

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ**

**ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**



**ΘΕΜΑ : Τρόποι Μείωσης Αντίστασης Τριβής σε Εμπορικά Πλοία**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: Σιγάλας Παναγιώτης**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ**

**ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : Γκοτζαμάνης Γιώργος**

**ΝΕΑ ΜΗΧΑΝΙΩΝΑ**

**2015**

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ**

**ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΜΑ : Τρόποι Μείωσης Αντίστασης Τριβής σε Εμπορικά  
Πλοία**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ : Σιγάλας Παναγιώτης**

**ΑΜ : 4815**

**ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ :**

Βεβαιώνεται η ολοκλήρωση της παραπάνω πτυχιακής εργασίας

Ο καθηγητής

## Περίληψη

Η μείωση αντίστασης τριβής στα εμπορικά πλοία εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες, στους οποίους συγκαταλέγεται και το σχήμα των πλοίων. Σε γενικές γραμμές επισημαίνεται ότι τα πλοία έχουν ένα ιδιόμορφο – μη κανονικό σχήμα που δεν αντιστοιχεί στα γνωστά γεωμετρικά σχήματα. Η παρούσα εργασία μελετά τα εμπορικά πλοία, δηλαδή τα πλοία που ο πλοιοκτήτης τους τα χρησιμοποιεί για εμπορικές πράξεις, όπως μεταφορές, ναυλώσεις και εκτέλεση εργασιών.

Κατά την διαδικασία κίνησης του πλοίου, δέχεται πληθώρα δυνάμεων, όπως η αντίσταση του αέρα και αντίσταση που φέρει το νερό στο οποίο κινείται το πλοίο, το οποίο μάλιστα έχει δικά του χαρακτηριστικά.

Ουσιαστικά, η μείωση της τριβής μπορεί να επιτευχθεί μέσω κατάλληλης κατασκευής των πλοίων. Ακόμη, η ελάττωση του μήκους συμβάλλει στην μείωση των καμπτικών ροπών, γεγονός που συμβάλλει στην μείωση της απαιτούμενης ροπής αντίστασης με αποτέλεσμα τη μείωση του βάρους κατασκευής. Επισημαίνεται ότι η μείωση του βάρους κατασκευής συμβάλλει αφενός στη μείωση του κόστους κατασκευής και αφετέρου στην αύξηση του ωφέλιμου φορτίου. Υπό αυτήν την έννοια, παράγοντες κατασκευαστικοί και λειτουργικοί μπορούν να συμβάλλουν στη μείωση αντίστασης τριβής στα εμπορικά πλοία.

## **Abstract**

The reduction in the resistance to cargo ships depends on various factors, including the shape of ships. Generally, it should be noted that ships have a peculiar - irregular shape that does not correspond to known geometric shapes. This study has as an objective to investigate commercial vessels, in other words, the vessels that the owner uses for trade, such as transport, chartering and working.

During the motion process of the ship, the latter one receives a lot of forces, such as wind resistance and the resistance of the water in which the ship is moving, which has its own characteristics.

In essence, the reduction of friction can be achieved through the appropriate construction of ships. Moreover, decreasing the length helps to reduce the bending moments, which contributes to the reduction of the required torque resistance, and therefore, it reduces the weight construction. It must also be noted that reducing the construction weight both contributes to the reduction of the manufacturing cost and also increases the payload. In this sense, constructional and operational factors may help reduce frictional resistance to cargo ships.

## **Εισαγωγή**

Θα αναφέρουμε τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πλοίων, τις αντιστάσεις που αναπτύσσονται σε αυτά καθώς κινούνται στο νερό, τους συντελεστές αντίστασης και το ρόλο που παίζουν αυτοί, την εμφάνιση της σπηλαίωσης καθώς και τρόπους μείωσης της αντίστασης τριβής.

# Κεφαλαίο 1

## 1.1. Ορολογία, ονοματολογία και γενική περιγραφή πλοίου-ναυπηγικές

**γραμμές.** [Ευστάθεια μεταφορά φορτίων Γρηγορόπουλος Γρηγόριος, Φωκάς Δημήτριος, Βούλγαρης Στυλιανός]

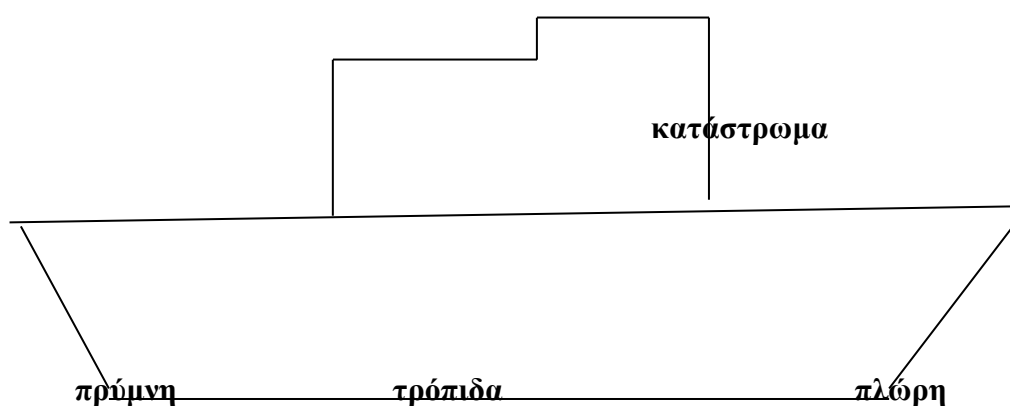
Στο τμήμα αυτό της εργασίας θα αναπτύξουμε την ορολογία και ονοματολογία των βασικών στοιχείων που περιγράφουν ένα πλοίο. Τα στοιχεία αυτά σχετίζονται τόσο με την γεωμετρία του γάστρας, του τμήματος δηλαδή του πλοίου που έρχεται σε άμεση επαφή με το νερό, όσο και με τα χαρακτηριστικά των κατασκευών και συστημάτων μέσα και πάνω από αυτήν, που συντελούν στην λειτουργία του και στην εκπλήρωση της αποστολής του.

Τα πλοία έχουν γενικά ένα ιδιόμορφο μη-κανονικό σχήμα που δεν αντιστοιχεί στα γνωστά γεωμετρικά σχήματα (κύβος, πυραμίδα, πρίσμα). Έτσι για την περιγραφή της εξωτερικής επιφάνειας της γάστρας τους πρέπει να κατασκευαστεί το σχέδιο ναυπηγικών γραμμών.

## 1.2 Γεωμετρία του πλοίου-ορισμοί..

[Ευστάθεια μεταφορά φορτίων Γρηγορόπουλος Γρηγόριος, Φωκάς Δημήτριος, Βούλγαρης Στυλιανός]

Αν παρατηρήσουμε πλευρικά ένα πλοίο θα παρατηρήσουμε τα εξής κύρια μέρη στην εικόνα 1.1



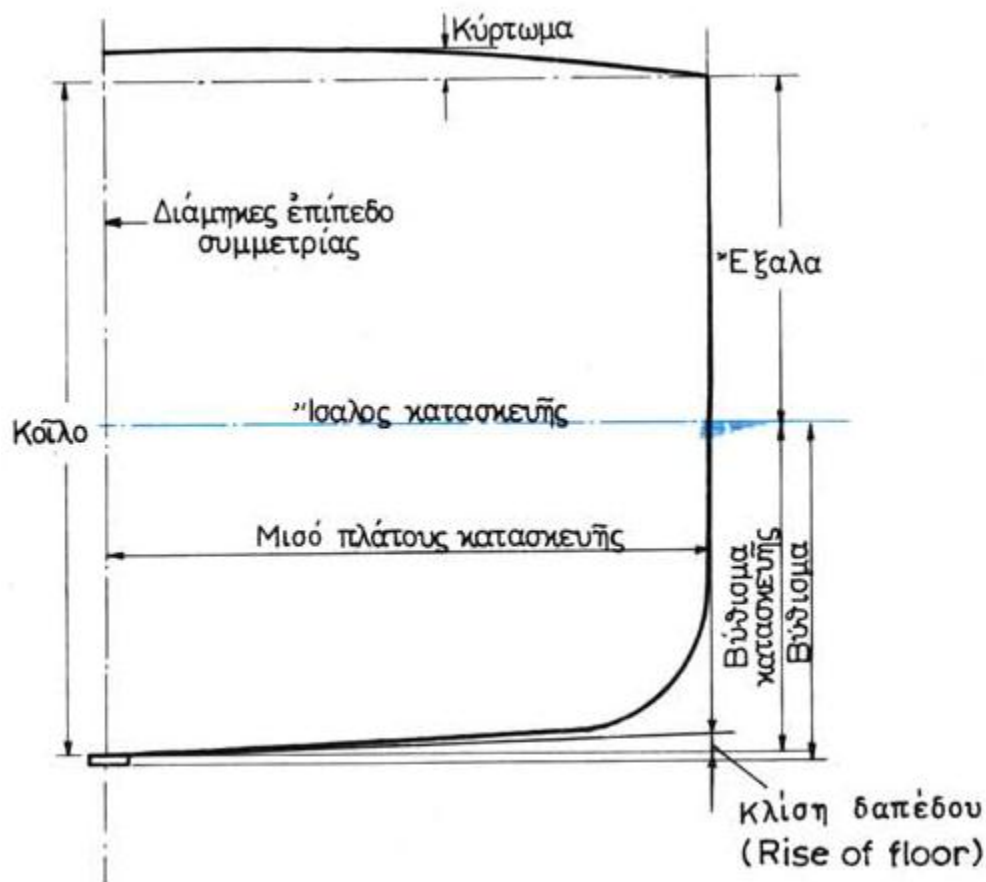
Εικόνα 1.1

- Το κοίλο τμήμα του πλοίου που έρχεται σε επαφή με το νερό και είναι υδατοστεγές. Το σώμα αυτό λέγεται γάστρα (hull).
- Το πάνω μέρος της γάστρας που τη σκεπάζει στεγανά και καλείται κύριο κατάστρωμα (main deck). Κάτω από το συνεχές κατάστρωμα ένα πλοίο μπορεί να διαθέτει και άλλα καταστρώματα.
- Το μπροστινό τμήμα της γάστρας χαρακτηρίζεται ως πλώρη και το πίσω μέρος ως πρύμη.
- Το κάτω τμήμα της γάστρας αποτελεί τον πυθμένα. Το κεντρικό τμήμα του πυθμένα που είναι ενισχυμένο και αποτελεί το πρώτο τμήμα που κατασκευάζεται κατά την ναυπήγηση ενός πλοίου, χαρακτηρίζεται ως τρόπιδα ή καρίνα.(keel).
- Πάνω από το κατάστρωμα το πλοίο διαθέτει διάφορους χρήσιμους χώρους τις λεγόμενες υπερκατασκευές. Ειδικότερα η κατασκευή στην πλώρη ονομάζεται πρόστεγο ενώ στην πρύμη επίστεγο.

Επιπλέον αν παρατηρήσουμε τη μέση εγκάρσια τομή του πλοίου

- Τον ίσαλο πλεύσης που αντιστοιχεί στην κατακόρυφη θέση όπου η επιφάνεια της θάλασσας τέμνει την γάστρα. Η γραμμή αυτή καλείται και ίσαλος σχεδίασης, εφόσον ο σχεδιαστής θεωρεί ότι το πλοίο θα ισορροπεί σε αυτήν την θέση.
- Το μέσο βύθισμα του πλοίου που προσδιορίζει το ύψος της γάστρας που είναι βυθισμένο στο νερό. Το μέρος του πλοίου που είναι μέσα στο νερό χαρακτηρίζεται ως υφάλα.
- Το ύψος εξάλων που αντιστοιχεί στο ύψος της γάστρας που είναι έξω από το νερό. Το συνολικό ύψος της γάστρας χαρακτηρίζεται ως κοίλο.
- Δεδομένου ότι τα πλοία είναι συμμετρικά κατά την εγκάρσια διεύθυνση, συνήθως οι εγκάρσιες τομές σχεδιάζονται κατά το μισό, δεξιά ή αριστερά, του διαμήκους επιπέδου συμμετρίας τους.

- Όλες οι κατακόρυφες διαστάσεις αναφέρονται στο οριζόντιο επίπεδο που περνάει από την τρόπιδα και καλείται βασικό επίπεδο αναφοράς



Εικόνα 1.2: Διαστάσεις Πλοίου

Όπως φαίνεται στην εικόνα 1.2, το κατάστρωμα δεν είναι οριζόντιο αλλά έχει μια καμπυλότητα προς τα πάνω που ονομάζεται κυρτότητα καταστρώματος. Η διαμόρφωση αυτή επιτρέπει στο νερό που πέφτει στο κατάστρωμα να αποχετεύεται από τα πλευρά.

Αντίστοιχη καμπυλότητα με τα κοίλα όμως προς τα πάνω, εμφανίζει και κατά το διαμήκες (σχήμα α). Αυτή η διαμόρφωση που ονομάζεται σιμότητα, αυξάνει το ύψος εξάλων στην περιοχή της πρόρας και περιορίζει την διαβροχή του καταστρώματος. Επιπλέον χάρη στην σιμότητα κάθε παρατηρητής που παρακολουθεί ένα πλοίο από μακριά διακρίνει ένα οριζόντιο κατάστρωμα και όχι ένα κατάστρωμα με τα κυρτά προς τα πάνω λόγω οπτικής απάτης.



Από τα διάφορα γεωμετρικά στοιχεία ενός πλοίου ξεχωρίζουμε τις κύριες διαστάσεις του που είναι: Το μήκος, το πλάτος, το βύθισμα. Υπάρχουν διάφοροι ορισμοί και περιγραφές των τριών αυτών ορισμών. Έτσι ορίζουμε το μήκος στην ίσαλο πλευσης, το ολικό μήκος καθώς και το συνολικό μήκος μεταξύ της πρωραίας καθέτου και της αντίστοιχης πρυμναίας.

Το μήκος αυτό ονομάζεται μήκος μεταξύ καθέτων του πλοίου. Ομοίως ορίζουμε το μέγιστο πλάτος του πλοίου και το πλάτος ισάλου. Τέλος έχουμε το μέσο βύθισμα στην θέση της μέσης τομής δηλ. στην μέση θέση ανάμεσα στην πρωραία και στην πρυμναία κάθετο, το πρωραίο βύθισμα στην πρωραία κάθετο και το πρυμναίο βύθισμα στην πρυμναία κάθετο.

Η διαφορά του πρωραίου από το πρυμναίο βύθισμα καλείται διαγωγή του πλοίου. Χαρακτηρίζεται ως εμπρύμνη ή εμπρώρη ανάλογα με το αν υπερτερεί το πρωραίο ή το πρυμναίο βύθισμα.

### **1.3. Ναυπηγικές γραμμές.** [Ευστάθεια μεταφορά φορτίων. Γρηγορόπουλος Γρηγόριος, Φωκάς Δημήτριος, Βούλαρης Στυλιανός]

Η μορφή της γάστρας ενός πλοίου αποτελεί βασικό δεδομένο για την σχεδίαση και την λειτουργία του, έτσι η ευστάθεια του, η αντίσταση του η συμπεριφορά του σε κυματισμούς καθώς και άλλες ιδιότητες του συνδέονται άμεσα με την μορφή της γάστρας του.

Επιπλέον όπως αναφέρθηκε η μορφή της γάστρας δεν αντιστοιχεί σε κάποιο κανονικό γεωμετρικό σχήμα επομένως η περιγραφή της δεν μπορεί να γίνει με τη βοήθεια ενός ή περισσότερων διαστάσεων. Για την απεικόνιση της μορφής της γάστρας απαιτείται η χάραξη του σχεδίου ναυπηγικών γραμμών. Οι γραμμές αυτές αποτελούν διάφορες τομές της επιφάνειας της γάστρας με τα επίπεδα του.

Έτσι προκύπτουν τα εξής επιμέρους σχέδια.

Σχέδιο διαμήκων τομών το οποίο αντιστοιχεί στην πλάγια όψη,

Σχέδιο ισάλων το οποίο αντιστοιχεί στην κάτωψη,

Σχέδιο εγκαρσίων τομών που αντιστοιχεί στην πρόοψη.

Για την χάραξη τους απαιτούνται τα εξής δεδομένα:

Οι κύριες διαστάσεις του πλοίου, πίνακας συντεταγμένων ή ημιπλατών διαφόρων τομών της επιφάνειας που ονομάζονται σταθμοί ή θεωρητικοί νομείς και στοιχεία περιγραφής των περιγραμμάτων της πλώρας, της πρύμνης, της τρόπιδας και των περιγραμμάτων.

Δεδομένου ότι η εξωτερική επιφάνεια της γάστρας είναι μια ομαλή επιφάνεια το ίδιο ισχύει και για την τομή της με οποιοδήποτε επίπεδο. Προς τούτο χρησιμοποιούνται λεπτές λωρίδες από ξύλο ή συνθετικό υλικό με επαρκή αντοχή και μεγάλη ελαστικότητα που λέγονται τερίζια. Τα τερίζια στερεώνονται επάνω στο χαρτί σχεδίασης με τη βοήθεια ειδικών χυτοσιδηρών ή μολύβδινων βαριδίων.

Μετά την χάραξη τους οι ναυπηγικές γραμμές ελέγχονται για την ομαλότητα τους και την συμβατότητα στις τρεις όψεις του σχεδίου Ναυπηγικών γραμμών.

## Κεφάλαιο 2

### Κατηγορίες πλοίων

Ανάλογα με το σκοπό τους τα πλοία χωρίζονται σε 3 κατηγορίες

A) Εμπορικά πλοία που ο πλοιοκτήτης τους τα χρησιμοποιεί για εμπορικές πράξεις όπως μεταφορές, ναυλώσεις, εκτέλεση εργασιών κτλ.

B). αναψυχής πλοία επιβατηγά πλοία.

Γ) Πολεμικά πλοία

Ανάλογα με το είδος της μεταφοράς ή εργασίας τα πλοία χωρίζονται σε 4 κατηγορίες.

A) φορτηγά πλοία

B) Επιβατηγά πλοία

Γ) Πλοία ειδικού προορισμού.

Δ) Βοηθητικά πλοία.

Παρακάτω έχουμε μερικές φωτογραφίες των εμπορικών πλοίων που είναι το αντικείμενο μελέτης μας.



Εικόνα 2.1

Δεξαμενόπλοιο ειδικό στην μεταφορά χημικών υγρών καυσίμων



Εικόνα 2.2

Πλοίο μεταφοράς υγροποιημένων αερίων LNG.



Εικόνα 2.3

Πλοίο μεταφοράς χύμα φορτίων.

## Κεφάλαιο 3

### Ανάπτυξη τριβής στα εμπορικά πλοία

#### 3.1 Βασικές Έννοιες

Θα αναφερθούμε σε μερικές βασικές έννοιες που αναπτύσσονται στην κίνηση των πλοίων.

Πρόωση πλοίου, η ισχύς που απαιτείται για την πρόωση ενός πλοίου στο νερό εξαρτάται από την αντίσταση που προβάλλουν το νερό και ο αέρας, την απόδοση του προωστήριου που έχει επιλεγεί και την αλληλεπίδραση μεταξύ τους.

Επειδή υπάρχει αλληλεπίδραση είναι απαραίτητο να θεωρήσουμε την σχεδίαση της γάστρας και της προωστήριας διάταξης ως ένα ολοκληρωμένο σύστημα.

Όταν η επιφάνεια είναι ταραγμένη λόγω κυματισμών το πρόβλημα γίνεται πιο περίπλοκο λόγω της αυξημένης αντίστασης και του γεγονότος ότι το προωστήριο σύστημα δουλεύει σε αντίξοες συνθήκες.

Η αναφορά μας γίνεται για ήρεμο νερό και επικεντρώνεται σε μονόγαστρα πλοία εκτοπίσματος. Σε πολύγαστρα πλοία εκτοπίσματος θα υπάρχει επίδραση τόσο στην αντίσταση τριβής όσο και στην αντίσταση κυματισμού λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο γαστρών.

Για τα εμπορικά πλοία η ταχύτητα που απαιτείται υπαγορεύεται από τις συνθήκες υπηρεσίας. Ένα τέτοιο πλοίο μπορεί να ταξιδεύει σε συγκεκριμένα δρομολόγια για αυτό ο σχεδιαστής πρέπει να προβλέψει με ακρίβεια την ταχύτητα που θα επιτύχει η νέα σχεδίαση.

Το κόστος των καυσίμων είναι ένα σημαντικό μέρος του κόστους λειτουργίας οποιουδήποτε πλοίου και έτσι ο σχεδιαστής θα προσπαθήσει να ελαχιστοποιήσει την ισχύ που απαιτείται για την επίτευξη της ταχύτητας υπηρεσίας.

Σε όλα τα πλοία η απαιτούμενη ισχύς πρέπει να μειωθεί στην ελάχιστη σύμφωνα με τις άλλες σχεδιαστικές απαιτήσεις, ώστε να ελαχιστοποιηθούν το βάρος το κόστος και ο απαιτούμενος όγκος για τα μηχανήματα και το καύσιμο.

Κατά συνέπεια μια ακριβής γνώση των χαρακτηριστικών πρόωσης του πλοίου έχει μεγάλη σημασία και δικαιολογεί αρκετή προσπάθεια για την επίτευξη του στόχου αυτού. Για την πρόβλεψη της αντίστασης του πλοίου ο σχεδιαστής μπορεί να χρησιμοποιήσει πληροφορίες από πλοία που έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί από θεωρητικές αναλύσεις ή πειράματα προτύπων.

Γενικά τα στοιχεία που προκύπτουν από μετρήσεις σε φυσική κλίμακα είναι περιορισμένης κλίμακας λόγω της συνεχούς εξέλιξης των πλοίων.

Αναφέρουμε δύο παραδείγματα η εισαγωγή των ηλεκτροσυγκολλήσεων οδήγησε σε ομαλότερες γάστρες και το μέγεθος των πλοίων με το πέρασμα των χρόνων έχει αυξηθεί.

Επίσης ένα νέο πλοίο συχνά απαιτείται να ταξιδεύει με μεγαλύτερη ταχύτητα οπότε πληροφορίες από υπάρχοντα πλοία δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα για τον υπολογισμό της μέγιστης ισχύος. Η θεωρητική ανάλυση έχει χρησιμοποιηθεί ως βοήθημα στις πιο πρακτικές μεθόδους και συνεχίζει να εξελίσσεται.

Δεν είναι όμως ακόμα επαρκής ώστε να δίνει απαντήσεις από μόνη της. Η κύρια συμβολή της είναι να καθοδηγεί τον σχεδιαστή μοντέλων και να του δίνει ένα πιο ορθολογικό και επιστημονικό υπόβαθρο στην εργασία του να προτείνει ωφέλιμες κατευθύνσεις έρευνας και να υποδεικνύει τη σχετική σπουδαιότητα των διαφόρων παραμέτρων της σχεδίασης.

Το κύριο εργαλείο του σχεδιαστή ήταν να παραμείνει το μοντέλο όπου η θεωρητική ανάλυση να λειτουργεί ως οδηγός και τα στοιχεία από τα υπάρχοντα πλοία να παρέχουν το απαραίτητο έλεγχο στις προβλέψεις από τα μοντέλα. Τα πειράματα στα μοντέλα είναι σχετικά φθηνά και τα αποτελέσματα μπορεί να ληφθούν σχετικά γρήγορα για ένα εύρος αλλαγών ώστε να μπορεί ο σχεδιαστής να βελτιστοποιήσει την σχεδίαση.

Ένα παράδειγμα των αποτελεσμάτων που μπορεί να βρεθούν από μια προσεχτική μείξη θεωρίας και πειραματικών αποτελεσμάτων παρέχεται από την λεγόμενη παλινδρομική ανάλυση η οποία δείχνει το βασικό ρόλο που παίζει ο υπολογιστής στο ρόλο του ναυπηγού.

Βασικά παράγεται μια μαθηματική σχέση για την αντίσταση του πλοίου βάσει ορισμένων παραμέτρων του πλοίου όπως ο λόγος  $L/B$ , το  $C_p$  κτλ. Η σχέση αυτή

χρησιμοποιείται για να βρεθεί η επιθυμητή αύξηση ή μείωση των παραμέτρων αυτών ώστε να ελαχιστοποιηθεί η αντίσταση, και παράγει μια μορφή γάστρας ανώτερης από αυτές που χρησιμοποιούνται.

Είναι απαραίτητο να μελετήσουμε πρώτα κάποιες από τις ιδιότητες των ρευστών στις οποίες κινείται το πλοίο. Οι ιδιότητες αυτές είναι θεμελιώδης για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του πλοίου από το πείραμα στο μοντέλο καθώς και για οποιαδήποτε θεωρητική εξέταση.

Θα αναφερθούμε στη συνέχεια στην δυναμική ρευστών, δύο ρευστά απασχολούν τον ναυπηγό ο αέρας και το νερό.

Η αντίσταση του αέρα αντιμετωπίζεται ως μια ξεχωριστή δύναμη αντίστασης. Μοντέλα υπό κλίμακα χρησιμοποιούνται ευρύτατα και είναι απαραίτητο να βεβαιωθούμε ότι η ροή γύρω από το μοντέλο είναι όμοια με αυτή γύρω από το πλοίο ώστε τα αποτελέσματα να μεταφερθούν σωστά υπό φυσική κλίμακα.

Η ομοιότητα υπό αυτή την έννοια απαιτεί το μοντέλο και το πλοίο να έχουν γεωμετρικά όμοιες μορφές, οι γραμμές ροής να είναι γεωμετρικά όμοιες στις δύο περιπτώσεις και οι ταχύτητες του ρευστού σε αντίστοιχα σημεία να βρίσκονται σε σταθερή αναλογία.

Το νερό έχει κάποιες συγκεκριμένες φυσικές ιδιότητες που είναι της ίδιας τάξης μεγέθους για το νερό στο οποίο γίνονται τα πειράματα και το νερό στο οποίο κινείται το πλοίο αυτές είναι:

Η πυκνότητα  $\rho$

Η επιφανειακή τάση  $\sigma$

Η συνεκτικότητα  $\mu$

Η πίεση ατμοποίησης  $P_v$

Η πίεση περιβάλλοντος στο άπειρο  $P^\infty$

Άλλοι παράγοντες που επιδρούν είναι:

Το βρεχόμενο μήκος  $L$

Η διάμετρος της έλικας  $D$

Η ταχύτητα  $v$

Οι στροφές της έλικας  $n$

Η αντίσταση  $R$

Η ώση  $T$

Η ροπή  $\tau$

Η επιτάχυνση της βαρύτητας  $g$

Η διαστατική ανάλυση παρέχει ένα οδηγό της μορφής με την οποία οι παραπάνω παράγοντες είναι σημαντικοί. Το θεώρημα Πι δηλώνει ότι η φυσική σχέση μεταξύ των παραπάνω παραγόντων μπορεί να αναπαρασταθεί ως μια σχέση μεταξύ ενός συνόλου αδιάστατων παραγόντων των εμπλεκόμενων μεγεθών.

Βεβαιώνει επίσης ότι οι μεταξύ τους σχετιζόμενες ποσότητες είναι ανεξάρτητες και ο αριθμός των συσχετιζόμενων ποσοτήτων θα είναι ελαττωμένος κατά τρεις δηλ. τον αριθμό των βασικών μονάδων μάζα, μήκος, χρόνος, από τον αριθμό των βασικών ποσοτήτων.

Εφαρμόζοντας την διαστατική ανάλυση στο πρόβλημα της πρόωσης του πλοίου μπορεί να δειχτεί ότι:

$$\frac{R}{\rho V^2 L^2} = F \left\{ \frac{VL\rho}{\mu}, \frac{V}{\sqrt{gL}}, \frac{V}{a}, \frac{\sigma}{g\rho L^2}, \frac{p_\infty - p_v}{\rho V^2} \right\}$$
$$\frac{T}{\rho n^2 D^4} \text{ και } \frac{Q}{\rho n^2 D^5} = F \left\{ \frac{V}{nD}, \frac{VD\rho}{\mu}, \frac{V^2}{gD}, \frac{\sigma}{\rho g L^2}, \frac{p_\infty - p_v}{\rho V^2} \right\}$$

Εκφρασμένο με διαφορετικό τρόπο είναι φυσικά λογικό να υποθέσουμε ότι αν τα δεδομένα μπορούν να εκφραστούν σε σχέση με παραμέτρους ανεξάρτητες



της κλίμακας δηλ. αδιάστατες παραμέτρους οι ίδιες αυτές τιμές των δεδομένων θα προκύψουν από πειράματα σε διαφορετική κλίμακα αν οι παράμετροι παραμείνουν σταθερές.

Όπου οι κύριες παράμετροι δεν μπορούν να παραμείνουν σταθερές τα δεδομένα θα μεταβληθούν κατά την μετάβαση από το μοντέλο στην πραγματική κλίμακα. Οι παραπάνω δεν είναι οι μόνες αδιάστατες παράμετροι που μπορούν να προκύψουν αλλά είναι αυτές που χρησιμοποιούνται γενικά.

Στην καθεμία έχει δοθεί ένα όνομα ως εξής:

$\frac{R}{\rho V^2 L^2}$  είναι ο συντελεστής αντίστασης.

$VL\rho/\mu$  ονομάζεται αριθμός Reynolds

$V/\sqrt{gL}$  είναι ο αριθμός Froude

$V/a,$  είναι ο αριθμός Mach

$\sigma/g\rho L^2$  είναι ο αριθμός Weber

$(P_\infty - P_v)/P_v^2$  είναι ο αριθμός σπηλαιώσης

$T/\rho n^2 D^4 = K_T$  συντελεστής ώσης

$Q/\rho n^2 D^5 = K_Q$  συντελεστής ροπής

$V/n D = J$  συντελεστής προχώρησης.

Δυστυχώς δεν είναι δυνατόν να γίνουν πειράματα με μοντέλα στα οποία όλοι οι παραπάνω παράμετροι να έχουν τιμές ίδιες με αυτές της φυσικής κλίμακας.

Αυτό φαίνεται εύκολα αν μελετήσουμε τους αριθμούς Froude και Reynolds. Καθώς το  $\rho, g, \mu$  είναι ίδιο για το μοντέλο και το πλοίο θα ήταν απαραίτητο τόσο το  $V \chi L$  όσο και το  $V/\sqrt{L}$  να είναι σταθερά.

Αυτό είναι φυσικά αδύνατο, εφόσον χρησιμοποιούσαμε ειδικά υγρά αντί για νερό για δοκιμές σε μοντέλα θα μπορούσαν να ικανοποιηθούν 2 παράμετροι αλλά όχι όλες.

Ευτυχώς μπορούν να ληφθούν ορισμένα έγκυρα αποτελέσματα διατηρώντας μια παράμετρο σταθερή στις δοκιμές μοντέλων και περιορίζοντας τις δοκιμές σε συγκεκριμένες μετρήσεις.

Για παράδειγμα τα πειράματα αντίστασης του μοντέλου γίνονται στον αντίστοιχο αριθμό Froude και τα πειράματα σπηλαίωσης υπό κλίμακα στον αντίστοιχο αριθμό σπηλαίωσης.

Αυτό σημαίνει ότι οι δυνάμεις αντίστασης που εξαρτώνται από τον αριθμό Reynolds πρέπει να τροποποιηθούν καθώς περνάμε από το μοντέλο στο πλοίο.

Θα δείξουμε ότι αν δεν υπήρχε αυτή η δυσκολία για την επίτευξη αυτής της ομοιότητας οι πρώτοι πειραματιστές δεν θα είχαν τόσες δυσκολίες στην πρόβλεψη της αντίστασης του πλοίου.

Στην συνέχεια θα αναφερθούμε στις συνιστώσες αντίστασης και πρόωσης

Είναι απαραίτητο να υπάρχει ένα προωστήριο μέσο για την κίνηση του πλοίου στο νερό. Όπως εξηγήσαμε επειδή το προωστήριο μέσο αλληλεπιδρά με την αντίσταση του πλοίου τα δύο δεν μπορούν να αναπτυχθούν χωριστά.

Όμως για ευκολία το συνολικό πρόβλημα θεωρείται σύνθεση επιμέρους προβλημάτων. Ο διαχωρισμός είναι αυθαίρετος αλλά έχει καθιερωθεί. Παρακάτω θα θεωρηθεί ότι το προωστήριο μέσο είναι η έλικα.

Αν η γυμνή γάστρα του πλοίου μπορούσε να κινηθεί στο νερό από ένα μέσο που δεν θα αλληλεπιδρούσε με τη γάστρα ή το νερό, θα είχε μια ολική αντίσταση  $R_T$  που θα ήταν το άθροισμα διαφόρων τύπων αντίστασης, όπως θα αναλυθεί αργότερα.

Η διαφοροποίηση μεταξύ των τύπων της αντίστασης θα είναι απαραίτητη γιατί αυτοί συμπεριφέρονται διαφορετικά κατά την αλλαγή της κλίμακας (από το μοντέλο στο πλοίο).

Το γινόμενο της  $R_T$  και της ταχύτητας  $V$  του πλοίου ορίζει μια ισχύ που είναι γνωστή ως ισχύς ρυμούλκησης. Η ισχύς ρυμούλκησης μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί στο ωφέλιμο έργο που παράγεται κατά την πρόωση του πλοίου.

Η ισχύς που μεταφέρεται στους άξονες για την πρόωση του πλοίου είναι η ισχύς άξονα. Ο λόγος μεταξύ της ισχύος άξονα και της ισχύος ρυμούλκησης είναι μέτρο της ολικής απόδοσης της πρωστήριας εγκατάστασης που επιτυγχάνεται και ονομάζεται συντελεστής πρόωσης  $PC$ .

Ο συντελεστής πρόωσης προκύπτει κατά το ένα μέρος από την απόδοση της έλικας και κατά ένα μέρος από την αλληλεπίδραση της έλικας και της γάστρας.

Επιπλέον πρέπει να τροποποιηθεί για να γίνουν τα δεδομένα του μοντέλου και του πλοίου συμβατά.

Από τα παραπάνω προκύπτουν τέσσερις βασικές συνιστώσες του προβλήματος πρόωσης:

**A) Η ισχύς ρυμούλκησης η η αντίστασης της γάστρας.**

**B) Η έλικα**

**Γ) Η αλληλεπίδραση έλικας/γάστρας**

**Δ) Η συσχέτιση μοντέλου πλοίου.**

Παρακάτω θα μιλήσουμε για την ισχύ ρυμούλκησης , όσον αφορά στην πρόωση του πλοίου στο νερό το ωφέλιμο ή δρών έργο είναι αυτό που απαιτείται για την υπερνίκηση της αντίστασης του πλοίου από την ταχύτητα προχώρησης.

Η αντίσταση που αναφέρεται θεωρείται ότι είναι αυτή της γυμνής γάστρας δηλ. χωρίς παρελκόμενα.

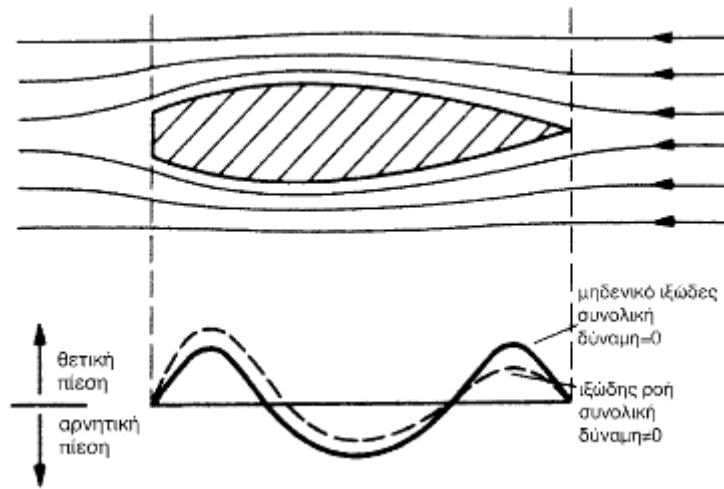
Αυτό μας οδηγεί στο επόμενο ορισμό ότι η ισχύς ρυμούλκησης ενός πλοίου είναι το γινόμενο της αντίστασης της γυμνής γάστρας επί την ταχύτητα της. Δηλώνεται ακόμα και σε μαθηματικές εξισώσεις με τα αρχικά  $e.h.p$  , οπότε  $e.h.p = R_T \cdot V$ .

Ενας αντίστοιχος ορισμός μπορεί να αναπτυχθεί χρησιμοποιώντας την αντίσταση της γάστρας μαζί με τα παρελκόμενα και αυτό συνήθως ορίζεται ως : **e.h.p'.Ο λόγος της e.h.p/e.h.p'** είναι γνωστός ως συντελεστής παρελκομένων .

### 3.2 Τύποι – Συνιστώσες αντίστασης

Η κλασική υδροδυναμική θεωρία έχει δείξει ότι ένα σώμα βαθιά βυθισμένο σε νερό μηδενικού ιζώδους δεν έχει αντίσταση.

Ανεξάρτητα από το πώς εκτρέπονται οι γραμμές ροής καθώς περνούν το σώμα, επιστρέφουν στην αδιατάραχτη κατάσταση πολύ μακριά από αυτό και η συνισταμένη δύναμη που ασκείται στο σώμα είναι μηδέν.



Εικόνα 3.1

Στην πράξη το υγρό είναι συνεκτικό και ένα βαθιά βυθισμένο σώμα θα παρουσιάσει αντίστασης τριβής.

Επιπλέον όταν το σώμα πλησιάζει στην ελεύθερη επιφάνεια οι διαφορές της πίεσης γύρω από το σώμα εκδηλώνονται ως ανύψωση ή πτώση της επιφάνειας του νερού.

Αυτό σημαίνει ότι δημιουργούνται κυματισμοί στην επιφάνεια του νερού. Η διαδικασία αυτή διαταράσσει την ισορροπία των πιέσεων που ασκούνται στο σώμα και έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μιας δύναμης αντίστασης τριβής.

Το μέτρο της αντίστασης αυτής σχετίζεται με την ενέργεια του συστήματος κυμάτων που δημιουργείται.

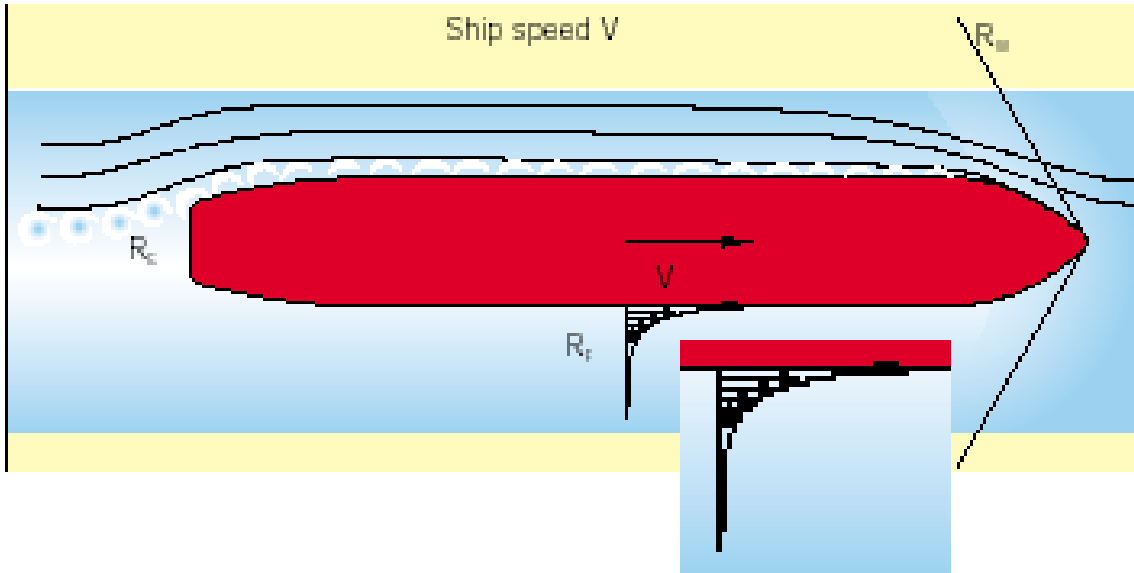
Η συνολική αντίσταση ενός πλοίου που κινείται σε ήρεμο νερό έχει πολλές συνιστώσες αυτές είναι:

Η αντίσταση κυματισμού, η αντίσταση τριβής, η αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας, η αντίσταση αέρα , η αντίσταση παρελκόμενων.

Κάθε αντίσταση θα μελετηθεί χωριστά με την προϋπόθεση ότι η καθεμία αλληλεπιδρά στην άλλη.

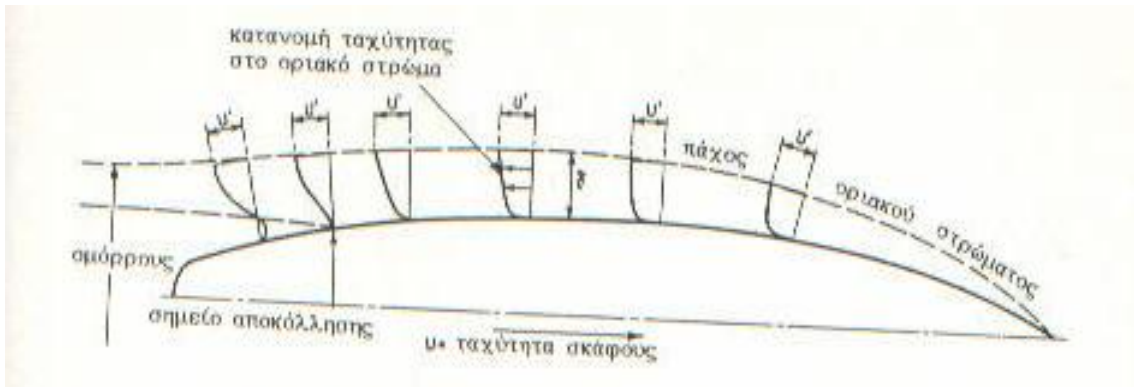
### 3.3 Αντίσταση Τριβής

Το νερό και τα άλλα υγρά παρουσιάζουν το φαινόμενο της εσωτερικής τριβής που παρουσιάζεται όταν μόρια του υγρού που γειτονεύουν κινούνται με διαφορετική ταχύτητα οπότε μεταξύ τους δημιουργούνται αντιστάσεις τριβής.



Εικόνα 3.2: Αντίσταση τριβής  $R_f$  – Ομόρρους τριβής

Έστω ένα πλοίο που κινείται εντελώς βυθισμένο μέσα στο νερό (σχ. 3.2) οι επιφάνειες παρασύρουν μόρια νερού λόγω της τριβής με αυτές χωρίς ολίσθηση, δηλαδή τα μόρια του νερού που βρίσκονται αμέσως σε επαφή με την επιφάνεια του πλοίου, κινούνται μαζί με αυτή και έχουν την ίδια ταχύτητα με την επιφάνεια του πλοίου ή σε σχέση προς αυτήν έχουν ταχύτητα μηδενική. Σε μικρή εντούτοις απόσταση από την επιφάνεια του πλοίου έχει παρατηρηθεί ότι η ταχύτητα των μορίων του υγρού είναι πολύ μικρή.



Εικόνα 3.3: Οριακό Στρώμα

Το μικρού πάχους στρώμα των μορίων του νερού τα οποία κινούνται μαζί με το πλοίο, δηλαδή το μεταξύ της επιφάνειας του πλοίου και του νερού που δεν επηρεάστηκε και που έχει μηδενική ταχύτητα, ονομάζεται οριακό στρώμα (Boundary Layer) ή αλλιώς ομόρρους τριβής. Στο στρώμα αυτό παρατηρείται γρήγορη πτώση της ταχύτητας των παρασυρόμενων μορίων από την ταχύτητα του πλοίου στη μηδενική του περιβάλλοντος νερού. Η ολική αντίσταση τριβής είναι άθροισμα των αντιστάσεων τριβής μεταξύ γειτνιαζόντων μορίων στο περιφερειακό.

Η κίνηση των μορίων του νερού προς τα εμπρός λόγω της ενέργειας των δυνάμεων τριβής είναι μία από τις συνιστώσες του πρυμναίου ομόρρου (Stern Wake), ο οποίος επηρεάζει σημαντικά την πρόωση μέσω της έλικας.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την αντίσταση τριβής είναι οι εξής

α)Είδος της βρεχόμενης επιφάνειας (λειότητα).

β)Έκταση της βρεχόμενης επιφάνειας.

γ)Ταχύτητα πλοίου.

δ)Πυκνότητα υγρού.

ε)Ιξώδες υγρού,

στ)Είδος ροής (νηματική, στροβιλώδης ή μικτή).

ζ)Μήκος πλοίου ή βρεχόμενης επιφάνειας.

Δεχόμαστε συνήθως ότι το σχήμα της επιφάνειας εκτός από το μήκος της, δεν επιδρά στην αντίσταση τριβής. Δηλαδή η αντίσταση τριβής θεωρείται εκείνη η οποία θα είχε ή βρεχόμενη επιφάνεια του σκάφους αν είχε μεν την ίδια έκταση αλλά ήταν τελείως επίπεδη.

Είναι προφανές ότι η κύρτωση της επιφάνειας αυτής προκαλεί πιέσεις στο νερό κατά την κίνηση του πλοίου. Εξάλλου το νερό από αντίδραση προκαλεί ίσες και αντίθετες πιέσεις σε κάθε σημείο της γάστρας. Ένας από τους τύπους που χρησιμοποιούνται συνηθέστερα για τον υπολογισμό της αντίστασης τριβής του Froude.



Κατά τον Froude η αντίσταση τριβής ενός πλοίου με βρεχόμενη επιφάνεια  $S$  αντιστοιχεί στην αντίσταση μιας επίπεδης πλάκας ίδιου μήκους και εμβαδού.

Ο  $C_f$  είναι ο συντελεστής αντίστασης τριβής, κοινά αποδεκτός κατά την International Towing Tank Conference (ITTC 1957) και μαζί με τον συντελεστή  $C_f$ , έχουμε την εξίσωση:

$$R_f = C_f \times S \times \rho / 2 \times V^2$$

Όπου  $f$  συντελεστής εξαρτώμενος από το είδος (λειότητα) της επιφάνειας, την πυκνότητα, το ιζώδες του υγρού και το μήκος του πλοίου.

$f=0,009$  ως  $0,010$ ,

$S$  η βρεχόμενη επιφάνεια σε  $ft^2$

$V$  η ταχύτητα του πλοίου σε κόμβους.

Από τον παραπάνω τύπο φαίνεται ότι η αντίσταση τριβής είναι ανάλογη με την βρεχόμενη επιφάνεια και την ταχύτητα του πλοίου υψωμένη σε δύναμη που πλησιάζει το τετράγωνο. Η λειότητα της επιφάνειας υπεισέρχεται με το συντελεστή  $f$ . Η αντίσταση τριβής ενός πλοίου αυξάνεται λόγω ρυπάνσεως της γάστρας και της καταστροφής της λειότητας των υφάλων, που αυτή δημιουργεί.

Η αύξηση της αντιστάσεως της τριβής μπορεί να ανέλθει σε 0,3 ως 0,5 για κάθε ημέρα από τον δεξαμενισμό του πλοίου, δηλαδή για 100 ημέρες από τον δεξαμενισμό η αντίσταση τριβής μπορεί να αυξηθεί κατά 30 ως 50%.

Βέβαια η ρύπανση της γάστρας και επομένως και η αύξηση αντιστάσεως τριβής που προέρχεται από αυτή εξαρτάται από την εποχή ενός έτους, την περιοχή της θάλασσας, την κίνηση ή όχι του πλοίου, το είδος των χρωμάτων κλπ.

Η διάρκεια μεταξύ δεξαμενισμών καθώς και το είδος της επιστρώσεως των υφάλων καθορίζεται από την συνεκτίμηση των παρακάτω βασικότερων παραγόντων

α) Την αύξηση της καταναλώσεως καύσιμων και τη μείωση της ταχύτητας και των ζημιών που προέρχονται από αυτά.

β) Το κόστος δεξαμενισμού και τις εργασίες συντηρήσεως της επιφάνειας των υφάλων.

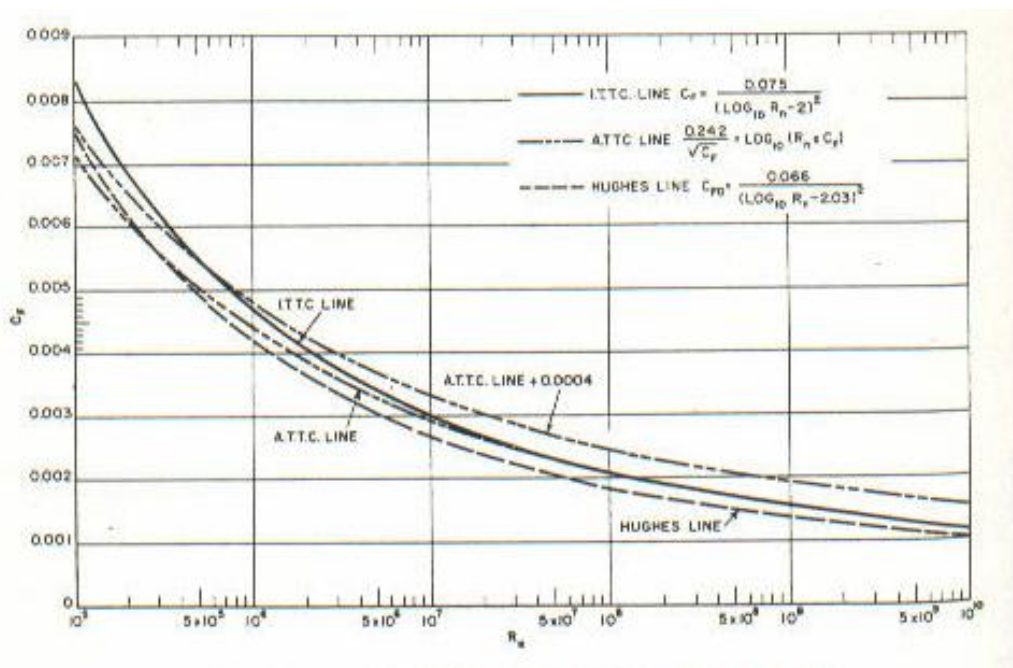
Γ)Το χρόνο που απαιτείται για το δεξαμενισμό και τα κέρδη που διαφεύγουν εξαιτίας του.

Η αντίσταση τριβής,  $R_f$ , της γάστρας εξαρτάται από το μέγεθος της βρεχόμενης επιφανείας της γάστρας  $A_s$  και από τον ειδικό συντελεστή αντίστασης τριβής  $C_f$ . Η τριβή αυξάνεται με την ρύπανση της γάστρας από θαλάσσιους οργανισμούς, όστρακα, φύκια, κ.λ.π.

Όταν το πλοίο ωθείται μέσα στο νερό, η αντίσταση τριβής αυξάνεται με ρυθμό, που είναι περίπου ίσος με το τετράγωνο της ταχύτητας του πλοίου.

Η αντίσταση τριβής αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό μέρος της αντίστασης του πλοίου, μερικές φορές κάπου 70 έως 90% της συνολικής αντίστασης του πλοίου για αργά πλοία (φορτίου χύδην και δεξαμενόπλοια) και άλλες φορές λιγότερο από 40% για γρήγορα πλοία (εμπορευματοκιβωτίων – container και επιβατηγά). Η αντίσταση τριβής βρίσκεται ως ακολούθως:

$$R_f = C_f \times K$$



Εικόνα 3.4: Συντελεστής τριβής  $C_F$  σε σχέση με  $R_n$

### 3.4 Τρόποι Μείωσης της Αντίστασης Τριβής

Ένα από τα σοβαρότερα προβλήματα που απασχολούν τη ναυτιλία είναι η ρύπανση των υφάλων των πλοίων που προκαλείται από την προσκόλληση σε αυτά ζωικών και φυτικών οργανισμών. Εξαιτίας της ρύπανσης επιτείνεται η διάβρωση στην περιοχή των υφάλων, ελαττώνεται η ταχύτητα πλεύσης του πλοίου και αυξάνεται σημαντικά η κατανάλωση καυσίμου.

Η ρύπανση αυτή η οποία οφείλεται σε προσκόλληση στα ύφαλα θαλάσσιων ζώων και φυτών, εκτός από το γεγονός ότι επιτείνει τη διάβρωση των υφάλων, προκαλεί ελάττωση της αρχικής ταχύτητας πλεύσης των πλοίων σε ποσοστό ως και 40% μέσα σε διάστημα ενός χρόνου. Ακόμα κι όταν τα πλοία δεξαμενισθούν, καθαριστούν και επαναβαφούν τα ύφαλα τους με κατάλληλα χρώματα, έχουν ήδη χάσει οριστικά ένα 7-14% της αρχικής τους ταχύτητας, επειδή η κατεργασθείσα και επαναβαφείσα επιφάνεια δεν μπορεί να επανακτήσει πλήρως την αρχική λειότητα της. Εκτός από τα ύφαλα, συνήθως ρυπαίνονται και τα δίκτυα θαλάσσιου νερού (sea water piping systems), δηλαδή δίκτυα θέρμανσης, ψύξης ή/και συμπυκνωτές που εργάζονται με θαλασσινό νερό, με συνέπεια την ελάττωση της ενεργού διατομής των σωλήνων αναρρόφησης και την αναμενόμενη μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας για τη λειτουργία των υποστηριζόμενων μονάδων.

Δυστυχώς και παρά την αποτελεσματικότητα τους από τεχνικό – οικονομική άποψη, τα χρησιμοποιούμενα αντιρρυπαντικά υφαλοχρώματα δημιουργούν λόγω της τοξικότητάς τους σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα. Απαιτούνται νέα υλικά και τεχνικές για μια λύση συμβατή με την εύθραυστη σημερινή οικολογική ισορροπία.. Εξαιτίας της ρύπανσης επιτείνεται η διάβρωση στην περιοχή των υφάλων, ελαττώνεται η ταχύτητα πλεύσης του πλοίου και αυξάνεται σημαντικά η κατανάλωση καυσίμου.

Μια προσπάθεια να αποφευχθεί η ρύπανση της γάστρας γίνεται με την χρήση των αντιρρυπαντικών χρωμάτων. Πρόκειται για ειδικά χρώματα γάστρας που μειώνουν την πιθανότητα ανάπτυξης οργανισμών στα ύφαλα του πλοίου.

Τα υφαλοχρώματα είναι προστατευτικά χρώματα με τα οποία βάφονται τα ύφαλα των πλοίων. Με σκοπό να αποτρέπουν την επικάλυψη διαφόρων φυκών, οστράκων και άλλων μικρών θαλάσσιων οργανισμών, που μειώνουν την ταχύτητά του, από τη

δεκαετία του 1970 ξεκίνησε η ευρεία χρήση οργανοκασσιτερικών ενώσεων, κυρίως του ισχυρού βιοκτόνου Tributyltin (TBT) ως πρόσθετο σε υφαλοχρώματα πλοίων.

Λόγω της τοξικής του δράσης, το TBT εμποδίζει την ανάπτυξη αλγών, οστράκων και άλλων θαλάσσιων οργανισμών στα ύφαλα των πλοίων. Δυστυχώς όμως, η ουσία αυτή διαφεύγει από τα υφαλοχρώματα και διασπείρεται στο θαλάσσιο περιβάλλον. Έτσι, συσσωρεύεται στα ιζήματα του βυθού, ιδιαίτερα σε περιοχές με μεγάλη κίνηση πλοίων όπως τα λιμάνια.

Τα υφαλοχρώματα με βιοκτόνες ουσίες είναι αρκετά τοξικά και μπορούν να επηρεάσουν πολλά είδη οργανισμών πέρα από αυτούς που επικάθονται στα πλοία. Οι οργανικές ενώσεις του κασσιτέρου δεν διαλύονται εύκολα στο νερό και παραμένουν σχετικά σταθερές στο περιβάλλον, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν μεγάλο συντελεστή βιοσυσώρευσης.

Το TBT προκαλεί διαταραχές του ενδοκρινικού συστήματος σε οστρακοειδή. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως 'imposex' και σημαίνει ότι θηλυκοί οργανισμοί αναπτύσσουν αρσενικά χαρακτηριστικά λόγω της δράσης του TBT στο ορμονικό τους σύστημα. Η δράση αυτή εμφανίζεται σε γαστερόποδα ακόμη και όταν οι συγκεντρώσεις TBT στο νερό είναι εξαιρετικά μικρές.

Η Διεθνής Σύμβαση για τον Έλεγχο των Επιβλαβών Προστατευτικών Συστημάτων των Υφάλων των Πλοίων (AFS Convention), που αφορούσε τις νέες κατασκευές, μετά την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου του 2003 και την ολική απαγόρευση μετά την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου του 2008, απαγορεύει τη χρήση οργανοκασσιτερικών ενώσεων σε υφαλοχρώματα που χρησιμοποιούνται στα πλοία, και επιβάλλει την χρήση νέων εναλλακτικών χρωμάτων, πιθανόν βασισμένων στον χαλκό.

### **3.5 Αντίσταση Κυματισμού**

Είναι γνωστό ότι ένα πλοίο που κινείται σε μία κατά τα άλλα αδιατάραχτη επιφάνεια νερού προκαλεί ένα σύστημα κυματισμού. Το σύστημα αυτό προκύπτει από το πεδίο πιέσεων γύρω από το σώμα και η ενέργεια που διαθέτει πρέπει να προέρχεται από το σώμα. Όσο αφορά στο σώμα η μεταφορά ενέργειας θα εμφανιστεί ως μια δύναμη που αντιτίθεται στην πρόσω δύναμη.

Αυτή η δύναμη ονομάζεται αντίσταση κυματισμού. Ένα βυθισμένο σώμα δέχεται επίσης μια αντίσταση λόγω της δημιουργίας κυμάτων στην ελεύθερη επιφάνεια, το μέτρο της αντίστασης αυτής ελαττώνεται λόγω αύξησης του βάθους στο οποίο βρίσκεται το σώμα και γίνεται ελάχιστη σε μεγάλο βάθος. Αυτό γίνεται συνήθως σε βάθη ίσα περίπου με το ήμισυ του μήκους του σώματος. Μια εξαίρεση σε αυτό τον κανόνα ισχύει για υποβρύχια που κινούνται κοντά στην διεπιφάνεια μεταξύ των δύο στρωμάτων νερού με διαφορετική πυκνότητα.

Σε αυτή την περίπτωση δημιουργείται ένα σύστημα κυματισμού στη διεπιφάνεια με αποτέλεσμα μιας δύναμης αντίστασης στο υποβρύχιο.

Ένα κύμα βαρύτητας μήκους  $\lambda$  σε βαθύ νερό κινείται με ταχύτητα  $C$  που ορίζεται ως :

$$C^2 = g\lambda/2\pi$$

Επειδή το σύστημα κυματισμού κινείται μαζί με το πλοίο το  $C$  πρέπει να είναι ίσο με την ταχύτητα του πλοίου  $V$ , και καθώς το  $\lambda$  έχει διάσταση μήκους μπορεί κατά την διαστατική ανάλυση να αναπαρασταθεί ως ανάλογο του μήκους του πλοίου  $L$  για μια δεδομένη ταχύτητα.

Ετσι μπορούμε να δούμε ότι από τις αδιάστατες παραμέτρους που μελετήσαμε παραπάνω είναι το

$$V^2/gL \text{ και το } V/\sqrt{gL}$$

Που είναι σημαντικά για την μελέτη της αντίστασης κυματισμού. Όπως αναφέρθηκε

στην ενότητα της μηχανικής ρευστών, η ποσότητα  $V/\sqrt{gL}$

συνήθως ονομάζεται αριθμός Froude. Σε πολλές περιπτώσεις η παράμετρος

$V/\sqrt{gL}$  χρησιμοποιείται για την γραφική αναπαράσταση αποτελεσμάτων αλλά αυτή η παράμετρος δεν είναι πλέον αδιάστατη.

Υδροδυναμικά το πλοίο μπορεί να θεωρηθεί ως ένα κινούμενο πεδίο πιέσεων.

Ο Kelvin μελέτησε μαθηματικά την απλοποιημένη περίπτωση ενός κινούμενου σημείου πίεσης και έδειξε ότι το δημιουργούμενο τμήμα αποτελείται από δύο συστήματα.

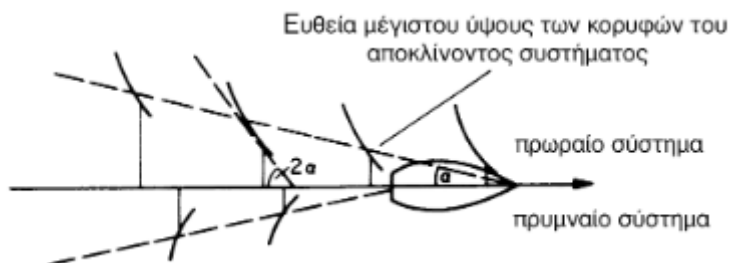
Το ένα σύστημα είναι ένα αποκλίνων σύστημα κυματισμού και το άλλο είναι ένα σύστημα κυμάτων με κορυφές περίπου κάθετες στην πορεία του σημείου πίεσης.

Τα δύο αυτά συστήματα κινούνται προς τα εμπρός με την ταχύτητα του σημείου πίεσης. Το σύστημα κυματισμού που δημιουργεί ένα πλοίο είναι πιο πολύπλοκο. Σε μια πρώτη προσέγγιση όμως το πλοίο μπορεί να θεωρηθεί ως ένα κινούμενο πεδίο υπερπίεσης που βρίσκεται κοντά στην πλώρη και ένα κινούμενο πεδίο υποπίεσης που βρίσκεται κοντά στην πρύμνη.

Η πλώρη δημιουργεί κυματισμό παρόμοιο με αυτό που αυτό που προκαλεί ένα σημείο πίεσης Kelvin κορυφή στην πλώρη.

Η πρύμνη από την άλλη δημιουργεί σύστημα κυματισμού με κοιλάδα στην πρύμνη.

Αν η ευθεία του μέγιστου ύψους των κορυφών του αποκλίνοντος συστήματος είναι στο  $\alpha$  τότε κορυφές στις θέσεις αυτές περικλείουν γωνία περίπου ίση με  $2\alpha$  ως προς το διαμήκη άξονα συμμετρίας του πλοίου



Εικόνα 3.5

Τα δύο εγκάρσια συστήματα κυμάτων δηλαδή της πλώρης και της πρύμνης έχουν μήκος κύματος  $2\pi V^2/g$ . Τα εγκάρσια κύματα αυξάνονται σε πλήθος καθώς αυξάνονται οι αποκλίνοντες κυματισμοί.

Η συνολική ενέργεια ανά κύμα είναι σταθερή οπότε το ύψος τους μειώνεται προοδευτικά με την αύξηση της απόστασης από το πλοίο.

Γενικά και τα δύο συστήματα μπορούν να ανιχνευτούν αν και αυτό της πρύμνης είναι πολύ ασθενέστερο από αυτό της πλώρης.

Συνήθως το πρυμναίο εγκάρσιο σύστημα δεν διακρίνεται καθώς από πίσω στο πλοίο εμφανίζεται η σύνθεση των δύο συστημάτων.

Σε ορισμένα πλοία το σύστημα κυματισμού μπορεί να γίνει ακόμα πιο πολύπλοκο με την δημιουργία και άλλων συστημάτων από τοπικές ασυνέχειες στη μορφή του πλοίου.

Καθώς στις περισσότερες ταχύτητες εμφανίζονται και το πρωαίο και το πρυμναίο από πίσω υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο ανωτέρων εγκάρσιων συστημάτων κυματισμού.

Εάν τα συστήματα φάσης έχουν διαφορά φάσης να συμπίπτουν τέτοια ώστε να συμπίπτουν οι κορυφές των κυμάτων, το δημιουργούμενο σύστημα θα έχει μεγαλύτερο ύψος και κατά συνέπεια θα περιέχει μεγαλύτερη ενέργεια.

Η αντίσταση κυματισμού η οποία εξαρτάται από την ενέργεια του συνολικού συστήματος κυματισμού, μεταβάλλεται λοιπόν με την ταχύτητα και το ενεργό μήκος μεταξύ των συστημάτων πίεσης στην πλώρη και την πρύμνη.

Πάλι οι παράμετροι  $V$  και  $L$  είναι σημαντικές. Στην βιβλιογραφία μελετάται η επίδραση στην αντίσταση του μήκους του πλοίου με την ρυμούλκιση μοντέλων με την ίδια μορφή άκρων αλλά με διαφορετικά μήκη παράλληλου τμήματος.

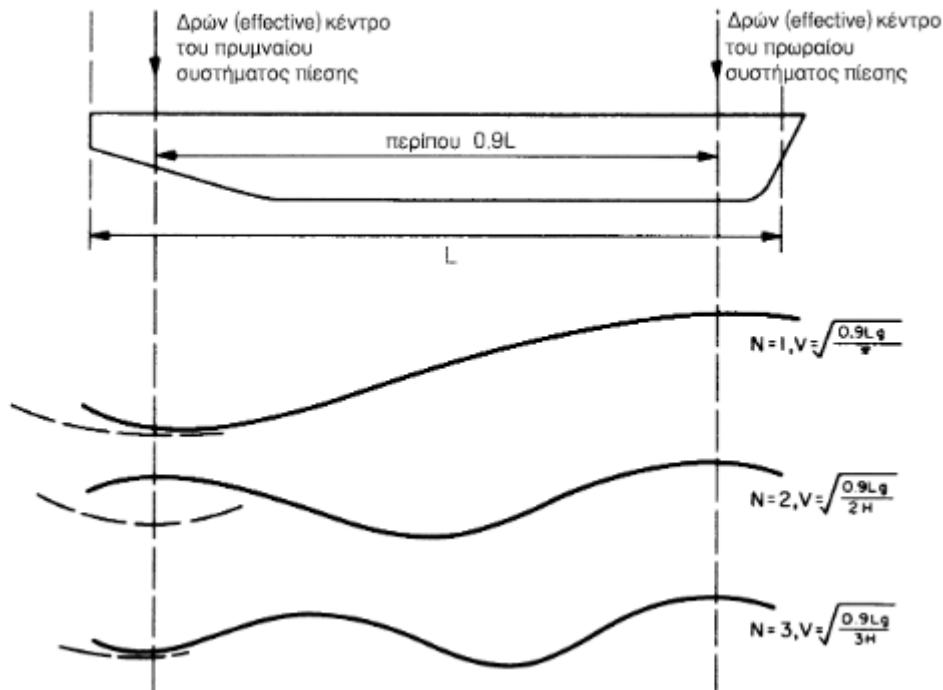
Τα αποτελέσματα συμφωνούν με τα αναμενόμενα από τους παραπάνω γενικούς συλλογισμούς.

Η απόσταση μεταξύ του συστήματος της πλώρης και της πρύμνης λαμβάνεται με  $0,9L$ .

Η συνθήκη ότι οι κορυφές ή οι κοιλάδες του συστήματος της πλώρης συμπίπτουν με την πρώτη κοιλάδα του συστήματος της πρύμνης είναι λοιπόν:

$$V^2/0,9L = g/N\pi$$

Για  $N=1,3,5,7$  κλπ οι κοιλάδες θα συμπίπτουν ενώ για  $N=2,4,6$ , κλπ οι κορυφές του πρωαίου συστήματος θα συμπίπτουν με την κοιλάδα του πρυμναίου συστήματος όπως φαίνεται στην εικόνα 3.6

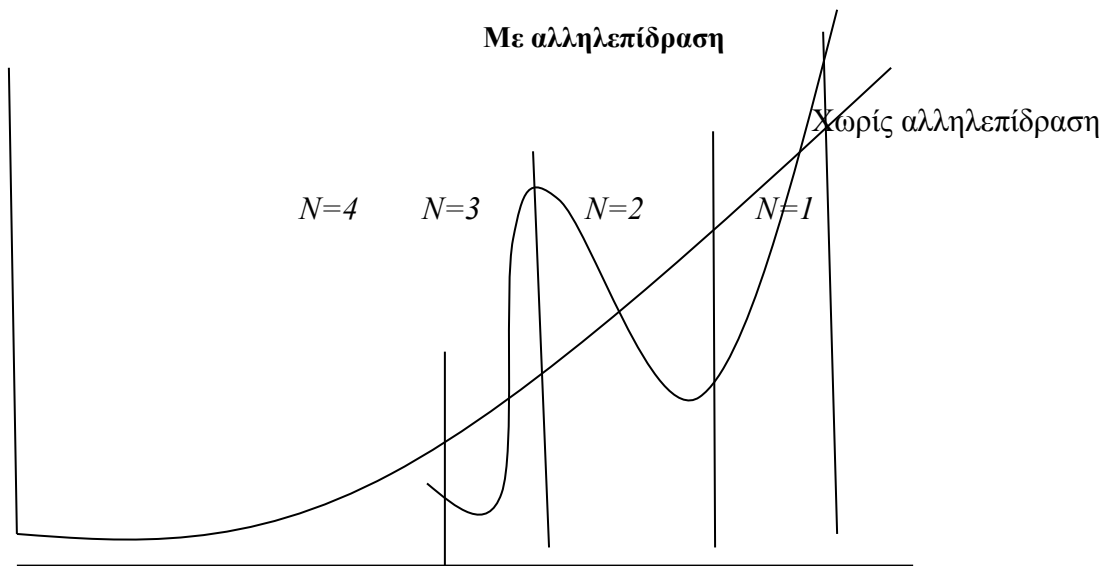


Εικόνα 3.6

**Αλληλεπίδραση του προραίου και πυρμναίου συστήματος.**

Αν δεν υπήρχε αλληλεπίδραση μεταξύ του προραίου και πυρμναίου συστήματος κυματισμών, η αντίσταση θα αυξανόταν σταθερά με την ταχύτητα όπως φαίνεται στην εικόνα 3.7





Εικόνα 3.7

### Κορυφές και κοιλάδες των καμπύλων αντίστασης κυματισμού

#### Αντίσταση κυματισμού-ταχύτητα

Με δεδομένο ότι ο αριθμός Froude είναι οι τιμές  $F_n$  που αντιστοιχούν στις κορυφές και τις κοιλάδες φαίνονται στον πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1

N	$F_n$
1	0,54
2	0,38
3	0,31
4	0,27

### 3.6 Άλλοι τρόποι μείωσης της τριβής

Αρχικά θα αναφερθούμε στην γεωμετρική κατασκευή των πλοίων και θα αναφέρουμε πως με την σωστή γεωμετρία τους θα έχουμε μείωση της τριβής. Με την ελάττωση του μήκους ελαττώνονται οι καμπτικές ροπές με αποτέλεσμα να ελαττώνεται η απαιτούμενη ροπή αντιστάσεως της μέσης τομής και έτσι να είναι δυνατή η μείωση του βάρους της κατασκευής του.

Η μείωση του βάρους της κατασκευής αλλά και του βάρους των στοιχείων του εξοπλισμού του πλοίου έχει σαν συνέπεια αφενός μεν την ελάττωση του κόστους αφετέρου δε την αύξηση του ωφέλιμου φορτίου.

Εκτός των ανωτέρω επιδράσεων του μήκους, σημαντική επίδραση αυτού έχουμε επί του βάρους της πρωοστηρίου εγκαταστάσεως.

Δεδομένου ότι εξετάζοντας την μεταβολή της ισχύος προώσεως ή της αντιστάσεως προώσεως για την ίδια ταχύτητα και εκτόπισμα, όταν αυξήσουμε το μήκος θα επέλθει αύξηση της βρεχόμενης επιφάνειας με συνέπεια την αύξηση της αντίδρασης τριβής.

Οπότε με μείωση του θα καταφέρουμε τα αντίθετα αποτελέσματα που και αυτά επιθυμούμε.

Επίσης οι επιδράσεις του πλάτους του πλοίου είναι επί της ευστάθειας, της ταχύτητας και του βάρους αυτού.

Η αύξηση του πλάτους αυξάνει σοβαρά την ευστάθεια ενώ επιδρά αρνητικά στην ταχύτητα του πλοίου στις περιπτώσεις όπου η αντίσταση του κύματος είναι υψηλή και στα πλοία εκείνα όπου η αντίσταση τριβών παίζει σημαντικό ρόλο.

Θα αναφέρουμε στην συνέχεια πως επηρεάζουν οι συντελεστές την αντίσταση τριβής των πλοίων.

Ο συντελεστής γάστρας είναι  $C_b$  είναι ο λόγος του εκτοπίσματος μέχρι μια δοσμένη ίσαλο προς τον όγκο ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου το οποίο έχει διαστάσεις μήκος, πλάτος και ύψος αντίστοιχα.

$$C_b = V/L.B.T.$$

V : όγκος εκτοπίσματος

L: μήκος ισάλου

T: μέσο βύθισμα.

Στους υπολογισμούς για το  $C_b$  των εμπορικών πλοίων και των υπολοίπων συντελεστών γάστρας λαμβάνεται γενικά το μήκος  $L_{pp}$  το οποίο δεν πρέπει να είναι μικρότερο του **96%** και δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερο του **97%** του μέγιστου μήκους της ισάλου γραμμή φορτώσεως θέρους.

Ο συντελεστής γάστρας δεν είναι σταθερός για όλα τα βυθίσματα δηλαδή για το άφορτο εκτόπισμα του πλοίου ο  $C_b$  θα είναι μικρότερος επειδή το πλοίο θα είναι λεπτότερο προς τον πυθμένα.

Μερικοί από τους παράγοντες που επιδρούν στην εκλογή του  $C_b$  είναι:

Η απαιτούμενη ταχύτητα για την αντίσταση του πλοίου

Η εκμετάλλευση του όγκου του πλοίου

Η συμπεριφορά του πλοίου σε κυματισμούς.

Η εκλογή του  $C_b$  αποτελεί αντικείμενο εξέτασης στο στάδιο της

προμελέτης του πλοίου.

Οι συνήθεις τρόποι προσέγγισης του  $C_b$  είναι οι εξής:

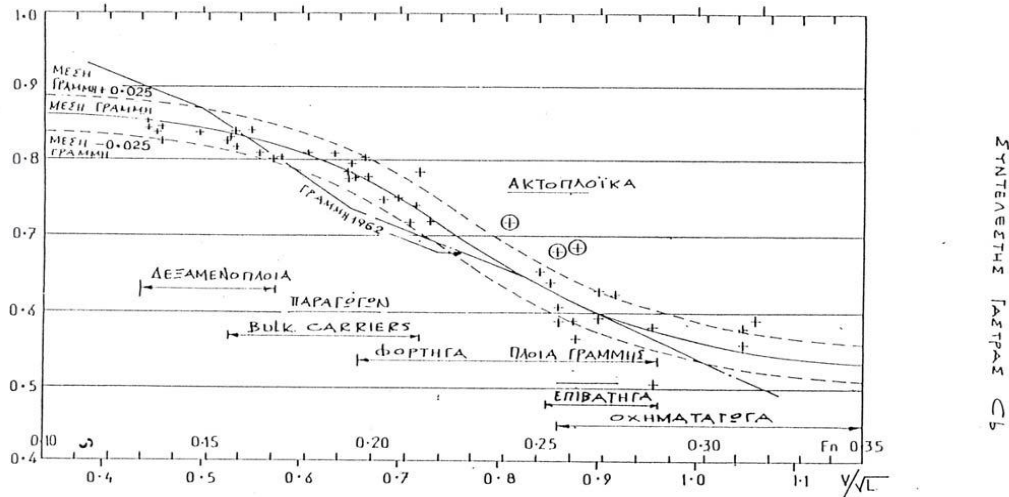
*Χρήση μαθηματικών τύπων από στατιστικά στοιχεία κατασκευασμένων πλοίων.*

Χρήση μαθηματικών τύπων από στατιστική ανάλυση πλοίων ελαχίστου κόστους ναυπήγησης

για δεδομένο κόστος ναυπήγησης.

για δεδομένο βάρος.

Χρήση διαγραμμάτων.



Εικόνα 17 Μεταβολή του συντελεστή γάστρας συναρτήσει του  $\sqrt{L}$

Εικόνα 3.8

Ο συντελεστής μέσης τομής  $C_m$  είναι ο λόγος του εμβαδού της μέσης τομής μέχρι μια δοσμένη ίσαλο προς το εμβαδόν του περιγεγραμμένου προς αυτή ορθογωνίου παραλληλογράμμου πλάτους ίσου με το μέγιστο πλάτος της ισάλου και ύψους ίσου με το βύθισμα που αντιστοιχεί στη δοσμένη ίσαλο.

Η εκλογή του  $C_m$  γίνεται λαμβάνοντας ορισμένα κριτήρια στο στάδιο της προμελέτης ορισμένα από αυτά είναι τα παρακάτω:

επίδραση επί της αντιστάσεως

επίδραση επί του κόστους κατασκευής

επίδραση επί της εκμετάλλευσης χώρου

επίδραση επί της ευστάθειας

επίδραση επί της συμπεριφοράς σε κυματισμό.

Γενικά ο συντελεστής  $C_m$  επιλέγεται ανάλογα με τον  $C_b$  και μειώνεται για μικρά  $C_b$  και υψηλούς αριθμούς Froude.

Παραπάνω δώσαμε κάποια σημεία κατασκευαστικά που επιδρούν στην δύναμη αντίστασης και περαιτέρω στην τριβή.

Στην συνέχεια θα αναφερθούμε στα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν η επιλογή των υλικών αποτελεί προϋπόθεση για τον υπολογισμό των διαστάσεων του βάρους της κατασκευής και του κόστους της ναυπήγησης. Πρόσθετα κριτήρια για την επιλογή των ναυπηγικών υλικών αποτελούν η αντοχή στη διάβρωση, η ευκολία επεξεργασίας οι απαιτήσεις συντήρησης, η διαθεσιμότητα κλπ.

Θα αναφέρουμε κάποια υλικά κατασκευής πλοίων και τις ιδιότητες τους.

### **Χάλυβας.**

Έχει το υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας αλλά είναι και το βαρύτερο υλικό. Οι χάλυβες υψηλής αντοχής έχουν υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας και επιτρέπουν το περιορισμό του πάχους των ελασμάτων και την μείωση του βάρους της μεταλλικής κατασκευής ενώ αυξάνεται ταυτόχρονα το κόστος της κατασκευής. Ο χάλυβας κυριαρχεί στα μεγαλύτερα πλοία.

Αντίθετα το αλουμίνιο και τα συνήθη κράματα του έχουν το 1/3 της ελαστικότητας του χάλυβα επιβάλλουν μεγαλύτερα πάχη ελασμάτων είναι όμως ακριβότερο και δεν αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες ενώ είναι πιο ανθεκτικό στη διάβρωση μέσα σε θαλάσσιο περιβάλλον (δημιουργεί ένα επιφανειακό στρώμα οξειδίου που εμποδίζει την περαιτέρω διάβρωση).

## **Βιβλιογραφία**

1. Ευστάθεια μεταφορά φορτίων, Γρηγορόπουλος Γρηγόριος, Φωκάς Δημήτριος, Βούλαρης Στυλιανός,
2. Ναυπηγικό σχέδιο-Γεωμετρία του πλοίου, Α.Πουλής-Γ.Χαντζηκωνσταντής,
3. Πρόωση πλοίου- γενικές αρχές.
4. [www.oryktosploutos.net](http://www.oryktosploutos.net)
5. [www.helmeacadets.gr](http://www.helmeacadets.gr)
6. Βασικές Αρχές Πρόωσης Πλοίων, Ν.Π. Κυρτάτος

## Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	2
Abstract.....	3
Εισαγωγή.....	4
Κεφάλαιο 1.....	5
1.1 Ορολογία, ονοματολογία, περιγραφή του πλοίου – ναυπηγικές γραμμές.....	5
1.2 Γεωμετρία του πλοίου – ορισμοί.....	5
1.3 Ναυπηγικές γραμμές.....	9
Κεφάλαιο 2.....	10
Κατηγορίες Πλοίων.....	10
Κεφάλαιο 3.....	12
3.1 Βασικές Έννοιες.....	12
3.2 Τύποι – Συνιστώσες.....	20
3.3 Αντίσταση Τριβής.....	22
3.4 Τρόποι μείωσης αντίστασης Τριβής.....	26
3.5 Αντίσταση κυματισμού.....	27
3.6 Άλλοι τρόποι μείωσης της τριβής.....	33
Βιβλιογραφία.....	37