσεων πεπερασμένων στοιχείων, οι οποίες συνήθως έχουν τη μορφή εξισώσεων πινάκων, οι τιμές των μεταβλητών πεδίου στους κόμβους καθίστανται γνωστές. Μόλις αυτές οι τιμές καθοριστούν, οι προσεγγιστικές συναρτήσεις προσδιορίζουν τη μεταβλητή πεδίου σε ολόκληρη τη διάταξη των στοιχείων.

Η διαδικασία που ακολουθείτε για την επίλυση ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζεται βήμα-βήμα παρακάτω:

Βήμα 1^ο : Διακριτοποίηση της δομής σε επιμέρους στοιχεία.

Το πρώτο βήμα στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι η διαίρεση της δομής ή της περιοχής που θα αναλυθεί σε μικρότερες υποδιαίρεσεις, γνωστές ως στοιχεία. Συνεπώς, η δομή πρέπει να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας κατάλληλα πεπερασμένα στοιχεία. Είναι απαραίτητο να αποφασιστούν ο αριθμός, ο τύπος, το μέγεθος και η διάταξη αυτών των στοιχείων.

Βήμα 2^ο : Επιλογή κατάλληλου μοντέλου παρεμβολής ή μετατόπισης.

Επειδή η ακριβής λύση για τη μετατόπιση μιας σύνθετης κατασκευής υπό καθορισμένες συνθήκες φόρτισης δεν μπορεί να προβλεφθεί, υποθέτουμε μια κατάλληλη προσέγγιση μέσα σε κάθε στοιχείο για την εκτίμηση της άγνωστης λύσης. Αυτή η υποτιθέμενη λύση πρέπει να είναι απλή από υπολογιστική άποψη, αλλά πρέπει επίσης να πληροί ορισμένες απαιτήσεις σύγκλισης. Συνήθως, η λύση ή το μοντέλο παρεμβολής εκφράζεται με τη μορφή πολυωνύμου.

Βήμα 3^ο : Παραγωγή μητρώων στιβαρότητας και διανυσμάτων φορτίου του στοιχείου.

Ξεκινώντας από το υποτιθέμενο μοντέλο μετατόπισης, ο πίνακας δυσκαμψίας $[K_e]$ και το διάνυσμα φορτίου \vec{P}_e για το στοιχείο e προκύπτουν χρησιμοποιώντας μια κατάλληλη αρχή μεταβολής, μια προσέγγιση σταθμισμένων υπολοίπων (όπως η μέθοδος Galerkin) ή συνθήκες ισορροπίας.

Βήμα 4^ο : Δημιουργία ολικών εξισώσεων ισορροπίας και την σύνδεση των εξισώσεων των στοιχείων.

Επειδή η δομή αποτελείται από πολλά πεπερασμένα στοιχεία, οι επιμέρους πίνακες δυσκαμψίας και τα διανύσματα φορτίου πρέπει να συναρμολογηθούν κατάλληλα ώστε να διαμορφωθούν οι συνολικές εξισώσεις ισορροπίας ως εξής:

$$[K] * \underline{\Phi} = \underline{P}$$

Όπου $[K]$ είναι ο συγκεντρωτικός πίνακας δυσκαμψίας, $\underline{\Phi}$ είναι το διάνυσμα των κομβικών μετατοπίσεων και \underline{P} είναι το διάνυσμα των κομβικών δυνάμεων για την πλήρη δομή.

Βήμα 5^ο : Επίλυση για τις άγνωστες μετατοπίσεις στους κόμβους.

Οι συνολικές εξισώσεις ισορροπίας πρέπει να προσαρμοστούν ώστε να συμπεριλάβουν τις οριακές συνθήκες του προβλήματος. Με την ενσωμάτωση αυτών των οριακών συνθηκών, οι εξισώσεις ισορροπίας μπορούν να διατυπωθούν ως εξής:

$$[K] * \vec{\Phi} = \vec{P}$$

Για γραμμικά προβλήματα, το διάνυσμα $\vec{\Phi}$ μπορεί να επιλυθεί πολύ εύκολα. Ωστόσο, σε μη γραμμικά προβλήματα, η λύση πρέπει να επιτευχθεί μέσω μιας διαδοχικής διαδικασίας, όπου κάθε βήμα περιλαμβάνει την προσαρμογή του πίνακα δυσκαμψίας $[K]$ ή/και του διανύσματος φορτίου \vec{P} .

Βήμα 6^ο: Υπολογισμός των τάσεων και παραμορφώσεων των στοιχείων.

Με βάση τις γνωστές κομβικές μετατοπίσεις $\vec{\Phi}$, οι τάσεις και οι παραμορφώσεις των στοιχείων μπορούν να υπολογιστούν, εφόσον χρειάζεται, χρησιμοποιώντας τις σχετικές εξισώσεις της μηχανικής στερεών ή της δομικής μηχανικής.

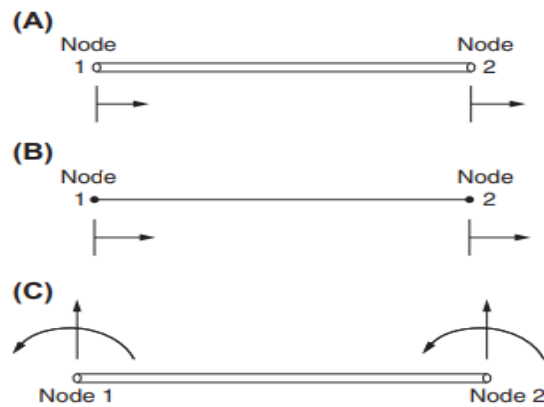
Τα παραπάνω βήματα ακολουθούνται κατά την λύση των προβλημάτων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, με κάποιες σημειακές τροποποιήσεις ανάλογα με την φύση του προβλήματος. Στη παρούσα διπλωματική εργασία τα βήματα αυτά θα τροποποιηθούν για την εύρεση των ιδιοσυχνοτήτων του αξονικού συστήματος πρόωσης.

2.3.1 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ

Στα περισσότερα μηχανολογικά προβλήματα, πρέπει να υπολογίσουμε τις τιμές μιας μεταβλητής πεδίου, όπως η μετατόπιση, η τάση, η θερμοκρασία, η πίεση ή η ταχύτητα, σε σχέση με τις χωρικές συντεταγμένες (x, y, z) . Σε μεταβατικά ή ασταθή προβλήματα, η μεταβλητή πεδίου πρέπει να υπολογιστεί όχι μόνο ως συνάρτηση των χωρικών συντεταγμένων (x, y, z) αλλά και του χρόνου (t) . Η γεωμετρία της περιοχής ανάλυσης συχνά είναι πολύπλοκη και ακανόνιστη. Το πρώτο βήμα στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων είναι η διάσπαση της ακανόνιστης περιοχής σε μικρότερες, τακτικές υποπεριοχές, γνωστές ως στοιχεία. Αυτό ισοδυναμεί με την αντικατάσταση μιας περιοχής με άπειρο αριθμό βαθμών ελευθερίας (dof) με ένα σύστημα που έχει περιορισμένο αριθμό dof.

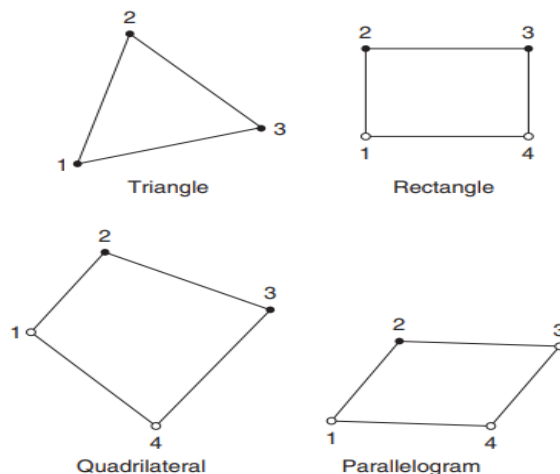
Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για τη μοντελοποίηση μιας περιοχής με πεπερασμένα στοιχεία. Διαφορετικές μέθοδοι διαίρεσης της περιοχής σε πεπερασμένα στοιχεία απαιτούν διαφορετικό υπολογιστικό χρόνο και συχνά οδηγούν σε διαφορετικές λύσεις του φυσικού προβλήματος. Η διαδικασία διακριτοποίησης είναι ουσιαστικά μια άσκηση μηχανικής κρίσης. Αποτελεσματικές μέθοδοι εξιδανίκευσης πεπερασμένων στοιχείων απαιτούν εμπειρία και κατανόηση βασικών αρχών. Για μεγάλα προβλήματα με πολύπλοκες γεωμετρίες, η χειροκίνητη εξιδανίκευση πεπερασμένων στοιχείων απαιτεί σημαντική προσπάθεια και χρόνο από τον αναλυτή. Ορισμένα λογισμικά αυτόματης δημιουργίας πλεγμάτων έχουν σχεδιαστεί για να εξιδανικεύουν αποτελεσματικά πολύπλοκες περιοχές με ελάχιστη ανάγκη παρέμβασης από τον αναλυτή.

Η επιλογή των σχημάτων, των διαστάσεων, του αριθμού και της διαμόρφωσης των στοιχείων πρέπει να γίνεται προσεκτικά, έτσι ώστε το αρχικό σχήμα ή πεδίο να προσομοιώνεται με το μέγιστο δυνατόν ακρίβειας χωρίς να αυξάνεται υπερβολικά η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς για την επίλυση. Η επιλογή του τύπου του στοιχείου καθορίζεται κυρίως από τη γεωμετρία του σώματος και τον αριθμό των ανεξάρτητων συντεταγμένων που απαιτούνται για την αναπαράστασή του. Αν η γεωμετρία, οι ιδιότητες του υλικού και η μεταβλητή πεδίου του προβλήματος μπορούν να περιγραφούν με μία μόνο χωρική διάσταση, τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν μονοδιάστατα ή γραμμικά στοιχεία, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.3.1A. Η κατανομή της θερμοκρασίας σε μια ράβδο (ή πτερύγιο), η κατανομή της πίεσης σε μια ροή μέσα σε σωλήνα και η παραμόρφωση μιας ράβδου υπό αξονικό φορτίο μπορούν να προσδιοριστούν με τη χρήση αυτών των στοιχείων. Παρόλο που αυτά τα στοιχεία έχουν επιφάνεια διατομής, συνήθως απεικονίζονται σχηματικά ως στοιχεία γραμμής στην εικόνα 2.3.1B. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η εμβέλεια της διατομής του στοιχείου μπορεί να είναι ανομοιόμορφη. Για μια απλή ανάλυση, τα μονοδιάστατα στοιχεία έχουν δύο κόμβους, έναν σε κάθε άκρο, όπου η τιμή της μεταβλητής πεδίου επιλέγεται ως αγνώστου (degree of freedom - dof). Ωστόσο, για την ανάλυση δοκών, επιλέγονται ως άγνωστοι η τιμή της μεταβλητής πεδίου (εγκάρσια μετατόπιση) και η παράγωγός της (κλίση) σε κάθε κόμβο, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.3.1C. (Rao, 2018)

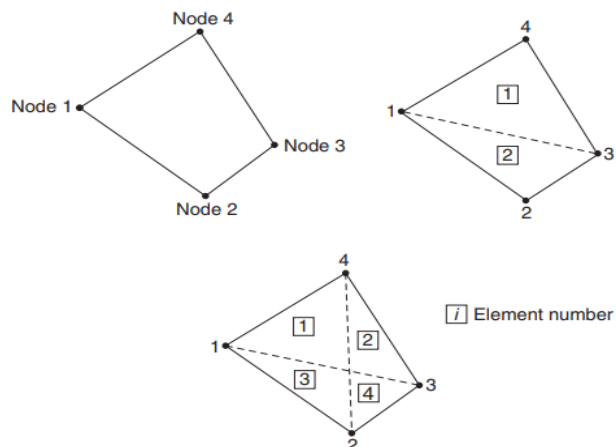


Εικόνα 2.3.1 : Μονοδιάστατα στοιχεία. (Rao, 2018)

Όταν η μορφή και άλλες λεπτομέρειες του προβλήματος μπορούν να περιγραφούν με δύο ανεξάρτητες χωρικές συντεταγμένες, χρησιμοποιούνται τα δισδιάστατα στοιχεία, όπως απεικονίζονται στην εικόνα 2.3.2. Το βασικό στοιχείο για τη δισδιάστατη ανάλυση είναι το τριγωνικό στοιχείο. Παρόλο που μπορεί να προκύψει ένα τετράπλευρο στοιχείο (ή οι ειδικές μορφές του όπως το ορθογώνιο και το παραλληλόγραμμο) από τη συναρμολόγηση δύο ή τεσσάρων τριγώνων, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.3.3, σε ορισμένες περιπτώσεις η χρήση τετράπλευρων στοιχείων (όπως το ορθογώνιο ή το παραλληλόγραμμο) αποδεικνύεται πιο επωφελής. Για την ανάλυση της κάμψης πλακών, χρησιμοποιούνται πολλαπλά degrees of freedom (εγκάρσια μετατόπιση και η παράγωγός της) σε κάθε κόμβο.

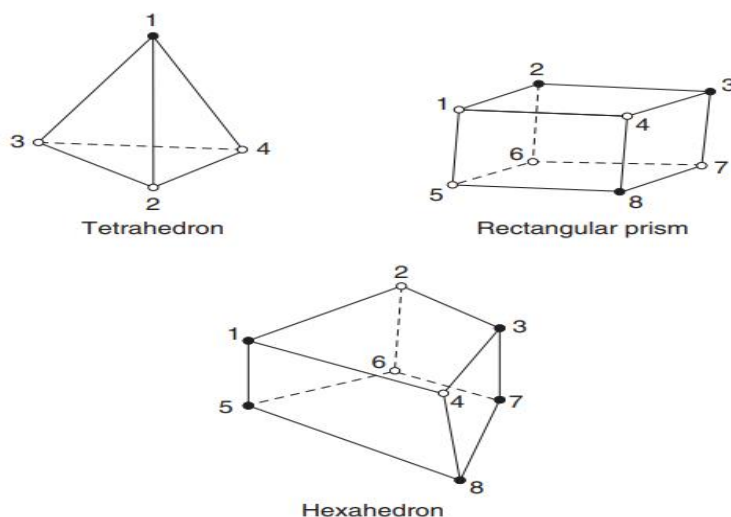


Εικόνα 2.3.2: Δισδιάστατα στοιχεία. (Rao, 2018)

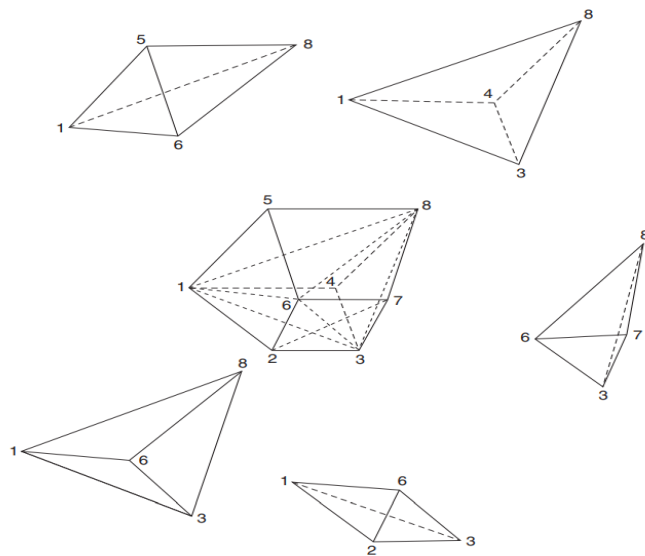


Εικόνα 2.3.3 : Σύνδεση δύο ή τεσσάρων τριγωνικών στοιχείων. (Rao, 2018)

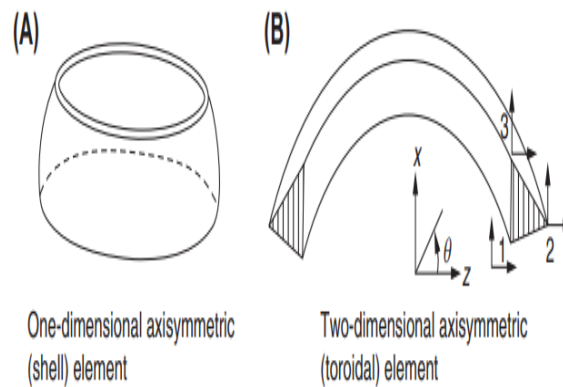
Όταν η μορφή, οι ιδιότητες του υλικού και άλλες παράμετροι ενός αντικειμένου απαιτούν τρεις ανεξάρτητες χωρικές συντεταγμένες για την πλήρη περιγραφή του, τότε χρησιμοποιούνται τα τρισδιάστατα στοιχεία, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4. Το βασικό τρισδιάστατο στοιχείο, αντίστοιχο του τριγωνικού στοιχείου στη δισδιάστατη ανάλυση, είναι το τετράεδρο στοιχείο. Σε ορισμένες περιπτώσεις, το εξαέδρο στοιχείο, το οποίο προκύπτει από τη συναρμολόγηση πέντε τετράεδρων όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5, αποδεικνύεται χρήσιμο. Ορισμένα προβλήματα που είναι πραγματικά τρισδιάστατα, μπορούν να περιγραφούν με μία ή δύο ανεξάρτητες συντεταγμένες. Τέτοια προβλήματα επιλύονται με τη χρήση αξονοσυμμετρικών στοιχείων ή στοιχείων τύπου δακτυλίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6. Παραδείγματα περιλαμβάνουν έμβολα, δεξαμενές αποθήκευσης, βαλβίδες, ακροφύσια πυραύλων και επανεισδοτικά οχήματα.



Εικόνα 2.3.4: Τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία. (Rao, 2018)

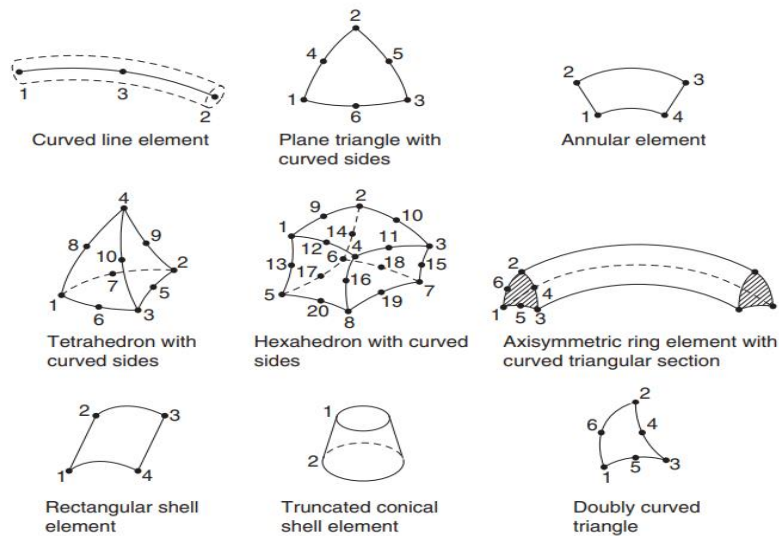


Εικόνα 2.3.5: Εξαεδρικά πεπερασμένα στοιχεία. (Rao, 2018)



Εικόνα 2.3.6: Αξονοσυμμετρικά στοιχεία. (Rao, 2018)

Για να αναγνωρίσουμε προβλήματα που περιλαμβάνουν καμπύλες γεωμετρίες, τα πεπερασμένα στοιχεία με καμπύλες πλευρές αποδεικνύονται χρήσιμα όπως φαίνεται στην εικόνα 2.3.7. Η δυνατότητα να μοντελοποιηθούν καμπύλα σύνορα επιτυγχάνεται με την προσθήκη κόμβων στη μέση των πλευρών. Τα πεπερασμένα στοιχεία με ευθείες πλευρές ονομάζονται γραμμικά στοιχεία, ενώ αυτά με καμπύλες πλευρές χαρακτηρίζονται ως στοιχεία υψηλότερης τάξης.



Εικόνα 2.3.7: Πεπερασμένα στοιχεία με καμπύλες πλευρές. (Rao, 2018)

Ακόμη μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η εμπειρία του χρήστη παίζει σημαντικό ρόλο στη σύντομη χρονικά επίλυση του υπολογιστικού προβλήματος, καθώς και στη μείωση του σφάλματος μεταξύ θεωρίας και πράξης, ανάλογα με την μέθοδο δημιουργίας πλέγματος που θα επιλέξει αυτοματοποιημένη ή μη και αν θα παρέμβει σημειακά στο πλέγμα για διορθώσεις. Ένας άλλος παράγοντας που παίζει ρόλο στο χρόνο επίλυσης του προβλήματος είναι η γεωμετρία του αντικειμένου αν είναι πολύπλοκη η απλή (πχ. Οπές, στρογγυλέματα, αιχμηρές ακμές).

Επίσης, για την κατασκευή ενός σωστού πλέγματος θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ο τύπος, το μέγεθος και ο αριθμός των στοιχείων και αυτό εξαρτάται από την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας. Όσο πιο σύνθετη είναι η γεωμετρία τόσο αυξάνεται το πλήθος και μειώνεται το μέγεθος των στοιχείων και όσο πιο απλή είναι η γεωμετρία τόσο αυξάνεται το μέγεθος και μειώνεται το πλήθος. Οι κόμβοι τοποθετούνται ανάλογα με τη γεωμετρία, το υλικό κατασκευής και των εξωτερικών συνθηκών.

Άρα, συμπεραίνουμε ότι η διακριτοποίηση της γεωμετρίας δεν εξαρτάται μόνο από την ισχύς του υπολογιστή και την επιλογή του προγράμματος προ επεξεργασίας αλλά και από την γνώση και την άποψη του χρήστη.

2.4 ΤΡΟΠΟΙ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ ΡΟΤΟΡΑ

Ένας ρότορας έχει την ικανότητα να υφίσταται ταλαντώσεις μέσω τριών διαφορετικών τρόπων λειτουργίας:

- Πλευρικά
- Στρεπτικά
- Αξονικά

2.4.1 ΠΛΕΥΡΙΚΕΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ

Η πλευρική ή εγκάρσια ταλάντωση του ρότορα (LRV) αναφέρεται στην τροχιακή κίνηση του άξονα περιστροφής του ρότορα σε ακτινική κατεύθυνση. Το μέγεθος των πλευρικών ταλαντώσεων είναι μόνο μερικά εκατοστά του χιλιοστού. Η LRV παίζει σημαντικό ρόλο σε πολλούς τύπους περιστρεφόμενων μηχανών, όπως οι στροβιλοηλεκτρικές μηχανές, οι συμπιεστές, οι αντλίες, οι αεριοστρόβιλοι, οι υπερσυμπιεστές και οι ηλεκτροκινητήρες. Συχνά, η δυναμική κάμψη τύπου δοκού του ρότορα έχει σημαντική επίδραση στα χαρακτηριστικά της LRV. Η σημασία της κάμψης αυξάνεται ανάλογα με τον λόγο δυσκαμψίας του ρουλεμάν προς τον ρότορα και με την ταχύτητα περιστροφής του ρότορα. Σε ορισμένες περιστρεφόμενες μηχανές με χαμηλή ταχύτητα λειτουργίας ή/και χαμηλό λόγο δυσκαμψίας ρουλεμάν προς ρότορα, η LRV μοιάζει με άκαμπτο ρότορα που δονείται σε εύκαμπτο έδρανο ή στήριγμα. Η αντίστροφη περίπτωση (εύκαμπτος ρότορας σε άκαμπτα έδρανα) είναι δυνατή, αλλά λιγότερο επιθυμητή, επειδή δεν παρέχει την απαραίτητη απόσβεση που διατηρεί τα πλάτη των δονήσεων σε αποδεκτά επίπεδα κατά τον συντονισμό.

Η ευκαμψία και η κατανομή της μάζας του ρότορα, σε συνδυασμό με τις ευκαμψίες των εδράνων του και τη μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του, καθορίζουν εάν η υπολειπόμενη ανισορροπία του ρότορα μπορεί να προκαλέσει εξαναγκασμένο συντονισμό LRV. Αυτοί οι παράγοντες καθορίζουν αν το σύστημα ρότορα-ρουλεμάν έχει έναν ή περισσότερους πλευρικούς τρόπους ιδιοσυχνότητας κάτω από την ταχύτητα λειτουργίας. Εάν αυτό ισχύει, ο ρότορας πρέπει να περάσει από την κρίσιμη ταχύτητα όπου οι υπολειπόμενες ανισορροπίες μάζας δρουν ως αρμονικές δυνάμεις για να διεγείρουν τις φυσικές συχνότητες του συστήματος κατά την επιτάχυνση και επιβράδυνση.

Οι τρόποι συντονισμού στις κρίσιμες ταχύτητες καθορίζονται επίσης, από τις ιδιότητες του ρότορα και των εδράνων. Πολλές σύγχρονες περιστρεφόμενες μηχανές σχεδιάζονται να λειτουργούν πάνω από μία ή περισσότερες κρίσιμες ταχύτητες για να επιτευχθεί υψηλή απόδοση. Κατά τον σχεδιασμό αυτών των μηχανών, είναι απαραίτητες οι αναλύσεις LRV για να διασφαλιστεί ότι η μηχανή δεν θα λειτουργεί συνεχώς σε μια κρίσιμη ταχύτητα ή κοντά σε αυτήν. Οι αναλύσεις αυτές περιλαμβάνουν υπολογισμούς για τα επίπεδα κραδασμών ανισορροπίας του ρότορα, ώστε να διασφαλιστεί ότι το σύστημα εδράνων είναι επαρκώς αποσβεσμένο για να περάσει με ασφάλεια από τις κρίσιμες ταχύτητες εντός του εύρους λειτουργίας. (Surovec, Bocko and Šarlošić, 2014)

2.4.2 ΣΤΡΕΠΤΙΚΕΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ

Οι στρεπτικές ταλαντώσεις είναι γωνιακές δονήσεις ενός αντικειμένου, συνήθως ενός άξονα, κατά μήκος του άξονα περιστροφής του. Αυτές οι δονήσεις μετρούνται μέσω της μεταβολής της ταχύτητας περιστροφής μέσα σε έναν κύκλο περιστροφής, συνήθως σε στροφές ανά λεπτό (RPM). Αυτές οι μεταβολές προκαλούνται συχνά από ανώμαλη κινητήρια ροπή ή μεταβαλλόμενο φορτίο. Οι συχνότητες που είναι ευαίσθητες στη δομή ενός συστήματος μετάδοσης κίνησης μπορούν να ενισχύσουν και να μεταδώσουν αυτά τα φαινόμενα, προκαλώντας προβλήματα στην άνεση, την αντοχή ή την απόδοση. Το επίπεδο των στρεπτικών δονήσεων επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως οι ιδιότητες των υλικών και οι

συνθήκες λειτουργίας, όπως η θερμοκρασία, το φορτίο, οι στροφές, που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Παρά την πρόοδο στην ακρίβεια της μοντελοποίησης, η πολυπλοκότητα των συστημάτων απαιτεί πιο ακριβή ανάλυση και ποσοτικοποίηση αυτών των στρεπτικών δονήσεων υπό ελεγχόμενες ή πραγματικές συνθήκες λειτουργίας για να βελτιωθούν τα μέτρα αντιμετώπισης. Η στρεπτικές ταλαντώσεις ή δονήσεις εμφανίζονται κάθε φορά που η ισχύς πρέπει να μεταδοθεί μέσω ενός περιστρεφόμενου άξονα ή γραναζιών, όπως στις κινητήριες μονάδες αυτοκινήτων, φορτηγών και λεωφορείων, οχημάτων αναψυχής, θαλάσσιων συστημάτων μετάδοσης κίνησης ή τουρμπίνων παραγωγής ενέργειας. (Siemens PLM Software, 2020).

2.4.3 ΑΞΟΝΙΚΕΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ

Η αξονική δόνηση του δρομέα περιγράφεται ως μια ταλάντωση που παρουσιάζεται κατά μήκος του άξονα του δρομέα. Η δυναμική συμπεριφορά αυτής της δόνησης σχετίζεται με την επέκταση και συμπίεση του δρομέα κατά μήκος του άξονά του. Τα προβλήματα που σχετίζονται με τις αξονικές δονήσεις σπάνια εμφανίζονται ως πρακτικά προβλήματα και η μελέτη τους είναι σπάνια στην πρακτική.

2.5 ΕΞΙΣΩΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ

Η εξίσωση κίνησης συμμετρικού ταλαντωτικού συστήματος με N βαθμούς ελευθερίας χωρίς απόσβεση γράφεται σε μητρική μορφή ως εξής:

$$M\ddot{\underline{x}} + K\underline{x} = \underline{f}(t) \quad (2.5.1)$$

Όπου το M το είναι το μητρώο μάζας, το K είναι το μητρώο στιβαρότητας, \underline{x} το διάνυσμα των αποκρίσεων και $\underline{f}(t)$ είναι ένα διάνυσμα εξαρτώμενο από το χρόνο και περιλαμβάνει όλες τις εξωτερικές δυνάμεις- διεγέρσεις. Εφόσον στο σύστημα δεν επιβάλλονται εξωτερικές διεγέρσεις τότε το $\underline{f}(t) = 0$, άρα το σύστημα κάνει ελεύθερη ταλάντωση και η εξίσωση 2.5.1 παίρνει την μορφή :

$$M\ddot{\underline{x}} + K\underline{x} = 0 \quad (2.5.2)$$

Η επίλυση αυτών των εξισώσεων γίνεται με τη μέθοδο ανάλυσης ιδιομορφών. Επιλύεται το ιδιοπρόβλημα που αντιστοιχεί στην εξίσωση 2.5.2 και αφού ισχύουν οι συνθήκες ορθογωνικότητας γίνεται η επιτυχής επίλυση της εξίσωσης 2.5.1.

2.5.1 ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗ ΙΔΙΟΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η μητρωϊκή εξίσωση κίνησης, επειδή αναμένεται ταλαντωτική απόκριση του συστήματος, γίνεται υπόθεση ότι θα έχει λύση με την εξής μορφή:

$$\underline{x}(t) = \underline{x} \cos(\omega t - \theta) \quad (2.5.3)$$

Με αντικατάσταση της 2.5.3 στην 2.5.2 προκύπτει:

$$(K - \omega^2 M)\underline{x} \cos(\omega t - \theta) = \underline{0} \quad (2.5.4)$$

Άρα, για να είναι λύση η εξίσωση 2.5.3 της 2.5.2 πρέπει να ικανοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$(K - \omega^2 M)\underline{x} = \underline{0} \quad (2.5.5)$$

Αυτή η σχέση αποτελεί το ιδιοπρόβλημα της εξίσωσης κίνησης 2.5.1. Για να έχει το πρόβλημα αυτό μη μηδενική λύση θα πρέπει να ικανοποιείται η παρακάτω συνθήκη δηλαδή η ορίζουσα να είναι ίση με μηδέν:

$$|K - \omega^2 M| = 0$$

Από την παραπάνω ορίζουσα προκύπτει το χαρακτηριστικό πολυώνυμο ως προς ω^2 :

$$\omega^{2N} + \alpha_{N-1}(\omega^2)^{N-1} + \dots + \alpha_1 \omega^2 + \alpha_0 = 0$$

Επίσης, λόγω του ότι τα μητρώα μάζας και στιβαρότητας είναι θετικοί αριθμοί τότε και οι ρίζες του πολυωνύμου θα είναι θετικές. Από τα παραπάνω αποτελέσματα βγαίνει το συμπέρασμα ότι η εξίσωση 2.5.3 είναι λύση της εξίσωσης 2.5.2 αρκεί το ω να αντιστοιχεί σε κάποια από τις τιμές ω_n για $n = 1, \dots, N$. Έτσι, για κάθε ιδιοτιμή ω_n υπολογίζεται και το αντίστοιχο ιδιοδιάνυσμα ή ιδιομορφή \underline{x}_n .

Τέλος, για τα μητρώα μάζας και στιβαρότητας αποδεικνύονται οι συνθήκες ορθογωνικότητας των ιδιομορφών γράφοντας τις ιδιομορφές με την μορφή πίνακα

$$X = [\underline{x}_1 \quad \underline{x}_2 \quad \dots \quad \underline{x}_N]$$

Οπότε οι συνθήκες ορθογωνικότητας γράφονται ως εξής:

$$X^T M X = M \text{ και } X^T K X = K \quad (2.5.6)$$

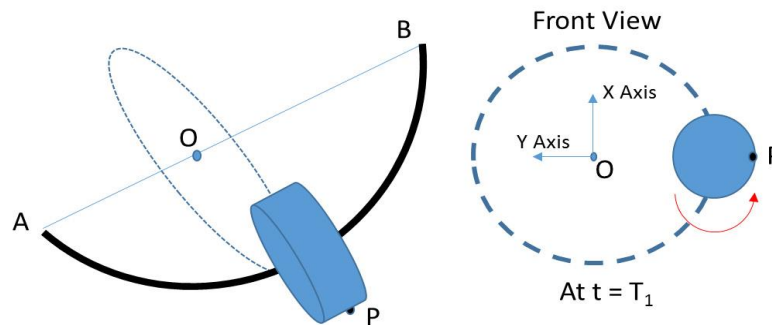
Όπου M και K είναι οι διαγώνιοι πίνακες με στοιχεία διαγωνίου m_r και k_r .

$$m_r = \underline{x}_r^T M \underline{x}_r \text{ και } k_r = \underline{x}_r^T K \underline{x}_r \quad (2.5.7)$$

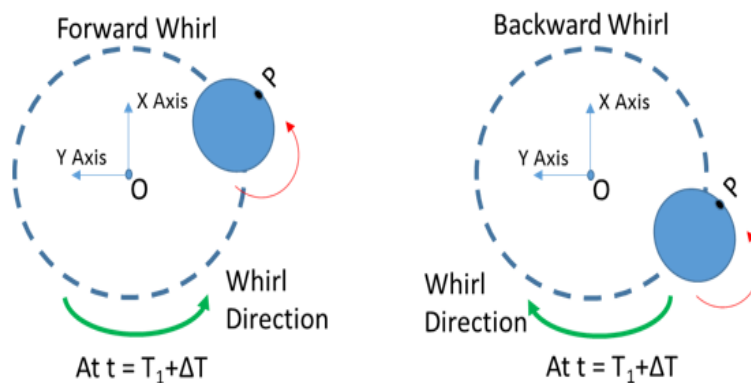
2.6 ΒΑΣΙΚΕΣ ΟΡΟΛΟΓΙΕΣ ΣΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΩΝ ΣΤΡΟΦΕΩΝ

2.6.1 ΣΤΡΟΒΙΛΙΣΜΟΣ

Όταν κινείται ένας ρότορας παρατηρείται ότι ο κλίνει και ακολουθεί μια πορεία κίνησης που είναι είτε τροχιακή είτε ελλειπτική. Αυτό οφείλεται στη φυγόκεντρη δύναμη που ασκείται στον ρότορα κατά τη διάρκεια της περιστροφής, γεγονός που χαρακτηρίζεται ως στροβιλισμός. Ο στροβιλισμός χωρίζεται περαιτέρω σε δύο κατηγορίες: περιστροφή προς τα εμπρός και περιστροφή προς τα πίσω, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.6.2. Όταν η παραμορφωμένη κίνηση του ρότορα είναι προς την ίδια κατεύθυνση με την ταχύτητα περιστροφής, αυτό αποκαλείται εμπρόσθιος στροβιλισμός, ενώ αν είναι αντίθετη κατεύθυνση, αποκαλείται οπίσθιος στροβιλισμός. Οι συχνότητες αυτών των στροβιλιστικών κινήσεων ονομάζονται φυσικές στροβιλιστικές συχνότητες και τα σχήματα που τις αντιπροσωπεύουν ονομάζονται φυσικοί τρόποι στροβιλισμού. (MSC NASTRAN ROTORDYNAMICS USER GUIDE, 2017).



Εικόνα 2.6.1: Εμπρόσθια όψη τροχιάς στροβιλισμού ρότορα. (MSC NASTRAN ROTORDYNAMICS USER GUIDE, 2017)



Εικόνα 2.6.2: Εμπρόσθιος και οπίσθιος στροβιλισμός. (MSC NASTRAN ROTORDYNAMICS USER GUIDE, 2017)

2.6.2 ΓΥΡΟΣΚΟΠΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Το γυροσκοπικό φαινόμενο παρουσιάζεται σε έναν ρότορα όταν αυτός εδράζεται σε εύκαμπτα έδρανα και λαμβάνεται υπόψιν η αδράνεια της μάζας του δίσκου. Για το λόγο αυτό παρουσιάζεται μια απόκλιση μεταξύ του άξονα περιστροφής του και του άξονα της κεντρικής γραμμής των εδράνων. Η κλίση ενός περιστρεφόμενου άξονα έναντι του άξονα περιστροφής προκαλεί τη δημιουργία γυροσκοπικών δυνάμεων διαταραχής. Το μέγεθος αυτών των δυνάμεων εξαρτάται από τη γωνία κλίσης, τη γωνιακή ροπή αδράνειας του ρότορα και την ταχύτητα περιστροφής του άξονα. Κατά την μοντελοποίηση και ανάλυση δυναμικών περιστρεφόμενων συστημάτων, υπάρχουν δύο βασικά φαινόμενα που αντίκεινται στα γυροσκοπικά φαινόμενα. Πρώτον, μια μεταβολή στην κατακόρυφη θέση του ρότορα επηρεάζει την οριζόντια δυναμική, και αντίστροφα. Δεύτερον, οι γυροσκοπικές ροπές προκαλούν απόκλιση των κρίσιμων ταχυτήτων του συστήματος από τις προαναγγελθείσες τους τιμές με μηδενική ταχύτητα. Η γυροσκοπική ροπή που ασκείται σε έναν δρομέα μπορεί να επηρεάσει τις κρίσιμες ταχύτητες του συστήματος ως συνάρτηση της ταχύτητας περιστροφής. (Se Young Yoon, Lin and Allaire, 2012).

2.6.3 ΑΠΟΣΒΕΣΗ

Η απόσβεση αναφέρεται στη διάχυση της ενέργειας, και υπάρχουν διάφοροι τύποι ανάλογα με το πως αυτή επιτυγχάνεται. Μεταξύ αυτών συγκαταλέγεται η ιξώδης απόσβεση, που συμβαίνει όταν ένα αντικείμενο κινείται μέσα σε ένα ρευστό. Επιπλέον, η απόσβεση λόγω τριβής προκύπτει κατά κύριο λόγο από την ολίσθηση επάνω σε ξηρές επιφάνειες. Όσον αφορά τη στερεή απόσβεση, που συχνά αναφέρεται ως δομική απόσβεση, αυτή οφείλεται στην εσωτερική τριβή που προκύπτει μέσα στο υλικό του αντικειμένου (Hameed, 2012). Η απόσβεση σε ένα σύστημα ρότορα μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες: εσωτερική απόσβεση και εξωτερική απόσβεση. Η εσωτερική απόσβεση περιλαμβάνει την απόσβεση που προκύπτει από το υλικό το οποίο ανήκει στο περιστρεφόμενο μέρος της δομής. Αντίθετα, η εξωτερική απόσβεση προκύπτει από το μη κινούμενο μέρος της δομής, με τη βοήθεια των ρουλεμάν. Η σταθερότητα ενός συστήματος μπορεί να καθοριστεί μέσω της απόσβεσης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η εσωτερική απόσβεση μπορεί να μειώνει την σταθερότητα του ρότορα και, ως εκ τούτου, να θεωρείται ανεπιθύμητη. Από την άλλη πλευρά, η εξωτερική απόσβεση συμβάλλει στη σταθεροποίηση του συστήματος, περιορίζοντας το πλάτος της απόκρισης και αυξάνοντας κάπως την κρίσιμη ταχύτητα.

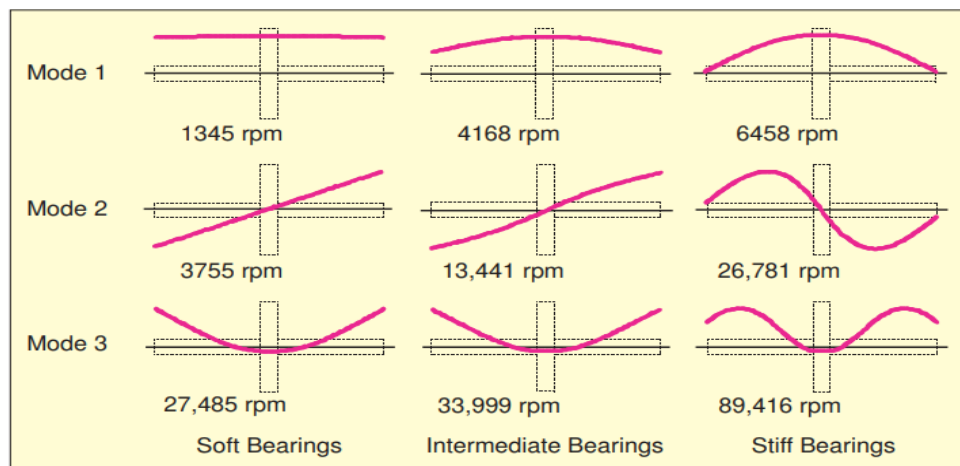
2.6.4 ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ

Όταν η κατασκευή αρχίζει να δονείται τα στοιχεία που είναι συνδεδεμένα με αυτήν κινούνται συλλογικά και ακολουθούν ένα συγκεκριμένο μοτίβο κίνησης για κάθε φυσική συχνότητα. Αυτό το πρότυπο κίνησης είναι γνωστό ως "mode shapes" ή «σχήματα τρόπου λειτουργίας». Ο τρόπος λειτουργίας αυτός αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για την απεικόνιση των ταλαντώσεων του δομικού στοιχείου σε διακριτές φυσικές συχνότητες. Στα περιστρεφόμενα συστήματα, ο

λόγος της δυσκαμψίας του εδράνου προς την ακαμψία του άξονα έχει σημαντική επίδραση στα «σχήματα τρόπου λειτουργίας». Για εδράνα χαμηλής και ενδιάμεσης σκληρότητας, ο ρότορας δεν καμπυλώνεται στους πρώτους δύο τρόπους, γνωστούς ως «άκαμπτοι τρόποι ρότορα». Η κλίση στην καμπυλότητα των χαμηλότερων ιδιοτήτων αυξάνεται όταν η δυσκαμψία των εδράνων είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με τη δυσκαμψία του άξονα.

Οι κυλινδρικοί τρόποι αποτελούν τον πρώτο τύπο άκαμπτων μορφών. Σε αυτήν τη λειτουργία, το σύστημα του δρομέα ακολουθεί ένα κυλινδρικό πρότυπο κίνησης. Εξαιτίας αυτού, ο τρόπος αυτός χαρακτηρίζεται ως «κυλινδρική λειτουργία». Από μια πλάγια οπτική, ο ρότορας φαίνεται να αναπηδά πάνω και κάτω. Η φυσική συχνότητα αυτού του τρόπου δεν υπόκειται σημαντικής μεταβολής με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής. Η εικόνα 2.6.4.1 που παρουσιάζεται παρακάτω επεξηγεί τα χαρακτηριστικά της κυλινδρικής μορφής αυτού του τρόπου, το οποίο παρουσιάζει ποικίλες αλλαγές σύμφωνα με την ακαμψία του εδράνου.

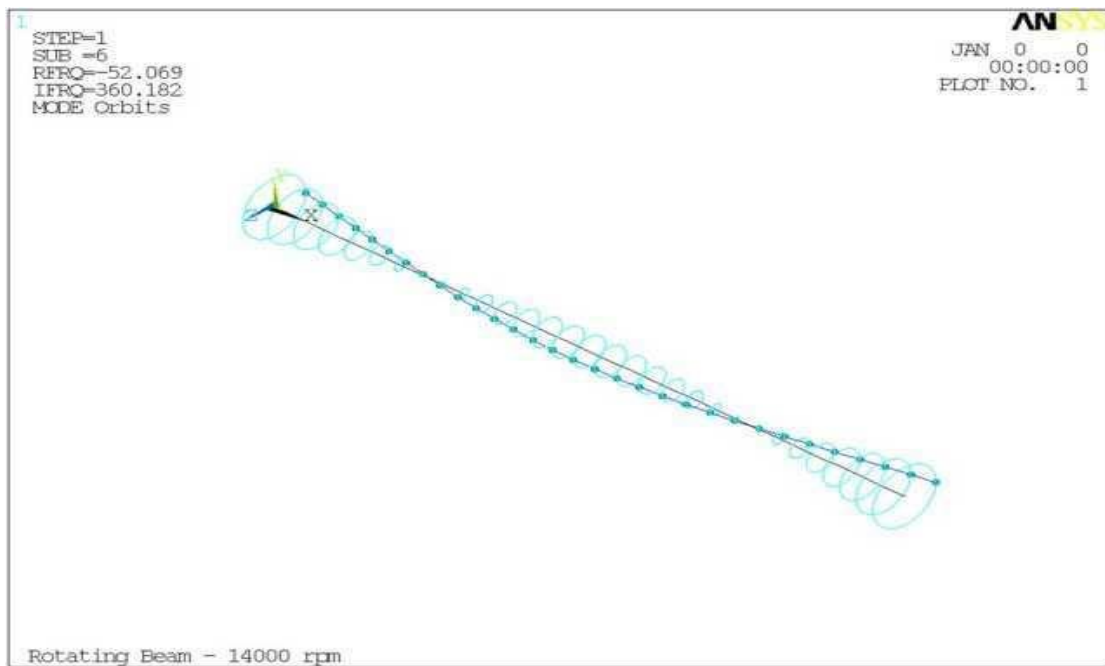
Οι κωνικοί τρόποι αποτελούν το δεύτερο είδος άκαμπτων τρόπων. Για να γίνει απεικόνιση αυτού του τρόπου, μπορεί να φανταστεί κάποιος μια ράβδο με σταθερό κέντρο, ενώ τα άκρα της περιστρέφονται σε έναν κυκλικό τρόπο, έτσι ώστε να είναι εκτός φάσης μεταξύ τους. Η μορφή του τρόπου λειτουργίας σχετίζεται με μια κωνική κίνηση. Από μια πλάγια οπτική, ο ρότορας φαίνεται να εκτελεί κινήσεις σαν να κουνιέται. Η ιδιοσυχνότητα αυτού του τρόπου διακυμαίνεται σύμφωνα με την ταχύτητα περιστροφής. Ο στροβιλισμός προς τα εμπρός αυξάνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής, ενώ ο προς τα πίσω στροβιλισμός μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής. Αυτό συμβαίνει λόγω της επίδρασης της «γυροσκοπικής δυσκαμψίας» και της «γυροσκοπικής αποδυνάμωσης», αντίστοιχα. Το διάγραμμα που παρουσιάζεται παρακάτω εξηγεί τα χαρακτηριστικά του κωνικού τρόπου λειτουργίας, το οποίο παρουσιάζει ποικίλες αλλαγές σύμφωνα με την ακαμψία του εδράνου. (Swanson, Powell and Weissman, 2005)



Εικόνα 2.6.4.1: Υπόδειγμα ιδιομορφών (Swanson, Powell and Weissman, 2005).

2.6.5 ΤΡΟΧΙΑ ΣΤΡΟΒΙΛΙΣΜΟΥ

Κατά την περιστροφή του ρότορα, τα σημεία ή οι κόμβοι που βρίσκονται στον άξονα περιστροφής μετακινούνται σε μια καμπύλη διαδρομή, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 2.6.5.1. Αυτή η καμπύλη διαδρομή είναι γνωστή ως τροχιά στροβίλου. Η τροχιά αυτή μπορεί να έχει είτε κυκλικό είτε ελλειπτικό σχήμα. Σε περίπτωση που το έδρανο έχει την ίδια δυσκαμψία και στις δύο κατευθύνσεις, τόσο οριζόντια όσο και κατακόρυφα, η τροχιά στροβίλου είναι κυκλική. Αν το έδρανο ή η στατική δομή στήριξης έχει διαφορετική δυσκαμψία και στις δύο κατευθύνσεις, η τροχιά του στροβίλου λαμβάνει μια ελλειπτική μορφή. (ANSYS INC, 2024)



Εικόνα 2.6.5.1: Τροχιά στροβιλισμού. (ANSYS INC, 2024)

2.6.6 ΚΡΙΣΙΜΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ

Οι κρίσιμες ταχύτητες συνήθως καθορίζονται ως οι ταχύτητες περιστροφής στις οποίες οι δονήσεις λόγω ανισορροπίας του δρομέα φτάνουν σε τοπικό ακρότατο. Δεδομένου ότι η ανισορροπία του δρομέα προκαλεί πάντα σύγχρονο στροβιλισμό, η παρουσία μεγάλων κορυφών στη σύγχρονη δόνηση συνήθως υπονοεί πρόβλημα ανισορροπίας στο ρότορα. Ωστόσο, οι αποκρίσεις ανισορροπίας σε κρίσιμες ταχύτητες δεν είναι πάντα επικίνδυνες. Υπάρχουν επίσης, ταχύτητες περιστροφής όπου υποσύγχρονες ή υπερσύγχρονες πηγές διέγερσης μπορεί να προκαλέσουν καταστροφικές δονήσεις, γνωστές ως υποσύγχρονες και υπερσύγχρονες κρίσιμες ταχύτητες.

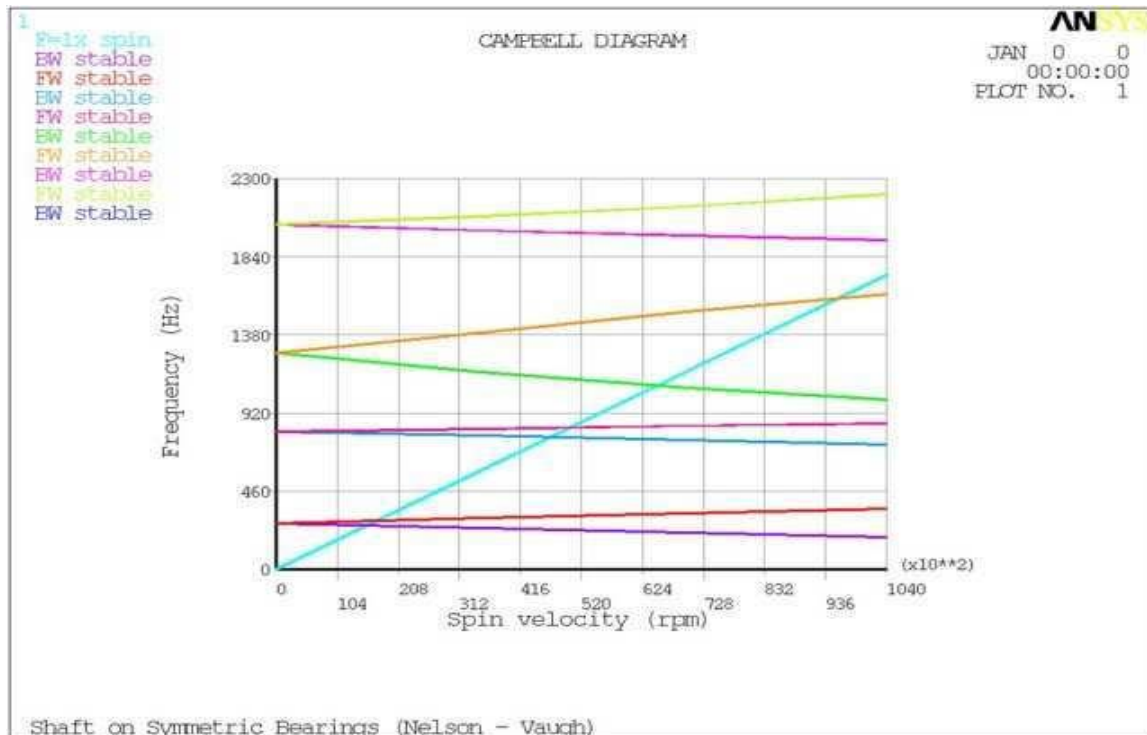
Τα διαγράμματα Campbell χρησιμοποιούνται για να εντοπίσουν τις κρίσιμες ταχύτητες του δρομέα. Η κρίσιμη ταχύτητα ενός συστήματος ρότορα ορίζεται ως η ταχύτητα περιστροφής όταν ένα πολλαπλάσιο της ταχύτητας αυτής συμπίπτει με μία από τις φυσικές συχνότητες του συστήματος. Η διέγερση λόγω ανισορροπίας είναι συνήθως σύγχρονη, δηλαδή η περιστροφική ταχύτητα του δρομέα είναι ίση με μία από τις φυσικές συχνότητες. Στις υποσύγχρονες ή υπερσύγχρονες ταχύτητες, η διέγερση συμβαίνει σε

πολλαπλάσια ή κλάσματα αυτών των συχνοτήτων, αντίστοιχα. Μια απλή προσέγγιση για τον προσδιορισμό των κρίσιμων ταχυτήτων είναι η δημιουργία διαγράμματος Campbell, συμπεριλαμβάνοντας όλες τις γραμμές συχνότητας διέγερσης που ενδιαφέρουν και εντοπίζοντας γραφικά το σημείο τομής μεταξύ της γραμμής διέγερσης και των καμπυλών φυσικής συχνότητας για να καθοριστεί η συγκεκριμένη κρίσιμη ταχύτητα που σχετίζεται με τη διεγερτική δύναμη. (MSC NASTRAN ROTORDYNAMICS USER GUIDE, 2017)

2.6.7 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ CAMBELL

Το διάγραμμα Campbell αναπαριστά γραφικά τη σχέση μεταξύ της συχνότητας του συστήματος ως λειτουργία της ταχύτητας περιστροφής. Συνήθως, χρησιμοποιείται για να προβλέψει τις κρίσιμες ταχύτητες του ρότορα. Ένα παράδειγμα διαγράμματος Campbell φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 2.6.7.1. Στον άξονα x απεικονίζεται η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, ενώ στον άξονα y παρουσιάζονται οι συχνότητες του συστήματος. Οι συχνότητες αυτές ποικίλλουν ανάλογα με το εύρος της ταχύτητας λειτουργίας.

Η εμπρόσθια συχνότητα στροβιλισμού αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής, ενώ οι συχνότητες των οπίσθιων στροβιλισμών μειώνονται με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής. Μια επιπλέον γραμμή, γνωστή ως γραμμή διέγερσης, μπορεί να προστεθεί στο διάγραμμα Campbell. Αυτή η γραμμή αντιστοιχεί στη συχνότητα περιστροφής του κινητήρα και τέμνει τις γραμμές των ιδιοσυχνοτήτων. Οι κρίσιμες ταχύτητες υπολογίζονται στο σημείο όπου η διαμορφούμενη συχνότητα τέμνει τη γραμμή διέγερσης. (ANSYS INC, 2024)



Εικόνα 2.6.7.1: Διάγραμμα Cambell. (ANSYS INC, 2024)

2.6.8 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Όταν αναλύονται περιστρεφόμενες κατασκευές πρέπει να καθορίζεται το σύστημα αναφοράς στο οποίο θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση. Αυτό είναι σημαντικό, διότι οι εξισώσεις κίνησης παρουσιάζουν επιπλέον όρους ανάλογα με το επιλεγμένο σύστημα αναφοράς. Γενικά, υπάρχουν δύο κατηγορίες συστημάτων αναφοράς: το σταθερό σύστημα αναφοράς και το περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς. Το λογισμικό Ansys Workbench παρέχει στον χρήστη τη δυνατότητα να πραγματοποιήσει στροφοδυναμική ανάλυση σε οποιοδήποτε σύστημα αναφοράς. Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκε το σταθερό σύστημα αναφοράς για όλα τα μοντέλα.

2.6.8.1 ΕΞΙΣΩΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΓΙΑ ΑΚΙΝΗΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Όταν χρησιμοποιείται ένα σταθερό πλαίσιο αναφοράς το σύστημα ανάλυσης συσχετίζεται με το παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων, το οποίο παραμένει αμετάβλητο. Σε ένα τέτοιο σύστημα ανάλυσης οι γυροσκοπικές ροπές που προκύπτουν από κομβικές περιστροφές συμπεριλαμβάνονται στον πίνακα απόσβεσης και η εξίσωση κίνησης γίνεται:

$$[M]\{\ddot{x}\} + ([C] + [C_{GYRO}])\{\dot{x}\} + ([B] + [K])\{x\} = \{f\}$$

Όπου, το $[M]$ είναι ο πίνακας μάζας, $[K]$ είναι ο πίνακας στιβαρότητας, $[C]$ είναι ο πίνακας απόσβεσης, το $[C_{GYRO}]$ είναι ο γυροσκοπικός πίνακας, το $[B]$ είναι ο περιστρεφόμενος πίνακας απόσβεσης και το f είναι οι εξωτερικές και φυγοκεντρικές δυνάμεις. (ANSYS INC, 2024)

2.6.8.2 ΕΞΙΣΩΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Όταν χρησιμοποιείτε ένα περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς όλα τα στοιχεία του μοντέλου περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα περιστροφής. Το σύστημα συντεταγμένων συνοδεύει το μοντέλο, επομένως, όλα κινούνται γύρω από αυτό. Η ενεργοποίηση του περιστρεφόμενου συστήματος αναφοράς γίνεται με την εντολή coriolis, on. Οι διαθέσιμες αναλύσεις περιλαμβάνουν στατικές, τροπικές, παροδικές και αρμονικές αποκρίσεις δύναμης. Στις στατικές αναλύσεις υπολογίζονται οι τάσεις και οι μετατοπίσεις. Το περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς χρησιμοποιείται κυρίως στην ευέλικτη δυναμική του συστήματος όταν δεν υπάρχουν ακίνητα μέρη. Ο πίνακας της επιτάχυνσης Coriolis και ο πίνακας εξομάλυνσης στιβαρότητας περιστροφής αντιστοιχούν στο γυροσκοπικό πίνακα σε ένα σταθερό σύστημα αναφοράς. Υπολογίζοντας το διάγραμμα Campbell δεν συνιστάται να υπολογίζετε σε περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς. Η εξίσωση κίνησης μετατρέπεται σε:

$$[M]\{\ddot{x}\} + ([C] + [C_{CORIOLIS}])\{\dot{x}\} + ([K] + [K_{SPIN}])\{x\} = \{f\}$$

Όπου, το $[M]$ είναι πίνακας μάζας, $[K]$ είναι ο πίνακας στιβαρότητας, $[C]$ είναι ο πίνακας απόσβεσης, το $[C_{CORIOLIS}]$ είναι ο πίνακας της επιτάχυνσης coriolis, το $[K_{SPIN}]$ είναι ο πίνακας μείωσης στιβαρότητας περιστροφής και το f είναι οι εξωτερικές και φυγοκεντρικές δυνάμεις. (ANSYS INC, 2024)

2.6.8.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΑΚΙΝΗΤΟΥ ΚΑΙ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Στο παρακάτω πίνακα 2.6.8.1 παρουσιάζονται οι διαφορές μεταξύ των δύο συστημάτων αναφοράς:

Ακίνητο Σύστημα Αναφοράς	Περιστρεφόμενο Σύστημα Αναφοράς
Η κατασκευή πρέπει να είναι συμμετρική ως προς τον άξονα περιστροφής.	Η κατασκευή δεν πρέπει να είναι απαραίτητα συμμετρική ως προς τον άξονα περιστροφής.
Η περιστρεφόμενη κατασκευή μπορεί να είναι μέρος ακίνητης κατασκευής σε ένα μοντέλο ανάλυσης.	Η περιστρεφόμενη κατασκευή πρέπει να είναι το μόνο μέρος ενός μοντέλου ανάλυσης.
Υποστηρίζει μία ή περισσότερες περιστρεφόμενες κατασκευές σε διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής και σε διαφορετικούς άξονες περιστροφής.	Υποστηρίζει μία μόνο περιστρεφόμενη κατασκευή.
Δημιουργεί Cambell διαγράμματα για τον υπολογισμό των κρίσιμων ταχυτήτων.	Δεν υποστηρίζει τον υπολογισμό Cambell διαγράμματος.

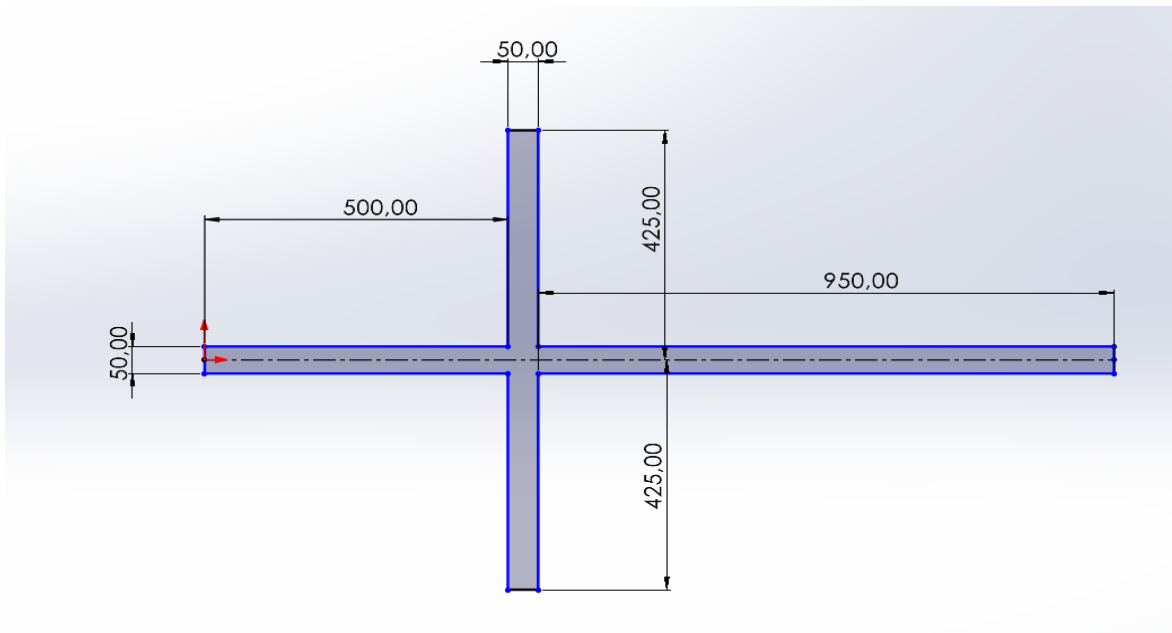
Πίνακας 2.6.8.1: Σύγκριση συστημάτων αναφοράς.

3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΟΥ ΡΟΤΟΡΑ JEFFCOTT.

Σε αυτό το κεφάλαιο, πραγματοποιείται η μοντελοποίηση του απλού μοντέλου ρότορα Jeffcott στο λογισμικό Solidworks και έπειτα το μοντέλο υπόκειται σε δυναμική ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis) στο λογισμικό Ansys Workbench όπου περιστρέφεται σε ένα εύρος ταχυτήτων 0-300 rad/s. Για να επαληθευθεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του λογισμικού Ansys πραγματοποιείται η ίδια ανάλυση στο πρόγραμμα Matlab με την βοήθεια του κώδικα που περιγράφεται στο Rotordynamics Software Manual από το βιβλίο των M.I. Friswell, J.E.T. Penny, S.D. Garvey and A.W. Lees (Dynamics of Rotating Machines) και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων.

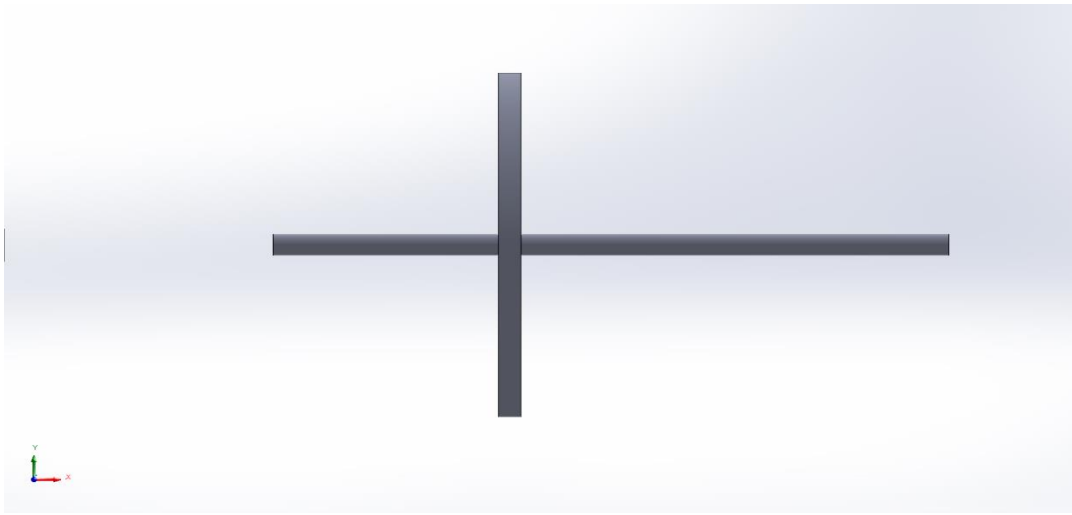
3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΡΟΤΟΡΑ JEFFCOTT

Το απλό μοντέλο του ρότορα Jeffcott που επιλέχθηκε για ανάλυση παρουσιάζεται στην εικόνα 3.1.1. Αποτελείται από έναν λεπτό ελαστικό άξονα μήκους 1,5 m και διαμέτρου 0,05 m συνδεδεμένο με έναν δίσκο τοποθετημένο 1 m μακριά από το μέσον του άξονα διαμέτρου 0,85 m και πάχους 0,05 m. Θεωρείται ότι και τα δύο μέρη άξονας και δίσκος αποτελούνται από το ίδιο υλικό (γραμμικό και ιστροπικό) με πυκνότητα $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$, μέτρο ελαστικότητας $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$ και μέτρο Poisson = 0,3.

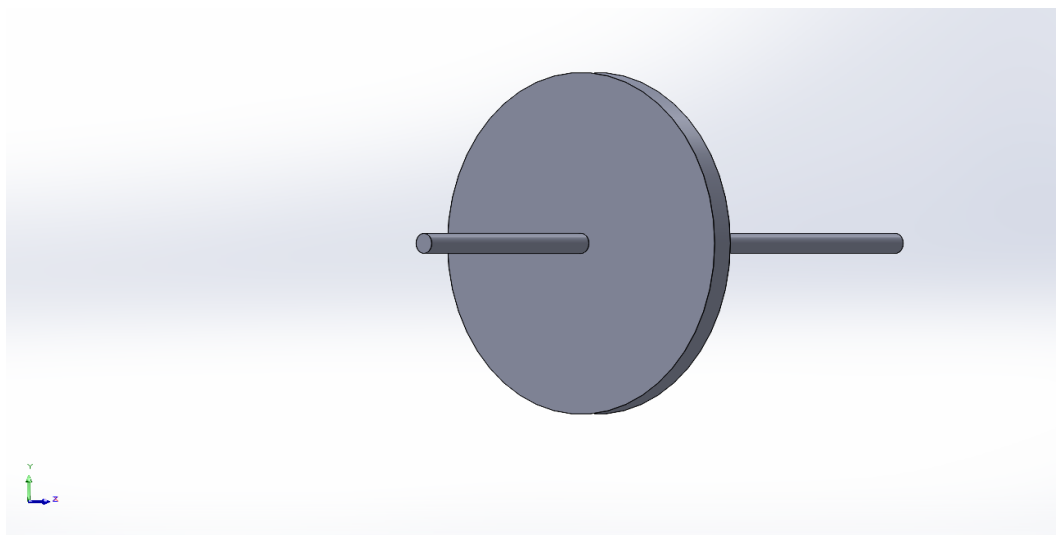


Εικόνα 3.1.1: Σκαρίφημα του Jeffcott ρότορα.

Το 3D μοντέλο σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα Solidworks και παρουσιάζεται στις δύο παρακάτω εικόνες 3.1.2 και 3.1.3:



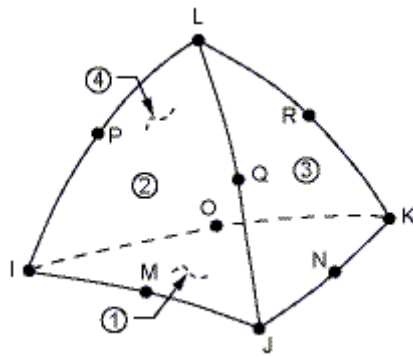
Εικόνα 3.1.2 : Πλάγια όψη μοντέλου Jeffcott.



Εικόνα 3.1.3: Τρισδιάστατη απεικόνιση Jeffcott ρότορα.

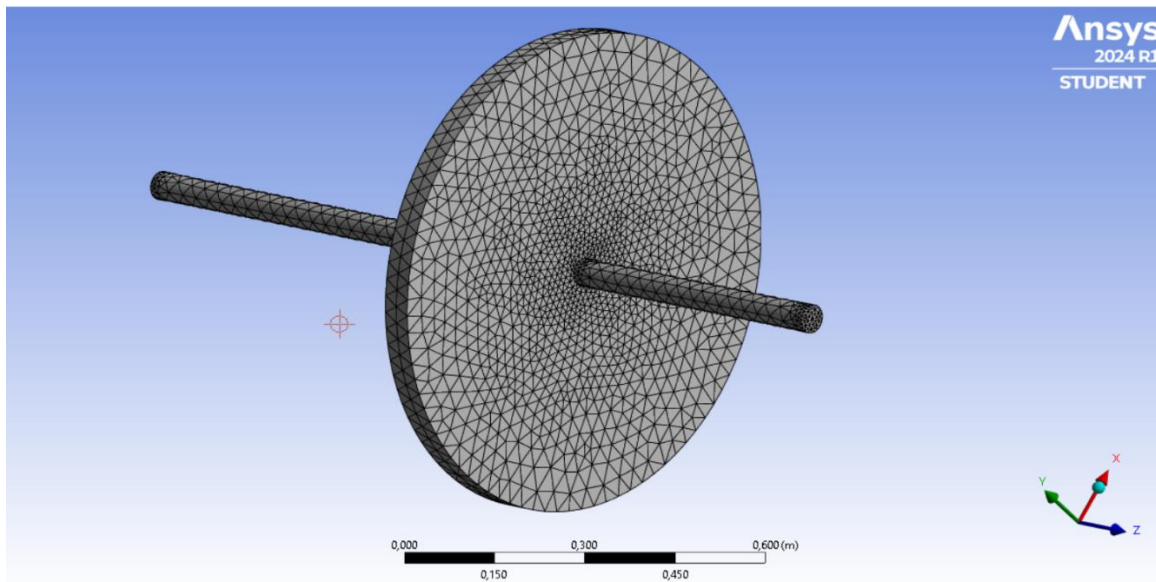
3.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΟΥ ΡΟΤΟΡΑ JEFFCOTT ΣΤΟ ANSYS WORKBENCH

Για την δημιουργία πλέγματος του μοντέλου του Jeffcott ρότορα χρησιμοποιήθηκε ο τύπος στοιχείων SOLID187 το οποίο υποστηρίζει το πρόγραμμα Ansys Workbench και αποτελείται από 10 κόμβους όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. Το στοιχείο αυτό συμπεριλαμβάνει την επιρροή της επιτάχυνσης Coriolis και προτείνεται για κυλινδρικά μοντέλα, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 3.2.1.



Εικόνα 3.2.1: Στοιχείο SOLID187. (ANSYS INC, 2024)

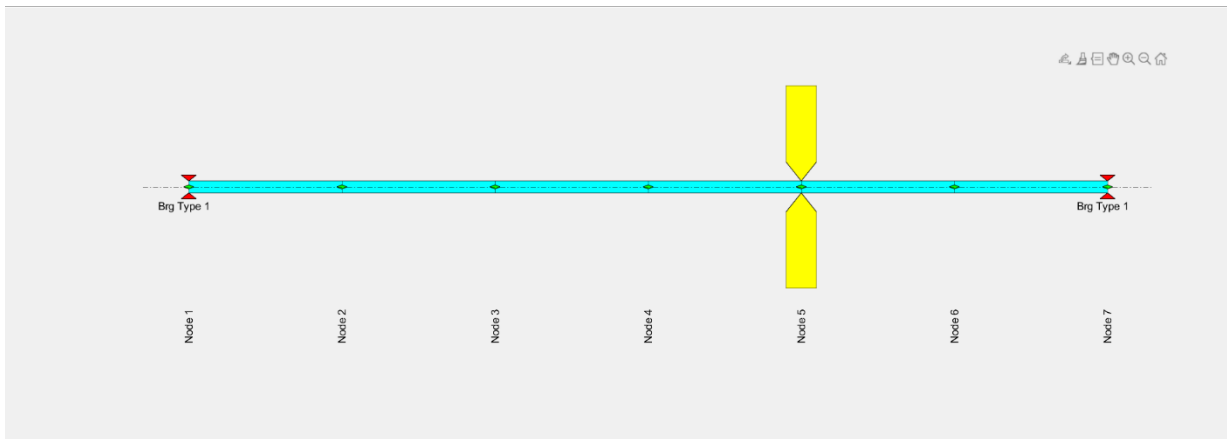
Το πλέγμα πραγματοποιήθηκε με την αυτοματοποιημένη μέθοδο δημιουργίας πλέγματος τετραεδρικών στοιχείων αλλάζοντας κάποιες παραμέτρους, όπως είναι το transition, span angle center και το smoothing. Επίσης, επιλέχθηκε το μέγεθος των στοιχείων στα 20 mm όπου μας έδωσε και τα καλύτερα αποτελέσματα πραγματοποιώντας σημειακές πυκνώσεις του πλέγματος στα άκρα και στο σημείο όπου εφάπτεται η εσωτερική επιφάνεια του δίσκου με τον άξονα, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.2.2. Ο τελικός αριθμός των κόμβων είναι 20495 και των στοιχείων 33334.



Εικόνα 3.2.2: Πλέγμα τετραεδρικών στοιχείων Jeffcott Rotor.

3.3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΟ MATLAB

Το αντίστοιχο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων με bar elements, κατασκευάστηκε στο πρόγραμμα Matlab όπου αποτελείται από 7 κόμβους που συμβολίζονται με πράσινους ρόμβους, ένα στοιχείο δίσκου που φαίνεται με κίτρινο χρώμα, τα άνω και κάτω κόκκινα βελιάκια που υπάρχουν στα άκρα του ρότορα ,τα οποία συμβολίζουν τα άκαμπτα έδρανα και τέλος με γαλάζιο χρώμα, όπως φαίνεται στη παρακάτω εικόνα 3.3.1 ο άξονας.



Εικόνα 3.3.1: Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων στο Matlab.

3.4 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με την έδραση των δύο άκρων του άξονα σε άκαμπτα έδρανα. Έτσι, χρησιμοποιήθηκε η εντολή remote point του Ansys Workbench όπου επιλέχθηκαν όλοι οι κόμβοι των δύο επιφανειών των άκρων του ρότορα και συγκεντρώθηκαν σε ένα νέο κόμβο στο κέντρο της κυκλικής επιφάνειας. Στη συνέχεια, περιορίστηκαν όλοι οι μεταφορικοί βαθμοί ελευθερίας (UX,UY,UZ) του νέου αυτού κόμβου προσομοιώνοντας τα άκαμπτα έδρανα.

3.5 ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

3.5.1 ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΜΗΔΕΝΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε ιδιομορφική ανάλυση του απλού μοντέλου ρότορα με μηδενική ταχύτητα περιστροφής. Οι ιδιοσυχνότητες για 0 rad/sec παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 3.5.1. Οι τιμές των ιδιοσυχνοτήτων που παρουσιάζονται πάρθηκαν από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν από την ιδιομορφική ανάλυση του μοντέλου στο λογισμικό Ansys Workbench και τον κώδικα Matlab.

	Συχνότητα (Hz) στα 0 rad/s		
Αριθμός Ιδιομορφής	Ansys	Matlab	Αναλογία
1	10.6	10.64	0.9962
2	10.602	10.64	0.9964
3	36.81	37.63	0.9782

Πίνακας 3.5.1: Ιδιοσυχνότητες Jeffcott ρότορα για 0 rad/s.

Παρατηρείται από τον παραπάνω πίνακα ότι τα αποτελέσματα από τις δύο διαφορετικές επιλύσεις είναι πάρα πολύ κοντά.

3.5.2 ΚΡΙΣΙΜΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ CAMBELL

Στη δεύτερη περίπτωση η ανάλυση πραγματοποιείται σε ένα εύρος ταχυτήτων από 0-300 rad/sec όπου παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα των συχνοτήτων μεταξύ του Ansys Workbench και του Matlab στον πίνακα 3.5.2.

	Συχνότητα (Hz) στα 300 rad/s		Αναλογία
Ιδιομορφές	Ansys	Matlab	
1	7.836	7.157	0.9133
2	11.448	12.0068	0.9534
3	16.197	17.782	0.9108
4	103.9	103.3465	0.9946

Πίνακας 3.5.2 : Ιδιοσυχνότητες Jeffcott ρότορα για 300 rad/s.

Στο πίνακα παρακάτω παρουσιάζονται οι φυσικές συχνότητες και οι αλλαγές του εμπρόσθιου και οπίσθιου στροβιλισμού του ρότορα σε διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής κατά την επίδραση του γυροσκοπικού φαινομένου. Από τις παρατηρούμενες ιδιομορφές λειτουργίας, φαίνεται πως η κλίση της κάμψης στον δίσκο κατά την πρώτη λειτουργία δεν έχει σημαντική επίδραση στις φυσικές συχνότητες, άρα δεν υπάρχει και σημαντική επίδραση του γυροσκοπικού φαινομένου. Ωστόσο, κατά τη τέταρτη λειτουργία η κλίση καμπύλης στον δίσκο είναι σημαντική με αποτέλεσμα το γυροσκοπικό φαινόμενο να επηρεάζει τις διαχωρισμένες συχνότητες, όπως φαίνεται στις εικόνες των ιδιομορφών. Αξιολογώντας το πέμπτο μοντέλο παρατηρείται μικρή πλευρική κίνηση στο δίσκο λόγω του μεγάλου του βάρους, η οποία λειτουργεί ως σφικτήρας για τον υπόλοιπο άξονα στη δεξιά πλευρά. Επομένως, το γυροσκοπικό φαινόμενο είναι αμελητέο και δεν παρατηρείται σημαντική αλλαγή στις φυσικές συχνότητες στροβιλισμού προς τα εμπρός και προς τα πίσω.

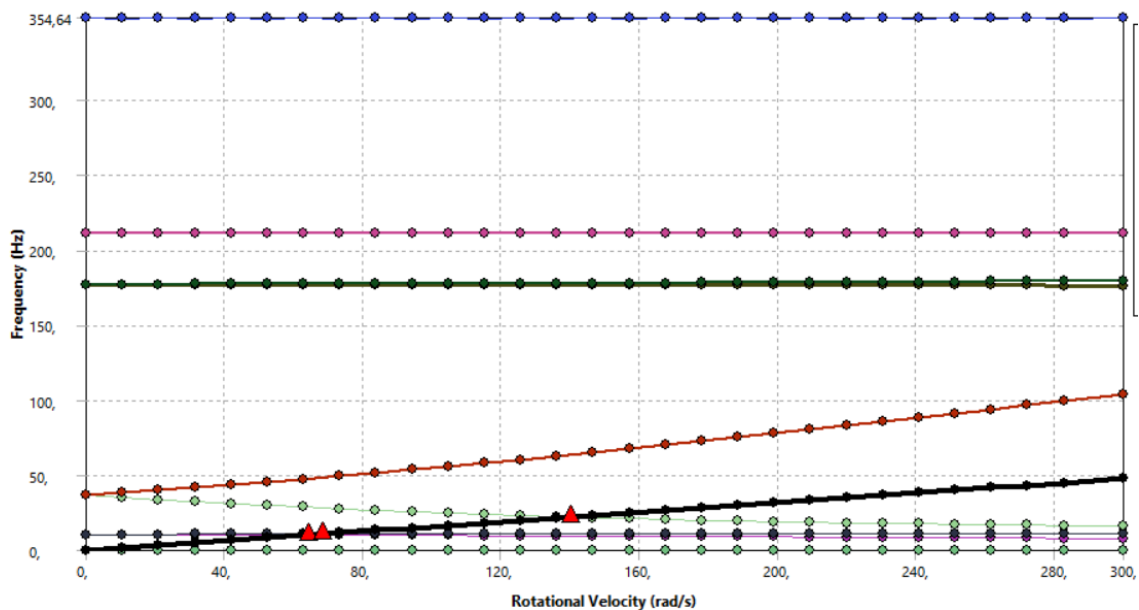
	Shaft speed rad/s			
Αριθμός ιδιομορφών	0	100	200	300
1 BW	10.6	9.931	9.029	7.836
2 FW	10.602	11.017	11.264	11.448
3 BW	36.81	24.871	19.173	16.197
4 FW	36.824	55.932	77.862	103.9
5 BW	177.19	176.85	176.62	176.41
6 FW	177.21	177.7	178.37	176.61

Πίνακας 3.5.3: Επιρροή γυροσκοπικού φαινομένου στις ιδιοσυχνότητες με την αύξηση ταχύτητας περιστροφής.

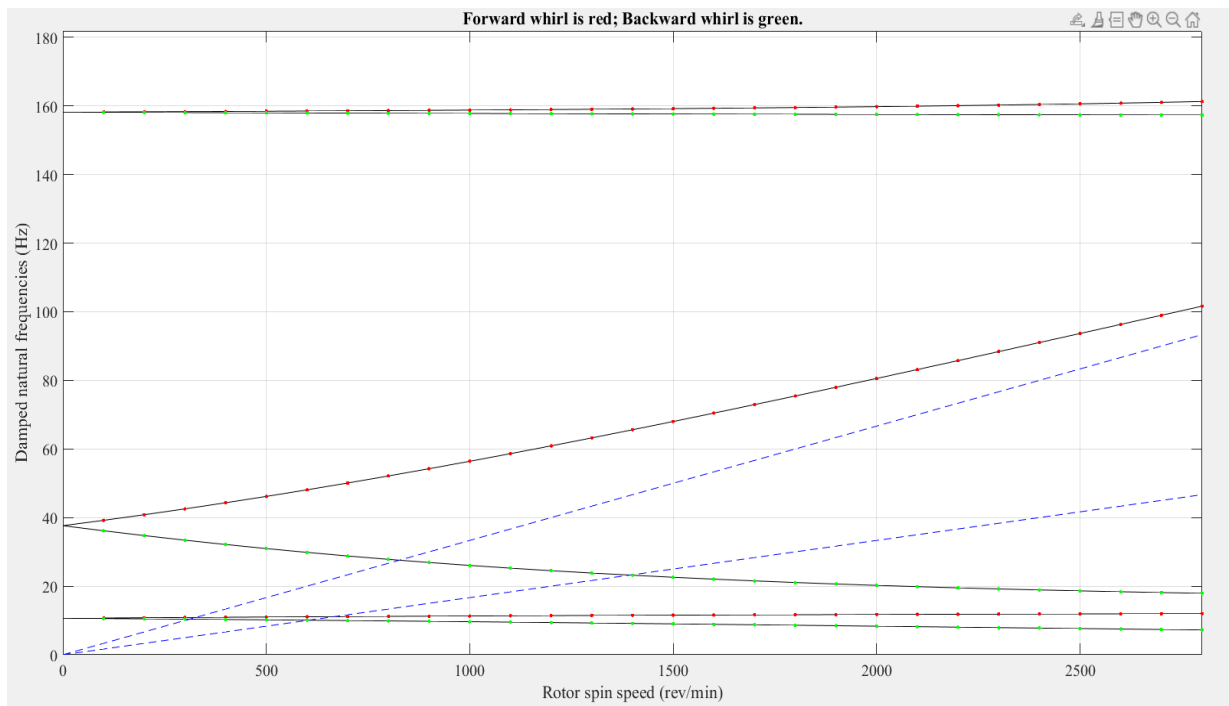
Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα Cambell που προέκυψαν από τις δύο αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο Ansys Workbench και στο Matlab. Παρατηρείται ότι οι συχνότητες των δύο διαγραμμάτων συμπίπτουν. Ακόμη οι οπίσθιοι και εμπρόσθιοι στροβιλισμοί τέμνονται πάντα στο σημείο μηδενικής ταχύτητας, αυτό συμβαίνει λόγω της εξάρτησης τους από την ταχύτητα περιστροφής του άξονα. Όταν οι δύο κλίμακες του διαγράμματος Cambell είναι ίσες τότε η γραμμή που διέρχεται από την διχοτόμο της ορθής γωνίας μεταξύ των δύο αξόνων είναι η γραμμή των κρίσιμων ταχυτήτων όπου σε κάθε σημείο που τέμνει κάποια από τις γραμμές των φυσικών συχνοτήτων είναι και μία κρίσιμη ταχύτητα. Στο πρώτο διάγραμμα αυτή η γραμμή είναι με μύαυρο χρώμα για το πρόγραμμα Ansys και με μπλέ χρώμα στο δεύτερο διάγραμμα στο πρόγραμμα του Matlab . Επίσης, η κύρια εφαρμογή του διαγράμματος Cambell είναι η εύρεση των κρίσιμων ταχυτήτων και η αποφυγή λειτουργίας της κατασκευής στις ταχύτητες αυτές. Οι τιμές των κρίσιμων ταχυτήτων, όπως φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα είναι παρόμοιες και παρουσιάζονται αναλυτικά στο παρακάτω πίνακα 3.5.4:

Κρίσιμες Ταχύτητες rpm			
Αριθμός Ιδιομορφής	Ansys	Matlab	Αναλογία
1	613,66	600	0.9777
2	653,63	700	0.9337
3	1337,37	1400	0.9552

Πίνακας 3.5.4: Σύγκριση κρίσιμων ταχυτήτων.

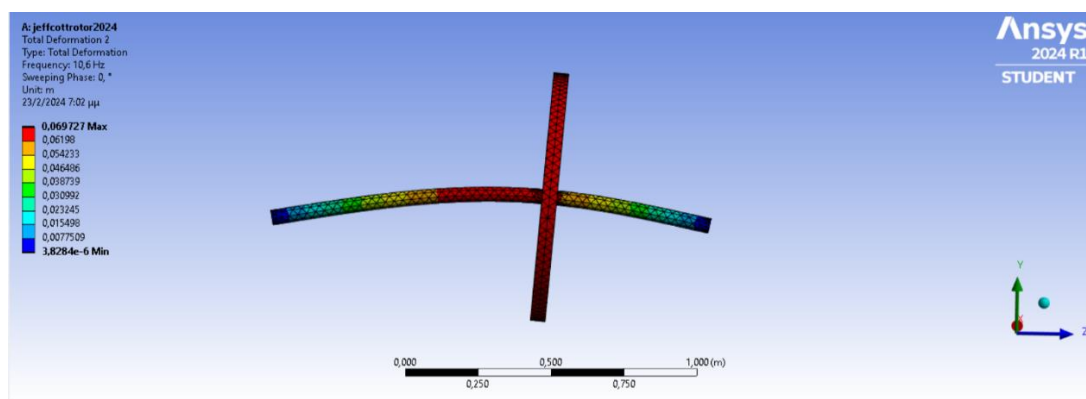


Διάγραμμα 3.5.1: Διάγραμμα Cambell στο Ansys Workbench.

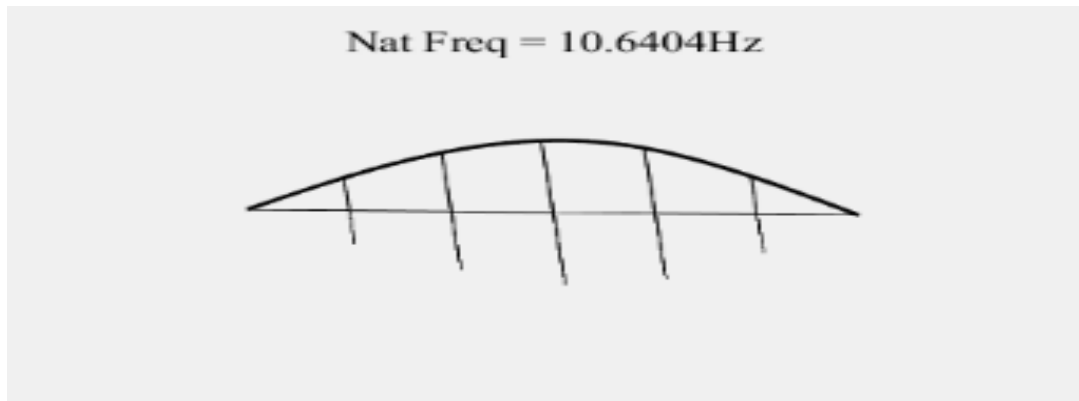


Διάγραμμα 3.5.2: Διάγραμμα Campbell στο Matlab.

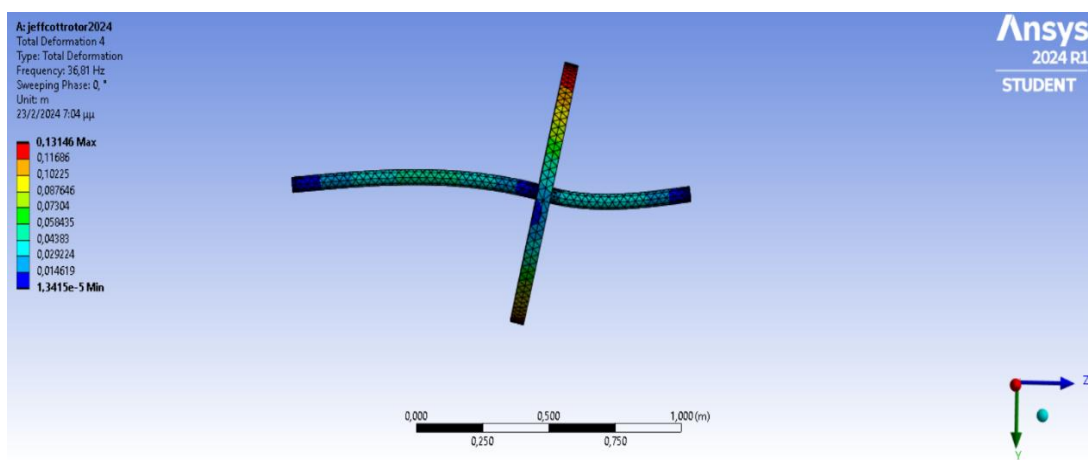
Η επίδρασης της φυγοκεντρικής δυσκαμψίας και του γυροσκοπικού φαινομένου σε διαφορετικές γωνιακές ταχύτητες και φυσικές συχνότητες μπορεί να εύκολα κατανοηθεί από τις παρακάτω εικόνες που απεικονίζουν τις ιδιομορφές του ρότορα που προέκυψαν από τα δύο προγράμματα. Στην πρώτη ιδιομορφή, η φυγοκεντρική δυσκαμψία επηρεάζει τη φυσική συχνότητα λόγω της αυξημένης κίνησης κοντά στον άξονα σε σύγκριση με την κίνηση κλίσης του δίσκου στην ίδια ταχύτητα. Από την άλλη, το γυροσκοπικό φαινόμενο επηρεάζει σημαντικά τις φυσικές συχνότητες κοντά στη δεύτερη και την τρίτη ιδιομορφή λόγω της υψηλής περιστροφικής κίνησης του δίσκου σε εγκάρσιο επίπεδο σε σύγκριση με την κίνηση της κεντρικής γραμμής του άξονα.



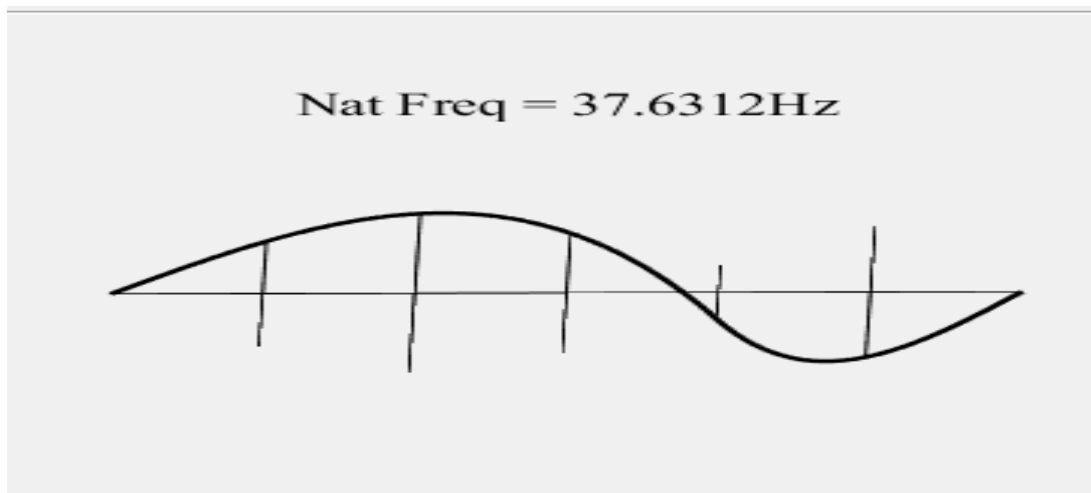
Εικόνα 3.5.5: 1^η Ιδιομορφή στο Ansys.



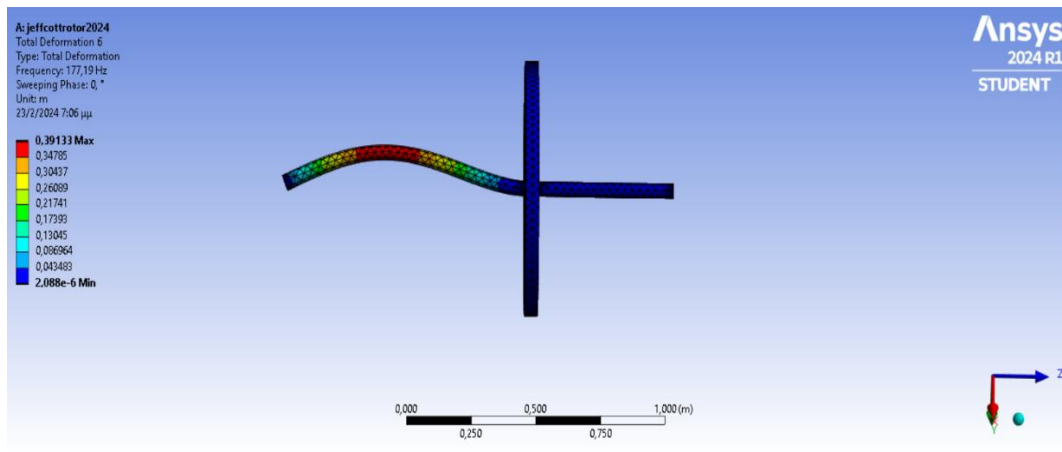
Εικόνα 3.5.6: 1^η Ιδιομορφή στο Matlab.



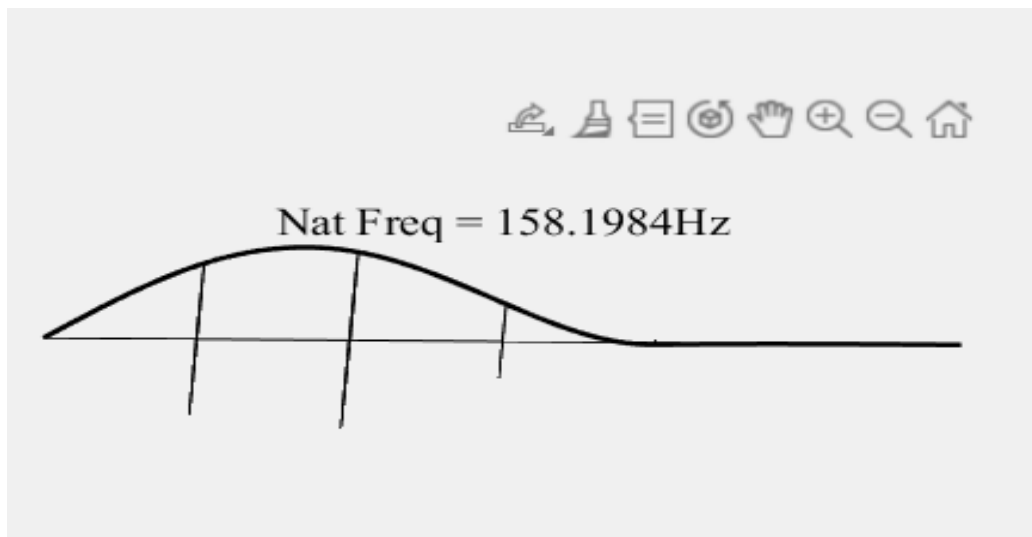
Εικόνα 3.5.7: 3η Ιδιομορφή στο Ansys.



Εικόνα 3.5.7: 3η Ιδιομορφή στο Matlab.



Εικόνα 3.5.8: 5η Ιδιομορφή στο Ansys.



Εικόνα 3.5.9: 5η Ιδιομορφή στο Matlab.

4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΑΞΟΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΡΩΣΗΣ .

Ο στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι η ανάπτυξη ενός απλού μοντέλου ναυτικού αξονικού συστήματος πρόωσης που χρησιμοποιείται σε πάρα πολλούς τύπους σκαφών και πλοίων, όπως είναι κάποια τουριστικά πλοία, σκάφη αναψυχής και μηχανότρατες, όπως στη συγκεκριμένη περίπτωση και η ανάλυση της δυναμικής του συμπεριφοράς σε κατάσταση λειτουργίας με την επιβολή πραγματικών φορτίων. Τέτοιου τύπου αναλύσεις είναι χρήσιμες για να γνωρίζει κανείς τυχόν κρίσιμες ταχύτητες λειτουργίας, έντονες μετατοπίσεις στο άξονα όπου μπορούν να καταστρέψουν τα έδρανα στήριξης και τον άξονα στρέψεως και τις επιδράσεις του γυροσκοπικού φαινομένου. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο Ansys Workbench και σε περιβάλλον Matlab σε κώδικα που συνοδεύει το βιβλίο Dynamic of Rotating Machines του M. I. Friswell ώστε να γίνει σύγκριση αλλά ταυτόχρονα επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν, όπως και στην ανάλυση του ρότορα Jeffcott. Ο συγκεκριμένος τύπος του αξονικού συστήματος πρόωσης αποτελείται από τον άξονα ή τους άξονες στρέψεως, την έλικα, τα έδρανα στήριξης και τον κινητήρα με ή χωρίς μειωτήρα στροφών. Λεπτομέρειες για τη γεωμετρία των επιμέρους τμημάτων , των μαζών, των υλικών, των ιδιοτήτων θα αναφερθούν παρακάτω.

4.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΗΚΑ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΤΟΥ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.

Το υπο μελέτη αξονικό σύστημα συνδέεται με ένα τετράχρονο πολύτροφο κινητήρα που λειτουργεί στις 3000 rpm ενώ αυτός με την σειρά του συνδέεται με ένα μειωτήρα στροφών με σχέση 1:2 μετατρέποντας τις αρχικές στροφές του κινητήρα στο μισό δηλαδή στις 1500 rpm αυτές είναι και οι μέγιστες στροφές λειτουργίας της έλικας. Επίσης, θεωρείται η μέγιστη ταχύτητα ταξιδιού στους 24 κόμβους (12,35 m/s).

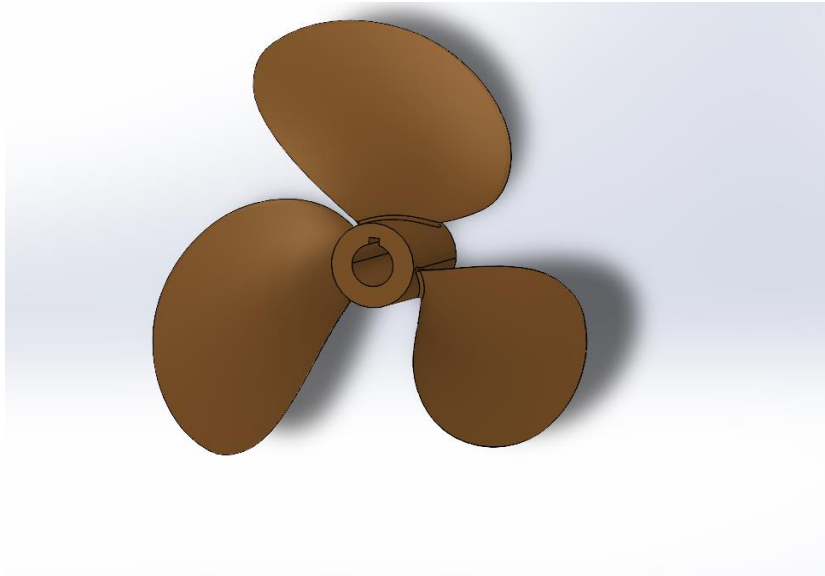
4.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΑΞΟΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΡΩΣΗΣ.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το αξονικό σύστημα πρόωσης αποτελείται από τον κινητήρα, την έλικα, τον άξονα στρέψεως και τα έδρανα στήριξης τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια, όπως σχεδιάστηκαν και συναρμολογήθηκαν στο πρόγραμμα Solidworks.

4.2.1 ΈΛΙΚΑ

Αρχικά, η έλικα του συστήματος πρόωσης σχεδιάζεται με ακριβή γεωμετρική προσέγγιση, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.2.1. Ωστόσο, στο αναπτυχθέν μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται, αντί αυτής, μία σημειακή μάζα (point mass

element) για το πρόγραμμα Ansys Workbench και αντίστοιχος κυκλικός δίσκος με παρόμοια μάζα και ροπή αδράνειας με την πραγματική για το κώδικα Matlab. Αυτό επιλέγεται διότι, λόγω της πολύπλοκης γεωμετρίας της έλικας, ο αριθμός των στοιχείων του πλέγματος αυξάνεται σημαντικά στην ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία, με αποτέλεσμα να αυξάνεται και ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος.



Εικόνα 4.2.1: Έλικα.

Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Έλικας :

Αριθμός Πτερυγίων (Z) : 3

Διάμετρος Έλικας (D) : 1 m

Λόγος Βήματος Έλικας (P/D) : 1,2

Λόγος Εκτεταμένης Επιφάνειας της Έλικας : 0,65

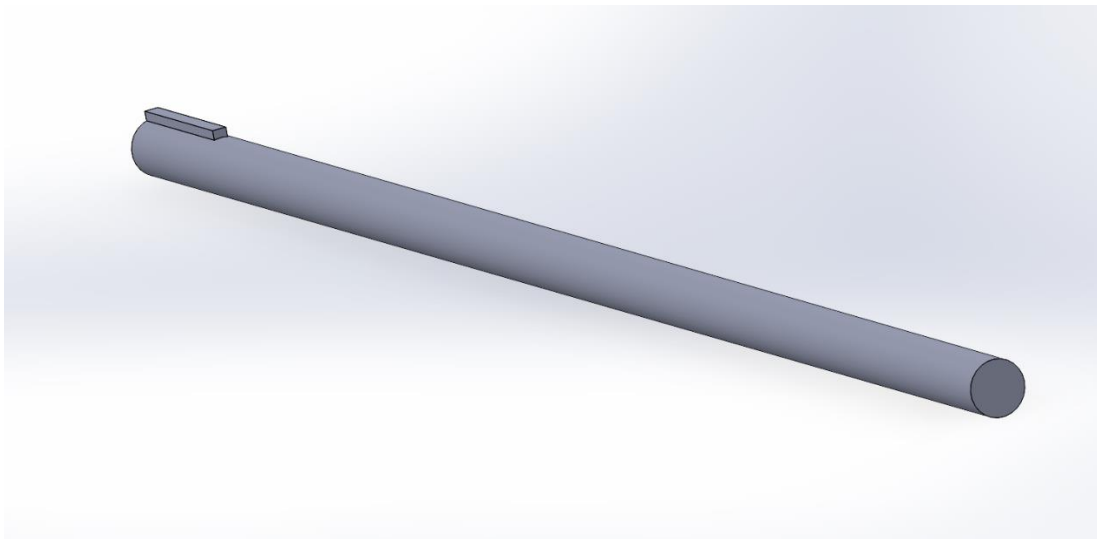
Βάρος Έλικας : 94,938 kg

Πολική Ροπή Αδράνειας (I_p): 4,81 kg * m²

Διαμετρική Ροπή Αδράνειας (I_d) : 2,97 kg * m²

4.2.2 ΕΛΙΚΟΦΟΡΟΣ ΑΞΟΝΑΣ

Στη συνέχεια, σχεδιάστηκε ο ελικοφόρος άξονας, ο οποίος στη μία άκρη φέρει ειδικό σφηνώτοπο, ώστε να στερεωθεί σταθερά η έλικα και στην αντίθετη άκρη φέρει φλάντζα, η οποία σχεδιάστηκε ξεχωριστά για την ένωση του άξονα με την φλάντζα του μειωτήρα στροφών για την παραλαβή και μετάδοση της περιστροφικής κίνησης. Στην εικόνα 4.2.2 παρουσιάζεται η τρισδιάστατη γεωμετρία του.



Εικόνα 4.2.2: Ελικοφόρος Αξονας.

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά Ελικοφόρου Αξονα:

Μήκος Άξονα: 4000 mm

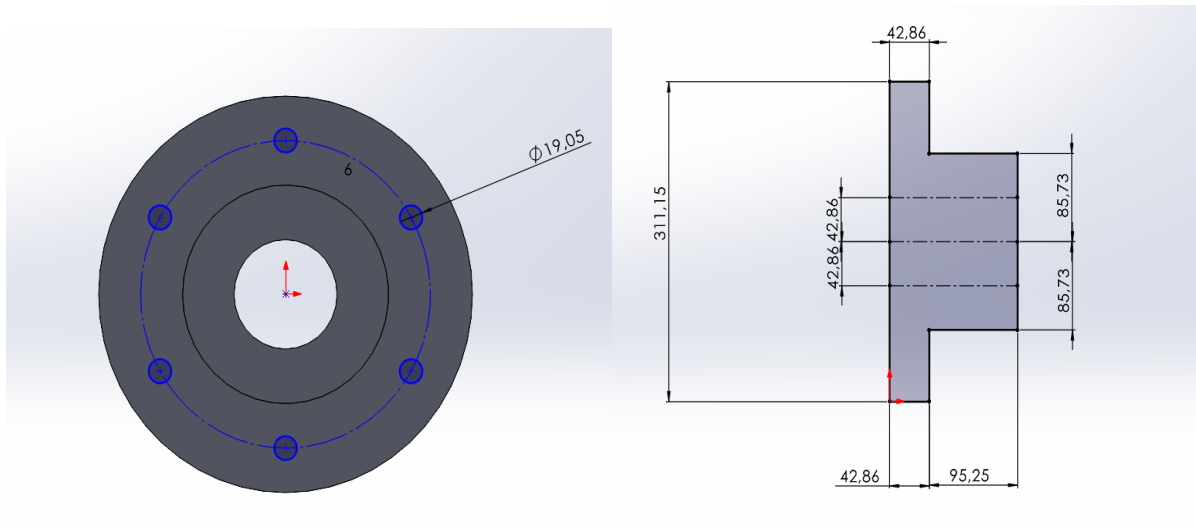
Διάμετρος Άξονα : 85,72 mm

Διαστάσεις Σφηνώτοπου :

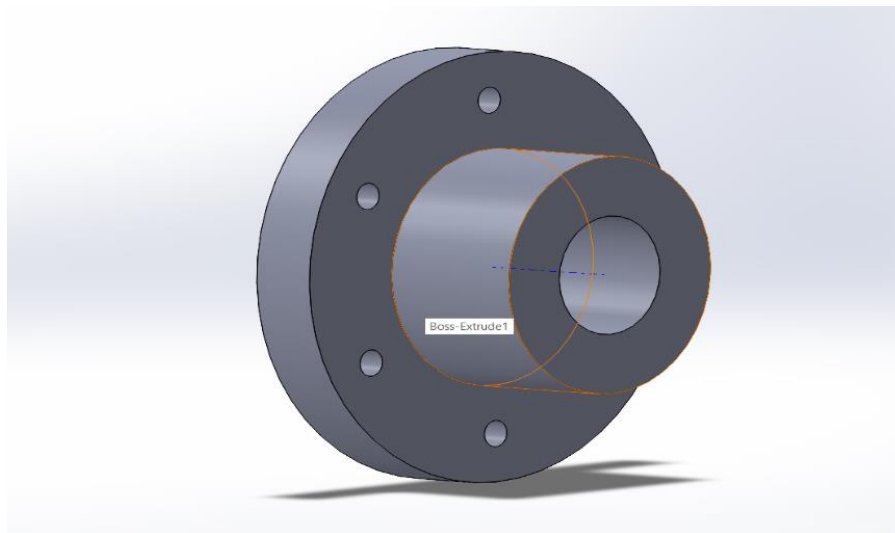
Πλάτος* Ύψος* Μήκος :21,43 mm *14,29 mm * 242,86 mm

4.2.3 ΦΛΑΝΤΖΑ

Η φλάντζα, όπως φαίνεται στις εικόνες 4.2.3 ,4.2.4 με τις διαστάσεις, χρησιμοποιείται για την ένωση του άξονα με τον μειωτήρα στροφών μπορεί είτε να συνδεθεί μηχανικά η να συγκολληθεί απευθείας πάνω στο άξονα. Οι οπές της φλάντζας είναι 6 στον αριθμό και διαμέτρου 19,05mm.



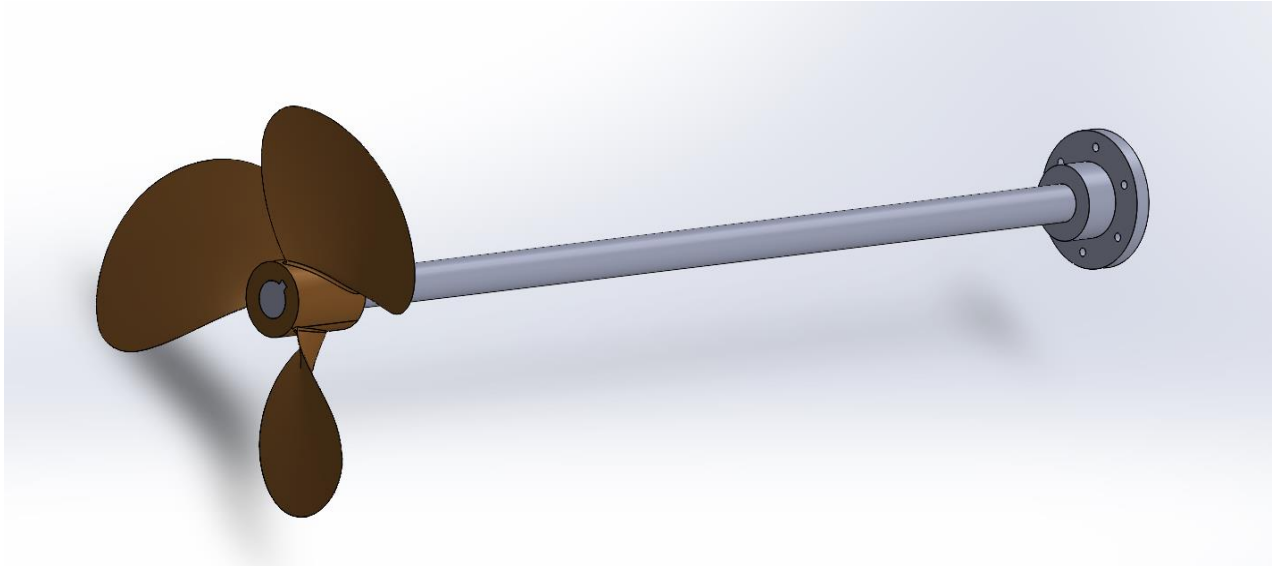
Εικόνα 4.2.3: Διαστάσεις Φλάντζας Συνδέσεως.



Εικόνα 4.2.4 : 3D Γεωμετρία Φλάντζας.

4.2.4 ΤΕΛΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

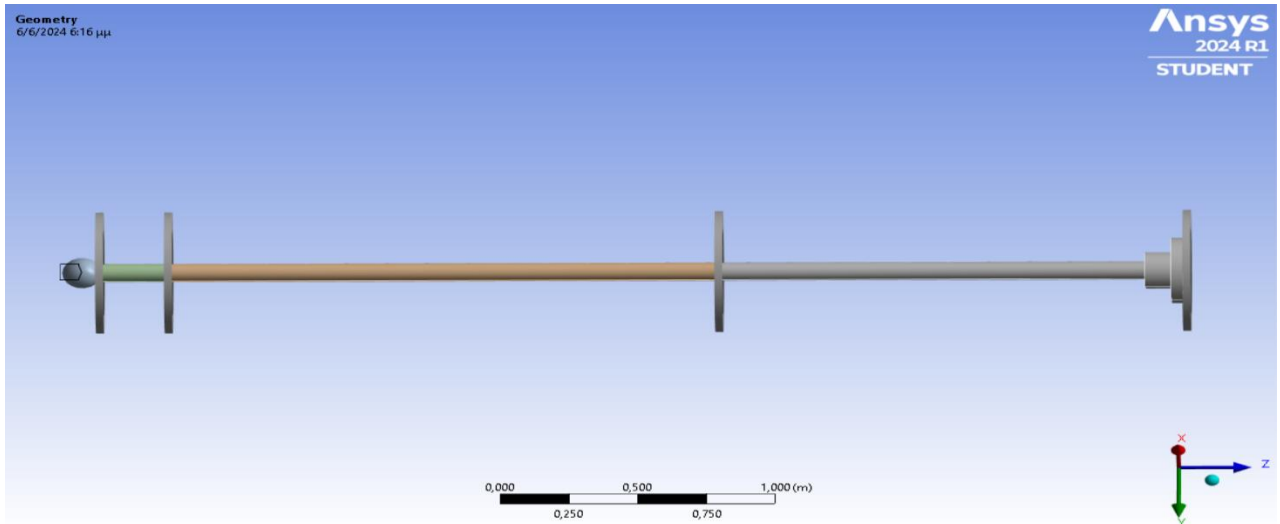
Η τελική γεωμετρία προέκυψε από την συναρμολόγηση αυτών των εξαρτημάτων με τη βοήθεια του προγράμματος Solidworks όπου με τους κατάλληλους περιορισμούς (mates)-εντολές προέκυψε η τελική γεωμετρία, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 4.2.5.



Εικόνα 4.2.5: 3D Γεωμετρία Συστήματος Πρόωσης.

4.3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΑΞΟΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΡΟΩΣΗΣ

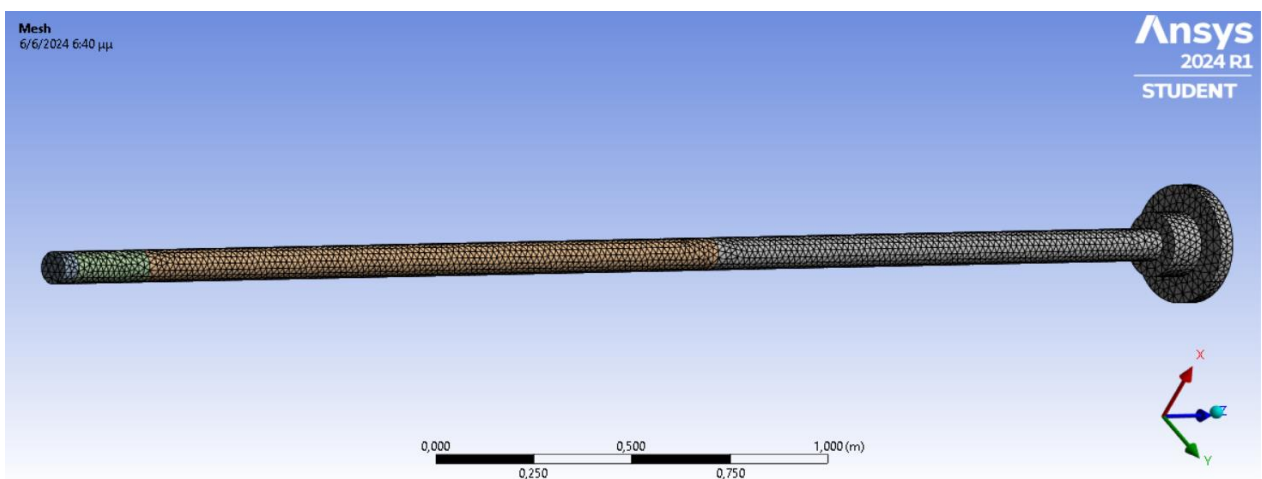
Στο επόμενο βήμα, εφόσον σχεδιάστηκε η γεωμετρία, έγινε εισαγωγή του αρχείου CAD από το πρόγραμμα Solidworks στο πρόγραμμα Ansys Workbench όπου αφού έγινε η επιλογή του υλικού της γεωμετρίας θεωρήθηκε ύστερα ότι όλα τα εξαρτήματα είναι φτιαγμένα από χάλυβα πυκνότητας 7850 kg/m^3 , μέτρο Poisson 0,3 και μέτρο ελαστικότητας $E= 2 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$. Στο επόμενο βήμα, η παρούσα γεωμετρία εισήχθη στο Design Modeler στη σχεδιαστική πλατφόρμα του λογισμικού Ansys όπου χωρίστηκε η γεωμετρία σε διαφορετικούς όγκους στα σημεία στα οποία τοποθετήθηκαν τα έδρανα στήριξης, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.3.1.



Εικόνα 4.3.1 : Απεικόνιση των διαιρεμένων όγκων και των θέσεων των εδράνων.

4.3.1 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

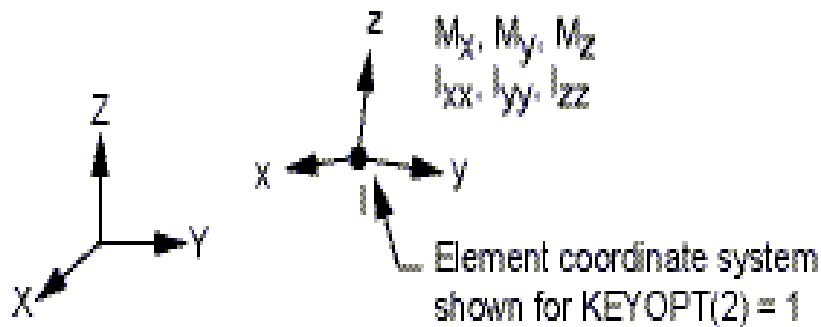
Ο τύπος των στοιχείων που επιλέχθηκαν για την δημιουργία του πλέγματος είναι ο ίδιος ακριβώς με την ανάλυση του Jeffcott Rotor για τους λόγους που έχουν προαναφερθεί. Η δημιουργία πλέγματος έγινε με την αυτοποιημένη διαδικασία, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 4.3.2, που προσφέρεται στο λογισμικό Ansys Workbench, όπως και στη προηγούμενη ανάλυση, όπου επιλέχθηκε ο τύπος των τετραεδρικών στοιχείων (SOLID187), το μήκος των στοιχείων το οποίο μετά από δοκιμές κατέληξε στα 20 mm όπου τα αποτελέσματα παρέμεναν ίδια. Ο τελικός αριθμός των στοιχείων και των κόμβων του πλέγματος είναι 21902 και 37219 αντίστοιχα.



Εικόνα 4.3.2: Πλέγμα Πεπερασμένων Στοιχείων.

Επίσης, η προσομοίωση της έλικας λόγω της περίπλοκης γεωμετρίας της δεν μοντελοποιήθηκε με τον ίδιο τύπο στοιχείων με το υπόλοιπο μοντέλο, διότι θα χρειαζόταν μεγάλο αριθμό

στοιχείων, ώστε να αποδοθεί σωστά η γεωμετρία της, άρα και περισσότερο χρόνο επίλυσης. Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο MASS21 όπου είναι ένα σημειακό στοιχείο (point element), όπως φαίνεται στην εικόνα 4.3.3, το οποίο έχει έξι βαθμούς ελευθερίας τρεις μεταφορικούς και τρεις περιστροφικούς στους άξονες x, y, z και τοποθετήθηκε στο κέντρο της διατομής του ενός άκρου του άξονα εκεί που εδράζεται η έλικα σε ένα κόμβο που δημιουργήθηκε με την εντολή remote point του Ansys συγκεντρώνοντας όλους τους κόμβους της διατομής σε αυτόν. Τέλος, στο στοιχείο αυτό συμπληρώθηκε η ακριβής μάζα, η πολική και η διαμετρική ροπή αδράνειας της έλικας, ώστε να είναι πιο ρεαλιστικά τα αποτελέσματα.



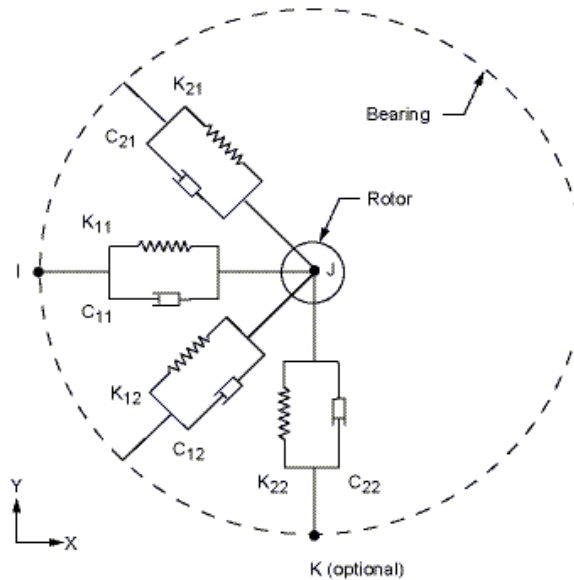
Εικόνα 4.3.3 : Στοιχείο Μάζας (MASS21). (ANSYS INC, 2024)

4.3.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΕΔΡΑΝΩΝ

Η μοντελοποίηση του πρυμναίου εδράνου η έδρανο χοάνης και του γραμμικού εδράνου έγιναν με το στοιχείο COMBI214 του Ansys όπου είναι ένα 2D στοιχείο, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.3.4 με διαμήκη ικανότητα εφελκυσμού και συμπίεσης. Το συγκεκριμένο στοιχείο περιγράφεται από δύο κόμβους με δύο μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο σε δύο από τις τρεις διευθύνσεις x, y και z . Επίσης, έχει χαρακτηριστικά στιβαρότητας και απόσβεσης είτε σε κάθετες ($K11, K22, C11, C22$) είτε σε διασταυρωμένες ($K21, K12, C21, C12$) διευθύνσεις. Η συντελεστής στιβαρότητας έχει μονάδα μέτρησης N/m και ο συντελεστής απόσβεσης $N * s/m$ (ANSYS INC, 2024). Ακόμη το έδρανο χοάνης επειδή έχει μήκος $0,3 m$ προσομοιώθηκε, όπως φαίνεται και στην εικόνα 5.3.1 με δύο στοιχεία εδράνων, ενώ το έδρανο γραμμής με ένα. Λόγω του ότι δεν είναι γνωστές ακριβώς οι τιμές στιβαρότητας και απόσβεσης για την πιο ακριβή προσομοίωση επιλέχθηκαν κάποιες τιμές που υπάρχουν στη δημοσίευση των Zhenguao Zhang, Xinxing Ma, Haiting Yu και Hongxing Hua [Stochastic dynamics and sensitivity analysis of a multistage marine shafting system with uncertainties]. Τέλος, με την εντολή remote point δημιουργήσαμε σε κάθε διατομή του κάθε όγκου όπου θα τοποθετηθούν τα έδρανα ένα κεντρικό κόμβο στο οποίο συνδεέται το έδρανο και στην άλλη πλευρά του στηρίχτηκε στο έδαφος πακτωμένο με περιορισμένους όλους τους βαθμούς ελευθερίας. Οι τιμές του κάθε εδράνου παρουσιάζονται στο πίνακα 4.3.1.

Πίνακας 4.3.1 Τιμές Απόσβεσης και Στιβαρότητας Εδράνων

Τύπος Εδράνου	Τιμή Στιβαρότητας (K)	Τιμή Απόσβεσης (C)
Έδρανο Χοάνης	$4e8 \text{ N/m}$	5000 N * s/m
Έδρανο Γραμμής	$2e8 \text{ N/m}$	5000 N * s/m



Εικόνα 4.3.4: Στοιχείο εδράνου COMBI214. (ANSYS INC, 2024)

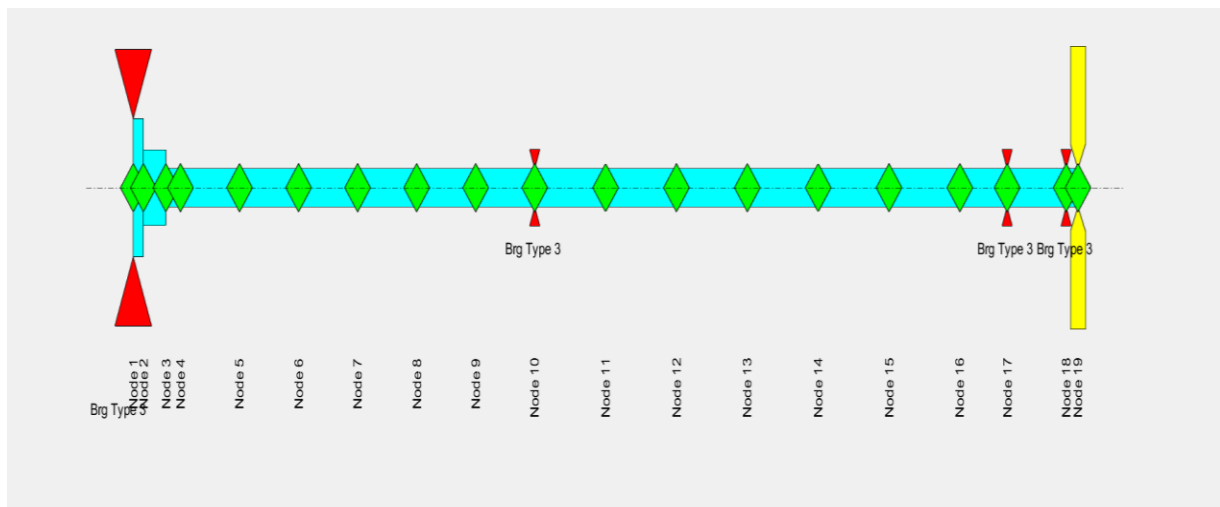
4.4 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ (CONSTRAINTS)

Η κίνηση του συστήματος γίνεται στο επίπεδο x, y ο άξονας περιστροφής είναι ο z , άρα σε όλους τους κεντρικούς κόμβους που δημιουργήθηκαν για την στήριξη των εδράνων, αλλά και της φλάντζας, περιορίστηκε ο μεταφορικός βαθμός ελευθερίας στο άξονα z . Επίσης, ο δεύτερος κόμβος των εδράνων στηρίχτηκε με το έδαφος περιορίστηκαν όλοι οι βαθμοί ελευθερίας θεωρώντας την βάση σταθερή και άκαμπτη.

4.5 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΟ MATLAB

Αντίστοιχα, πραγματοποιήθηκε και το στήσιμο του μοντέλου σε κώδικα Matlab, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.5.1, με τις ίδιες ιδιότητες υλικού και διαστάσεις για όλα τα στοιχεία του συστήματος πρόωσης, χωρίς βέβαια να σχεδιαστούν οι οπές της φλάντζας, κάτι που δεν είναι εφικτό στο λογισμικό. Το σύστημα πρόωσης αποτελείται από 19 κόμβους, οι οποίοι συμβολίζονται με πράσινους ρόμβους, από 18 στοιχεία άξονα τα οποία είναι με μπλέ χρώμα και με 4 στοιχεία εδράνων, που απεικονίζονται με άνω και κάτω κόκκινα βέλη τύπου 3 όπου συμπληρώθηκαν οι τιμές στιβαρότητας και απόσβεσης για το κάθε έδρανο συγκεκριμένα.

Επιπρόσθετα, η έλικα μοντελοποιήθηκε με στοιχείο δίσκου, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.5.1 με κίτρινο χρώμα με ίδια μάζα, πολική και διαμετρική ροπή αδράνειας με την πραγματική.



Εικόνα 4.5.1 : Αναπαράσταση 2D του Συστήματος Πρόωσης στο Matlab.

4.6 ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΡΩΩΣΗΣ

Εφόσον τελειοποιήθηκε η μοντελοποίηση της γεωμετρίας και της κατασκευής του πλέγματος, όπως και στη πρώτη ανάλυση του μοντέλου Jeffcott Rotor, έτσι και σε αυτή την περίπτωση θα γίνει ακριβώς η ίδια διαδικασία για την εξαγωγή των φυσικών συχνοτήτων, του διαγράμματος Cambell και των ιδιομορφών και στη συνέχεια θα επιτευχθεί η σύγκρισή τους με τα αποτελέσματα από το λογισμικό Matlab.

Αρχικά, η ανάλυση στο πρόγραμμα Ansys Workbench πραγματοποιήθηκε στο σταθερό σύστημα αναφοράς, ώστε να μπορέσει να εξαχθεί το διάγραμμα Cambell με την επίδραση του γυροσκοπικού φαινομένου, όπως και στη πρώτη ανάλυση. Επίσης, η μέθοδος επίλυσης που χρησιμοποιήθηκε και σε αυτή την ανάλυση είναι η QR Damped μέθοδος, η οποία δίνει πολύ καλά αποτελέσματα σε μεγάλα μοντέλα, με όσο το δυνατόν λιγότερο αριθμό κόμβων και δυνατότητα εισαγωγής απόσβεσης στο σύστημα. Τέλος, προστέθηκε η ταχύτητα περιστροφής της γεωμετρίας μας σε 16 βήματα από 100 rpm το κάθε ένα στο εύρος 0-1500 rpm όπου είναι η ταχύτητα λειτουργίας. Στους παρακάτω πίνακες 4.6.1 και 4.6.2 παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα για 0 rpm και για 1500 rpm αντίστοιχα που προέκυψαν από την ανάλυση στο Ansys και στο Matlab.

Συχνότητα Hz στις 0 rpm			
Ιδιομορφή	Matlab	Ansys	Αναλογία
1 BW	58.61	58.141	0.9919
2 FW	58.61	58.143	0.9920
3 BW	85.3275	84.36	0.9886
4 FW	85.3275	84.36	0.9886
5 BW	145.365	145.06	0.9979

6 FW	145.365	145.08	0.9980
7 BW	200.3504	197.57	0.9861
8 FW	200.3504	197.58	0.9861

Πίνακας 4.6.1 : Σύγκριση Ιδιοσυχνοτήτων για 0 rpm.

Συχνότητα Hz στις 1500 rpm			
Ιδιομορφή	Matlab	Ansys	Αναλογία
1 BW	58.3934	57.919	0.9918
2 FW	58.8222	58.361	0.9921
3 BW	85.007	84.035	0.9885
4 FW	85.6436	84.36	0.9850

Πίνακας 4.6.2 : Σύγκριση Ιδιοσυχνοτήτων για 1500 rpm

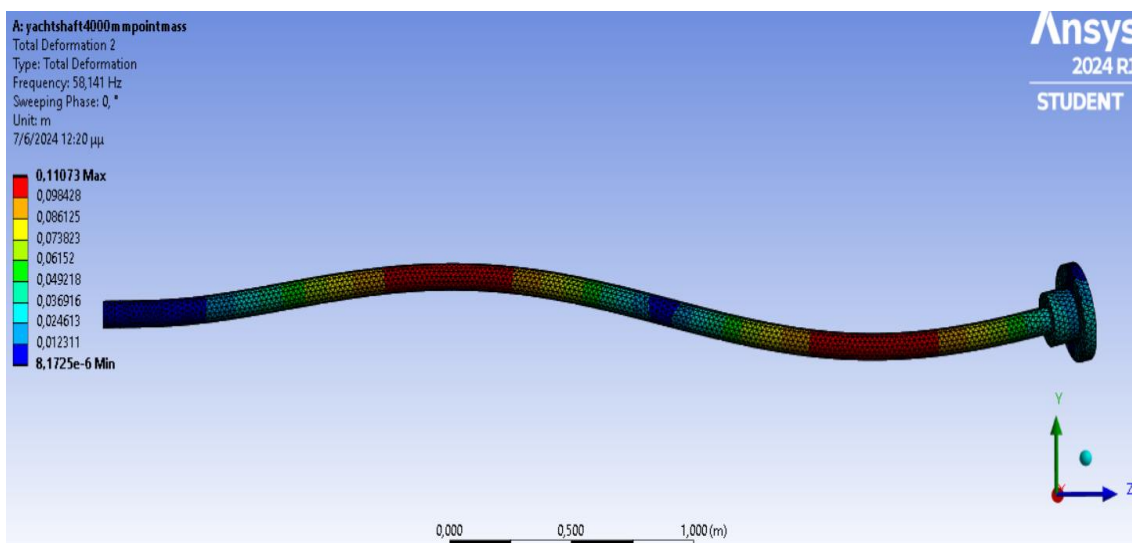
Παρατηρείται και στους δύο πίνακες 4.6.1 και 4.6.2, ότι οι ιδιοσυχνότητες που προέκυψαν από την ανάλυση, στα δύο διαφορετικά λογισμικά για 0 rpm και για 1500 rpm συμπίπτουν με πολύ μικρά ποσοστά αποκλίσεων. Άρα, τα αποτελέσματα είναι κοντά στο πραγματικό αποτέλεσμα. Στον πίνακα 4.6.3 παρουσιάζεται η μεταβολή των συχνοτήτων για διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής όπου φαίνεται η επίδραση του γυροσκοπικού φαινομένου.

Συχνότητα σε Hz				
Ιδιομορφή	0 rpm	500 rpm	1000 rpm	1500 rpm
1 BW	58.1410	58.0680	57.9940	57.9190
2 FW	58.1430	58.2150	58.2880	58.3610
3 BW	84.3600	84.2540	84.1450	84.0350
4 FW	84.3600	84.4700	84.5770	84.6850
5 BW	145.0600	139.9500	135.0100	130.2500
6 FW	145.0800	150.3500	155.7900	161.3500
7 BW	197.5700	197.3600	197.1700	197.0000
8 FW	197.5800	197.8200	198.1000	198.4500

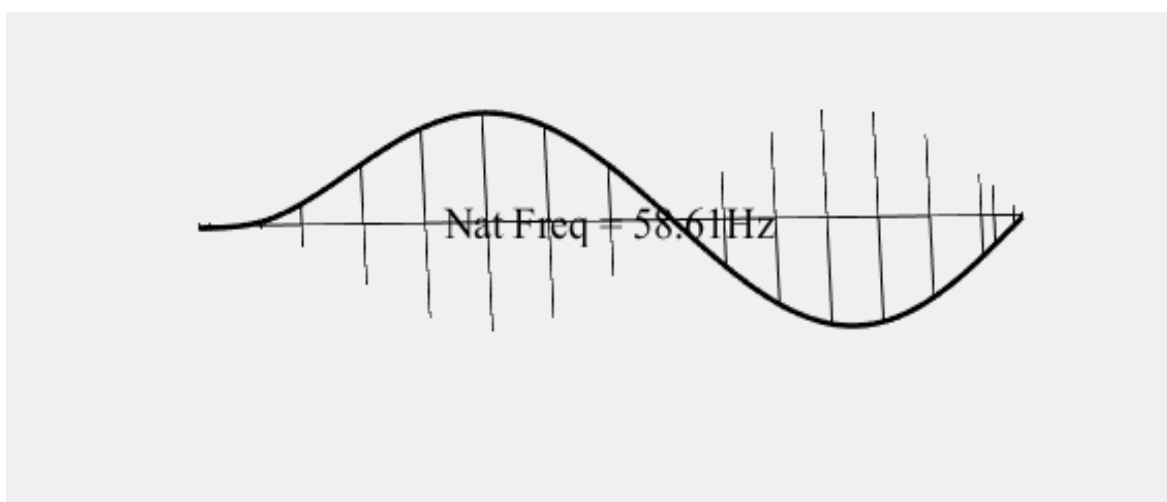
Πίνακας 4.6.3 : Επίδραση γυροσκοπικού φαινομένου στις φυσικές συχνότητες.

Στον πίνακα 4.6.3 φαίνονται οι μεταβολές στις προς τα εμπρός και προς τα πίσω συχνότητες στροβιλισμού με την επίδραση του γυροσκοπικού φαινομένου στην ανάλυση. Η πιο έντονη μεταβολή παρατηρείται στις ιδιομορφές 5 και 6 όπου από 0-1500 rpm παρατηρείται μια μεταβολή της τάξης των 16 Hz περίπου Hz. Αυτό εύκολα μπορεί να εντοπισθεί από τα σχήματα των ιδιομορφών και των διαγραμμάτων Campbell τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω όπου στην 5 και 6 ιδιομορφή θα δούμε την μεγαλύτερη κάμψη του άξονα στο σημείο της έλικας από τις άλλες και στο διάγραμμα Campbell οι αποκλίσεις μεταξύ των τιμών.

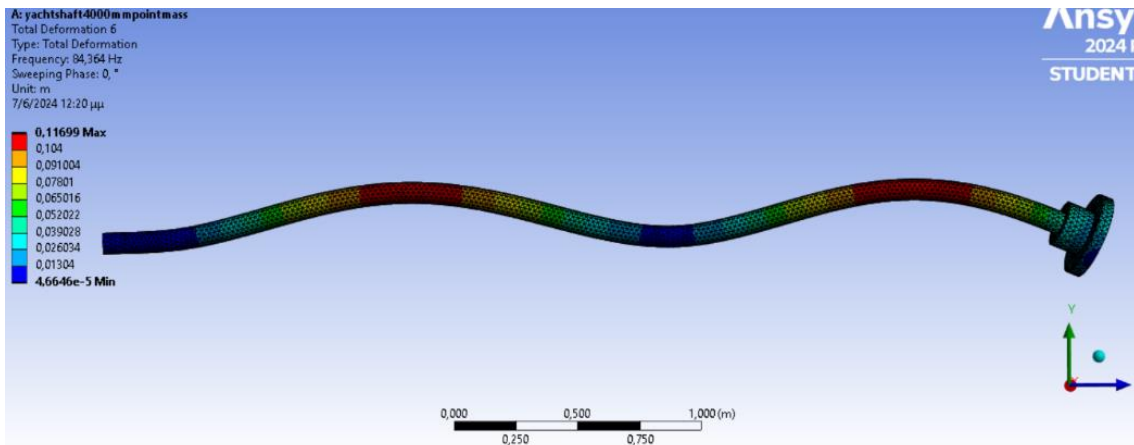
Στις παρακάτω εικόνες από 4.6.1-4.6.10 παρουσιάζονται οι ιδιομορφές από την επίλυση της γεωμετρίας μας στα δύο λογισμικά στο Ansys και στο Matlab για μηδενική περιστροφή σε έγχρωμες και ασπρόμαυρες εικόνες αντίστοιχα. Στο Matlab η παχιά μαύρη γραμμή αντιπροσωπεύει τον άξονα του δρομέα ενώ οι κάθετες γραμμές τις τροχιές των κόμβων σε μια περίοδο ταλάντωσης. Παρατηρείται ότι, σε κάθε ιδιομορφή οι κινήσεις του συστήματος πρόωσης μοιάζουν πολύ και στις δύο αναλύσεις. Επίσης, στη 3D γεωμετρία στο Ansys μέσω των χρωματισμών είναι εφικτή η κατανόηση της κίνησης του σώματος σε όλη τη διάρκεια της ταλάντωσης, αφού απεικονίζεται η μέγιστη απομάκρυνση από το αρχικό σημείο της ταλάντωσης. Έτσι, το μπλέ χρώμα δείχνει τον μικρότερο εύρος της ταλάντωσης και το βαθύ μπλέ το ακίνητο σημείο, ενώ όσο κινείται κανείς προς το κόκκινο αυξάνεται το εύρος της ταλάντωσης.



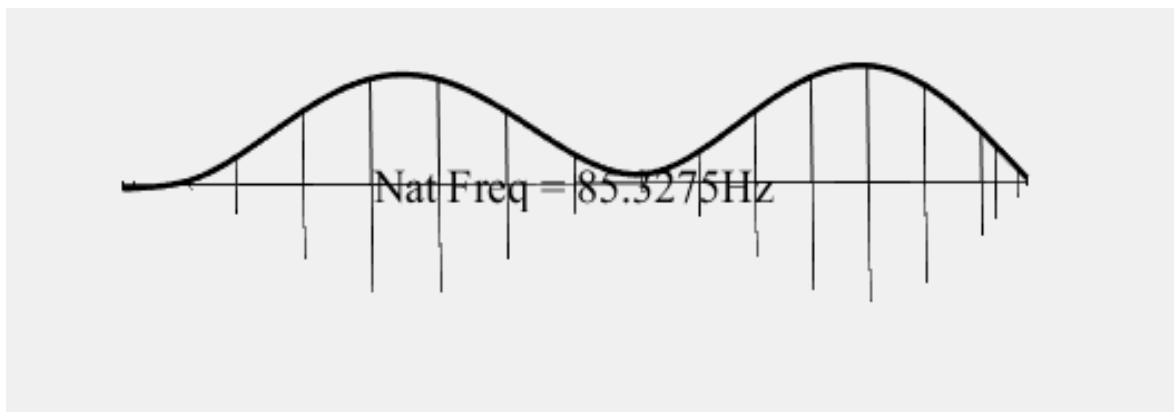
Εικόνα 4.6.1 : 1^η Ιδιομορφή στο Ansys.



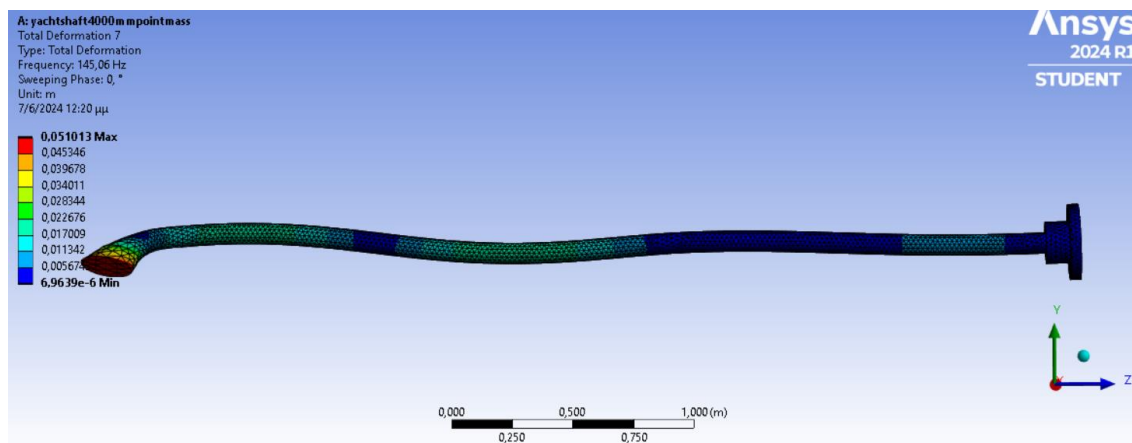
Εικόνα 4.6.2 : 1^η Ιδιομορφή στο Matlab.



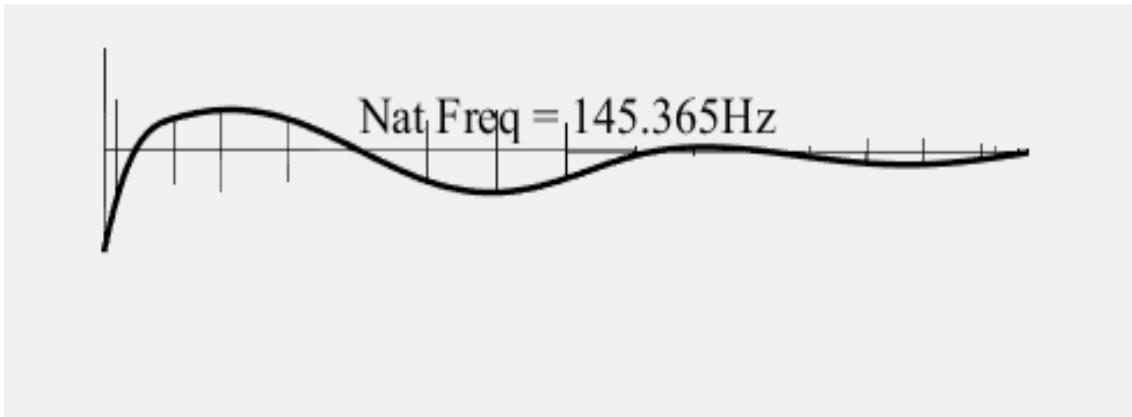
Εικόνα 4.6.3: 4^η Ιδιομορφή στο Ansys .



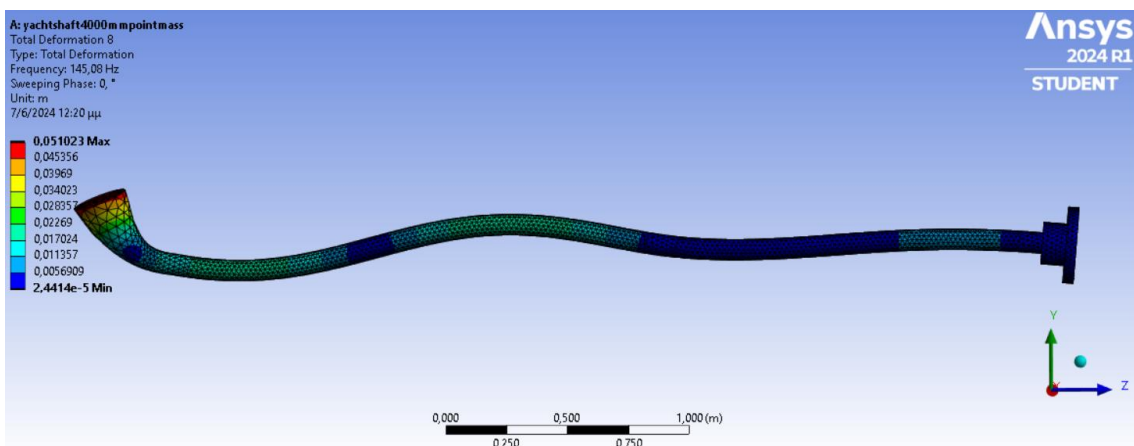
Εικόνα 4.6.4: 4^η Ιδιομορφή στο Matlab.



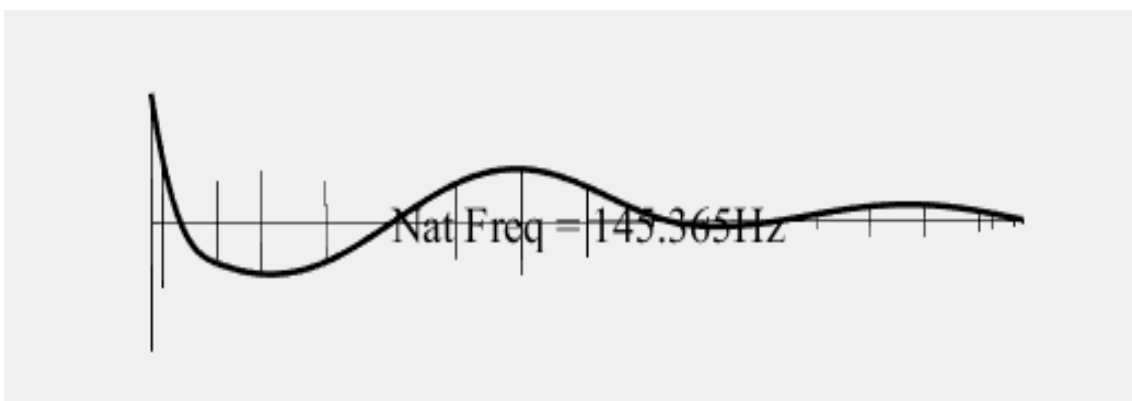
Εικόνα 4.6.5 : 5^η Ιδιομορφή στο Ansys.



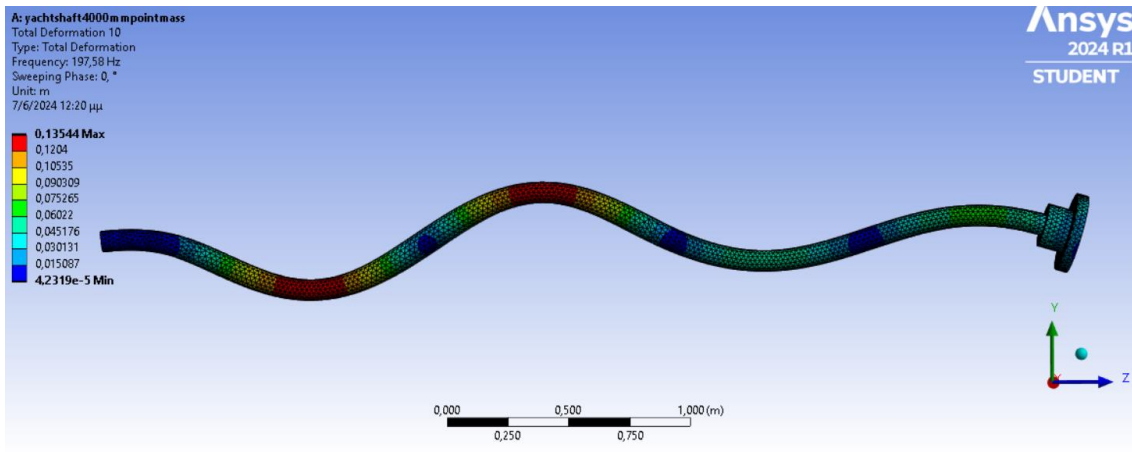
Εικόνα 4.6.6 : 5^η Ιδιομορφή στο Matlab.



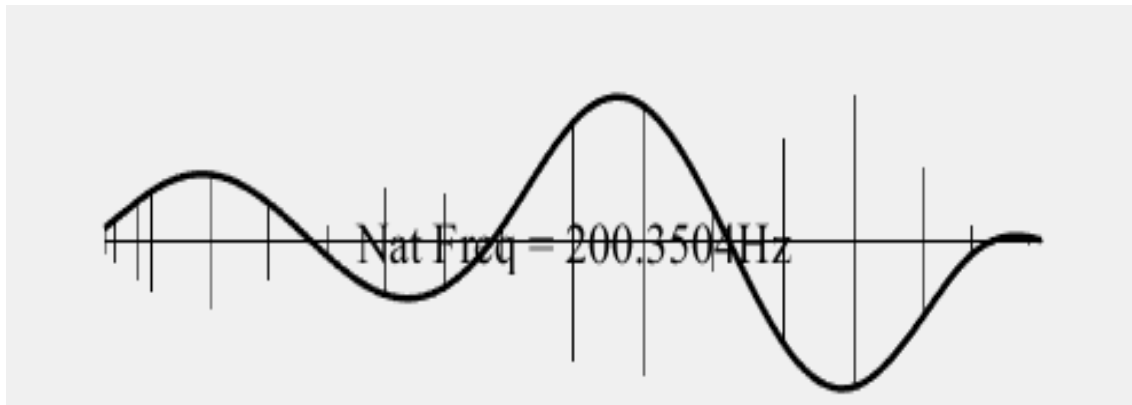
Εικόνα 4.6.7 : 6^η Ιδιομορφή στο Ansys.



Εικόνα 4.6.8 : 6^η Ιδιομορφή στο Matlab.



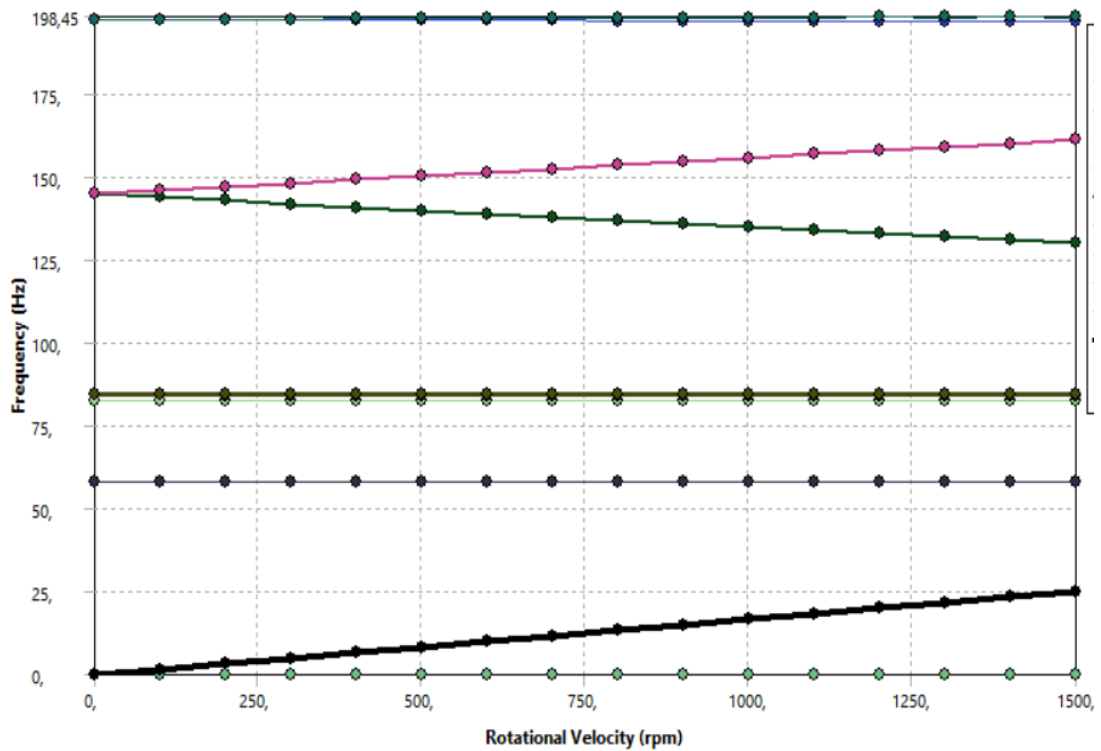
Εικόνα 4.6.9 : 8^η Ιδιομορφή στο Ansys.



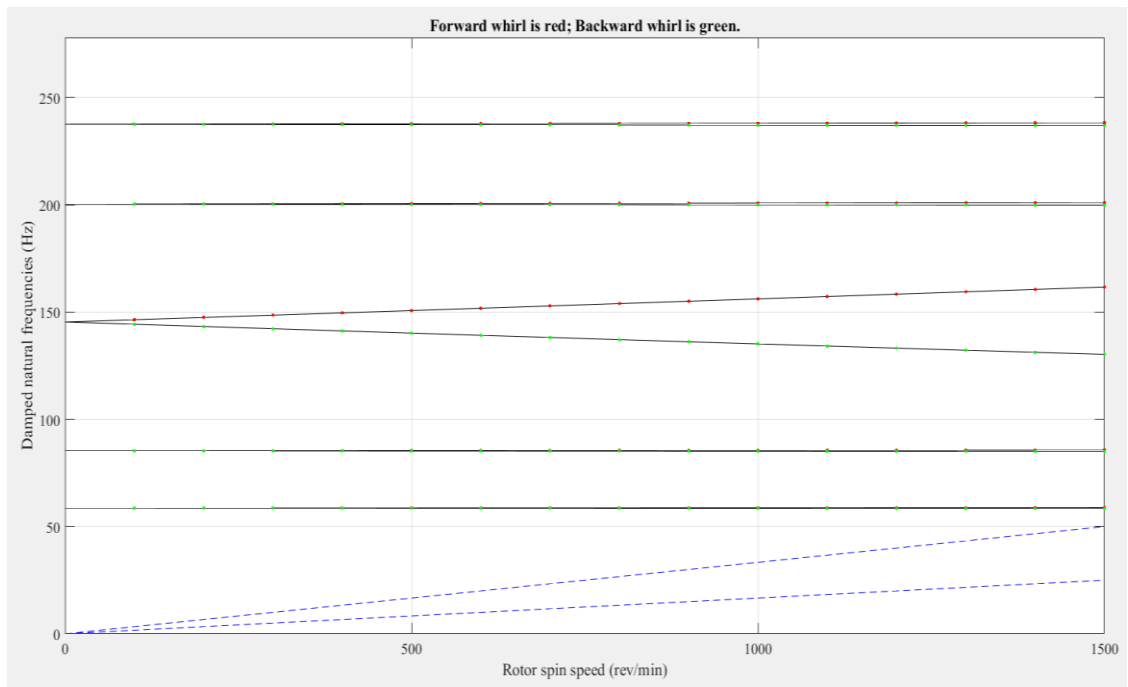
Εικόνα 4.6.10 : 8^η Ιδιομορφή στο Matlab.

Από τα αριθμητικά αποτελέσματα των ιδιομορφών φαίνεται ότι υπάρχει κάποιο μικρό σφάλμα στις ιδιοσυχνότητες, όμως στην ποιοτική αναπαράσταση των ιδιομορφών, είναι παρόμοια και στα δύο μοντέλα. Επιπλέον, ο αριθμός των κόμβων που είναι ακίνητοι η σχεδόν ακίνητοι είναι ο ίδιος, καθώς και οι θέσεις τους πάνω στον άξονα. Άρα, βγαίνει το συμπέρασμα, ότι τα αποτελέσματα μέσω τις σύγκρισης των δύο αναλύσεων, είναι αρκετά αξιόπιστα.

Συνοψίζοντας για να ολοκληρωθεί αυτό το κομμάτι θα γίνει παρουσίαση και θα σύγκριση των διαγραμμάτων περιστροφικών ταχυτήτων (Cambell) του συστήματος πρόωσης στο εύρος 0-1500 rpm όπου φαίνονται οι μεταβολές των συχνοτήτων σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής. Στις δύο παρακάτω εικόνες 4.6.11 και 4.6.12 παρουσιάζονται τα δύο διαγράμματα από τα δύο λογισμικά:



Εικόνα 4.6.11: Διάγραμμα Campbell στο Ansys στο εύρος 0-1500 rpm.



Εικόνα 4.6.12: Διάγραμμα Campbell στο Matlab στο εύρος 0-1500 rpm.

Όπως παρατηρείται στα δύο παραπάνω διαγράμματα περιστροφικών ταχυτήτων η σύγκριση είναι όμοια με πολύ μικρές αποκλίσεις. Ακόμη θα διαπιστωθεί ότι η γραμμή των κρίσιμων ταχυτήτων, η οποία συμβολίζεται με μαύρο χρώμα στο πρόγραμμα Ansys και με μπλέ διακεκομμένη γραμμή στο Matlab, δεν τέμνει καμία από τις γραμμές των συχνοτήτων οπότε δεν εμφανίζεται καμία κρίσιμη ταχύτητα, όπως στη πρώτη περίπτωση με το ρότορα Jeffcott. Τέλος, η απόκλιση της 5 και 6 ιδιομορφής των 16 Hz περίπου, όπως συζητήθηκε παραπάνω, ξεκινούν από το ίδιο σημείο 145 Hz και ανοίγουν στο εύρος των 130 Hz και 161 Hz αντίστοιχα.

4.7 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ (FREQUENCY RESPONSE ANALYSIS)

Στο τελευταίο στάδιο της ανάλυσης θα υπολογισθεί η έκκεντρη ώση και η ροπή που παράγεται με τη βοήθεια των τύπων 4.7.1, 4.7.2 και 4.7.3 από το βιβλίο Marine propellers and propulsion του John Charlton κατά την μέγιστη λειτουργία της έλικας δηλαδή στις 1500 rpm και ταχύτητα υπηρεσίας 24 (12,35 m/s) κόμβους. Οι συντελεστές ώσης (K_T) και ροπής (K_Q) θα υπολογιστούν με βάση το διάγραμμα 5.7.1 των Barnitsas M.M. , Ray D., Kinley P. για τον συγκεκριμένο τύπο έλικας (Wageningen B series).

$$(4.7.1) \quad K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \rightarrow T = K_T \rho n^2 D^4$$

$$(4.7.2) \quad K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \rightarrow Q = K_Q \rho n^2 D^5$$

$$(4.7.3) \quad J = \frac{V_A}{Dn}$$

Όπου :

T = Έκκεντρη ώση

Q = Ροπή

ρ = Πυκνότητα θαλασσινού νερού (Θεωρούμε $\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$)

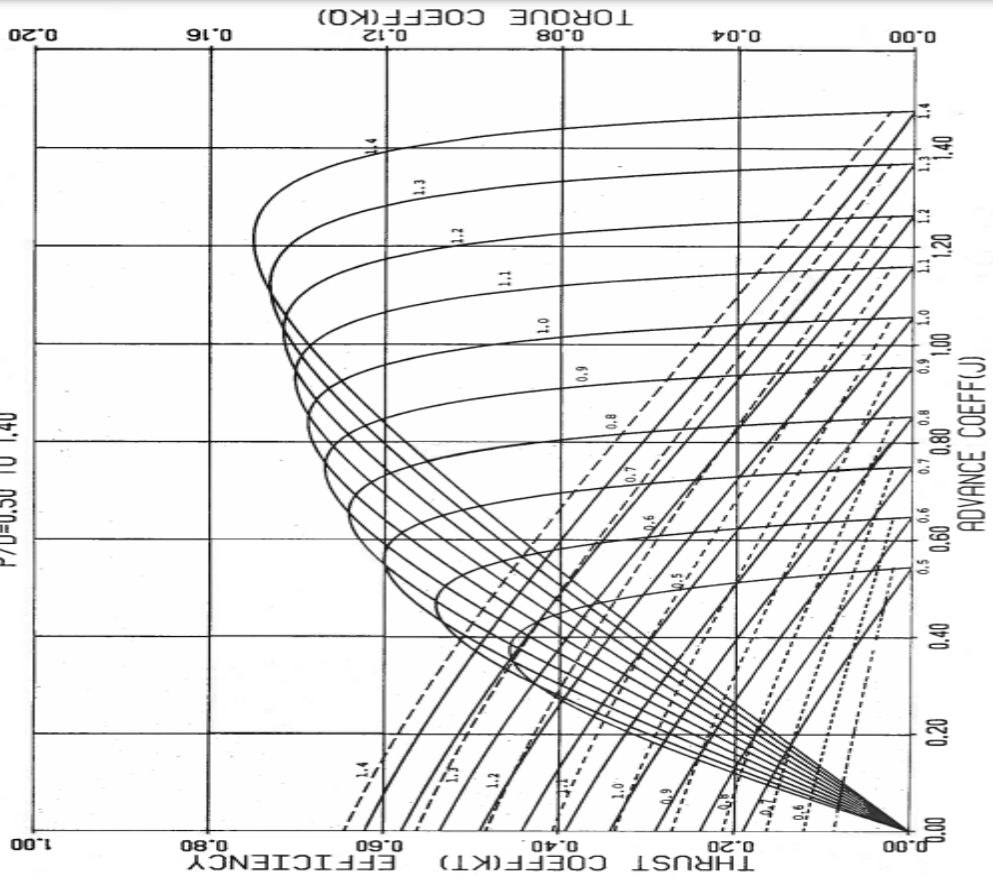
n = Αριθμός στροφών ($n = 1500$ rpm)

D = Διάμετρος έλικας (1m)

V_A = Ταχύτητα με την οποία εισέρχεται το νερό στην προπέλα (Θεωρούμε $V_A = 12,35$ m/s)

J = Λόγος πρόωσης

FIGURE 24. WAGENINGEN B-SERIES PROPELLERS FOR 3 BLADES $RE/RO=0.650$ $P/D=0.50$ TO 1.40



Διάγραμμα 4.7.1 : Διάγραμμα καμπυλών συντελεστών ώσης (K_T) και ροπής (K_Q).

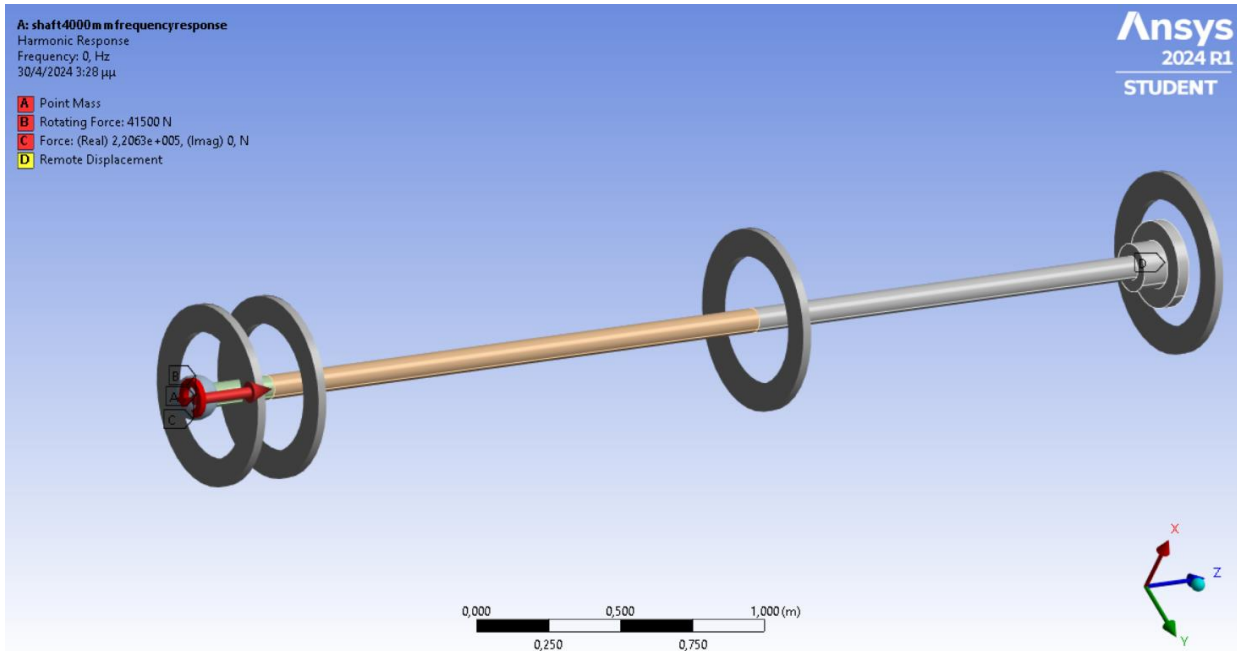
Από τον τύπο 5.7.3 θα υπολογισθεί ο λόγος πρόωσης :

$$J = \frac{V_A}{Dn} = \frac{12,35 \text{ m/s}}{1 \text{ m } 25 \text{ rev/s}} \rightarrow J = 0,494$$

Άρα, για $J = 0,494$ και $\frac{P}{D}=1,2$ προκύπτει $K_T=353$ και $K_Q=0,066$

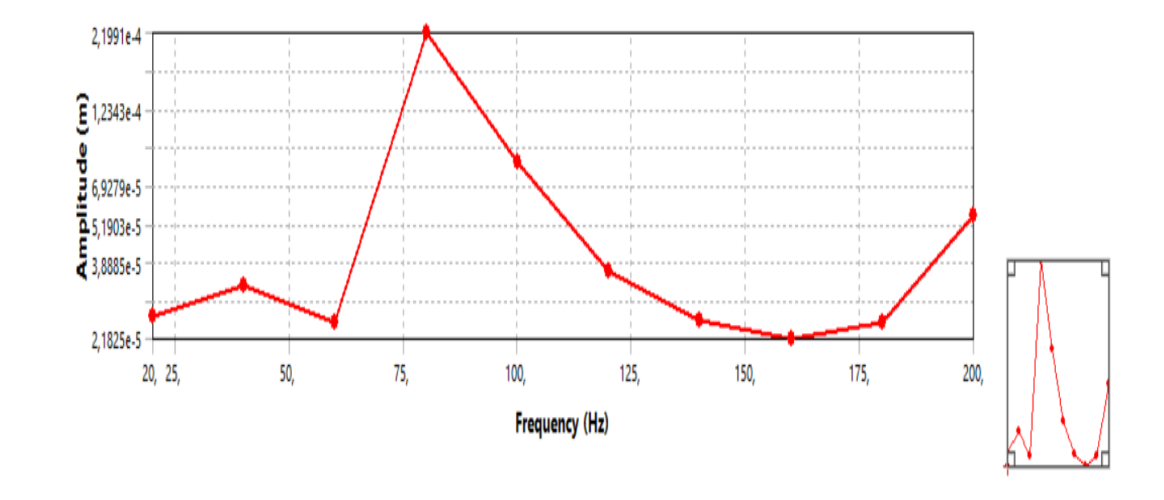
και με βάση τους τύπους 4.7.1 και 4.7.2 προκύπτει $T= 220625 \text{ N}$ και $Q= 41500 \text{ N}$.

Αφού έγινε ο υπολογισμός των δυνάμεων, που ασκούνται στο άξονα από την έλικα και έχοντας έτοιμο το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του συστήματος πρόωσης από την προηγούμενη ανάλυση, γνωρίζοντας επίσης από την ιδιομορφική ανάλυση ότι το εύρος των Hz από τις ιδιοσυχνότητες είναι 0-200 Hz θα γίνει εισαγωγή στο Ansys και η τοποθέτηση των δυνάμεων, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.7.1, όπου με κόκκινα βελάκια φαίνεται η έκκεντρη ώση και η ροπή που παράγεται κατά την διάρκεια μέγιστης λειτουργίας.

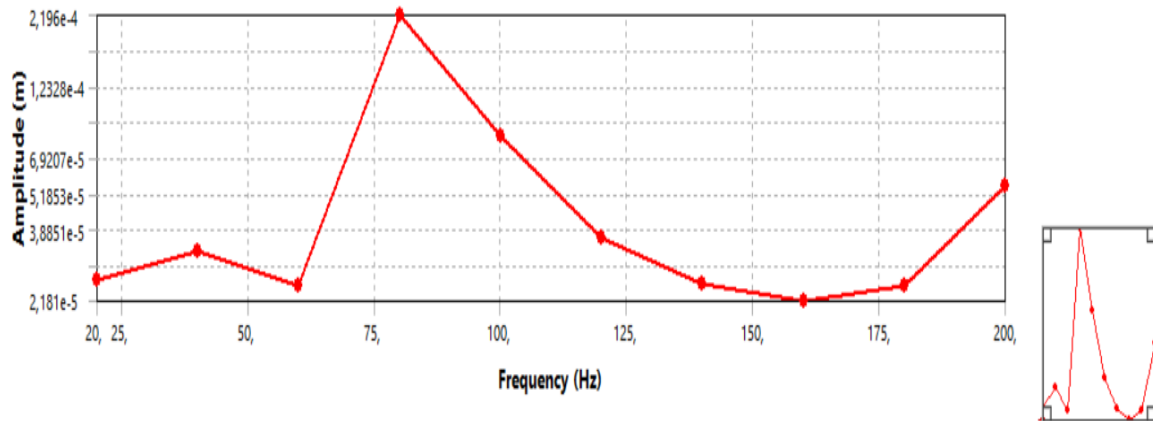


Εικόνα 4.7.1 : Θέσεις δυνάμεων ώσης και ροπής.

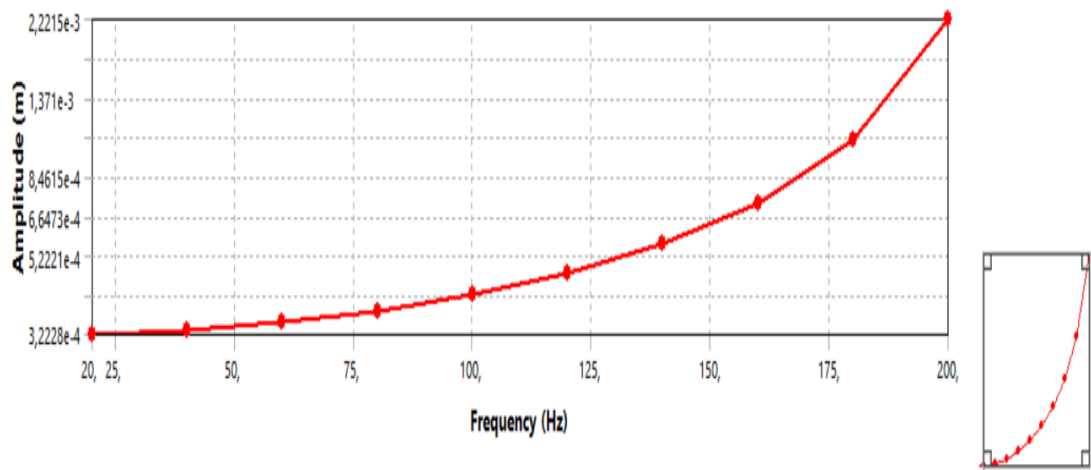
Εφόσον, συμπληρώθηκαν τα δεδομένα των δυνάμεων και το εύρος των Hz που χρειάζεται να μελετηθούν θα γίνει στη συνέχεια η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου και του κατάλληλου επιλυτή για την ανάλυση. Η μέθοδος που επιλέχθηκε από τις προτεινόμενες του Ansys είναι η Full method λόγω της ύπαρξης ρουλεμάν άρα και ασύμμετρων πινάκων, καθώς επίσης, υποστηρίζει και όλους τους τύπους φορτίων. Για τον ίδιο ακριβώς λόγο, ο επιλυτής που επιλέχθηκε από το πακέτο επιλυτών που προσφέρει το Ansys είναι ο Sparse solver ένας άμεσος επιλυτής που είναι αρκετά αποτελεσματικός σε τέτοιου τύπου αναλύσεις. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα 4.7.2, 4.7.3 και 4.7.4 του πλάτους της ταλάντωσης για τον κάθε άξονα (x,y,z) στο εύρος 0-200 Hz.



Εικόνα 4.7.2 : Πλάτος ταλάντωσης στον άξονα y.



Εικόνα 4.7.3 : Πλάτος ταλάντωσης στον άξονα x.



Εικόνα 4.7.4 : Πλάτος ταλάντωσης στον άξονα z.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ανακεφαλαιώνοντας, ο σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας ήταν η σχεδίαση του παραμετρικού μοντέλου και η δυναμική ανάλυση του αξονικού συστήματος της μηχανότρατας με την χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων.

Αρχικά, επιτεύχθηκε η παραμετρική σχεδίαση και η δυναμική ανάλυση ενός απλού μοντέλου ,του ρότορα Jeffcott , ώστε να γίνει πιο εύκολα κατανοητή η ανάλυση της μεθόδου, αλλά και να επαληθευθεί η σωστή και έγκυρη λειτουργία των δύο λογισμικών, μεταξύ του Ansys Workbench και του Matlab με τα οποία πραγματοποιήθηκε η συγκεκριμένη ανάλυση ,όπως και η ανάλυση του αξονικού συστήματος πρόωσης του σκάφους. Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων του απλού μοντέλου που προέκυψαν δηλαδή, από την εξαγωγή των ιδιοσυχνοτήτων ,των ιδιομορφών ,των διαγραμμάτων Cambell και των κρίσιμων ταχυτήτων η διαφορά μεταξύ των δύο προγραμμάτων ήταν σχεδόν κάτω από το 10% στις τιμές των ιδιοσυχνοτήτων δείχνοντας την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Ακόμη, τα διαγράμματα Cambell και οι ιδιομορφές είναι παρόμοιες με ελάχιστες αποκλίσεις. Επίσης, παρατηρείται ότι λόγω του γυροσκοπικού φαινομένου και της φυγοκεντρικής δυσκαμψίας υπάρχει μεταβολή στις τιμές των ιδιοσυχνοτήτων, καθώς αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής.

Ακριβώς η ίδια μεθοδολογία ακολουθήθηκε και για το αξονικό σύστημα πρόωσης όπου αρχικά σχεδιάστηκαν παραμετρικά και τμηματικά τα εξαρτήματα του αξονικού συστήματος η έλικα , ο άξονας και η φλάντζα και ύστερα συναρμολογήθηκαν. Αφού ολοκληρώθηκε η σχεδίαση, το παραμετρικό μοντέλο εισήχθη στο πρόγραμμα Ansys Workbench όπου χωρίστηκε σε τρεις όγκους, ώστε να μπορέσει να γίνει η τοποθέτηση των εδράνων, του πρυμναίου σωλήνα και του εδράνου γραμμής. Στο επόμενο βήμα, έγινε η διακριτοποίηση της γεωμετρίας και επιβολή των οριακών συνθηκών, αλλά και της ταχύτητας περιστροφής. Μετά το πέρας της ιδιομορφικής ανάλυσης του αξονικού συστήματος έγινε η εξαγωγή του διαγράμματος Cambell, των ιδιοσυχνοτήτων, των ιδιομορφών και των κρίσιμων ταχυτήτων που σε αυτή την περίπτωση η κατασκευή μας δεν παρουσιάζει καμία. Όπως και στην προηγούμενη, ανάλυση τα ποσοστά σφάλματος των ιδιοσυχνοτήτων μεταξύ των δύο λογισμικών είναι πολύ χαμηλά κάτω από 10% κάτι που αποδεικνύει την εγκυρότητα και την αξιοπιστία στα αποτελέσματα . Τέλος, και σε αυτή την περίπτωση τα διαγράμματα Cambell και οι ιδιομορφές είναι πάρα πολύ κοντά.

Η τελευταία ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο αξονικό σύστημα πρόωσης ήταν η απόκριση της συχνότητας . Σε πρώτη φάση υπολογίστηκαν οι συντελεστές ώσης και ροπής από το διάγραμμα λειτουργίας της έλικας και έπειτα υπολογίστηκαν οι δυνάμεις ροπής και ώσης για των μέγιστο αριθμό στροφών. Με αυτό τον τρόπο βρέθηκαν οι μετατοπίσεις του αξονικού συστήματος πρόωσης και στους τρεις άξονες περιστροφής. Αυτή η ανάλυση είναι σημαντική στο σχεδιασμό του αξονικού συστήματος και κυρίως για την επιλογή των εδράνων γνωρίζοντας τις μετατοπίσεις της κατασκευής .

Τέλος, από την ροτοδυναμική ανάλυση προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα: πρώτον, ότι οι μικρές αυτές αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων στα δύο προγράμματα μπορεί να οφείλονται σε απλοποιήσεις που έγιναν στη γεωμετρία του μοντέλου κατά την σχεδίαση, την ανάλυση, αλλά και στην λάθος επιλογή μεγέθους στοιχείων και μεθόδου. Δεύτερον, είναι

σημαντικό για μια περιστρεφόμενη κατασκευή να γνωρίζει κανείς αν παρουσιάζει κρίσιμες ταχύτητες κατά την λειτουργία της και τις μέγιστες μετατοπίσεις για την ασφαλή και μη καταστροφική λειτουργία της. Τρίτον, οι επιδράσεις του γυροσκοπικού φαινομένου και της φυγοκεντρικής δυσκαμψίας πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, διότι και στα δύο φαινόμενα παίζει σημαντικό ρόλο η γεωμετρία, άρα κατά τον σχεδιασμό μιας περιστρεφόμενης κατασκευής πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη σημασία. Έτσι, με την βοήθεια αυτής της απλής ανάλυσης γίνεται κατανοητή η πολυπλοκότητα των περιστρεφόμενων συστημάτων ή κατασκευών κατά τα αρχικά στάδια της σχεδίασης και η ανάγκη σε μεγάλη υπολογιστική ισχύ που χρειάζονται αυτές οι αναλύσεις.

5.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Στη παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται η ανάπτυξη του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων του αξονικού συστήματος πρόωσης της μηχανότρατας και εξάγονται τα αποτελέσματα από την δυναμική του συμπεριφορά το οποίο δίνει ένα πάτημα για την διερεύνηση περαιτέρω παραγόντων που επιβάλλονται στο σύστημα, όπως:

α) Μη τέλεια καύση σε έναν η και παραπάνω κυλίνδρους.

Σε πραγματική κατάσταση λειτουργίας μπορεί να συμβεί το φαινόμενο της ατελής καύσης σε ένα ή και περισσότερους κυλίνδρους του κινητήρα του σκάφους με αποτέλεσμα να δημιουργήσει ταλαντωτικά φορτία στο άξονα όπου με τη σειρά τους θα επηρεάσουν τα σημεία έδρασης του δηλαδή τα έδρανα-ρουλεμάν στήριξης.

β) Καταπονήσεις του άξονα από μετατοπίσεις στη γάστρα του πλοίου λόγω έντονων κυματισμών.

Αυτές οι μετατοπίσεις είναι αποτέλεσμα των δυνάμεων που ασκούνται από τα κύματα πάνω στο σκάφος και μπορεί να επηρεάσουν την σταθερότητα και την ασφάλεια του πλοίου. Κατά την πλεύση σε κυματισμούς, η γάστρα μπορεί να βιώσει διάφορα είδη κίνησης, όπως ανύψωση, καταβύθιση, κύρτωση, και πλεύση. Οι μετατοπίσεις αυτές είναι σημαντικές για τα έδρανα καθώς παραλαμβάνουν τις κατακόρυφες αυτές μετατοπίσεις από την γάστρα κάθε χρονική στιγμή.

γ) Υδροδυναμική λίπανση των εδράνων.

Αποτελεί και αυτό το φαινόμενο θέμα για μελλοντική έρευνα, καθώς στις περιοχές που ρέει το λιπαντικό ασκούνται τριβές και πιέσεις.

δ) Χρήση ανθρακονημάτων στους άξονες.

Η χρήση νέων υλικών και τεχνολογιών, όπως είναι το ανθρακόνημα, είναι ένα ερευνητικό αντικείμενο τα τελευταία χρόνια στις κατασκευές γενικά. Η κατασκευή υβριδικών αξόνων από μέταλλο-ανθρακόνημα στα πλοία είναι κάτι σημαντικό, καθώς θα προσφέρει υψηλή αντοχή, μείωση του βάρους και εξοικονόμηση καυσίμου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) C Coulson Pounder and Woodyard, D.F. (2004). *Pounder's marine diesel engines and gas turbines*. 8th ed. Oxford: Elsevier, pp.760–761.
- 2) Anish Wankhede (2019). *Propeller, Types of Propellers and Construction of Propellers*. [online] Marine Insight. Available at: <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/propeller-types-of-propellers-and-construction-of-propellers/>.
- 3) Carlton, J. (2018). *Marine Propellers and Propulsion*. 2th ed. Butterworth-Heinemann.
- 4) Ajay Menon (2020). *Marine Propeller Shaft - Design And Construction*. [online] Marine Insight. Available at: <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/marine-propeller-shaft-design-and-construction/>.
- 5) Lignum Vitae | Wood Bearings. (n.d.). Stern Tube Bearings. [online] Available at: <https://lignumvitaesolutions.com/products/marine/stern-tube-bearings/>.
- 6) Wodtke, M. and Litwin, W. (2021). Water-lubricated stern tube bearing - experimental and theoretical investigations of thermal effects. *Tribology International*, 153, p.106608. doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106608>.
- 7) F Xavier Borrás, Roy, Ramesh, V., de, B. and Schipper, D.J. (2021). Stern tube seals operation: A practical approach. *Advances in mechanical engineering/Advances in Mechanical Engineering*, 13(2), p.168781402199440168781402199440. doi: <https://doi.org/10.1177/1687814021994404>.
- 8) Rao, S.S. (2018). *The finite element method in engineering*. 6th ed. Oxford: Elsevier.
- 9) Tiwari, R. (2017). *Rotor Systems*. CRC Press.
- 10) Siemens PLM Software (2020). *Siemens DISW*. [online] community.sw.siemens.com. Available at: <https://community.sw.siemens.com/s/article/torsional-vibration-what-is-it>.
- 11) Surovec, R., Bocko, J. and Šarloši, J. (2014). Lateral Rotor Vibration Analysis Model. *American Journal of Mechanical Engineering*, 2(7), pp.282–285. doi:<https://doi.org/10.12691/ajme-2-7-23>.

12) MSC NASTRAN ROTORDYNAMICS USER GUIDE (2017). *MSC Community*. [online] simcompanion.hexagon.com.

Available at: <https://simcompanion.hexagon.com/customers/s/article/msc-nastran-2018-rotordynamics-user-s-guide-doc11550>.

13) Se Young Yoon, Lin, Z. and Allaire, P.E. (2012). *Control of Surge in Centrifugal Compressors by Active Magnetic Bearings*. Springer.

14) Hameed, H.T. (2012). Gas Turbine Engineering Handbook Fourth Edition. *www.academia.edu*, [online] 5. Available at: https://www.academia.edu/40674351/Gas_Turbine_Engineering_Handbook_Fourth_Edition.

15) ANSYS INC (2024). *ANSYS HELP DOCUMENTATION 2024*.