



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ανάλυση Δυναμικής Συμπεριφοράς Αξονικού Συστήματος
Πλοίου Μεταφοράς Εμπορευματοκιβωτίων**

Βασιλάκης Ιωάννης

Εξεταστική επιτροπή:

Επιβλέπων:

Χ. Ι. Παπαδόπουλος,
Λ. Καϊκτής,
Γ. Παπαλάμπρου,

Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2019

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανάλυση Δυναμικής Συμπεριφοράς Αξονικού Συστήματος Πλοίου Μεταφοράς Εμπορευματοκιβωτίων

Βασιλάκης Ιωάννης

Επιβλέπων : Χ. Ι. Παπαδόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 14^η Μαρτίου 2019.

(Υπογραφή)

.....
Χρήστος Παπαδόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Λάμπρος Καϊκτσίης
Αναπληρωτής καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Γεώργιος- Παπαλάμπρου
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2019

(Υπογραφή)

.....

Βασιλάκης Ιωάννης

Διπλωματούχος Ναυπηγός Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Copyright © Βασιλάκης Ιωάννης, 2019 – All rights reserved

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξολοκλήρου ή μέρους αυτής, για εμπορικό ή κερδοσκοπικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για εμπορικό- κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται αποκλειστικά στους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή την εργασία εκφράζουν τους συγγραφείς και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου συμπεριλαμβανόμενων Σχολών, Τομέων και Μονάδων αυτού.

Περίληψη

Η εγκατάσταση πρόωσης ενός πλοίου αποτελεί σύστημα ζωτικής σημασίας για την ασφαλή και αποδοτική εκτέλεση των υποχρεώσεων του πλοίου στο θαλάσσιο περιβάλλον. Κύριο τμήμα της εγκατάστασης πρόωσης αποτελεί το αξονικό σύστημα, η σωστή ευθυγράμμιση του οποίου συντελεί αφενός στην ασφαλή και αποδοτική λειτουργία του πλοίου, και αφετέρου στην αποφυγή βλαβών που μπορεί να οδηγήσουν σε απώλεια πρόωσης και ακυβερνησία του πλοίου. Η συνήθης διαδικασία εκπόνησης του πλάνου ευθυγράμμισης του άξονα πρόωσης, περιλαμβάνει τη χρήση μοντέλου στατικής ισορροπίας του άξονα, η επίλυση του οποίου λαμβάνει υπόψη την ελαστικότητα της βάσης των εδράνων, τη δυναμική φόρτιση της έλικας, καθώς και την ψυχρή και θερμή κατάσταση της κύριας μηχανής πρόωσης. Παράλληλα, το έτος 2015, οι νηογνώμονες BV και ABS εξέδωσαν νέους κανονισμούς επί του θέματος, λαμβάνοντας υπόψη νέες παραμέτρους κατά τη σχεδίαση, όπως τις παραμορφώσεις της γάστρας, τα χαρακτηριστικά του λιπαντικού φιλμ των εδράνων και την ακαμψία της βάσης στήριξής τους. Επομένως, με επιπλέον δεδομένο ότι οι σύγχρονες σχεδιάσεις πλοίων χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερα μήκη αξονικού συστήματος και έλικες μεγαλύτερου μεγέθους και βάρους, η λεπτομερής εκπόνηση του πλάνου ευθυγράμμισης αποτελεί μείζον ζήτημα, το οποίο πρέπει να αντιμετωπιστεί στη φάση της μελέτης του πλοίου, ώστε να αποφευχθούν σημαντικά προβλήματα κατά τη λειτουργία.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιήθηκε μοντελοποίηση του συστήματος πρόωσης ενός τυπικού πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, με κύρια διάταξη πρόωσης αποτελούμενη από βραδύστροφο δίχρονο κινητήρα Diesel, ο οποίος κινεί έλικα σταθερού βήματος, απευθείας συνδεδεμένη στον άξονα χωρίς την παρεμβολή μειωτήρα στροφών. Αρχικά, σχεδιάστηκε ένα αναλυτικό παραμετρικό μοντέλο του συστήματος πρόωσης του πλοίου, και, εν συνεχεία, το αντίστοιχο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο περιλαμβάνει την έλικα, το αξονικό σύστημα (άξονες και έδρανα) και τον κινηματικό μηχανισμό της κύριας μηχανής πρόωσης (στροφαλοφόρος άξονας, διωστήρες, έμβολα, σφόνδυλος και αποσβεστήρας στρεπτικών ταλαντώσεων).

Το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, αρχικά, χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των αντιδράσεων των εδράνων της στατικής ισορροπίας του άξονα σε διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας. Σκοπός της παραπάνω ανάλυσης ήταν ο έλεγχος της αξιοπιστίας του διαμορφωμένου μοντέλου, με παράλληλη σύγκριση των αποτελεσμάτων του με τα αντίστοιχα μεγέθη που περιλαμβάνονται στις οδηγίες του νηογνώμονα, καθώς και με τα αποτελέσματα της μελέτης του συστήματος που παρουσιάστηκε στη Διπλωματική Εργασία του Σ. Σιαμαντά (Μάρτιος 2018). Ο βασικός στόχος για την ανάπτυξη του συγκεκριμένου μοντέλου ήταν η ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος υπό την επίδραση

των χρονικά μεταβαλλόμενων φορτίων που παραλαμβάνει ο άξονας του πλοίου κατά τη λειτουργία της κύριας μηχανής. Έχοντας προσεγγίσει με μεγάλη ακρίβεια τη στατική λύση του προβλήματος, διερευνήθηκαν τα φαινόμενα που χαρακτηρίζουν την πραγματική συμπεριφορά του συστήματος, μέσω επιβολής κατάλληλων φορτίσεων και οριακών συνθηκών. Συγκεκριμένα, τα φαινόμενα που ελήφθησαν υπόψη στο προτεινόμενο μοντέλο είναι η πίεση στα έμβολα της κύριας μηχανής λόγω της καύσης εντός του κυλίνδρου, τα υδροδυναμικά φορτία της έλικας, η πίεση του λιπαντικού στα έδρανα, καθώς και η λειτουργία των αποσβεστήρων ταλαντώσεων της κύριας μηχανής.

Τέλος, μελετήθηκε η δυναμική απόκριση του αξονικού συστήματος για λειτουργία της κύριας μηχανής σε σταθερές στροφές λειτουργίας και ισχύ κοντά στη Μέγιστη Συνεχή Ισχύ (MCR) της, με τα έδρανα ρυθμισμένα στην κατάσταση αναφοράς για θερμή λειτουργία μηχανής. Για καθένα από τα έδρανα του αξονικού συστήματος, υπολογίστηκε η χρονική ιστορία των αντιδράσεων στήριξης, και, με χρήση ειδικού λογισμικού υπολογισμών που σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, υπολογίστηκαν οι τριβολογικές παράμετροι λειτουργίας, όπως η εκκεντρότητα του εδράνου, η γωνία συμπεριφοράς, το ελάχιστο πάχος λιπαντικού, ο συντελεστής τριβής και η απώλεια ισχύος λόγω τριβών.

Abstract

The propulsion system is vital for safe operation and efficient performance of a vessel. The shafting system constitutes an important part of the propulsion system and needs to be addressed accordingly in the design stage, by means of detailed shaft alignment. Failing to design and implement an optimal shaft alignment plan may lead to unreliable and potentially unsafe operation of the ship, which could result in loss of propulsion and vessel immobilization. A static analysis of the propulsion shafting system, taking into consideration the bearing foundation stiffness, the dynamic loading of the propeller and both cold and hot conditions of the main engine, has been a common practice in the maritime sector. Nowadays, shafting systems with increased length and propeller diameter, thus weight, are common practice for newbuild cargo vessels. In 2015, two Classification Societies, namely BV and ABS, released rule notations concerning the shaft alignment procedure onboard large cargo ships, which take into account hull deformations, oil film characteristics and stiffness of the bearings' foundation.

In the present work, the shafting system of a typical 10,000 TEU containership is studied, driven by a two-stroke low-speed Diesel engine connected directly to a fixed pitch propeller. Firstly, an analytical parametric model of the ship's propulsion system was designed, and then the corresponding finite element model. Both models comprise of the propeller, the shafting system (propeller shaft, intermediate shafts and their bearings) and part of the main engine (crankshaft, connecting rod, pistons, flywheel and damper).

The FE model was initially used to calculate the bearing reactions in a static analysis of the propulsion system, for a series of representative loading conditions of the vessel. The results were compared with data provided by class guidelines as well as with results of the case study presented in the Diploma Thesis of S. Siamantas (March 2018), for reliability purposes of the designed model. Ultimately, the FE model is used to calculate bearing reactions in a dynamic analysis of the propulsion system under the influence of the time-varying loads exerted to the shafting system by the operation of the main engine.

Having obtained a fine solution for the static analysis of the problem, the phenomena describing the actual behavior of the system were investigated, imposing proper loads and boundary conditions. To further analyze, the phenomena taken into account in the proposed model for the dynamic analysis were; (a) pressure on the main engine pistons due to combustion within the cylinder, (b) hydrodynamic loads of the propeller, (c) lubricant pressure in the bearings, and (d) operation of the main engine vibration dampers.

Finally, the dynamic response of the shafting system was studied, for hot main engine condition with constant operating speeds. For each bearing of the shafting system, the time history of the supporting reactions was calculated. The calculated reactions are used as input data for the utilized software, designed and developed at the National Technical University of Athens, which calculates tribological performance parameters, such as bearing eccentricity, angle of behavior, minimum oil thickness, friction coefficient and friction loss.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους συνέβαλαν με οποιοδήποτε τρόπο στην επιτυχή εκπόνησή της, και ιδιαίτερα τον Επίκουρο Καθηγητή Χρήστο Παπαδόπουλο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, καθώς και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα θέμα εξαιρετικά ενδιαφέρον για εμένα.

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους συναδέλφους Ναυπηγούς Μηχανολόγους Μηχανικούς Σταύρο Σιαμαντά, Αναστάση Χαριτόπουλο και Γιώργο Ρωσσόπουλο, για το ενδιαφέρον και την καθοδήγηση που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την πολύτιμη υποστήριξη που μου προσέφερε όλα αυτά τα χρόνια.

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	5
Ευχαριστίες.....	9
Πίνακας Περιεχομένων.....	11
Ευρετήριο Σχημάτων.....	13
Ευρετήριο Πινάκων	15
1 Εισαγωγή.....	19
1.1 Βιβλιογραφική επισκόπηση	21
1.2 Περίγραμμα – Στόχος της μελέτης	23
2 Βασικά Μέρη Συστήματος Πρόωσης	25
2.1 Γενικές αρχές εγκαταστάσεων πρόωσης.....	25
2.2 Ναυτικός κινητήρας Diesel.....	26
2.2.1 Βάση.....	28
2.2.2 Σκελετός.....	28
2.2.3 Στροφαλοφόρος.....	28
2.2.4 Χιτόνια	30
2.2.5 Ελατήρια εμβόλων.....	30
2.2.6 Έμβολο.....	31
2.2.7 Πώμα Κυλίνδρου.....	32
2.2.8 Βαλβίδα εξαγωγής.....	32
2.2.9 Σταυρός (Ζύγωμα).....	33
2.2.10 Διωστήρας.....	33
2.2.11 Σφόνδυλος – Βολάν.....	34
2.3 Έλικα.....	36
2.4 Αξονικό σύστημα.....	38
2.4.1 Ελικοφόρος Άξονας.....	38
2.4.2 Ενδιάμεσος Άξονας	38

2.5	Έδρανα στήριξης αξονικού συστήματος	39
2.5.1	Ωστικό έδρανο.....	39
2.5.2	Έδρανα χοάνης.....	40
2.5.3	Έδρανα γραμμής.....	40
3	Ευθυγράμμιση αξονικού συστήματος.....	41
3.1	Εισαγωγή.....	41
3.2	Κανονισμοί	43
3.2.1	Επισκόπηση.....	43
3.2.2	Απευθυγράμμιση εδράνων	45
3.3	Διαδικασία πλάνου ευθυγράμμισης	47
3.3.1	Σχεδιασμός και ανάλυση	47
3.3.2	Εφαρμογή και μετρήσεις.....	49
4	Ακτινικά έδρανα ολίσθησης	53
4.1	Εισαγωγή.....	53
4.1.1	Συνθήκες λειτουργίας	54
4.1.2	Υλικά κατασκευής.....	54
4.2	Υδροδυναμική λίπανση.....	56
4.2.1	Θεωρία υδροδυναμικής λίπανσης.....	56
4.2.2	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ακτινικών εδράνων	57
4.3	Υπολογισμός ακτινικών εδράνων ολισθήσεως με χρήση διαγραμμάτων Raimondi και Boyd.....	59
4.3.1	Υπολογισμός αδιάστατης εκκεντρότητας, ϵ , και γωνίας συμπεριφοράς, ϕ	59
4.3.2	Υπολογισμός συντελεστή τριβής.....	61
4.3.3	Υπολογισμός μέγιστης πίεσης στο λιπαντικό	62
5	Ανάλυση και αποτελέσματα.....	63
5.1	Κύρια χαρακτηριστικά του υπό μελέτη πλοίου	63
5.2	Δημιουργία τρισδιάστατης γεωμετρίας συστήματος πρόωσης.....	65
5.2.1	Αναλυτικά και ποιοτικά σχέδια υπό μελέτη πλοίου	65
5.2.2	Αποτελέσματα σχεδίασης.....	67
5.2.3	Συναρμολόγηση και παραμετρική μοντελοποίηση	71
5.2.4	Έλεγχος μαζών και ροπών αδρανείας	72
5.3	Δημιουργία συστήματος πρόωσης με πεπερασμένα στοιχεία	74

5.3.1	<i>Δημιουργία πλέγματος</i>	74
5.3.2	<i>Οριακές Συνθήκες</i>	76
5.4	<i>Ανάλυση στατικής ισορροπίας του άξονα σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας</i> ...	79
5.4.1	<i>Γενικά στοιχεία αξονικού συστήματος συστήματος</i>	79
5.4.2	<i>Αρχικό πλάνο στατικής ευθυγράμμισης αξονικού συστήματος - Κατάσταση αναφοράς</i>	81
5.4.3	<i>Υπολογισμοί και αποτελέσματα ευθυγράμμισης αξονικού συστήματος</i>	82
5.5	<i>Ανάλυση δυναμικής λειτουργίας συστήματος πρόωσης</i>	106
5.5.1	<i>Γενικά στοιχεία συστήματος πρόωσης</i>	106
5.5.2	<i>Παράμετροι δυναμικής λειτουργίας συστήματος πρόωσης</i>	107
5.5.3	<i>Μοντελοποίηση οριακών συνθηκών δυναμικών φαινομένων</i>	109
5.5.4	<i>Υπολογισμοί και αποτελέσματα δυναμικής λειτουργίας του συστήματος πρόωσης</i> 114	
6	Συμπεράσματα - Μελλοντική Εργασία	150
6.1	<i>Συμπεράσματα</i>	150
6.2	<i>Μελλοντική Έρευνα</i>	151
6.2.1	<i>Ατελής καύση σε έναν ή περισσότερους κυλίνδρους</i>	151
6.2.2	<i>Μετατοπίσεις γάστρας κατά την πλεύση του πλοίου σε κυματισμούς</i>	152
6.2.3	<i>Υδροδυναμικές φορτίσεις από την έλικα</i>	152
6.2.4	<i>Υδροδυναμική λίπανση των εδράνων</i>	152
6.2.5	<i>Μεταβατικές συνθήκες συστήματος πρόωσης</i>	152
6.2.6	<i>Βελτιστοποίηση του πλάνου ευθυγράμμισης του αξονικού συστήματος</i>	153
7	Βιβλιογραφία	155

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1. 1: Τυπικό αξονικό σύστημα πλοίου [1]	20
Σχήμα 2. 1: Τυπική μορφή αργόστροφου κινητήρα Diesel [9]	27
Σχήμα 2. 2: Στροφαλοφόρος άξονας μεγάλης δίχρονης πετρελαιομηχανής [9]	29
Σχήμα 2. 3: Έμβολο με σύστημα ψύξης λαδιού [11]	31
Σχήμα 2. 4: Ζύγωμα [11]	33
Σχήμα 2. 5: Σύστημα λίπανσης διωστήρα [9]	34
Σχήμα 2. 6: Έλικά μεταβλητού βήματος [10]	36
Σχήμα 2. 7: Έλικά σταθερού βήματος [10]	37
Σχήμα 2. 8: Τυπική μορφή ενδιάμεσου άξονα [9]	38
Σχήμα 2. 9: Ωστικό έδρανο [12]	39
Σχήμα 2. 10: Ωστική άτρακτος [12]	39
Σχήμα 2. 11: Διαδικασία λίπανσης εδράνου χοάνης [12]	40
Σχήμα 3. 1: Διάταξη πρυμναίου εδράνου, διπλού κεκλιμένου επιπέδου. [15]	46
Σχήμα 3. 2: Αλγόριθμος υπολογισμού αριθμού και θέσης εδράνων του αξονικού συστήματος.	47
Σχήμα 3. 3: Ευθυγράμμιση αξονικού συστήματος. Ορισμός γραμμής αναφοράς.	50
Σχήμα 3. 4: Εφαρμογή κλίσης στο πρυμναίο έδρανο χοάνης [15]	50
Σχήμα 3. 5: Διάφορες περιπτώσεις διάταξης κατά τη διαδικασία sag and gap. [15]	51
Σχήμα 3. 6: Μέτρηση αντιδράσεων με υδραυλικό γρύλο και ωρολογιακό μικρόμετρο. [15] ..	51
Σχήμα 3. 7: Αρχική απευθυγράμμιση της Κύριας Μηχανής. [15]	52
Σχήμα 4. 1: Ακτινικό έδρανο ολίσθησης [16]	53
Σχήμα 4. 2: Δημιουργία υδροδυναμικής πίεσης στην περίπτωση ενός απλού ολισθητή. Η άνω επιφάνεια κινείται οριζόντια με ταχύτητα U , ενώ η κάτω επιφάνεια είναι ακίνητη [19]	56
Σχήμα 4. 3: Εγκάρσια τομή του συστήματος εδράνου-άξονα για διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας.	58
Σχήμα 4. 4: Αδιάστατο ελάχιστο πάχος λιπαντικού h_0/c και αδιάστατη εκκεντρότητα ϵ συναρτήσει του αριθμού Sommerfeld S για διαφορετικές τιμές του λόγου μήκους προς διάμετρο L/D του εδράνου [20]	60
Σχήμα 4. 5: Γωνία συμπεριφοράς, ϕ , συναρτήσει του αριθμού Sommerfeld, S , για διαφορετικές τιμές του λόγου μήκους προς διάμετρο, L/D , του εδράνου [20]	60
Σχήμα 4. 6: Αδιάστατος συντελεστής τριβής $f/R/c$ συναρτήσει του αριθμού Sommerfeld S για διαφορετικές τιμές του λόγου μήκους προς διάμετρο L/D του εδράνου [20]	61

Σχήμα 4. 7: Λόγος μέσης προς μέγιστης πίεσης του εδράνου συναρτήσει του αριθμού Sommerfeld, S, για διαφορετικές τιμές του λόγου μήκους προς διάμετρο, L/D, του εδράνου [20]	62
Σχήμα 4. 8: Εγκάρσια τομή εδράνου όπου φαίνεται η θέση του ελάχιστου φιλμ λαδιού, η γωνία φ, η κατανομή της μέγιστης πίεσης, η εκκεντρότητα, η περιστροφική ταχύτητα και το κατακόρυφο φορτίο P. [20]	62
Σχήμα 5. 1: Κατασκευαστικό σχέδιο ελικοφόρου άξονα.....	66
Σχήμα 5. 2: Σχέδιο ενδιάμεσου άξονα no.3, no.2 και no.1	66
Σχήμα 5. 3: Σχέδιο στροφαλοφόρου άξονα.....	66
Σχήμα 5. 4: Σχέδια διωστήρα, ζυγώματος και πιστονιού	66
Σχήμα 5. 5: Σχέδιο σφονδύλου και αποσβεστήρα στρεπτικών ταλαντώσεων	67
Σχήμα 5. 6: Ελικοφόρος άξονας και ενδιάμεσοι άξονες no.1, no.2 και no.3	67
Σχήμα 5. 7: Πρυμναίο, πρωραίο και ενδιάμεσο τμήμα στροφαλοφόρου άξονα.....	68
Σχήμα 5. 8: Βασικό στέλεχος διωστήρα, κάλυμμα κεφαλής και κάλυμμα ποδιού	68
Σχήμα 5. 9: Ζύγωμα και Πιστόνι.....	69
Σχήμα 5. 10: Σφόνδυλος και αποσβεστήρας στρεπτικών ταλαντώσεων.....	69
Σχήμα 5. 11: Έλικά.....	70
Σχήμα 5. 12: Πλάκα και δαχτυλίδι εδράνου.....	70
Σχήμα 5. 13: Παραχθέν γεωμετρία συστήματος πρόωσης.....	71
Σχήμα 5. 14: Τοπικό και γενικό σύστημα συντεταγμένων.....	76
Σχήμα 5. 15: Μοντελοποίηση εδράνου	77
Σχήμα 5. 16: Τμήματα ελικοφόρου άξονα	78
Σχήμα 5. 17: Τετρακύλινδρο σύστημα.....	80
Σχήμα 5. 18: Ελαστική γραμμή αξόνων με κύρια μηχανή εκτός λειτουργίας και 50% βυθισμένη έλικά	84
Σχήμα 5. 19: Μοντέλο δυναμικής ανάλυσης.....	106
Σχήμα 5. 20: Καμπύλη έλिकास	107
Σχήμα 5. 21: Δυναμοδεικτικό διάγραμμα του κινήτηρα	109
Σχήμα 5. 22: Ποσοστά της κρίσιμης απόσβεσης για το εκάστοτε τμήμα του συστήματος πρόωσης.....	111
Σχήμα 5. 23: Εκτίμηση απώλειας ενέργειας από κάθε έδρανο (Loading Condition “MAX”)	116
Σχήμα 5. 24: Κατακόρυφες αντιδράσεις ASB.....	117
Σχήμα 5. 25: Οριζόντιες αντιδράσεις ASB	118
Σχήμα 5. 26: Τροχιά άξονα στο ASB	118
Σχήμα 5. 27: ASB, Τριβολογικές παράμετροι λειτουργίας (Loading Condition “MAX”)	119
Σχήμα 5. 28: Κατακόρυφες αντιδράσεις FSB	120

Σχήμα 5. 29: Οριζόντιες αντιδράσεις FSB	121
Σχήμα 5. 30: Τροχιά άξονα στο FSB.....	121
Σχήμα 5. 31: FSB, Τριβολογικές παράμετροι λειτουργίας (Loading Condition “MAX”).....	122
Σχήμα 5. 32: Κατακόρυφες αντιδράσεις ISB 3	123
Σχήμα 5. 33: Οριζόντιες αντιδράσεις ISB 3	124
Σχήμα 5. 34: Τροχιά άξονα στο ISB 3	124
Σχήμα 5. 35: ISB 3, Τριβολογικές παράμετροι λειτουργίας (Loading Condition “MAX”)...	125
Σχήμα 5. 36: Κατακόρυφες αντιδράσεις ISB 2	126
Σχήμα 5. 37: Οριζόντιες αντιδράσεις ISB 2	127
Σχήμα 5. 38: Τροχιά άξονα στο ISB 2	127
Σχήμα 5. 39: ISB 2, Τριβολογικές παράμετροι λειτουργίας (Loading Condition “MAX”)...	128
Σχήμα 5. 40: Κατακόρυφες αντιδράσεις ISB 1	129
Σχήμα 5. 41: Οριζόντιες αντιδράσεις ISB 1	130
Σχήμα 5. 42: Τροχιά άξονα στο ISB 1	130
Σχήμα 5. 43: ISB 1, Τριβολογικές παράμετροι λειτουργίας (Loading Condition “MAX”)...	131
Σχήμα 5. 44: Εκτίμηση απώλειας ενέργειας από κάθε έδρανο (Loading Condition “BLD”)	133
Σχήμα 5. 45: Κατακόρυφες αντιδράσεις ASB.....	134
Σχήμα 5. 46: Οριζόντιες αντιδράσεις ASB	135
Σχήμα 5. 47: Τροχιά άξονα στο ASB.....	135
Σχήμα 5. 48: ASB, Τριβολογικές παράμετροι λειτουργίας (Loading Condition “BLD”)	136
Σχήμα 5. 49: Κατακόρυφες αντιδράσεις FSB	137
Σχήμα 5. 50: Οριζόντιες αντιδράσεις FSB	138
Σχήμα 5. 51: Τροχιά άξονα στο FSB.....	138
Σχήμα 5. 52: FSB, Τριβολογικές παράμετροι λειτουργίας (Loading Condition “BLD”)	139
Σχήμα 5. 53: Κατακόρυφες αντιδράσεις ISB 3	140
Σχήμα 5. 54: Οριζόντιες αντιδράσεις ISB 3	141
Σχήμα 5. 55: Τροχιά άξονα στο ISB 3	141
Σχήμα 5. 56: ISB 3, Τριβολογικές παράμετροι λειτουργίας (Loading Condition “BLD”)....	142
Σχήμα 5. 57: Κατακόρυφες αντιδράσεις ISB 2	143
Σχήμα 5. 58: Οριζόντιες αντιδράσεις ISB 2	144
Σχήμα 5. 59: Τροχιά άξονα στο ISB 2	144
Σχήμα 5. 60: ISB 2, Τριβολογικές παράμετροι λειτουργίας (Loading Condition “BLD”)....	145
Σχήμα 5. 61: Κατακόρυφες αντιδράσεις ISB 1	146
Σχήμα 5. 62: Οριζόντιες αντιδράσεις ISB 1	147
Σχήμα 5. 63: Τροχιά άξονα στο ISB 1	147
Σχήμα 5. 64: ISB 1, Τριβολογικές παράμετροι λειτουργίας (Loading Condition “BLD”)....	148

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 5. 1: Κύρια χαρακτηριστικά του υπό μελέτη πλοίου	64
Πίνακας 5. 2: Ιδιότητες ανθρακοχάλυβα.....	72
Πίνακας 5. 3: Ιδιότητες φαιού χυτοσιδήρου.....	72
Πίνακας 5. 4: Σύγκριση Μαζών	73
Πίνακας 5. 5: Σύγκριση Ροπών Αδρανείας	73
Πίνακας 5. 6: Χαρακτηριστικά πλέγματος.....	75
Πίνακας 5. 7: Επιλογή πυκνότητας ελικοφόρου άξονα.....	77
Πίνακας 5. 8: Χαρακτηριστικά εδράνων σε κατάσταση αναφοράς	81
Πίνακας 5. 9: Αντιδράσεις εδράνων σε ψυχρή στατική κατάσταση (έλικα 50% βυθισμένη)..	83
Πίνακας 5. 10: Αντιδράσεις εδράνων σε ψυχρή στατική κατάσταση (έλικα 75% βυθισμένη)	85
Πίνακας 5. 11: Αντιδράσεις εδράνων σε ψυχρή στατική κατάσταση (έλικα 100% βυθισμένη)	86
Πίνακας 5. 12: Αντιδράσεις εδράνων σε θερμή στατική κατάσταση (έλικα 100% βυθισμένη)	87
Πίνακας 5. 13: Αντιδράσεις εδράνων σε θερμή δυναμική κατάσταση (έλικα 100% βυθισμένη) με υδροδυναμική ροπή -40% T	88
Πίνακας 5. 14: Αντιδράσεις εδράνων σε θερμή δυναμική κατάσταση (έλικα 100% βυθισμένη) με υδροδυναμική ροπή +5% T	89
Πίνακας 5. 15: Αντιδράσεις εδράνων (Ballast condition).....	90
Πίνακας 5. 16: Αντιδράσεις εδράνων (Design condition).....	91
Πίνακας 5. 17: Αντιδράσεις εδράνων (Full condition).....	92
Πίνακας 5. 18: Αντιδράσεις εδράνων (Dock2 condition)	93
Πίνακας 5. 19: Αντιδράσεις εδράνων (BLD condition)	94
Πίνακας 5. 20: Αντιδράσεις εδράνων (BLD-S11.1 condition).....	95
Πίνακας 5. 21: Αντιδράσεις εδράνων (BLD-PANAMA condition)	96
Πίνακας 5. 22: Αντιδράσεις εδράνων (BLM-PANAMA condition).....	97
Πίνακας 5. 23: Αντιδράσεις εδράνων (BLA-PANAMA condition)	98
Πίνακας 5. 24: Αντιδράσεις εδράνων (16TDD condition).....	99
Πίνακας 5. 25: Αντιδράσεις εδράνων (16TAD condition).....	100
Πίνακας 5. 26: Αντιδράσεις εδράνων (11TDS condition).....	101
Πίνακας 5. 27: Αντιδράσεις εδράνων (11TAS condition).....	102

Πίνακας 5. 28: Αντιδράσεις εδράνων (16TDS condition).....	103
Πίνακας 5. 29: Αντιδράσεις εδράνων (16TAS condition).....	104
Πίνακας 5. 30: Αντιδράσεις εδράνων (MAX condition).....	105
Πίνακας 5. 31: Ακαμψίας και απόσβεσης της υδροδυναμικής λίπανσης.....	113
Πίνακας 5. 32: Θέσεις των βάσεων των εδράνων ‘Loading Condition MAX’	115
Πίνακας 5. 33: Κατακόρυφα Φορτία εδράνου ASB.....	117
Πίνακας 5. 34: Οριζόντια Φορτία εδράνου ASB	117
Πίνακας 5. 35: Κατακόρυφα Φορτία εδράνου FSB	120
Πίνακας 5. 36: Οριζόντια Φορτία εδράνου FSB	120
Πίνακας 5. 37: Κατακόρυφα Φορτία εδράνου ISB 3	123
Πίνακας 5. 38: Οριζόντια Φορτία εδράνου ISB 3	123
Πίνακας 5. 39: Κατακόρυφα Φορτία εδράνου ISB 2	126
Πίνακας 5. 40: Οριζόντια Φορτία εδράνου ISB 2	126
Πίνακας 5. 41: Κατακόρυφα Φορτία εδράνου ISB 1	129
Πίνακας 5. 42: Οριζόντια Φορτία εδράνου ISB 1	129
Πίνακας 5. 43: Θέσεις των βάσεων των εδράνων ‘Loading Condition BLD.....	132
Πίνακας 5. 44: Κατακόρυφα Φορτία εδράνου ASB.....	134
Πίνακας 5. 45: Οριζόντια Φορτία εδράνου ASB	134
Πίνακας 5. 46: Κατακόρυφα Φορτία εδράνου FSB	137
Πίνακας 5. 47: Οριζόντια Φορτία εδράνου FSB	137
Πίνακας 5. 48: Κατακόρυφα Φορτία εδράνου ISB 3	140
Πίνακας 5. 49: Οριζόντια Φορτία εδράνου ISB 3	140
Πίνακας 5. 50: Κατακόρυφα Φορτία εδράνου ISB 2	143
Πίνακας 5. 51: Οριζόντια Φορτία εδράνου ISB 2	143
Πίνακας 5. 52: Κατακόρυφα Φορτία εδράνου ISB 1	146
Πίνακας 5. 53: Οριζόντια Φορτία εδράνου ISB 1	146

1

Εισαγωγή

Τα σύγχρονα εμπορικά πλοία αποτελούν μία από τις μεγαλύτερες και πιο σύνθετες κατασκευές της εποχής μας, ενώ ταυτόχρονα συμβάλλουν καθοριστικά στο παγκόσμιο εμπόριο, καθώς διακινούν το 80% του συνολικού όγκου των μεταφερόμενων αγαθών. Ένα πλοίο αποτελεί ειδική κατασκευή, η οποία θα πρέπει να είναι αυτοσυντηρούμενη στο περιβάλλον της, για μεγάλες χρονικές περιόδους, ενώ, παράλληλα απαιτεί ιδιαίτερα υψηλό βαθμό αξιοπιστίας. Τα πρώτα χρόνια κατασκευής των χαλύβδινων πλοίων, οι μέθοδοι που ακολουθήθηκαν βασίστηκαν σε σχετικά απλούς υπολογισμούς. Οι μελετητές κατέφυγαν στη χρήση απλών μοντέλων προκειμένου να υπολογίσουν τις καταπονήσεις των διαφόρων τμημάτων τους. Για τον λόγο αυτό, σε συνδυασμό με τη φύση μιας τέτοιας κατασκευής, η οποία υποβάλλεται διαρκώς σε μεταβαλλόμενες φορτίσεις λόγω του θαλάσσιου περιβάλλοντος και του μεταφερόμενου φορτίου, δημιουργήθηκε επιτακτικά η ανάγκη προσδιορισμού πολλών περισσότερων παραμέτρων που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την κατασκευή και την αξιόπιστη λειτουργία ενός πλοίου.

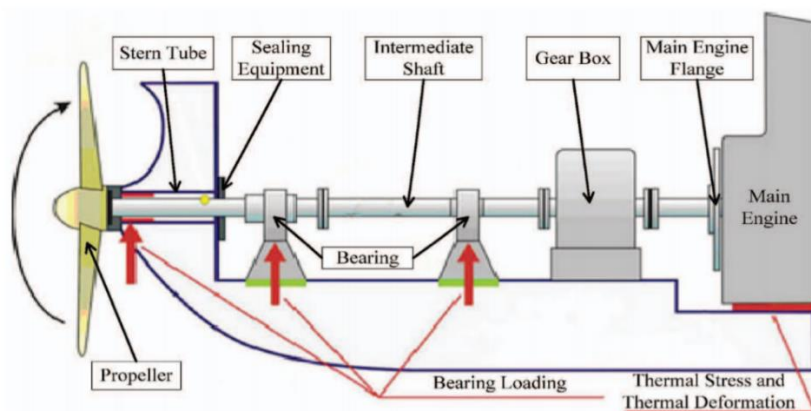
Προς αυτή τη κατεύθυνση, βρίσκονται δύο διαφορετικές επιστημονικές ειδικότητες, αυτή του αρχιτέκτονα ναυπηγού και αυτή του ναυπηγού μηχανικού. Ο Αρχιτέκτονας Ναυπηγός έχει ως βασικό πεδίο μελέτης την κατασκευή του κύτους, την μορφή του, τη διαμόρφωση των χώρων του και την ικανότητα αντοχής του στο φυσικό περιβάλλον, ενώ ο Ναυπηγός Μηχανικός είναι υπεύθυνος για τα διάφορα συστήματα πρόωσης και λειτουργίας του πλοίου. Συγκεκριμένα, ο Ναυπηγός Μηχανικός μελετά όλα τα συστήματα που απαιτούνται για την πρόωση, την πλοήγηση, την πρόσδεση, την ασφάλεια, το χειρισμό του

φορτίου και την παραγωγή ενέργειας του πλοίου, καθώς και ότι σχετίζεται με αυτά. Σαφώς, σε πολλά τμήματα της μελέτης αυτής, και με σκοπό την επίτευξη βέλτιστων αποτελεσμάτων, απαιτείται συνεργασία των δύο αυτών επιστημονικών πεδίων. Ένα από αυτά τα τμήματα αποτελεί και η επιλογή του συστήματος πρόωσης του πλοίου.

Η επιλογή του συστήματος πρόωσης για ένα πλοίο είναι μια πολύπλοκη διαδικασία και απαιτεί ιδιαίτερη γνώση και εμπειρία. Πριν την τελική επιλογή εξετάζονται πολλές εναλλακτικές λύσεις, μιας και οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόφαση αυτή είναι πολλοί. Το σύστημα πρόωσης του πλοίου έχει καθοριστικό ρόλο στη λειτουργία του στο θαλάσσιο περιβάλλον. Ένα τυπικό σύστημα πρόωσης, συνήθως αποτελείται από τρία μέρη: την κύρια μηχανή, το αξονικό σύστημα και την έλικα. Το αξονικό σύστημα ενός πλοίου, το οποίο αποτελεί το βασικό στοιχείο μελέτης της συγκεκριμένης εργασίας, μεταδίδει την ισχύ από την Κύρια Μηχανή Πρόωσης (παραγωγή) στην έλικα του πλοίου (κατανάλωση) και μεταφέρει την παραγόμενη ώση από την έλικα στο σημείο παραλαβής του πλοίου (ωστικό έδρανο).

Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να αναφερθεί ότι, πλέον, στη σύγχρονη ναυτιλία έχει γίνει απαραίτητη προϋπόθεση και η υψηλή απόδοση όλων των επιμέρους τμημάτων ενός πλοίου. Επομένως, οι προτεινόμενες λύσεις και τάσεις της εποχής επηρεάζουν αναπόφευκτα και το σχεδιασμό του αξονικού συστήματος. Οι πιο συνηθισμένες τάσεις στη σύγχρονη ναυπηγική βιομηχανία εμπορικών πλοίων σύμφωνα με το Šverko (2010) [1] είναι οι εξής:

- Μεγάλα σκάφη με εύκαμπτη γάστρα
- Βραδύστροφοι κινητήρες υψηλής ισχύος, δημιουργούν απαίτηση για άξονες με μεγάλες διαμέτρους
- Μεγιστοποίηση των χώρων του φορτίου και ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του χώρου του μηχανοστασίου, οδηγώντας σε άκαμπτους και μικρού μήκους άξονες



Σχήμα 1. 1: Τυπικό αξονικό σύστημα πλοίου [1]

Όμως, η επίτευξη των παραπάνω στόχων επιφέρει ορισμένες δυσμενείς συνέπειες όσον αφορά το πλάνο ευθυγράμμισης του αξονικού συστήματος, οι οποίες οφείλονται στους παρακάτω λόγους:

- Με βελτιστοποιημένη εύκαμπτη γάστρα πλοίου, το σύστημα πρόωσης γίνεται πιο ευαίσθητο στις παραμορφώσεις της γάστρας, οι οποίες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη στο πλάνο ευθυγράμμισης
- Η χαμηλή ταχύτητα του άξονα και τα βαριά φορτία από το αξονικό σύστημα-έλικα, έχουν ως αποτέλεσμα περισσότερη καταπόνηση και έντονη απευθυγράμμιση των εδράνων
- Η διαδικασία κατασκευής του σκάφους σε μεγάλα μπλοκ καθιστά δύσκολο τον έλεγχο της ακρίβειας της ευθυγράμμισης.

1.1 Βιβλιογραφική επισκόπηση

Το σύστημα πρόωσης του πλοίου αποτελεί λειτουργία ζωτικής σημασίας για την αξιόπιστη πλεύση του στο θαλάσσιο περιβάλλον. Τις τελευταίες δεκαετίες, γίνονται έρευνες που βελτιστοποιούν το σύστημα πρόωσης, για να εξασφαλίσουν την λειτουργία του πλοίου σε όλες τις συνθήκες υπηρεσίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι, ένα πολύ σημαντικό τμήμα του συστήματος πρόωσης είναι το αξονικό του σύστημα, που απασχολεί μεγάλο μέρος της ερευνητικής κοινότητας. Πιο συγκεκριμένα, οι έρευνες εστιάζουν στην συμπεριφορά του συστήματος και στις φορτίσεις των εδράνων στήριξης για διαφορετικές καταστάσεις πλεύσης του πλοίου.

Οι K.H. Low, et al. (2003) [2] προσδιόρισαν την παραμόρφωση του αξονικού συστήματος, εφαρμόζοντας δυναμικές καταστάσεις κύματος. Στην μελέτη τους, έγιναν δοκιμές, όπου το πλοίο πλέει σε ακραίες συνθήκες κύματος, και ελέγχθηκε η συμπεριφορά των βάσεων των εδράνων. Τα συμπεράσματα, τελικά, που παρήχθησαν αφορούν το πλάνο ευθυγράμμισης του αξονικού συστήματος, στο οποίο κατέληξαν ότι δεν πρέπει να αμελούνται κατά το στάδιο του σχεδιασμού τα δυναμικά φαινόμενα του κύματος, διότι η διακύμανση των φορτίων των εδράνων είναι σημαντική.

Επιπλέον, οι Dahler et al. (2004) [3] στην μελέτη που έκαναν, παρουσιάζουν τα αποτελέσματα από ένα βιομηχανικό έργο, το οποίο ήταν σε συνεργασία με τους DNV, MAN B&W και DAEWOO, και αφορούσε τις μετατοπίσεις του αξονικού συστήματος του πλοίου και τις φορτίσεις που δέχονται τα έδρανα. Δημιούργησαν ένα πλήρες μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (FEM), με πολύ πυκνό πλέγμα, αναπαριστώντας το πρυμναίο τμήμα της γάστρας

ενός τυπικού πλοίου VLCC και την πραγματική μορφή της γεωμετρίας του στροφαλοφόρου άξονα. Στόχος της μελέτης ήταν να βρεθούν οι μετατοπίσεις του στροφαλοφόρου άξονα και της μηχανής, καθώς επίσης και οι επιδράσεις στα φορτία των εδράνων στήριξης του στροφαλοφόρου άξονα. Τέλος, τα συμπεράσματα της ανάλυσης ήταν: (α) το μοντέλο που δημιουργήθηκε κατέγραψε τις παραμορφώσεις της γάστρας σε καλό βαθμό και (β) δεν έγινε από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων σωστή ανάλυση των τοπικών παραμορφώσεων του στροφαλοφόρου άξονα με αποτέλεσμα τη λανθασμένη πρόβλεψη των φορτίσεων των αντίστοιχων εδράνων.

Στο έργο του, ο Murawski (2005) [4] ανέπτυξε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων FEM ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων χωρητικότητας 2,000 TEU. Υπογράμμισε τη σημασία:

- των παραμορφώσεων της γάστρας υπό διαφορετικές καταστάσεις φόρτωσης,
- των χαρακτηριστικών ακαμψίας και απόσβεσης του φιλμ λαδιού των εδράνων,
- των χαρακτηριστικών ακαμψίας των βάσεων των εδράνων στο πρόβλημα της ευθυγράμμισης.

Κατέληξε στο συμπέρασμα ότι, σε μια ολιστική προσέγγιση του προβλήματος της ευθυγράμμισης του αξονικού συστήματος, πρέπει να ληφθούν υπόψη στο σχεδιασμό τα χαρακτηριστικά ακαμψίας και απόσβεσης του φιλμ του λαδιού κάθε έδρασης. Τέλος, πρότεινε ότι, όλα τα έδρανα πρέπει να είναι εξίσου φορτισμένα και ο αριθμός Sommerfeld των εδράνων γραμμής να είναι 30-50% μεγαλύτερος από τα υπόλοιπα.

Επιπρόσθετα, οι Lei Shi et al. (2009) [5] αναφέρουν ότι η ευθυγράμμιση του αξονικού συστήματος επηρεάζεται σημαντικά από τις καταστάσεις φόρτωσης του πλοίου λόγω παραμορφώσεων της γάστρας, ιδίως από τις φορτίσεις του πρυμναίου τμήματος του. Στην έρευνά τους, διαπίστωσαν ότι βασικοί παράμετροι είναι οι κυματισμοί και οι μεταβολές της θερμοκρασίας του φυσικού περιβάλλοντος αλλά και τα θερμικά φορτία που προέρχονται από τον κινητήρα, διότι επηρεάζουν τις μετατοπίσεις των βάσεων των εδράνων στήριξης.

Ύστερα, ο BV (2015) [6] και ο ABS (2015) [7] δημοσίευσαν κανόνες και εγχειρίδια σχετικά με την διαδικασία ευθυγράμμισης του αξονικού συστήματος για τα μεγάλα πλοία. Και οι δύο μεθοδολογίες λαμβάνουν υπόψη τις παραμορφώσεις της γάστρας, τα χαρακτηριστικά του λαδιού και την στιβαρότητα των βάσεων των εδράνων. Τα εγχειρίδια ESA (“Elastic Shaft Alignment” για τον BV και “Enhanced Shaft Alignment για τον ABS”) θεωρούνται απαραίτητα για πολλούς τύπους πλοίων, όμως, η εφαρμογή τους είναι προαιρετική. Οι κανόνες του BV είναι, κυρίως, εφαρμόσιμοι για:

- Πλοία, όλων των τύπων, που έχουν ισχύ πρόωσης μεγαλύτερη ή ίση με 30MW,
- Πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων που έχουν ισχύ πρόωσης μεγαλύτερη ή ίση με 15MW,
- Πλοία μεταφοράς υγροποιημένου αερίου που έχουν ισχύ πρόωσης μεγαλύτερη ή ίση με 10MW.

Από την άλλη πλευρά, οι κανόνες του ABS είναι, κυρίως, εφαρμόσιμοι για:

- Δεξαμενόπλοια μεγάλου μεγέθους (όπως τα Suezmax, VLCC, ULCC, LNGC),
- Πλοία μεταφοράς φορτίου χύδην, επίσης, μεγάλου μεγέθους (όπως τα Capesize και VLOC),
- Πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων μεγάλου μεγέθους (πάνω από 9,000 TEU).

Γίνεται, λοιπόν, αντιληπτό μέσω των κανόνων ESA ότι η σημασία του σχεδιασμού και των λεπτομερών υπολογισμών του πλάνου ευθυγράμμισης, του αξονικού συστήματος, στα σύγχρονα πλοία είναι, πλέον, επιτακτική ανάγκη.

Τέλος, οι Goran Vizentin et al. (2017) [8] αναφέρουν τις συνήθεις αιτίες αστοχίας του συστήματος πρόωσης του πλοίου. Συγκεκριμένα, αναφέρουν ότι οι περισσότερες καταστροφές έχουν προέλθει από την λανθασμένη ευθυγράμμιση του αξονικού συστήματος που κατέληξε σε δημιουργία κραδασμών και τελικής αστοχίας του υλικού των εδράνων ή των αξόνων.

1.2 Περίγραμμα – Στόχος της μελέτης

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιείται η τρισδιάστατη σχεδίαση και ανάλυση του συστήματος πρόωσης ενός τυπικού πλοίου μεταφοράς 10,000 εμπορευματοκιβωτίων. Το μοντέλο περιλαμβάνει τα εξής στοιχεία του συστήματος πρόωσης:

- Κύρια Μηχανή Πρόωσης (στροφαλοφόρος άξονας, διωστήρας, πιστόνι, σταυρός, έδρανα βάσης μηχανής)
- Έλικα
- Αξονικό σύστημα (ελικοφόρος άξονας, ενδιάμεσοι άξονες και τα έδρανα τους)

Η γεωμετρική αναπαράσταση του συστήματος πρόωσης υλοποιείται στο Inventor της Autodesk και ακολουθεί τα εξής στάδια. Αρχικά, γίνεται η αναζήτηση των απαραίτητων τμημάτων σχεδίασης, σύμφωνα με τα οποία θα μπορέσει να επιτευχθεί η ακριβής προσέγγιση ενός ρεαλιστικού μοντέλου. Στη συνέχεια, αφού γίνει η επιλογή των παραπάνω στοιχείων, ακολουθεί η εύρεση των αναλυτικών και ποιοτικών σχεδίων τους από το υπό μελέτη πλοίο, με σκοπό τη σχεδίαση και τη συναρμολόγησή τους. Ενώ τέλος, πραγματοποιείται ο έλεγχος των χαρακτηριστικών του διαμορφωμένου μοντέλου.

Υστερα, δημιουργώντας το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του συστήματος πρόωσης του συγκεκριμένου πλοίου, επιδιώκεται η ανάλυση της στατικής αλλά και της δυναμικής κατάστασης του, για διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

Πιο συγκεκριμένα, αρχικά, χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των αντιδράσεων των εδράνων της στατικής ισορροπίας του άξονα σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Σκοπός της παραπάνω ανάλυσης είναι, ο έλεγχος της αξιοπιστίας του διαμορφωμένου μοντέλου, με παράλληλη σύγκριση των αποτελεσμάτων του με τα αντίστοιχα μεγέθη που παρέχονται από τον κατασκευαστικό οδηγό του νηογνώμονα και την διπλωματική εργασία του Σταύρου Σιαμαντά [24]. Κατ' επέκταση όμως, η βασική αφορμή για την ανάπτυξη του συγκεκριμένου μοντέλου, είναι η δυναμική ανάλυση του συστήματος στο πεδίο του χρόνου. Έχοντας προσεγγίσει με μεγάλη ακρίβεια την στατική λύση του προβλήματος, πλέον ερευνώνται τα φαινόμενα που προσδιορίζουν την πραγματική συμπεριφορά του συστήματος, και εφαρμόζονται μέσω κατάλληλων οριακών συνθηκών. Έπειτα, μελετάται η λειτουργία της κύριας μηχανής σε σταθερές στροφές, με τα έδρανα να ρυθμίζονται στην κατάσταση αναφοράς για θερμή λειτουργία μηχανής. Για καθένα από τα έδρανα του αξονικού συστήματος, καταγράφεται η χρονική ιστορία των αντιδράσεων στήριξης, όπου το σύνολο αυτών εισάγεται σε λογισμικό που σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, προκειμένου να υπολογιστούν οι παράμετροι λειτουργίας του εδράνου.

Τέλος, τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι ότι η στατική ανάλυση του προβλήματος στο στάδιο του σχεδιασμού δεν είναι αρκετή, μιας και τα φαινόμενα που αντιμετωπίζει το πλοίο κατά την λειτουργία του είναι δυναμικά.

2

Βασικά Μέρη Συστήματος Πρόωσης

2.1 Γενικές αρχές εγκαταστάσεων πρόωσης

Στα σύγχρονα εμπορικά πλοία, το μηχανοστάσιο τοποθετείται στο πρυμναίο τμήμα του σκάφους. Το γεγονός αυτό προκύπτει επειδή η χρήση αργόστροφων πετρελαιομηχανών απαιτούν μεγάλο ύψος για την εγκατάστασή τους, οπότε η τοποθέτηση του μηχανοστασίου πρυμναία είναι μονόδρομος. Ως αποτέλεσμα, η συγκεκριμένη σχεδίαση επιφέρει πλεονεκτήματα όπως είναι η αύξηση του μεγέθους των χώρων μεταφορά εμπορευμάτων, μείωση του συνολικού μήκους του αξονικού συστήματος καθώς και σύζευξη του μηχανοστασίου με τους χώρους ενδιαίτησης.

Η μελέτη για την εγκατάσταση του συστήματος πρόωσης, ξεκινά με την επιλογή της κύριας μηχανής. Ο κινητήρας που επιλέγεται πρέπει να εξασφαλίζει την ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία του πλοίου, ελάχιστο κόστος λειτουργίας και κτήσης, ευκολία στις επιθεωρήσεις και τους ελέγχους καθώς και μικρές διαστάσεις και βάρος ανά παραγόμενο ίππο. Η συνολική ισχύς του κινητήρα, πρέπει να αποτελεί το 80% έως 90% της ονομαστικής ισχύος του, στις ονομαστικές στροφές λειτουργίας του. Όταν το πλοίο είναι αναγκασμένο είτε να κινείται με μεγάλη σταθερή ταχύτητα για αρκετό χρονικό διάστημα, είτε η γάστρα του είναι ρυπασμένη, ή το πλοίο σε καταστάσεις πλεύσεις με άσχημες καιρικές συνθήκες, προτιμάται η μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύς.

Ύστερα, για την κίνηση των εμπορικών πλοίων, χρησιμοποιούνται έλικες σταθερού ή μεταβλητού βήματος με μεγάλες διαμέτρους, η οποίες συσφίγγονται στο πρυμναίο άκρο του ελικοφόρου άξονα. Στις περιπτώσεις με απαίτηση για υψηλή απόδοση ελιγμών, προστίθενται περισσότερες έλικες στο σύστημα. Η αλληλεπίδραση της έλικας με το θαλάσσιο περιβάλλον παράγει την ώση του πλοίου, που απαιτείται για την πρόσω και ανάποδα κίνηση του.

Τέλος, η μελέτη της εγκατάστασης του συστήματος πρόωσης ολοκληρώνεται με τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του αξονικού συστήματος. Οι άξονες και τα έδρανα είναι ειδικά μελετημένα να αντέχουν στις καταπονήσεις που προέρχονται από το σύστημα διάφορες συνθήκες πλεύσης και λειτουργίας του πλοίου.

2.2 *Ναυτικός κινητήρας Diesel*

Για τα σύγχρονα μεγάλα εμπορικά πλοία (δεξαμενόπλοια, πλοία μεταφοράς φορτίου κύδην και πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων), η επιλογή αργόστροφης πετρελαιομηχανής, στο σύστημα πρόωσης τους, είναι σύνηθες φαινόμενο. Δίχρονοι μηχανές με ζύγωμα, οι οποίες διαθέτουν υπερπλήρωση και είναι αντιστρέψιμες, συνδέονται, χωρίς μειωτήρες στροφών και συμπλέκτες, απευθείας με την έλικα του πλοίου μέσω του αξονικού συστήματος.

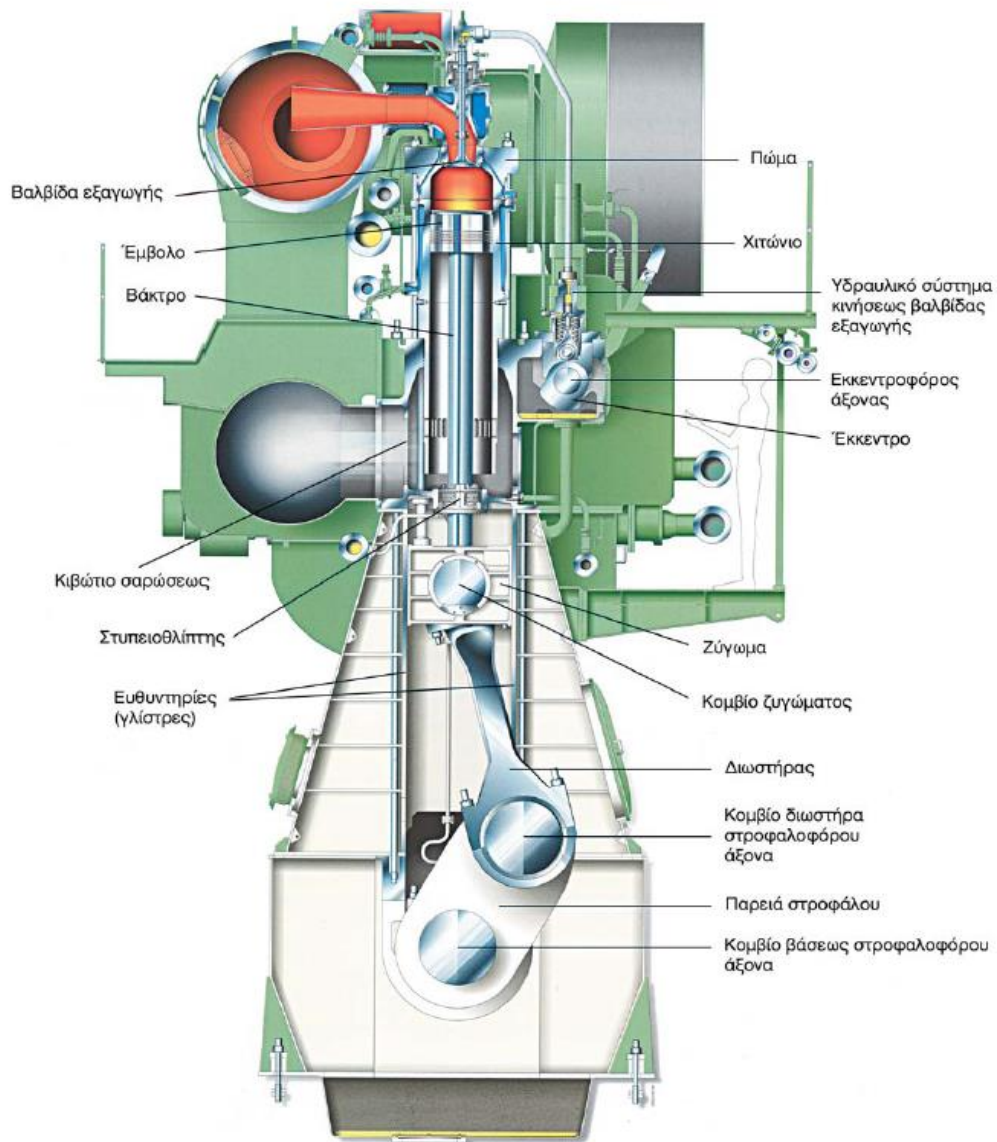
Οι κατασκευαστές αργόστρογων κινητήρων ντίζελ, ακολουθούν όμοιες τακτικές στην σχεδίαση και κατασκευή μηχανών με αποτέλεσμα να κυκλοφορούν μηχανές με κοινά χαρακτηριστικά. Τα βασικά χαρακτηριστικά που συναντώνται στις σημερινές μηχανές είναι:

- Δίχρονη λειτουργία
- Ύπαρξη ζυγώματος (σταυρού)
- Σάρωση με βαλβίδες εξαγωγής
- Σύστημα καυσαερίων σταθερής πίεσεως
- Διάμετροι κυλίνδρου από 260 έως 980 mm
- Λόγος διαδρομής εμβόλου προς διάμετρο κυλίνδρου έως και 4.2:1
- Αριθμός κυλίνδρων έως και 12
- Ταχύτητες περιστροφής από 55 έως 250 στροφές το λεπτό

Η αύξηση της μέγιστης πίεσης του κυλίνδρου, του λόγου διαδρομής εμβόλου προς διάμετρο κυλίνδρου αλλά και της μέσης ταχύτητας του εμβόλου έχει γίνει τις τελευταίες δεκαετίες ερευνητικό αντικείμενο για την συγκεκριμένη βιομηχανία. Η μορφή ενός

αργόστροφου κινητήρα φαίνεται στο **Σχήμα 2.1**. Τέλος, μερικά πλεονεκτήματα των αργόστροφων πετρελαιομηχανών είναι:

- Πλήρη καύση κακής ποιότητας καυσίμου και μείωση του κόστους καυσίμου,
- Απλότητα στην κατασκευή και μικρό κόστος συντήρησης,
- Μείωση των κινούμενων τμημάτων,
- Χρήση διαφορετικού λιπαντικού για τον κύλινδρο από αυτό τον υπολοίπων μερών της μηχανής
- Λειτουργία σε χαμηλές στροφές και απουσία μειωτήρα στροφών
- Μεγάλη αξιοπιστία.



Σχήμα 2. 1:Τυπική μορφή αργόστροφου κινητήρα Diesel [9]

2.2.1 Βάση

Η βάση ως μέρος της μηχανής υπάρχει μόνο στους μεγάλους κινητήρες. Η μορφή της είναι κιβωτιοειδή και αποτελείται από δύο διαμήκεις δοκούς, οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με εγκάρσιους δοκούς και διάτρητα διαφράγματα. Συνήθως, κατασκευάζεται από ηλεκτροσυγκολλημένα χαλύβδινα ελάσματα, που προσδίδουν στην υπόλοιπη δομή την απαραίτητη ακαμψία με το ελάχιστο δυνατό βάρος. Η βάση εδράζεται στο δάπεδο του μηχανοστασίου και το κάτω τμήμα της είναι κλειστό, σχηματίζοντας την ελαιολεκάνη. Τέλος, οι εγκάρσιοι δοκοί είναι κατάλληλα διαμορφωμένοι, έτσι ώστε να μπορούν να εφαρμοστούν το κάτω ήμισυ των εδράνων στηρίξεως του στροφαλοφόρου άξονα.

2.2.2 Σκελετός

Ο σκελετός είναι το κύριο τμήμα της μηχανής, πάνω στον οποίο τοποθετούνται όλος ο απαραίτητος εξοπλισμός του κινητήρα. Στις μεγάλες αργόστροφες μηχανές, κατασκευάζεται από ηλεκτροσυγκολλημένα χαλύβδινα ελάσματα με σκοπό την μείωση του συνολικού βάρους και του όγκου και την αύξηση της αντοχής της μηχανής. Στις πλευρές του έχει ανοίγματα, που εγκαθίστανται οι ανθρωποθυρίδες προσπελάσεως και οι βαλβίδες ασφαλείας. Τα κάτω τμήμα του στηρίζεται στην βάση της κύριας μηχανής, αντίθετα στο άνω τμήμα του προσαρμόζονται οι κύλινδροι. Η ένωση των κυλίνδρων, του σκελετού και της βάσης γίνεται με ειδικούς κοχλίες (συνδέτες ή εντατήρες) μεγάλου μήκους και ελαστικότητας. Επιπροσθέτως, ανάλογα με τη διάταξη των κυλίνδρων, ο σκελετός των κινητήρων διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

1. Διάταξη εν σειρά
2. Διάταξη τύπου V
3. Διάταξη αντιτιθεμένων κυλίνδρων
4. Αστεροειδής διάταξη

Στις ναυτικές μηχανές έχουν επικρατήσει ολοκληρωτικά οι πρώτοι δύο τύποι από τους παραπάνω.

2.2.3 Στροφαλοφόρος

Ο στροφαλοφόρος άξονας αποτελείται από έναν αριθμό στροφάλων, οι οποίοι περιστρέφονται με δυνάμεις αποδιδόμενες από τα έμβολα που μεταδίδονται μέσω των

διωστήρων. Κάθε κύλινδρος διαθέτει ένα στρόφαλο (αγκώνα), κάθε στρόφαλος αποτελείται από δύο βραχίονες (παρειές, μάγουλα ή κιθάρες) που συνδέονται με ένα κοινό κομβίο διωστήρα και κάθε βραχίονας συνδέεται με ένα κύριο κομβίο βάσης τα οποία εδράζονται στις βάσεις της μηχανής. Το ένα άκρο του άξονα είναι με φλάντζα για την μετάδοση της ισχύς του κινητήρα στο αξονικό σύστημα και το άλλο άκρο είναι «ελεύθερο». Τροχοί μετάδοσης κίνησης ή αλυσίδες προστίθενται πάνω στο στροφαλοφόρο με σκοπό τον συγχρονισμό των μηχανισμών λειτουργίας του κινητήρα με τον στροφαλοφόρο.

Ο στροφαλοφόρος άξονας λαμβάνει και μεταδίδει την πλήρη ισχύ λειτουργίας του κινητήρα και υπόκειται σε κυμαινόμενες τάσεις κάμψης, στρέψης και διάτμησης. Το υλικό του πρέπει να έχει υψηλή αντοχή, μεγάλη διάρκεια ζωής και να σχηματίζει καλές επιφάνειες. Κατασκευάζεται από σφυρήλατο ή χυτό χάλυβα (χρωμονικελιούχο ανοξείδωτο χάλυβα) άριστης ποιότητας και υψηλής αντοχής. Στην συνέχεια, στους βραχίονες δημιουργούνται οπές που τους επιτρέπει να συρρικνώνονται από τα περιοδικά φορτία. Η γωνία μεταξύ των στροφάλων δεν είναι η ίδια. Κατά την δημιουργία του στροφαλοφόρου ρυθμίζονται οι σωστές γωνίες μεταξύ των στροφάλων ώστε να αντιστοιχούν στη σειρά πυροδότησής του κινητήρα.



Σχήμα 2. 2: Στροφαλοφόρος άξονας μεγάλης δίχρονης πετρελαιομηχανής [9]

Οι προδιαγραφές των υλικών, το σχήμα, το μέγεθος, οι μέθοδοι κατασκευής, η θερμική επεξεργασία και ο έλεγχος όλων των στροφαλοφόρων αξόνων πρέπει να συμμορφώνονται με τους κανόνες των νηογνωμόνων. Τέλος, σε μεγάλους πολυκύλινδρους

κινητήρες, ο στροφαλοφόρος άξονας μπορεί να αποτελείται από δύο μέρη συνδεδεμένα με κοχλίες πάνω στις φλάντζες τους.

2.2.4 Χιτώνια

Το χιτώνιο είναι το κυλινδρικής διατομής τμήμα της μηχανής, εντός του οποίου παλινδρομεί το έμβολο. Στους σκελετούς ενιαίου τύπου τα χιτώνια τοποθετούνται εντός του σώματος των κυλίνδρων ή εντός του σκελετού της μηχανής. Η διαιρετή αυτή κατασκευή προσφέρει το πλεονέκτημα της εύκολης αντικατάστασης σε περίπτωση φθοράς.

Τα χιτώνια κατασκευάζονται από ειδικά κράματα φαιού χυτοσιδήρου, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μεγάλη αντοχή στις πιέσεις και αντίσταση φθοράς από την παλινδρόμηση του εμβόλου και τη χρήση βαρέως πετρελαίου. Η καταπόνηση των χιτωνίων είναι σύνθετη και περιοδικά μεταβαλλόμενη, με ισχυρότερες τις εφελκυστικές τάσεις λόγω των εσωτερικών πιεσεων. Η κατασκευή τους μπορεί να είναι ενιαία ή διαιρετή, με σκοπό τα τμήματα που φθείρονται περισσότερο, να αντικαθίστανται.

2.2.5 Ελατήρια εμβόλων

Τα ελατήρια του εμβόλου εξασφαλίζουν την απαραίτητη στεγανοποίηση του χώρου καύσης, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή συμπίεση του αέρα, να αποφεύγεται η διαφυγή καυσαερίων προς το στροφαλοθάλαμο και να αποτρέπεται η εισροή λαδιού λιπάνσεως στο χώρο καύσης.

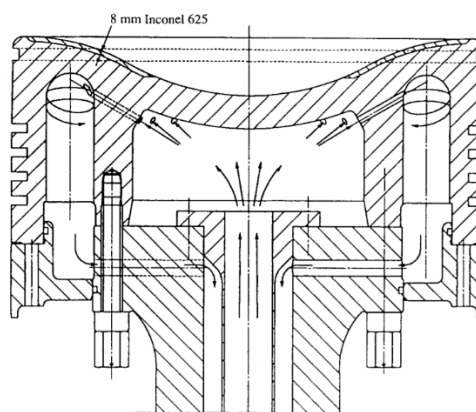
Τα ελατήρια του εμβόλου διακρίνονται στα ελατήρια συμπίεσης, που έχουν προορισμό τη στεγανοποίηση του θαλάμου καύσης και στα ελατήρια λαδιού, τα οποία βοηθούν στην ομοιόμορφη διανομή του λαδιού και εμποδίζουν το λάδι λίπανσης να εισέρχεται στο θάλαμο καύσης.

Τα ελατήρια έχουν δακτυλιοειδές σχήμα, μη ολοκληρωμένου κύκλου, για να είναι δυνατή η τοποθέτησή τους στις εγκοπές του εμβόλου και να παραλαμβάνονται οι θερμικές διαστολές. Η εσωτερική διάμετρος των ελατηρίων είναι μικρότερη της εξωτερικής του εμβόλου, αλλά μεγαλύτερη της διαμέτρου των αυλακώσεων. Η εξωτερική τους διάμετρος είναι μεγαλύτερη της εσωτερικής διαμέτρου του κυλίνδρου. Έτσι, για την τοποθέτησή τους στο έμβολο είναι απαραίτητη η διαστολή τους, ενώ για να τοποθετηθεί το έμβολο με τα ελατήρια εντός του κυλίνδρου είναι απαραίτητη η σύσφιξη τους. Το τμήμα που απουσιάζει από το ελατήριο, παραλαμβάνει τη σύσφιξη αυτή, καθώς και τις θερμικές διαστολές.

2.2.6 Έμβολο

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τα έμβολα απαιτούν ιδιότητες, παρόμοιες με εκείνες για τις επενδύσεις των κυλίνδρων και των καλυμμάτων. Η κεφαλή του εμβόλου πρέπει να αντέχει σε υψηλό φορτίο, λόγω των πιέσεων του αερίου, και να μπορεί να μεταδώσει τη δύναμη στο βάκτρο. Δεν πρέπει να είναι επιρρεπής σε φαινόμενα κόπωσης έτσι ώστε να επιβιώσει από τις μεταβαλλόμενες μηχανικές και θερμικές καταπονήσεις. Η επιφάνεια της κεφαλής είναι εκτεθειμένη σε υψηλές θερμοκρασίες από την καύση και γρήγορη εναλλαγή σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από τον αέρα καθαρισμού σε κάθε κύκλο του κινητήρα. Το μέταλλο πρέπει να αντιστέκεται στον ερπυσμό σε υψηλές θερμοκρασίες, τη διάβρωση και να μπορεί εύκολα να διοχετεύσει θερμότητα για ψύξη, αλλά με περιορισμένη θερμική διαστολή. Τα υλικά και ο σχεδιασμός του εξαρτώνται από το μέγεθος, την ταχύτητα και το καύσιμο του κινητήρα.

Τα έμβολα είναι χυτευμένα σε κράμα χάλυβα από χαλκό-μολυβδαίνιο και έχουν κατεργαστεί σε όλες τις επιφάνειες τους. Στο τμήμα της κεφαλής, υπάρχουν περιφερειακές εγκοπές (αυλακώσεις) για τα ελατήρια συμπίεσης. Τα ελατήρια χρησιμοποιούνται για να μειώσουν την φθορά και την τριβή των επιφανειών. Η διάμετρος του εμβόλου μπορεί να έχει μικρή κωνικότητα προς τα μέσα, πάνω από τη θέση του άνω δακτυλίου, για να επιτρέπει μικρές αλλαγές στη γεωμετρία του λόγω των υψηλών τάσεων και θερμοκρασιών. Σε ορισμένες περιπτώσεις, για να δοθεί πρόσθετη προστασία από τη διάβρωση σε υψηλή θερμοκρασία, μέρος της επιφάνειας της κεφαλής του εμβόλου μπορεί να έχει ένα λεπτό στρώμα από συγκολλητικό κράμα.



Σχήμα 2. 3: Έμβολο με σύστημα ψύξης λαδιού [11]

Η ψύξη των εμβόλων είναι απαραίτητη για την αποφυγή της υπερβολικής θερμότητας από την καύση και για τον περιορισμό της θερμικής καταπόνησης. Επίσης, με

την ψύξη ελέγχεται η θερμική διαστολή και έτσι διατηρούνται σωστές αποστάσεις μεταξύ του εμβόλου και χιτωνίου. Το έμβολο ψύχεται με κυκλοφορία ψυκτικού μέσου στις εσωτερικές διόδους των εμβόλων, που είναι, συνήθως, λάδι ή γλυκό νερό.

2.2.7 Πώμα Κυλίνδρου

Η κεφαλή (πώμα) των κυλίνδρων προσαρμόζεται στο πάνω μέρος των χιτωνίων, σχηματίζοντας μαζί με τα χιτώνια και το πάνω μέρος του εμβόλου το χώρο, όπου πραγματοποιείται η καύση. Μπορεί να είναι ολόσωμη ή διαιρούμενη, δηλαδή κάθε κύλινδρος να έχει τη δική του κεφαλή. Συνδέεται με το άνω τμήμα του κορμού της μηχανής με τη βοήθεια φυτευτών κοχλιών ελαστικής μηχανόσωσης. Μεταξύ του σώματος και της κεφαλής των κυλίνδρων παρεμβάλλεται ένα ειδικό παρέμβυσμα για την εξασφάλιση πλήρους στεγανότητας.

Στις δίχρονες πετρελαιομηχανές, απουσιάζουν οι βαλβίδες εισαγωγής, ενώ οι βαλβίδες εξαγωγής συναντώνται συνήθως σε όλες τις αργόστροφες πετρελαιομηχανές μεγάλης ισχύος. Τέλος, η κεφαλή των κυλίνδρων στις πετρελαιομηχανές κατασκευάζεται από χυτοσίδηρο.

2.2.8 Βαλβίδα εξαγωγής

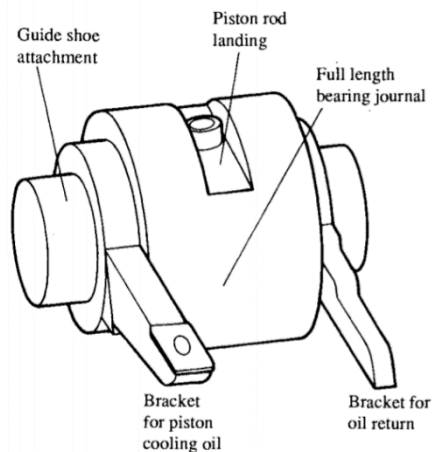
Η βαλβίδες, με το άνοιγμα και το κλείσιμό τους στις κατάλληλες χρονικές στιγμές του κύκλου λειτουργίας της μηχανής, ρυθμίζουν την εισαγωγή του αέρα ή του καυσίμου μείγματος και την εξαγωγή των καυσαερίων.

Σε όλους τους σύγχρονους τύπους μεγάλων πετρελαιομηχανών υπάρχουν μόνο βαλβίδες εξαγωγής. Κάθε βαλβίδα αποτελείται από την κεφαλή, το στέλεχος και την ουρά. Η κεφαλή είναι το κάτω τμήμα της βαλβίδας με το χαρακτηριστικό σχήμα μανιταριού. Όταν η βαλβίδα είναι κλειστή, η κεφαλή της εφάπτεται στεγανά στην αντιστοιχη έδρα της, στην κεφαλή των κυλίνδρων. Το στέλεχος είναι κυλινδρικός επιμήκης άξονας που στηρίζει και μετατρέπει την κίνηση στην κεφαλή. Το στέλεχος ολισθαίνει στο εσωτερικό του οδηγού της βαλβίδας. Η ουρά αποτελεί το ανώτερο τμήμα της βαλβίδας, και φέρει μία ή περισσότερες εγκοπές. Εκεί τοποθετούνται οι κωνικές διαιρούμενες ασφάλειες, που συγκρατούν το δακτύλιο στηρίξεως του ελατηρίου.

2.2.9 Σταυρός (Ζύγωμα)

Το βάκτρο του εμβόλου λειτουργεί ως κύρια αντηρίδα για την μεταφορά του φορτίου των πιέσεων από τα αέρια προς το ζύγωμα και από εκεί προς το μηχανισμό κίνησης του κινητήρα. Το μήκος του εξαρτάται από το μήκος της διαδρομής και τη σχεδίασή του κινητήρα. Πρόκειται, ουσιαστικά, για έναν χαλύβδινο βραχίονα με στρογγυλή τομή για υψηλή αντοχή και ακαμψία. Στο άνω άκρο του έχει διαμορφωμένη μια φλάντζα, όπου τα μπουλόνια συνδέονται με την κεφαλή του εμβόλου. Αντίθετα, στο κάτω άκρο του με διαμόρφωση κατάλληλου σπειρώματος, υψηλής αντοχής, και με περικόχλιο συνδέεται με το ζύγωμα. Το βάκτρο έχει μια οπή στο κέντρο του για την μεταφορά του ψυκτικού μέσου στην κεφαλή του εμβόλου.

Το ζύγωμα είναι ένας μηχανισμός που χρησιμοποιείται ως σύνδεσμος για την ολίσθηση των παλινδρομικών μαζών και συμπιεστών της μηχανής. Παραλαμβάνει τις πλάγιες δυνάμεις που αναπτύσσονται λόγω των κλίσεων του διωστήρα. Κατασκευάζεται από χάλυβα και φέρει ειδικό κομβίο για να ταιριάζουν οι τριβείς της κεφαλής του διωστήρα. Επιπλέον, το ζύγωμα επιτρέπει να μετακινείται ελεύθερα ο διωστήρας έξω από τον κύλινδρο. Στο **Σχήμα 2.4** φαίνεται η μορφή του ζυγώματος.

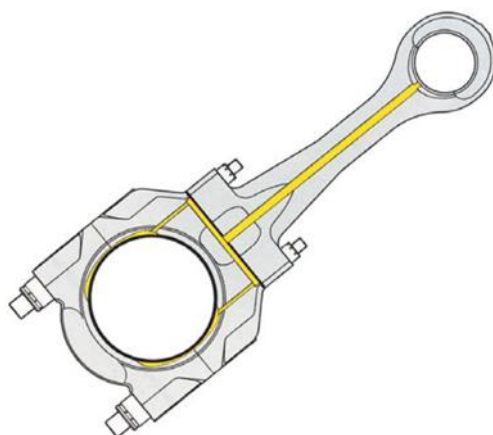


Σχήμα 2. 4: Ζύγωμα [11]

2.2.10 Διωστήρας

Ο διωστήρας είναι η ράβδος που συνδέει τον επάνω μηχανισμό (ζύγωμα και έμβολο) με τον κάτω μηχανισμό (στρόφαλο), διευκολύνοντας τη μετατροπή των παλινδρομικών δυνάμεων από το έμβολο σε περιστρεφόμενη ισχύ στον στροφαλοφόρο άξονα. Σε αργούς τύπου κινητήρες, ο διωστήρας λειτουργεί κυρίως ως αντηρίδα υπό από αξονική φόρτιση.

Κατασκευάζεται από σφυρήλατο χάλυβα και μορφοποιείται σε κάθε άκρη του με δυο οπές, ώστε, να προσαρμόζεται το κομβίο του στροφαλοφόρου άξονα, στο κάτω τμήμα μηχανισμού, και ο πείρος του εμβόλου (κομβίο ζυγώματος), στο άνω τμήμα του μηχανισμού. Μια, επιπλέον, οπή ανοίγεται εσωτερικά του στελέχους του διωστήρα όπου τοποθετούνται αγωγοί για την διοχέτευση λιπαντικού υγρού στους τριβείς. Το μήκος του είναι τόσο όσο επιτρέπει ο σχεδιασμός της μηχανής, έτσι ώστε το συνολικό ύψος του κινητήρα να είναι χαμηλό. Στο **Σχήμα 2.5** φαίνεται η μορφή του διωστήρα και το σύστημα λίπανσης του.



Σχήμα 2. 5: Σύστημα λίπανσης διωστήρα [9]

2.2.11 Σφόνδυλος – Βολάν

Οι κινητήρες υψηλής ταχύτητας ή οι κινητήρες με λίγους κυλίνδρους μπορεί να είναι εφοδιασμένοι με σφόνδυλο. Ο σφόνδυλος είναι ένας στερεός τροχός διαμορφωμένος ώστε να έχει μεγάλη μάζα και αδράνεια για να αποθηκεύει ενέργεια κατά την λειτουργία του κινητήρα. Αυτή η ενέργεια είναι ανάλογη με τις στροφές του κινητήρα. Όταν οι στροφές κινητήρα μειώνονται, η κινητική ενέργεια στο σφόνδυλο πρέπει, επίσης, να μειώνεται επιστρέφοντας ενέργεια στον στροφαλοφόρο άξονα της μηχανής. Ουσιαστικά, απορροφά την ενέργεια κατά τη μέγιστη ροπή που παράγει ο κινητήρας και δίνει επιτάχυνση στους άξονες και επιστρέφει ενέργεια κατά τη διάρκεια της χαμηλής ροπής και της επιβράδυνσης.

Με αυτή την διαδικασία ο σφόνδυλος εξομαλύνει τις διακυμάνσεις στις στροφές του κινητήρα. Η ενέργεια που αποθηκεύεται από τον σφόνδυλο μιας αργόστροφης μηχανής είναι περιορισμένη και το αποτέλεσμά της είναι αμελητέο σε σύγκριση με την αδράνεια που αποθηκεύεται στα υπόλοιπα περιστρεφόμενα μέρη του κινητήρα.

Τέλος, ο σφόνδυλος τοποθετείται στο άκρο του στροφαλοφόρου άξονα έξω από το στροφαλοθάλαμο και χρησιμοποιείται κυρίως για την εμπλοκή του κινητήρα περιστροφής

κατά τη διάρκεια της γενικής επισκευής. Είναι επίσης πολύ βολικό εργαλείο για την επισήμανση γωνιών στροφάλου.

2.3 Έλικα

Η έλικα αποτελείται από έναν άξονα με αρκετές λεπίδες ελικοειδούς μορφής που τοποθετούνται πάνω του ομόκεντρα και ενιαία. Με την περιστροφή της μετατρέπει την μηχανική ενέργεια, που της αποδίδει ο ελικοφόρος άξονας, σε κινητική ενέργεια μέσω του νερού. Επιπλέον, η έλικα βυθισμένη στο νερό αυξάνει την ορμή του ρευστού, που ρέει ανάμεσα από τα πτερύγια της, και έτσι ασκείται δύναμη από το ρευστό στα πτερύγια. Αξίζει να σημειωθεί ότι, η δύναμη του ρευστού μπορεί να αναλυθεί ως μια αξονική ωστική δύναμη και σε μια περιφερειακή ανθιστάμενη συνιστώσα. Με το άθροισμα, λοιπόν, των περιφερειακών ανθιστάμενων συνιστωσών από το κάθε πτερύγιο υπολογίζεται η ανθιστάμενη ροπή στρέψεως της έλικας, η οποία πρέπει να υπερνικηθεί από την στρεπτική ροπή του κινητήρα για να αυξήσει ταχύτητα το πλοίο.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες έλικας: οι έλικες με πτερύγια σταθερού βήματος (**Σχήμα 2.7**) και οι έλικες με πτερύγια μεταβλητού βήματος (**Σχήμα 2.6**). Η διαφορά μεταξύ των δύο τύπων έλικας είναι ο τρόπος επίτευξης της αντίστροφης κίνησης. Στις έλικες σταθερού βήματος το πλοίο για να κινηθεί ανάποδα πρέπει να αλλάξει τη φορά περιστροφής της μηχανής, όπου στις περιπτώσεις αυτές ο βαθμός απόδοσης της έλικας είναι πολύ χαμηλός. Αντίθετα, οι έλικες μεταβλητού βήματος έχουν ρυθμιζόμενα πτερύγια με δυνατότητες μεταβολής της κλίσης τους. Έτσι η μηχανή δεν χρειάζεται να αλλάξει φορά περιστροφής, και τα πτερύγια, με την χρήση υδραυλικών ή ηλεκτρικών σερβομηχανών, αυτορυθμίζονται και βελτιστοποιούν το βήμα τους για επίτευξη μεγάλων αποδόσεων. Το κόστος κτήσης μιας έλικας μεταβλητού βήματος φτάνει έως και τέσσερις φορές το κόστος κτήσης της έλικας με πτερύγια σταθερού βήματος, λόγω της ιδιαιτερότητας του εξοπλισμού και της διάταξής του.



Σχήμα 2. 6: Έλικα μεταβλητού βήματος [10]

Η μέγιστη απόδοση της έλικας είναι συνάρτηση δύο μεταβλητών: της ταχύτητας περιστροφής και του μεγέθους της. Γενικά, στα ποντοπόρα πλοία επιλέγονται έλικες μεγάλης

διαμέτρου με χαμηλές ταχύτητες περιστροφής. Οι μεγάλοι μεγέθους έλικες με μεγάλες ταχύτητες περιστροφής οδηγούν σε σπηλαιώσης της έλικας. Το σχήμα και ο αριθμός των πτερυγίων στην έλικα εξαρτάται ανάλογα με το είδος, το μέγεθος και της επιθυμητές επιδόσεις του πλοίου. Σε δεδομένη ταχύτητα η ισχύς που απορροφά η έλικα, επηρεάζεται από διάφορες συνθήκες, όπως:

- Η κατάσταση έλικα και γάστρας,
- Το βύθισμα του πλοίου,
- Η κατάσταση θάλασσας και τα υπόγεια ρεύματα,
- Η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου.

Η κατασκευή της έλικας έχει ως διαδικασία την χύτευση μαγγανιούχου ορείχαλκου και εν συνεχεία την διαμόρφωση με κατεργασίες αφαίρεσης υλικού.



Σχήμα 2. 7: Έλικα σταθερού βήματος [10]

Τέλος, η έλικα αποτελεί σημαντική παράμετρο για το σύστημα πρόωσης του πλοίου. Η σωστή ζυγοστάθμιση και η αποφυγή ξενερίσματός της οδηγούν σε καλές συνθήκες λειτουργίας του συστήματος. Όταν η έλικα είναι λανθασμένα ζυγοσταθμισμένη ή ξενερίζει, προκαλεί βίαιες καταπονήσεις στην άτρακτο, και η άτρακτος με την σειρά της στα έδρανα και την μηχανή, λόγω στρεπτικών και καμπτικών ταλαντώσεων.

2.4 Αξονικό σύστημα

2.4.1 Ελικοφόρος Άξονας

Ο ελικοφόρος άξονας είναι το τμήμα του αξονικού συστήματος που συνδέεται με την έλικα και βρίσκεται σχεδόν ολόκληρος μέσα στην χοάνη. Το προωαίο άκρο του έχει ενσωματωμένη φλάντζα για την σύνδεση του με τους ενδιάμεσους άξονες, ενώ το πρυμναίο άκρο της ατράκτου φέρει κωνική μορφή και καταλήγει σε κατάλληλο σπείρωμα. Η έλικα με την αντίστοιχη κωνική μορφή προσαρμόζεται πάνω στην άτρακτο και σφίγγει με ένα ανεξάρτητο περικόχλιο, του οποίου η φορά συσφίξεως είναι αντίθετη από την φορά της περιστροφής της έλικας κατά την πρόσω κίνηση. Η στρεπτική ροπή μεταφέρεται από τον ελικοφόρο άξονα στην έλικα μέσω τριβής, λόγω της ισχυρής δυνάμεως συσφίξεως που πραγματοποιείται από το περικόχλιο.

2.4.2 Ενδιάμεσος Άξονας

Η διάταξη του αξονικού συστήματος περιλαμβάνει στο πρυμναίο τμήμα τον ελικοφόρο άξονα, ο οποίος συνδέεται με μια σειρά από ενδιάμεσους άξονες ανάλογα με το μήκος του μηχανοστασίου. Το προωαίο άκρο του αξονικού συστήματος έρχεται σε επαφή με τον στροφαλοφόρο άξονα της Κύριας Μηχανής και έτσι επιτυγχάνεται η σύνδεση έλικας - μηχανής. Οι ενδιάμεσοι άξονες στα άκρα τους έχουν ενσωματωμένες φλάντζες και κατασκευάζονται από μαλακό σφυρήλατο χάλυβα. Στα σημεία όπου στηρίζονται από τα ακτινικά έδρανα ολίσθησης συνήθως οι άξονες αυξάνουν την διάμετρο τους. Μια τυπική μορφή ενός ενδιάμεσου άξονα φαίνεται στο **Σχήμα 2.8**.

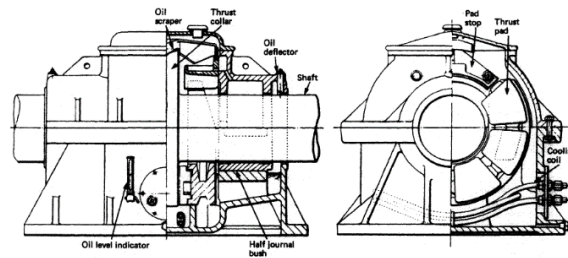


Σχήμα 2. 8: Τυπική μορφή ενδιάμεσου άξονα [9]

2.5 Έδρανα στήριξης αξονικού συστήματος

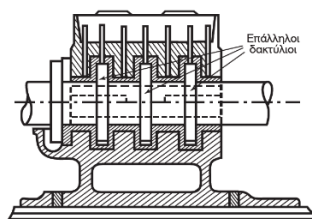
2.5.1 Ωστικό έδρανο

Το ωστικό έδρανο, ή αλλιώς ωστικός τριβέας, μεταφέρει την ώση από την έλικα στην γάστρα του πλοίου. Η κατασκευή του πρέπει να είναι αρκετά στιβαρή ώστε να αντέχει σε κανονικά φορτία τόσο για την πρόσω κίνηση, όσο και για την ανάποδα. Το τμήμα της γάστρας όπου τοποθετείται ο συγκεκριμένος τύπος εδράνου είναι ιδιαίτερα ενισχυμένο. Το ωστικό έδρανο μπορεί να αποτελεί ανεξάρτητο τμήμα του συστήματος (Σχήμα 2.9) ή αναπόσπαστο μέρος της κύριας μηχανής.



Σχήμα 2. 9: Ωστικό έδρανο [12]

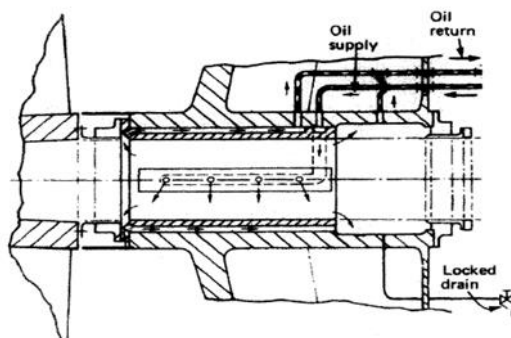
Το τμήμα του άξονα που προσαρμόζεται το ωστικό έδρανο ονομάζεται ωστική άτρακτος (Σχήμα 2.10). Η ωστική άτρακτος έχει ιδιαίτερη διαμόρφωση. Αναλυτικότερα, το τμήμα αυτό αποτελείται από επίπεδους δακτυλίους κάθετους στον άξονα συμμετρίας της ατράκτου, οι οποίοι είναι συμπαγείς με τον άξονα, και φέρουν επιστρώσεις από ειδικά μέταλλα. Το ωστικό έδρανο φέρει εσωτερικά του δακτυλιοειδής αύλακες, μέσα στους οποίους περιστρέφονται και ολισθαίνουν οι δακτύλιοι της ατράκτου. Μεταξύ τους, υπάρχει ένα μικρό διάκενο που πληρώνεται με λιπαντικό για την δημιουργία του φιλμ λαδιού. Το έδρανο μετατρέπει περίπου το 0.5 % της δύναμης της ώσης σε θερμότητα. Αυτή η θερμότητα αποβάλλεται με την κυκλοφορία νερού μέσα από το κέλυφος του εδράνου. Στις σύγχρονες εγκαταστάσεις χρησιμοποιείται ένας μοναδικός δακτύλιος ωστικού τριβέα.



Σχήμα 2. 10: Ωστική άτρακτος [12]

2.5.2 Έδρανα χοάνης

Τα έδρανα χοάνης εξυπηρετούν δυο πολύ σημαντικούς σκοπούς. Πρώτον, παραλαμβάνουν το βάρος του ελικοφόρου άξονα και ένα σημαντικό ποσοστό του βάρους της έλικας, ενώ, δεύτερον, είναι ο βασικός τρόπος στεγάνωσης του μηχανοστασίου αποτρέποντας την είσοδο υδάτων μέσω της χοάνης, αλλά και την εκροή ελαίου προς το θαλάσσιο περιβάλλον. Τα σύγχρονα πλοία, ως υλικά για τα έδρανα χοάνης χρησιμοποιούν λευκά μέταλλα με ειδικές διατάξεις λίπανσης.



Σχήμα 2. 11: Διαδικασία λίπανσης εδράνου χοάνης [12]

Μια ειδική αντλία λαδιού χρησιμοποιείται για την κυκλοφορία του λαδιού στο σύστημα λίπανση του εδράνου. Το λάδι αντλείται στα έδρανα χοάνης μέσω εξωτερικών αξονικών αυλακώσεων και διέρχεται διαμέσου οπών στο κέλυφος στις εσωτερικές διόδους των εδράνων. Η περιστροφή του άξονα ωθεί το λάδι προς τα άκρα του εδράνου και έτσι απορροφάται από την αντλία. Ύστερα, για να μειωθεί η θερμοκρασία του λαδιού και να επαναχρησιμοποιηθεί, περνάει μέσα από το ψυγείο.

2.5.3 Έδρανα γραμμής

Τα έδρανα γραμμής του αξονικού συστήματος είναι ακτινικά έδρανα, τα οποία στηρίζουν τους άξονες. Παραλαμβάνουν το βάρος όλων των εξαρτημάτων και υπόκεινται επίσης σε βαριά φορτία, κυμαινόμενα σε μέγεθος. Σε συστήματα με αργόστροφους κινητήρες χρησιμοποιούνται λευκά μέταλλα με παχύ κέλυφος. Τα έδρανα γραμμής αποτελούνται από δύο τμήματα, το άνω τμήμα του κάθε εδράνου όπου ασφαλίζεται, είτε με παξιμάδια είτε με βίδες, και το κάτω τμήμα του εδράνου όπου είναι σταθερό πάνω στο διπύθμενο του πλοίου. Οι εσωτερικές επιφάνειες πρέπει να είναι με ακρίβεια τορναρισμένες και να ευθυγραμμίζονται σωστά ώστε να αποφεύγεται η κάμψη στον άξονα. Τέλος, κάθε έδρανο γραμμής πρέπει να ελέγχετε τακτικά, διότι φθείρονται ανεξέλεχτα.

3

Ευθυγράμμιση αξονικού συστήματος

3.1 Εισαγωγή

Με την πάροδο των χρόνων η ζήτηση για αξιόπιστη λειτουργία και πλεύση των πλοίων γίνεται εντονότερη. Καθώς τα μεγέθη τους αυξήθηκαν σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες, αυξήθηκε, αντίστοιχα, και το μήκος των ατράκτων του αξονικού τους συστήματος.

Προκειμένου να διασφαλιστεί η ορθή κίνηση του πλοίου από το αξονικό σύστημα, γίνονται ειδικές μελέτες για την σχεδίαση του πλάνου ευθυγράμμισης και ακολουθούνται εμπειρικές μέθοδοι για την κατάλληλη εγκατάστασή του. Για τον καθορισμό του πλάνου ευθυγράμμισης, χρειάζονται κατ' ελάχιστον το σύνολο των παρακάτω παραμέτρων:

- Ο αριθμός όλων των σημείων στήριξης κατά μήκος του άξονα,
- η διαμήκης θέση κάθε σημείου στήριξης στον άξονα,
- η κατακόρυφη απόσταση κάθε σημείου στήριξης από την ορισμένη γραμμή αναφοράς,
- η γωνία με την οποία θα τοποθετηθούν τα έδρανα στήριξης ως προς την ορισμένη γραμμή αναφοράς,
- ακριβείς διαστάσεις των εδράνων και η αντοχή τους στα φορτία του άξονα,
- Οι αντιδράσεις στήριξης των εδράνων, τόσο σε στατικές όσο και σε δυναμικές συνθήκες λειτουργίας της κύριας μηχανής πρόωσης.

Η ευθυγράμμιση θεωρείται κατάλληλη όταν οι αντιδράσεις των εδράνων είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων των κανονισμών των νηογνομόνων, υπό όλες τις συνθήκες λειτουργίας του πλοίου. Έτσι, κατά τη μελέτη σχεδίασης του πλάνου ευθυγράμμισης, ελέγχονται ποικίλες συνθήκες λειτουργίας σε διαφορετικές καταστάσεις φόρτωσης και ερματισμού αλλά και σε διαφορετικές θερμικές μεταβολές του συστήματος πρόωσης. Η λανθασμένη εφαρμογή ή ακόμα και ο κακός σχεδιασμός του πλάνου ευθυγράμμισης του αξονικού συστήματος μπορεί να επιφέρει:

- Αστάθεια των εδράνων (αρνητικά φορτισμένα έδρανα, υψηλοί ρυθμοί φθοράς εδράνων),
- υπερβολική κάμψη άξονα, στροβοκαμπτικές ταλαντώσεις,
- καταπόνηση και φθορά του μειωτήρα στροφών,
- κόπωση του αξονικού συστήματος λόγω ορθών τάσεων λόγω κάμψης,
- καταπόνηση και φθορά εδράνων βάσης της Κύριας Μηχανής.

3.2 Κανονισμοί

3.2.1 Επισκόπηση

Η κοινότητα των νηογνομόνων, εκδίδοντας κανονισμούς και οδηγίες, προσπάθησαν να δώσουν λύση στο πρόβλημα της ευθυγράμμισης του αξονικού συστήματος, αντιμετωπίζοντας το στατικά, θέτοντας ως παραδοχή ότι τα ενεργά φορτία είναι στατικές δυνάμεις και ροπές.

Αν και η ευθυγράμμιση του αξονικού συστήματος αφορά περιστρεφόμενους μηχανισμούς, μέχρι σήμερα δεν εξετάζονται επαρκώς οι δυναμικοί παράγοντες, και η ανάλυση σταματά στη στατική μελέτη της ευθυγράμμισης, που είναι ο πρωταρχικός σκοπός της. Έτσι, σε πρώτη φάση, η ευθυγράμμιση του αξονικού συστήματος πραγματοποιείται σε ένα εύρος καταστάσεων λειτουργίας του πλοίου όπως:

- Σε ψυχρές στατικές καταστάσεις, επ' άγκυρα (εν λιμένι),
- σε θερμές στατικές καταστάσεις, επ' άγκυρα (εν λιμένι),
- σε θερμές δυναμικές καταστάσεις, εν πλώ.

Με τους όρους στατικές και δυναμικές καταστάσεις εννοούμε:

Στατικές καταστάσεις, όπου, η κύρια μηχανή είναι εκτός λειτουργίας και έτσι ισχύουν τα εξής:

1. Δεν παράγει ώση η έλικα, οπότε δεν δημιουργείται έκκεντρη φόρτιση στον άξονα παρά μόνο φορτίσεις λόγω του βάρους της έλικας,
2. οι άξονες δεν περιστρέφονται, επομένως δεν υπολογίζεται η υδροδυναμική λίπανση στα έδρανα,
3. στα σημεία στήριξης είναι αποδεκτή η κάθετη κίνηση του άξονα εντός των ορίων τους,
4. λαμβάνεται υπόψη μόνο η στατική φόρτιση του άξονα, δηλαδή, οι βαρυτικές δυνάμεις, τα κατακόρυφα φορτία στα έδρανα και τα φορτία που εφαρμόζονται μηχανικά επί του άξονα.

Δυναμικές καταστάσεις, όπου, η κύρια μηχανή είναι σε λειτουργία και έτσι ισχύουν τα εξής:

- Ανομοιόμορφη θερμική διαστολή της κύριας μηχανής, η οποία επηρεάζει όλα τα έδρανα του στροφαλοφόρου άξονα,
- δημιουργείται υδροδυναμική λίπανση, με αποτέλεσμα να παράγεται φιλμ ελαίου ανάμεσα στον άξονα και σε κάθε έδρανο στήριξης,
- η έλικα παράγει εκκεντρική ώση, η οποία μεταφράζεται ως ροπή κάμψης.

Επιπρόσθετα, βασικοί παράμετροι, πληροφορίες και αποτελέσματα που λαμβάνονται υπόψη κατά την έγκριση της στατικής μελέτης από τους νηογνώμονες είναι:

- Λεπτομερής περιγραφή του πλάνου ευθυγράμμισης:
 - Χαρακτηριστικά αξόνων συστήματος: υλικά, μήκη, και διάμετροι,
 - προσδιορισμός της γραμμής αναφοράς,
 - κατακόρυφη και οριζόντια θέση του κάθε εδράνου σε σχέση με την γραμμή αναφοράς,
 - χαρακτηριστικά εδράνων: υλικά, μήκη, διάκενο και ακαμψία.
- Παράμετροι που χρησιμοποιούνται:
 - Μετατόπιση των εδράνων λόγω παραμορφώσεων της γάστρας για διάφορες καταστάσεις φόρτωσης,
 - υδροδυναμικές φορτίσεις της έλικας,
 - το βάρος και την επίδραση της άντωσης της έλικας,
 - ισχύς Κύριας Μηχανής και ταχύτητα περιστροφής,
 - θερμική διαστολή της κύριας μηχανής,
 - τοποθεσία των καμπυλών φορτίου – ανύψωσης.
- Περιορισμοί (μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο στα έδρανα, κτλ.)
- Αποτελέσματα:
 - Συντελεστές επιρροής των εδράνων,
 - προσδοκώμενες αντιδράσεις στήριξης των εδράνων για ένα εύρος καταστάσεων φόρτωσης του πλοίου,
 - προσδοκώμενες μετατοπίσεις των αξόνων, διατμητικές δυνάμεις και ροπές για ένα εύρος καταστάσεων φόρτωσης του πλοίου,
 - τιμές πτώσης και ανοίγματος φλαντζών (SAG-GAP),
 - συντελεστές διορθώσεις καμπύλη φορτίου – ανύψωσης.

Τα αποδεκτά επιτρεπόμενα όρια των ανωτέρω αποτελεσμάτων που αφορούν τις αντιδράσεις των εδράνων, είναι πανομοιότυπα για όλους σχεδόν τους νηογνώμονες.

Τέλος, οι κύριες απαιτήσεις για τη στατική ανάλυση, σύμφωνα με τον ABS (2014) [13], παρουσιάζονται παρακάτω:

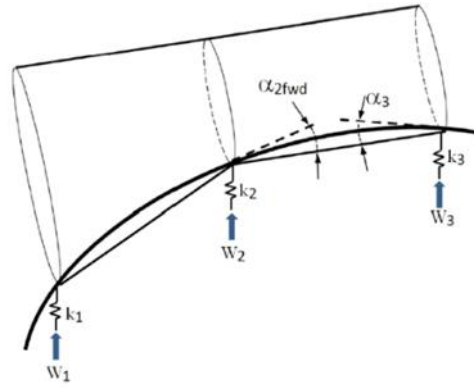
- Όλα τα έδρανα πρέπει να είναι θετικά φορτισμένα (με θετικό φορτίο να σημαίνει στήριξη του άξονα),
- τα φορτία των εδράνων των ενδιάμεσων αξόνων δεν πρέπει να υπερβαίνουν το 80% των μέγιστων αποδεκτών φορτίσεων που καθορίζουν οι κατασκευαστές,
- η σχετική κλίση μεταξύ του ελικοφόρου άξονα και της γραμμής αναφοράς δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 0.3 mm/m,
- το μήκος των εδράνων δεν πρέπει να είναι μικρότερο από το διπλάσιο της διαμέτρου του άξονα. Το μήκος των εδράνων μπορεί να είναι μικρότερο από αυτό με την προϋπόθεση ότι η ονομαστική πίεση στα έδρανα δεν είναι μεγαλύτερη από 0,8 N/mm² για τα μεταλλικά έδρανα και 0,6 N/mm² για τα έδρανα που αποτελούνται σύνθετα υλικά,
- το υλικό που επιλέγεται για τους άξονες δεν πρέπει να έχει μικρότερη από 400 N/mm² αντοχή σε εφελκυσμό.

3.2.2 Απευθυγράμμιση εδράνων

Μία βασική παράμετρος που ελέγχεται από τους νηογνώμονες είναι η απευθυγράμμιση μεταξύ των αξόνων και των εδράνων. Αν και ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην κατάσταση που βρίσκεται το πρυμναίο έδρανο χοάνης, ωστόσο ελέγχεται και η κατάσταση που βρίσκονται και τα υπόλοιπα έδρανα.

Όσον αφορά το πρυμναίο έδρανο χοάνης, όπως αναφέραμε οι περιορισμοί που εφαρμόζονται, αφορούν την σχετική γωνία που μπορεί να υπάρξει μεταξύ ελικοφόρου άξονα και εδράνου, η οποία είναι ανάλογη με τις διαστάσεις τους. Αυτή η γωνία δεν πρέπει να υπερβαίνει σε καμία περίπτωση την αναλογία, ακτινικό διάκενο του εδράνου επί το μήκος του. Αν προκύψει αποτέλεσμα αποδεκτό, κατόπιν του ανωτέρω υπολογισμού, εφαρμόζεται αυτή η κλίση στο έδρανο. Ωστόσο, πολλοί από τους νηογνώμονες προτείνουν ότι πρέπει να γίνει χρήση περισσότερων κεκλιμένων επιπέδων στην εσωτερική επιφάνεια του πρυμναίου άκρου, διότι, το πρυμναίο έδρανο χοάνης είναι συνήθως αρκετά μακρύ, και η κάμψη του άξονα μπορεί να είναι σημαντική εντός αυτού του μήκους.

Στο **Σχήμα 3.1** απεικονίζεται η διάταξη του πρυμναίου εδράνου με διπλό κεκλιμένο επίπεδο.



Σχήμα 3. 1: Διάταξη πυρμαίου εδράνου, διπλού κεκλιμένου επιπέδου. [15]

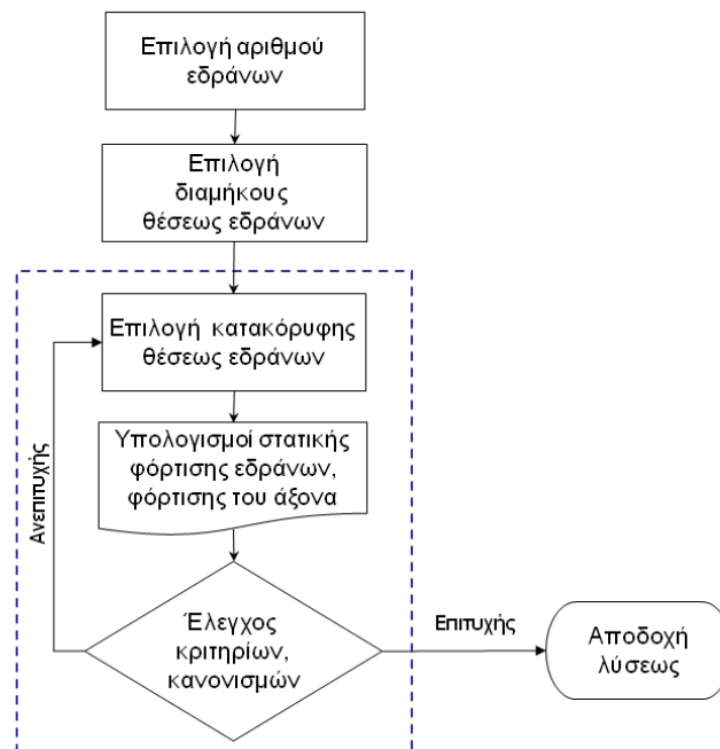
3.3 Διαδικασία πλάνου ευθυγράμμισης

3.3.1 Σχεδιασμός και ανάλυση

Ο σχεδιασμός της ευθυγράμμισης του αξονικού συστήματος, ξεκινά με την επιλογή του αριθμού και της θέσης των εδράνων κατά μήκος του άξονα.

Το πρώτο στάδιο θεωρεί όλα τα έδρανα στην ίδια κατακόρυφη θέση (μηδενική κατακόρυφη μετατόπιση ως προς τη γραμμή αναφοράς) και έτσι υπολογίζονται οι αντιδράσεις στήριξης τους. Ταυτόχρονα, προσδιορίζεται η ελαστική γραμμή του άξονα, υπολογίζονται οι παραμορφώσεις του και οι τάσεις του και λαμβάνουν τιμή και οι συντελεστές επιρροής.

Κατόπιν, έκαστο έδρανο μετατοπίζεται κατακόρυφα, έως να επιτευχθεί το επιθυμητό πλάνο ευθυγράμμισης. Ουσιαστικά, πρόκειται για μια επαναληπτική διαδικασία με την χρήση των συντελεστών επιρροής (Σχήμα 3.2). Στο τέλος της παραπάνω διαδικασίας, υπολογίζεται η κλίση που πρέπει να εφαρμοστεί στο πρυμναίο έδρανο χοάνης και οι τιμές των SAG - GAP (πτώσεις και ανοίγματα φλαντζών) για όλους τους άξονες.



Σχήμα 3. 2: Αλγόριθμος υπολογισμού αριθμού και θέσης εδράνων του αξονικού συστήματος.

3.3.1.1 Συντελεστές επιρροής

Για ένα συγκεκριμένο αριθμό εδράνων και δεδομένη την διαμήκη θέση τους πάνω σε εύκαμπτο άξονα, η κάθετη μετατόπιση ενός μόνο εδράνου, από αυτά, θα επηρεάσει την κατανομή των αντιδράσεων στήριξης όλων των εδράνων. Ο υπολογισμός των αντιδράσεων στήριξης για κάθε σύνολο κατακόρυφων μετατοπίσεων, διευκολύνεται σε μεγάλο βαθμό από την εισαγωγή και τη χρήση συντελεστών επιρροής.

Ο συντελεστής επιρροής του εδράνου i επί του εδράνου j είναι ένα μέτρο της μεταβολής της αντίδρασης στήριξης του εδράνου j , που προκαλείται από μία κάθετη μετατόπιση του φέροντος στοιχείου i .

Επομένως, μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$\sigma_{ij} = \frac{R_{ij} - R_j^0}{y_i} \quad [\text{EQ.3-1}]$$

Όπου:

- σ_{ij} είναι ο συντελεστής επιρροής του εδράνου i στο έδρανο j ,
- R_{ij} είναι η αντίδραση στήριξης του εδράνου j , όταν το έδρανο i έχει μετατοπιστεί κατακόρυφα σε απόσταση y_i ,
- R_j^0 είναι η αντίδραση στήριξης του εδράνου j , όταν όλα τα έδρανα έχουν μηδενική κατακόρυφη μετατόπιση,

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω εξίσωση, μπορεί να γίνει η οποιαδήποτε πρόβλεψη των η αντιδράσεων στήριξης για ένα εύρος κατακόρυφων μετατοπίσεων, πολύ πιο εύκολα, αφού πρώτα υπολογιστούν όλοι οι συντελεστές επιρροής:

$$R_{ij} = R_j^0 + \sigma_{ij} \cdot y_i \quad [\text{EQ.3-2}]$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι μπορεί να γίνει η υπέρθεση της παραπάνω εξίσωσης, μιας και οι κατακόρυφες μετατοπίσεις που επιβάλλονται στα έδρανα (μερικά χιλιοστά του μέτρου) είναι μηδαμινά μπροστά στην απόσταση μεταξύ των εδράνων (μερικά μέτρα). Επομένως, η δύναμη αντίδρασης του εδράνου j για οποιαδήποτε δεδομένη συνθήκη είναι:

$$R_{ij} = R_j^0 + \sum_{i=1}^N \sigma_{ij} \cdot y_i \quad [\text{EQ.3-3}]$$

Τέλος, οι συντελεστές επιρροής ορίζουν την ευαισθησία του πλάνου ευθυγράμμισης σε εξωτερικές διαταραχές. Αυτό που επιδιώκουμε είναι η επίτευξη χαμηλών τιμών στους συντελεστές επιρροής για να μην υπάρχουν μεγάλες διακύμανσης των αντιδράσεων στήριξης των εδράνων.

3.3.2 Εφαρμογή και μετρήσεις

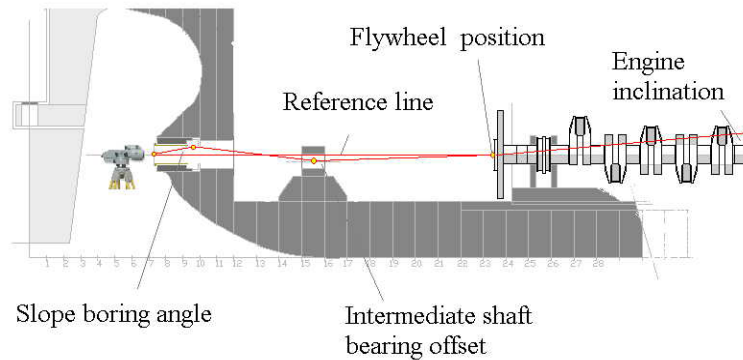
Η διαδικασία της ευθυγράμμισης αποτελείται από το σχεδιασμό, την ανάλυση, τη εφαρμογή και τις μετρήσεις. Η εφαρμογή αποτελεί μια αλληλουχία διαδικασιών που ορίζονται σύμφωνα με τις απαιτήσεις του σχεδιαστή. Το στάδιο αυτό της διαδικασίας της ευθυγράμμισης το αξονικού δεν έχει κάποιο συγκεκριμένο πρότυπο στη βιομηχανία. Η εφαρμογή εξαρτάται από τις πρακτικές των ναυπηγείων, τις εμπειρίες και ακόμη περισσότερο από το πρόγραμμα παραγωγής του συγκεκριμένου κατασκευαστή. Γενικά η εφαρμογή του πλάνου ευθυγράμμισης μπορεί να συνοψιστεί στις ακόλουθες δραστηριότητες:

1. Ορισμός γραμμής αναφοράς,
2. εφαρμογή κλίσης στο πρυμναίο έδρανο χοάνης,
3. αρχική απευθυγράμμιση της μηχανής,
4. μέθοδος ανοίγματος και πτώσης φλαντζών,
5. μετρήσεις αντιδράσεων,
6. αξιολόγηση της απευθυγράμμισης των εδράνων και αξόνων,
7. αξιολόγηση της εκκεντρότητας του άξονα,
8. τελική μετατόπιση των εδράνων των ενδιάμεσων αξόνων.

3.3.2.1 Περιγραφή αλληλουχίας

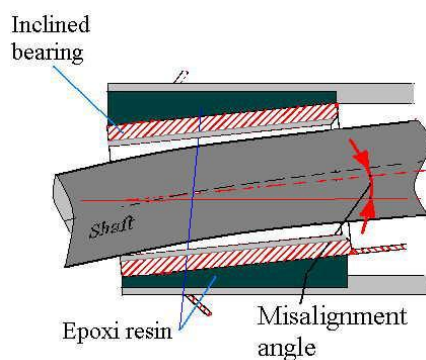
Η εφαρμογή του πλάνου ευθυγράμμισης αναμένεται να ξεκινήσει όταν, πλέον, όλα τα μπλοκ της πρύμνης του πλοίου είναι πλήρως συγκολλημένα καθώς και όλη η βαριά δομή της είναι στη θέση της. Πρώτα, ορίζεται η γραμμή αναφοράς για την ευθυγράμμιση των διαφόρων στοιχείων του αξονικού συστήματος (**Σχήμα 3.3**). Η διαδικασία ορισμού της γραμμής αναφοράς ολοκληρώνεται όταν εφαρμοστεί, αν προβλέπεται, η κλίση στο πρυμναίο έδρανο χοάνης. Μετά το πέρας της παραπάνω διαδικασίας, το πλοίο είναι έτοιμο για την

τοποθέτηση των αξόνων, την εγκατάσταση της έλικας και τη συναρμολόγηση του συστήματος (συνδέεται ο κινητήρας και το κιβώτιο ταχυτήτων).

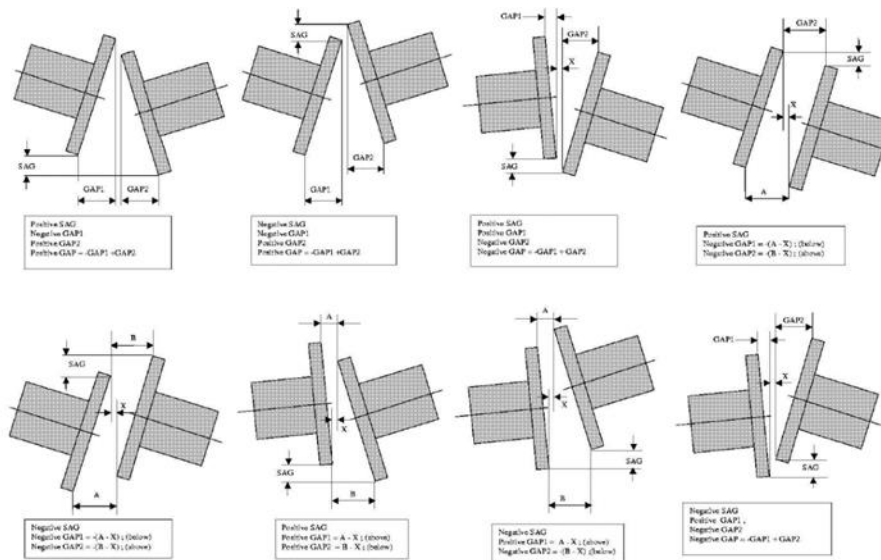


Σχήμα 3. 3: Ευθυγράμμιση αξονικού συστήματος. Ορισμός γραμμής αναφοράς.

Η μεταφορά και η τοποθέτηση των αξόνων στα σημεία του αξονικού συστήματος πρόκειται για μια πολύπλοκη σειρά ενεργειών, λόγω των διαστάσεων τους και του βάρους τους. Όταν οι άξονες είναι τοποθετημένοι στη θέση τους, ξεκινάει η διαδικασία της συναρμολόγησης, όπου, χρησιμοποιούνται πρόσθετα (προσωρινά) έδρανα για την διευκόλυνση της εφαρμογής. Επόμενο βήμα, είναι η εφαρμογή της έλικας με τον ελικοφόρο άξονα. Στον ελικοφόρο άξονα αφού τοποθετηθεί η έλικα, ασκείται, στο εμπρόσθιο άκρο του, φορτίο για να διατηρηθεί ο άξονας σε επαφή με το πρωαίο έδρανο χοάνης και να γίνει η συναρμολόγηση. Πριν από τη συναρμολόγηση του αξονικού συστήματος είναι συνήθη πρακτική, να ελέγχει το ναυπηγείο την κατάσταση ευθυγράμμισης με τη διεξαγωγή της διαδικασία ‘πτώσης και ανοίγματος φλαντζών’ (sag and gap).



Σχήμα 3. 4: Εφαρμογή κλίσης στο πρυμαίο έδρανο χοάνης [15]



Σχήμα 3. 5: Διάφορες περιπτώσεις διάταξης κατά τη διαδικασία sag and gap. [15]

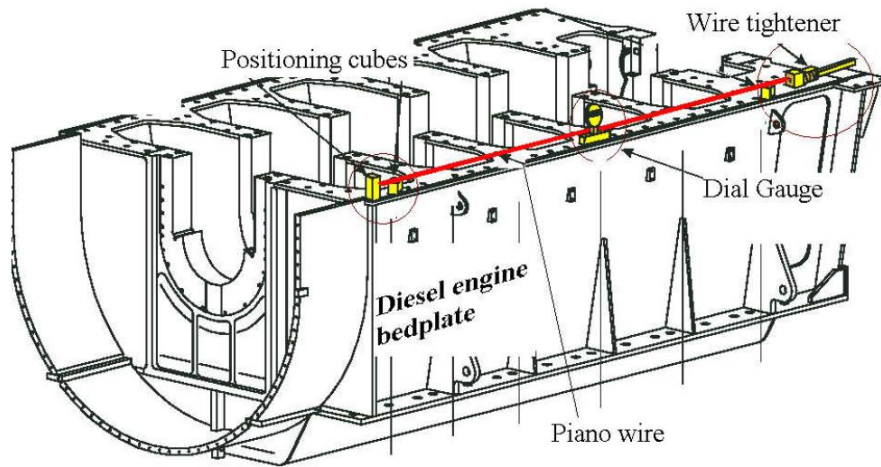
Μετά τη συναρμολόγηση είναι απαραίτητο να μετρηθούν οι αντιδράσεις των εδράνων ώστε να επιβεβαιωθεί η κατάλληλη εφαρμογή του σχεδίου ευθυγράμμισης. Συγκεκριμένα, μετρούνται οι αντιδράσεις των εδράνων και οι κλίσεις των αξόνων στα σημεία έδρασης. Οι αντιδράσεις των εδράνων μπορούν να μετρηθούν είτε άμεσα είτε έμμεσα. Γίνεται αξιολόγηση των μετατοπίσεων, λόγω ανακούφισης, τόσο στα έδρανα όσο και στους άξονες και ελέγχεται η εκκεντρότητα του άξονα. Αν κριθεί απαραίτητο γίνεται ρύθμιση εκ νέου της μετατόπισης των εδράνων των ενδιάμεσων αξόνων και επαναλαμβάνεται η διαδικασία μέχρι την επίτευξη επιθυμητών αποτελεσμάτων.



Σχήμα 3. 6: Μέτρηση αντιδράσεων με υδραυλικό γρύλο και ωρολογιακό μικρόμετρο. [15]

Τέλος, αναφέρεται ότι στην κατάσταση δεξαμενισμού του πλοίου, επιπλέον, πραγματοποιείται προμελετημένη απευθυγράμμιση των εδράνων βάσης της Κύριας Μηχανής (pre-sagging) με βάση τα στοιχεία του κατασκευαστή της. Η απευθυγράμμιση αυτή αναμένεται να εκμηδενιστεί σε καταστάσεις πλεύσεις λόγω των σχετικών παραμορφώσεων

της γάστρας του πλοίου και της κατακόρυφης μετατόπισης των εδράνων βάσης του κινητήρα λόγω θερμικών διαστολών.



Σχήμα 3. 7: Αρχική απευθυγράμμιση της Κύριας Μηχανής. [15]

4.1.1 Συνθήκες λειτουργίας

Κατά την λειτουργία του μηχανισμού μεταξύ των δύο επιφανειών δημιουργείται μια στρώση λιπαντικού μεγάλου πάχους (thick-film lubrication), που ονομάζεται υδροδυναμικό φιλμ λαδιού, και έτσι οι επιφάνειες δεν έρχονται σε επαφή. Τα ακτινικά έδρανα δεν στηρίζονται πάντοτε σε αυτό το υδροδυναμικό φαινόμενο. Κατά την εκκίνηση και το τερματισμό της λειτουργίας του μηχανισμού, όταν δηλαδή, η ταχύτητα περιστροφής του άξονα είναι ανεπαρκής και δεν υποστηρίζονται οι συνθήκες του φαινομένου, τότε προκειμένου να μην έρθουν σε επαφή οι δύο επιφάνειες χρησιμοποιείται εξωτερική τροφοδότηση λαδιού με πίεση για να ανυψωθεί ο άξονας.

Το υδροδυναμικό φιλμ του λαδιού που δημιουργείται βοηθάει το έδρανο να στηρίζει εξαιρετικά υψηλού μεγέθους φορτία και ταυτόχρονα να λειτουργεί σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής (επιφανειακές ταχύτητες μέχρι 250 μέτρα ανά δευτερόλεπτο). Το ελάχιστο πάχος του φιλμ (h₀) κυμαίνεται από 1 έως 300 μικρά, με πιο συνηθισμένες τιμές, για τον βιομηχανικό εξοπλισμό, 5 έως 75 μικρά. Γενικά, η τιμή αυξάνεται καθώς η διάμετρος του άξονα μεγαλώνει. Τέλος, οι πιέσεις κυμαίνονται από 0.7 MPa έως 2.1 MPa. [17]

4.1.2 Υλικά κατασκευής

Τα υλικά των εδράνων πρέπει να είναι ικανά να καλύπτουν ορισμένες απαιτήσεις, οι οποίες είναι περιστασιακά αντιφατικές. Για παράδειγμα, πρέπει να μπορούν να παραμορφώνονται, ώστε να συμμορφώνονται στην περίπτωση ατελούς ευθυγράμμισης ή στην περίπτωση παραμορφώσεων του άξονα, αλλά ταυτόχρονα πρέπει να είναι αρκετά σκληρά για να αποτραπεί η φθορά και η κόπωση. Για τα ακτινικά έδρανα ολίσθησης υψηλού φορτίου που χρησιμοποιούνται σε βαρέως τύπου ναυτικούς κινητήρες, όπου η κόπωση παίζει σημαντικό ρόλο, τα έδρανα είναι χαλύβδινα με ενισχυμένα χάλκινα υλικά επένδυσης. Σε περιπτώσεις όπου οι προδιαγραφές δεν είναι αυστηρές όσον αφορά την παράμετρο της κόπωσης, χρησιμοποιούνται υλικά αλουμινίου που υποστηρίζονται από χάλυβα χωρίς επικαλύψεις.

Η διαδικασία επιλογής επικάλυψης συμβαδίζει με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Σε κινητήρες με καλές ανοχές άξονα, καλά συστήματα φιλτραρίσματος και καθαρές διαδικασίες κατασκευής μπορούν να χρησιμοποιηθούν πιο σκληρές επικαλύψεις. Οι επικαλύψεις αλουμινίου-κασσίτερου παρέχουν την απόλυτη αντοχή στη φθορά και την κόπωση αλλά με πάρα πολύ υψηλό κόστος. Συνηθέστερες είναι οι επικαλύψεις με ηλεκτρόλυση από μολύβδινο-χαλκό και μολύβδο-ίνδιο μιας και είναι πιο οικονομικές. Τέλος, πρόσφατα δοκιμάστηκαν οι ηλεκτρολυτικές επικαλύψεις με κεραμικά σωματίδια σκληρής φάσης,

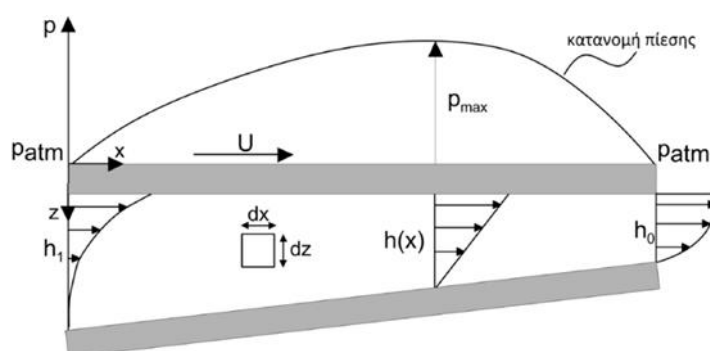
επιτυγχάνοντας υψηλές προδιαγραφές ενώ τα επίπεδα κόστους είναι ίδια με εκείνων της ηλεκτρολυτικής επίστρωσης και του ψεκασμού. [18]

4.2 Υδροδυναμική λίπανση

4.2.1 Θεωρία υδροδυναμικής λίπανσης

Ο Osborne Reynolds το 1886 ήταν αυτός που χρησιμοποίησε για πρώτη φορά την θεωρία της υδροδυναμικής λίπανσης, ενώ ο Beauchamp Tower έκανε τα πρώτα πειράματα. Τα ωστικά έδρανα των Michell και Kingsbury ήταν τα πρώτα υδροδυναμικά έδρανα λίπανσης, τα οποία κατασκευάστηκαν στις αρχές του 20ου αιώνα.

Η υδροδυναμική λίπανση είναι το φαινόμενο, στο οποίο δυο μη παράλληλες επιφάνειες είναι σε κίνηση μεταξύ τους και διαχωρίζονται από ένα υδροδυναμικό στρώμα λιπαντικού υπό πίεση (Σχήμα 4.2). Μεταξύ των δύο επιφανειών το λιπαντικό κινείται με μια ορισμένη ταχύτητα. Το γεγονός ότι οι δύο επιφάνειες είναι μη ευθυγραμμισμένες και σε μια σχετική κίνηση οδηγεί στην παραγωγή του υδροδυναμικού στρώματος. Το λιπαντικό, συνήθως, είναι υψηλού ιξώδους, επιτρέπει τη διάδοση των δυνάμεων, χωρίς να έρθουν σε επαφή οι επιφάνειες, με αποτέλεσμα να υπάρχουν ελάχιστες απώλειες λόγω τριβής, να υπάρχει μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας καθώς και σημαντική μείωση του ρυθμού φθοράς.



Σχήμα 4.2: Δημιουργία υδροδυναμικής πίεσης στην περίπτωση ενός απλού ολισθητή. Η άνω επιφάνεια κινείται οριζόντια με ταχύτητα U , ενώ η κάτω επιφάνεια είναι ακίνητη [19]

Κατά τη διάρκεια αυτής της κίνησης του άξονα στο έδρανο, δημιουργείται ένα πεδίο πίεσης στο ρευστό λόγω της πρόσδοσης ενέργειας στο λιπαντικό από τον περιστρεφόμενο άξονα. Αυτό φυσικά συμβαίνει όταν η ταχύτητα περιστροφής υπερβεί κάποια κρίσιμη ταχύτητα. Το πεδίο πιέσεων που αναπτύσσεται στις επιφάνειες εδράνου και άξονα έχει την ικανότητα να υποστηρίζει ένα αρκετά μεγάλο φορτίο που εφαρμόζεται από τον άξονα καθώς και την δυνατότητα να κρατάει σε απόσταση τις δυο επιφάνειες. Για την δημιουργία της υδροδυναμικής λίπανσης δεν χρειάζεται η εισαγωγή ρευστού υπό πίεση (αν και συμβαίνει), αλλά πρέπει να υπάρχει αέναη τροφοδοσία με λιπαντικό. [16]

Το φαινόμενο της υδροδυναμική λίπανση μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά με τη μορφή της «εξίσωση Reynolds». Υπάρχουν διάφοροι τρόποι που είναι δυνατόν να προκύψει αυτή η εξίσωση. Ένας τρόπος είναι μέσω της εξίσωσης Navier-Stokes και της εξίσωσης συνέχειας. Ωστόσο, πιο συχνά προκύπτει μέσω της απλής θεώρησης του ισοζυγίου δυνάμεων και της εφαρμογής της εξίσωσης συνέχειας της ροής σε στοιχειώδη όγκο του ρευστού που υπόκειται σε διάτμηση.

Συνοψίζοντας, για να χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση Reynolds και για να εκφράσουμε μαθηματικά τις αρχές της υδροδυναμικής λίπανσης των ακτινικών εδράνων, οι βασικές συνθήκες που πρέπει να ισχύουν είναι:

- Το λιπαντικό να είναι Νευτώνιο ρευστό,
- οι δυνάμεις που προκαλούνται από την αδράνεια του λιπαντικού να είναι αμελητέες συγκριτικά με δυνάμεις συνοχής,
- οι βαρυτικές δυνάμεις να μπορούν να παραληφθούν,
- το λιπαντικό να είναι ασυμπίεστο,
- το ιξώδες να είναι χωρικά σταθερό,
- η ροή του λιπαντικού να είναι σταθερή,
- η εσωτερική διάμετρος του εδράνου σε αναλογία με την ακτινική χάρη να απειρίζεται.

4.2.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ακτινικών εδράνων

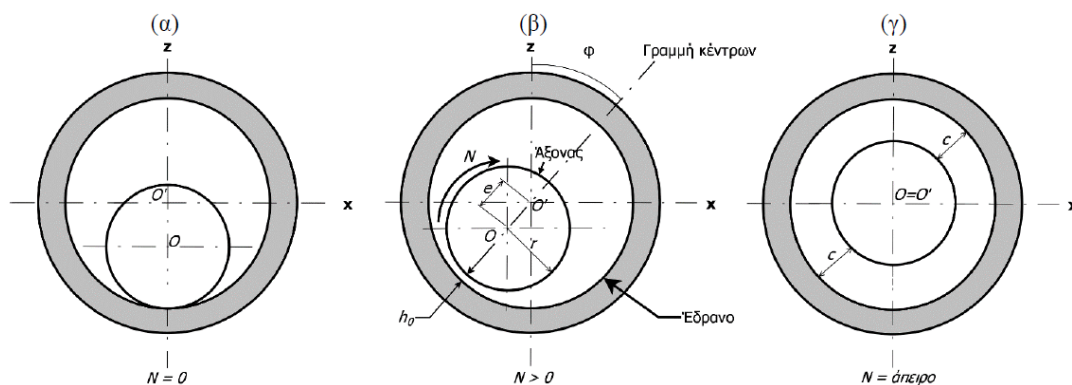
Στο **Σχήμα 4.3**, παρουσιάζεται η τομή ενός τυπικού ακτινικού εδράνου για τρεις διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας του άξονα, με τα εξής γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

- Διάμετρος εδράνου, D ,
- διάμετρος άξονα, d ,
- ακτίνα εδράνου, R ,
- ακτίνα άξονα, r ,
- ακτινική χάρη c , (η διαφορά μεταξύ των ακτίνων εδράνου και άξονα),
- ταχύτητα περιστροφής, N ,
- δυναμικό ιξώδες λιπαντικού, η ,
- ελάχιστο πάχος λιπαντικού, h_0 ,
- γωνία συμπεριφοράς, ϕ (γωνία που σχηματίζει η διάμετρος του άξονα που διέρχεται από τη θέση με το ελάχιστο πάχος λιπαντικού με τον άξονα z),

- εκκεντρότητα του άξονα κατά την ισορροπία του, e (η απόσταση του κέντρου του άξονα από το κέντρο του εδράνου).

Η πρώτη κατάσταση (**Σχήμα 4.3.(α)**) είναι για μηδενική ταχύτητα περιστροφής του άξονα ($N=0$). Σε αυτή την κατάσταση, προφανώς, δεν δημιουργείται υδροδυναμικό στρώμα για να ανασηκωθεί ο άξονας με αποτέλεσμα την απόλυτη επαφή μεταξύ των επιφανειών εδράνου- άξονα. Η δεύτερη κατάσταση (**Σχήμα 4.3.(β)**) που εξετάζεται, έχει μια θετική ταχύτητα περιστροφής του άξονα ($N>0$). Όταν υπάρχει αρκετή ποσότητα λιπαντικού στο έδρανο, η ταχύτητα περιστροφής του άξονα ωθεί το λιπαντικό στο διάκενο κατά την φορά περιστροφής του και έτσι το λιπαντικό οδηγεί τον άξονα στην αντίθετη πλευρά. Η διαδικασία αυτή ουσιαστικά παράγει ένα στρώμα λιπαντικού που σε κάποιες θέσεις έχει ελάχιστο πάχος h_0 . Οι θέσεις αυτές συνήθως δεν είναι στο κάτω μέρος του εδράνου αλλά μετατοπισμένες κατά την φορά περιστροφής και καθορίζονται από την ισορροπία δυνάμεων στο κατακόρυφο και οριζόντιο άξονα.

Επιπλέον, στην κατάσταση αυτή ορίζεται και η εκκεντρότητα του άξονα σχετικά με το κέντρο του εδράνου. Τέλος, αναφέρεται (**Σχήμα 4.3.(γ)**), και η κατάσταση όπου η ταχύτητα περιστροφής του άξονα τείνει στο άπειρο ($N \rightarrow \infty$). Σε αυτή την περίπτωση, η υδροδυναμική πίεση γίνεται πολύ μεγάλη οπότε ο άξονας και το έδρανο αποκτούν κοινό κέντρο ($O=O'$) καθώς η εκκεντρότητα είναι μηδενική. Στην φάση αυτή γίνεται κατανοητή η έννοια της ακτινικής χάρης c όπου ορίζεται ως $c=R-r$ και ισχύει $0 < h_0 < c$.



Σχήμα 4. 3: Εγκάρσια τομή του συστήματος εδράνου-άξονα για διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας.

4.3 Υπολογισμός ακτινικών εδράνων ολίσθησεως με χρήση

διαγραμμάτων Raimondi και Boyd

Για τον υπολογισμό των διάφορων χαρακτηριστικών των εδράνων ολίσθησεως με υδροδυναμική λίπανση υπολογίζονται οι λύσεις της εξίσωσης Reynolds, όπως αυτές προτάθηκαν από τους Raimondi και Boyd, με τη μορφή διαγραμμάτων όπως εμφανίζονται στα ακόλουθα σχήματα.

Αρχικά, για την εξαγωγή δεδομένων από τα σχετικά διαγράμματα πρέπει να οριστεί ο αριθμός Sommerfeld, ο οποίος είναι αδιάστατος αριθμός και χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά του εδράνου.

$$S = \left(\frac{R}{c}\right)^2 \cdot \left(\eta \cdot \frac{N}{p_m}\right) \quad [\text{EQ.4-1}]$$

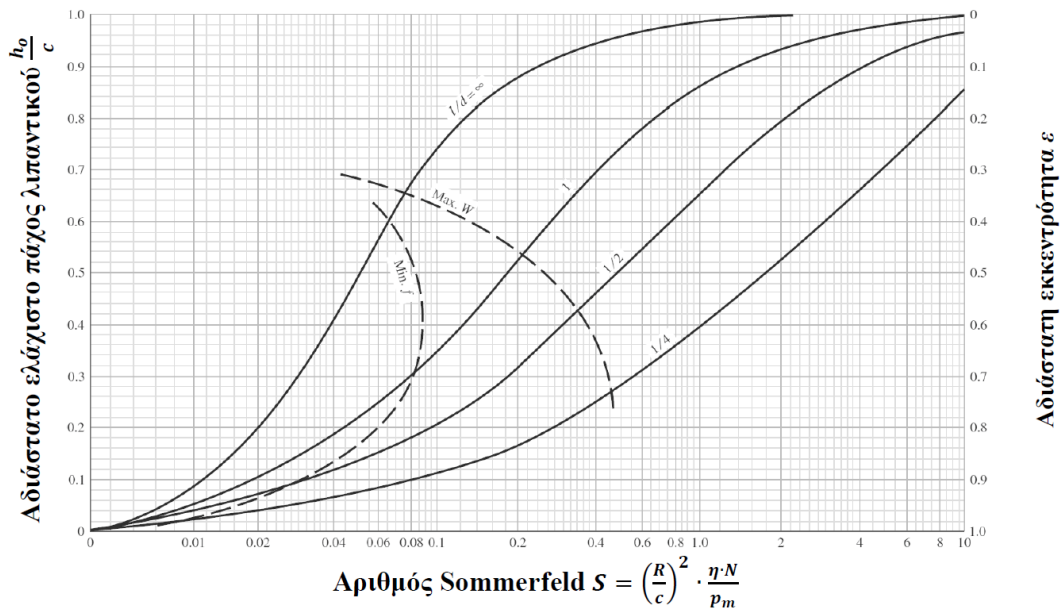
Όπου:

- $p_m = \frac{p}{2 \cdot R \cdot L}$, η μέση πίεση του εδράνου,
- p , το εγκάρσιο φορτίο του εδράνου

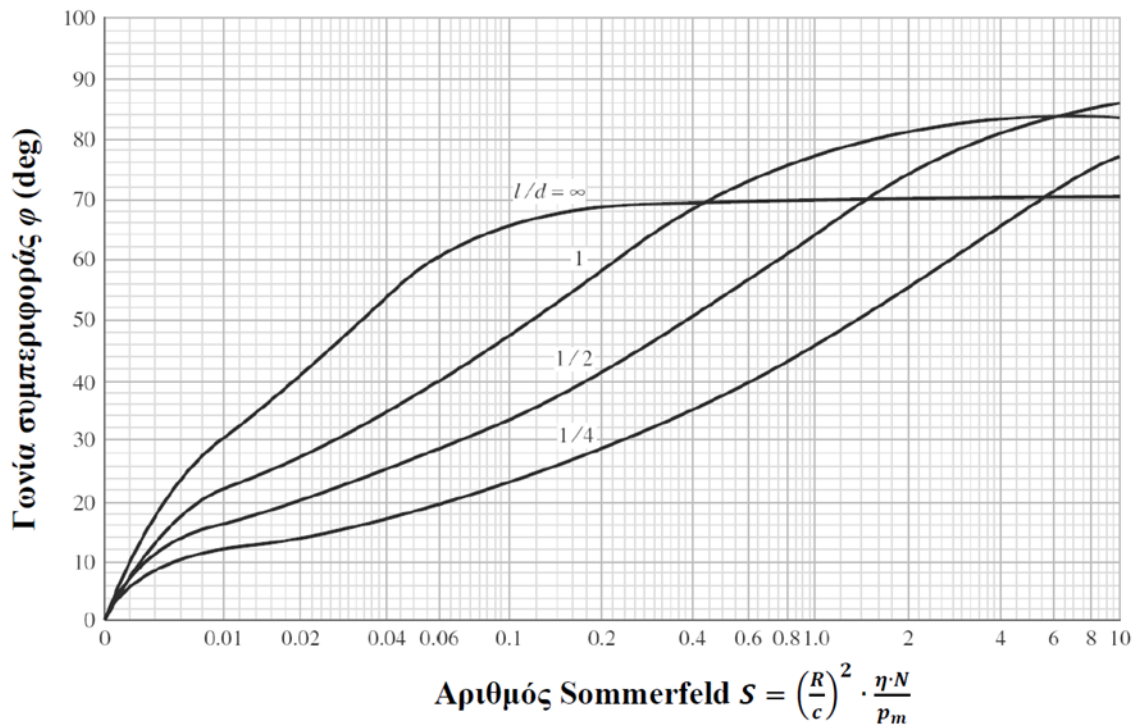
4.3.1 Υπολογισμός αδιάστατης εκκεντρότητας, ε , και γωνίας συμπεριφοράς, φ

Στο **Σχήμα 4.4** υπολογίζεται ο λόγος του ελάχιστου πάχους του λιπαντικού προς την ακτινική χάρη h_0/c και η αδιάστατη εκκεντρότητα $\varepsilon=e/c$, σε συνάρτηση με τον αριθμό Sommerfeld, για ένα εύρος τιμών του λόγου μήκους προς διάμετρο L/D του εδράνου. Από το **Σχήμα 4.5** υπολογίζεται η γωνία συμπεριφοράς φ και έτσι εντοπίζεται η θέση στην οποία βρίσκεται το ελάχιστο πάχος λιπαντικού (**Σχήμα 4.3**). Επιπλέον, φαίνεται ότι για υψηλές τιμές του αριθμού Sommerfeld (είτε μικρά φορτία είτε μεγάλες ταχύτητες περιστροφής), η αδιάστατη εκκεντρότητα έχει τιμές σχεδόν μηδενικές, ενώ για χαμηλές τιμές του αριθμού Sommerfeld, η αδιάστατη εκκεντρότητα έχει πολύ μεγάλες τιμές (δηλαδή, ο άξονας προσεγγίζει το έδρανο και ελαττώνεται το ελάχιστο πάχος του λιπαντικού). Στην περίπτωση, κατά την οποία ο άξονας έχει επαφή με το έδρανο, ισχύει ότι $h_0=0$ και συνεπώς $\varepsilon=c$, επομένως $\varepsilon=1$. Σε ενδιάμεσες θέσεις άξονα ισχύει:

$$h_0 = c - e = c - \varepsilon \cdot c \rightarrow \frac{h_0}{c} = 1 - \varepsilon \quad [\text{EQ.4-2}]$$



Σχήμα 4. 4: Αδιάστατο ελάχιστο πάχος λιπαντικού h_0/c και αδιάστατη εκκεντρότητα ε συναρτήσει του αριθμού Sommerfeld S για διαφορετικές τιμές του λόγου μήκους προς διάμετρο L/D του εδράνου [20]

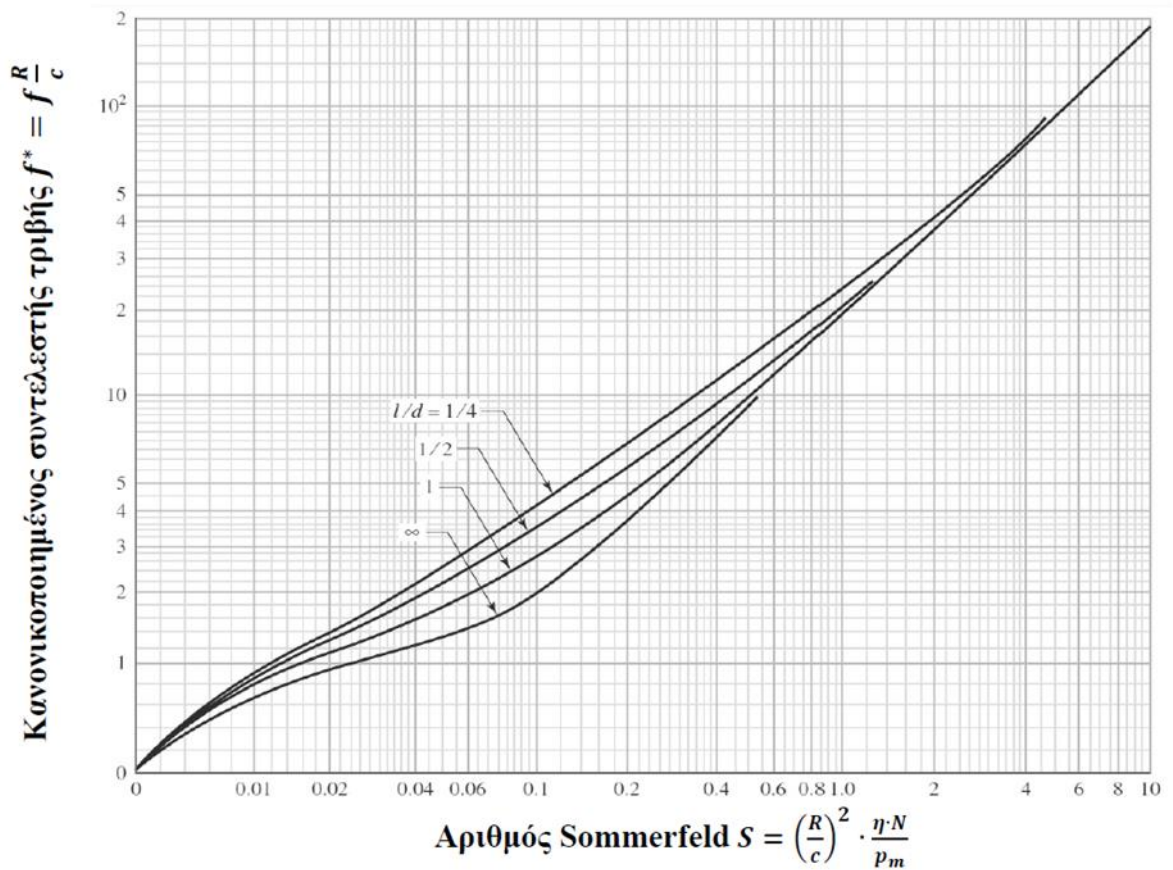


Σχήμα 4. 5: Γωνία συμπεριφοράς, φ , συναρτήσει του αριθμού Sommerfeld, S , για διαφορετικές τιμές του λόγου μήκους προς διάμετρο, L/D , του εδράνου [20]

4.3.2 Υπολογισμός συντελεστή τριβής

Στο Σχήμα 4.6 μπορεί να προσδιοριστεί ο κανονικοποιημένος συντελεστής τριβής $f \cdot R/c$ σε συνάρτηση με τον αριθμό Sommerfeld S , για ένα εύρος τιμών του λόγου μήκους προς διάμετρο L/D του εδράνου, και έτσι υπολογίζεται ο συντελεστής τριβής f . Η στρεπτική ροπή τριβής λαμβάνει τιμές από την σχέση:

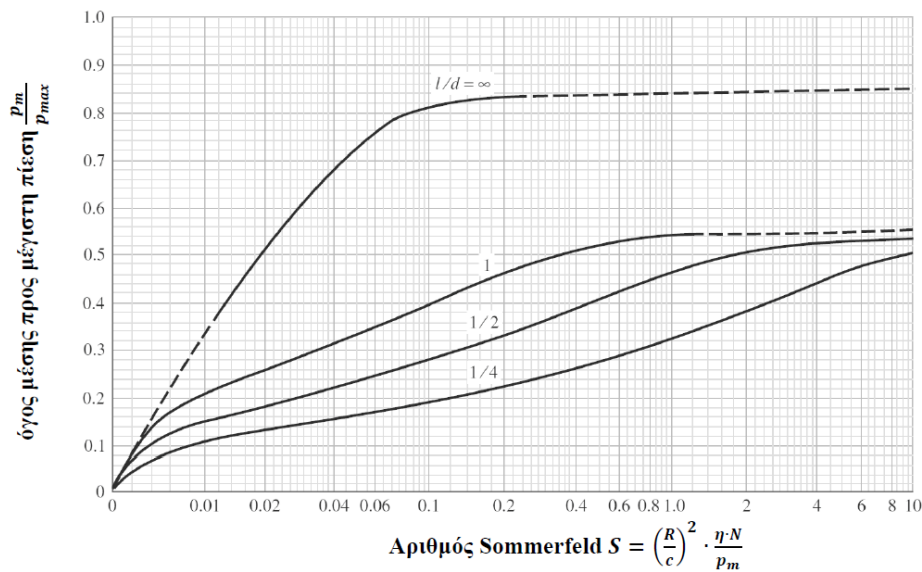
$$T = f \cdot P \cdot r \quad [\text{EQ.4-3}]$$



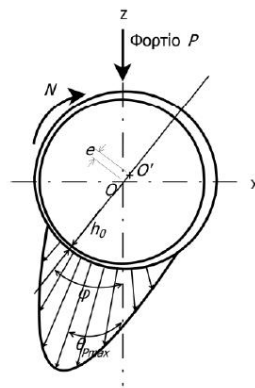
Σχήμα 4. 6: Αδιάστατος συντελεστής τριβής $f \cdot R/c$ συναρτήσει του αριθμού Sommerfeld S για διαφορετικές τιμές του λόγου μήκους προς διάμετρο L/D του εδράνου [20]

4.3.3 Υπολογισμός μέγιστης πίεσης στο λιπαντικό

Στο **Σχήμα 4.7** δίνεται ο λόγος της μέσης πίεσης $p_m = p/(2 \cdot R \cdot L)$ προς την μέγιστη αναπτυσσόμενη πίεση p_{max} του υδροδυναμικού στρώματος, σε συνάρτηση με τον αριθμό Sommerfeld S , για ένα εύρος τιμών του λόγου μήκους προς διάμετρο L/D του εδράνου. Η μέγιστη πίεση στο λιπαντικό μπορεί να υπολογιστεί από αυτόν τον λόγο. Στο **Σχήμα 4.8** φαίνεται η κατανομή της πίεσης σε μια εγκάρσια τομή ενός εδράνου, αλλά και η γωνία μέγιστης πίεσης θ_{pmax} .



Σχήμα 4.7: Λόγος μέσης προς μέγιστης πίεσης του εδράνου συναρτήσει του αριθμού Sommerfeld, S , για διαφορετικές τιμές του λόγου μήκους προς διάμετρο, L/D , του εδράνου [20]



Σχήμα 4.8: Εγκάρσια τομή εδράνου όπου φαίνεται η θέση του ελάχιστου φιλμ λαδιού, η γωνία ϕ , η κατανομή της μέγιστης πίεσης, η εκκεντρότητα, η περιστροφική ταχύτητα και το κατακόρυφο φορτίο P . [20]

5

Ανάλυση και αποτελέσματα

Το παρόν κεφάλαιο ξεκινά με μία εκτεταμένη παρουσίαση της τρισδιάστατη σχεδίασης της γεωμετρίας του συστήματος πρόωσης του υπό μελέτη πλοίου. Εν συνεχεία, ακολουθεί η ανάλυση της στατικής ισορροπίας του αξονικού συστήματος για διάφορες συνθήκες λειτουργίας του πλοίου, ενώ στο τέλος αναλύεται και η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος πρόωσης.

5.1 Κύρια χαρακτηριστικά του υπό μελέτη πλοίου

Η τρισδιάστατη σχεδίαση και ανάλυση του συστήματος πρόωσης βασίζεται σε ένα πραγματικό πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, χωρητικότητας 10,000 TEU. Τα κύρια χαρακτηριστικά του προαναφερθέντος υπό μελέτη πλοίου παρατίθενται παρακάτω στον **Πίνακα 5.1**.

Πίνακας 5. 1: Κύρια χαρακτηριστικά του υπό μελέτη πλοίου

ΤΥΠΟΣ ΠΛΟΙΟΥ	10,000 TEU CONTAINER SHIP
ΜΗΚΟΣ ΜΕΤΑΞΥ ΚΑΘΕΤΩΝ	320.00 Μ
ΠΛΑΤΟΣ	48.20 Μ
ΚΟΙΛΟ	27.20 Μ
ΒΥΘΙΣΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ	13.00 Μ
ΒΥΘΙΣΜΑ ΑΝΤΟΧΗΣ	15.20 Μ
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ	23.80 ΚΝ
ΚΥΡΙΑ ΜΗΧΑΝΗ	MAN B&W 10S90ME-C9.2-TΠ
ΙΣΧΥΣ ΕΞΟΔΟΥ	51,000 kW x 84 RPM
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ ΑΞΟΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	> 50 Μ
ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΝΔΙΑΜΕΣΩΝ ΕΛΡΑΝΩΝ	ΤΡΙΑ (3)
ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΕΛΙΚΑΣ	9.900 Μ
ΧΡΟΝΟΛΟΓΙΑ ΝΑΥΠΗΓΗΣΗΣ	2013

5.2 Δημιουργία τρισδιάστατης γεωμετρίας συστήματος

πρόωσης

Η γεωμετρική αναπαράσταση του συστήματος πρόωσης υλοποιείται στο Inventor της Autodesk και ακολουθεί τα εξής στάδια. Αρχικά, γίνεται η αναζήτηση των απαραίτητων τμημάτων σχεδίασης, σύμφωνα με τα οποία θα μπορέσει να επιτευχθεί η ακριβής προσέγγιση ενός ρεαλιστικού μοντέλου. Στη συνέχεια, αφού γίνει η επιλογή των παραπάνω στοιχείων, ακολουθεί η εύρεση των αναλυτικών και ποιοτικών σχεδίων τους από το υπό μελέτη πλοίο, με σκοπό τη σχεδίαση και τη συναρμολόγησή τους. Ενώ τέλος, πραγματοποιείται ο έλεγχος των χαρακτηριστικών του διαμορφωμένου μοντέλου.

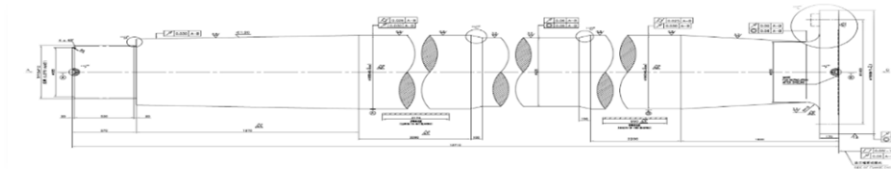
5.2.1 Αναλυτικά και ποιοτικά σχέδια υπό μελέτη πλοίου

Στόχος του μοντέλου που σχεδιάζεται είναι η ρεαλιστική απόκρισή του σε στατικές και δυναμικές διεγέρσεις. Μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί πάνω στη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος πρόωσης, καταλήγουν στην μοντελοποίηση των εξής επιμέρους τμημάτων:

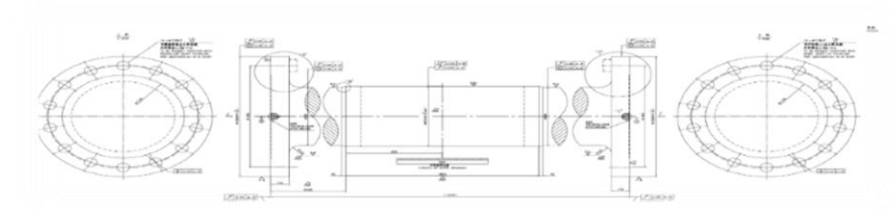
- αξονικό σύστημα
 - ελικοφόρος άξονας
 - ενδιάμεσοι άξονες
 - πρυμναίο και πρωαίο έδρανο χοάνης
 - έδρανα γραμμής
- κύρια μηχανή πρόωσης
 - στροφαλοφόρος άξονας
 - κινηματικός μηχανισμός
 - σφόνδυλος
 - αποσβεστήρας στρεπτικών ταλαντώσεων
 - έδρανα στήριξης στροφαλοφόρου άξονα
- έλικα

Ωστόσο, βασική πηγή πληροφοριών σχετικά με τη γεωμετρία των παραπάνω στοιχείων αποτελούν τα ναυπηγεία. Τα ναυπηγεία έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν στους μελλοντικούς ιδιοκτήτες πληροφορίες και δεδομένα για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (μάζες και ροπές αδρανείας) του πλοίου και των επιμέρους τμημάτων του, καθώς και

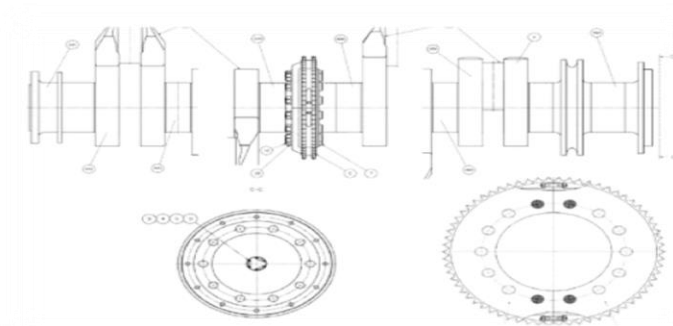
κατασκευαστικά σχέδια. Τα κατασκευαστικά σχέδια κατατάσσονται σε αναλυτικά και ποιοτικά, με τα δεύτερα να υπερτερούν αριθμητικά με μειονέκτημα όμως να μην διαθέτουν τον απαιτούμενο βαθμό λεπτομέρειας που απαιτείται για την επίτευξη μιας ολοκληρωμένης σχεδίασης. Έτσι και στην παρούσα εργασία, προκειμένου να γίνει η αναπαράσταση της γεωμετρίας, χρησιμοποιούνται τα ποιοτικά σχέδια των επιμέρους τμημάτων του συστήματος πρόωσης, τα οποία φαίνονται στα **Σχήματα 5.1-5.5**.



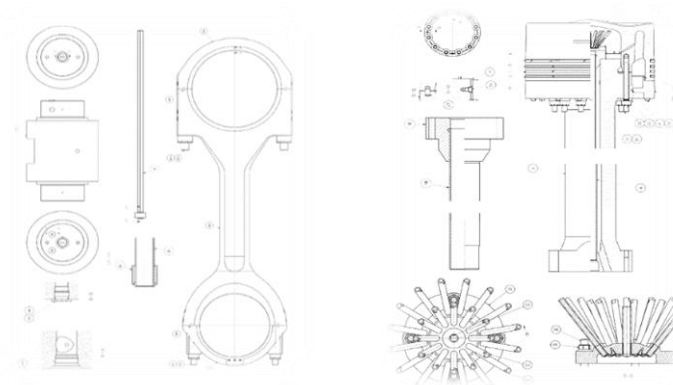
Σχήμα 5. 1: Κατασκευαστικό σχέδιο ελικοφόρου άξονα



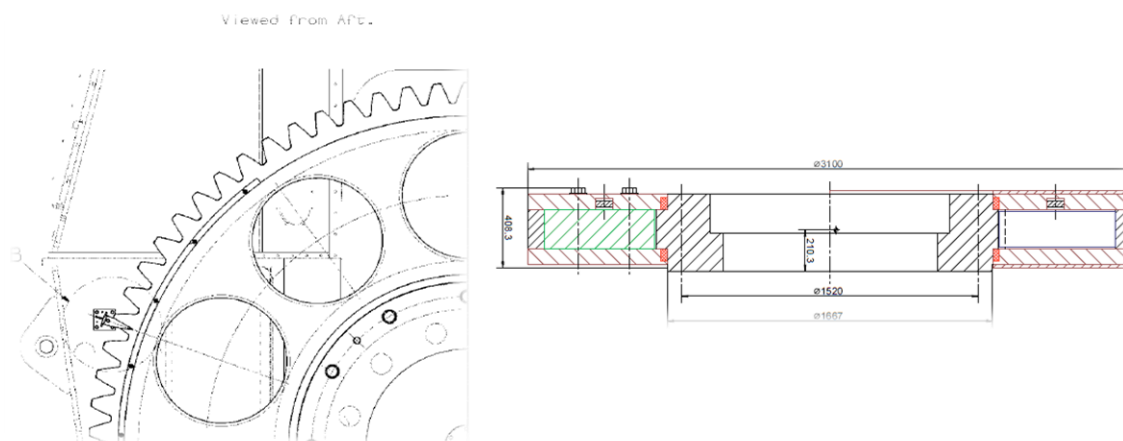
Σχήμα 5. 2: Σχέδιο ενδιάμεσου άξονα no.3, no.2 και no.1



Σχήμα 5. 3: Σχέδιο στροφαλοφόρου άξονα



Σχήμα 5. 4: Σχέδια διωστήρα, ζυγώματος και πιστονιού



Σχήμα 5. 5: Σχέδιο σφονδύλου και αποσβεστήρα στρεπτικών ταλαντώσεων

5.2.2 Αποτελέσματα σχεδίασης

Η προσέγγιση της γεωμετρίας μέσω των ποιοτικών σχεδίων γίνεται με χρήση του λόγου της κάθε διάστασης του εξαρτήματος ως προς μια γνωστή διάσταση πάνω στο σχέδιο. Η συγκεκριμένη διαδικασία ακολουθείται και για τις δύο διαστάσεις του σχεδίου, διότι έχουν διαφορετική κλίμακα.

5.2.2.1 Ελικοφόρος άξονας και ενδιάμεσοι άξονες

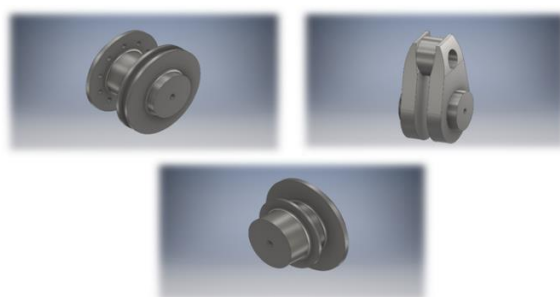
Στα συγκεκριμένα τμήμα του αξονικού συστήματος διατίθενται τα αναλυτικά σχέδια από το ναυπηγείο, καθώς επίσης και το συνολικό τους βάρος. Ως εκ τούτου, η αποτύπωσή τους καθίσταται πιο εύκολη διαδικασία, με αποτέλεσμα την τρισδιάστατη απεικόνιση του ελικοφόρου άξονα και των τριών ενδιάμεσων αξόνων του αξονικού συστήματος του πλοίου που φαίνονται παρακάτω (Σχήμα 5.6).



Σχήμα 5. 6: Ελικοφόρος άξονας και ενδιάμεσοι άξονες no.1, no.2 και no.3

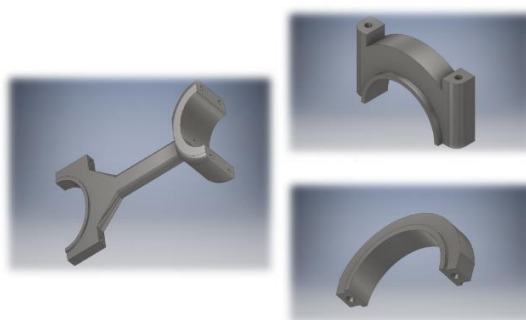
5.2.2.2 Κύρια μηχανή πρόωσης

Το πρώτο στάδιο στη σχεδίαση της κύριας μηχανής είναι η δημιουργία του στροφαλοφόρου άξονα. Η πολύπλοκη γεωμετρία του συγκεκριμένου στοιχείου το καθιστά εξαιρετικά απαιτητικό από πλευράς σχεδίασης, μιας και πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην υπάρξουν σημαντικές αποκλίσεις στο συνολικό του βάρος. Σε αυτή την απαιτητική εργασία συμβάλλει και το γεγονός ότι λόγω ελλιπούς γνώσης το βάρος της κατασκευής βρίσκεται προσεγγιστικά. Για την σχεδίαση του στροφαλοφόρου άξονα διαμορφώνονται τα εξής τρία μέρη: το πρυμναίο τμήμα, το πρωραίο τμήμα και οι στρόφαλοι (Σχήμα 5.7).



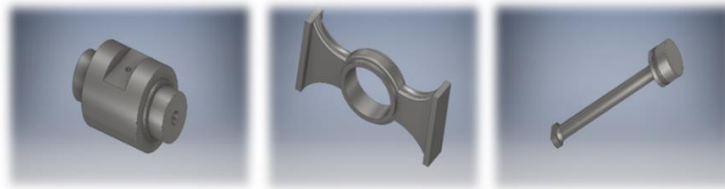
Σχήμα 5. 7: Πρυμναίο, πρωραίο και ενδιάμεσο τμήμα στροφαλοφόρου άξονα.

Το επόμενο στάδιο είναι η δημιουργία του κινηματικού μηχανισμού, ο οποίος συντελείται από το διωστήρα, τον σταυρό και το πιστόνι. Σε αντιστοιχία με τα κατασκευαστικά σχέδια, στο μοντέλο που διαμορφώνεται ο διωστήρας σχεδιάζεται σε τέσσερα επιμέρους τμήματα. Το πρώτο τμήμα είναι το βασικό στέλεχος του διωστήρα ενώ τα υπόλοιπα τρία τμήματα είναι τα καλύμματα της κεφαλής και το κάλυμμα του ποδιού (Σχήμα 5.8). Μεταξύ του άνω τμήματος του βασικού στελέχους και των καλυμμάτων της κεφαλής του διωστήρα βρίσκεται το ζύγωμα, ενώ στο κάτω τμήμα του διωστήρα συνδέεται ο κάθε στρόφαλος.



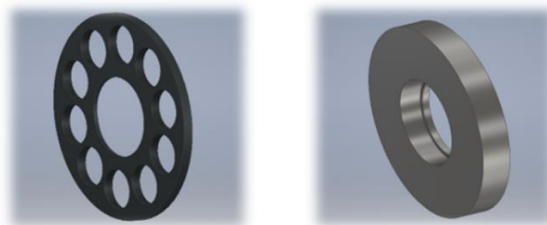
Σχήμα 5. 8: Βασικό στέλεχος διωστήρα, κάλυμμα κεφαλής και κάλυμμα ποδιού

Τέλος, ο κινηματικός μηχανισμός της κύριας μηχανής ολοκληρώνεται με τη σχεδίαση του ζυγώματος και του πιστονιού (**Σχήμα 5.9**). Το πρώτο αποτελείται από δύο μέρη, ενώ στο άνω μέρος του διαθέτει ειδικά διαμορφωμένη βάση για την έδραση του πιστονιού. Το δεύτερο σχεδιάζεται και αποτυπώνεται ως ένας ενιαίος μηχανισμός.



Σχήμα 5. 9: Ζύγωμα και Πιστόνι

Το τμήμα της κύριας μηχανής συμπληρώνεται με το σχεδιασμό του σφονδύλου και του αποσβεστήρα στρεπτικών ταλαντώσεων (**Σχήμα 5.10**). Τα συγκεκριμένα τμήματα δεν αποδίδονται με μεγάλη ακρίβεια σχεδίασης, διότι κύριο μέλημα είναι η επίτευξη και μόνο των πραγματικών τιμών των μαζών και των ροπών αδρανείας τους, και όχι η λεπτομερής γεωμετρία τους.



Σχήμα 5. 10: Σφόνδυλος και αποσβεστήρας στρεπτικών ταλαντώσεων

5.2.2.3 Έλικα

Αρχικά, η έλικα του συστήματος πρόωσης σχεδιάζεται με ακριβή γεωμετρική προσέγγιση, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.11**, Ωστόσο, στο αναπτυχθέν μοντέλο χρησιμοποιείται, αντί αυτής, ένας κυκλικός δίσκος με αντίστοιχη μάζα και ροπή αδρανείας. 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.



Σχήμα 5. 11: Έλικα

5.2.2.4 Έδρανα στήριξης συστήματος πρόωσης

Τα έδρανα του συστήματος πρόωσης, όπως και ο σφόνδυλος και ο αποσβεστήρας στρεπτικών ταλαντώσεων, δεν αποδίδονται με μεγάλη ακρίβεια σχεδίασης. Για την αναπαράσταση των εδράνων χρησιμοποιούνται δαχτυλίδια και πλάκες, όπου με κατάλληλες οριακές συνθήκες προσομοιάζεται η πραγματική συμπεριφορά των εδράνων.



Σχήμα 5. 12: Πλάκα και δαχτυλίδι εδράνου.

5.2.3 Συναρμολόγηση και παραμετρική μοντελοποίηση

Το τελικό μοντέλο που διαμορφώθηκε, με την ολοκλήρωση της συναρμολόγησης του συστήματος πρόωσης, φαίνεται στο **Σχήμα 2.13**. Αξίζει να σημειωθεί ότι, προκειμένου να απλοποιηθεί η διαδικασία της διόρθωσης των αριθμητικών σφαλμάτων, αναπτύσσεται ένας παραμετρικός τρόπος συναρμολόγησης των επιμέρους στοιχείων και επεξεργασίας κάποιων βασικών διαστάσεων. Πιο συγκεκριμένα, επιλέγονται οι παράμετροι που έχουν μέγιστη σημασία στην διαμόρφωση του συστήματος πρόωσης και με βάση αυτούς δημιουργείται το παραμετρικό μοντέλο. Οι παράμετροι αυτοί ακολουθούν παρακάτω:

- Ο αριθμός των κυλίνδρων
- Η διάμετρος και το μήκος της κεφαλής του πιστονιού και του βάκτρου
- Η διαδρομή του πιστονιού από το άνω νεκρό σημείο έως το κάτω νεκρό σημείο
- Ο λόγος που συνδέει την διαδρομή του πιστονιού με την απόσταση των κέντρων των οπών του διωστήρα
- Οι βασικές διάμετροι του στροφαλοφόρου άξονα
- Το πάχος της κιθάρας
- Το μήκος του κάθε εδράνου
- Η γωνία περιστροφής του κάθε στροφάλου ως προς τον πρώτο στρόφαλο
- Η απόσταση μεταξύ γειτονικών στροφάλων
- Η διαμήκης θέση των εδράνων στήριξης



Σχήμα 5. 13: Παραχθέν γεωμετρία συστήματος πρόωσης

5.2.4 Έλεγχος μαζών και ροπών αδρανείας

Η διαδικασία της σχεδίασης του τρισδιάστατου μοντέλου ολοκληρώνεται με τον έλεγχο της εκτίμησης του όγκου που έχει πραγματοποιηθεί για το κάθε εξάρτημα, μέσω της σύγκρισης των μαζών και των ροπών αδρανείας με τις πραγματικές τιμές, γνωστές από τα κατασκευαστικά σχέδια.

Προκειμένου να γίνει η μετατροπή του όγκου σε μάζα και ροπή αδράνειας, γίνεται μία εκτίμηση του υλικού κατασκευής από ένα εύρος πιθανών υλικών που προτείνει η βιβλιογραφία [9, 11, 12, 23].

Όταν η μάζα και η ροπή αδράνειας του τεμαχίου που σχεδιάζεται συμφωνούν με τις τιμές του ναυπηγείου, τότε η προσέγγιση του τμήματος θεωρείται ικανοποιητική και το επιλεγμένο υλικό τελικά αποδεκτό. Σε αντίθετη περίπτωση γίνονται οι απαραίτητες διορθώσεις και επαναλαμβάνεται η παραπάνω διαδικασία.

Το αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας είναι η τελική επιλογή των υλικών του κάθε εξαρτήματος και ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών τους (**Πίνακας 5.2 & 5.3**). Πιο συγκεκριμένα, για τους άξονες και τον κινηματικό μηχανισμό της κύριας μηχανής επιλέγεται ο ανθρακοχάλυβας (Carbon Steel), ενώ για τον σφόνδυλο ο φαιός χυτοσίδηρος (Gray Cast Iron). Με αυτόν τον τρόπο γίνεται ο τελικός υπολογισμός των μαζών και των ροπών αδρανείας του διαμορφωμένου μοντέλου, όπου ολοκληρώνεται με τη τελική σύγκρισή τους με τις πραγματικές τιμές (**Πίνακας 5.4 & 5.5**).

Πίνακας 5. 2: Ιδιότητες ανθρακοχάλυβα

Πυκνότητα	$\rho=7850 \text{ kg/m}^3$
Μέτρο Ελαστικότητας	$E=210 \text{ GPa}$
Λόγος Poisson	$\nu=0.3$
Όριο ελαστικής παραμόρφωσης	$\sigma_y=350 \text{ MPa}$

Πίνακας 5. 3: Ιδιότητες φαιού χυτοσιδήρου

Πυκνότητα	$\rho=7200 \text{ kg/m}^3$
Μέτρο Ελαστικότητας	$E=110 \text{ GPa}$
Λόγος Poisson	$\nu=0.28$
Όριο ελαστικής παραμόρφωσης	$\sigma_y=240 \text{ MPa}$

Όσον αφορά την έλικα και τον αποσβεστήρα στρεπτικών ταλαντώσεων, δεδομένου ότι δεν έχει προσεγγιστεί με μεγάλη ακρίβεια η γεωμετρία τους, επιλέγεται η πυκνότητα απευθείας στο Ansys Workbench με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτευχθεί ακρίβεια στη μάζα και στη ροπή αδρανείας τους. Επιπροσθέτως, έχει γίνει υπερδιαστασιολόγηση στην τιμή του

μέτρου ελαστικότητας (Ex>>) των εδράνων (πλάκες και δαχτυλίδια), προκειμένου να μην υποστούν παραμόρφωση λόγω των μικρών διαστάσεών τους.

Πίνακας 5. 4: Σύγκριση Μαζών

ΜΑΖΑ(kg)			
ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΠΛΟΙΟ	INVENTOR	% ΔΙΑΦΟΡΑ
Ελικοφόρος	77982	77093	1.14
Ενδιάμεσος No.3	56012	56006	0.01
Ενδιάμεσος No.2	56012	56006	0.01
Ενδιάμεσος No.1	56640	56636	0.01
Βασικό Στέλεχος Διωστήρα	6100	6107	-0.11
Καλυμμα κεφαλής	1400	1340	4.28
Κάλυμμα Ποδιού	805	840	-4.34
Ζύγωμα	7300	7337	-0.50
Πιστόνι	5000	5064	-1.28
Σφόνδυλος	8506	8668	-1.90

Πίνακας 5. 5: Σύγκριση Ροπών Αδρανείας

ΙΧΧ ΡΟΠΗ ΑΔΡΑΝΕΙΑΣ(kg*m²)

ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΠΛΟΙΟ	INVENTOR	% ΔΙΑΦΟΡΑ
Ελικοφόρος	7738.6	8392.6	-8.45
Ενδιάμεσος No.3	6092.5	5833.8	4.24
Ενδιάμεσος No.2	6092.5	5833.3	4.25
Ενδιάμεσος No.1	6329.8	6285.3	0.70
Στρόφαλος	36032	34704	3.68
Πρυμναίο τμήμα στροφάλοφору	10746	10688	0.53
Πρωραίο τμήμα στροφαλοφору	4389	4685.7	-6.76
Σφόνδυλος	33283.5	31925	4.08

5.3 Δημιουργία συστήματος πρόωσης με πεπερασμένα

στοιχεία

Τα χαρακτηριστικά του υπό μελέτη πλοίου παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.1**. Δημιουργώντας το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του συστήματος πρόωσης του συγκεκριμένου πλοίου, επιδιώκεται η ανάλυση της στατικής αλλά και της δυναμικής κατάστασης του, για διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Στη συνέχεια γίνεται μία αναλυτική παρουσίαση της διαδικασίας δημιουργίας του πλέγματος και των οριακών συνθηκών για την επίλυση του προβλήματος και την εξαγωγή αποτελεσμάτων. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την παραπάνω διεργασία είναι το Ansys Workbench.

5.3.1 Δημιουργία πλέγματος

Αρχικά, εισάγεται στο λογισμικό η γεωμετρία του συστήματος πρόωσης και ξεκινάει η δημιουργία του πλέγματος για την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία. Εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι, το Ansys Workbench δημιουργεί αυτόματα το πλέγμα μέσω ενδογενών συναρτήσεων, επιτρέποντας έτσι στον χρήστη, την επιλογή των διαφόρων παραμέτρων για τα χαρακτηριστικά του πλέγματος αλλά και για την ποιότητα του.

Το μέγεθος και ο αριθμός των στοιχείων του πλέγματος επιλέγεται μέσω της ακόλουθης επαναληπτικής διαδικασίας. Για διάφορες τιμές μεγέθους και αριθμού στοιχείων, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των αντιδράσεων και της ακτινικής χάρης του κάθε εδράνου, καθώς και της διείσδυσης του άξονα στα έδρανα, μέχρις ότου η διαφορά των τιμών από πλέγμα σε πλέγμα να μην είναι σημαντική. Τελικά, το πλέγμα που επιλέγεται αποτελείται από μικρού μεγέθους τετραεδρικά στοιχεία (μήκος στοιχείου 200 mm), με μόνη διαφορά τα σημεία που έρχονται σε επαφή τα έδρανα με τους άξονες, όπου το μέγεθος των στοιχείων είναι ακόμα μικρότερο (μήκος στοιχείου 5 mm), ενώ ο αριθμός των στοιχείων είναι 320,000 και των κόμβων 540,000.

Όσον αφορά την ποιότητα του πλέγματος (**Πίνακας 5.6**) πρέπει να σημειωθεί ότι, τα βασικά κριτήρια που ελέγχονται για το κάθε στοιχείο είναι η αναλογία των διαστάσεων (aspect ratio), η ποιότητα (element quality), η κυρτότητα (Skewness), καθώς και η ορθογωνικότητα του πλέγματος (Mesh Orthogonality).

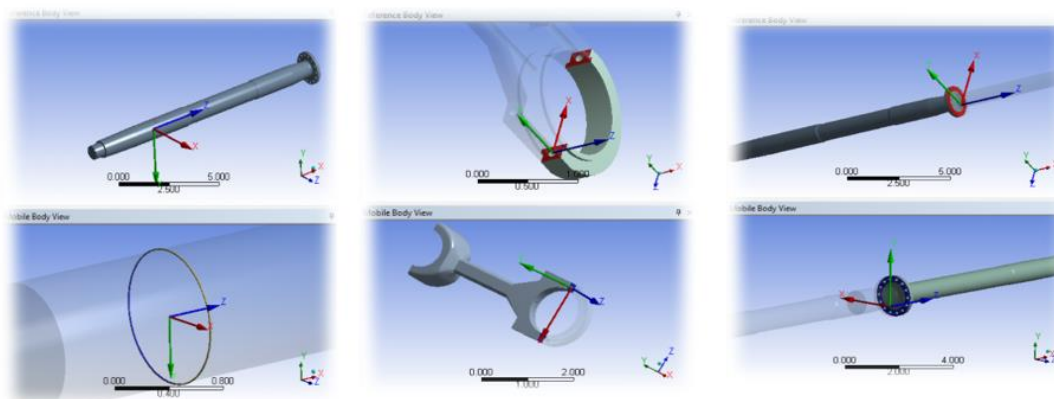
Πίνακας 5. 6: Χαρακτηριστικά πλέγματος

Διαστάσεις πλέγματος συστήματος πρόωσης		MIN-MAX
Μήκος Στοιχείων	200 mm	0-INF.
Διαστάσεις πλέγματος μεταξύ εδράνων και αξόνων		
Μήκος Στοιχείων	20 mm	0-INF.
Ποιότητας Πλέγματος (Μέσος Όρος)		
Αναλογία διαστάσεων	3.2	0-INF.
Ποιότητα στοιχείων	0.64	0-1
Κυρτότητα	0.51	0-1
Ορθογωνικότητα	0.49	0-1

5.3.2 Οριακές Συνθήκες

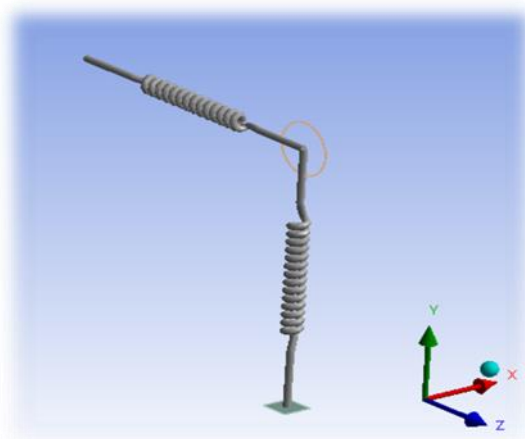
Στην συγκεκριμένη παράγραφο παρουσιάζονται οι συσχετίσεις μεταξύ των διαφόρων εξαρτημάτων του συστήματος, προκειμένου να γίνει η περιγραφή της πλήρους συμπεριφοράς της κίνησής του.

Η συνδεσμολογία των εξαρτημάτων μοντελοποιείται μέσω μιας σειράς ρυθμίσεων του λογισμικού που χρησιμοποιείται. Βασικός στόχος της διαδικασίας είναι ο περιορισμός των βαθμών ελευθερίας του κάθε εξαρτήματος, τόσο στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων μεταξύ των γειτονικών εξαρτημάτων του, αλλά και ως προς το γενικό σύστημα συντεταγμένων του συστήματος πρόωσης (**Σχήμα 5.14**). Επιπροσθέτως, στα τμήματα με ελεύθερα άκρα προσδιορίζονται και οι σταθερές επαναφοράς και απόσβεσης για όλες τις κινήσεις του σώματος.



Σχήμα 5. 14: Τοπικό και γενικό σύστημα συντεταγμένων

Όσον αφορά τις βάσεις των εδράνων, η μοντελοποίησή τους γίνεται με τον τρόπο που φαίνεται στο **Σχήμα 5.15**. Τα δαχτυλίδια συνδέονται στις πλάκες με ελατήρια, στα οποία καθορίζονται η σταθερά επαναφοράς K και απόσβεσης C με τιμές ανάλογες του αντίστοιχου εδράνου. Μεταξύ των δαχτυλιδιών και των αξόνων, επιτρέπεται η μετατόπιση μέχρις ότου ο άξονας να έρθει σε επαφή με τα όρια των δαχτυλιδιών, προκειμένου να προσδιοριστεί το διάκενο μεταξύ εδράνου και άξονα. Τέλος, μετακινώντας τις πλάκες, γίνεται η μοντελοποίηση των κατακόρυφων μετατοπίσεων των εδράνων, έτσι ώστε να καθοριστούν οι διάφορες καταστάσεις λειτουργίας του πλοίου.



Σχήμα 5. 15: Μοντελοποίηση εδράνου

Ένα σημαντικό στοιχείο που αξίζει να αναφερθεί, είναι οι μοντελοποιήσεις που γίνονται, με βάση το νηογνώμονα του υπό μελέτη πλοίου, για το πρυμναίο έδρανο χοάνης και τον ελικοφόρο άξονα.

Πιο συγκεκριμένα, η μοντελοποίηση του ελικοφόρου άξονα γίνεται μέσω του διαχωρισμού της πυκνότητάς του σε τρία τμήματα. Αυτό εφαρμόζεται προκειμένου να ληφθεί υπόψη η άντωση στα βυθισμένα τμήματα του άξονα. Ο διαχωρισμός αφορά τα εξής μέρη:

- το τμήμα του άξονα που βρίσκεται μέσα στην θάλασσα - λήψη πυκνότητας στο νερό
- το τμήμα του άξονα στην χοάνη - λήψη πυκνότητας στο λάδι
- το τμήμα αυτό που βρίσκεται μέσα στο πλοίο και έξω από τη χοάνη - λήψη πυκνότητας στον αέρα

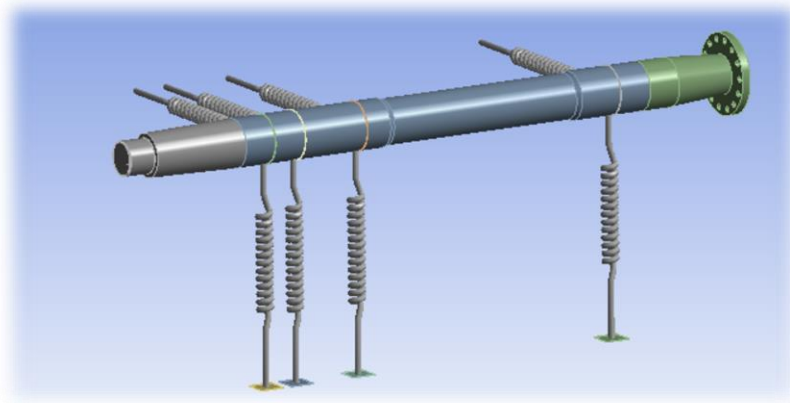
Σχετικά με τα παραπάνω, ο νηογνώμονας προτείνει την επιλογή διαφορετικής πυκνότητας υλικού στα τρία προαναφερθέντα τμήματα, όπως αυτό φαίνεται στον **Πίνακα 5.7**.

Πίνακας 5. 7: Επιλογή πυκνότητας ελικοφόρου άξονα

Πυκνότητα ανθρακοχάλυβα σε νερό	$\rho=6000 \text{ kg/m}^3$
Πυκνότητα ανθρακοχάλυβα σε λάδι	$\rho=6850 \text{ kg/m}^3$
Πυκνότητα ανθρακοχάλυβα στον αέρα	$\rho=7850 \text{ kg/m}^3$

Όσον αφορά το πρυμναίο έδρανο χοάνης, μοντελοποιείται με τρία διαφορετικά έδρανα στήριξης. Σκοπός είναι με τις κατάλληλες τιμές στις κατακόρυφες μετατοπίσεις των πλακών των εδράνων, να ληφθεί υπόψη η κλίση που αποκτά το πρυμναίο έδρανο χοάνης, κατά την σχεδίαση του πλάνου ευθυγράμμισης.

Οι δυο μοντελοποιήσεις γίνονται αντιληπτές στο **Σχήμα 5.16** μέσω της χρωματικής διαφοράς των τμημάτων του ελικοφόρου άξονα και την σχετικά μικρή απόσταση των τριών εδράνων.



Σχήμα 5. 16: Τμήματα ελικοφόρου άξονα

5.4 Ανάλυση στατικής ισορροπίας του άξονα σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας

5.4.1 Γενικά στοιχεία αξονικού συστήματος συστήματος

Στο Σχήμα 5.17 αναπαρίσταται το μοντέλο του συστήματος πρόωσης του υπό μελέτη πλοίου, όπως αυτό χρησιμοποιήθηκε για τη στατική ανάλυση.

Το αναπτυχθέν μοντέλο περιλαμβάνει τον ελικοφόρο άξονα, τους ενδιάμεσους άξονες, τμήμα του στροφαλοφόρου άξονα, καθώς και τον κινηματικό μηχανισμό έως τον τέταρτο κύλινδρο της κύριας μηχανής. Ο ελικοφόρος άξονας στηρίζεται από δύο πρυμαία έδρανα, ενώ οι ενδιάμεσοι άξονες στηρίζονται από τρία έδρανα γραμμής. Για τη συγκεκριμένη ανάλυση, χρησιμοποιούνται μόνο τα πρώτα έξι έδρανα στήριξης του στροφαλοφόρου άξονα. Τα χαρακτηριστικά των εδράνων παρουσιάζονται παρακάτω.

Τα φορτία που λαμβάνονται υπόψη είναι το βάρος της έλικας μέσα στο νερό, το βάρος του παξιμαδιού σύσφιξης της έλικας αλλά και το βάρος του σφόνδουλου. Επιπροσθέτως, στην παρούσα εργασία μοντελοποιήθηκε το κάθε έδρανο ως ένα γραμμικό ελατήριο με ακαμψία ίση με αυτή της βάσης του κάθε εδράνου. Αξίζει να σημειωθεί ότι για ορισμένες καταστάσεις φόρτωσης γίνεται εκτίμηση της ροπής που ασκείται στον άξονα λόγω της έκκεντρα παραγόμενης ώσης από την έλικα.

Πρυμαίο έδρανο χοάνης (ASB)

• Εξωτερική διάμετρος άξονα	988 mm
• Ενεργό μήκος εδράνου	2174 mm
• Μήκος προς διάμετρο	2.20
• Ακτινική χάρη	0.75 mm
• Μέγιστη επιτρεπόμενη φόρτιση	0.8 MPa / 1718 kN
• Ακαμψία βάσης	3.5E+10 N/m

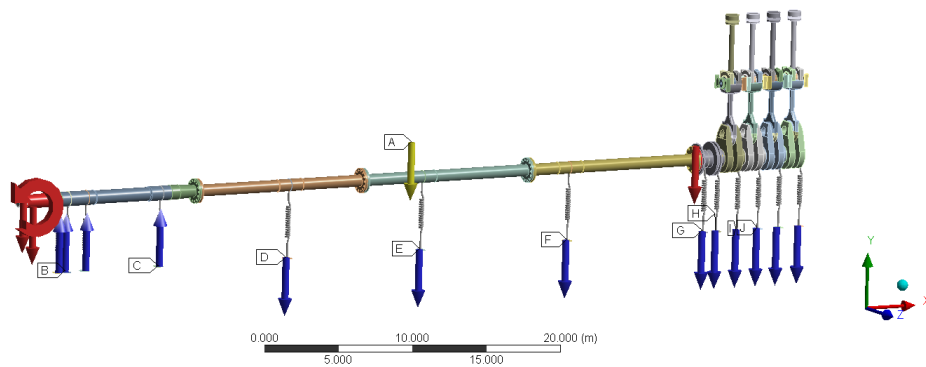
Πρωαίο έδρανο χοάνης (FSB)

• Εξωτερική διάμετρος άξονα	990 mm
• Ενεργό μήκος εδράνου	990 mm
• Μήκος προς διάμετρο	1.00
• Ακτινική χάρη	0.75 mm
• Μέγιστη επιτρεπόμενη φόρτιση	0.8 MPa / 784 kN
• Ακαμψία βάσης	2.0E+10 N/m

Έδρανα γραμμής (ISB)

- Εξωτερική διάμετρος άξονα 830 mm
- Ενεργό μήκος εδράνου 850 mm
- Μήκος προς διάμετρο 1.02
- Ακτινική χάρη 0.40 mm
- Μέγιστη επιτρεπόμενη φόρτιση 1.0 MPa / 705 kN
- Ακαμψία βάσης 5.0E+10 N/m

Στο Σχήμα 5.17. τα μπλε βέλη συμβολίζουν τις μετατοπίσεις των βάσεων του συστήματος, τα κόκκινα τα προαναφερθέντα βαρυτικά φορτία, ενώ το κίτρινο την επιτάχυνση της βαρύτητας. Τέλος, το κόκκινο καμπύλο βέλος συμβολίζει την υδροδυναμική ροπή που παράγει η έκκεντρη ώση της έλικας.



Σχήμα 5. 17: Τετρακύλινδρο σύστημα

5.4.2 Αρχικό πλάνο στατικής ευθυγράμμισης αξονικού συστήματος - Κατάσταση αναφοράς

Η γραμμή που διαπερνά το κέντρο της χοάνης ορίζεται ως η γραμμή αναφοράς, ενώ ως κατάσταση αναφοράς ορίζεται η κατάσταση του πλοίου στο λιμάνι (DOCK1), με το πλοίο να επιπλέει χωρίς περαιτέρω φορτία. Στο **Πίνακα 5.8** φαίνεται η κατακόρυφη μετατόπιση των εδράνων σε σχέση με την γραμμή αναφοράς, με βάση το πλάνο ευθυγράμμισης του πλοίου.

Πίνακας 5. 8: Χαρακτηριστικά εδράνων σε κατάσταση αναφοράς

Τύπος Εδράνου	Ακτινική Χάρη [mm]	Στιβαρότητα Βάσεων Εδράνων [N/m]	L/D	Κατακόρυφη Θέση Εδράνων [mm]	Αντιδράσεις Εδράνων [N]	Μέση Πίεση [Pa]
Πρυμναίο έδρανο χοάνης	1.50	3.5E+09	0.988	0.75	1.59E+06	0.72
Πρωραίο έδρανο χοάνης	1.50	3.5E+09	0.990	0.75	2.12E+05	0.25
Έδρανο γραμμής No.3	0.80	2.0E+09	0.830	-2.00	4.02E+05	0.52
Έδρανο γραμμής No.2	0.80	2.0E+09	0.830	-3.00	4.68E+05	0.69
Έδρανο γραμμής No.1	0.80	2.0E+09	0.830	-4.00	5.23E+05	0.72
Έδρανο μηχανής No.13	0.60	5.0E+09	1.180	-6.00	4.17E+05	0.41
Έδρανο μηχανής No.12	0.60	5.0E+09	1.180	-6.00	3.87E+05	0.44
Έδρανο μηχανής No.11	0.60	5.0E+09	0.602	-6.00	4.98E+05	0.97
Έδρανο μηχανής No.10	0.60	5.0E+09	0.602	-6.00	5.74E+05	1.13
Έδρανο μηχανής No.9	0.60	5.0E+09	0.602	-6.00	5.77E+05	1.13
Έδρανο μηχανής No.8	0.60	5.0E+09	0.602	-6.00	2.24E+05	0.45

Για την εκτίμηση των υπολογισμών, στην συγκεκριμένη ενότητα, λαμβάνονται υπόψη οι εξής παραδοχές:

- Η κύρια μηχανή είναι εκτός λειτουργίας, και συνεπώς σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Επομένως, δεν προκύπτουν πρόσθετες μετατοπίσεις των βάσεων των εδράνων της κύριας μηχανής λόγω θερμικών φορτίων καθώς και περαιτέρω φορτίσεις από την υδροδυναμική λίπανση των εδράνων.
- Η έλικα και το τμήμα του ελικοφόρου άξονα είναι πλήρως βυθισμένα στο νερό. Ως επακόλουθο, μελετάται το φαινόμενο της άντωση των δύο αντικειμένων.

5.4.3 Υπολογισμοί και αποτελέσματα ευθυγράμμισης αξονικού συστήματος

Πληροφορίες σχετικά με το πλάνο ευθυγράμμισης του αξονικού συστήματος του υπό μελέτη πλοίου, λαμβάνονται από τα κατασκευαστικά σχέδια του νηογνώμονα. Το εγχειρίδιο “Calculations for Shaft Alignment” παρέχει τα χαρακτηριστικά του συστήματος για κάποιες κατάσταση λειτουργίας του πλοίου. Οι καταστάσεις που ελέγχονται από τον νηογνώμονα είναι:

Στατική κατάσταση:

- ψυχρή με έλικα βυθισμένη στο 50%, 75% και 100%,
- θερμή με έλικα βυθισμένη στο 100%.

Λειτουργία μηχανής:

- θερμή κατάσταση λειτουργίας του πλοίου με την έλικα, λόγω της έκκεντρης θέσεως της ώσης, να παράγει ροπή -40% της ώσης και 5% της ώσης.

Καταστάσεις φόρτωσης:

- Design, Full load, Ballast

Η ανάλυση που εφαρμόζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, ακολουθεί τις ίδιες καταστάσεις μιας και υπάρχουν διαθέσιμες οι τιμές των αντιδράσεων και μπορεί να γίνει η σύγκριση των παραχθέντων αποτελεσμάτων. Σκοπός είναι ο προσδιορισμός της αξιοπιστίας του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί και για τη δυναμική ανάλυση.

Επιπλέον, για το ίδιο υπό μελέτη πλοίο έχει δημιουργήσει μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της γάστρας και έχει υπολογίσει τις κατακόρυφες μετατοπίσεις των βάσεων των εδράνων για αρκετές καταστάσεις φόρτωσης, ο Σταύρος Σιαμαντάς στη διπλωματική εργασία του [24]. Οπότε, ορίζοντας τις κατάλληλες συνθήκες υπολογίζονται και συγκρίνονται οι αντιδράσεις με τις αντίστοιχες που υπολογίζει ο Σταύρος Σιαμαντάς στην διπλωματική του. Οι καταστάσεις φόρτωσης είναι:

Καταστάσεις φόρτωσης:

- DOCK2, BLD, BLD-S11.1, BLD-PANAMA, BLM-PANAMA, BLA-PANAMA, 16TDD, 16TAD, 11TDS, 11TAS, 16TDS, 16TAS, MAX.

5.4.3.1 Κύρια μηχανή εκτός λειτουργίας και 50% βυθισμένη έλικα

Παρακάτω παρουσιάζονται οι υποθέσεις οι οποίες έχουν ληφθεί υπόψη προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός των αντιδράσεων των εδράνων στήριξης:

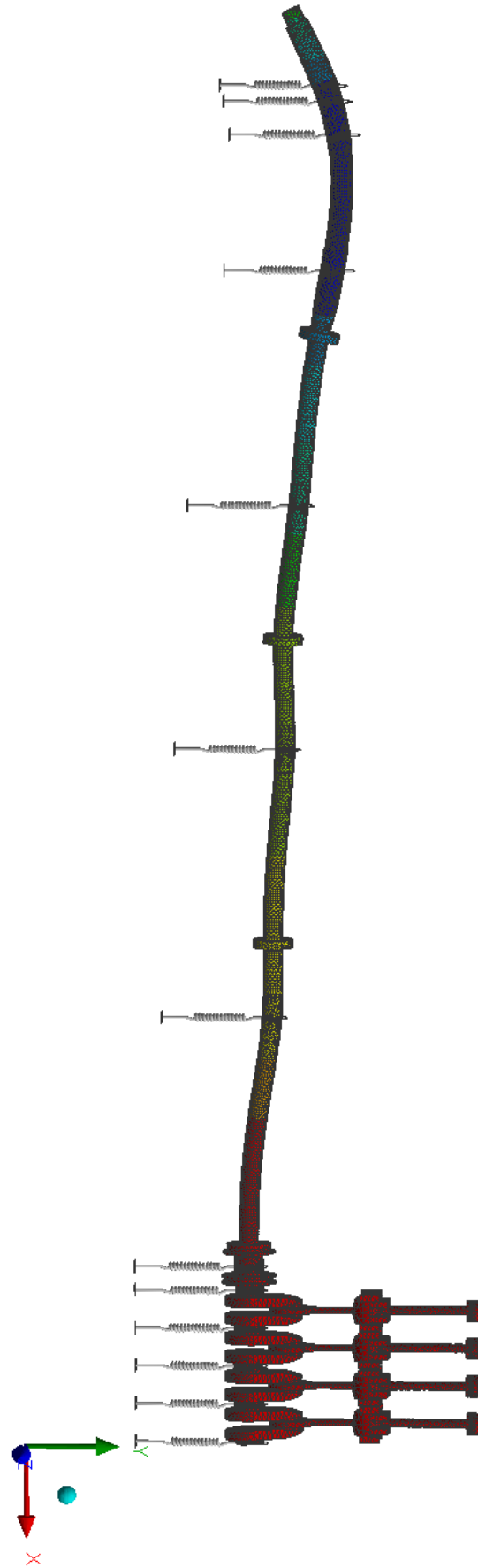
- Η κύρια μηχανή είναι εκτός λειτουργίας.
- Η κύρια μηχανή βρίσκεται σε ψυχρή κατάσταση.
- Οι μετατοπίσεις της γάστρας είναι μηδενικές.
- Η έλικα και το τμήμα του ελικοφόρου άξονα είναι μερικώς βυθισμένα. Συνεπώς, στα συγκεκριμένα τμήματα εκτιμάται και η άντωση.
- Το φορτίο της έλικας είναι: $F = 940,587 \text{ N}$.

Στον Πίνακα 5.9 παρατίθενται οι διαμήκεις και κατακόρυφες θέσεις των εδράνων, οι τιμές των αντιδράσεων στήριξης των εδράνων υπολογισμένες με βάση τον κατασκευαστικό οδηγό αλλά και το λογισμικό ANSYS, καθώς και η μεταξύ τους ποσοστιαία απόκλιση.

Πίνακας 5. 9: Αντιδράσεις εδράνων σε ψυχρή στατική κατάσταση (έλικα 50% βυθισμένη)

Τύπος Εδράνου	Διαμήκη Θέση Εδράνων [m]	Κατακόρυφη Θέση Εδράνων [mm]	Υπολογισμοί Φορτίσεων Εγχειριδίων [N]	Υπολογισμοί Φορτίσεων ANSYS [N]	Διαφορά
Πρυμναίο έδρανο χοάνης	3.195	0.75	1.59E+06	1.59E+06	-0.19%
Πρωραίο έδρανο χοάνης	3.870	0.75	2.12E+05	2.06E+05	3.07%
Έδρανο γραμμής Νο.3	5.269	-2.00	4.02E+05	3.98E+05	0.81%
Έδρανο γραμμής Νο.2	10.982	-3.00	4.68E+05	4.69E+05	-0.14%
Έδρανο γραμμής Νο.1	20.896	-4.00	5.23E+05	5.14E+05	1.64%
Έδρανο μηχανής Νο.13	31.161	-6.00	4.17E+05	4.29E+05	-3.02%
Έδρανο μηχανής Νο.12	42.454	-6.00	3.87E+05	3.87E+05	0.12%
Έδρανο μηχανής Νο.11	52.935	-6.00	4.98E+05	4.84E+05	2.80%
Έδρανο μηχανής Νο.10	53.945	-6.00	5.74E+05	5.75E+05	-0.17%
Έδρανο μηχανής Νο.9	55.535	-6.00	5.77E+05	5.79E+05	-0.29%
Έδρανο μηχανής Νο.8	57.125	-6.00	2.24E+05	2.26E+05	-0.82%
Σύνολο			5.87E+06	5.86E+06	0.21%

Στο Σχήμα 5.18 φαίνεται η ελαστική γραμμή που ακολουθούν οι άξονες για την συγκεκριμένη κατάσταση.



Σχήμα 5. 18: Ελαστική γραμμή αξόνων με κύρια μηχανή εκτός λειτουργίας και 50% βυθισμένη έλικα

5.4.3.2 Κύρια μηχανή εκτός λειτουργίας και 75% βυθισμένη έλικα

Παρακάτω παρουσιάζονται οι υποθέσεις οι οποίες έχουν ληφθεί υπόψη προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός των αντιδράσεων των εδράνων στήριξης:

- Η κύρια μηχανή είναι εκτός λειτουργίας.
- Η κύρια μηχανή βρίσκεται σε ψυχρή κατάσταση.
- Οι μετατοπίσεις της γάστρας είναι μηδενικές.
- Η έλικα και το τμήμα του ελικοφόρου άξονα είναι μερικώς βυθισμένα. Συνεπώς, στα συγκεκριμένα τμήματα εκτιμάται και η άντωση.
- Το φορτίο της έλικας είναι: $F= 907,898 \text{ N}$.

Στον Πίνακα 5.10 παρατίθενται οι διαμήκεις και κατακόρυφες θέσεις των εδράνων, οι τιμές των αντιδράσεων στήριξης των εδράνων υπολογισμένες με βάση τον κατασκευαστικό οδηγό αλλά και το λογισμικό ANSYS, καθώς και η μεταξύ τους ποσοστιαία απόκλιση.

Πίνακας 5. 10: Αντιδράσεις εδράνων σε ψυχρή στατική κατάσταση (έλικα 75% βυθισμένη)

Τύπος Εδράνου	Διαμήκη Θέση Εδράνων [m]	Κατακόρυφη Θέση Εδράνων [mm]	Υπολογισμοί Φορτίσεων Εγχειριδίων [N]	Υπολογισμοί Φορτίσεων ANSYS [N]	Διαφορά
Πρυμναίο έδρανο χοάνης	3.195	0.75	1.55E+06	1.56E+06	-0.17%
Πρωραίο έδρανο χοάνης	3.870	0.75	2.17E+05	2.11E+05	2.93%
Έδρανο γραμμής Νο.3	5.269	-2.00	4.01E+05	3.98E+05	0.80%
Έδρανο γραμμής Νο.2	10.982	-3.00	4.68E+05	4.69E+05	-0.14%
Έδρανο γραμμής Νο.1	20.896	-4.00	5.23E+05	5.14E+05	1.64%
Έδρανο μηχανής Νο.13	31.161	-6.00	4.17E+05	4.29E+05	-3.02%
Έδρανο μηχανής Νο.12	42.454	-6.00	3.87E+05	3.87E+05	0.12%
Έδρανο μηχανής Νο.11	52.935	-6.00	4.98E+05	4.84E+05	2.80%
Έδρανο μηχανής Νο.10	53.945	-6.00	5.74E+05	5.75E+05	-0.17%
Έδρανο μηχανής Νο.9	55.535	-6.00	5.77E+05	5.79E+05	-0.29%
Έδρανο μηχανής Νο.8	57.125	-6.00	2.24E+05	2.26E+05	-0.82%
Σύνολο			5.84E+06	5.83E+06	0.21%

5.4.3.3 Κύρια μηχανή εκτός λειτουργίας και 100% βυθισμένη έλικα

Παρακάτω παρουσιάζονται οι υποθέσεις οι οποίες έχουν ληφθεί υπόψη προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός των αντιδράσεων των εδράνων στήριξης:

- Η κύρια μηχανή είναι εκτός λειτουργίας.
- Η κύρια μηχανή βρίσκεται σε ψυχρή κατάσταση.
- Οι μετατοπίσεις της γάστρας είναι μηδενικές.
- Η έλικα και το τμήμα του ελικοφόρου άξονα είναι μερικώς βυθισμένα. Συνεπώς, στα συγκεκριμένα τμήματα εκτιμάται και η άντωση.
- Το φορτίο της έλικας είναι: $F = 875,199 \text{ N}$.

Στον Πίνακα 5.11 παρατίθενται οι διαμήκεις και κατακόρυφες θέσεις των εδράνων, οι τιμές των αντιδράσεων στήριξης των εδράνων υπολογισμένες με βάση τον κατασκευαστικό οδηγό αλλά και το λογισμικό ANSYS, καθώς και η μεταξύ τους ποσοστιαία απόκλιση.

Πίνακας 5. 11: Αντιδράσεις εδράνων σε ψυχρή στατική κατάσταση (έλικα 100% βυθισμένη)

Τύπος Εδράνου	Διαμήκη Θέση Εδράνων [m]	Κατακόρυφη Θέση Εδράνων [mm]	Υπολογισμοί Φορτίσεων Εγχειριδίων [N]	Υπολογισμοί Φορτίσεων ANSYS [N]	Διαφορά
Πρυμαίο έδρανο χοάνης	3.195	0.75	1.52E+06	1.52E+06	-0.03%
Πρωραίο έδρανο χοάνης	3.870	0.75	2.22E+05	2.17E+05	2.41%
Έδρανο γραμμής Νο.3	5.269	-2.00	4.00E+05	3.97E+05	0.78%
Έδρανο γραμμής Νο.2	10.982	-3.00	4.68E+05	4.69E+05	-0.19%
Έδρανο γραμμής Νο.1	20.896	-4.00	5.23E+05	5.14E+05	1.69%
Έδρανο μηχανής Νο.13	31.161	-6.00	4.17E+05	4.30E+05	-3.23%
Έδρανο μηχανής Νο.12	42.454	-6.00	3.87E+05	3.86E+05	0.33%
Έδρανο μηχανής Νο.11	52.935	-6.00	4.98E+05	4.84E+05	2.86%
Έδρανο μηχανής Νο.10	53.945	-6.00	5.74E+05	5.75E+05	-0.15%
Έδρανο μηχανής Νο.9	55.535	-6.00	5.77E+05	5.79E+05	-0.44%
Έδρανο μηχανής Νο.8	57.125	-6.00	2.24E+05	2.26E+05	-0.60%
Σύνολο			5.81E+06	5.79E+06	0.23%

5.4.3.4 Κύρια μηχανή σε λειτουργία και 100% βυθισμένη έλικα

Παρακάτω παρουσιάζονται οι υποθέσεις οι οποίες έχουν ληφθεί υπόψη προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός των αντιδράσεων των εδράνων στήριξης:

- Η κύρια μηχανή είναι σε λειτουργία.
- Η κύρια μηχανή βρίσκεται σε θερμή κατάσταση και η κατακόρυφη μετατόπιση των εδράνων της αυξάνεται κατά 0.41 mm.
- Οι μετατοπίσεις της γάστρας είναι μη-μηδενικές.
- Η έλικα και το τμήμα του ελικοφόρου άξονα είναι μερικώς βυθισμένη. Συνεπώς, εκτιμάται η άντωση στα συγκεκριμένα τμήματα.
- Το φορτίο της έλικας είναι: $F = 875,199 \text{ N}$.

Στον **Πίνακα 5.12** παρατίθενται οι διαμήκεις και κατακόρυφες θέσεις των εδράνων, οι τιμές των αντιδράσεων στήριξης των εδράνων υπολογισμένες με βάση τον κατασκευαστικό οδηγό αλλά και το λογισμικό ANSYS, καθώς και η μεταξύ τους ποσοστιαία απόκλιση.

Πίνακας 5. 12: Αντιδράσεις εδράνων σε θερμή στατική κατάσταση (έλικα 100% βυθισμένη)

Τύπος Εδράνου	Διαμήκη Θέση Εδράνων [m]	Κατακόρυφη Θέση Εδράνων [mm]	Υπολογισμοί Φορτίσεων Εγχειριδίων [N]	Υπολογισμοί Φορτίσεων ANSYS [N]	Διαφορά
Πρυμναίο έδρανο χοάνης	3.195	0.75	1.52E+06	1.52E+06	-0.14%
Πρωραίο έδρανο χοάνης	3.870	0.75	2.23E+05	2.16E+05	2.76%
Έδρανο γραμμής Νο.3	5.269	-2.00	3.99E+05	3.96E+05	0.79%
Έδρανο γραμμής Νο.2	10.982	-3.00	4.74E+05	4.74E+05	0.03%
Έδρανο γραμμής Νο.1	20.896	-4.00	5.08E+05	5.03E+05	1.04%
Έδρανο μηχανής Νο.13	31.161	-5.59	4.62E+05	4.61E+05	0.18%
Έδρανο μηχανής Νο.12	42.454	-5.59	3.71E+05	3.77E+05	-1.66%
Έδρανο μηχανής Νο.11	52.935	-5.59	4.78E+05	4.69E+05	2.05%
Έδρανο μηχανής Νο.10	53.945	-5.59	5.73E+05	5.74E+05	-0.21%
Έδρανο μηχανής Νο.9	55.535	-5.59	5.78E+05	5.79E+05	-0.21%
Έδρανο μηχανής Νο.8	57.125	-5.59	2.24E+05	2.27E+05	-0.94%
Σύνολο			5.81E+06	5.79E+06	0.22%

5.4.3.5 Κύρια μηχανή σε λειτουργία, 100% βυθισμένη έλικα και έκκεντρη ώση έλικας

$(M_x = -40\%T)$

Παρακάτω παρουσιάζονται οι υποθέσεις οι οποίες έχουν ληφθεί υπόψη προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός των αντιδράσεων των εδράνων στήριξης:

- Η κύρια μηχανή είναι σε λειτουργία.
- Η κύρια μηχανή βρίσκεται σε θερμή κατάσταση και η κατακόρυφη μετατόπιση των εδράνων της αυξάνεται κατά 0.41 mm.
- Οι μετατοπίσεις της γάστρας είναι μη-μηδενικές.
- Η έλικα και το τμήμα του ελικοφόρου άξονα είναι μερικώς βυθισμένη. Συνεπώς, εκτιμάται η άντωση στα συγκεκριμένα τμήματα.
- Το φορτίο της έλικας είναι: $F = 875,199 \text{ N}$.
- Η ροπή από την έκκεντρη ώση της έλικας είναι: $M_x = -2319114 \text{ Nm}$.

Στον Πίνακα 5.13 παρατίθενται οι διαμήκεις και κατακόρυφες θέσεις των εδράνων, οι τιμές των αντιδράσεων στήριξης των εδράνων υπολογισμένες με βάση τον κατασκευαστικό οδηγό αλλά και το λογισμικό ANSYS, καθώς και η μεταξύ τους ποσοστιαία απόκλιση.

Πίνακας 5. 13: Αντιδράσεις εδράνων σε θερμή δυναμική κατάσταση (έλικα 100% βυθισμένη) με υδροδυναμική ροπή -40% T

Τύπος Εδράνου	Διαμήκη Θέση Εδράνων [m]	Κατακόρυφη Θέση Εδράνων [mm]	Υπολογισμοί Φορτίσεων Εγχειριδίων [N]	Υπολογισμοί Φορτίσεων ANSYS [N]	Διαφορά
Πρυμναίο έδρανο χοάνης	3.195	0.75	1.39E+06	1.39E+06	0.16%
Πρωραίο έδρανο χοάνης	3.870	0.75	3.69E+05	3.63E+05	1.39%
Έδρανο γραμμής Νο.3	5.269	-2.00	3.78E+05	3.78E+05	0.11%
Έδρανο γραμμής Νο.2	10.982	-3.00	4.78E+05	4.79E+05	-0.03%
Έδρανο γραμμής Νο.1	20.896	-4.00	5.07E+05	5.02E+05	1.09%
Έδρανο μηχανής Νο.13	31.161	-5.59	4.63E+05	4.62E+05	0.17%
Έδρανο μηχανής Νο.12	42.454	-5.59	3.71E+05	3.77E+05	-1.67%
Έδρανο μηχανής Νο.11	52.935	-5.59	4.78E+05	4.68E+05	2.06%
Έδρανο μηχανής Νο.10	53.945	-5.59	5.73E+05	5.74E+05	-0.21%
Έδρανο μηχανής Νο.9	55.535	-5.59	5.78E+05	5.79E+05	-0.21%
Έδρανο μηχανής Νο.8	57.125	-5.59	2.24E+05	2.27E+05	-0.94%
Σύνολο			5.81E+06	5.79E+06	0.23%

5.4.3.6 Κύρια μηχανή σε λειτουργία, 100% βυθισμένη έλικα και έκκεντρη ώση έλικας
($Mx=5\%T$)

Παρακάτω παρουσιάζονται οι υποθέσεις οι οποίες έχουν ληφθεί υπόψη προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός των αντιδράσεων των εδράνων στήριξης:

- Η κύρια μηχανή είναι σε λειτουργία.
- Η κύρια μηχανή βρίσκεται σε θερμή κατάσταση και η κατακόρυφη μετατόπιση των εδράνων της αυξάνεται κατά 0.41 mm.
- Οι μετατοπίσεις της γάστρας είναι μη-μηδενικές.
- Η έλικα και το τμήμα του ελικοφόρου άξονα είναι μερικώς βυθισμένη. Συνεπώς, εκτιμάται η άντωση στα συγκεκριμένα τμήματα.
- Το φορτίο της έλικας είναι: $F= 875,199 \text{ N}$.
- Η ροπή από την έκκεντρη ώση της έλικας είναι: $Mx= 289889 \text{ Nm}$.

Στον Πίνακα 5.14 παρατίθενται οι διαμήκεις και κατακόρυφες θέσεις των εδράνων, οι τιμές των αντιδράσεων στήριξης των εδράνων υπολογισμένες με βάση τον κατασκευαστικό οδηγό αλλά και το λογισμικό ANSYS, καθώς και η μεταξύ τους ποσοστιαία απόκλιση.

Πίνακας 5. 14: Αντιδράσεις εδράνων σε θερμή δυναμική κατάσταση (έλικα 100% βυθισμένη) με υδροδυναμική ροπή +5% T

Τύπος Εδράνου	Διαμήκη Θέση Εδράνων [m]	Κατακόρυφη Θέση Εδράνων [mm]	Υπολογισμοί Φορτίσεων Εγχειριδίων [N]	Υπολογισμοί Φορτίσεων ANSYS [N]	Διαφορά
Πρυμναίο έδρανο χοάνης	3.195	0.75	1.54E+06	1.54E+06	-0.04%
Πρωραίο έδρανο χοάνης	3.870	0.75	2.01E+05	1.97E+05	1.94%
Έδρανο γραμμής Νο.3	5.269	-2.00	4.02E+05	3.98E+05	0.96%
Έδρανο γραμμής Νο.2	10.982	-3.00	4.74E+05	4.73E+05	0.02%
Έδρανο γραμμής Νο.1	20.896	-4.00	5.08E+05	5.03E+05	1.04%
Έδρανο μηχανής Νο.13	31.161	-5.59	4.62E+05	4.61E+05	0.18%
Έδρανο μηχανής Νο.12	42.454	-5.59	3.71E+05	3.77E+05	-1.66%
Έδρανο μηχανής Νο.11	52.935	-5.59	4.78E+05	4.69E+05	2.05%
Έδρανο μηχανής Νο.10	53.945	-5.59	5.73E+05	5.74E+05	-0.21%
Έδρανο μηχανής Νο.9	55.535	-5.59	5.78E+05	5.79E+05	-0.21%
Έδρανο μηχανής Νο.8	57.125	-5.59	2.24E+05	2.27E+05	-0.94%
Σύνολο			5.81E+06	5.79E+06	0.21%

5.4.3.7 Κατάσταση φόρτωσης “Ballast Condition”

Παρακάτω παρουσιάζονται οι υποθέσεις οι οποίες έχουν ληφθεί υπόψη προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός των αντιδράσεων των εδράνων στήριξης:

- Η κύρια μηχανή είναι εκτός λειτουργίας.
- Η κύρια μηχανή βρίσκεται σε ψυχρή κατάσταση.
- Οι μετατοπίσεις της γάστρας είναι μη-μηδενικές.
- Η έλικα και το τμήμα του ελικοφόρου άξονα είναι μερικώς βυθισμένα. Συνεπώς, στα συγκεκριμένα τμήματα εκτιμάται και η άντωση.
- Το φορτίο της έλικας είναι: $F = 875,199 \text{ N}$.

Στον Πίνακα 5.15 παρατίθενται οι διαμήκεις και κατακόρυφες θέσεις των εδράνων, οι τιμές των αντιδράσεων στήριξης των εδράνων υπολογισμένες με βάση τον κατασκευαστικό οδηγό αλλά και το λογισμικό ANSYS, καθώς και η μεταξύ τους ποσοστιαία απόκλιση.

Πίνακας 5. 15: Αντιδράσεις εδράνων (Ballast condition)

Τύπος Εδράνου	Διαμήκη Θέση Εδράνων [m]	Κατακόρυφη Θέση Εδράνων [mm]	Υπολογισμοί Φορτίσεων Εγχειριδίων [N]	Υπολογισμοί Φορτίσεων ANSYS [N]	Διαφορά
Πρυμαίο έδρανο χοάνης	3.195	0.75	1.51E+06	1.52E+06	-0.16%
Πρωραίο έδρανο χοάνης	3.870	0.78	2.23E+05	2.17E+05	2.49%
Έδρανο γραμμής Νο.3	5.269	-1.96	4.01E+05	3.97E+05	0.93%
Έδρανο γραμμής Νο.2	10.982	-3.19	4.68E+05	4.69E+05	-0.23%
Έδρανο γραμμής Νο.1	20.896	-5.08	5.27E+05	5.18E+05	1.73%
Έδρανο μηχανής Νο.13	31.161	-8.77	4.16E+05	4.31E+05	-3.48%
Έδρανο μηχανής Νο.12	42.454	-8.96	3.95E+05	3.93E+05	0.54%
Έδρανο μηχανής Νο.11	52.935	-9.27	4.89E+05	4.78E+05	2.40%
Έδρανο μηχανής Νο.10	53.945	-9.58	5.72E+05	5.74E+05	-0.36%
Έδρανο μηχανής Νο.9	55.535	-9.89	5.77E+05	5.78E+05	-0.18%
Έδρανο μηχανής Νο.8	57.125	-10.2	2.25E+05	2.24E+05	0.32%
Σύνολο			5.81E+06	5.79E+06	0.21%

5.4.3.8 Κατάσταση φόρτωσης “Design Condition”

Παρακάτω παρουσιάζονται οι υποθέσεις οι οποίες έχουν ληφθεί υπόψη προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός των αντιδράσεων των εδράνων στήριξης:

- Η κύρια μηχανή είναι εκτός λειτουργίας.
- Η κύρια μηχανή βρίσκεται σε ψυχρή κατάσταση.
- Οι μετατοπίσεις της γάστρας είναι μη-μηδενικές.
- Η έλικα και το τμήμα του ελικοφόρου άξονα είναι μερικώς βυθισμένα. Συνεπώς, στα συγκεκριμένα τμήματα εκτιμάται και η άντωση.
- Το φορτίο της έλικας είναι: $F = 875,199 \text{ N}$.

Στον Πίνακα 5.16 παρατίθενται οι διαμήκεις και κατακόρυφες θέσεις των εδράνων, οι τιμές των αντιδράσεων στήριξης των εδράνων υπολογισμένες με βάση τον κατασκευαστικό οδηγό αλλά και το λογισμικό ANSYS, καθώς και η μεταξύ τους ποσοστιαία απόκλιση.

Πίνακας 5. 16: Αντιδράσεις εδράνων (Design condition)

Τύπος Εδράνου	Διαμήκη Θέση Εδράνων [m]	Κατακόρυφη Θέση Εδράνων [mm]	Υπολογισμοί Φορτίσεων Εγχειριδίων [N]	Υπολογισμοί Φορτίσεων ANSYS [N]	Διαφορά
Πρυμαίο έδρανο χοάνης	3.195	0.75	1.53E+06	1.53E+06	0.14%
Πρωαίο έδρανο χοάνης	3.870	0.82	1.99E+05	2.00E+05	-0.54%
Έδρανο γραμμής Νο.3	5.269	-0.96	4.03E+05	3.98E+05	1.26%
Έδρανο γραμμής Νο.2	10.982	-0.41	4.71E+05	4.71E+05	-0.02%
Έδρανο γραμμής Νο.1	20.896	-0.39	5.21E+05	5.14E+05	1.27%
Έδρανο μηχανής Νο.13	31.161	-2.97	2.72E+05	2.75E+05	-0.90%
Έδρανο μηχανής Νο.12	42.454	-3.02	6.75E+05	6.81E+05	-0.89%
Έδρανο μηχανής Νο.11	52.935	-3.51	3.81E+05	3.71E+05	2.67%
Έδρανο μηχανής Νο.10	53.945	-4.01	5.44E+05	5.44E+05	0.12%
Έδρανο μηχανής Νο.9	55.535	-4.52	5.89E+05	5.98E+05	-1.45%
Έδρανο μηχανής Νο.8	57.125	-5.06	2.19E+05	2.14E+05	2.51%
Σύνολο			5.81E+06	5.79E+06	0.21%

5.4.3.9 Κατάσταση φόρτωσης “Full Condition”

Παρακάτω παρουσιάζονται οι υποθέσεις οι οποίες έχουν ληφθεί υπόψη προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός των αντιδράσεων των εδράνων στήριξης:

- Η κύρια μηχανή είναι εκτός λειτουργίας.
- Η κύρια μηχανή βρίσκεται σε ψυχρή κατάσταση.
- Οι μετατοπίσεις της γάστρας είναι μη-μηδενικές.
- Η έλικα και το τμήμα του ελικοφόρου άξονα είναι μερικώς βυθισμένα. Συνεπώς, στα συγκεκριμένα τμήματα εκτιμάται και η άντωση.
- Το φορτίο της έλικας είναι: $F = 875,199 \text{ N}$.

Στον Πίνακα 5.17 παρατίθενται οι διαμήκεις και κατακόρυφες θέσεις των εδράνων, οι τιμές των αντιδράσεων στήριξης των εδράνων υπολογισμένες με βάση τον κατασκευαστικό οδηγό αλλά και το λογισμικό ANSYS, καθώς και η μεταξύ τους ποσοστιαία απόκλιση.

Πίνακας 5. 17: Αντιδράσεις εδράνων (Full condition)

Τύπος Εδράνου	Διαμήκη Θέση Εδράνων [m]	Κατακόρυφη Θέση Εδράνων [mm]	Υπολογισμοί Φορτίσεων Εγχειριδίων [N]	Υπολογισμοί Φορτίσεων ANSYS [N]	Διαφορά
Πρυμναίο έδρανο χοάνης	3.195	0.75	1.53E+06	1.54E+06	-0.82%
Πρωραίο έδρανο χοάνης	3.870	1.01	1.51E+05	1.65E+05	-9.30%
Έδρανο γραμμής Νο.3	5.269	0.64	4.35E+05	4.25E+05	2.33%
Έδρανο γραμμής Νο.2	10.982	1.97	4.63E+05	4.63E+05	-0.11%
Έδρανο γραμμής Νο.1	20.896	2.24	5.26E+05	5.18E+05	1.42%
Έδρανο μηχανής Νο.13	31.161	-0.58	2.14E+05	2.21E+05	-3.32%
Έδρανο μηχανής Νο.12	42.454	-0.63	7.52E+05	7.55E+05	-0.36%
Έδρανο μηχανής Νο.11	52.935	-1.22	3.66E+05	3.52E+05	3.82%
Έδρανο μηχανής Νο.10	53.945	-1.83	5.36E+05	5.46E+05	-1.92%
Έδρανο μηχανής Νο.9	55.535	-2.47	5.94E+05	5.93E+05	0.20%
Έδρανο μηχανής Νο.8	57.125	-3.14	2.16E+05	2.12E+05	1.69%
Σύνολο			5.78E+06	5.79E+06	-0.19%

5.4.3.10 Κατάσταση φόρτωσης “DOCK2”

Παρακάτω παρουσιάζονται οι υποθέσεις οι οποίες έχουν ληφθεί υπόψη προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός των αντιδράσεων των εδράνων στήριξης:

- Η κύρια μηχανή είναι εκτός λειτουργίας.
- Η κύρια μηχανή βρίσκεται σε ψυχρή κατάσταση.
- Οι μετατοπίσεις της γάστρας είναι μη-μηδενικές.
- Η έλικα και το τμήμα του ελικοφόρου άξονα είναι μερικώς βυθισμένα. Συνεπώς, στα συγκεκριμένα τμήματα εκτιμάται και η άντωση.
- Το φορτίο της έλικας είναι: $F = 915,002 \text{ N}$.

Στον Πίνακα 5.18 παρατίθενται οι διαμήκεις και κατακόρυφες θέσεις των εδράνων, οι τιμές των αντιδράσεων στήριξης των εδράνων υπολογισμένες με βάση τον κατασκευαστικό οδηγό αλλά και το λογισμικό ANSYS, καθώς και η μεταξύ τους ποσοστιαία απόκλιση.

Πίνακας 5. 18: Αντιδράσεις εδράνων (Dock2 condition)

Τύπος Εδράνου	Διαμήκη Θέση Εδράνων [m]	Κατακόρυφη Θέση Εδράνων [mm]	Υπολογισμοί Φορτίσεων Σ.Σιαμαντά [N]	Υπολογισμοί Φορτίσεων ANSYS [N]	Διαφορά
Πρυμαίο έδρανο χοάνης	3.195	0.75	1.532E+6	1.56E+06	1.42%
Πρωαίο έδρανο χοάνης	3.870	0.77	2.136E+5	2.12E+05	-7.10%
Έδρανο γραμμής Νο.3	5.269	-1.97	3.729E+5	3.97E+05	-5.15%
Έδρανο γραμμής Νο.2	10.982	-3.01	4.883E+5	4.74E+05	1.41%
Έδρανο γραμμής Νο.1	20.896	-4.09	4.747E+5	5.02E+05	1.22%
Έδρανο μηχανής Νο.13	31.161	-5.83	6.030E+5	4.71E+05	-0.83%
Έδρανο μηχανής Νο.12	42.454	-5.86	3.162E+5	3.67E+05	-1.21%
Έδρανο μηχανής Νο.11	52.935	-5.90	4.246E+5	4.72E+05	2.84%
Έδρανο μηχανής Νο.10	53.945	-5.95	5.691E+5	5.72E+05	-0.26%
Έδρανο μηχανής Νο.9	55.535	-6.00	5.749E+5	5.79E+05	-0.30%
Έδρανο μηχανής Νο.8	57.125	-6.05	2.280E+5	2.26E+05	-0.64%
Σύνολο			5.797E+6	5.79E+06	0.05%

5.4.3.11 Κατάσταση φόρτωσης “BLD”

Παρακάτω παρουσιάζονται οι υποθέσεις οι οποίες έχουν ληφθεί υπόψη προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός των αντιδράσεων των εδράνων στήριξης:

- Η κύρια μηχανή είναι εκτός λειτουργίας.
- Η κύρια μηχανή βρίσκεται σε ψυχρή κατάσταση.
- Οι μετατοπίσεις της γάστρας είναι μη-μηδενικές.
- Η έλικα και το τμήμα του ελικοφόρου άξονα είναι μερικώς βυθισμένα. Συνεπώς, στα συγκεκριμένα τμήματα εκτιμάται και η άντωση.
- Το φορτίο της έλικας είναι: $F = 874,841 \text{ N}$.

Στον Πίνακα 5.19 παρατίθενται οι διαμήκεις και κατακόρυφες θέσεις των εδράνων, οι τιμές των αντιδράσεων στήριξης των εδράνων υπολογισμένες με βάση τον κατασκευαστικό οδηγό αλλά και το λογισμικό ANSYS, καθώς και η μεταξύ τους ποσοστιαία απόκλιση.

Πίνακας 5. 19: Αντιδράσεις εδράνων (BLD condition)

Τύπος Εδράνου	Διαμήκη Θέση Εδράνων [m]	Κατακόρυφη Θέση Εδράνων [mm]	Υπολογισμοί Φορτίσεων Σ.Σιαμαντά [N]	Υπολογισμοί Φορτίσεων ANSYS [N]	Διαφορά
Πρυμαίο έδρανο χοάνης	3.195	0.75	1.53E+06	1.52E+06	1.09%
Πρωραίο έδρανο χοάνης	3.870	0.78	2.09E+05	2.17E+05	-3.87%
Έδρανο γραμμής Νο.3	5.269	-2.10	3.81E+05	4.01E+05	-5.28%
Έδρανο γραμμής Νο.2	10.982	-3.84	4.76E+05	4.69E+05	1.44%
Έδρανο γραμμής Νο.1	20.896	-6.23	5.10E+05	5.05E+05	1.10%
Έδρανο μηχανής Νο.13	31.161	-10.19	4.87E+05	4.84E+05	0.58%
Έδρανο μηχανής Νο.12	42.454	-10.49	3.70E+05	3.80E+05	-2.69%
Έδρανο μηχανής Νο.11	52.935	-10.98	4.56E+05	4.47E+05	1.95%
Έδρανο μηχανής Νο.10	53.945	-11.47	5.79E+05	5.81E+05	-0.23%
Έδρανο μηχανής Νο.9	55.535	-11.97	5.71E+05	5.71E+05	-0.16%
Έδρανο μηχανής Νο.8	57.125	-12.46	2.27E+05	2.26E+05	0.82%
Σύνολο			5.80E+06	5.79E+06	0.04%

5.4.3.12 Κατάσταση φόρτωσης “BLD-S11.1”

Παρακάτω παρουσιάζονται οι υποθέσεις οι οποίες έχουν ληφθεί υπόψη προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός των αντιδράσεων των εδράνων στήριξης:

- Η κύρια μηχανή είναι εκτός λειτουργίας.
- Η κύρια μηχανή βρίσκεται σε ψυχρή κατάσταση.
- Οι μετατοπίσεις της γάστρας είναι μη-μηδενικές.
- Η έλικα και το τμήμα του ελικοφόρου άξονα είναι μερικώς βυθισμένα. Συνεπώς, στα συγκεκριμένα τμήματα εκτιμάται και η άντωση.
- Το φορτίο της έλικας είναι: $F= 874,841 \text{ N}$.

Στον Πίνακα 5.20 παρατίθενται οι διαμήκεις και κατακόρυφες θέσεις των εδράνων, οι τιμές των αντιδράσεων στήριξης των εδράνων υπολογισμένες με βάση τον κατασκευαστικό οδηγό αλλά και το λογισμικό ANSYS, καθώς και η μεταξύ τους ποσοστιαία απόκλιση.

Πίνακας 5. 20: Αντιδράσεις εδράνων (BLD-S11.1 condition)

Τύπος Εδράνου	Διαμήκη Θέση Εδράνων [m]	Κατακόρυφη Θέση Εδράνων [mm]	Υπολογισμοί Φορτίσεων Σ.Σιαμαντά [N]	Υπολογισμοί Φορτίσεων ANSYS [N]	Διαφορά
Πρυμαίο έδρανο χοάνης	3.195	0.75	1.53E+06	1.51E+06	1.27%
Πρωαίο έδρανο χοάνης	3.870	0.81	2.08E+05	2.18E+05	-5.06%
Έδρανο γραμμής Νο.3	5.269	-2.02	3.81E+05	4.01E+05	-5.15%
Έδρανο γραμμής Νο.2	10.982	-3.76	4.76E+05	4.69E+05	1.39%
Έδρανο γραμμής Νο.1	20.896	-6.22	5.11E+05	5.05E+05	1.14%
Έδρανο μηχανής Νο.13	31.161	-10.26	4.83E+05	4.77E+05	1.21%
Έδρανο μηχανής Νο.12	42.454	-10.56	3.71E+05	3.90E+05	-4.96%
Έδρανο μηχανής Νο.11	52.935	-11.06	4.57E+05	4.39E+05	4.09%
Έδρανο μηχανής Νο.10	53.945	-11.55	5.80E+05	5.91E+05	-1.89%
Έδρανο μηχανής Νο.9	55.535	-12.06	5.71E+05	5.64E+05	1.21%
Έδρανο μηχανής Νο.8	57.125	-12.55	2.27E+05	2.28E+05	-0.36%
Σύνολο			5.80E+06	5.79E+06	0.05%

5.4.3.13 Κατάσταση φόρτωσης “BLD-PANAMA”

Παρακάτω παρουσιάζονται οι υποθέσεις οι οποίες έχουν ληφθεί υπόψη προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός των αντιδράσεων των εδράνων στήριξης:

- Η κύρια μηχανή είναι εκτός λειτουργίας.
- Η κύρια μηχανή βρίσκεται σε ψυχρή κατάσταση.
- Οι μετατοπίσεις της γάστρας είναι μη-μηδενικές.
- Η έλικα και το τμήμα του ελικοφόρου άξονα είναι μερικώς βυθισμένα. Συνεπώς, στα συγκεκριμένα τμήματα εκτιμάται και η άντωση.
- Το φορτίο της έλικας είναι: $F = 874,841 \text{ N}$.

Στον Πίνακα 5.21 παρατίθενται οι διαμήκεις και κατακόρυφες θέσεις των εδράνων, οι τιμές των αντιδράσεων στήριξης των εδράνων υπολογισμένες με βάση τον κατασκευαστικό οδηγό αλλά και το λογισμικό ANSYS, καθώς και η μεταξύ τους ποσοστιαία απόκλιση.

Πίνακας 5. 21: Αντιδράσεις εδράνων (BLD-PANAMA condition)

Τύπος Εδράνου	Διαμήκη Θέση Εδράνων [m]	Κατακόρυφη Θέση Εδράνων [mm]	Υπολογισμοί Φορτίσεων Σ.Σιαμαντά [N]	Υπολογισμοί Φορτίσεων ANSYS [N]	Διαφορά
Πρυμναίο έδρανο χοάνης	3.195	0.75	1.53E+06	1.52E+06	1.13%
Πρωραίο έδρανο χοάνης	3.870	0.78	2.09E+05	2.17E+05	-3.97%
Έδρανο γραμμής Νο.3	5.269	-2.05	3.80E+05	4.00E+05	-5.24%
Έδρανο γραμμής Νο.2	10.982	-3.57	4.76E+05	4.69E+05	1.40%
Έδρανο γραμμής Νο.1	20.896	-5.50	5.10E+05	5.04E+05	1.13%
Έδρανο μηχανής Νο.13	31.161	-8.85	4.84E+05	4.88E+05	-0.82%
Έδρανο μηχανής Νο.12	42.454	-9.09	3.77E+05	3.75E+05	0.39%
Έδρανο μηχανής Νο.11	52.935	-9.48	4.52E+05	4.48E+05	0.99%
Έδρανο μηχανής Νο.10	53.945	-9.87	5.81E+05	5.81E+05	-0.04%
Έδρανο μηχανής Νο.9	55.535	-10.27	5.70E+05	5.72E+05	-0.29%
Έδρανο μηχανής Νο.8	57.125	-10.66	2.28E+05	2.26E+05	0.62%
Σύνολο			5.80E+06	5.79E+06	0.05%

5.4.3.14 Κατάσταση φόρτωσης “BLM-PANAMA”

Παρακάτω παρουσιάζονται οι υποθέσεις οι οποίες έχουν ληφθεί υπόψη προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός των αντιδράσεων των εδράνων στήριξης:

- Η κύρια μηχανή είναι εκτός λειτουργίας.
- Η κύρια μηχανή βρίσκεται σε ψυχρή κατάσταση.
- Οι μετατοπίσεις της γάστρας είναι μη-μηδενικές.
- Η έλικα και το τμήμα του ελικοφόρου άξονα είναι μερικώς βυθισμένα. Συνεπώς, στα συγκεκριμένα τμήματα εκτιμάται και η άντωση.
- Το φορτίο της έλικας είναι: $F= 876,305 \text{ N}$.

Στον Πίνακα 5.22 παρατίθενται οι διαμήκεις και κατακόρυφες θέσεις των εδράνων, οι τιμές των αντιδράσεων στήριξης των εδράνων υπολογισμένες με βάση τον κατασκευαστικό οδηγό αλλά και το λογισμικό ANSYS, καθώς και η μεταξύ τους ποσοστιαία απόκλιση.

Πίνακας 5. 22: Αντιδράσεις εδράνων (BLM-PANAMA condition)

Τύπος Εδράνου	Διαμήκη Θέση Εδράνων [m]	Κατακόρυφη Θέση Εδράνων [mm]	Υπολογισμοί Φορτίσεων Σ.Σιαμαντά [N]	Υπολογισμοί Φορτίσεων ANSYS [N]	Διαφορά
Πρυμαίο έδρανο χοάνης	3.195	0.75	1.54E+06	1.52E+06	-1.79%
Πρωαίο έδρανο χοάνης	3.870	0.81	2.09E+05	2.18E+05	-1.35%
Έδρανο γραμμής Νο.3	5.269	-1.96	3.79E+05	3.99E+05	-4.62%
Έδρανο γραμμής Νο.2	10.982	-3.31	4.76E+05	4.68E+05	0.56%
Έδρανο γραμμής Νο.1	20.896	-4.94	5.09E+05	5.03E+05	1.42%
Έδρανο μηχανής Νο.13	31.161	-7.85	4.82E+05	4.87E+05	2.16%
Έδρανο μηχανής Νο.12	42.454	-8.04	3.76E+05	3.81E+05	2.32%
Έδρανο μηχανής Νο.11	52.935	-8.35	4.52E+05	4.39E+05	-4.56%
Έδρανο μηχανής Νο.10	53.945	-8.65	5.86E+05	5.89E+05	2.38%
Έδρανο μηχανής Νο.9	55.535	-8.97	5.67E+05	5.64E+05	-2.05%
Έδρανο μηχανής Νο.8	57.125	-9.28	2.28E+05	2.30E+05	0.77%
Σύνολο			5.80E+06	5.83E+06	-0.61%

5.4.3.15 Κατάσταση φόρτωσης “BLA-PANAMA”

Παρακάτω παρουσιάζονται οι υποθέσεις οι οποίες έχουν ληφθεί υπόψη προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός των αντιδράσεων των εδράνων στήριξης:

- Η κύρια μηχανή είναι εκτός λειτουργίας.
- Η κύρια μηχανή βρίσκεται σε ψυχρή κατάσταση.
- Οι μετατοπίσεις της γάστρας είναι μη-μηδενικές.
- Η έλικα και το τμήμα του ελικοφόρου άξονα είναι μερικώς βυθισμένα. Συνεπώς, στα συγκεκριμένα τμήματα εκτιμάται και η άντωση.
- Το φορτίο της έλικας είναι: $F= 881,757 \text{ N}$.

Στον Πίνακα 5.23 παρατίθενται οι διαμήκεις και κατακόρυφες θέσεις των εδράνων, οι τιμές των αντιδράσεων στήριξης των εδράνων υπολογισμένες με βάση τον κατασκευαστικό οδηγό αλλά και το λογισμικό ANSYS, καθώς και η μεταξύ τους ποσοστιαία απόκλιση.

Πίνακας 5. 23: Αντιδράσεις εδράνων (BLA-PANAMA condition)

Τύπος Εδράνου	Διαμήκη Θέση Εδράνων [m]	Κατακόρυφη Θέση Εδράνων [mm]	Υπολογισμοί Φορτίσεων Σ.Σιαμαντά [N]	Υπολογισμοί Φορτίσεων ANSYS [N]	Διαφορά
Πρυμναίο έδρανο χοάνης	3.195	0.75	1.54E+06	1.52E+06	1.19%
Πρωραίο έδρανο χοάνης	3.870	0.78	2.06E+05	2.16E+05	-4.87%
Έδρανο γραμμής No.3	5.269	-2.01	3.80E+05	3.99E+05	-5.06%
Έδρανο γραμμής No.2	10.982	-3.32	4.76E+05	4.70E+05	1.32%
Έδρανο γραμμής No.1	20.896	-4.80	5.09E+05	5.03E+05	1.19%
Έδρανο μηχανής No.13	31.161	-7.45	4.76E+05	4.73E+05	0.75%
Έδρανο μηχανής No.12	42.454	-7.60	3.81E+05	3.97E+05	-4.28%
Έδρανο μηχανής No.11	52.935	-7.87	4.55E+05	4.33E+05	4.87%
Έδρανο μηχανής No.10	53.945	-8.12	5.81E+05	5.92E+05	-2.06%
Έδρανο μηχανής No.9	55.535	-8.39	5.70E+05	5.64E+05	1.05%
Έδρανο μηχανής No.8	57.125	-8.64	2.28E+05	2.30E+05	-1.01%
Σύνολο			5.80E+06	5.80E+06	0.04%

5.4.3.16 Κατάσταση φόρτωσης “16TDD”

Παρακάτω παρουσιάζονται οι υποθέσεις οι οποίες έχουν ληφθεί υπόψη προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός των αντιδράσεων των εδράνων στήριξης:

- Η κύρια μηχανή είναι εκτός λειτουργίας.
- Η κύρια μηχανή βρίσκεται σε ψυχρή κατάσταση.
- Οι μετατοπίσεις της γάστρας είναι μη-μηδενικές.
- Η έλικα και το τμήμα του ελικοφόρου άξονα είναι μερικώς βυθισμένα. Συνεπώς, στα συγκεκριμένα τμήματα εκτιμάται και η άντωση.
- Το φορτίο της έλικας είναι: $F = 874,841 \text{ N}$.

Στον Πίνακα 5.24 παρατίθενται οι διαμήκεις και κατακόρυφες θέσεις των εδράνων, οι τιμές των αντιδράσεων στήριξης των εδράνων υπολογισμένες με βάση τον κατασκευαστικό οδηγό αλλά και το λογισμικό ANSYS, καθώς και η μεταξύ τους ποσοστιαία απόκλιση.

Πίνακας 5. 24: Αντιδράσεις εδράνων (16TDD condition)

Τύπος Εδράνου	Διαμήκη Θέση Εδράνων [m]	Κατακόρυφη Θέση Εδράνων [mm]	Υπολογισμοί Φορτίσεων Σ.Σιαμαντά [N]	Υπολογισμοί Φορτίσεων ANSYS [N]	Διαφορά
Πρυμαίο έδρανο χοάνης	3.195	0.75	1.526E+6	1.51E+06	1.35%
Πρωραίο έδρανο χοάνης	3.870	0.82	2.215E+5	2.33E+05	-5.19%
Έδρανο γραμμής Νο.3	5.269	-2.26	3.740E+5	3.94E+05	-5.28%
Έδρανο γραμμής Νο.2	10.982	-3.79	4.822E+5	4.75E+05	1.54%
Έδρανο γραμμής Νο.1	20.896	-4.81	4.823E+5	4.83E+05	-0.16%
Έδρανο μηχανής Νο.13	31.161	-5.93	5.701E+5	5.30E+05	7.10%
Έδρανο μηχανής Νο.12	42.454	-6.00	3.408E+5	3.83E+05	-12.52%
Έδρανο μηχανής Νο.11	52.935	-6.15	4.204E+5	4.03E+05	4.18%
Έδρανο μηχανής Νο.10	53.945	-6.28	5.804E+5	5.91E+05	-1.79%
Έδρανο μηχανής Νο.9	55.535	-6.43	5.720E+5	5.66E+05	0.97%
Έδρανο μηχανής Νο.8	57.125	-6.56	2.274E+5	2.31E+05	-1.62%
Σύνολο			5.797E+6	5.79E+06	0.05%

5.4.3.17 Κατάσταση φόρτωσης “16TAD”

Παρακάτω παρουσιάζονται οι υποθέσεις οι οποίες έχουν ληφθεί υπόψη προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός των αντιδράσεων των εδράνων στήριξης:

- Η κύρια μηχανή είναι εκτός λειτουργίας.
- Η κύρια μηχανή βρίσκεται σε ψυχρή κατάσταση.
- Οι μετατοπίσεις της γάστρας είναι μη-μηδενικές.
- Η έλικα και το τμήμα του ελικοφόρου άξονα είναι μερικώς βυθισμένα. Συνεπώς, στα συγκεκριμένα τμήματα εκτιμάται και η άντωση.
- Το φορτίο της έλικας είναι: $F = 874,841 \text{ N}$.

Στον Πίνακα 5.25 παρατίθενται οι διαμήκεις και κατακόρυφες θέσεις των εδράνων, οι τιμές των αντιδράσεων στήριξης των εδράνων υπολογισμένες με βάση τον κατασκευαστικό οδηγό αλλά και το λογισμικό ANSYS, καθώς και η μεταξύ τους ποσοστιαία απόκλιση.

Πίνακας 5. 25: Αντιδράσεις εδράνων (16TAD condition)

Τύπος Εδράνου	Διαμήκη Θέση Εδράνων [m]	Κατακόρυφη Θέση Εδράνων [mm]	Υπολογισμοί Φορτίσεων Σ.Σιαμαντά [N]	Υπολογισμοί Φορτίσεων ANSYS [N]	Διαφορά
Πρυμναίο έδρανο χοάνης	3.195	0.75	1.53E+06	1.51E+06	1.25%
Πρωραίο έδρανο χοάνης	3.870	0.80	2.14E+05	2.24E+05	-4.86%
Έδρανο γραμμής Νο.3	5.269	-2.04	3.76E+05	3.95E+05	-5.16%
Έδρανο γραμμής Νο.2	10.982	-3.20	4.84E+05	4.76E+05	1.56%
Έδρανο γραμμής Νο.1	20.896	-3.92	4.84E+05	4.84E+05	0.07%
Έδρανο μηχανής Νο.13	31.161	-4.77	5.61E+05	5.34E+05	4.83%
Έδρανο μηχανής Νο.12	42.454	-4.81	3.39E+05	3.66E+05	-7.85%
Έδρανο μηχανής Νο.11	52.935	-4.89	4.32E+05	4.16E+05	3.58%
Έδρανο μηχανής Νο.10	53.945	-4.96	5.75E+05	5.88E+05	-2.22%
Έδρανο μηχανής Νο.9	55.535	-5.05	5.78E+05	5.71E+05	1.11%
Έδρανο μηχανής Νο.8	57.125	-5.13	2.25E+05	2.28E+05	-1.69%
Σύνολο			5.80E+06	5.79E+06	0.05%

5.4.3.18 Κατάσταση φόρτωσης “11TDS”

Παρακάτω παρουσιάζονται οι υποθέσεις οι οποίες έχουν ληφθεί υπόψη προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός των αντιδράσεων των εδράνων στήριξης:

- Η κύρια μηχανή είναι εκτός λειτουργίας.
- Η κύρια μηχανή βρίσκεται σε ψυχρή κατάσταση.
- Οι μετατοπίσεις της γάστρας είναι μη-μηδενικές.
- Η έλικα και το τμήμα του ελικοφόρου άξονα είναι μερικώς βυθισμένα. Συνεπώς, στα συγκεκριμένα τμήματα εκτιμάται και η άντωση.
- Το φορτίο της έλικας είναι: $F = 874,841 \text{ N}$.

Στον Πίνακα 5.26 παρατίθενται οι διαμήκεις και κατακόρυφες θέσεις των εδράνων, οι τιμές των αντιδράσεων στήριξης των εδράνων υπολογισμένες με βάση τον κατασκευαστικό οδηγό αλλά και το λογισμικό ANSYS, καθώς και η μεταξύ τους ποσοστιαία απόκλιση.

Πίνακας 5. 26: Αντιδράσεις εδράνων (11TDS condition)

Τύπος Εδράνου	Διαμήκη Θέση Εδράνων [m]	Κατακόρυφη Θέση Εδράνων [mm]	Υπολογισμοί Φορτίσεων Σ.Σιαμαντά [N]	Υπολογισμοί Φορτίσεων ANSYS [N]	Διαφορά
Πρυμναίο έδρανο χοάνης	3.195	0.75	1.559E+6	1.54E+06	1.15%
Πρωραίο έδρανο χοάνης	3.870	0.82	1.628E+5	1.76E+05	-7.95%
Έδρανο γραμμής Νο.3	5.269	-0.54	3.974E+5	4.14E+05	-4.17%
Έδρανο γραμμής Νο.2	10.982	-0.28	4.916E+5	4.82E+05	1.98%
Έδρανο γραμμής Νο.1	20.896	-0.34	4.626E+5	4.68E+05	-1.17%
Έδρανο μηχανής Νο.13	31.161	-0.81	6.596E+5	6.09E+05	7.69%
Έδρανο μηχανής Νο.12	42.454	-0.92	2.880E+5	3.23E+05	-12.07%
Έδρανο μηχανής Νο.11	52.935	-1.08	3.917E+5	3.92E+05	-0.19%
Έδρανο μηχανής Νο.10	53.945	-1.23	5.850E+5	5.89E+05	-0.64%
Έδρανο μηχανής Νο.9	55.535	-1.40	5.724E+5	5.73E+05	-0.11%
Έδρανο μηχανής Νο.8	57.125	-1.56	2.271E+5	2.28E+05	-0.24%
Σύνολο			5.797E+6	5.79E+06	0.05%

5.4.3.19 Κατάσταση φόρτωσης “11TAS”

Παρακάτω παρουσιάζονται οι υποθέσεις οι οποίες έχουν ληφθεί υπόψη προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός των αντιδράσεων των εδράνων στήριξης:

- Η κύρια μηχανή είναι εκτός λειτουργίας.
- Η κύρια μηχανή βρίσκεται σε ψυχρή κατάσταση.
- Οι μετατοπίσεις της γάστρας είναι μη-μηδενικές.
- Η έλικα και το τμήμα του ελικοφόρου άξονα είναι μερικώς βυθισμένα. Συνεπώς, στα συγκεκριμένα τμήματα εκτιμάται και η άντωση.
- Το φορτίο της έλικας είναι: $F = 874,841 \text{ N}$.

Στον Πίνακα 5.27 παρατίθενται οι διαμήκεις και κατακόρυφες θέσεις των εδράνων, οι τιμές των αντιδράσεων στήριξης των εδράνων υπολογισμένες με βάση τον κατασκευαστικό οδηγό αλλά και το λογισμικό ANSYS, καθώς και η μεταξύ τους ποσοστιαία απόκλιση.

Πίνακας 5. 27: Αντιδράσεις εδράνων (11TAS condition)

Τύπος Εδράνου	Διαμήκη Θέση Εδράνων [m]	Κατακόρυφη Θέση Εδράνων [mm]	Υπολογισμοί Φορτίσεων Σ.Σιαμαντά [N]	Υπολογισμοί Φορτίσεων ANSYS [N]	Διαφορά
Πρυμαίο έδρανο χοάνης	3.195	0.75	1.558E+6	1.54E+06	1.37%
Πρωραίο έδρανο χοάνης	3.870	0.86	1.639E+5	1.81E+05	-10.30%
Έδρανο γραμμής Νο.3	5.269	-0.51	3.977E+5	4.13E+05	-3.92%
Έδρανο γραμμής Νο.2	10.982	-0.27	4.905E+5	4.81E+05	1.90%
Έδρανο γραμμής Νο.1	20.896	-0.29	4.626E+5	4.68E+05	-1.18%
Έδρανο μηχανής Νο.13	31.161	-0.75	6.636E+5	6.18E+05	6.86%
Έδρανο μηχανής Νο.12	42.454	-0.87	2.838E+5	3.07E+05	-8.11%
Έδρανο μηχανής Νο.11	52.935	-1.03	3.979E+5	4.10E+05	-2.99%
Έδρανο μηχανής Νο.10	53.945	-1.20	5.771E+5	5.71E+05	1.04%
Έδρανο μηχανής Νο.9	55.535	-1.37	5.743E+5	5.83E+05	-1.48%
Έδρανο μηχανής Νο.8	57.125	-1.54	2.275E+5	2.25E+05	0.97%
Σύνολο			5.797E+6	5.79E+06	0.05%

5.4.3.20 Κατάσταση φόρτωσης “16TDS”

Παρακάτω παρουσιάζονται οι υποθέσεις οι οποίες έχουν ληφθεί υπόψη προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός των αντιδράσεων των εδράνων στήριξης:

- Η κύρια μηχανή είναι εκτός λειτουργίας.
- Η κύρια μηχανή βρίσκεται σε ψυχρή κατάσταση.
- Οι μετατοπίσεις της γάστρας είναι μη-μηδενικές.
- Η έλικα και το τμήμα του ελικοφόρου άξονα είναι μερικώς βυθισμένα. Συνεπώς, στα συγκεκριμένα τμήματα εκτιμάται και η άντωση.
- Το φορτίο της έλικας είναι: $F = 874,841 \text{ N}$.

Στον Πίνακα 5.28 παρατίθενται οι διαμήκεις και κατακόρυφες θέσεις των εδράνων, οι τιμές των αντιδράσεων στήριξης των εδράνων υπολογισμένες με βάση τον κατασκευαστικό οδηγό αλλά και το λογισμικό ANSYS, καθώς και η μεταξύ τους ποσοστιαία απόκλιση.

Πίνακας 5. 28: Αντιδράσεις εδράνων (16TDS condition)

Τύπος Εδράνου	Διαμήκη Θέση Εδράνων [m]	Κατακόρυφη Θέση Εδράνων [mm]	Υπολογισμοί Φορτίσεων Σ.Σιαμαντά [N]	Υπολογισμοί Φορτίσεων ANSYS [N]	Διαφορά
Πρυμαίο έδρανο χοάνης	3.195	0.75	1.529E+6	1.51E+06	1.25%
Πρωαίο έδρανο χοάνης	3.870	0.80	2.189E+5	2.29E+05	-4.50%
Έδρανο γραμμής Νο.3	5.269	-2.12	3.708E+5	3.91E+05	-5.48%
Έδρανο γραμμής Νο.2	10.982	-3.29	4.885E+5	4.80E+05	1.79%
Έδρανο γραμμής Νο.1	20.896	-4.14	4.717E+5	4.75E+05	-0.79%
Έδρανο μηχανής Νο.13	31.161	-5.24	6.131E+5	5.73E+05	6.51%
Έδρανο μηχανής Νο.12	42.454	-5.37	3.281E+5	3.50E+05	-6.79%
Έδρανο μηχανής Νο.11	52.935	-5.59	3.973E+5	4.05E+05	-2.07%
Έδρανο μηχανής Νο.10	53.945	-5.81	5.799E+5	5.81E+05	-0.25%
Έδρανο μηχανής Νο.9	55.535	-6.04	5.728E+5	5.68E+05	0.75%
Έδρανο μηχανής Νο.8	57.125	-6.25	2.277E+5	2.31E+05	-1.43%
Σύνολο			5.797E+6	5.79E+06	0.05%

5.4.3.21 Κατάσταση φόρτωσης “16TAS”

Παρακάτω παρουσιάζονται οι υποθέσεις οι οποίες έχουν ληφθεί υπόψη προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός των αντιδράσεων των εδράνων στήριξης:

- Η κύρια μηχανή είναι εκτός λειτουργίας.
- Η κύρια μηχανή βρίσκεται σε ψυχρή κατάσταση.
- Οι μετατοπίσεις της γάστρας είναι μη-μηδενικές.
- Η έλικα και το τμήμα του ελικοφόρου άξονα είναι μερικώς βυθισμένα. Συνεπώς, στα συγκεκριμένα τμήματα εκτιμάται και η άντωση.
- Το φορτίο της έλικας είναι: $F = 874,841 \text{ N}$.

Στον Πίνακα 5.29 παρατίθενται οι διαμήκεις και κατακόρυφες θέσεις των εδράνων, οι τιμές των αντιδράσεων στήριξης των εδράνων υπολογισμένες με βάση τον κατασκευαστικό οδηγό αλλά και το λογισμικό ANSYS, καθώς και η μεταξύ τους ποσοστιαία απόκλιση.

Πίνακας 5. 29: Αντιδράσεις εδράνων (16TAS condition)

Τύπος Εδράνου	Διαμήκη Θέση Εδράνων [m]	Κατακόρυφη Θέση Εδράνων [mm]	Υπολογισμοί Φορτίσεων Σ.Σιαμαντά [N]	Υπολογισμοί Φορτίσεων ANSYS [N]	Διαφορά
Πρυμαίο έδρανο χοάνης	3.195	0.75	1.535E+6	1.52E+06	1.00%
Πρωραίο έδρανο χοάνης	3.870	0.75	2.083E+5	2.15E+05	-3.24%
Έδρανο γραμμής Νο.3	5.269	-1.92	3.751E+5	3.95E+05	-5.27%
Έδρανο γραμμής Νο.2	10.982	-2.77	4.896E+5	4.81E+05	1.80%
Έδρανο γραμμής Νο.1	20.896	-3.40	4.700E+5	4.74E+05	-0.82%
Έδρανο μηχανής Νο.13	31.161	-4.32	6.253E+5	5.81E+05	7.10%
Έδρανο μηχανής Νο.12	42.454	-4.44	3.152E+5	3.49E+05	-10.80%
Έδρανο μηχανής Νο.11	52.935	-4.64	3.990E+5	3.90E+05	2.27%
Έδρανο μηχανής Νο.10	53.945	-4.82	5.783E+5	5.90E+05	-1.99%
Έδρανο μηχανής Νο.9	55.535	-5.02	5.744E+5	5.73E+05	0.19%
Έδρανο μηχανής Νο.8	57.125	-5.21	2.275E+5	2.27E+05	0.06%
Σύνολο			5.797E+6	5.79E+06	0.05%

5.4.3.2 Κατάσταση φόρτωσης “MAX”

Παρακάτω παρουσιάζονται οι υποθέσεις οι οποίες έχουν ληφθεί υπόψη προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός των αντιδράσεων των εδράνων στήριξης:

- Η κύρια μηχανή είναι εκτός λειτουργίας.
- Η κύρια μηχανή βρίσκεται σε ψυχρή κατάσταση.
- Οι μετατοπίσεις της γάστρας είναι μη-μηδενικές.
- Η έλικα και το τμήμα του ελικοφόρου άξονα είναι μερικώς βυθισμένα. Συνεπώς, στα συγκεκριμένα τμήματα εκτιμάται και η άντωση.
- Το φορτίο της έλικας είναι: $F = 874,841 \text{ N}$.

Στον Πίνακα 5.30 παρατίθενται οι διαμήκεις και κατακόρυφες θέσεις των εδράνων, οι τιμές των αντιδράσεων στήριξης των εδράνων υπολογισμένες με βάση τον κατασκευαστικό οδηγό αλλά και το λογισμικό ANSYS, καθώς και η μεταξύ τους ποσοστιαία απόκλιση.

Πίνακας 5. 30: Αντιδράσεις εδράνων (MAX condition)

Τύπος Εδράνου	Διαμήκη Θέση Εδράνων [m]	Κατακόρυφη Θέση Εδράνων [mm]	Υπολογισμοί Φορτίσεων Σ.Σιαμαντά [N]	Υπολογισμοί Φορτίσεων ANSYS [N]	Διαφορά
Πρυμαίο έδρανο χοάνης	3.195	0.75	1.532E+6	1.52E+06	1.00%
Πρωαίο έδρανο χοάνης	3.870	0.75	2.136E+5	2.20E+05	-2.82%
Έδρανο γραμμής Νο.3	5.269	-2.05	3.729E+5	3.93E+05	-5.45%
Έδρανο γραμμής Νο.2	10.982	-3.00	4.883E+5	4.80E+05	1.66%
Έδρανο γραμμής Νο.1	20.896	-3.58	4.747E+5	4.76E+05	-0.29%
Έδρανο μηχανής Νο.13	31.161	-4.29	6.030E+5	5.74E+05	4.77%
Έδρανο μηχανής Νο.12	42.454	-4.37	3.162E+5	3.37E+05	-6.60%
Έδρανο μηχανής Νο.11	52.935	-4.49	4.246E+5	4.14E+05	2.45%
Έδρανο μηχανής Νο.10	53.945	-4.61	5.691E+5	5.81E+05	-2.02%
Έδρανο μηχανής Νο.9	55.535	-4.74	5.749E+5	5.74E+05	0.14%
Έδρανο μηχανής Νο.8	57.125	-4.86	2.280E+5	2.28E+05	-0.17%
Σύνολο			5.797E+6	5.79E+06	0.05%

5.5 Ανάλυση δυναμικής λειτουργίας συστήματος πρόωσης

5.5.1 Γενικά στοιχεία συστήματος πρόωσης

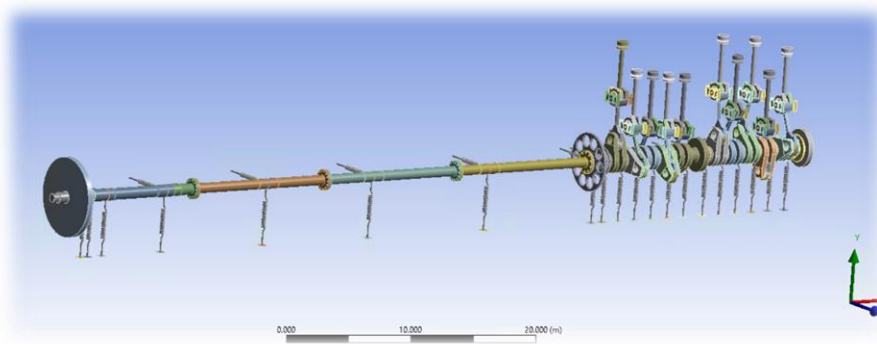
Στο **Σχήμα 5.19** αναπαρίσταται το μοντέλο του συστήματος πρόωσης του υπό μελέτη πλοίου, όπως αυτό χρησιμοποιείται για τη δυναμική ανάλυση.

Το αναπτυχθέν μοντέλο περιλαμβάνει την έλικα, τον ελικοφόρο άξονα, τους ενδιάμεσους άξονες, τον στροφαλοφόρο άξονα, καθώς και τον κινηματικό μηχανισμό, τον αποσβεστήρα στρεπτικών ταλαντώσεων και τον σφόνδυλο της κύριας μηχανής πρόωσης. Όπως και στη στατική ανάλυση, ο ελικοφόρος άξονας στηρίζεται από δύο πρυμναία έδρανα, ενώ οι ενδιάμεσοι άξονες στηρίζονται από τρία έδρανα γραμμής. Επιπροσθέτως, το κάθε έδρανο μοντελοποιείται ως ένα γραμμικό ελατήριο με ακαμψία ίση με αυτή της βάσης του. Αξίζει να σημειωθεί ότι, σε αντίθεση με τη στατική ανάλυση, και για λόγους απλοποίησης της δυναμικής μελέτης, δεν εκτιμάται η ροπή που ασκείται στον άξονα λόγω της εκκεντρα παραγόμενης ώσης από την έλικα.

Μία επιπλέον βασική διαφορά με τη στατική ανάλυση, είναι η σχεδίαση του στροφαλοφόρου άξονα, όπου αναπαρίστανται όλοι οι κύλινδροι του κινητήρα με ρύθμιση στις κατάλληλες γωνίες, όπως ορίζει η σειρά αλληλουχίας της καύσης του κινητήρα από τον κατασκευαστή ενώ παράλληλα χρησιμοποιούνται όλα τα έδρανα στήριξης του.

Τέλος, στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων προσδιορίζονται, μέσω οριακών συνθηκών, τα φαινόμενα:

- η πίεση στα έμβολα της κύριας μηχανής λόγω της καύσης εντός του κυλίνδρου
- τα υδροδυναμικά φορτία της έλικας
- η πίεση του λιπαντικού στα έδρανα
- οι λειτουργία των αποσβεστήρων ταλαντώσεων της κύριας μηχανής

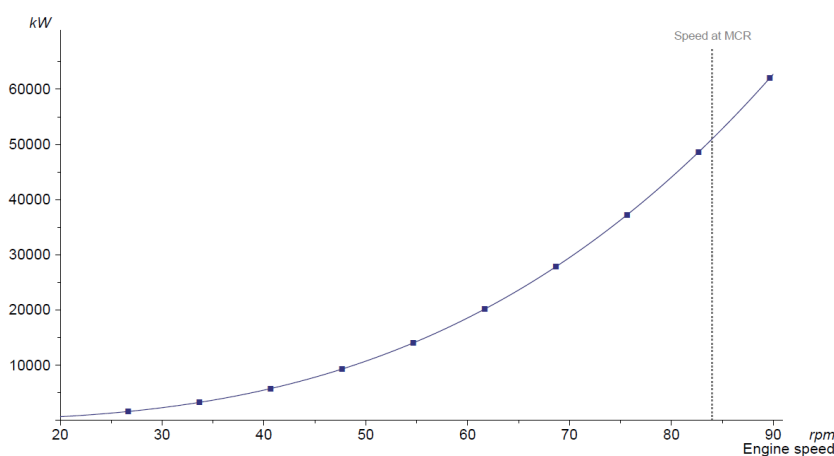


Σχήμα 5. 19: Μοντέλο δυναμικής ανάλυσης

5.5.2 Παράμετροι δυναμικής λειτουργίας συστήματος πρόωσης

Το υπό μελέτη πλοίο είναι εξοπλισμένο με κύρια μηχανή πρόωσης αποδιδόμενη ισχύος 45,900 kW και 81 RPM στο N.C.R. το οποίο αντιστοιχεί σε ταχύτητα υπηρεσίας 23.8 κόμβων. Η κάθε κατάσταση φόρτωσης, σύμφωνα με το «Loading manual», αντιστοιχεί σε διαφορετικό εκτόπισμα, και συνεπώς σε διαφορετική αντίσταση από την γάστρα. Όταν η αντίσταση από τη γάστρα αυξάνεται ή μειώνεται, προκειμένου επιτευχθεί η απαιτούμενη ταχύτητα υπηρεσίας (23.8 κόμβοι), πρέπει να αυξηθούν ή να μειωθούν αντιστοίχως και οι στροφές της έλικας.

Η εκτίμηση της ταχύτητας περιστροφής της έλικας, προκύπτει από την καμπύλη έλικας και το συντελεστή Ναυαρχείου. Το διάγραμμα της καμπύλης της έλικας χρησιμοποιείται για να παρέχει πληροφορίες σχετικά με την απαιτούμενη ισχύ ως συνάρτηση της ταχύτητας περιστροφής της έλικας. Θεωρητικά, η καμπύλη της έλικας διαφοροποιείται ανά κατάσταση φόρτωσης, όμως για λόγους απλοποίησης στην παρούσα μελέτη θεωρείται σταθερή για όλες τις καταστάσεις που εξετάζονται. Η καμπύλη της έλικας φαίνεται στο **Σχήμα 5.20**



Σχήμα 5. 20: Καμπύλη έλικας

Ο συντελεστής Ναυαρχείου κατά κύριο λόγο, χρησιμοποιείται για άμεσες και όχι ακριβείς εκτιμήσεις των χαρακτηριστικών του πλοίου, και υπολογίζεται από την σχέση:

$$A = \frac{\Delta^{\frac{2}{3}} \cdot P^3}{V} \quad [\text{EQ.5-1}]$$

Όπου,

- Δ : το εκτόπισμα
- P : η απαιτούμενη ισχύς
- V : η ταχύτητα υπηρεσίας.

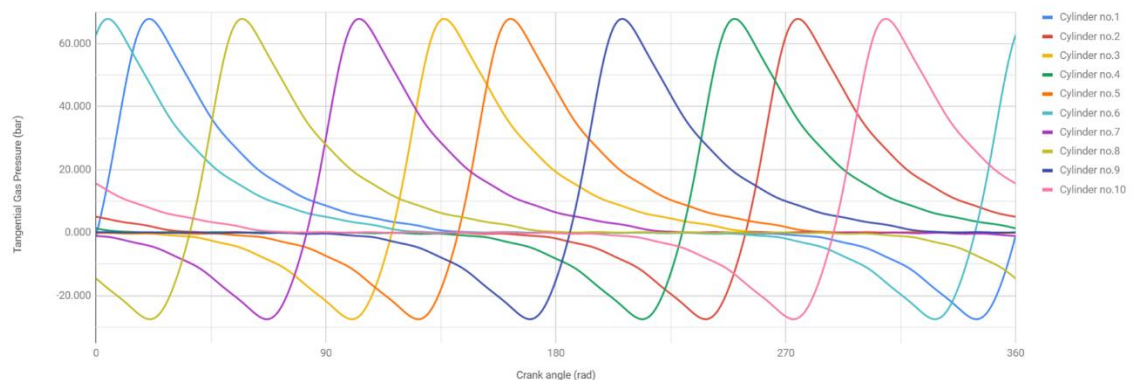
Τέλος, αφού πρώτα υπολογιστεί ο συντελεστής ναυαρχείου και επιλεγθεί η ταχύτητα υπηρεσίας, προσδιορίζονται οι τιμές της ισχύος του κινητήρα καθώς και οι στροφές της έλικας για κάθε κατάσταση που μελετάται.

5.5.3 Μοντελοποίηση οριακών συνθηκών δυναμικών φαινομένων

5.5.3.1 Καύση στους κυλίνδρους του κινητήρα

Το φαινόμενο της καύσης στους κυλίνδρους, απλοποιείται εφαρμόζοντας κατάλληλες πιέσεις στις κορυφές των πιστονιών, οι οποίες προκύπτουν από το δυναμοδεικτικό διάγραμμα του κινητήρα. Το δυναμοδεικτικό διάγραμμα προσδιορίζει την τιμή της πίεσης στον κύλινδρο σε κάθε γωνία περιστροφής του στροφαλοφόρου άξονα, θεωρώντας ως γωνία μηδέν τη θέση στην οποία ο πρώτος κύλινδρος βρίσκεται στο άνω νεκρό σημείο.

Ο νηογώμονας στον κατασκευαστικό οδηγό «Torsional Vibration Calculation», αθροίζοντας είκοσι αρμονικές συναρτήσεις ημιτόνου και συνημίτονου με άγνωστη τη γωνία του εκάστοτε στροφάλου, παράγει την πληροφορία του δυναμοδεικτικού διαγράμματος για το M.C.R. του κινητήρα. Στο **Σχήμα 5.21** φαίνονται τα διαγράμματα των πιέσεων στο M.C.R. του κινητήρα, με χαρακτηριστικά 51,000 kW παραγόμενη ισχύ και 84 στροφές λειτουργίας.



Σχήμα 5. 21: Δυναμοδεικτικό διάγραμμα του κινητήρα

5.5.3.2 Λειτουργία των αποσβεστήρων ταλαντώσεων της κύριας μηχανής

Το σύστημα πρόωσης προκειμένου να ισορροπήσει σε σταθερές στροφές περιστροφής, πρέπει να οριστούν οι οριακές συνθήκες, οι οποίες θα εμποδίσουν τα μεγάλα πλάτη στρεπτικής ταλάντωσης. Αναγκαία και ικανή συνθήκη ώστε να συμβεί αυτό είναι η απώλεια ενέργειας από το σύστημα πρόωσης.

Στον κατασκευαστικό οδηγό του νηογνώμονα «Torsional Vibration Calculation», προσδιορίζονται οι συντελεστές απόσβεσης για την μείωση των στρεπτικών ταλαντώσεων της απόλυτης κίνησης του συστήματος καθώς και της σχετικής κίνησης των τμημάτων της κύριας μηχανής. Οι τιμές των συντελεστών για την απόλυτη κίνηση, προκύπτουν ως ποσοστό της κρίσιμης απόσβεσης των εξαρτημάτων για την εκάστοτε συχνότητα διέγερσης, ενώ οι αποσβέσεις της σχετικής κίνησης, των κυλίνδρων του κινητήρα και του αποσβεστήρα στρεπτικών ταλαντώσεων, υπολογίζονται από τον τύπο:

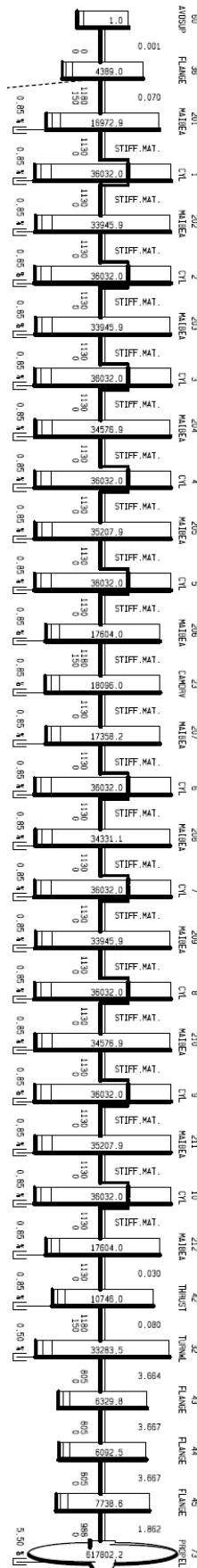
$$C_{rel.} = \frac{\kappa * T_{elastic}}{\omega} \quad [EQ.5-2]$$

Όπου:

- C_{rel} : ο συντελεστής απόσβεσης
- $T_{elastic}$: η ελαστική ροπή
- ω : η ταχύτητα περιστροφής μεταξύ των δύο σωμάτων
- $\kappa = 0.1$

Στο **Σχήμα 5.22** φαίνονται τα ποσοστά της κρίσιμης απόσβεσης για το εκάστοτε τμήμα του συστήματος πρόωσης, καθώς και οι τιμές των ροπών αδρανείας τους για την περιστροφική κίνηση.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι, η έλικα επηρεάζει σημαντικά στην απόσβεση της απόλυτης κίνησης του συστήματος, ενώ ο αποσβεστήρας στρεπτικών ταλαντώσεων επιφέρει σημαντική μείωση στην σχετική κίνηση μεταξύ των τμημάτων του κινητήρα.



Σχήμα 5. 22: Ποσοστά της κρίσιμης απόσβεσης για το εκάστοτε τμήμα του συστήματος πρόωσης

5.5.3.3 Υδροδυναμική συμπεριφορά έλικας

Η υδροδυναμική συμπεριφορά της έλικας μοντελοποιείται, προσδιορίζοντας τις τιμές των μητρώων της μάζας (M), της ακαμψίας (K) και της απόσβεσης (C). Αρχικά, το μητρώο ακαμψίας μηδενίζεται, εφόσον οι καταστάσεις φόρτωσης οι οποίες εξετάζονται στην συγκεκριμένη μελέτη, θεωρούν την έλικα πλήρως βυθισμένη. Στην συνέχεια, το μητρώο απόσβεσης της έλικας προσδιορίζεται με βάση τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$c_{11} = 0.0925 \cdot \rho \cdot \omega \cdot D^3 \cdot \left(\frac{A_e}{A_o}\right) \quad [\text{EQ.5-3}]$$

$$c_{22} = c_{33} = 0.1536 \cdot \frac{\rho \cdot \omega \cdot D^2}{\pi} \cdot \left(\frac{P}{D}\right)^2 \cdot \left(\frac{A_e}{A_o}\right) \quad [\text{EQ.5-4}]$$

$$c_{44} = 0.0231 \cdot \frac{\rho \cdot \omega \cdot D^5}{\pi} \cdot \left(\frac{P}{D}\right)^2 \cdot \left(\frac{A_e}{A_o}\right) \quad [\text{EQ.5-5}]$$

$$c_{55} = c_{66} = 0.0053 \cdot \pi \cdot \rho \cdot \omega \cdot D^5 \cdot \left(\frac{A_e}{A_o}\right) \quad [\text{EQ.5-6}]$$

$$c_{41} = -0.0463 \cdot \rho \cdot \omega \cdot D^4 \cdot \left(\frac{P}{D}\right) \cdot \left(\frac{A_e}{A_o}\right) \quad [\text{EQ.5-7}]$$

$$c_{52} = 0.0231 \cdot \rho \cdot \omega \cdot D^4 \cdot \left(\frac{P}{D}\right) \cdot \left(\frac{A_e}{A_o}\right)^2 \quad [\text{EQ.5-8}]$$

$$c_{62} = 0.0981 \cdot \frac{\rho \cdot \omega \cdot D^4}{Z} \cdot \left(\frac{P}{D}\right) \cdot \left(\frac{A_e}{A_o}\right)^2 \quad [\text{EQ.5-9}]$$

$$c_{65} = 0.0183 \cdot \frac{\pi \cdot \rho \cdot \omega \cdot D^5}{Z} \cdot \left(\frac{A_e}{A_o}\right)^2 \quad [\text{EQ.5-10}]$$

$$c_{35} = 0.1128 \cdot \frac{\rho \cdot \omega \cdot D^4}{Z} \cdot \left(\frac{P}{D}\right) \cdot \left(\frac{A_e}{A_o}\right)^2 \quad [\text{EQ.5-11}]$$

Όπου,

- ρ : η πυκνότητα του θαλασσινού νερού
- ω : η ταχύτητα περιστροφής
- Z : ο αριθμός των πτερυγίων της έλικας
- D : η διάμετρος της έλικας
- P/D : ο λόγος του βήματος της έλικας
- A_e/A_o : ο λόγος της εκτεταμένης επιφάνειας της έλικας

Τέλος, σύμφωνα με το κατασκευαστικό οδηγό «Torsional Vibration Calculation», γίνεται προσαύξηση του μητρώου της μάζας κατά 25%, προκειμένου να μοντελοποιηθεί η κίνηση της έλικας μέσα στο ρευστό.

5.5.3.4 Υδροδυναμική λίπανση εδράνων

Αρχικά, μέσα από το περιβάλλον του Ansys Workbench, χρησιμοποιήθηκε ειδική βιβλιοθήκη όπου προσδίδοντας τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε εδράνου, γίνεται επίλυση της εξίσωσης Reynolds και έτσι ορίζεται η υδροδυναμική λίπανση του λιπαντικού των εδράνων. Βέβαια η συγκεκριμένη επιλογή απορρίφθηκε μιας και ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος αυξήθηκε σημαντικά.

Στην συνέχεια, επιλέγεται να προσδιοριστούν σταθερές ακαμψίας και απόσβεσης για την μοντελοποίηση του φαινομένου, οι τιμές των οποίων προκύπτουν από τις αντίστοιχες τιμές που χρησιμοποιεί ο Murawski [4] για τα έδρανα του συστήματος που εξετάζει. Αξίζει να σημειωθεί ότι, τα έδρανα του υπό μελέτη πλοίου καθώς και η ταχύτητα περιστροφής του συστήματος είναι όμοια με αυτά του Murawski, οπότε η απόκλιση από των σταθερών είναι αρκετά μικρή. Στο **Πίνακα 5.31** παρουσιάζονται οι τιμές των σταθερών ακαμψίας και απόσβεσης της υδροδυναμικής λίπανσης, για το έδρανα του συστήματος πρόωσης, .

Πίνακας 5. 31: Ακαμψίας και απόσβεσης της υδροδυναμικής λίπανσης

Τύπος εδράνου	Κατακόρυφη ακαμψία (N/m)	Οριζόντια ακαμψία (N/m)	Κατακορυφη απόσβεση (Ns/m)	Οριζόντια απόσβεση (Ns/m)
Πρυμναία έδρανα χοάνης	2.9×10^9	2.3×10^9	2.8×10^8	2.8×10^8
Έδρανα γραμμής	1.8×10^9	1.1×10^9	1.0×10^8	1.0×10^8
Έδρανα μηχανής	1.4×10^9	0.9×10^9	0.7×10^8	0.7×10^8

5.5.4 Υπολογισμοί και αποτελέσματα δυναμικής λειτουργίας του συστήματος πρόωσης

Η ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος πρόωσης, καθορίζεται για μεμονωμένες καταστάσεις λειτουργίας του πλοίου, οι οποίες ορίζονται από την κατάσταση φόρτωσης, την ταχύτητα υπηρεσίας και τις καιρικές συνθήκες. Κοινό χαρακτηριστικών όλων των καταστάσεων είναι ότι η κύρια μηχανή είναι σε λειτουργία. Πιο συγκεκριμένα, οι καταστάσεις οι οποίες εξετάζονται είναι οι εξής:

- Η κατάσταση φόρτωσης “MAX” με ταχύτητα υπηρεσίας 23.8 κόμβων
- Η κατάσταση φόρτωσης “BLD” με ταχύτητα υπηρεσίας 23.8 κόμβων

Η ανάλυση που ακολουθεί, έχει χρησιμοποιήσει το λογισμικό Ansys Workbench για την επίλυση του προβλήματος. Οι πρώτες περιστροφές του μοντέλου, αφορούν μεταβατικές καταστάσεις της κίνησης και δεν λαμβάνονται υπόψη. Όταν το σύστημα ισορροπεί σε σταθερές ταχύτητες περιστροφής (με μικρή διακύμανση), εξάγονται οι πληροφορίες για την χρονική ιστορία των εδράνων.

Ύστερα, για καθένα από τα έδρανα του αξονικού συστήματος, εισάγεται η χρονική ιστορία των αντιδράσεων στήριξης σε λογισμικό που σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, προκειμένου να παρουσιαστεί η τροχιά του άξονα μέσα στο έδρανο.

Για της παραπάνω καταστάσεις, έγινε επίλυση του προβλήματος για δυο κύκλους περιστροφής του συστήματος μιας και ο εξοπλισμός του εργαστηρίου δεν είχε την δυνατότητα να στηρίζει μεγαλύτερο αριθμό περιστροφών.

Τέλος, για την απλοποίηση του προβλήματος, στην παρούσα διπλωματική θεωρείται ότι το πλοίο ταξιδεύει σε καλές καιρικές συνθήκες, όπου δεν υπάρχουν λόγω κυματισμών (α) μετατοπίσεις στην γάστρα και (β) αλλαγή τον υδροδυναμικών φαινομένων της έλικας.

5.5.4.1 Loading Condition “MAX”

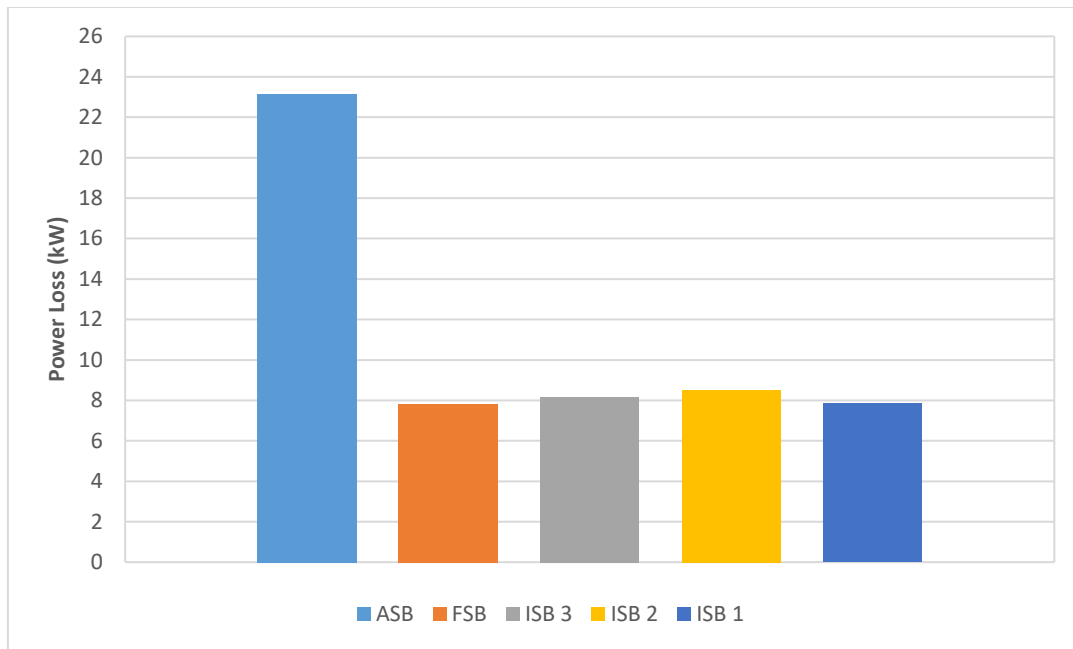
Παρακάτω παρουσιάζονται οι υποθέσεις, οι οποίες έχουν ληφθεί υπόψη προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός των αντιδράσεων των εδράνων στήριξης:

- Η κύρια μηχανή έχει ταχύτητα περιστροφής 84.9 RPM
- Η κύρια μηχανή βρίσκεται σε θερμή κατάσταση και η κατακόρυφη μετατόπιση των εδράνων της, αυξάνεται κατά 0.41 mm
- Οι μετατοπίσεις της γάστρας είναι μη-μηδενικές (**Πίνακας 5.32**)
- Η έλικα έχει προσαύξηση 25% στην μάζα της και την ροπή αδρανείας της
- Οι συντελεστές απόσβεσης στρεπτικών ταλαντώσεων είναι μη-μηδενικοί

Πίνακας 5. 32: Θέσεις των βάσεων των εδράνων ‘Loading Condition MAX’

Τύπος Εδράνου	Διαμήκη Θέση Εδράνων [m]	Κατακόρυφη Θέση Εδράνων [mm]
Πρυμναίο έδρανο χοάνης	3.87	0.75
Πρωραίο έδρανο χοάνης	10.982	0.75
Έδρανο γραμμής No.3	20.896	-2.05
Έδρανο γραμμής No.2	31.161	-3.00
Έδρανο γραμμής No.1	42.454	-3.58
Έδρανο μηχανής No.13	52.935	-3.88
Έδρανο μηχανής No.12	53.945	-3.96
Έδρανο μηχανής No.11	55.535	-4.08
Έδρανο μηχανής No.10	57.125	-4.2
Έδρανο μηχανής No.9	58.715	-4.33
Έδρανο μηχανής No.8	60.305	-4.45
Έδρανο μηχανής No.7	61.895	-4.57
Έδρανο μηχανής No.6	63.755	-4.71
Έδρανο μηχανής No.5	65.345	-4.83
Έδρανο μηχανής No.4	66.935	-4.95
Έδρανο μηχανής No.3	68.525	-5.07
Έδρανο μηχανής No.2	70.115	-5.19
Έδρανο μηχανής No.1	71.705	-5.31

Θεωρώντας λιπαντικό με τιμή ιξώδους 0.1 Pa s, εκτιμάται η απώλεια ενέργειας για το κάθε έδρανο. Τα σχετικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο **Σχήμα 5.23**.



Σχήμα 5. 23: Εκτίμηση απώλειας ενέργειας από κάθε έδρανο (Loading Condition “MAX”)

Ακολουθούν τα αποτελέσματα για το κάθε έδρανο του αξονικού συστήματος που προκύπτουν από την ανάλυση με χρήση του λογισμικού Ansys Workbench και του λογισμικού για την επίλυση των εδράνων του Ε.Μ.Π.

5.5.4.1.1 Έδρανο “ASB”

Στον **Πίνακα 5.33** παρουσιάζονται για το έδρανο ASB, το ελάχιστο, το μέγιστο και το μέσο κατακόρυφο φορτίο που υπολογίζει το Ansys Workbench κατά την επίλυση του δυναμικού προβλήματος καθώς και το κατακόρυφο φορτίο της στατικής κατάστασης, ενώ στον **Πίνακα 5.34** παρουσιάζονται αντίστοιχα τα εγκάρσια φορτία.

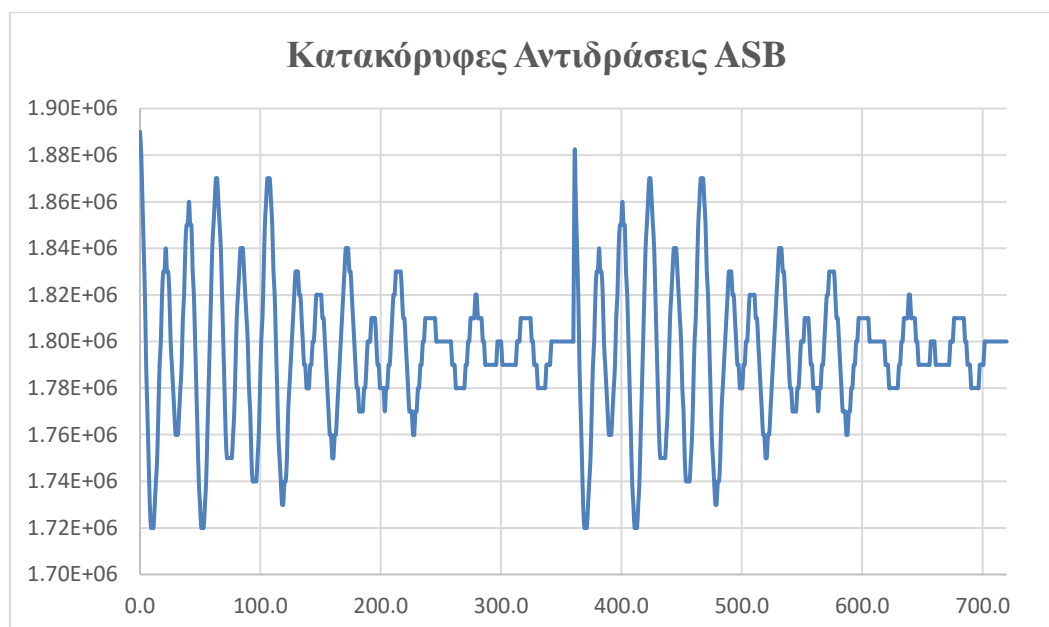
Πίνακας 5. 33: Κατακόρυφα Φορτία εδράνου ASB

Δυναμική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)			Στατική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)
Μέγιστη	Ελάχιστη	Μέση	Μέση
1.89E+06 N	1.72E+06 N	1.80E+06 N	1.77E+06 N

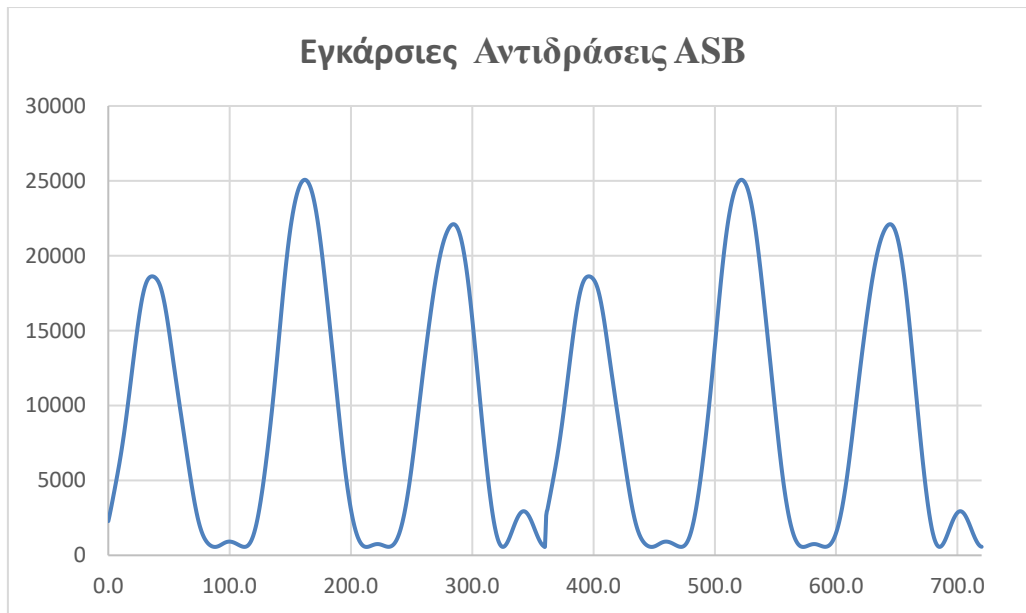
Πίνακας 5. 34: Εγκάρσια Φορτία εδράνου ASB

Δυναμική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)			Στατική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)
Μέγιστη	Ελάχιστη	Μέση	Μέση
2.5E+04 N	5.61E+02 N	9.0E+03 N	~0

Οι κατακόρυφες και εγκάρσιες αντιδράσεις που προκύπτουν από το Ansys Workbench φαίνονται στα **Σχήματα 5.24 - 5.25**.

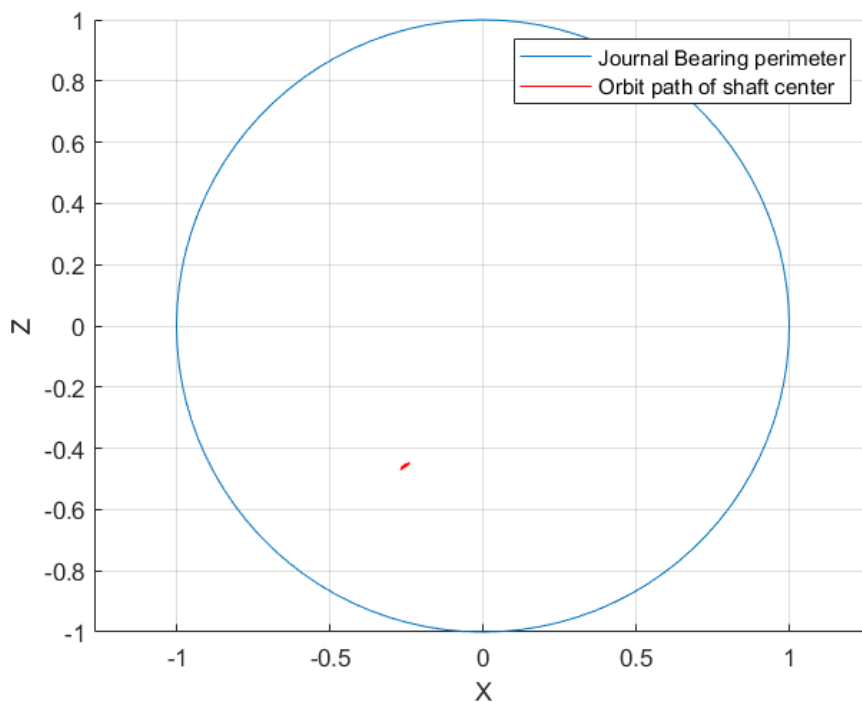


Σχήμα 5. 24: Κατακόρυφες αντιδράσεις ASB

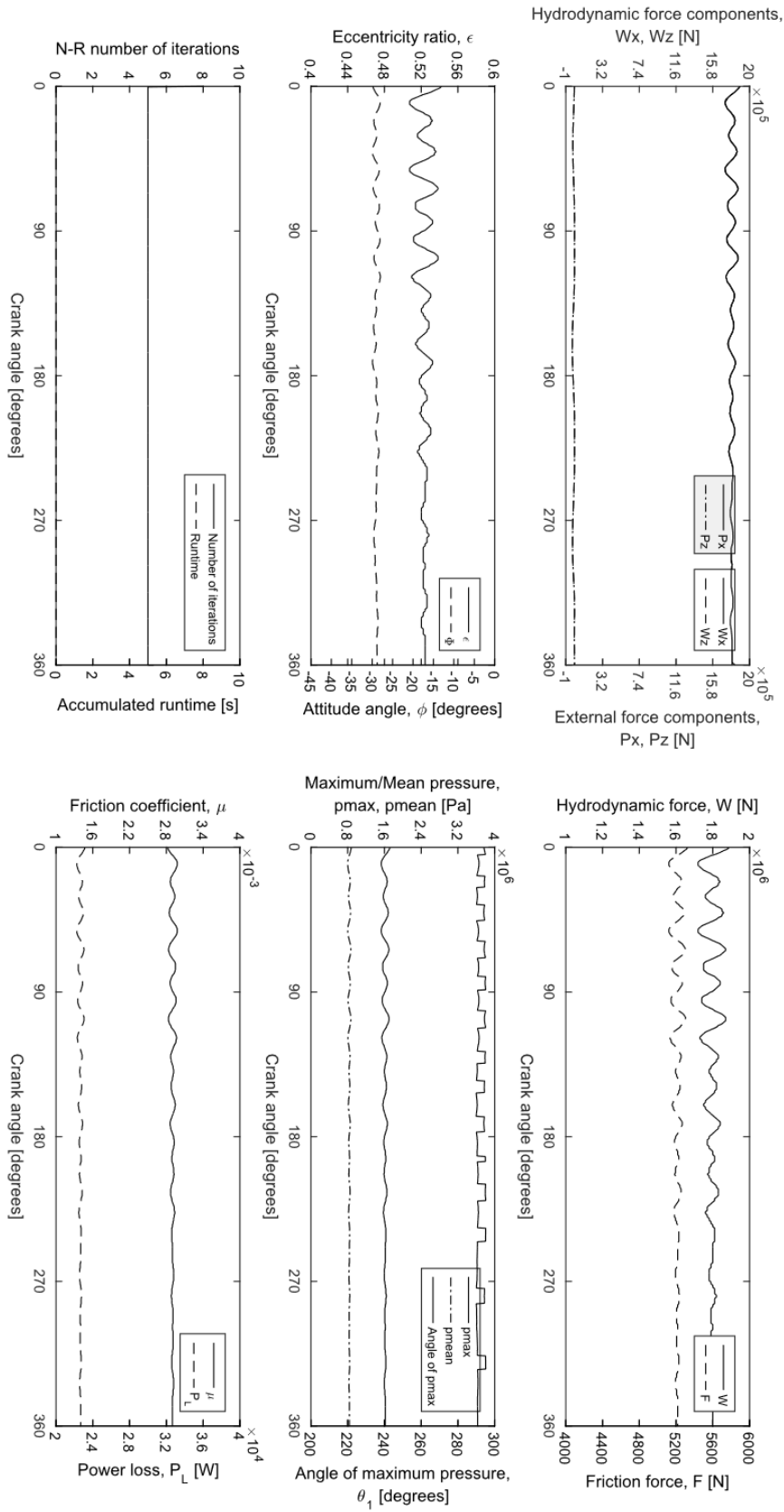


Σχήμα 5. 25: Εγκάρσιες αντιδράσεις ASB

Επιπλέον, η τροχιά που διαγράφει ο άξονας μέσα στο έδρανο ASB σύμφωνα με το λογισμικό για την επίλυση των εδράνων του Ε.Μ.Π, καθώς και οι τριβολογικές παράμετροι λειτουργίας . απεικονίζεται στο **Σχήμα 5.26** και **Σχήμα 5.27**, αντίστοιχα.



Σχήμα 5. 26: Τροχιά άξονα στο ASB



Σχήμα 5. 27: ASB, Τριβολογικές παράμετροι λειτουργίας (Loading Condition “MAX”)

5.5.4.1.2 Έδρανο “FSB”

Στον **Πίνακα 5.35** παρουσιάζονται για το έδρανο FSB, το ελάχιστο, το μέγιστο και το μέσο κατακόρυφο φορτίο που υπολογίζει το Ansys Workbench κατά την επίλυση του δυναμικού προβλήματος καθώς και το κατακόρυφο φορτίο της στατικής κατάστασης, ενώ στον **Πίνακα 5.36** παρουσιάζονται αντίστοιχα τα εγκάρσια φορτία.

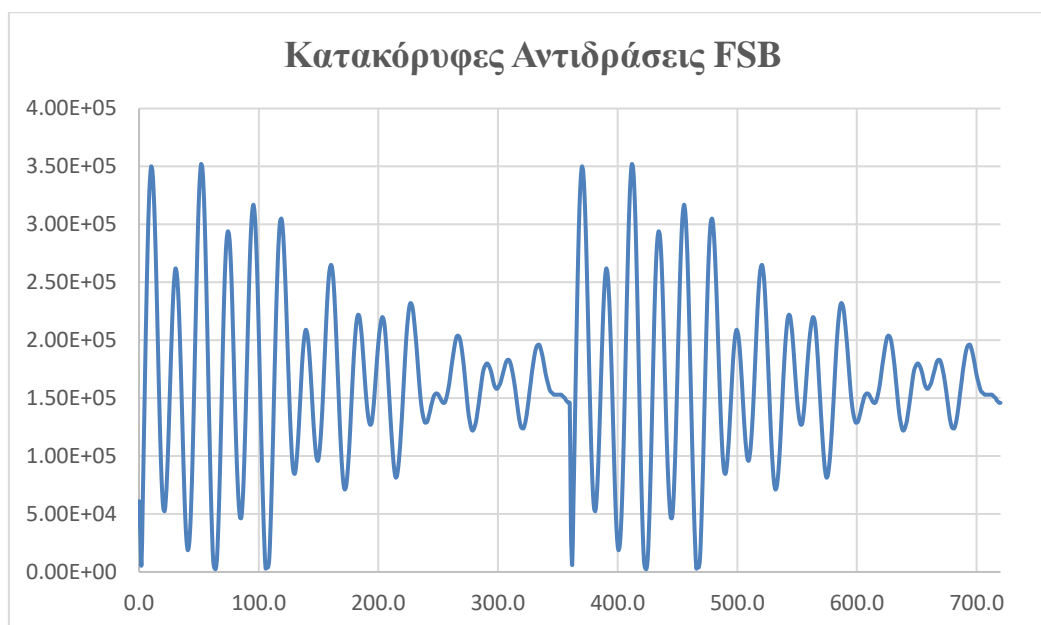
Πίνακας 5. 35: Κατακόρυφα Φορτία εδράνου FSB

Δυναμική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)			Στατική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)
Μέγιστη	Ελάχιστη	Μέση	Μέση
3.52E+05 N	6.58E+03 N	1.64E+05 N	1.77E+05 N

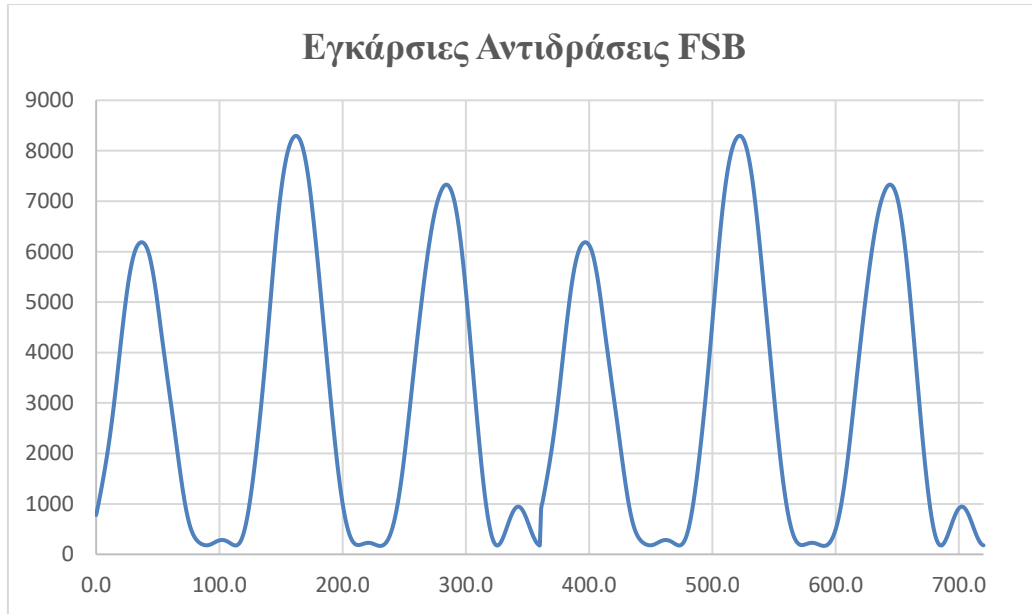
Πίνακας 5. 36: Εγκάρσια Φορτία εδράνου FSB

Δυναμική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)			Στατική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)
Μέγιστη	Ελάχιστη	Μέση	Μέση
8.29E+03 N	1.67E+02 N	2.97E+03 N	~0

Οι κατακόρυφες και εγκάρσιες αντιδράσεις που προκύπτουν από το Ansys Workbench φαίνονται στα **Σχήματα 5.28 - 5.29**.

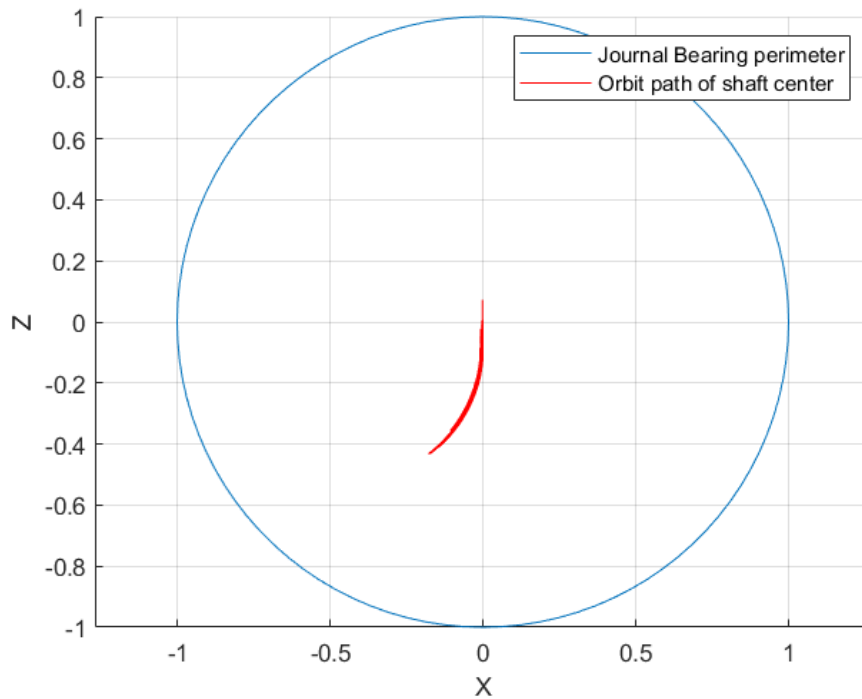


Σχήμα 5. 28: Κατακόρυφες αντιδράσεις FSB

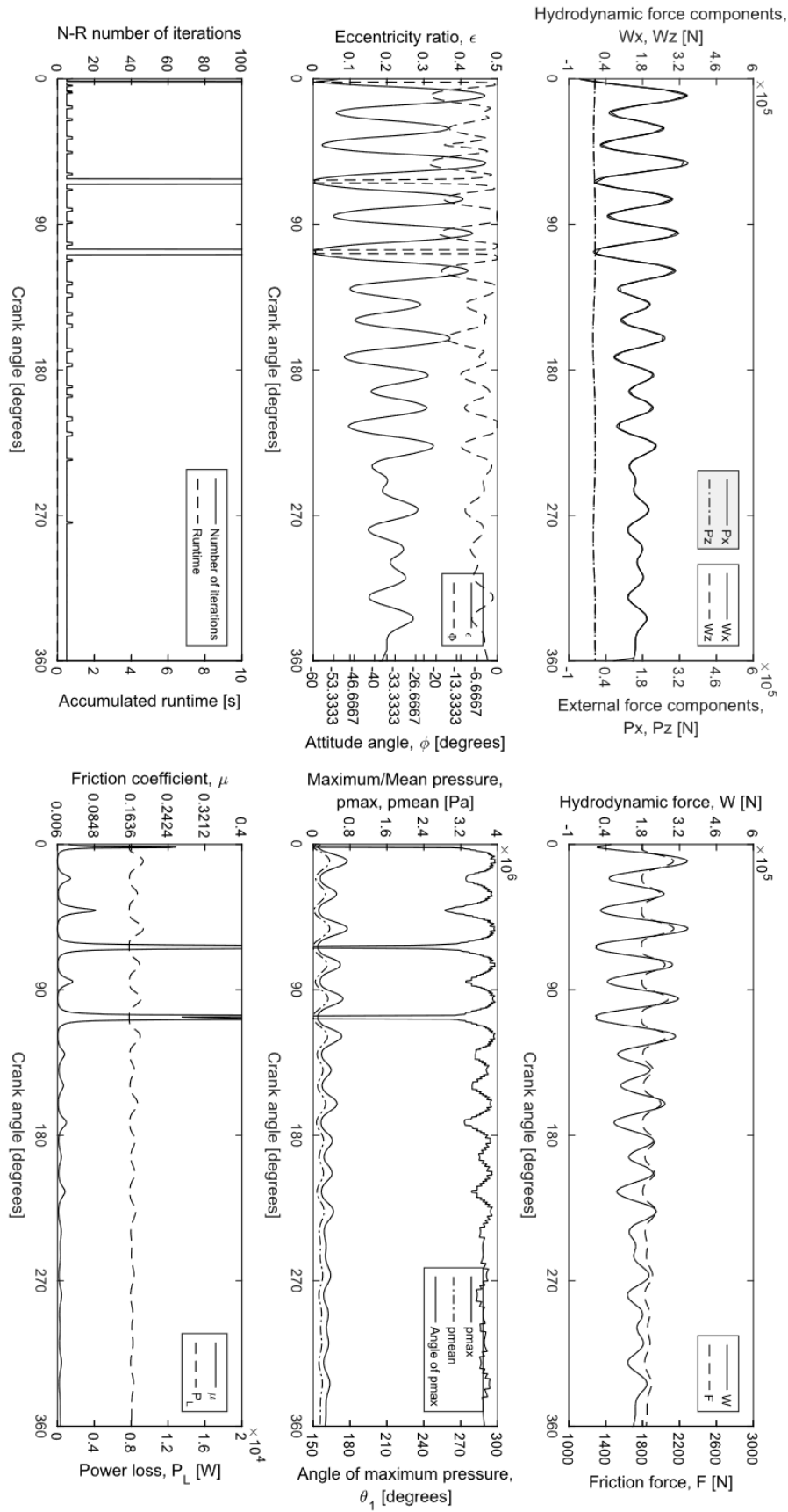


Σχήμα 5. 29: Εγκάρσιες αντιδράσεις FSB

Επιπλέον, η τροχιά που διαγράφει ο άξονας μέσα στο έδρανο FSB σύμφωνα με το λογισμικό για την επίλυση των εδράνων του Ε.Μ.Π, καθώς και οι τριβολογικές παράμετροι λειτουργίας . απεικονίζεται στο **Σχήμα 5.30** και **Σχήμα 5.31**, αντίστοιχα.



Σχήμα 5. 30: Τροχιά άξονα στο FSB



Σχήμα 5. 31: FSB, Τριβολογικές παράμετροι λειτουργίας (Loading Condition “MAX”)

5.5.4.1.3 Έδρανο “ISB 3”

Στον **Πίνακα 5.37** παρουσιάζονται για το έδρανο ISB 3, το ελάχιστο, το μέγιστο και το μέσο κατακόρυφο φορτίο που υπολογίζει το Ansys Workbench κατά την επίλυση του δυναμικού προβλήματος καθώς και το κατακόρυφο φορτίο της στατικής κατάστασης, ενώ στον **Πίνακα 5.38** παρουσιάζονται αντίστοιχα τα εγκάρσια φορτία.

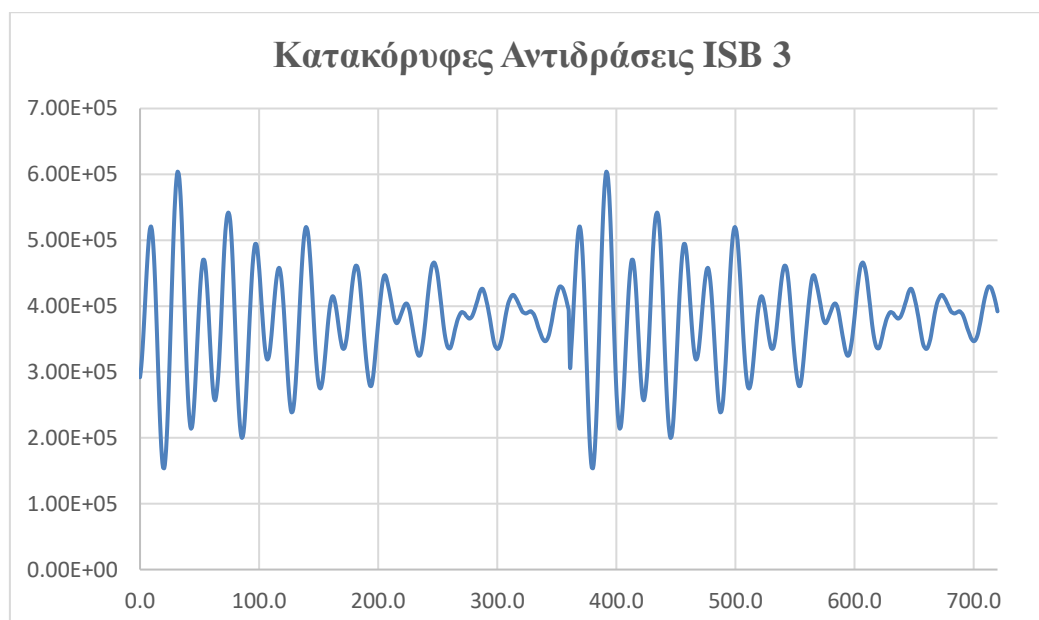
Πίνακας 5. 37: Κατακόρυφα Φορτία εδράνου ISB 3

Δυναμική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)			Στατική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)
Μέγιστη	Ελάχιστη	Μέση	Μέση
6.04E+05 N	2.00E+05 N	3.83E+05 N	4.00E+05 N

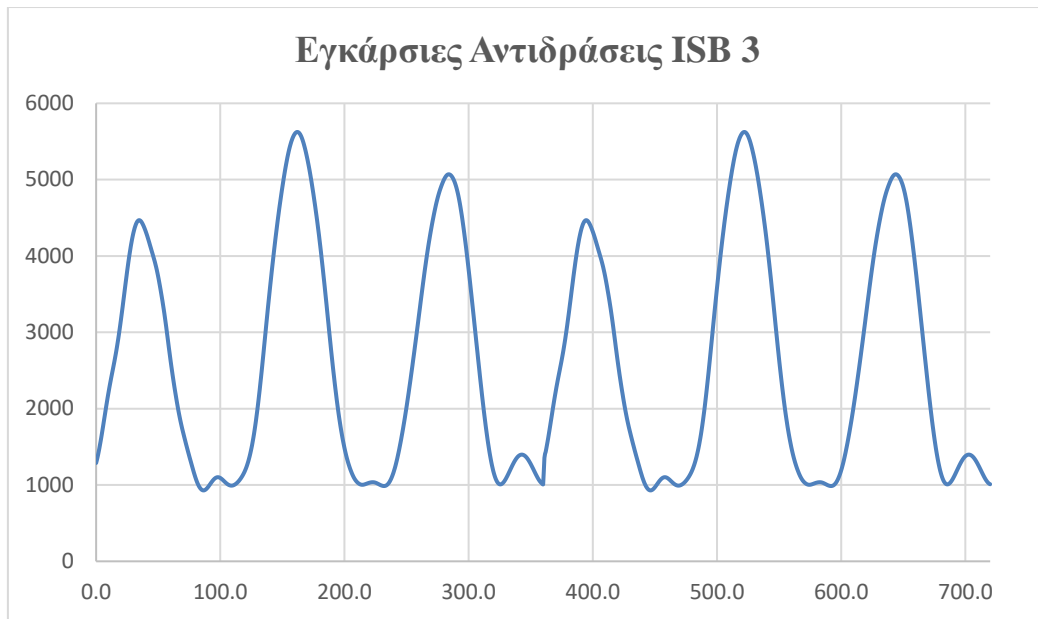
Πίνακας 5. 38: Εγκάρσια Φορτία εδράνου ISB 3

Δυναμική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)			Στατική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)
Μέγιστη	Ελάχιστη	Μέση	Μέση
5.62E+03 N	9.29E+02 N	2.58E+03 N	~0

Οι κατακόρυφες και εγκάρσιες αντιδράσεις που προκύπτουν από το Ansys Workbench φαίνονται στα **Σχήματα 5.32 - 5.33**.

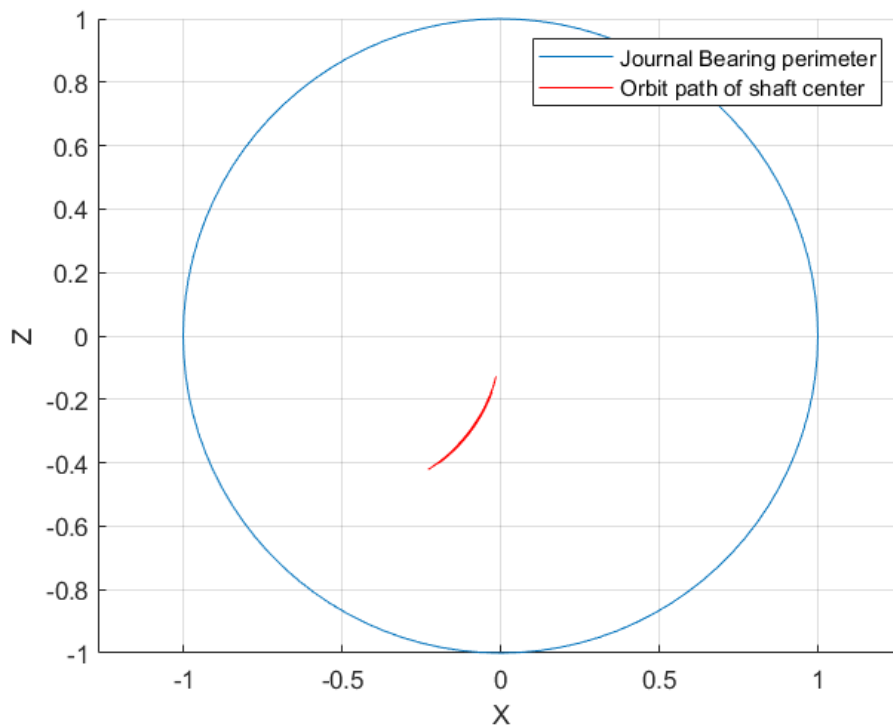


Σχήμα 5. 32: Κατακόρυφες αντιδράσεις ISB 3

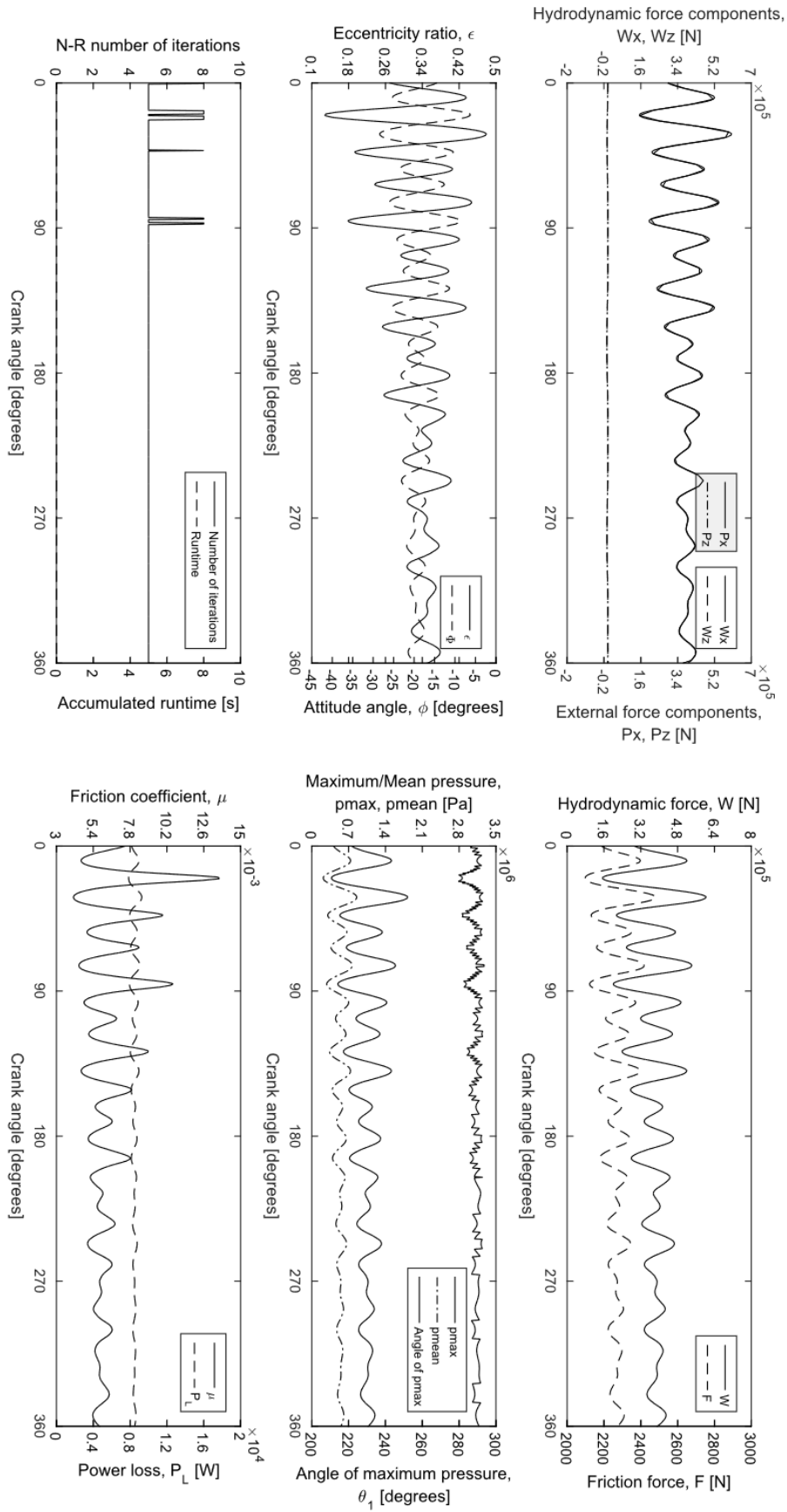


Σχήμα 5. 33: Εγκάρσιες αντιδράσεις ISB 3

Επιπλέον, η τροχιά που διαγράφει ο άξονας μέσα στο έδρανο ISB 3 σύμφωνα με το λογισμικό για την επίλυση των εδράνων του Ε.Μ.Π, καθώς και οι τριβολογικές παράμετροι λειτουργίας . απεικονίζεται στο Σχήμα 5.34 και Σχήμα 5.35, αντίστοιχα.



Σχήμα 5. 34: Τροχιά άξονα στο ISB 3



Σχήμα 5. 35: ISB 3, Τριβολογικές παράμετροι λειτουργίας (Loading Condition “MAX”)

5.5.4.1.4 Έδρανο “ISB 2”

Στον **Πίνακα 5.39** παρουσιάζονται για το έδρανο ISB 2, το ελάχιστο, το μέγιστο και το μέσο κατακόρυφο φορτίο που υπολογίζει το Ansys Workbench κατά την επίλυση του δυναμικού προβλήματος καθώς και το κατακόρυφο φορτίο της στατικής κατάστασης, ενώ στον **Πίνακα 5.40** παρουσιάζονται αντίστοιχα τα εγκάρσια φορτία.

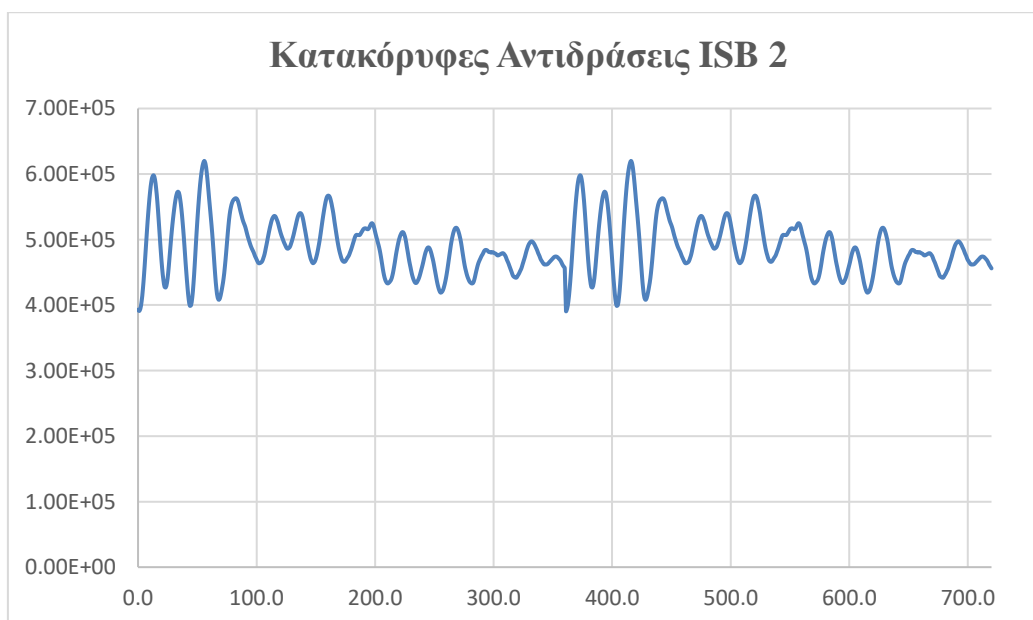
Πίνακας 5. 39: Κατακόρυφα Φορτία εδράνου ISB 2

Δυναμική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)			Στατική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)
Μέγιστη	Ελάχιστη	Μέση	Μέση
6.20E+05 N	3.99E+05 N	4.88E+05 N	4.71E+05 N

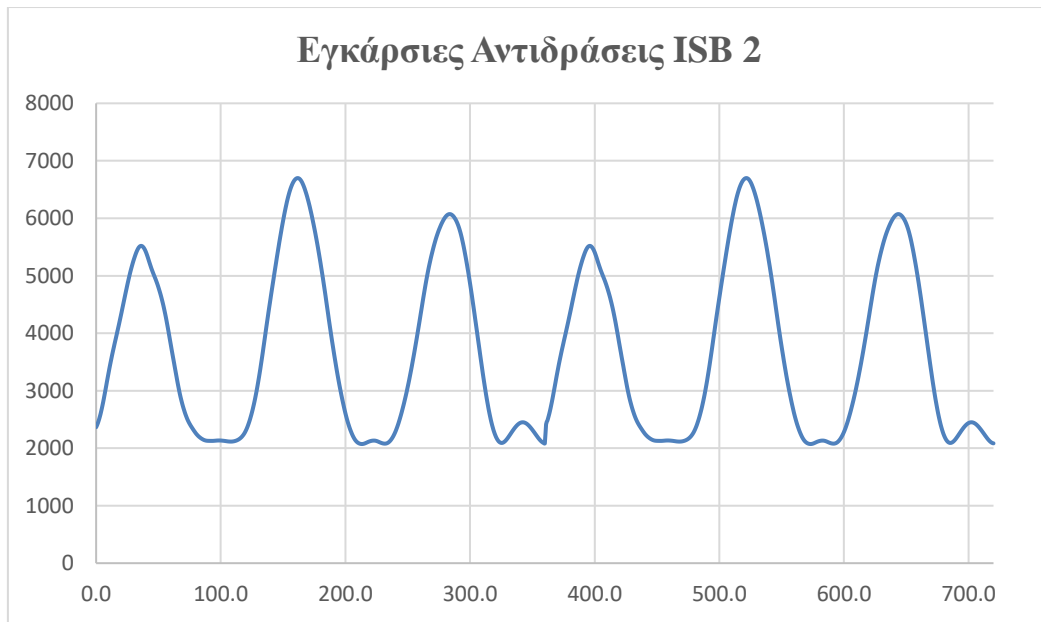
Πίνακας 5. 40: Εγκάρσια Φορτία εδράνου ISB 2

Δυναμική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)			Στατική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)
Μέγιστη	Ελάχιστη	Μέση	Μέση
6.69E+03 N	2.07E+03 N	3.65E+03 N	~0

Οι κατακόρυφες και εγκάρσιες αντιδράσεις που προκύπτουν από το Ansys Workbench φαίνονται στα **Σχήματα 5.36 - 5.37**.

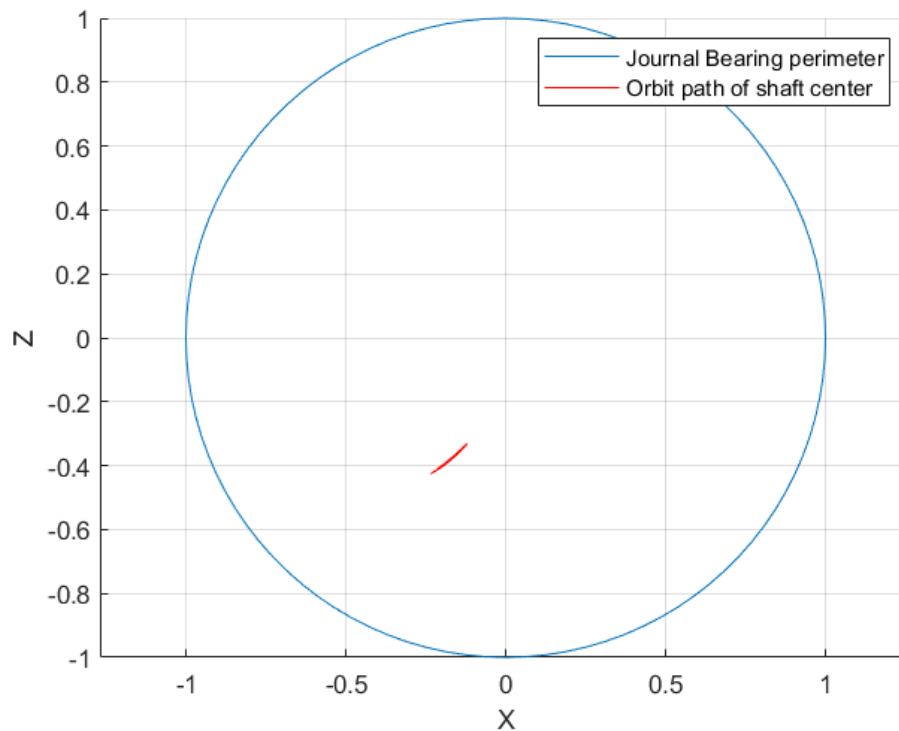


Σχήμα 5. 36: Κατακόρυφες αντιδράσεις ISB 2

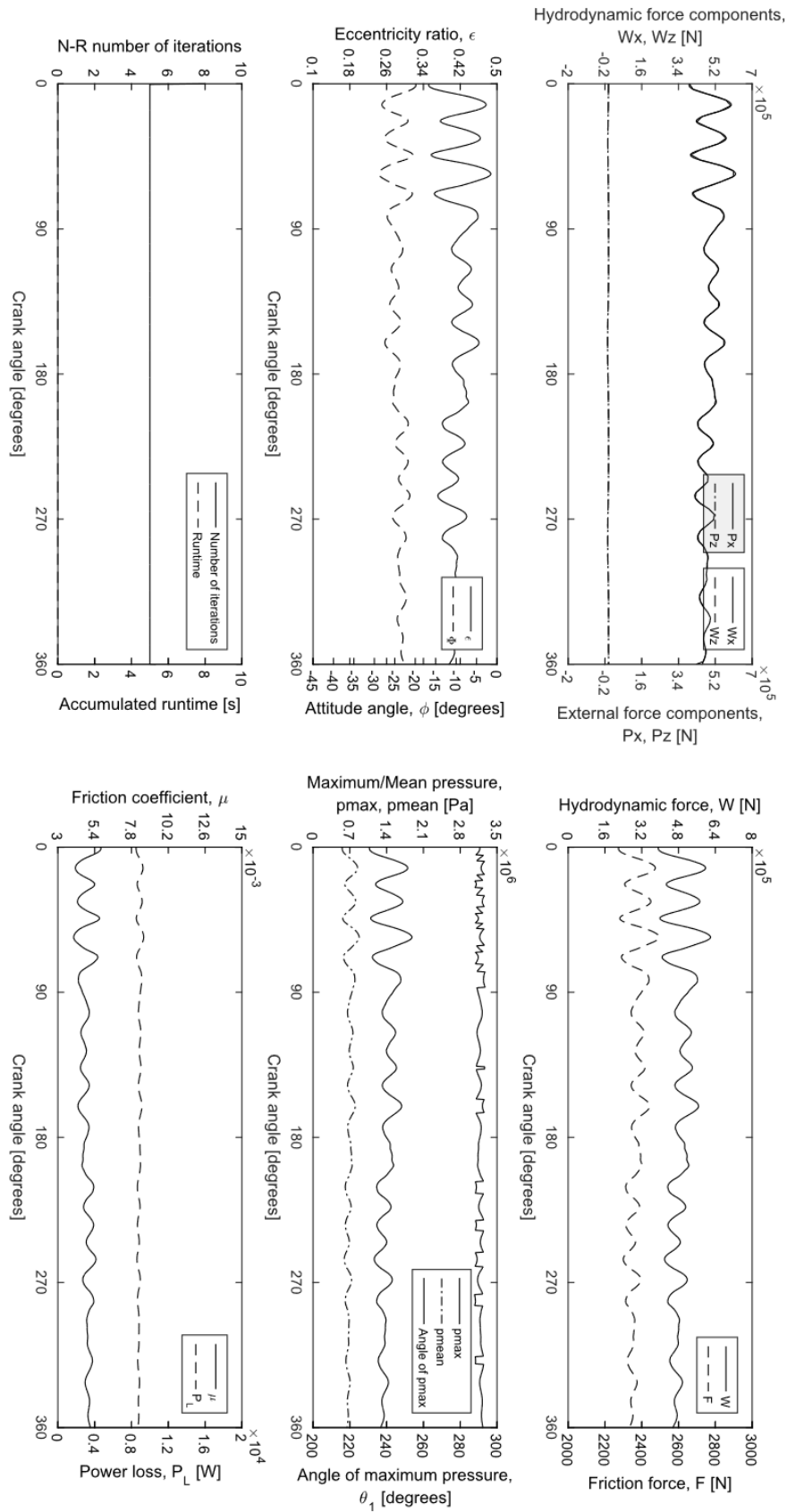


Σχήμα 5. 37: Εγκάρσιες αντιδράσεις ISB 2

Επιπλέον, η τροχιά που διαγράφει ο άξονας μέσα στο έδρανο ISB 2 σύμφωνα με το λογισμικό για την επίλυση των εδράνων του Ε.Μ.Π, καθώς και οι τριβολογικές παράμετροι λειτουργίας . απεικονίζεται στο Σχήμα 5.38 και Σχήμα 5.39, αντίστοιχα.



Σχήμα 5. 38: Τροχιά άξονα στο ISB 2



Σχήμα 5. 39: ISB 2, Τριβολογικές παράμετροι λειτουργίας (Loading Condition “MAX”)

5.5.4.1.5 Έδρανο “ISB 1”

Στον **Πίνακα 5.41** παρουσιάζονται για το έδρανο ISB 1, το ελάχιστο, το μέγιστο και το μέσο κατακόρυφο φορτίο που υπολογίζει το Ansys Workbench κατά την επίλυση του δυναμικού προβλήματος καθώς και το κατακόρυφο φορτίο της στατικής κατάστασης, ενώ στον **Πίνακα 5.42** παρουσιάζονται αντίστοιχα τα εγκάρσια φορτία.

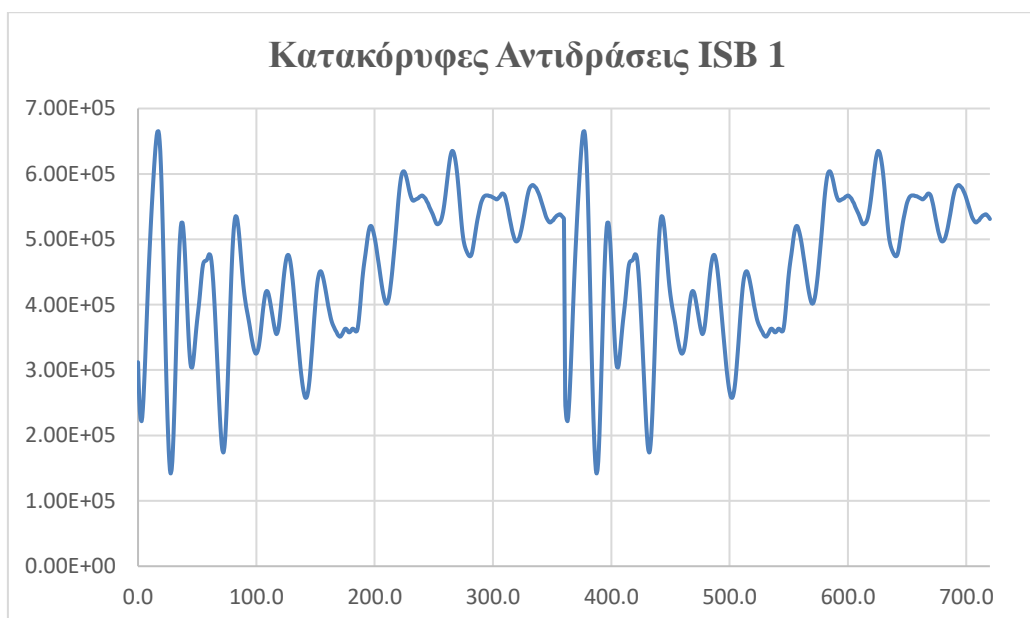
Πίνακας 5. 41: Κατακόρυφα Φορτία εδράνου ISB 1

Δυναμική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)			Στατική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)
Μέγιστη	Ελάχιστη	Μέση	Μέση
6.35E+05 N	1.42E+05 N	4.59E+05 N	5.03E+05 N

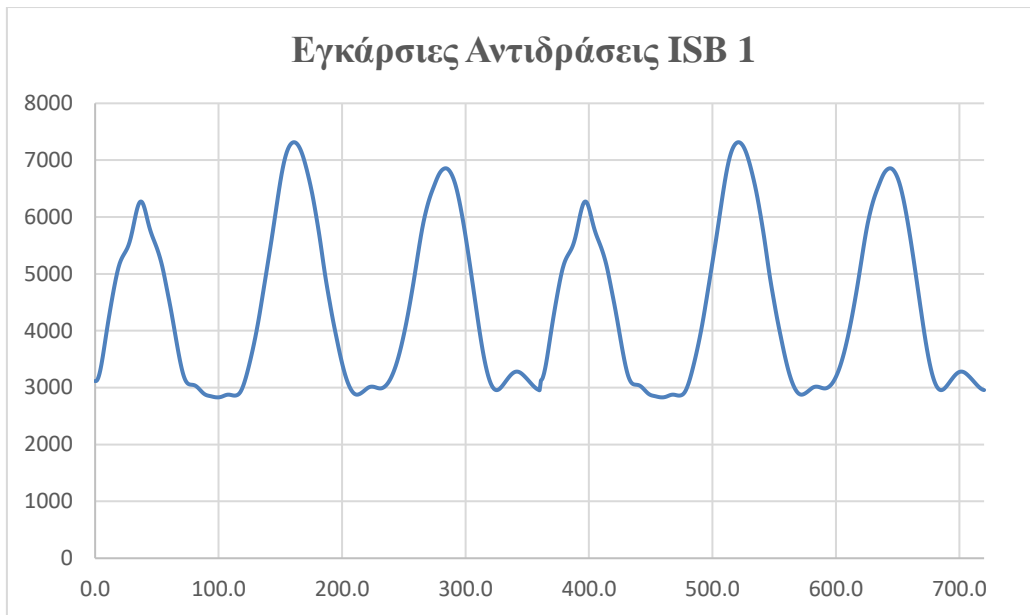
Πίνακας 5. 42: Εγκάρσια Φορτία εδράνου ISB 1

Δυναμική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)			Στατική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)
Μέγιστη	Ελάχιστη	Μέση	Μέση
7.31E +03 N	2.82E+03 N	4.42E+03 N	~0

Οι κατακόρυφες και εγκάρσιες αντιδράσεις που προκύπτουν από το Ansys Workbench φαίνονται στα **Σχήματα 5.40 - 5.41**.

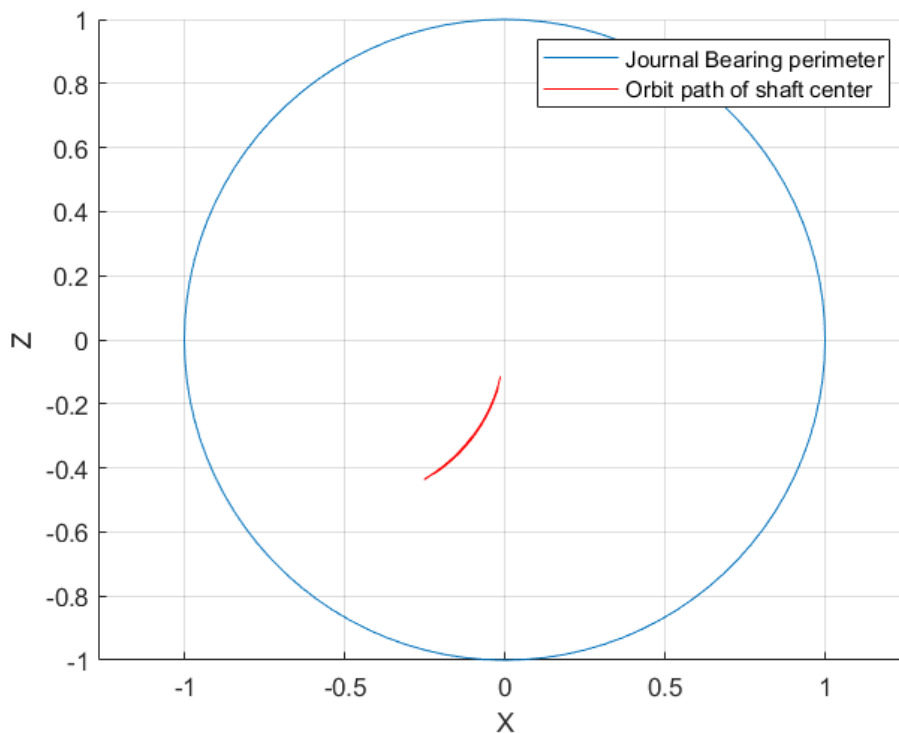


Σχήμα 5. 40: Κατακόρυφες αντιδράσεις ISB 1

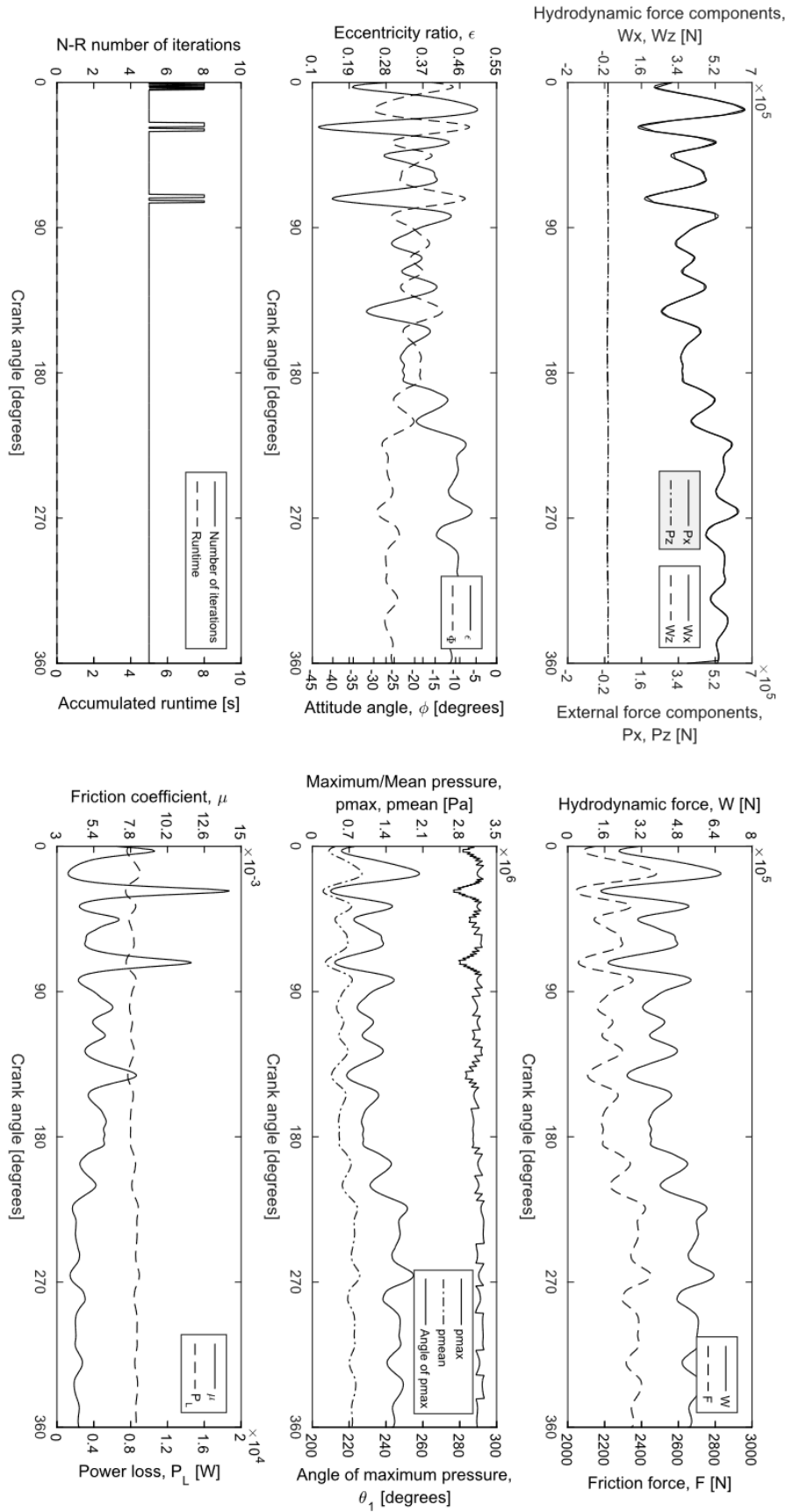


Σχήμα 5. 41: Εγκάρσιες αντιδράσεις ISB 1

Επιπλέον, η τροχιά που διαγράφει ο άξονας μέσα στο έδρανο ISB 1 σύμφωνα με το λογισμικό για την επίλυση των εδράνων του Ε.Μ.Π, καθώς και οι τριβολογικές παράμετροι λειτουργίας . απεικονίζεται στο Σχήμα 5.42 και Σχήμα 5.43, αντίστοιχα.



Σχήμα 5. 42: Τροχιά άξονα στο ISB 1



Σχήμα 5. 43: ISB 1, Τριβολογικές παράμετροι λειτουργίας (Loading Condition “MAX”)

5.5.4.2 Loading Condition “BLD”

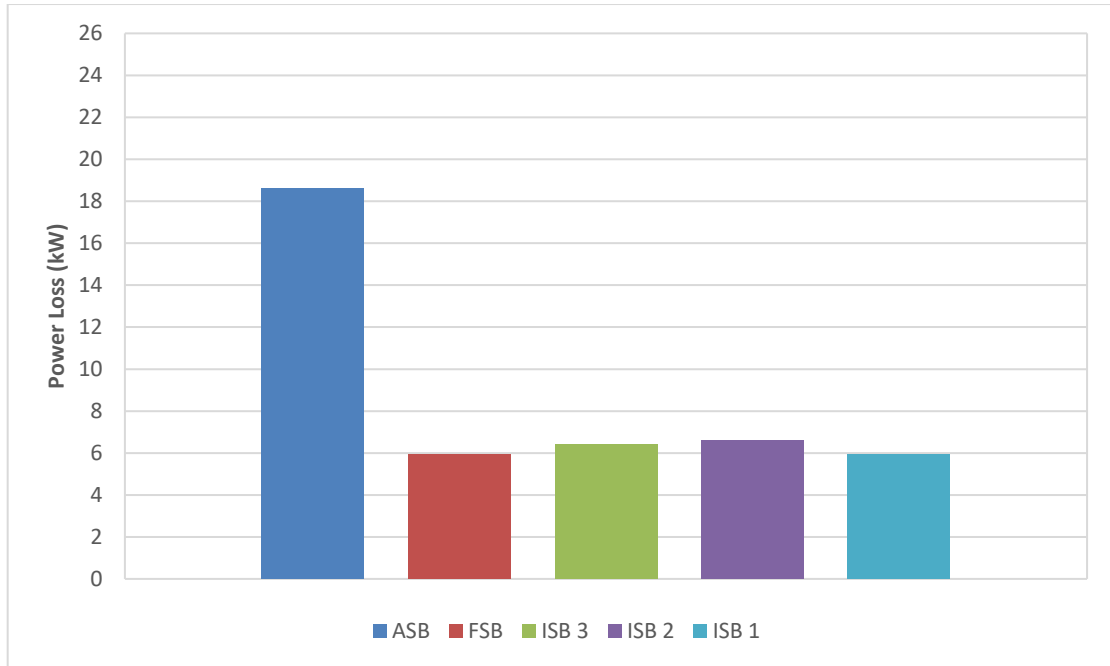
Παρακάτω παρουσιάζονται οι υποθέσεις, οι οποίες έχουν ληφθεί υπόψη προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός των αντιδράσεων των εδράνων στήριξης:

- Η κύρια μηχανή έχει ταχύτητα περιστροφής 73.2 RPM
- Η κύρια μηχανή βρίσκεται σε θερμή κατάσταση και η κατακόρυφη μετατόπιση των εδράνων της, αυξάνεται κατά 0.41 mm
- Οι μετατοπίσεις της γάστρας είναι μη-μηδενικές (**Πίνακας 5.43**)
- Η έλικα έχει προσαύξηση 25% στην μάζα της και την ροπή αδρανείας της
- Οι συντελεστές απόσβεσης στρεπτικών ταλαντώσεων είναι μη-μηδενικοί

Πίνακας 5. 43: Θέσεις των βάσεων των εδράνων ‘Loading Condition BLD

Τύπος Εδράνου	Διαμήκη Θέση Εδράνων [m]	Κατακόρυφη Θέση Εδράνων [mm]
Πρυμναίο έδρανο χοάνης	3.87	0.75
Πρωραίο έδρανο χοάνης	10.982	0.77
Έδρανο γραμμής No.3	20.896	-1.97
Έδρανο γραμμής No.2	31.161	-3.01
Έδρανο γραμμής No.1	42.454	-4.09
Έδρανο μηχανής No.13	52.935	-5.83
Έδρανο μηχανής No.12	53.945	-5.86
Έδρανο μηχανής No.11	55.535	-5.90
Έδρανο μηχανής No.10	57.125	-5.95
Έδρανο μηχανής No.9	58.715	-6.00
Έδρανο μηχανής No.8	60.305	-6.05
Έδρανο μηχανής No.7	61.895	-6.10
Έδρανο μηχανής No.6	63.755	-6.16
Έδρανο μηχανής No.5	65.345	-6.21
Έδρανο μηχανής No.4	66.935	-6.26
Έδρανο μηχανής No.3	68.525	-6.31
Έδρανο μηχανής No.2	70.115	-6.36
Έδρανο μηχανής No.1	71.705	-6.41

Θεωρώντας λιπαντικό με τιμή ιξώδους 0.1 Pa s, εκτιμάται η απώλεια ενέργειας για το κάθε έδρανο. Τα σχετικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο **Σχήμα 5.44**.



Σχήμα 5. 44: Εκτίμηση απώλειας ενέργειας από κάθε έδρανο (Loading Condition “BLD”)

Ακολουθούν τα αποτελέσματα για το κάθε έδρανα του αξονικού συστήματος που προκύπτουν από την ανάλυση με χρήση του λογισμικού Ansys Workbench και του λογισμικού για την επίλυση των εδράνων του Ε.Μ.Π.

5.5.4.2.1 Έδρανο “ASB”

Στον **Πίνακα 5.44** παρουσιάζονται για το έδρανο ASB, το ελάχιστο, το μέγιστο και το μέσο κατακόρυφο φορτίο που υπολογίζει το Ansys Workbench κατά την επίλυση του δυναμικού προβλήματος καθώς και το κατακόρυφο φορτίο της στατικής κατάστασης, ενώ στον **Πίνακα 5.45** παρουσιάζονται αντίστοιχα τα εγκάρσια φορτία.

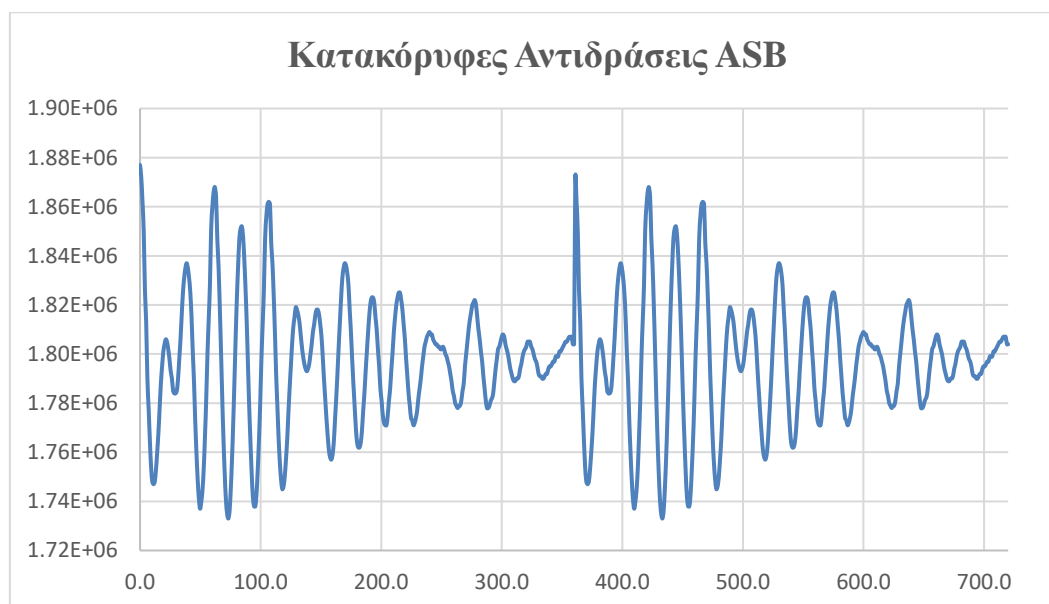
Πίνακας 5. 44: Κατακόρυφα Φορτία εδράνου ASB

Δυναμική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)			Στατική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)
Μέγιστη	Ελάχιστη	Μέση	Μέση
1.88E+06 N	1.73E+06 N	1.80E+06 N	1.77E+06 N

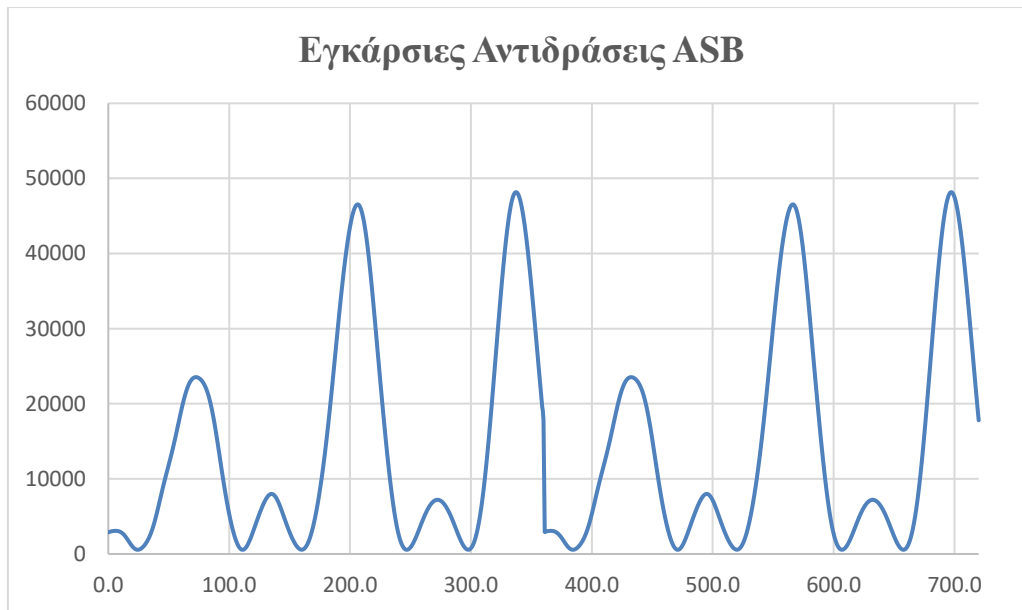
Πίνακας 5. 45: Εγκάρσια Φορτία εδράνου ASB

Δυναμική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)			Στατική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)
Μέγιστη	Ελάχιστη	Μέση	Μέση
4.81E+04 N	5.63E+02 N	1.41E+04 N	~0

Οι κατακόρυφες και εγκάρσιες αντιδράσεις που προκύπτουν από το Ansys Workbench φαίνονται στα **Σχήματα 5.45 - 5.46**.

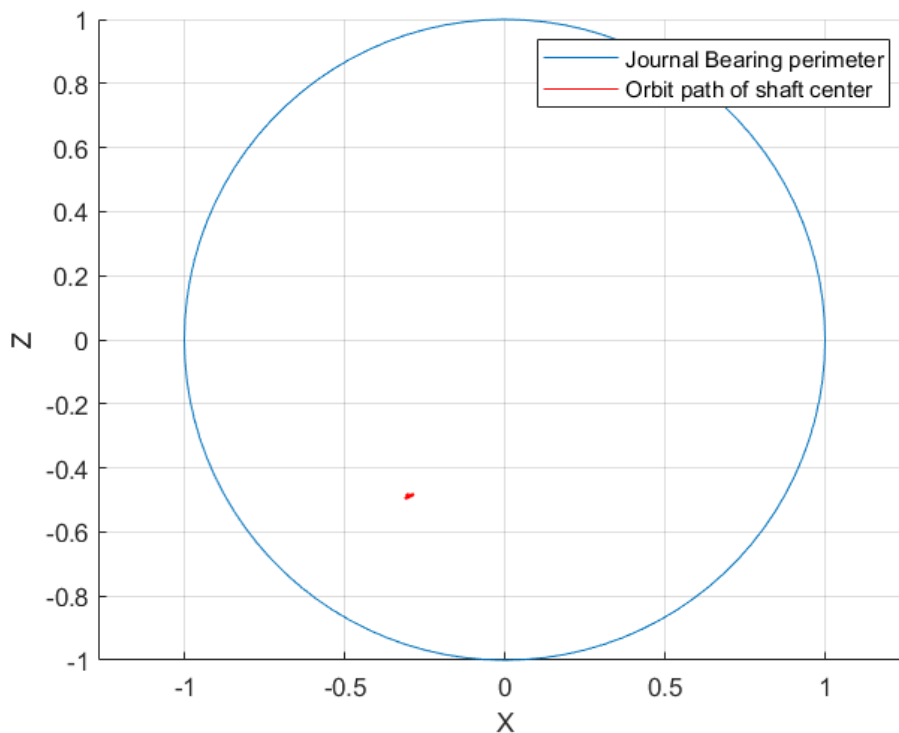


Σχήμα 5. 45: Κατακόρυφες αντιδράσεις ASB

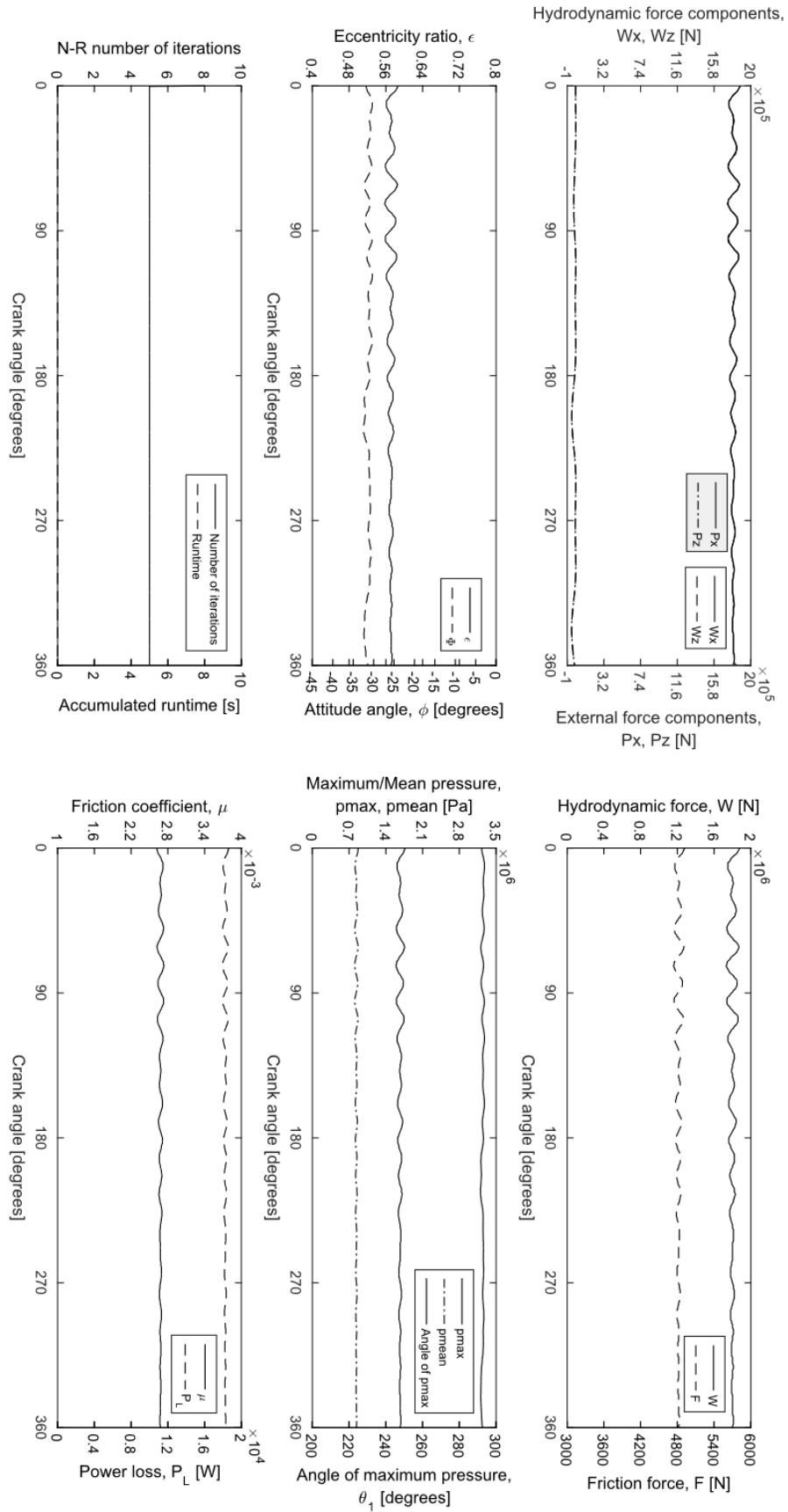


Σχήμα 5. 46: Εγκάρσιες αντιδράσεις ASB

Επιπλέον, η τροχιά που διαγράφει ο άξονας μέσα στο έδρανο ASB σύμφωνα με το λογισμικό για την επίλυση των εδράνων του Ε.Μ.Π, καθώς και οι τριβολογικές παράμετροι λειτουργίας . απεικονίζεται στο Σχήμα 5.47 και Σχήμα 5.48, αντίστοιχα.



Σχήμα 5. 47: Τροχιά άξονα στο ASB



Σχήμα 5. 48: ASB, Τριβολογικές παράμετροι λειτουργίας (Loading Condition “BLD”)

5.5.4.2.2 Έδρανο “FSB”

Στον **Πίνακα 5.46** παρουσιάζονται για το έδρανο FSB, το ελάχιστο, το μέγιστο και το μέσο κατακόρυφο φορτίο που υπολογίζει το Ansys Workbench κατά την επίλυση του δυναμικού προβλήματος καθώς και το κατακόρυφο φορτίο της στατικής κατάστασης, ενώ στον **Πίνακα 5.47** παρουσιάζονται αντίστοιχα τα εγκάρσια φορτία.

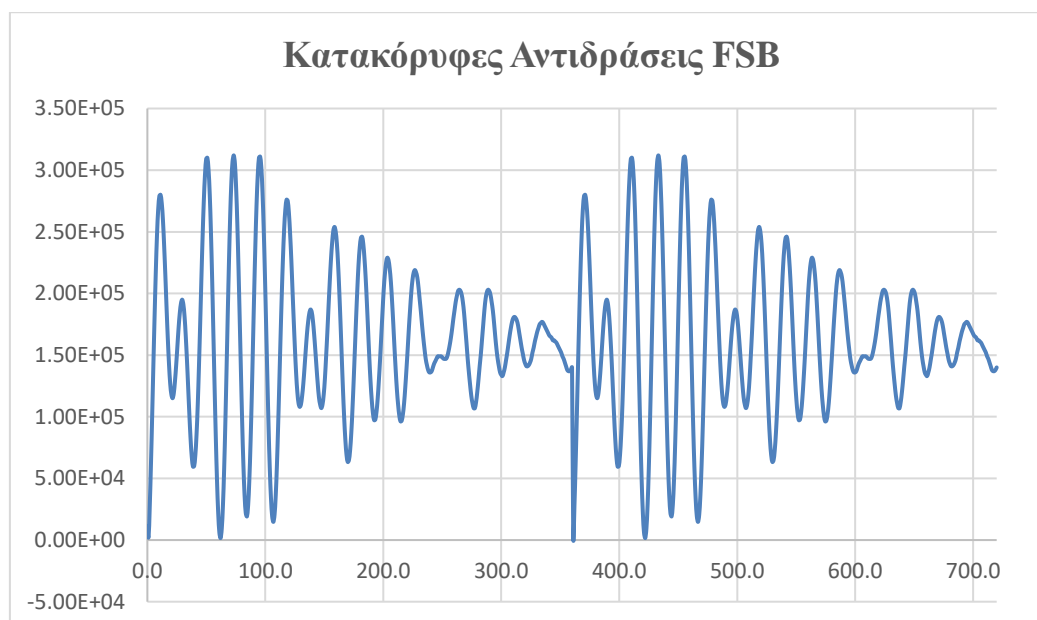
Πίνακας 5. 46: Κατακόρυφα Φορτία εδράνου FSB

Δυναμική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)			Στατική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)
Μέγιστη	Ελάχιστη	Μέση	Μέση
3.12E+05 N	1.56E+03 N	1.62E+05 N	1.78E+05 N

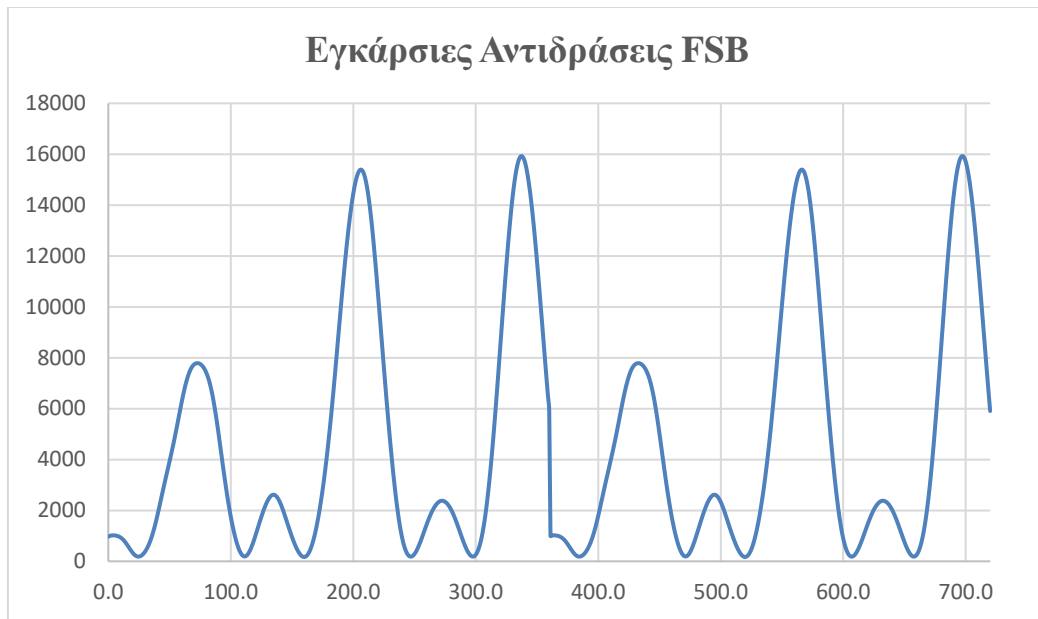
Πίνακας 5. 47: Εγκάρσια Φορτία εδράνου FSB

Δυναμική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)			Στατική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)
Μέγιστη	Ελάχιστη	Μέση	Μέση
1.59E+04 N	1.71E+02 N	4.68E+03 N	~0

Οι κατακόρυφες και οριζόντιες αντιδράσεις που προκύπτουν από το Ansys Workbench φαίνονται στα **Σχήματα 5.49 - 5.50**.

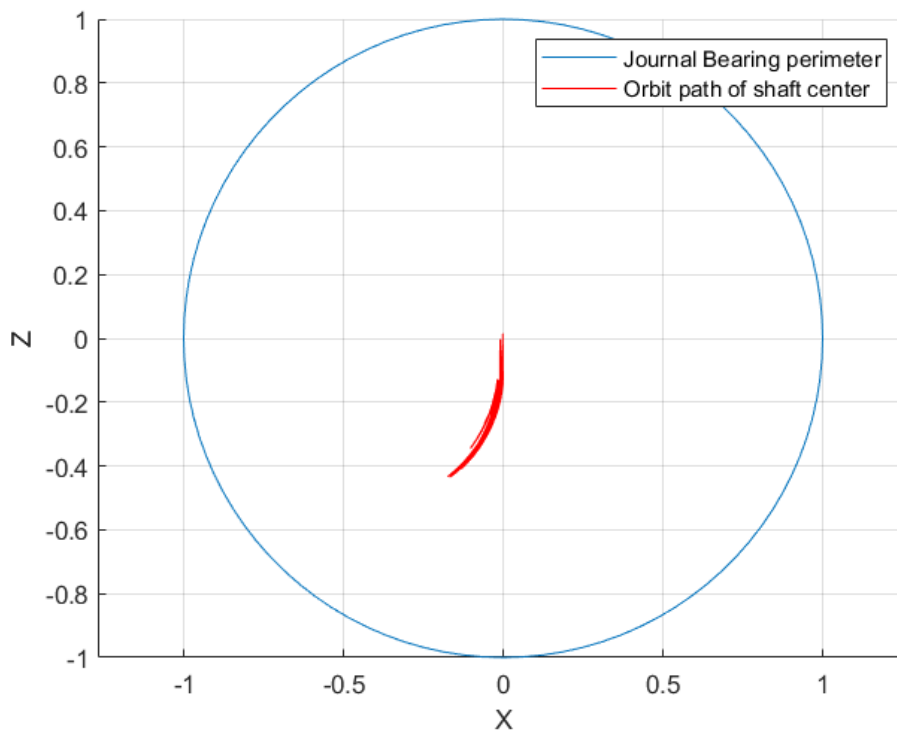


Σχήμα 5. 49: Κατακόρυφες αντιδράσεις FSB

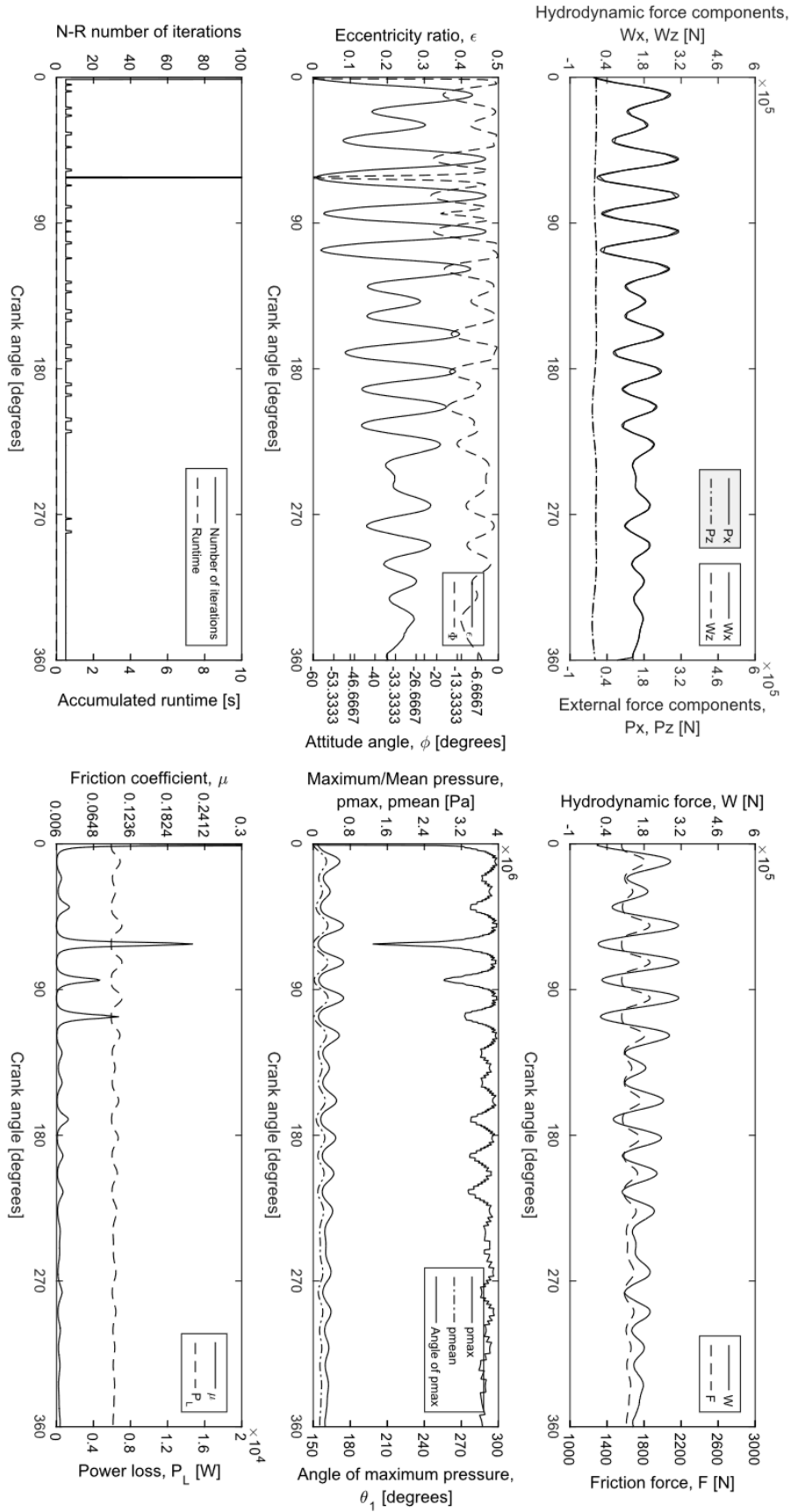


Σχήμα 5. 50: Εγκάρσιες αντιδράσεις FSB

Επιπλέον, η τροχιά που διαγράφει ο άξονας μέσα στο έδρανο FSB σύμφωνα με το λογισμικό για την επίλυση των εδράνων του Ε.Μ.Π, καθώς και οι τριβολογικές παράμετροι λειτουργίας . απεικονίζεται στο Σχήμα 5.51 και Σχήμα 5.52, αντίστοιχα.



Σχήμα 5. 51: Τροχιά άξονα στο FSB



Σχήμα 5. 52: FSB, Τριβιολογικές παράμετροι λειτουργίας (Loading Condition “BLD”)

5.5.4.2.3 Έδρανο “ISB 3”

Στον **Πίνακα 5.48** παρουσιάζονται για το έδρανο ISB 3, το ελάχιστο, το μέγιστο και το μέσο κατακόρυφο φορτίο που υπολογίζει το Ansys Workbench κατά την επίλυση του δυναμικού προβλήματος καθώς και το κατακόρυφο φορτίο της στατικής κατάστασης, ενώ στον **Πίνακα 5.49** παρουσιάζονται αντίστοιχα τα εγκάρσια φορτία.

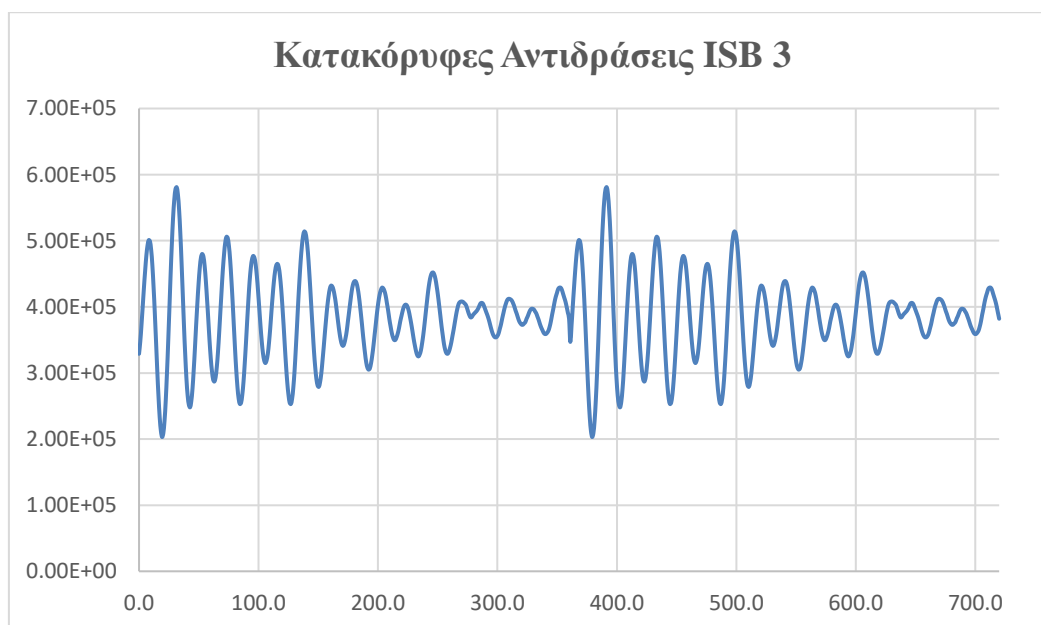
Πίνακας 5. 48: Κατακόρυφα Φορτία εδράνου ISB 3

Δυναμική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)			Στατική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)
Μέγιστη	Ελάχιστη	Μέση	Μέση
5.81E+05 N	2.48E+05 N	3.83E+05 N	4.00E+05 N

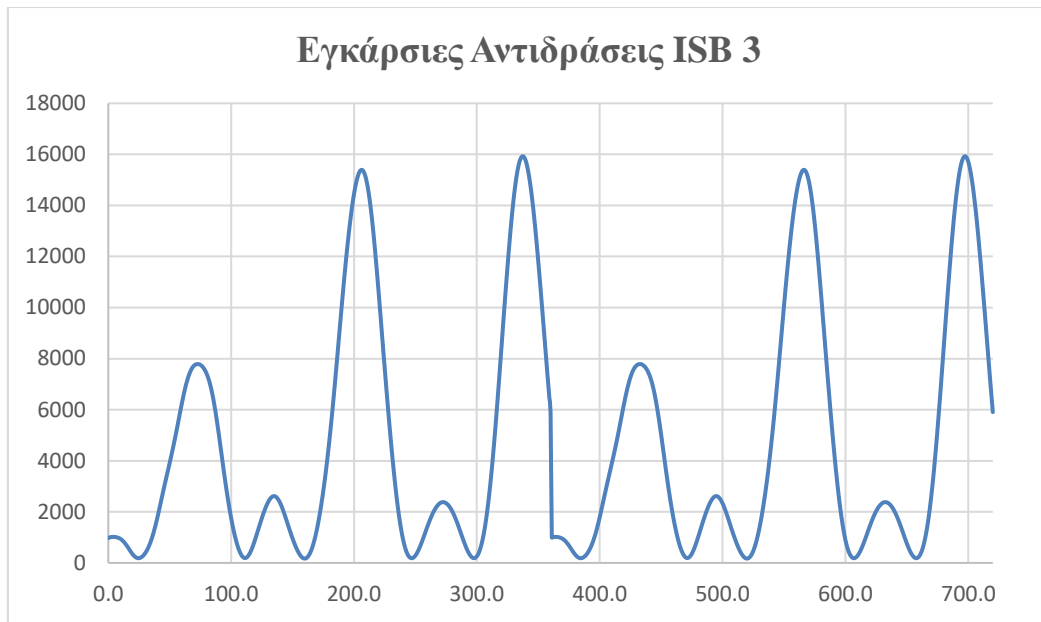
Πίνακας 5. 49: Εγκάρσια Φορτία εδράνου ISB 3

Δυναμική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)			Στατική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)
Μέγιστη	Ελάχιστη	Μέση	Μέση
1.59E+04 N	1.71E+02 N	4.68E+03 N	~0

Οι κατακόρυφες και οριζόντιες αντιδράσεις που προκύπτουν από το Ansys Workbench φαίνονται στα **Σχήματα 5.53 - 5.54**.

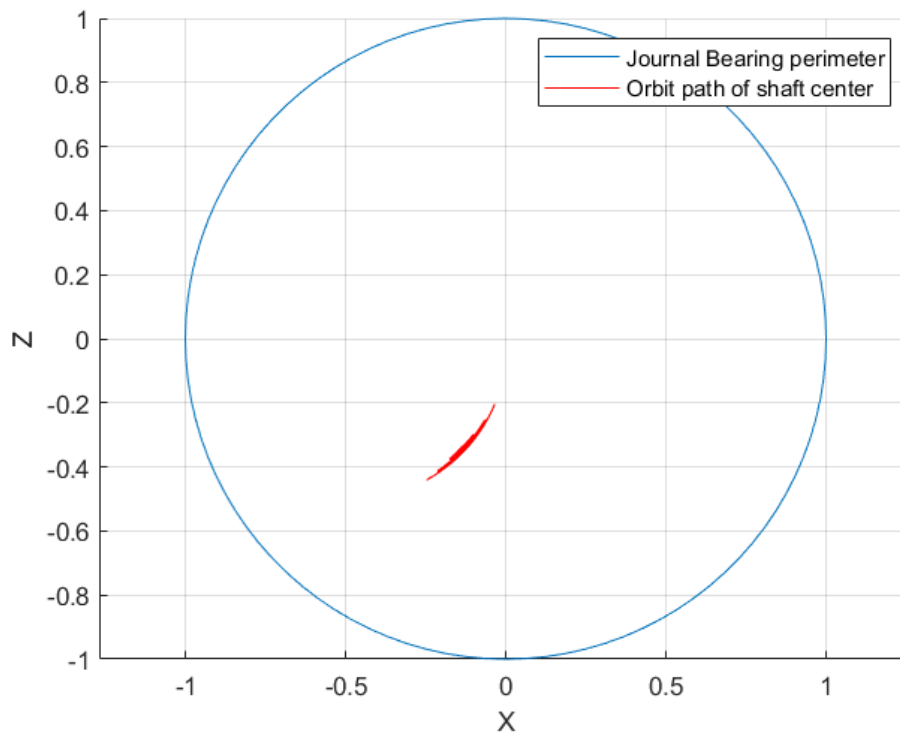


Σχήμα 5. 53: Κατακόρυφες αντιδράσεις ISB 3

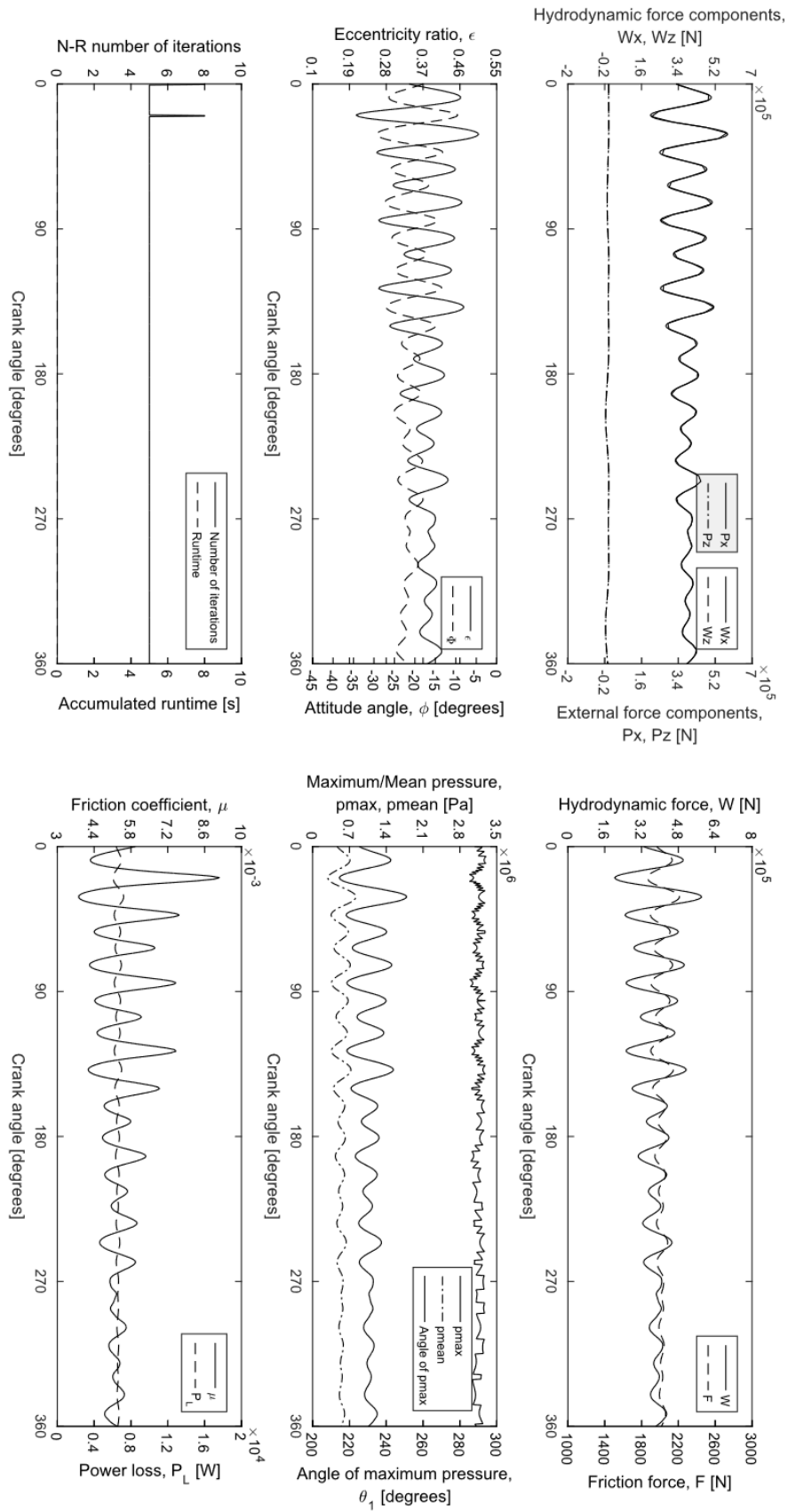


Σχήμα 5. 54: Εγκάρσιες αντιδράσεις ISB 3

Επιπλέον, η τροχιά που διαγράφει ο άξονας μέσα στο έδρανο ISB 3 σύμφωνα με το λογισμικό για την επίλυση των εδράνων του Ε.Μ.Π, καθώς και οι τριβολογικές παράμετροι λειτουργίας . απεικονίζεται στο Σχήμα 5.55 και Σχήμα 5.56, αντίστοιχα.



Σχήμα 5. 55: Τροχιά άξονα στο ISB 3



Σχήμα 5.56: ISB 3, Τριβολογικές παράμετροι λειτουργίας (Loading Condition “BLD”)

5.5.4.2.4 Έδρανο “ISB 2”

Στον **Πίνακα 5.50** παρουσιάζονται για το έδρανο ISB 2, το ελάχιστο, το μέγιστο και το μέσο κατακόρυφο φορτίο που υπολογίζει το Ansys Workbench κατά την επίλυση του δυναμικού προβλήματος καθώς και το κατακόρυφο φορτίο της στατικής κατάστασης, ενώ στον **Πίνακα 5.51** παρουσιάζονται αντίστοιχα τα εγκάρσια φορτία.

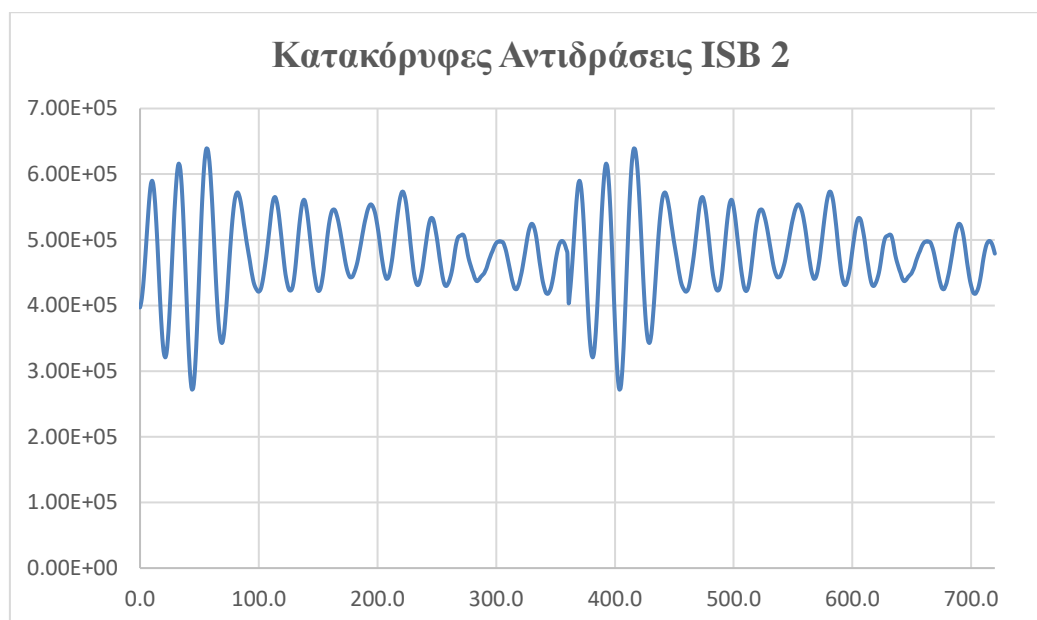
Πίνακας 5. 50: Κατακόρυφα Φορτία εδράνου ISB 2

Δυναμική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)			Στατική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)
Μέγιστη	Ελάχιστη	Μέση	Μέση
6.39E+05 N	2.72E+05 N	4.80E+05 N	4.71E+05 N

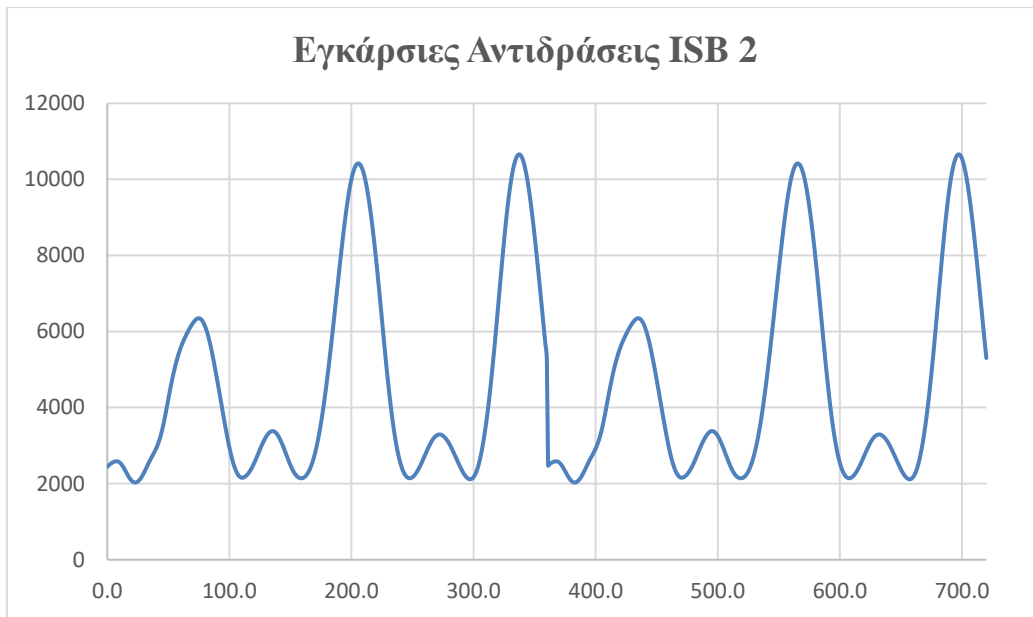
Πίνακας 5. 51: Εγκάρσια Φορτία εδράνου ISB 2

Δυναμική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)			Στατική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)
Μέγιστη	Ελάχιστη	Μέση	Μέση
1.07E+04 N	2.03E+03 N	4.58E +03 N	~0

Οι κατακόρυφες και οριζόντιες αντιδράσεις που προκύπτουν από το Ansys Workbench φαίνονται στα **Σχήματα 5.57 - 5.58**.

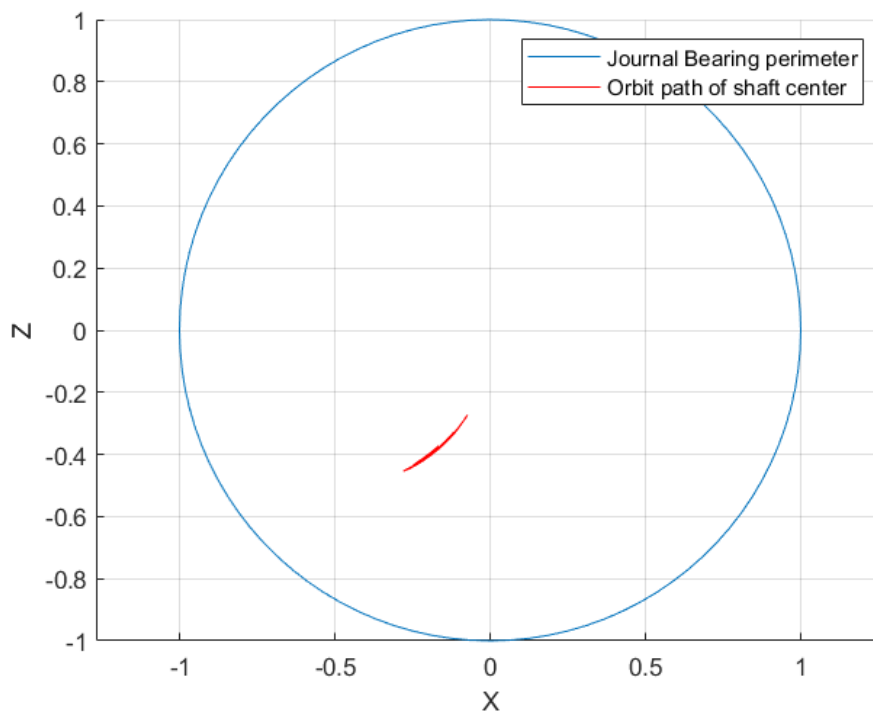


Σχήμα 5. 57: Κατακόρυφες αντιδράσεις ISB 2

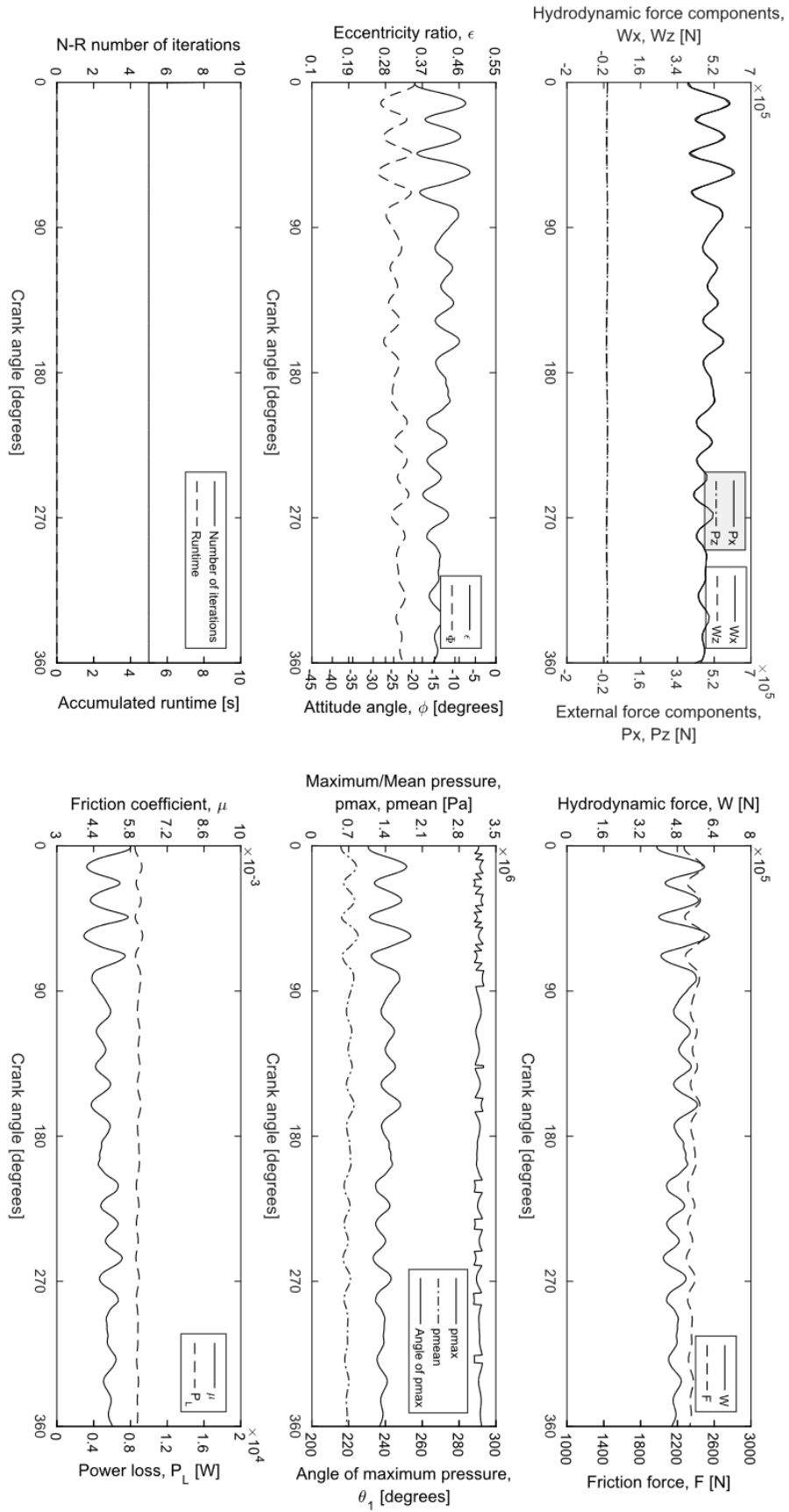


Σχήμα 5. 58: Εγκάρσιες αντιδράσεις ISB 2

Επιπλέον, η τροχιά που διαγράφει ο άξονας μέσα στο έδρανο ISB 2 σύμφωνα με το λογισμικό για την επίλυση των εδράνων του Ε.Μ.Π, καθώς και οι τριβολογικές παράμετροι λειτουργίας . απεικονίζεται στο Σχήμα 5.59 και Σχήμα 5.60, αντίστοιχα.



Σχήμα 5. 59: Τροχιά άξονα στο ISB 2



Σχήμα 5. 60: ISB 2, Τριβολογικές παράμετροι λειτουργίας (Loading Condition “BLD”)

5.5.4.2.5 Έδρανο “ISB 1”

Στον Πίνακα 5.52 παρουσιάζονται για το έδρανο ISB 1, το ελάχιστο, το μέγιστο και το μέσο κατακόρυφο φορτίο που υπολογίζει το Ansys Workbench κατά την επίλυση του δυναμικού προβλήματος καθώς και το κατακόρυφο φορτίο της στατικής κατάστασης, ενώ στον Πίνακα 5.53 παρουσιάζονται αντίστοιχα τα εγκάρσια φορτία.

Πίνακας 5. 52: Κατακόρυφα Φορτία εδράνου ISB 1

Δυναμική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)			Στατική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)
Μέγιστη	Ελάχιστη	Μέση	Μέση
7.80E+05 N	3.10E+05 N	4.90E+05 N	5.03E+05 N

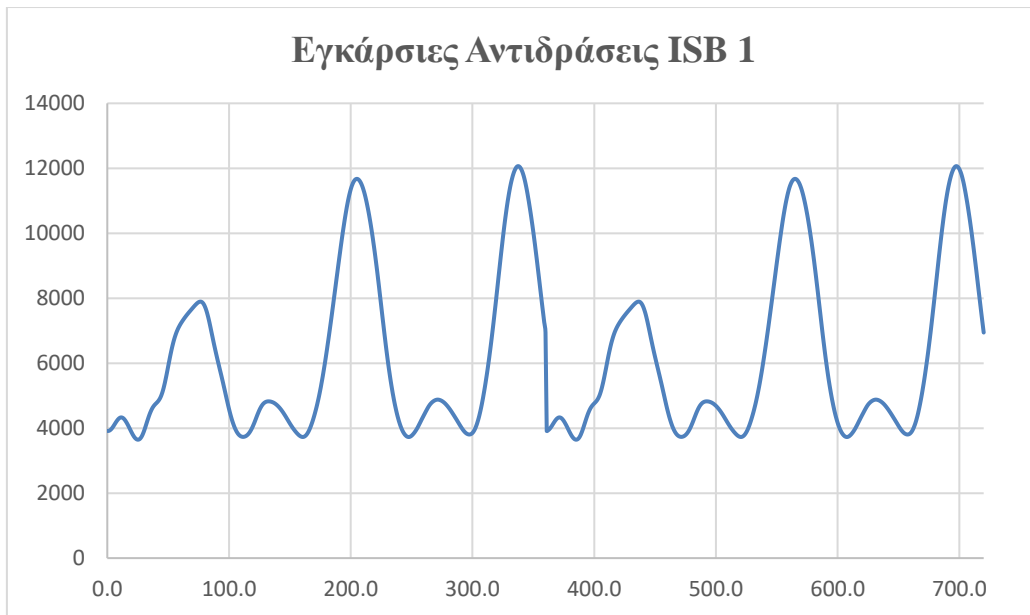
Πίνακας 5. 53: Εγκάρσια Φορτία εδράνου ISB 1

Δυναμική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)			Στατική ανάλυση (Τιμές Φορτίων)
Μέγιστη	Ελάχιστη	Μέση	Μέση
1.21E +04 N	3.65E+03 N	6.15E+03 N	~0

Οι κατακόρυφες και οριζόντιες αντιδράσεις που προκύπτουν από το Ansys Workbench φαίνονται στα Σχήματα 5.61 - 5.62.

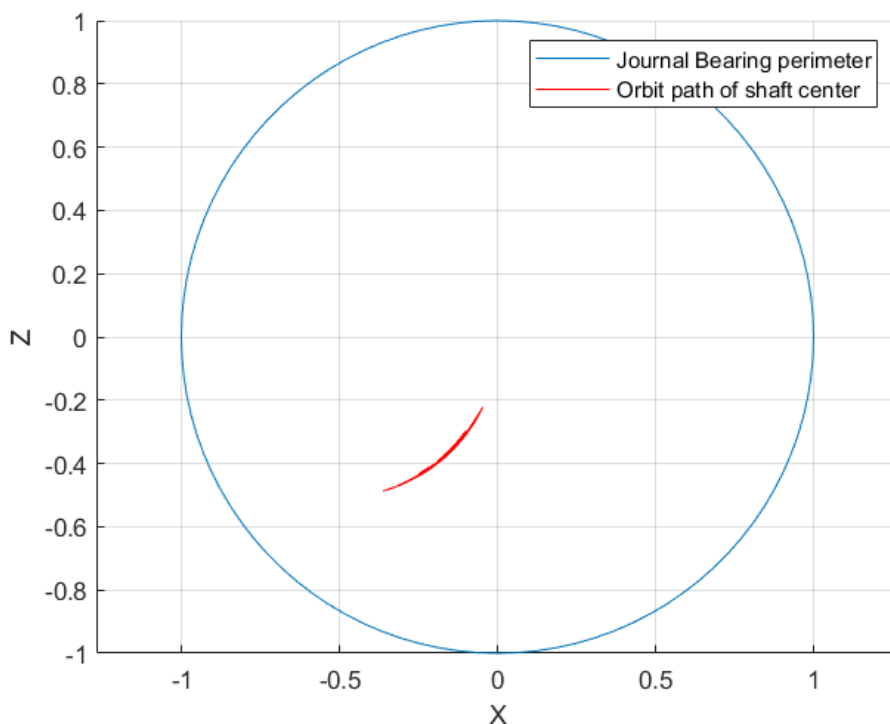


Σχήμα 5. 61: Κατακόρυφες αντιδράσεις ISB 1

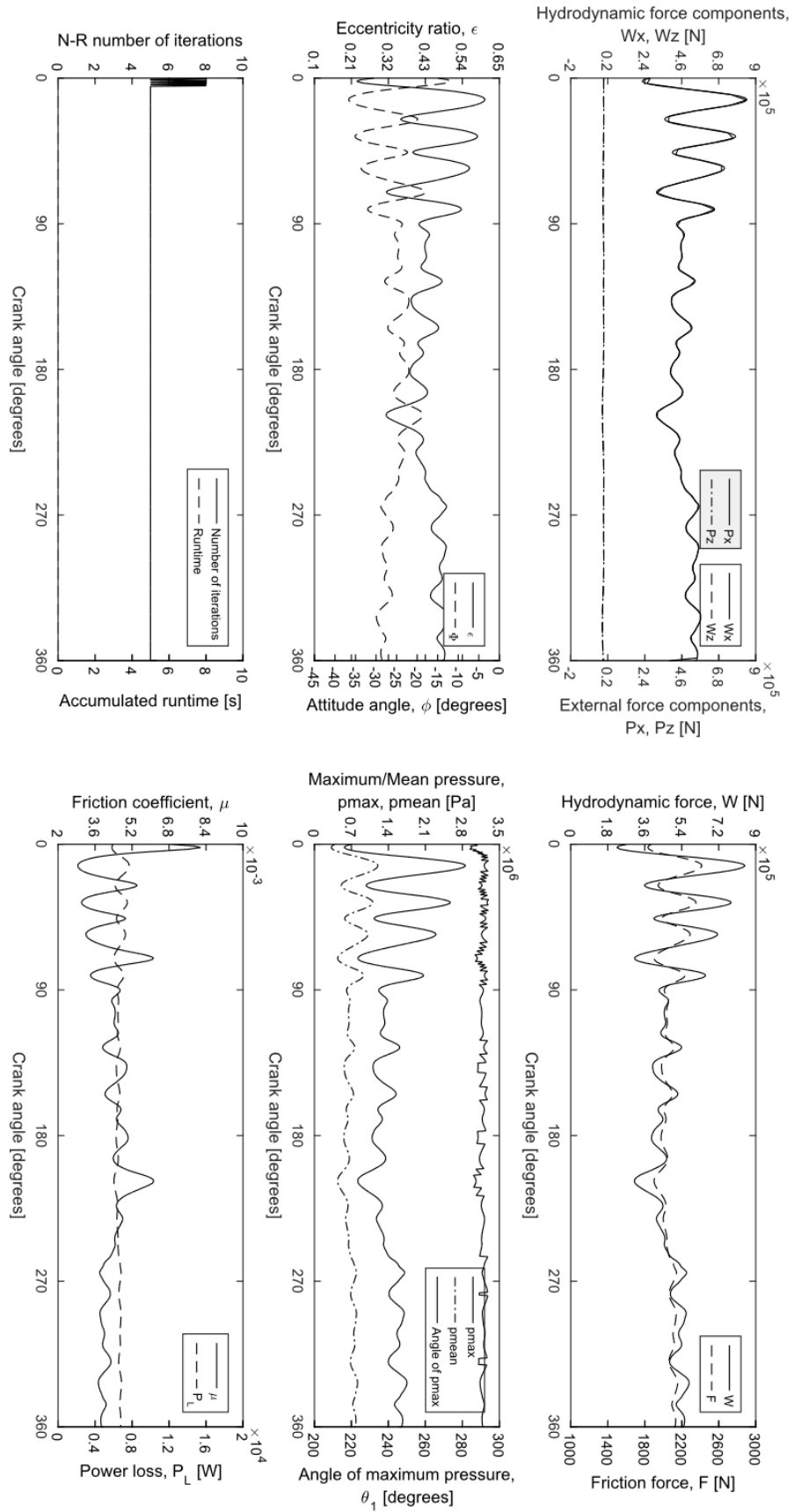


Σχήμα 5. 62: Εγκάρσιες αντιδράσεις ISB 1

Επιπλέον, η τροχιά που διαγράφει ο άξονας μέσα στο έδρανο ISB 1 σύμφωνα με το λογισμικό για την επίλυση των εδράνων του Ε.Μ.Π, καθώς και οι τριβολογικές παράμετροι λειτουργίας . απεικονίζεται στο Σχήμα 5.63 και Σχήμα 5.64, αντίστοιχα.



Σχήμα 5. 63: Τροχιά άξονα στο ISB 1



Σχήμα 5. 64: ISB 1, Τριβολογικές παράμετροι λειτουργίας (Loading Condition “BLD”)

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

6

Συμπεράσματα - Μελλοντική Εργασία

6.1 Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας πραγματοποιήθηκε η ανάλυση της δυναμικής απόκρισης του αξονικού συστήματος ενός τυπικού πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (10,000 TEU). Αρχικά, σχεδιάστηκε ένα αναλυτικό παραμετρικό μοντέλο της γεωμετρίας του συστήματος πρόωσης του πλοίου, και ύστερα παράχθηκε το αντίστοιχο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, προκειμένου να υπολογιστούν οι αντιδράσεις των εδράνων σε στατική καθώς και δυναμική διέγερση του συστήματος.

Κατ' αρχάς, υπολογίστηκε η στατική απόκριση του συστήματος, ώστε να αποδειχθεί η αξιοπιστία του παραχθέντος μοντέλου. Προκειμένου να συμβεί αυτό, εξετάστηκαν 22 καταστάσεις υπηρεσίας του πλοίου για τον υπολογισμό των αντιδράσεων των εδράνων της στατικής ισορροπίας του άξονα. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των υπολογισμένων τιμών των αντιδράσεων των εδράνων με τις αντίστοιχες τιμές που είχαν υπολογιστεί στη σχετική μελέτη του πλοίου, καθώς και στη Διπλωματική Εργασία του Σ. Σιαμαντά (2018).

Τα συμπεράσματα από την σύγκριση των αποτελεσμάτων είναι ικανοποιητικά καθώς όλες οι αντιδράσεις έχουν θετικό πρόσημο και η απόκλιση από τις αντίστοιχες εκτιμήσεις είναι μικρή. Πιο συγκεκριμένα, οι αντιδράσεις στήριξης των εδράνων έχουν απόκλιση που κυμαίνεται από -9.30% έως 3.82% σε σχέση τα αποτελέσματα του νηογνώμονα, ενώ

αντίστοιχα από -12.52% έως 7.69% σε σχέση με τα αποτελέσματα της Δ.Ε. του Σ. Σιαμαντά. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει ότι η μοντελοποίηση του άξονα είναι ρεαλιστική και τα αποτελέσματα αξιόπιστα..

Έπειτα, μελετήθηκε η λειτουργία της κύριας μηχανής σε σταθερές στροφές, με τα έδρανα να ρυθμίζονται στην κατάσταση αναφοράς για θερμή λειτουργία μηχανής. Επιπλέον, προσδιορίστηκαν οι οριακές συνθήκες, προκειμένου να περιγραφούν τα φαινόμενα που δημιουργούνται κατά την δυναμική λειτουργία του συστήματος πρόωσης. Τέλος, για καθένα από τα έδρανα του αξονικού συστήματος, υπολογίστηκε η χρονική ιστορία των αντιδράσεων στήριξης, όπου το σύνολο αυτών εισάγεται σε ειδικό λογισμικό υπολογισμού ακτινικών εδράνων, ώστε να υπολογιστούν οι παράμετροι λειτουργίας του εδράνου.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, εξήχθησαν συμπεράσματα σχετικά με την αναγκαιότητα της δυναμικής μοντελοποίησης και επίλυσης του προβλήματος. Καταδείχθηκε ότι, για να εξαχθούν ακριβή και έγκυρα αποτελέσματα των αντιδράσεων των εδράνων στήριξης, η εκτίμηση της στατικής κατάστασης, όπως ορίζουν οι νηογνώμονες, δεν είναι αρκετή. Οι συνθήκες υπηρεσίας του πλοίου αποτελούν δυναμικό πρόβλημα και επομένως ως τέτοιο πρέπει να αντιμετωπίζεται. Η μεγάλη διακύμανση στις τιμές των αντιδράσεων των εδράνων στήριξης, παρά το γεγονός ότι ελέγχθηκαν συνθήκες υπηρεσίας με ομαλή λειτουργία του πλοίου δείχνει ότι δεν θα πρέπει να αγνοείται η δυναμική ανάλυση στο στάδιο του σχεδιασμού.

6.2 Μελλοντική Έρευνα

Το γεγονός ότι στην παρούσα διπλωματική εργασία παράγεται ένα λεπτομερές μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για το σύστημα πρόωσης του πλοίου και διεξάγονται αποτελέσματα για την δυναμική συμπεριφορά του, δίνει την δυνατότητα επέκτασης σε ένα εύρος προβλημάτων που επηρεάζει το πεδίο της ευθυγράμμισης του αξονικού συστήματος σε δυναμική λειτουργία. Σε αυτό το πλαίσιο, προτείνονται οι παρακάτω κατευθύνσεις μελλοντικής εργασίας.

6.2.1 Ατελής καύση σε έναν ή περισσότερους κυλίνδρους

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν στην παραπάνω ανάλυση, είχαν κοινό χαρακτηριστικό ότι οι πιέσεις των κυλίνδρων, από την καύση της καύσιμης ύλης, ακολουθούσαν την καμπύλη της τέλει καύσης. Στην πραγματικότητα, μπορεί για οποιοδήποτε λόγο ένας ή περισσότεροι κύλινδροι, σε σειρά ή όχι, να μην παράξουν την

απαιτούμενη ισχύ. Η μερική καύση σε κύλινδρο είναι ένα φαινόμενο που μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τις αντιδράσεις των εδράνων, επομένως είναι σημαντική η επιπλέον διερεύνηση της συμπεριφοράς του συστήματος υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας.

6.2.2 Μετατοπίσεις γάστρας κατά την πλεύση του πλοίου σε κυματισμούς

Το πλοίο, κατά την πλεύση του στο θαλάσσιο περιβάλλον, συναντά διάφορες καταστάσεις θάλασσας, οι οποίες επηρεάζουν άμεσα τις παραμορφώσεις της γάστρας και κατ' επέκταση τις κατακόρυφες θέσεις των βάσεων των εδράνων. Οι κατακόρυφες μετατοπίσεις των εδράνων αποτελούν μια σημαντική παράμετρο για την επίλυση και εύρεση των αντιδράσεων των εδράνων σε κάθε χρονική στιγμή (σε κατάσταση πλεύσης του πλοίου). Μεταβάλλοντας, λοιπόν, χρονικά τις κατακόρυφες θέσεις των βάσεων μπορεί να μοντελοποιηθεί η συμπεριφορά του αξονικού συστήματος σε διαφορετικούς κυματισμούς.

6.2.3 Υδροδυναμικές φορτίσεις από την έλικα

Η κοινότητα των νηογνομόνων προτείνει ότι πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα υδροδυναμικά φορτία που προέρχονται από την έλικα για τους υπολογισμούς του πλάνου ευθυγράμμισης. Στην παρούσα διπλωματική, μελετήθηκαν συνθήκες με πλήρως βυθισμένη έλικα και ιδανικές συνθήκες ρευστού. Επομένως, επόμενο βήμα είναι να διερευνηθούν τα φαινόμενα που προκύπτουν από την υδροδυναμική συμπεριφορά της έλικας σε καταστάσεις, όπου η έλικα δεν είναι πλήρως βυθισμένη ή σε καταστάσεις με εναλλαγή του ποσοστού βύθισης της λόγω κυματισμού.

6.2.4 Υδροδυναμική λίπανση των εδράνων

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε προσπάθεια επίλυση του προβλήματος της υδροδυναμικής λίπανσης των εδράνων μέσω της επίλυσης της εξίσωσης Reynold μέσα από βιβλιοθήκες του Ansys Workbench, ωστόσο τελικά αυτό δεν κατέστη εφικτό. Επομένως, η μοντελοποίηση του φαινομένου είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη σε μελλοντικές έρευνες.

6.2.5 Μεταβατικές συνθήκες συστήματος πρόωσης

Το γεγονός ότι δημιουργήθηκε ένα μοντέλο για ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος πρόωσης, δίνει την δυνατότητα να μελετηθούν μεταβατικά

φαινόμενα του συστήματος. Θα μπορούσε κανείς, πλέον, να διερευνήσει την συμπεριφορά του αξονικού συστήματος σε καταστάσεις επιτάχυνσης και επιβράδυνσης του, ώστε να διερευνηθεί η πιθανότητα υπερφόρτισης εδράνων κατά τις καταστάσεις αυτές.

6.2.6 Βελτιστοποίηση του πλάνου ευθυγράμμισης του αξονικού συστήματος

Όταν, πλέον, έχουν μελετηθεί ένα ή παραπάνω φαινόμενα μπορεί εύκολα να προστεθούν νέες παράμετροι με σκοπό την βελτιστοποίηση της αρχικής σχεδίασης του πλάνου ευθυγράμμισης. Η βελτιστοποίηση της διαδικασίας του πλάνου ευθυγράμμισης πρέπει να εστιάζει:

- Στην βέλτιστη κατανομή των αντιδράσεων των εδράνων για τις διάφορες συνθήκες λειτουργίας του πλοίου,
- Ελαχιστοποίηση των καμπτικών ροπών το άξονα,
- Μεγιστοποίηση του ελάχιστου πάχους του λιπαντικού στα έδρανα,
- Ελαχιστοποίηση της απώλειας ενέργειας στο αξονικό σύστημα.

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

7

Βιβλιογραφία

- [1] Sverko D. Sestan A., “Experimental determination of stern tube journal bearing behavior”, BRODOGRANDNJA 61, pp. 130-141, 2010
- [2] Devanney, J., Kennedy, M. (2003). The down ratchet and the deterioration of tanker newbuilding standards. Center for Tankship Excellence.
- [3] Dahler, G. et al. (2004). A study on flexible hulls, flexible engines, crankshaft deflections and engine bearing loads for VLCC propulsion machinery. CIMAC Congress. Paper 48. Kyoto.
- [4] Murawski, L. (2005). Shaft line alignment analysis taking ship construction flexibility and deformations into consideration. Marine Structures. 18(1). pp. 62–84.
- [5] Lei Shi, et al. (2009). Research on shafting alignment considering ship hull deformations.
- [6] Bureau Veritas. (2015). Elastic Shaft Alignment (ESA).
- [7] American Bureau of Shipping. (2015). Enhanced Shaft Alignment (ESA).
- [8] Goran Vizentin, et al. (2017). Common failures of ship propulsion shafts.

- [9] Κλιάνης Λ., Νικόλου Ι., Σιδέρης Ι. (2002). Μηχανές Εσωτερικής Καύσεως. 1^{ος} Τόμος.
- [10] Κλιάνης Λ., Νικόλου Ι., Σιδέρης Ι. (2003). Μηχανές Εσωτερικής Καύσεως. 2^{ος} Τόμος.
- [11] Κυρτάτος Ν., (1993). Ναυτικοί κινητήρες Diesel.
- [12] Harrington, R. (1992). Marine engineering.
- [13] American Bureau of Shipping. (2014). Guidance notes on propulsion shafting alignment.
- [14] Det Norske Veritas. (2006). Casualty Information.
- [15] American Bureau of Shipping. (2004). “Guidance Notes on Propulsion Shafting Alignment”.
- [16] Stachowiak G. W. and Bathelor A. W. (2005) "Engineering Tribology", University of Western Australia, Department of Mechanical and Materials Engineering, Australia, Butterworth Heinemann, pp. 81- 96, pp. 101-110, pp. 146-148, pp. 149-150, p. 154, p. 163.
- [17] Cameron A. (1983). “Basic lubrication theory”, Imperial College of Science and Technology London, Ellis Horwood Ltd, p. chapter 3: Reynolds equation, chapter 7: Journal bearings.
- [18] Bhusan B. (2001). “Modern Tribology Handbook”, Boca Raton: CRC Press LLC, p. 1253, pp. 1262-1264, pp.1377-1378.
- [19] Szeri A.Z. (2011). “Fluid Film Lubrication”, New York: Cambridge University Press.
- [20] Κωστόπουλος Θ. Ν.. (2005). Οδοντώσεις και μειωτήρες στροφών.
- [21] Frangopoulos, C. A. (1989). Torsional Vibrations.
- [22] A.S Veritec. (1985) . Vibration Control in Ships.
- [23] A.J. Wharton (1991). Diesel Engines.

- [24] Σιαμαντάς Σ. (2018). Ελαστική Ευθυγράμμιση Αξονικού Συστήματος Πλοίου Μεταφοράς Εμπορευματοκιβωτίων.