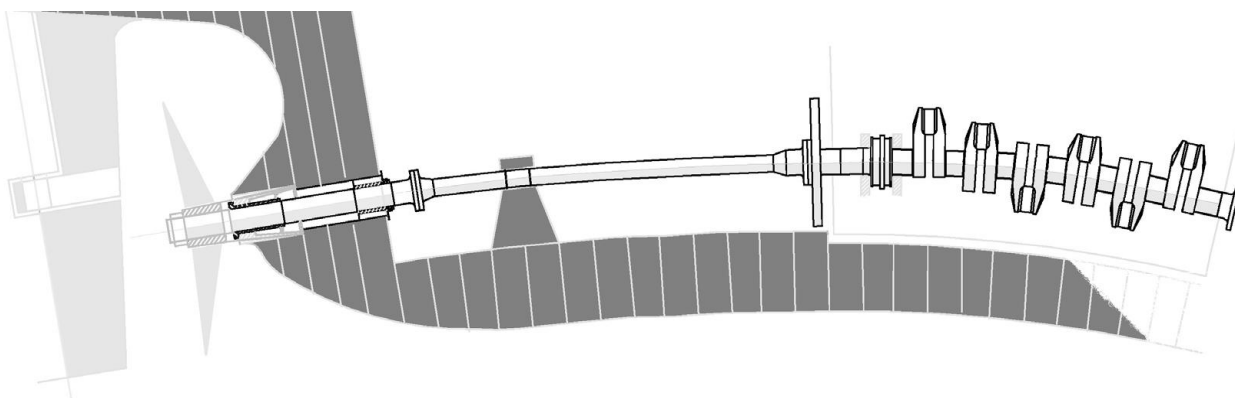


**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ευθυγράμμιση Αξονικού Συστήματος Πρόωσης Πλοίου



ΙΩΑΝΝΙΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

00/00/00

ΕΠΙΒΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΧΑΤΖΗΦΩΤΙΟΥ ΘΩΜΑΣ



ΝΕΑ ΜΗΧΑΝΙΩΝΑ 2016

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ: Ευθυγράμμιση Αξονικού Συστήματος Πρόωσης Πλοίου

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΙΩΑΝΝΙΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΑΜ: 4872

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ

Βεβαιώνεται η ολοκλήρωση της παραπάνω πτυχιακής εργασίας

Ο καθηγητής

1. Εισαγωγή

Η ευθυγράμμιση του αξονικού συστήματος ενός πλοίου αποτελεί διαδικασία η οποία περιλαμβάνει τον σχεδιασμό και την υλοποίηση της στήριξης του άξονα ώστε να επιτυγχάνεται βέλτιστη λειτουργία του αξονικού συστήματος κατά τη λειτουργία του πλοίου υπό τις συνθήκες υπηρεσίας του. Συγκεκριμένα περιλαμβάνει δύο ξεχωριστά βήματα:

- α) Την ανάλυση του αξονικού συστήματος και τη συγκρότηση σχεδίου ευθυγράμμισης
- β) Την εφαρμογή του σχεδίου ευθυγράμμισης επί πλοίου και την πειραματική επιβεβαίωση μέσω μετρήσεων.

Σύμφωνα με τους κανονισμούς των νηογνώμωνων, η μελέτη ευθυγράμμισης είναι υποχρεωτική, και κατατίθεται στον αρμόδιο νηογνώμονα για πλοία με ελικοφόρο άξονα διαμέτρου μεγαλύτερης των 400 mm, για πλοία με αξονικό σύστημα που περιλαμβάνει μειωτήρα δύο εισόδων μίας εξόδου, για πλοία με αξονικό σύστημα με βοηθητική έξοδο ισχύος (power take off), και για πλοία στα οποία προβλέπεται κατεργασία για τη δημιουργία κλίσης του πρυμναίου εδράνου χοάνης.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας θα αναλυθεί η διαδικασία η οποία ακολουθείται ώστε να γίνει η ανάλυση του αξονικού συστήματος και η συγκρότηση του σχεδίου ευθυγράμμισης, καθώς και η υλοποίησή της επί πλοίου. Για τον σκοπό αυτό θα περιγραφούν τα βασικά μέρη τα οποία συνθέτουν τυπικά αξονικά συστήματα πλοίων και θα παρουσιαστούν συνοπτικά βασικές γνώσεις της Μηχανικής, απαραίτητες για τους υπολογισμούς. Θα περιγραφούν οι συνήθεις μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή του σχεδίου ευθυγράμμισης επί πλοίου, και την πειραματική επιβεβαίωση της αποτελεσματικότητάς του, μέσω διεξαγωγής μετρήσεων. Επιπλέον, θα γίνει αναφορά σε διάφορα ειδικά θέματα σχετικά με την ευθυγράμμιση αξονικών συστημάτων πλοίου, όπως η επίδραση της κατάστασης φόρτωσης του πλοίου και του κυματισμού και η επίδραση των θερμικών διαστολών κατά τη λειτουργία της κύριας μηχανής. Τέλος, θα παρουσιαστεί η χρήση ειδικού προγράμματος, με το οποίο μπορεί να γίνει η μοντελοποίηση του αξονικού συστήματος και η πραγματοποίηση των σχετικών υπολογισμών.

1. Introduction

Alignment of the shafting system of a ship is a process which comprises the design and implementation of the shaft support to achieve optimum operation of the axial system during operation of the ship under conditions of service of. Specifically includes two separate steps:

- a) The analysis of the axial system and the establishment alignment project
- b) The implementation of on-board alignment project and experimental confirmation measurements.

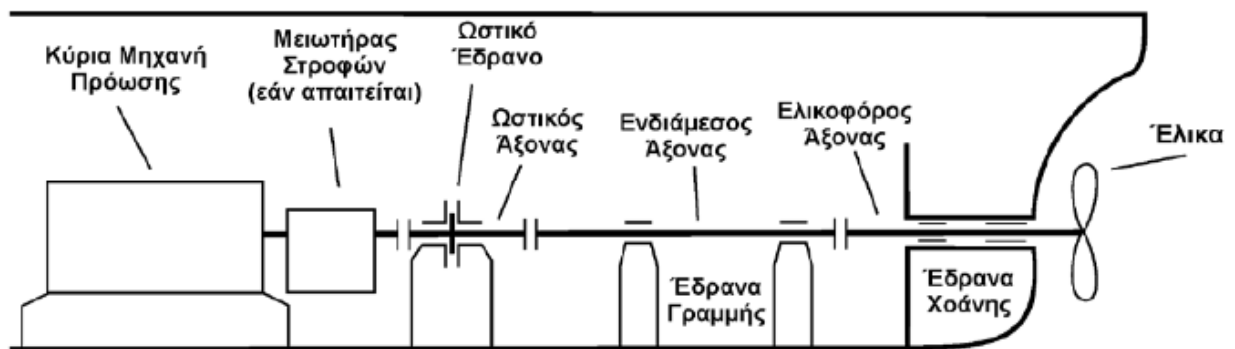
According to regulations of classification societies, the alignment study is mandatory, and filed the classification society for ships with larger diameter shafts of 400 mm, for ships axial system includes two input gear of an exit for axial system ships with auxiliary power outlet (power take off), and for ships to which provided treatment to generate inclination of the stern tube bearing.

As part of this exercise, the process will be discussed followed to make analysis of the axial system and the formation of the alignment project and the implementation onboard. For this purpose will be described the principal parties typically comprise axially ship systems and summarized basic knowledge Engineering, necessary for the calculations. The usual methods are described that used to implement the on-board alignment project and experimental confirm its effectiveness through measurements conducted. Moreover, it will be reference to various specific issues on aligning axial ship systems, such as the effect of the loading condition of the vessel and the wave and the effect of thermal expansions during operation of the main engine. Finally, we present the use specific program, which can make the modeling of the shaft system to undertake these calculations.

2. Βασικά Μέρη Αξονικού Συστήματος

Το αξονικό σύστημα ενός πλοίου μεταφέρει την ισχύ από την παραγωγή (Κύρια Μηχανή Πρόωσης) στην κατανάλωση (έλικα του πλοίου). Επιπροσθέτως, μεταφέρει την παραγόμενη από την έλικα ώση στο σημείο παραλαβής της από το πλοίο (ωστικό έδρανο). Το (Σχ. 1) παρουσιάζει τυπική διάταξη αξονικού συστήματος και απεικονίζει τα επιμέρους στοιχεία καθώς και τη μετάδοση ισχύος που λαμβάνει χώρα.

Το αξονικό σύστημα του πλοίου περιλαμβάνει τον ελικοφόρο άξονα (στην άκρη του οποίου βρίσκεται η έλικα), και τον ενδιάμεσο άξονα (ή τους ενδιάμεσους άξονες) ο οποίος συνδέει τον ελικοφόρο με τον στροφαλοφόρο άξονα της Κύριας Μηχανής. Σε πλοία με 2-Χ κινητήρες Diesel, ο ενδιάμεσος άξονας συνδέεται απευθείας στον στροφαλοφόρο του κινητήρα. Σε πλοία με 4-Χ κινητήρες Diesel, υπάρχει η ανάγκη μείωσης των στροφών της κύριας μηχανής, επομένως παρεμβάλλεται κατάλληλος μειωτήρας στροφών. Το αξονικό σύστημα καλείται να λειτουργήσει μεταφέροντας την ισχύ από την κύρια μηχανή στην έλικα, συγχρόνως δε, πρέπει να είναι κατάλληλα εδρασμένο ώστε να παραλαμβάνονται τα στατικά και δυναμικά φορτία λειτουργίας (βάρος έλικας, βάρη αξόνων, συνδέσμων, δυνάμεις κατά τη λειτουργία, κ.λπ.).

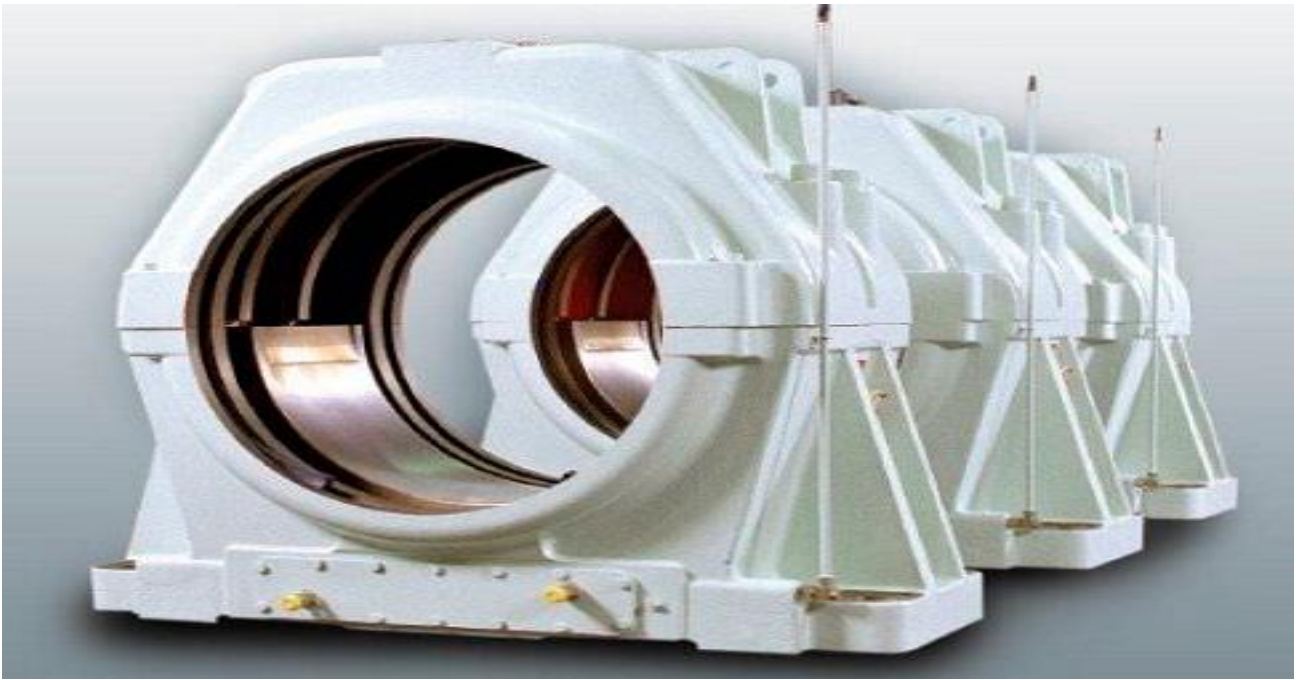


Σχ. 1. Τυπικό αξονικό σύστημα πλοίου. Μεταφορά ισχύος από την κύρια μηχανή στην έλικα.

Ο ενδιάμεσος άξονας εδράζεται σε ένα ή περισσότερα έδρανα ολίσθησης, τα οποία καλούνται έδρανα γραμμής. Ο ελικοφόρος άξονας εδράζεται συνήθως σε δύο έδρανα ολίσθησης στη χοάνη του πλοίου. Το πρυμναίο έδρανο χοάνης έχει συνήθως μεγάλο λόγο μήκους προς διάμετρο ώστε να παραλαμβάνει τα μεγάλα φορτία που δημιουργούνται λόγω της ύπαρξης της έλικας σε πρόβολο. Το (Σχ. 2) αποτελεί τυπικό αυτορυθμιζόμενο έδρανο ολίσθησης με δίσκους λίπανσης, ενώ στο (Σχ. 4) παρουσιάζεται τυπική διάταξη εδράνων χοάνης.

Ο στροφαλοφόρος άξονας του κινητήρα Diesel (Σχ. 3) εδράζεται στα έδρανα βάσεως εκατέρωθεν κάθε στροφάλου.

Στη συναρμολογημένη κατάσταση, το αξονικό σύστημα εδράζεται σε μεγάλο αριθμό εδράνων και αποτελεί τυπικό υπερστατικό φορέα. Για τη συγκρότηση πλάνου ευθυγράμμισης είναι αναγκαία η ανάλυση της στατικής ισορροπίας του.



Σχ. 2. Έδρανα γραμμής



Σχ. 3. Έδραση στροφαλοφόρου άξονα



Σχ. 4. Έδρανα χοάνης

3. Ευθυγράμμιση αξονικού συστήματος

3.1. Το πρόβλημα της ευθυγράμμισης

Όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα, το αξονικό σύστημα ενός πλοίου αποτελεί υπερστατικό φορέα, λόγω της ύπαρξης περισσότερων στηρίξεων των τμημάτων του άξονα από όσες απαιτούνται ώστε να υπάρχει στατική ισορροπία. Το γεγονός αυτό κάνει τον υπολογισμό των αντιδράσεων στα σημεία στήριξης μη τετριμμένο καθώς δεν αρκεί απλός υπολογισμός ισορροπίας δυνάμεων και ροπών για τον υπολογισμό της στατικής ισορροπίας. Αφ' ετέρου, πλημμελής σχεδιασμός των στηρίξεων του άξονα μπορεί να οδηγήσει σε υπερφορτίσεις συγκεκριμένων εδράνων και σε επιτάχυνση της φθοράς των συνεργαζόμενων στοιχείων. Επιπλέον, η ύπαρξη μεγάλων καμπτικών ροπών σε τμήματα του άξονα οδηγεί σε αύξηση των (δυναμικών κατά τη λειτουργία) ορθών τάσεων λόγω κάμψης, οι οποίες σε συνδυασμό με τις διατμητικές στρεπτικές τάσεις μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία από κόπωση του υλικού. Είναι λοιπόν απαραίτητος ο προσδιορισμός της κατάλληλης διαμήκουσ και κατακόρυφης θέσεως των εδράνων ώστε να παραλαμβάνονται ομοιόμορφα τα στατικά φορτία του αξονικού συστήματος. Με την έννοια αυτή, ο όρος «ευθυγράμμιση του αξονικού συστήματος» αντιστοιχεί στην πραγματικότητα στον προμελετημένο σχεδιασμό και την εφαρμογή κατάλληλης απευθυγράμμισης των κέντρων των εδράνων, ούτως ώστε να επιτευχθούν βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας του αξονικού συστήματος του πλοίου. Τα φορτία του αξονικού συστήματος τα οποία θα παραληφθούν από τα έδρανα είναι (α) το βάρος της έλικας, η οποία βρίσκεται σε πρόβολο στο πρυμναίο άκρο του αξονικού συστήματος, (β) το ίδιο βάρος των τμημάτων του άξονα τα οποία συνθέτουν το αξονικό σύστημα και (γ) το βάρος τυχόν συνδέσμων.

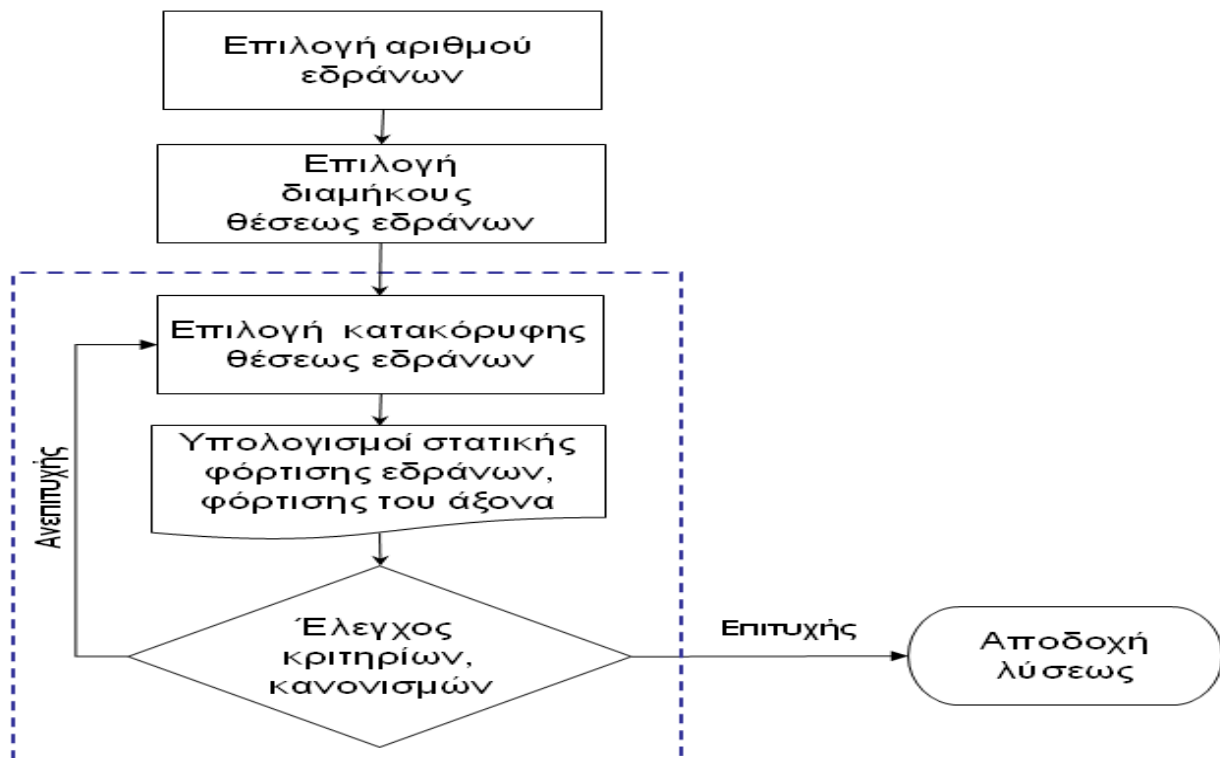
Εν γένει, η ευθυγράμμιση του αξονικού συστήματος έχει τους παρακάτω στόχους:

- Μείωση ανομοιομορφίας φόρτισης εδράνων
- Αποφυγή αρνητικά φορτισμένων εδράνων (εδράνων που δεν παραλαμβάνουν φορτίο)
- Μείωση βέλους κάμψης και ορθών τάσεων λόγω κάμψης του άξονα
- Μικρός αριθμός σημείων καμπής του άξονα
- Ελαχιστοποίηση διαφοράς φορτίου μεταξύ πρυμναίου-πρωραίου εδράνου του μειωτήρα στροφών (αν υπάρχει)
 - Ανακούφιση εδράνων της Κύριας Μηχανής Πρόωσης
 - Χρησιμοποίηση μικρού αριθμού εδράνων
 - Επιτυχή λειτουργία σε διάφορες καταστάσεις φόρτωσης και καιρού
 - Επιτυχή λειτουργία σε θερμή και ψυχρή κατάσταση

Ανεπιτυχής σχεδιασμός ή εφαρμογή του σχεδίου ευθυγράμμισης του αξονικού συστήματος μπορεί να οδηγήσει σε:

- Αστάθεια των εδράνων (αρνητικά φορτισμένα έδρανα, υψηλοί ρυθμοί φθοράς εδράνων)
- Υπερβολική κάμψη άξονα, ταλαντώσεις λόγω έκκεντρου άξονα
- Καταπόνηση και φθορά του μειωτήρα στροφών
- Κόπωση του αξονικού συστήματος λόγω ορθών τάσεων λόγω κάμψης
- Καταπόνηση και φθορά εδράνων βάσης της Κύριας Μηχανής

Ο αλγόριθμος για τη συγκρότηση του πλάνου ευθυγράμμισης αξονικού συστήματος κατά τον σχεδιασμό για συγκεκριμένη κατάσταση φόρτωσης του πλοίου παρουσιάζεται στο Σχ. 5.



Σχ. 5. Αλγόριθμος υπολογισμού αριθμού και θέσης εδράνων με δοκιμές.

3.2. Βασικοί Υπολογισμοί Μηχανικής

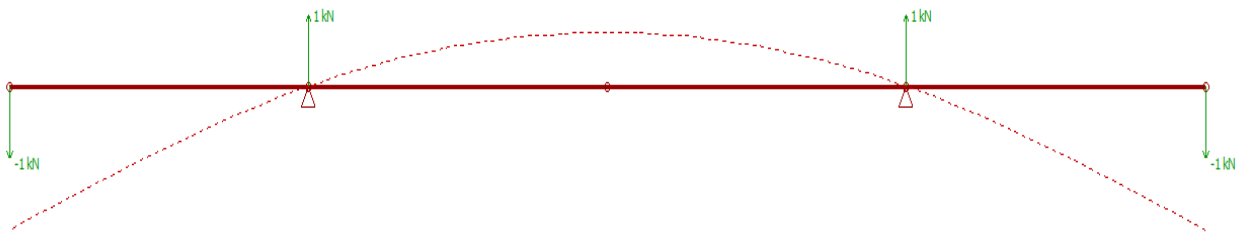
Το αξονικό σύστημα ενός πλοίου μπορεί να μοντελοποιηθεί ως δοκός η οποία εδράζεται σε N σημειακές κυλίσεις όπου $N > 2$. Η δοκός φέρει το ίδιο βάρος του άξονα (κατανεμημένο φορτίο) και διάφορα σημειακά φορτία (βάρος έλικας, βάρος συνδέσμων, κ.λπ.). Οι N άγνωστες αντιδράσεις στα σημεία στήριξης μπορούν να υπολογιστούν από τις δύο εξισώσεις ισορροπίας του συστήματος (ισορροπία δυνάμεων και ροπών) και $N-2$ πρόσθετες εξισώσεις που προκύπτουν από εφαρμογή της εξίσωσης τριών ροπών σε οποιαδήποτε διαδοχικά τμήματα της δοκού τα οποία στηρίζονται σε τρία έδρανα.

Στο (Σχ. 6) παρουσιάζεται παράδειγμα αβαρούς φορέα, ο οποίος καταπονείται από δύο συγκεντρωμένες δυνάμεις ίδιου μεγέθους στα άκρα του. Στην περίπτωση (α) ο φορέας είναι στατικά ορισμένος και, λόγω συμμετρίας, οι αντιδράσεις των δύο εδράνων είναι ίσες. Στην περίπτωση (β) εισάγεται τρίτο σημείο στήριξης μεταξύ των δύο υπάρχοντων. Ο φορέας είναι υπερστατικός ($N=3$). Από την επίλυση του προβλήματος προκύπτουν οι αντιδράσεις στα τρία σημεία στήριξης. Παρατηρείται ότι το μεσαίο έδρανο έχει αρνητική αντίδραση (δεν φέρει φορτίο) ενώ αυξάνεται το φορτίο των δύο ακραίων εδράνων. Στην περίπτωση (γ) επιβάλλεται κατάλληλη αρνητική κατακόρυφη μετατόπιση στο δεξί έδρανο. Εδώ, οι αντιδράσεις των εδράνων είναι όλες θετικές, και το συνολικό φορτίο της δοκού κατανέμεται ισομερώς στα τρία έδρανα.

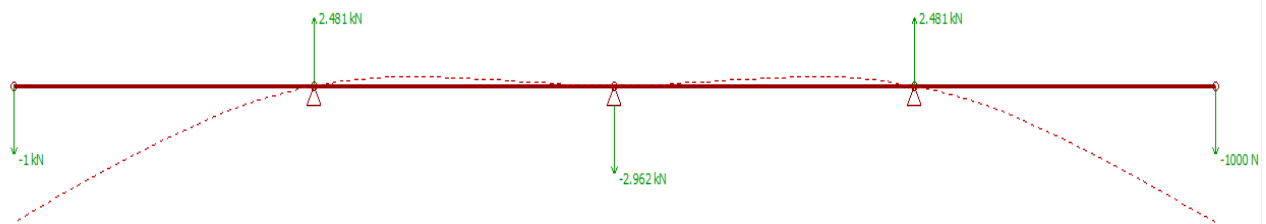
Η κατακόρυφη μετατόπιση ενός εδράνου μεταβάλλει το φορτίο που φέρεται από το ίδιο το έδρανο αλλά και το φορτίο των υπολοίπων εδράνων του συστήματος. Η επίδραση της κατακόρυφης

μετατόπιση ενός εδράνου στις αντιδράσεις του συστήματος στα σημεία έδρασης μπορεί να εκφραστεί μέσω των συντελεστών επιρροής του συστήματος. Συντελεστής επιρροής σίι του εδράνου i στο έδρανο j ορίζεται ως η μεταβολή του φορτίου του εδράνου j , που οφείλεται σε κατακόρυφη μετατόπιση του εδράνου i κατά μία μονάδα μήκους. Η χρήση των συντελεστών επιρροής μπορεί να διευκολύνει σημαντικά τον υπολογισμό κατάλληλων κατακόρυφων μετατοπίσεων των εδράνων του συστήματος. Γενικά, όσο μεγαλύτεροι είναι οι συντελεστές επιρροής ενός συστήματος, τόσο μεγαλύτερες είναι οι μεταβολές στις αντιδράσεις των εδράνων λόγω αλλαγών στην κατακόρυφη θέση τους. Λύσεις που αντιστοιχούν σε μικρότερους συντελεστές επιρροής είναι λιγότερο ευαίσθητες σε τέτοιες μεταβολές και επομένως προτιμότερες

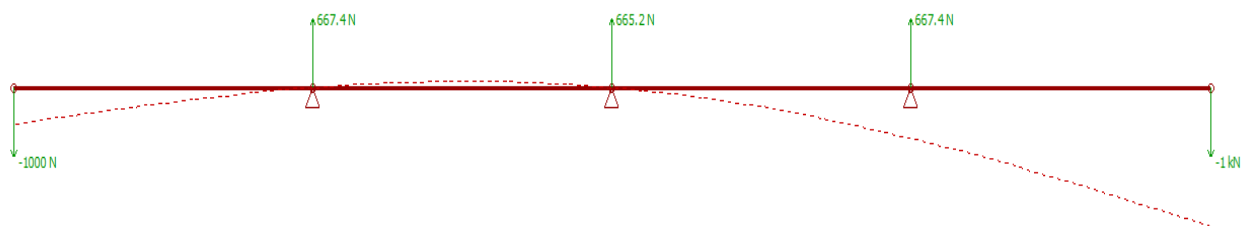
Σχ. 6. Παράδειγμα υπολογισμών αντιδράσεων.



(α) Ισοστατικός (στατικά ορισμένος) φορέας,



(β) Υπερστατικός φορέας



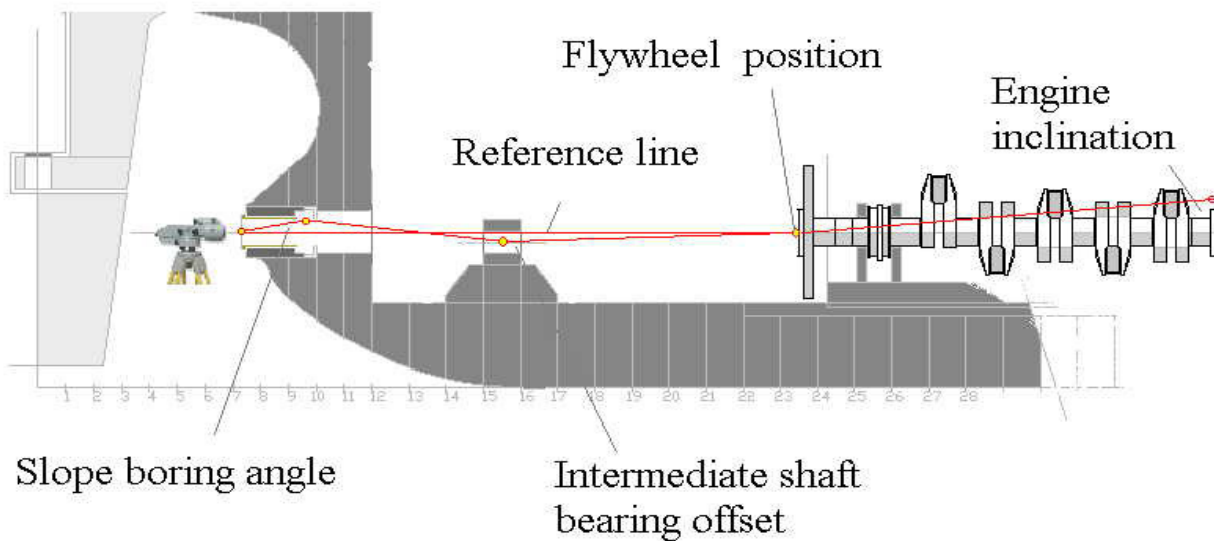
(γ) Υπερστατικός φορέας με κατάλληλη κατακόρυφη μετατόπιση του δεξιού εδράνου.

4. Διαδικασία εφαρμογής σχεδίου ευθυγράμμισης και τεχνικά μέσα

Η διαδικασία της εφαρμογής του σχεδίου ευθυγράμμισης ξεκινά συνήθως μετά τη συγκόλληση του πρυμναίου τμήματος του πλοίου. Η διαδικασία περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

4.1. Ορισμός γραμμής αναφοράς

Ορίζεται η γραμμή αναφοράς (Σχ. 7) για την ευθυγράμμιση των διαφόρων στοιχείων του αξονικού συστήματος. Για την υλοποίηση της διαδικασίας χρησιμοποιούνται οπτικά συστήματα, συστήματα Laser ή τεντωμένο σύρμα (Σχ. 8).



Σχ. 7. Ευθυγράμμιση αξονικού συστήματος. Ορισμός γραμμής αναφοράς

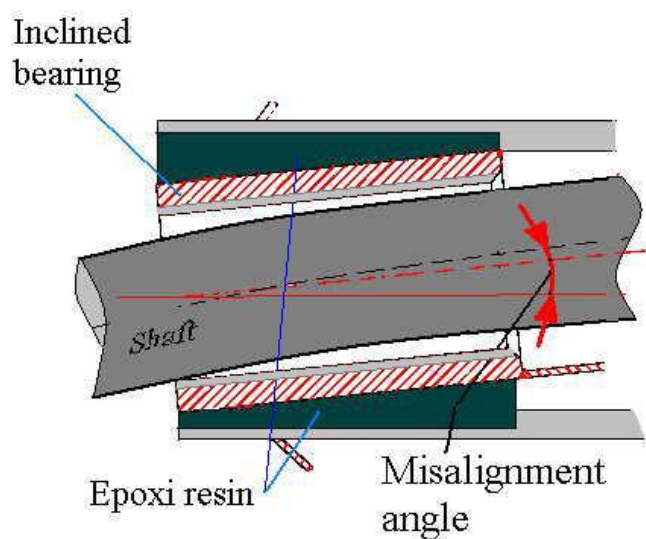
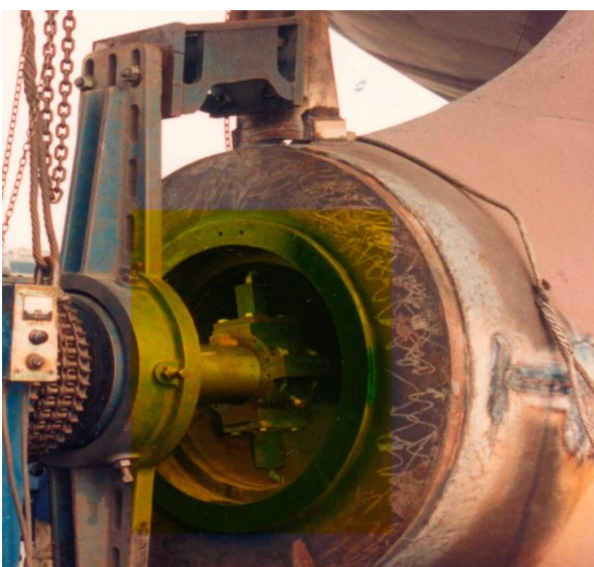




Σχ. 8. Τεχνικές τεντωμένου σύρματος και οπτικών συστημάτων ή συστημάτων Laser

4.2. Εφαρμογή κλίσης στο πρυμναίο έδρανο χοάνης

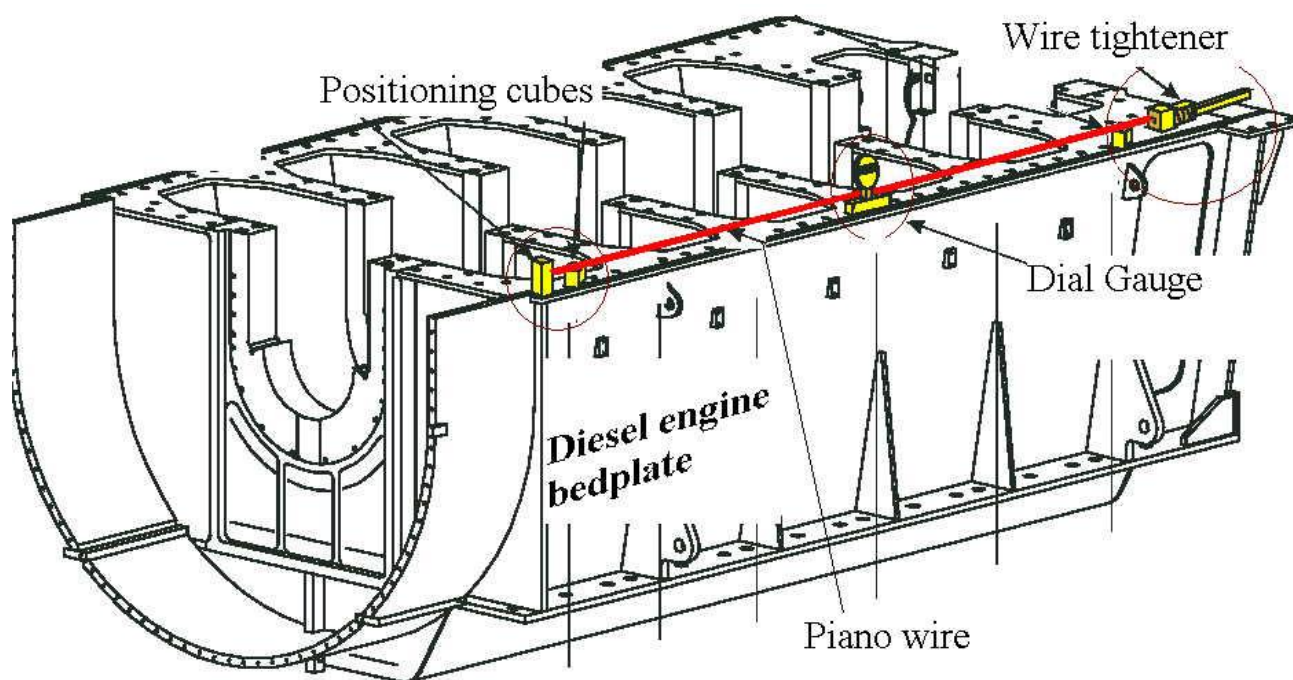
Αν το σχέδιο ευθυγράμμισης προβλέπει εφαρμογή κλίσης στο πρυμναίο έδρανο χοάνης τότε αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους: (α) με μηχανουργική κατεργασία στο πρυμναίο έδρανο χοάνης για τη δημιουργία κατάλληλης κλίσης (σε σχέση με τη γραμμή αναφοράς) και (β) με περιστροφή του εδράνου. Στην περίπτωση εφαρμογής κατεργασίας, το έδρανο τοποθετείται κατεργασμένο σε μικρότερη από την τελική διάμετρο, και χρησιμοποιείται ειδικό μηχάνημα κατεργασίας (Σχ. 9α) το οποίο δημιουργεί την απαιτούμενη κλίση με διαδοχικά πάσα (περάσματα) ώστε να επιτευχθούν οι απαιτούμενες ανοχές χωρίς υπερθέρμανση του υλικού του εδράνου. Η διαδικασία είναι σχετικά αργή, απαιτεί ειδικά διαμορφωμένο μηχάνημα, και η ακρίβεια της κατεργασίας μειώνεται σε έδρανα μεγάλου μήκους. Στην περίπτωση περιστροφής του εδράνου, το έδρανο τοποθετείται κατεργασμένο στην τελική του διάσταση με ελεύθερη συναρμογή στη χοάνη, περιστρέφεται στην κατάλληλη γωνία και σταθεροποιείται με χρήση εποξικών ρητινών (Σχ. 9β).



Σχ. 9^{α-β}. Κατεργασία και περιστροφή πρυμναίου εδράνου χοάνης

4.3. Αρχική απευθυγράμμιση της κύριας μηχανής

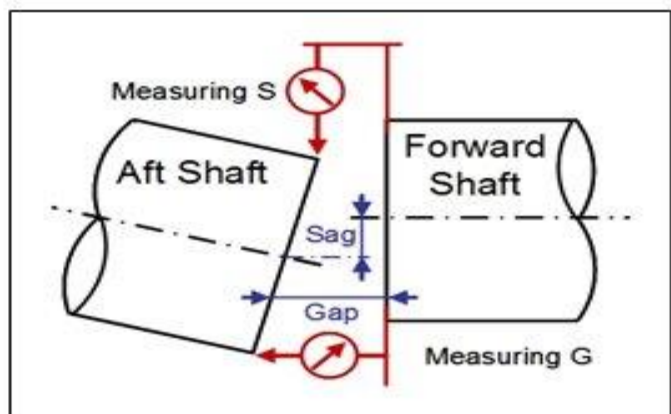
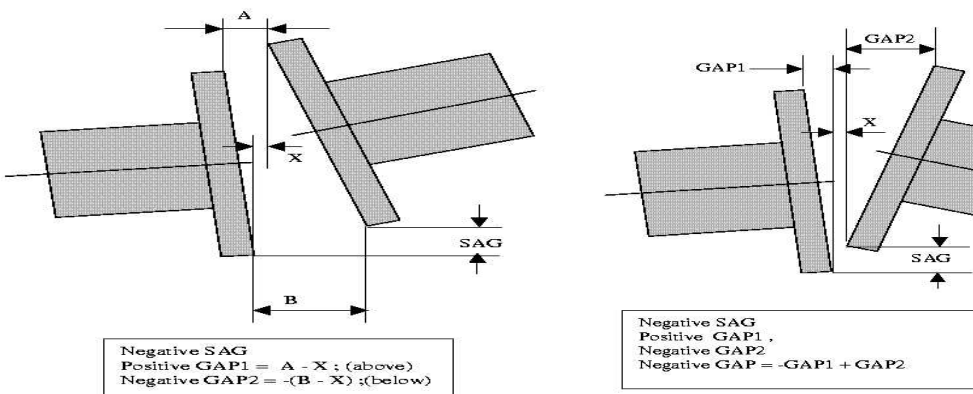
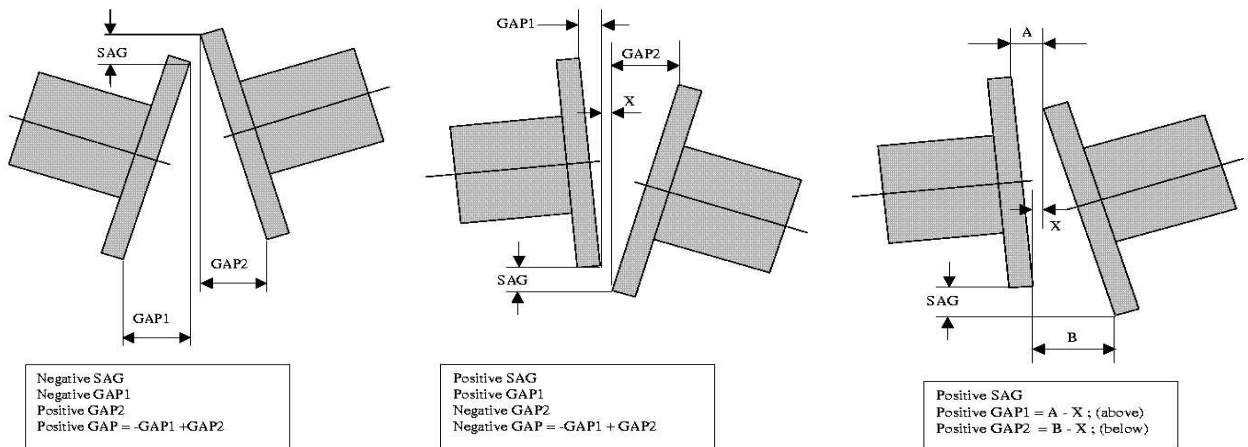
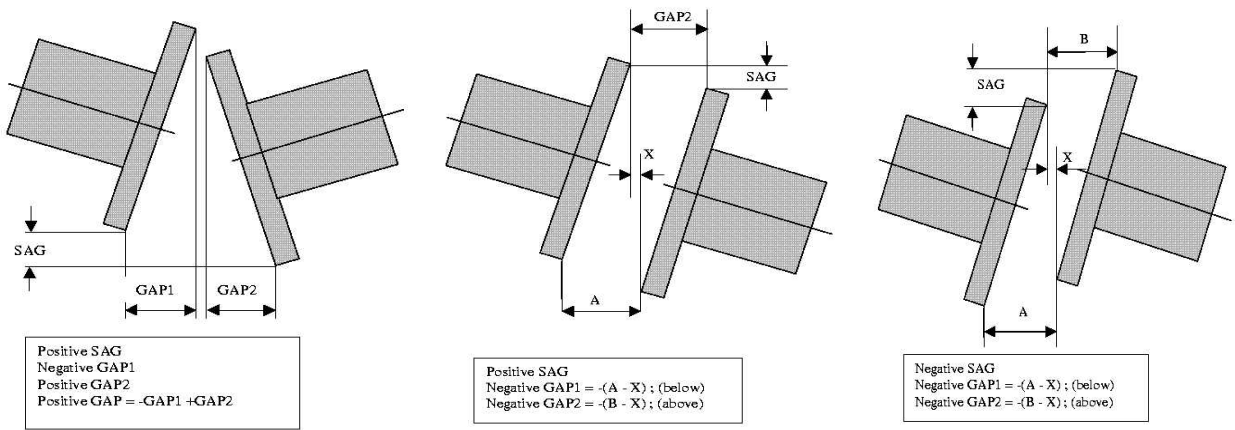
Οι μεγάλες 2-X μηχανές πλοίου είναι σχετικά εύκαμπτες κατασκευές. Επομένως η ευθυγράμμιση των εδράνων βάσεως επηρεάζεται σημαντικά από τις παραμορφώσεις της γάστρας του πλοίου και τις αλλαγές της θερμοκρασίας. Προβλήματα στην ευθυγράμμιση της μηχανής μπορεί να οδηγήσουν σε αυξημένη καταπόνηση και φθορά των εδράνων και του στροφαλοφόρου άξονα. Για τον λόγο αυτό, στην κατάσταση δεξαμενισμού του πλοίου, πραγματοποιείται προμελετημένη απευθυγράμμιση των εδράνων βάσεως της Κύριας Μηχανής (pre-sagging) με βάση τα στοιχεία του κατασκευαστή της. (Σχ.10) Η απευθυγράμμιση αυτή αναμένεται να εκμηδενιστεί σε καταστάσεις πλεύσης λόγω των σχετικών παραμορφώσεων της γάστρας του πλοίου και της κατακόρυφης μετατόπισης των εδράνων βάσης του κινητήρα λόγω θερμικών διαστολών.



Σχ. 10. Αρχική απευθυγράμμιση της Κύριας Μηχανής

4.4. Διαδικασία πτώσης και ανοίγματος φλάντζών (sag and gap)

Αφού ολοκληρωθεί η τοποθέτηση των εδράνων στην τελική τους θέση, τοποθετούνται τα τμήματα του αξονικού συστήματος (ελικοφόρος και ενδιάμεσος άξονας) τα οποία κατ' αρχήν είναι αποσυναρμολογημένα. Κάθε τμήμα στηρίζεται σε δύο το πολύ έδρανα (το ένα από τα οποία μπορεί να είναι προσωρινό). Στην κατάσταση αυτή, κάθε τμήμα έχει τη δική του ελαστική γραμμή, επομένως στα σημεία σύνδεσης των αξόνων οι φλάντζες των προς σύνδεση τμημάτων έχουν κάποια αξονική κλίση και μετατόπιση (Σχ. 11). Η σχετική απόσταση των δύο φλάντζών μπορεί να προσδιοριστεί με μέτρηση της πτώσης (sag) και του ανοίγματος (gap) των φλάντζών. Η πτώση (sag) αντιστοιχεί στη διαφορά των κατακόρυφων μετατοπίσεων των δύο φλάντζών. Το άνοιγμα (gap) κάθε φλάντζας είναι η οριζόντια απόσταση της υψηλότερης και χαμηλότερης ακμής της φλάντζας. Το ολικό άνοιγμα προκύπτει από το άθροισμα των ανοιγμάτων κάθε φλάντζας. Σκοπός της διαδικασίας είναι η κατάλληλη τοποθέτηση των αξόνων πριν τη συναρμολόγηση ώστε να προκύπτει η προδιαγεγραμμένη ευθυγράμμιση μετά τη συναρμολόγηση .

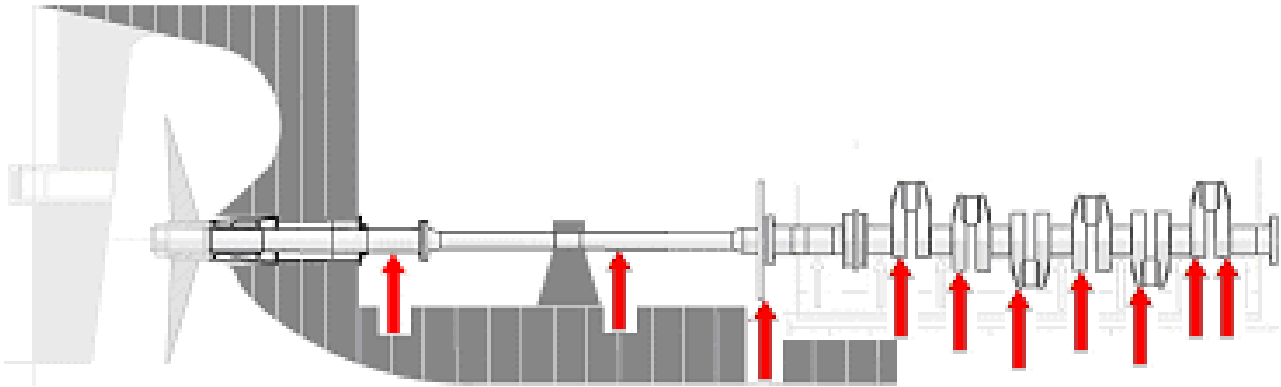


Σχ. 11. Διάφορες περιπτώσεις διάταξης κατά τη διαδικασία sag and gap

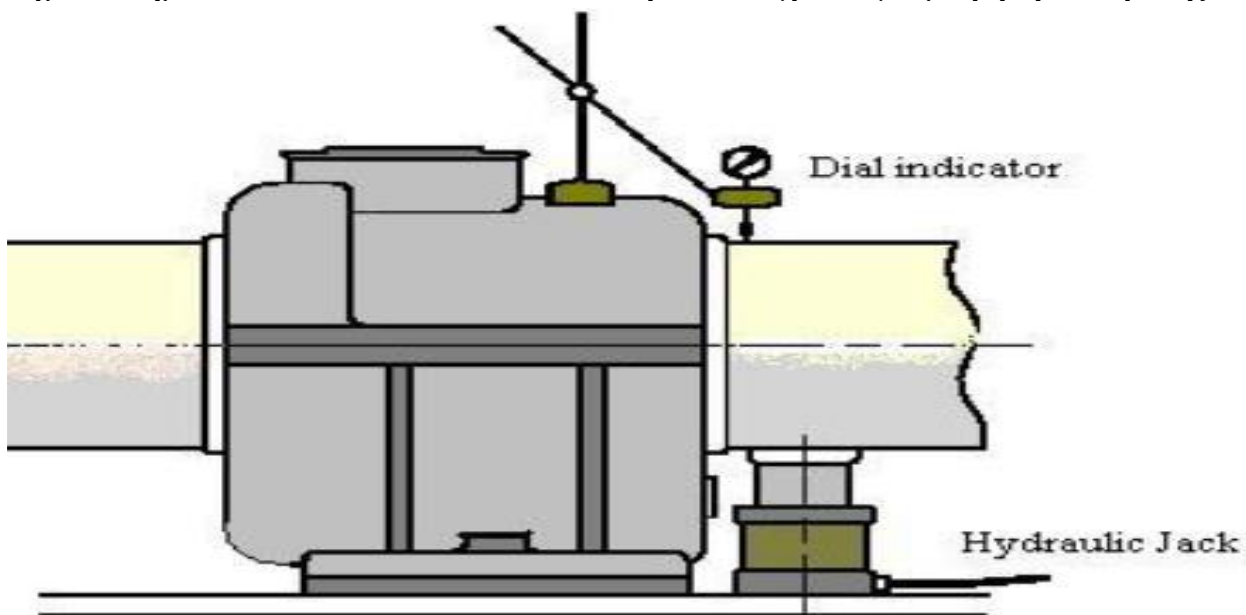
4.5. Μέτρηση αντιδράσεων των εδράνων

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. Οι συνήθεις τρόποι μέτρησης της κατάστασης ευθυγράμμισης είναι οι ακόλουθες:

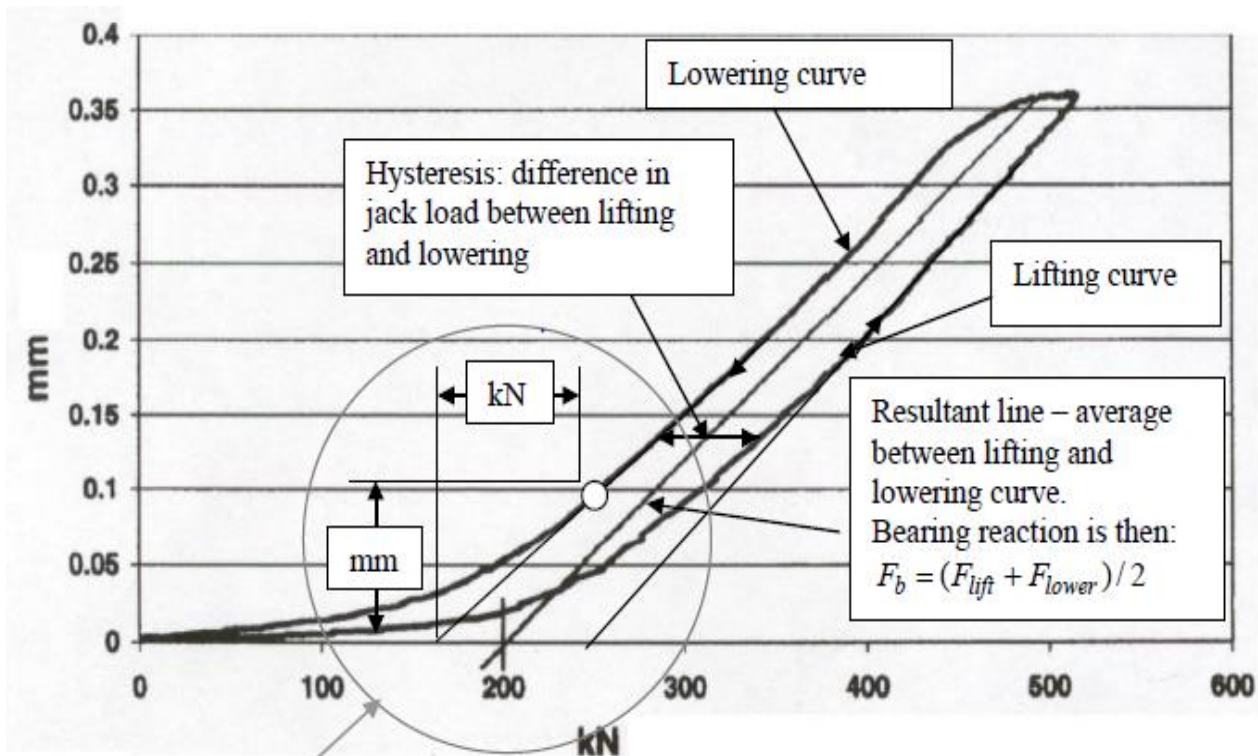
(α) Μέτρηση αντιδράσεων με υδραυλικό γρύλλο (Σχ. 13). Αποτελεί άμεση μέθοδο μέτρησης των αντιδράσεων στα έδρανα. Υδραυλικός γρύλλος τοποθετείται δίπλα στο έδρανο το οποίο πρόκειται να μετρηθεί. Ο γρύλλος είναι συνήθως εξοπλισμένος με δυναμοκυψέλη για τη βελτίωση της ακρίβειας των μετρήσεων. Κατά την ανύψωση του γρύλλου μετράται η δύναμη που ασκείται στη δυναμοκυψέλη. Συγχρόνως μετράται η ανύψωση μέσω του ωρολογιακού μικρομέτρου. Με τον τρόπο αυτό κατασκευάζεται διάγραμμα όπως αυτό του (Σχ. 14.) Η διαφορά μεταξύ των μετρήσεων κατά την ανοδική και καθοδική πορεία οφείλεται σε τριβές του άξονα και του συστήματος ανύψωσης. Στην αρχή της διαδικασίας, λόγω της ελαστικότητας του εδράνου, καθώς ανυψώνεται ο άξονας το φορτίο παραλαμβάνεται συνδυαστικά από το έδρανο και τον γρύλλο (τμήμα καμπύλης με μικρή κλίση στο (Σχ. 14). Η κλίση αυξάνεται όταν ο άξονας χάσει την επαφή με το έδρανο, οπότε όλο το φορτίο φέρεται από τον γρύλλο



Σχ. 12. Σημεία στα οποία τοποθετούνται οι υδραυλικοί γρύλλοι για μέτρηση αντίδρασης.



Σχ. 13. Μέτρηση αντιδράσεων με υδραυλικό γρύλλο και ωρολογιακό μικρόμετρο



Η κλίση της ανόδου / καθόδου της καμπύλης υπολογίζεται :

$$\text{ΚΛΙΣΗ} = \Delta \text{ΥΝΑΜΗ} / \text{ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ} \quad \text{kn} / \text{mm}$$

Σχ. 14. Καμπύλη φορτίου – ανύψωσης

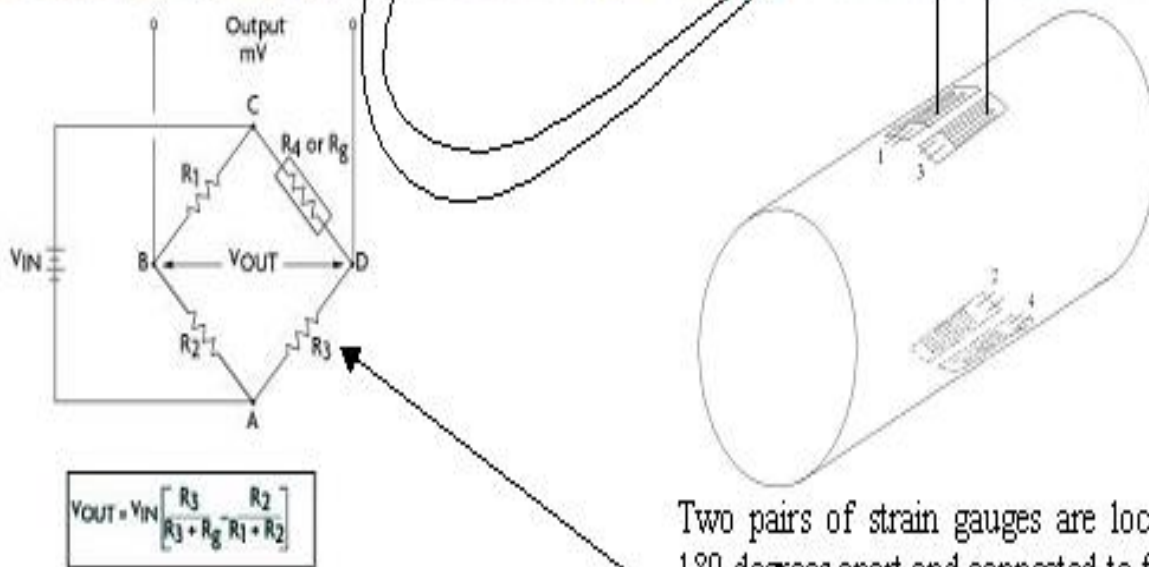
(β) Μέτρηση με επιμηκυσσιόμετρα. Η μέθοδος αυτή αποτελεί έμμεση μέθοδο υπολογισμού των αντιδράσεων των εδράνων. Συγκεκριμένα, με γέφυρες επιμηκυσσιόμετρων τοποθετημένες σε κατάλληλα σημεία κατά το μήκος του άξονα μετρούνται οι καμπτικές τάσεις στα σημεία αυτά. Εάν επαναλαμβάνουμε την διαδικασία περιστροφής του άξονα το σφάλμα θα επαναλαμβάνετε αυτό βοηθά στην εγκυρότητα της μέτρησης

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου με επιμηκυσσιόμετρο είναι:

- Μπορεί να παρέχει σχετικά ακριβείς πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση φόρτισης των εδράνων τα οποία δεν είναι προσβάσιμα για μετρήσεις jack-up.
- Μόλις τα όργανα μέτρησης τοποθετούνται, η μέτρηση μπορεί να επαναληφθεί εύκολα μέσα σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα.
- Μπορεί να παρέχει δεδομένα σχετικά με κάθετη και οριζόντια φόρτιση στα έδρανα.
- Μπορεί να παρέχει ταυτόχρονα πληροφορίες για περισσότερα από ένα σημεία.

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου μετρητή στέλεχος είναι:

- Απαιτεί ένα σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα για την εγκατάσταση εξοπλισμού (περίπου μία ώρα ανά σημείο μέτρησης).
- Ακρίβεια των δεδομένων εξαρτάται από την μοντελοποίηση του συστήματος.
- Απαιτεί σχετικά περίπλοκο και ακριβό εξοπλισμό για τη μέτρηση.



$$V_{OUT} = V_{IN} \left[\frac{R_3}{R_3 + R_g} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right]$$

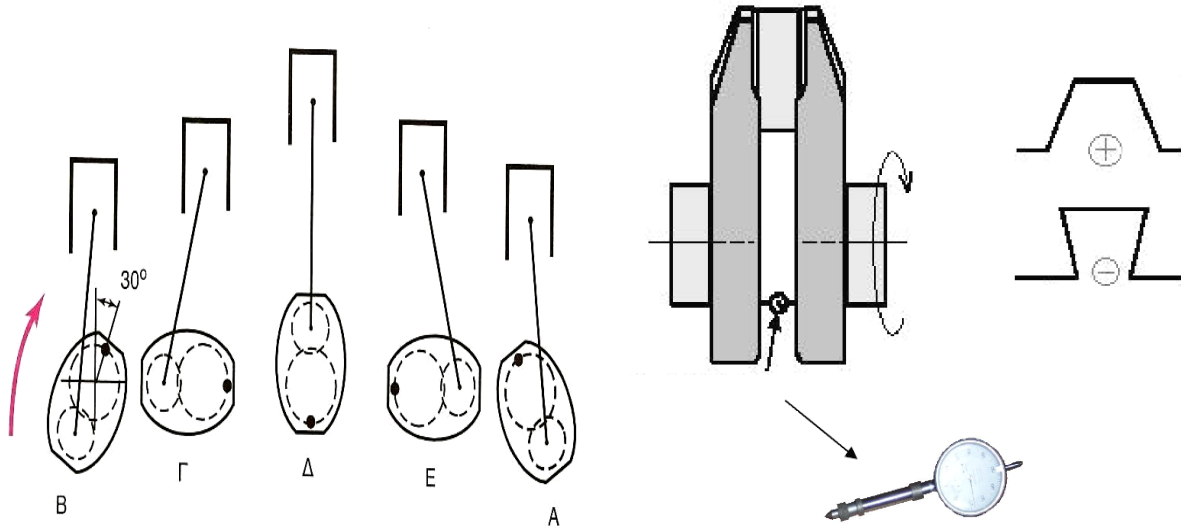
Strain gauge schematic – full bridge is apply at each measurement location

Two pairs of strain gauges are located 180 degrees apart and connected to form Wheatstone bridge

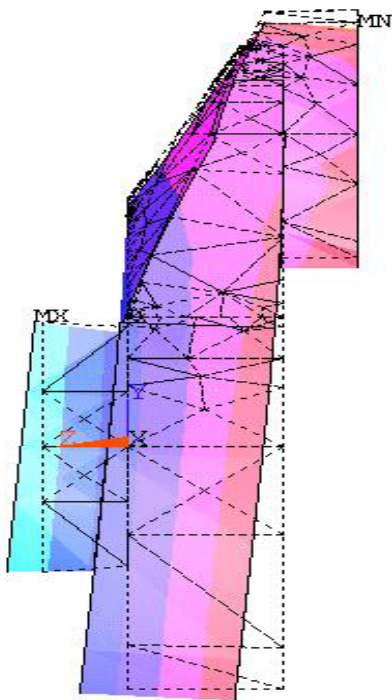
Σχ. 15. Μέτρηση αντιδράσεων με επιμηκυνσιόμετρα

4.6. Παραμορφώσεις στροφάλων Κύριας Μηχανής

Η μέτρηση των παραμορφώσεων των στροφάλων της Κύριας Μηχανής(deflection) αποτελεί έμμεσο τρόπο εκτίμησης της καταπόνησης του στροφαλοφόρου άξονα. Συγκεκριμένα, στο τέλος της διαδικασίας ευθυγράμμισης μετράται το άνοιγμα κάθε στροφάλου σε διάφορες γωνίες του στροφαλοφόρου, με χρήση ωρολογιακού μικρομέτρου, και οι μετρημένες τιμές ελέγχονται με βάση ανώτερες επιτρεπόμενες τιμές που προβλέπει ο κατασκευαστής της μηχανής.



Σχ. 16. Μέτρηση παραμορφώσεων στροφάλου.



```

ANSYS 6.0
AUG 30 2002
07:14:57
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
UY (AVG)
RSYS=0
PowerGraphics
EFACET=1
AVRES=Mat
DMX =9.611
SMN =-5.223

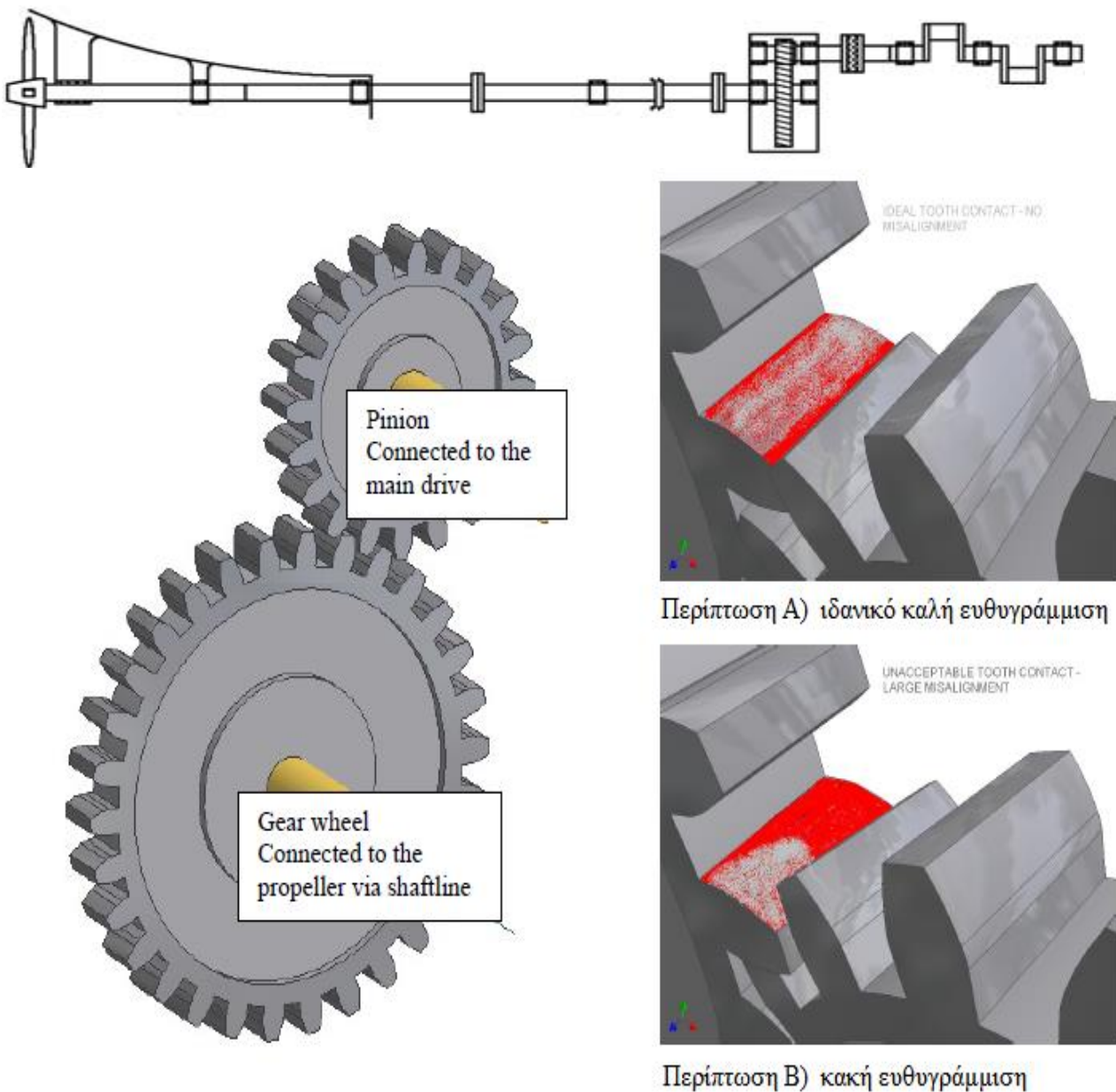
```

Yellow	-5.223
Orange	-4.642
Red	-4.062
Red-Orange	-3.482
Red	-2.901
Pink	-2.321
Purple	-1.741
Blue	-1.161
Cyan	-.580281
White	0

4.7. κακή εφαρμογή οδοντωτών τροχών λόγω κακής ευθυγράμμισης

- Περίπτωση A) ιδανικό (μηδέν) καλή ευθυγράμμιση μεταξύ των οδοντωτών τροχών.
- Περίπτωση B) κακή ευθυγράμμιση μεταξύ των οδοντωτών τροχών.

Και στις δυο περιπτώσεις το κόκκινο χρώμα είναι βαφή επάνω στην επιφάνεια των δοντιών των γραναζιών ενώ το γκρι χρώμα αντιπροσωπεύει το σημείο της επαφής μεταξύ των οδοντωτών τροχών. Προφανώς όταν η ευθυγράμμιση είναι καλή τα δόντια θα είναι γκρι σε όλο το πλάτος τους όπως στην περίπτωση (A). Όταν η γκρι περιοχή είναι ορατή μόνο στη μια πλευρά των δοντιών περίπτωση (B) τότε έχουμε κακή ευθυγράμμιση.(Σχ17)



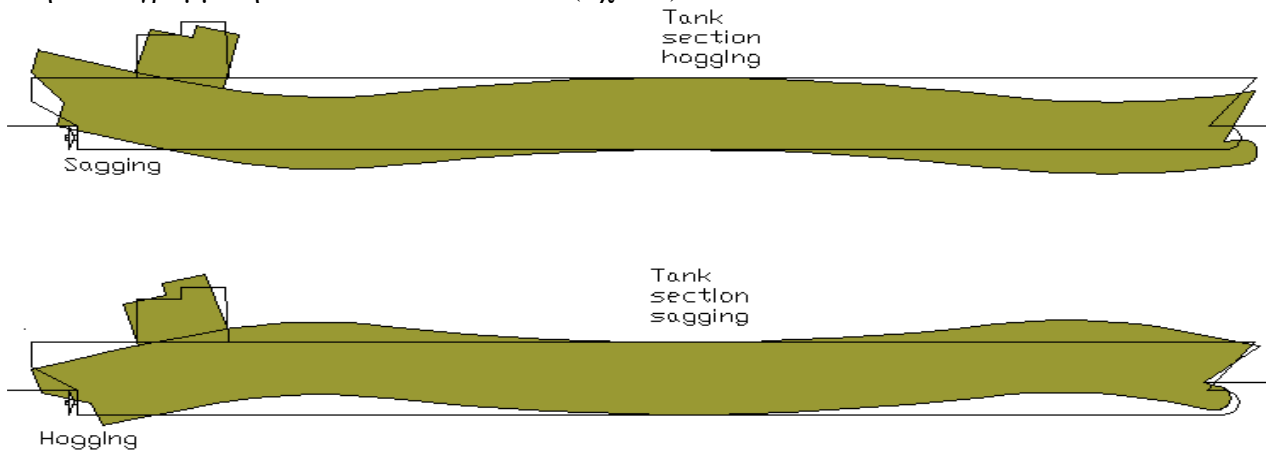
Σχ. 17. Οδοντωτοί τροχοί μειωτήρα

5. Ειδικά θέματα

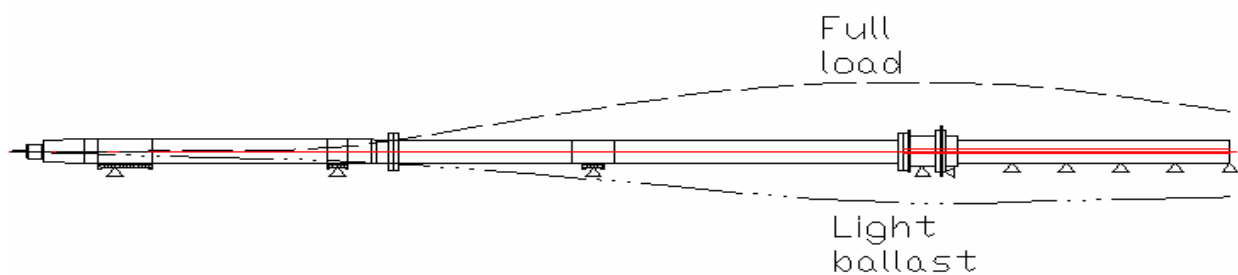
5.1. Επίδραση παραμορφώσεων της γάστρας

Επίδραση φόρτωσης πλοίου

Οι παραμορφώσεις της γάστρας του πλοίου επηρεάζουν σημαντικά τις κατακόρυφες θέσεις των εδράνων και επομένως την ευθυγράμμιση του αξονικού συστήματος κατά την υπηρεσία του πλοίου. Αν οι παραμορφώσεις αυτές δεν ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό, είναι ενδεχόμενο να υπάρξουν καταστάσεις λειτουργίας με πλημμελή ευθυγράμμιση οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά τις καταπονήσεις και τη διάρκεια ζωής των εδράνων του συστήματος. Εν γένει, ο προσδιορισμός των παραμορφώσεων της γάστρας του πλοίου και η αποτίμηση της επίδρασής τους στην ευθυγράμμιση του πλοίου είναι δύσκολη και επίπονη διαδικασία. Πλοία στα οποία οι παραμορφώσεις της γάστρας επηρεάζουν σημαντικά την ευθυγράμμιση του αξονικού συστήματος είναι μεγάλα δεξαμενόπλοια και πλοία μεταφοράς φορτίου χύδην. Εν γένει, πλοία με μεγάλο μήκος αξονικού συστήματος είναι περισσότερο ευαίσθητα σε παραμορφώσεις της γάστρας του πλοίου. Παράδειγμα παραμορφώσεων της γάστρας λόγω της κατάστασης φόρτισης και της επίδρασης στην ευθυγράμμιση του πλοίου δίδεται στο (Σχ. 18.)



(α)



(β)

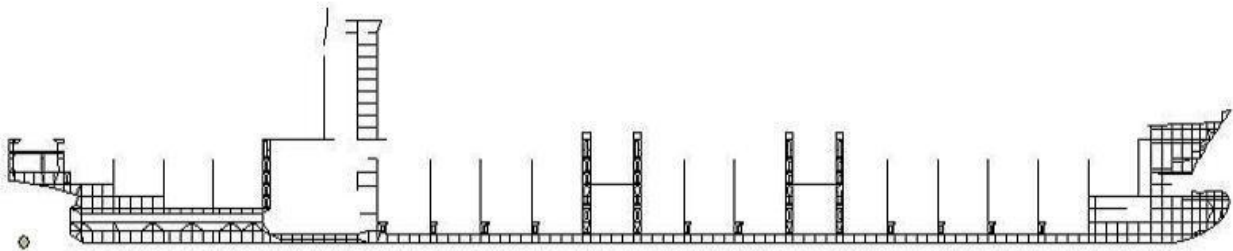
Σχ. 18. (α) Τυπικές παραμορφώσεις της γάστρας πλοίου VLCC σε κατάσταση πλήρους φορτίου και ερματισμού.

(β) Συμπεριφορά του αξονικού συστήματος στις δύο ακραίες περιπτώσεις.

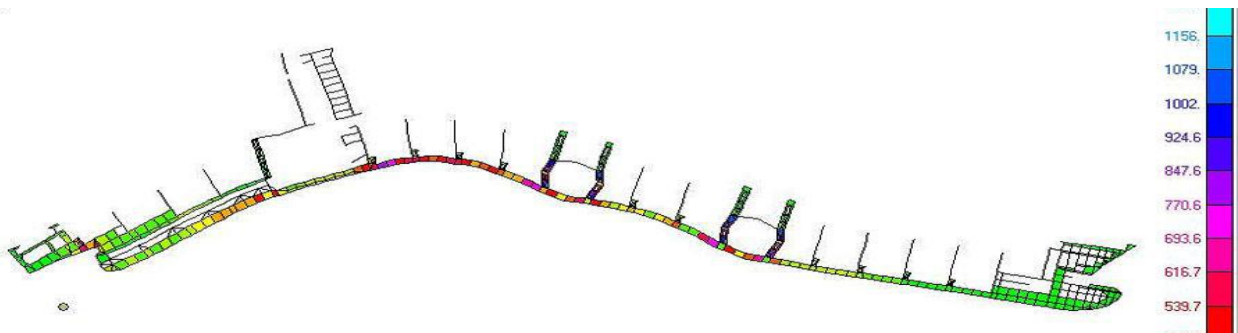
Οι παραμορφώσεις της γάστρας μπορούν να εκτιμηθούν είτε αναλυτικά είτε με τη βοήθεια μετρήσεων. Ο αναλυτικός υπολογισμός των παραμορφώσεων συνήθως περιλαμβάνει τη λεπτομερή μοντελοποίηση του πλοίου (κυρίως του πρυμναίου άκρου) με τη βοήθεια αριθμητικών μεθόδων, όπως της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

Οι μετρήσεις των παραμορφώσεων της γάστρας του πλοίου διεξάγονται για δύο κυρίως λόγους: (α) την ανάλυση της ευαισθησίας της ευθυγράμμισης υπάρχουσας εγκατάστασης λόγω παραμορφώσεων της γάστρας, και (β) για τον σχεδιασμό της ευθυγράμμισης σε πλοία ίδιας γεωμετρίας. Σκοπό των μετρήσεων αποτελεί η εύρεση της κατακόρυφης απόκλισης των κέντρων των εδράνων του αξονικού συστήματος σε διαφορετικές καταστάσεις φόρτωσης του πλοίου. (σχ19) Για το σκοπό αυτό μετράται η ροπή κάμψης σε διάφορα σημεία του αξονικού συστήματος με χρήση επιμηκυνσιομέτρων, και η αντίδραση των εδράνων του συστήματος με χρήση γρύλων με δυναμοκυβέλες. Με αντίστροφη σχεδίαση (reverse engineering) υπολογίζονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις των εδράνων.

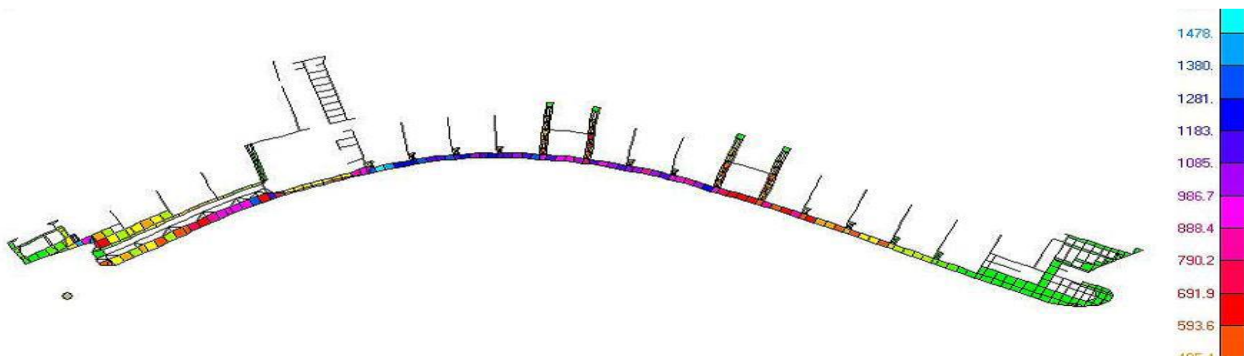
Σχ. 19. Παραμορφώσεις πλοίου.



δεξαμενισμός (dry dock)



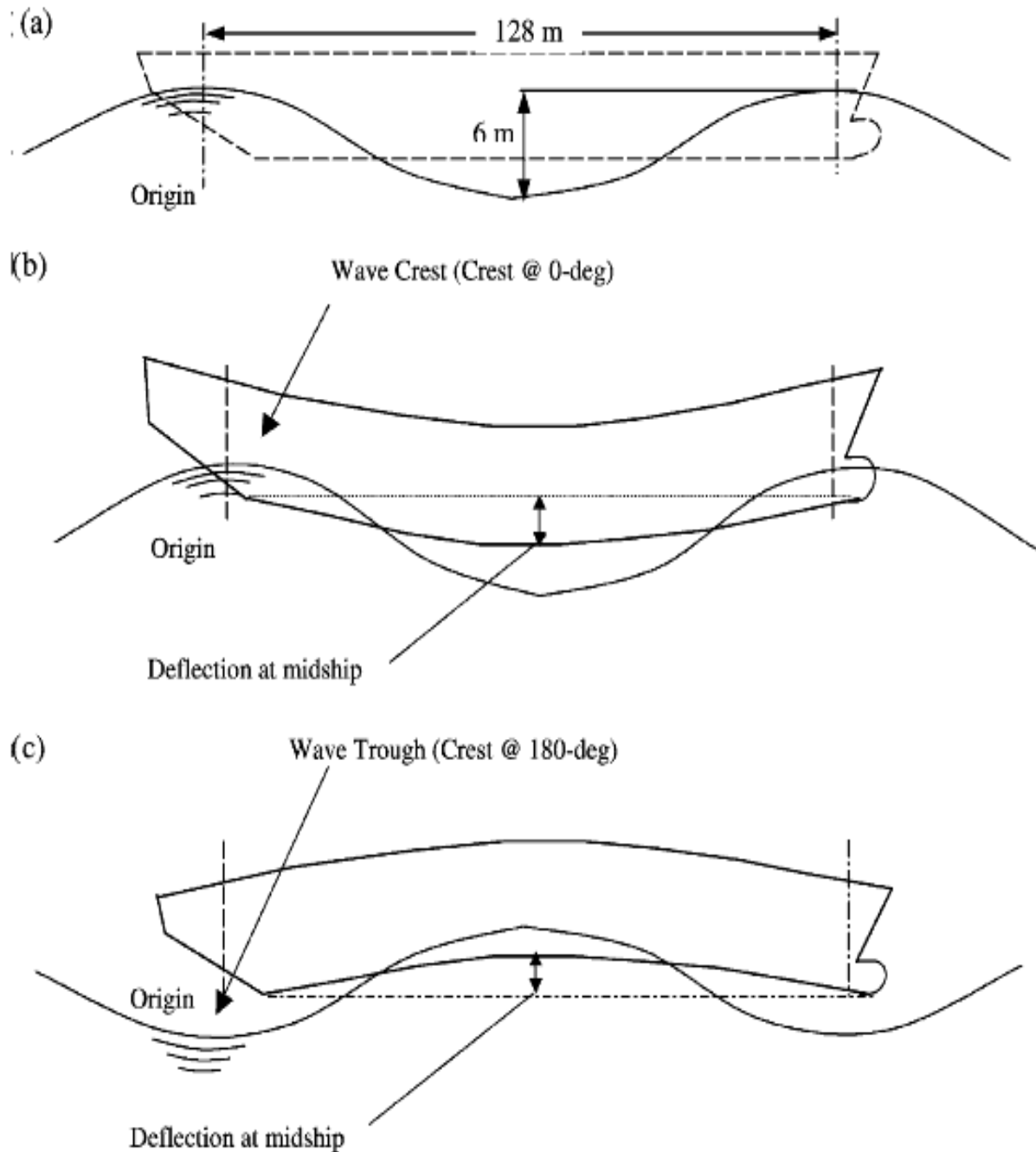
κατάσταση ερματισμού



κατάσταση πλήρους φορτίου

Επίδραση κυματισμού

Εκτός από την κατάσταση φόρτωσης, σημαντική είναι και η επίδραση του κυματισμού στις παραμορφώσεις της γάστρας του πλοίου κατά την υπηρεσία του πλοίου. Η πλεύση σε θάλασσα με κυματισμό επηρεάζει την κατανομή της άντωσης στη γάστρα του πλοίου δημιουργώντας επιπλέον παραμορφώσεις για δεδομένη κατάσταση φόρτωσης. Τυπικό παράδειγμα παρουσιάζεται στο Σχ18



Σχ. 20. Επίδραση κυματισμού στην ευθυγράμμιση:

- (α) Τροχοειδές κύμα και απαραμόρφωτο πλοίο
(β) Κατάσταση hogging (κορυφή κύματος στα άκρα του πλοίου), (γ) Κατάσταση sagging (κορυφή κύματος στο μέσο του πλοίου).

Βελτιστοποίηση ευθυγράμμισης

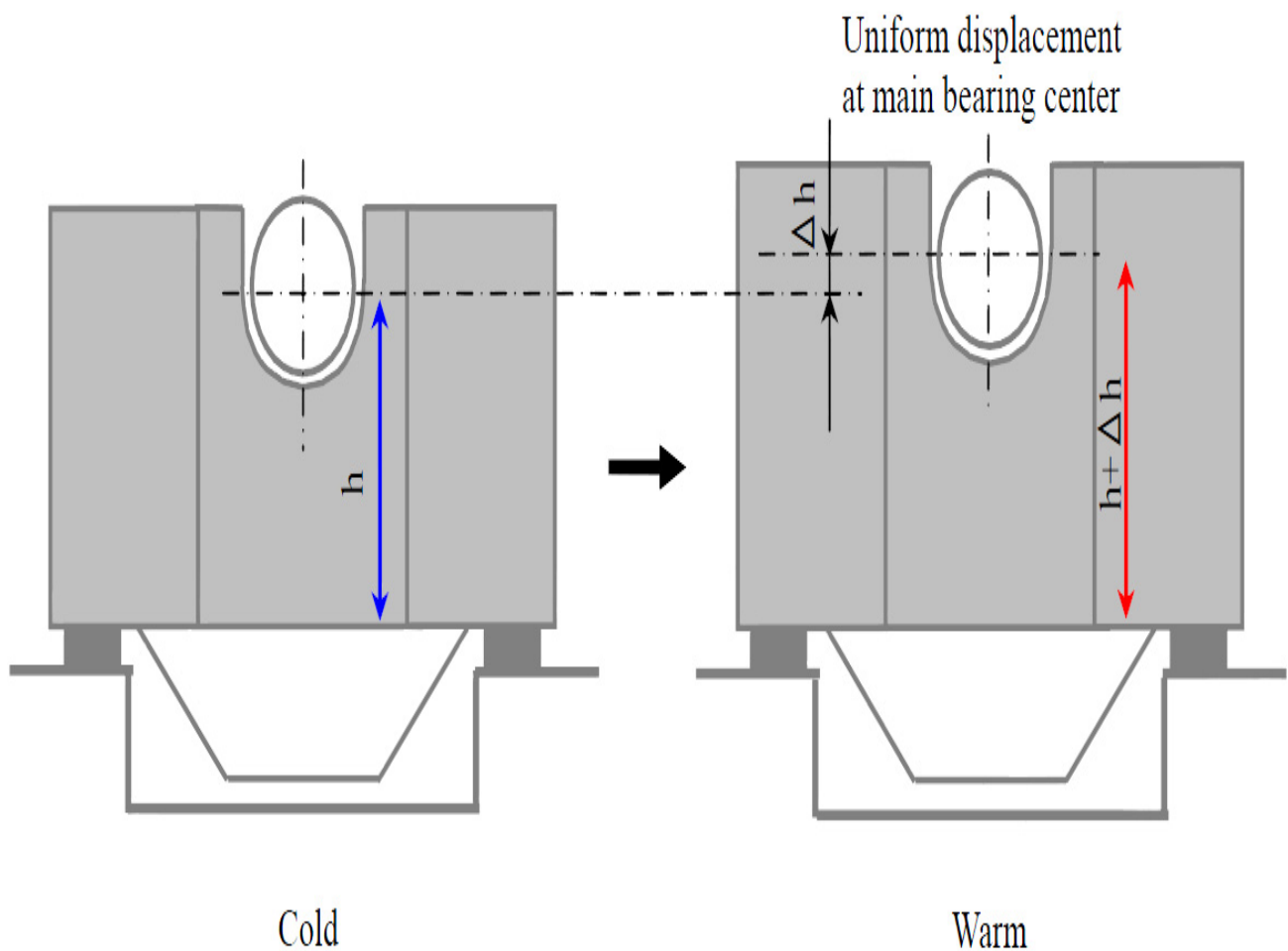
Η γνώση των παραμορφώσεων της γάστρας του σκάφους που οφείλεται είτε σε διαφορετικές συνθήκες φόρτωσης, είτε σε κυματισμό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τον σχεδιασμό του αξονικού συστήματος και την επιλογή της διαμήκους και κατακόρυφης θέσης των εδράνων, ώστε να προκύπτει ικανοποιητική ευθυγράμμιση σε μεγάλο εύρος καταστάσεων υπηρεσίας του πλοίου. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να περιοριστούν οι καμπτικές ταλαντώσεις του άξονα και οι στροβοκαμπτικές ταλαντώσεις, και να εξασφαλιστεί καλή λειτουργία των εδράνων (κυρίως του πρυμναίου εδράνου χράνης) η οποία αυξάνει τον χρόνο ζωής και μειώνει τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης των εδράνων.

Συνήθως, προς την κατεύθυνση αυτή ο αρχικός σχεδιασμός μπορεί να γίνει αναφορικά με κάποια κατάσταση μερικού φορτίου η οποία συνήθως αντιστοιχεί στη μέση κατάσταση λειτουργίας του σκάφους (κατάσταση αναφοράς). Στην κατάσταση αυτή επιλέγονται οι παράμετροι σχεδίασης του προβλήματος ώστε να υπάρχει βέλτιστη ευθυγράμμιση του αξονικού συστήματος. Στη συνέχεια, οι παράμετροι αυτές τροποποιούνται κατάλληλα ώστε να επιτυγχάνεται ικανοποιητική ευθυγράμμιση σε διαφορετικές καταστάσεις του πλοίου. Οι τιμές των παραμέτρων σχεδίασης προκύπτουν μέσω διαδικασίας παραμετρικής ανάλυσης.

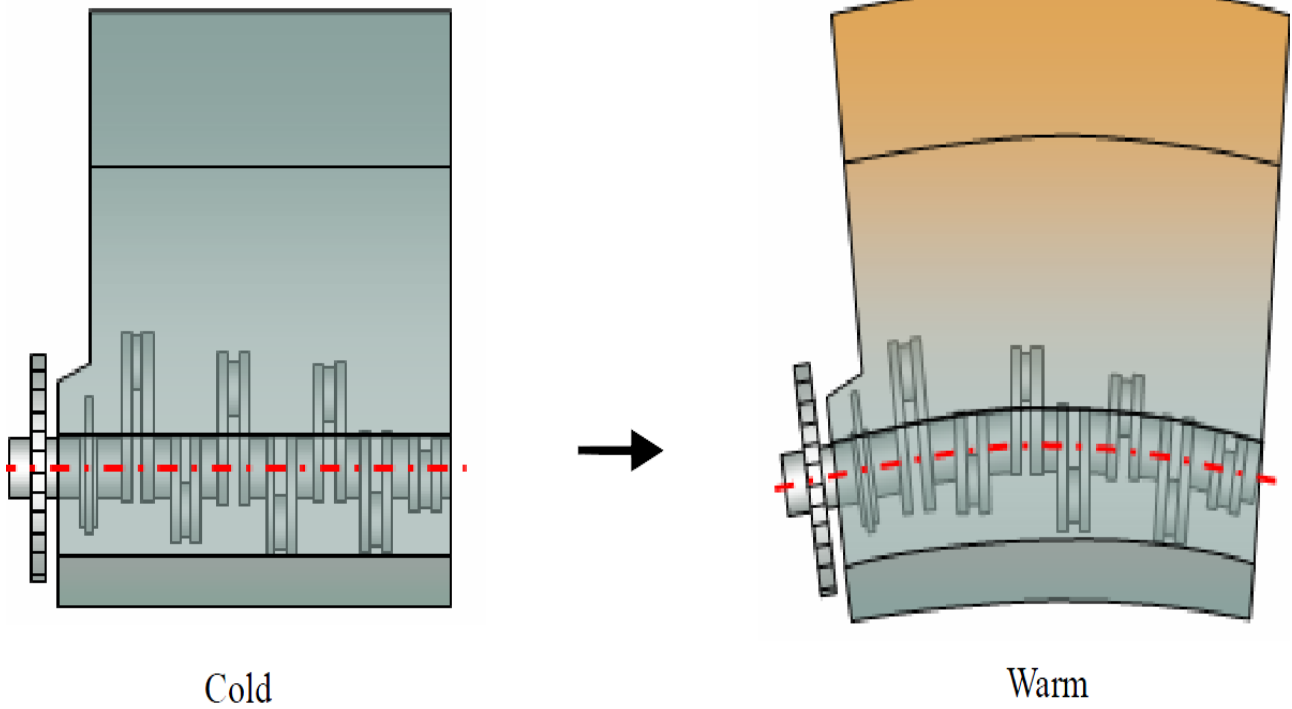
Το παραπάνω πρόβλημα μπορεί επίσης να διατυπωθεί ως πρόβλημα βελτιστοποίησης με σκοπό την εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων σχεδίασης ώστε να πληρούνται τα κριτήρια και οι περιορισμοί οι οποίοι τίθενται από τους σχετικούς κανονισμούς. Αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος βελτιστοποίησης μπορεί να είναι η ελαχιστοποίηση του φορτίου των εδράνων, η ελαχιστοποίηση των τάσεων του άξονα, η ελαχιστοποίηση του κόστους συντήρησης και λειτουργίας του συστήματος, κ.λπ. Περιορισμοί μπορεί να τεθούν σχετικά με τη διαμήκη θέση των εδράνων, τις μέγιστες επιτρεπτές τάσεις του άξονα, τις αντιδράσεις στα έδρανα του μειωτήρα, κ.λπ. Γενικά, στο τέλος της βελτιστοποίησης επιστρέφεται αριθμός υποψήφιων λύσεων, και η ανάλυσή τους οδηγεί στον τελικό σχεδιασμό

5.2. Επίδραση θερμικών διαστολών

Κατά τη λειτουργία της Κύριας Μηχανής του πλοίου, τα κατασκευαστικά στοιχεία της μηχανής κοντά στους θαλάμους καύσης έχουν γενικά υψηλότερη θερμοκρασία (της τάξεως των 80-90 οC) από στοιχεία στην περιοχή της βάσης της μηχανής (30-40 οC). Η θερμική διαστολή των κατασκευαστικών στοιχείων της μηχανής είναι εν γένει τρισδιάστατη, όμως μόνο η κατακόρυφη συνιστώσα επηρεάζει την ευθυγράμμιση του αξονικού συστήματος. Η συνολική μετατόπιση των εδράνων βάσεως της μηχανής, λόγω της διαστολής, μπορεί να υποτεθεί ότι αποτελεί τη σύνθεση δύο συνιστωσών, μίας παράλληλης κατακόρυφης μετατόπισης και μιας ανομοιόμορφης παραβολικής. Η παράλληλη μετατόπιση οφείλεται κυρίως στην αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της βάσης του κινητήρα. Η παραβολική μετατόπιση οφείλεται στη μεγαλύτερη διαστολή κατασκευαστικών τμημάτων της μηχανής κοντά στους θαλάμους καύσης (υψηλότερες θερμοκρασίες), έναντι της μικρότερης διαστολής κατασκευαστικών τμημάτων κοντά στη βάση της μηχανής (χαμηλότερες θερμοκρασίες). Κατά τους υπολογισμούς πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι μετατοπίσεις αυτές ώστε να προσδιορίζονται οι συνθήκες ευθυγράμμισης εν πλω.



Σχ.21. Παράλληλη κατακόρυφη μετατόπιση των κέντρων των εδράνων βάσεως λόγω θερμικής διαστολής της βάσης της Κύριας Μηχανής.



Σχ. 22. Ανομοιόμορφη μετατόπιση των κέντρων των εδράνων βάσεως λόγω θερμικής διαστολής της όλης κατασκευής της Κύριας Μηχανής.

6. Μοντελοποίηση αξονικού συστήματος

6.1. Απαραίτητα δεδομένα

Για την επιτυχή διεξαγωγή μελέτης ευθυγράμμισης του αξονικού συστήματος πλοίου, ο μελετητής θα πρέπει να έχει στη διάθεσή του στοιχεία σχετικά με τα επιμέρους τμήματα τα οποία το συνθέτουν. Τα στοιχεία αυτά περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

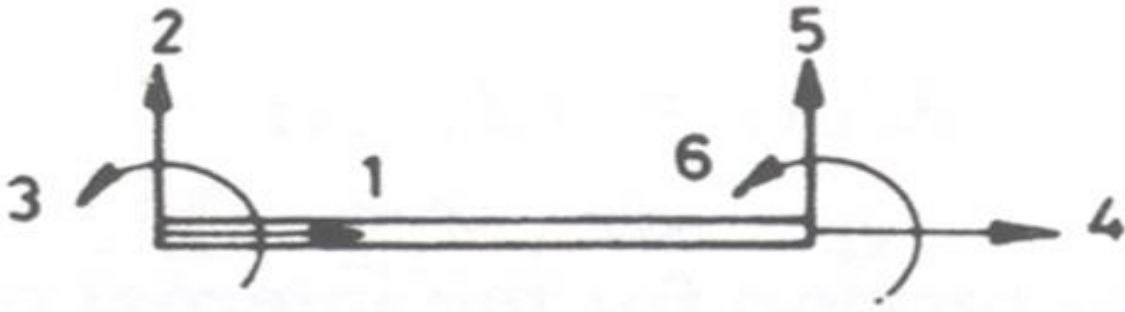
- Γενική διάταξη του αξονικού συστήματος
- Κατασκευαστικά σχέδια των αξόνων (μήκη και διαμέτροι)
- Μάζες και κέντρα βάρους των μαζών που σχετίζονται με το αξονικό σύστημα
- Υλικό κατασκευής και διαστάσεις του πρυμναίου εδράνου χοάνης
- Επιτρεπόμενες τιμές φορτίων για τα έδρανα χοάνης (ή υλικό και διαστάσεις των εδράνων)
- Επιτρεπόμενες τιμές φορτίων για τα έδρανα γραμμής (ή υλικά και διαστάσεις των εδράνων)
- Θερμοκρασιακή αύξηση στην περιοχή των εδράνων γραμμής
- Βάρος έλικας
- Ποσοστό βύθισης της έλικας, βάρος της έλικας στο νερό
- Ώση έλικας και εκκεντρότητα
- Διαστάσεις στροφάλων και επιτρεπόμενες φορτίσεις εδράνων βάσης
- Βάρος σφονδύλου
- Μετατόπιση εδράνων βάσης λόγω θερμικής διαστολής κατά τη λειτουργία

6.2. Πρόγραμμα ανάλυσης ευθυγράμμισης αξονικού συστήματος

Το διατιθέμενο πρόγραμμα ανάλυσης ευθυγράμμισης αξονικού συστήματος παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού:

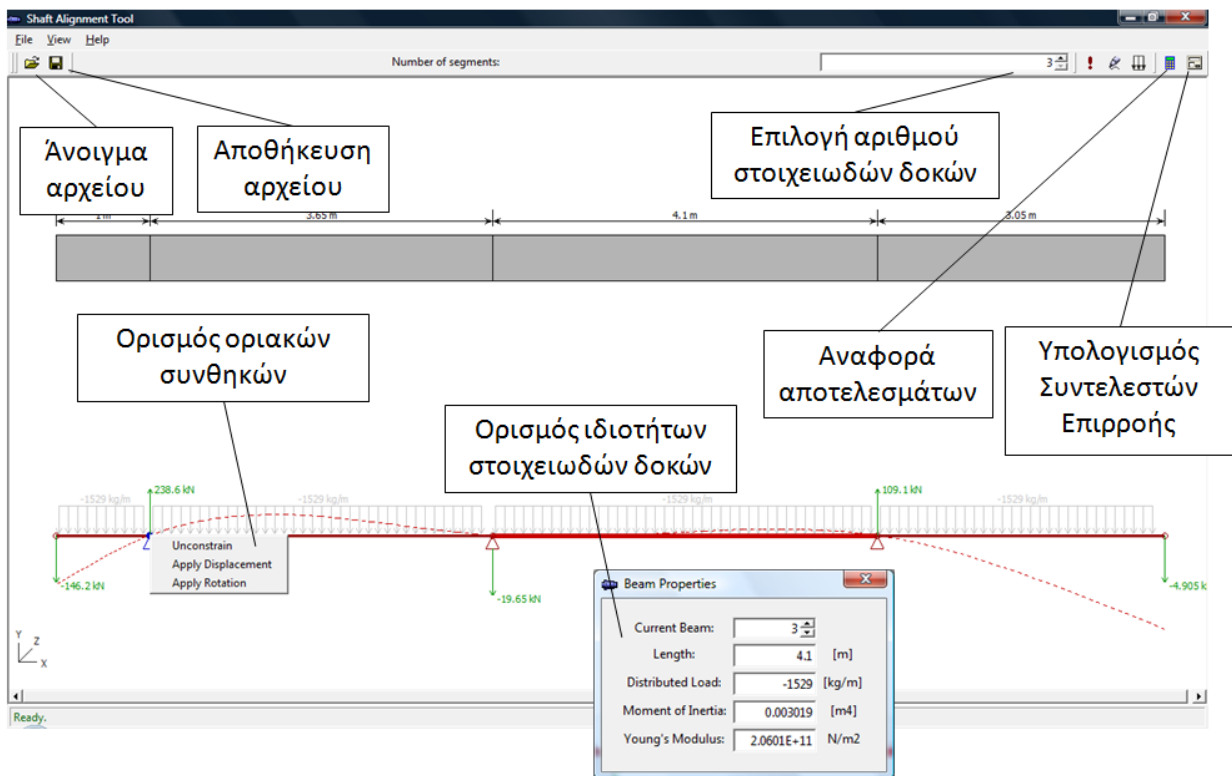
- (α) Αντιδράσεων στις θέσεις των εδράνων
- (β) Ελαστικής γραμμής
- (γ) Κλίσεων του άξονα στα σημεία στήριξης
- (δ) Συντελεστών επιρροής

Οι υπολογισμοί του προγράμματος βασίζονται στη μέθοδο της μητρικής ανάλυσης. Το αξονικό σύστημα μοντελοποιείται ως σύνθεση αριθμού στοιχειωδών τμημάτων. Το κάθε τμήμα μοντελοποιείται ως επίπεδη στοιχειώδης δοκός με δύο κόμβους και 3 βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο (Σχ. 23), δηλαδή δύο μετατοπίσεις και μία περιστροφή (τρεις γενικευμένες μετατοπίσεις). Η κάθε στοιχειώδης δοκός θεωρείται ομογενής ως προς το υλικό (υλικό με μέτρο ελαστικότητας E), και σταθερής διατομής, με εμβαδό A και ροπή αδράνειας I . Το μήκος της στοιχειώδους δοκού είναι L . Εξωτερικές φορτίσεις της στοιχειώδους δοκού αποτελούν οι δύο δυνάμεις (αξονικές και εγκάρσιες) κατά τους δύο άξονες και η καμπτική ροπή σε κάθε κόμβο.



Σχ. 23. Στοιχειώδης δοκός και βαθμοί ελευθερίας

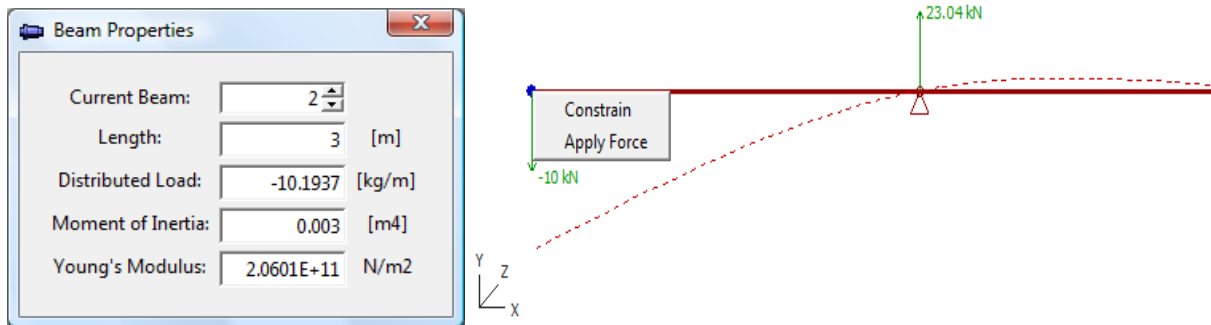
Η βασική οθόνη του προγράμματος, το οποίο υλοποιεί τη μέθοδο μητρικής ανάλυσης, παρουσιάζεται στο (Σχ. 24.) Ο χρήστης επιλέγει τον αριθμό των στοιχειωδών δοκών του προβλήματος, τις ιδιότητες κάθε δοκού και τις οριακές συνθήκες κάθε κόμβου (θέσεις στήριξης, προδιαγραφή κατακόρυφης μετατόπισης ή/και περιστροφής). Η επίλυση γίνεται αυτόματα μετά από κάθε αλλαγή των δεδομένων, και υπάρχει δυνατότητα εξαγωγής των αποτελεσμάτων και υπολογισμού των συντελεστών επιρροής του συστήματος.



Σχ. 24. Η βασική οθόνη του προγράμματος ανάλυσης ευθυγράμμισης αξονικού συστήματος.

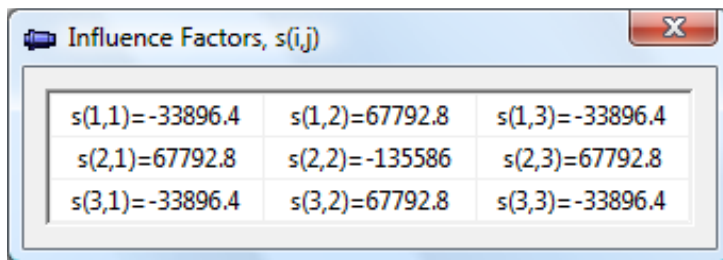
Η διαδικασία μοντελοποίησης περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

(α) Προσδιορισμός ιδιοτήτων στοιχειωδών δοκών (μήκος, κατανεμημένο φορτίο, ροπή αδράνειας της διατομής, μέτρο ελαστικότητας του υλικού). Προσδιορισμός κόμβων στήριξης, κόμβων άσκησης εξωτερικών δυνάμεων (συγκεντρωμένο βάρος έλικας, άλλα βάρη), (Σχ. 25.)



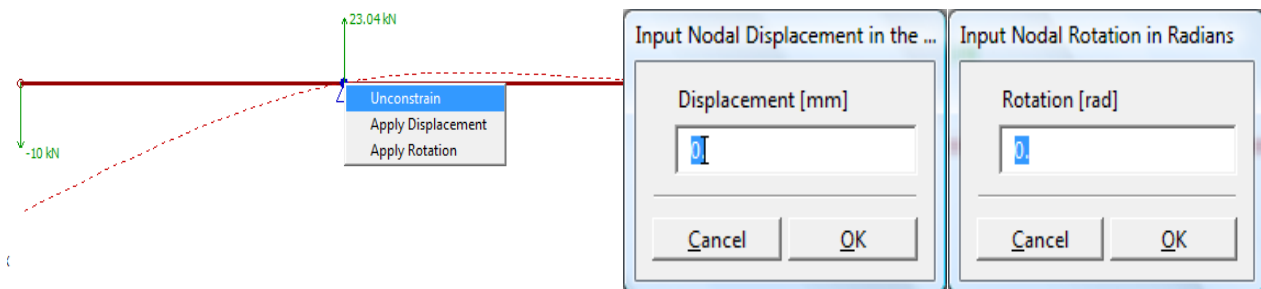
Σχ. 25. Εισαγωγή ιδιοτήτων στοιχειωδών δοκών. Επιβολή δυνάμεων, εισαγωγή στηρίξεων.

(β) Υπολογισμός συντελεστών επιρροής, Σχ. 26.



Σχ. 26. Υπολογισμός συντελεστών επιρροής

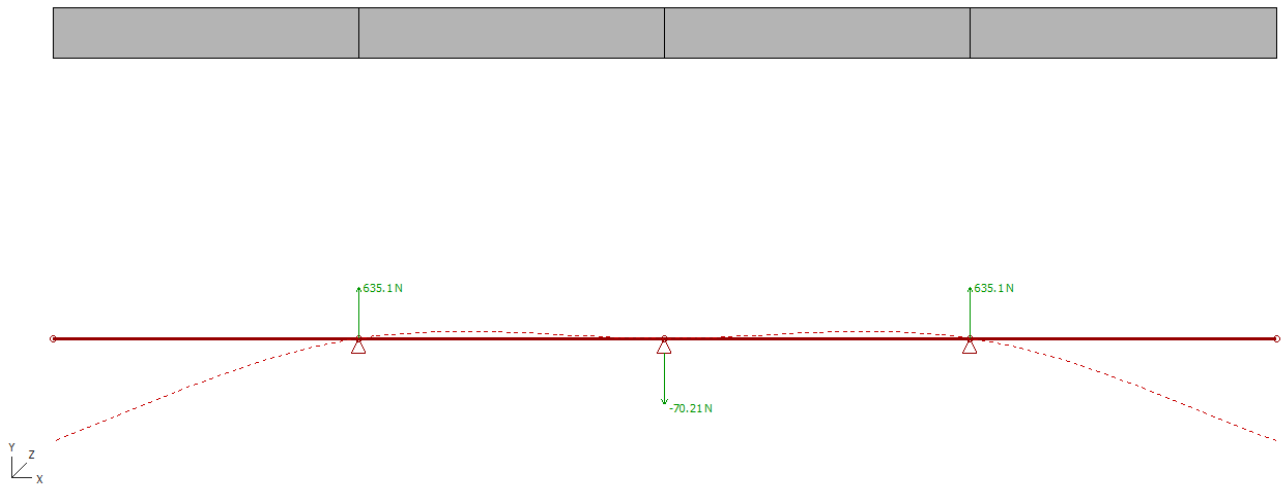
(γ) Προσδιορισμός κατάλληλων κατακόρυφων μετατοπίσεων ή/και περιστροφών στα σημεία στήριξης, Σχ. 27.



Σχ. 27. Επιβολή κατακόρυφων μετατοπίσεων ή/και περιστροφών στα σημεία στήριξης

(δ) Επαναληπτική διαδικασία έως ότου επιτευχθούν οι στόχοι της ευθυγράμμισης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται γραφικά στην οθόνη και σε μορφή report, Σχ. 28.

α)



β)

Model Data						
Nodes						
Node No	Coord. X (m)	Coord. Y (m)	Coord. Z (m)			
1	0	0	0			
2	3	0	0			
3	6	0	0			
4	9	0	0			
5	12	0	0			
Beam Members						
Member No	Length (m)	Distr. Weight (kg/m)	Total Weight (kg)	Moment of Inertia (m4)	Young's Modulus (N/m2)	
1	3	-100	-300	0.003	2.06E+11	
2	3	-100	-300	0.003	2.06E+11	
3	3	-100	-300	0.003	2.06E+11	
4	3	-100	-300	0.003	2.06E+11	
Forces						
Node No	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Mx (Nm)	My (Nm)	Mz (Nm)
1	0	-1.17E-12	0	0	0	9.38E-13
2	0	635.105	0	0	0	3.41E-13
3	0	-70.2098	0	0	0	1.71E-13
4	0	635.105	0	0	0	-3.41E-13
5	0	-5.68E-14	0	0	0	-2.27E-13
Displacements						
Node No	Ux (m)	Uy (m)	Uz (m)	Rx (deg)	Ry (deg)	Rz (deg)
1	0	-3.08E-06	0	0	0	1.20E-06
2	0	0	0	0	0	4.73E-07
3	0	0	0	0	0	-1.48E-21
4	0	0	0	0	0	-4.73E-07
5	0	-3.08E-06	0	0	0	-1.20E-06

Σχ. 28. Αποτελέσματα επίλυσης υπερστατικού φορέα: (α) γραφική απεικόνιση και (β) report.

7. Βιβλιογραφία

1. American Bureau of Shipping, "Guidance notes on Propulsion Shafting Alignment", April 2004 (Updated February 2014)
2. Lech Murawski. Identification of shaft line alignment with insufficient data availability pp. 35-42
3. Davor Šverko. shaft alignment optimization with genetic algorithms
4. Journal of Marine Science and Technology, Vol. 21, No. 4, pp. 400-409
5. analysis of ship shaft line coupling bolts failure
6. journal of a Korean society of marine engineering pp.785-794 a study on hull deflection and shaft alignment interaction on vlcc
7. lech murawski. marine structures (2005) shaft line alignment analysis talking ships construction flexibility and deformation into consideration
8. marine technology 1980 pp8-15 shaft alignment methods with strain gages and load cells

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	2
2. Βασικά Μέρη Αξονικού Συστήματος	4
3. Ευθυγράμμιση αξονικού συστήματος	6
3.1. Το πρόβλημα της ευθυγράμμισης	6
3.2. Βασικοί Υπολογισμοί Μηχανικής	7
4. Διαδικασία εφαρμογής σχεδίου ευθυγράμμισης και τεχνικά μέσα	9
4.1. Ορισμός γραμμής αναφοράς	9
4.2. Εφαρμογή κλίσης στο πρυμαίο έδρανο χοάνης	10
4.3. Αρχική απευθυγράμμιση της κύριας μηχανής	11
4.4. Διαδικασία πτώσης και ανοίγματος φλαντζών (sag and gap)	11
4.5. Μέτρηση αντιδράσεων των εδράνων	13
4.6. Παραμορφώσεις στροφάλων Κύριας Μηχανής	16
4.7. κακή εφαρμογή οδοντωτών τροχών λόγω κακής ευθυγράμμισης.....	17
5. Ειδικά θέματα	18
5.1. Επίδραση παραμορφώσεων της γάστρας	18
5.2. Επίδραση θερμικών διαστολών	22
6. Μοντελοποίηση αξονικού συστήματος	24
6.1. Απαραίτητα δεδομένα	24
6.2. Πρόγραμμα ανάλυσης ευθυγράμμισης αξονικού συστήματος	24
7. Βιβλιογραφία	28

