

10. Πρόωση πλοίου: Γενικές αρχές

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 συστήματος που έχει επιλεγεί και την αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Επειδή υπάρχει αλληλεπίδραση, είναι απαραίτητο να θεωρήσουμε τη σχεδίαση της γάστρας και της προωστήριας διάταξης ως ένα ολοκληρωμένο σύστημα. Όταν η επιφάνεια του νερού είναι ταραγμένη (π.χ. λόγω κυματισμών), το πρόβλημα γίνεται πιο περίπλοκο λόγω της αυξημένης αντίστασης και του γεγονότος ότι το προωστήριο σύστημα δουλεύει σε δυσμενέστερες συνθήκες. Η πρόωση σε κυματισμό αναλύεται λεπτομερέστερα στο Κεφάλαιο 12. Το παρόν κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στην πρόωση πλοίων σε ήρεμο νερό και επικεντρώνεται σε μονόγαστρα πλοία εκτοπίσματος. Σε πολύγαστρα σκάφη εκτοπίσματος θα υπάρχει επίδραση τόσο στην αντίσταση τριβής όσο και στην αντίσταση κυματισμού λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο γαστρών (βιβλ. αναφ. 1). Στις ολισθακάτους, στα αερόστρωμνα ή στα υδροπτέρυγα γίνονται ειδικές θεωρήσεις, οι οποίες θα αναφερθούν πολύ σύντομα στο βιβλίο αυτό (Κεφάλαιο 16).

Για τα εμπορικά πλοία, η ταχύτητα που απαιτείται υπαγορεύεται από τις συνθήκες υπηρεσίας. Ένα τέτοιο πλοίο μπορεί να χρειάζεται να ταξιδεύει σε συγκεκριμένα δρομολόγια, όπως ένα κρουαζιερόπλοιο γραμμής, ή να αποτελεί μέρος ενός στόλου που μεταφέρει μια σταθερή ποσότητα φορτίου. Γι' αυτόν το λόγο ο σχεδιαστής πρέπει να μπορεί 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. Το πετρέλαιο είναι επίσης μια πρώτη ύλη με πεπερασμένα φυσικά αποθέματα.

Η ταχύτητα ενός πολεμικού πλοίου καθορίζεται από τις επιχειρησιακές προδιαγραφές. Μια ανθυποβρυχιακή φρεγάτα πρέπει να είναι αρκετά γρήγορη, για να πλησιάσει ένα εχθρικό υποβρύχιο και να το καταστρέψει. Την ίδια στιγμή, υψηλές απαιτήσεις ταχύτητας και κατανάλωσης καυσίμου μπορούν να αντιμετωπιστούν μόνο με μείωση του οπλισμού που φέρει το πλοίο.

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 κατασκευαστεί, από θεωρητικές αναλύσεις ή πειράματα προτύπων.

Γενικά, τα στοιχεία που προκύπτουν από μετρήσεις σε φυσική κλίμακα είναι περιορισμένης χρησιμότητας λόγω της συνεχούς εξέλιξης των πλοίων. Αναφέρουμε δύο παράγοντες: η εισαγωγή των ηλεκτροσυγκολήσεων 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. Προφανώς, η μέθοδος αυτή δεν ισχύει επίσης όταν εισάγεται ένας νέος τύπος πλοίου, όπως τα *δίγαστρα πλοία μικρής ισάλου επιφάνειας* (SWATH, Small Waterplane Area Twin Hull).

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 πειραματιστή μοντέλων και να του δίνει ένα πιο ορθολογικό και επιστημονικό υπόβαθρο στη δουλειά του, να προτείνει ωφέλιμες κατευθύνσεις έρευνας και να υποδεικνύει τη σχετική σπουδαιότητα των διαφόρων παραμέτρων της σχεδίασης.

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

Ένα παράδειγμα των αποτελεσμάτων που μπορεί να βρεθούν από μια προσεκτική μεϊξη θεωρίας και πειραματικών αποτελεσμάτων, παρέχεται από τη λεγόμενη παλινδρομική ανάλυση (regression analysis), η οποία δείχνει επίσης το σημαντικό ρόλο που παίζει σήμερα ο υπολογιστής στο έργο του ναυπηγού. Βασικά, παράγεται μια μαθηματική σχέση για την αντίσταση του πλοίου, συναρτήσει διαφόρων παραμέτρων του πλοίου όπως ο λόγος L/B , το C_p κ.λπ. 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 ανώτερη από αυτές που χρησιμοποιούνται.

Αυτές οι διάφορες θεωρήσεις αναπτύσσονται πιο αναλυτικά αργότερα, όμως είναι απαραίτητο να μελετήσουμε πρώτα κάποιες από τις ιδιότητες των ρευστών στα οποία κινείται το πλοίο. Οι ιδιότητες αυτές είναι θεμελιώδεις για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του πλοίου από το πείραμα σε μοντέλο καθώς και για οποιαδήποτε θεωρητική εξέταση.

Δυναμική ρευστών

Δύο ρευστά απασχολούν το ναυπηγό, ο αέρας και το νερό. Αν δε δηλώνεται διαφορετικά, το ρευστό που αναφέρεται στις ακόλουθες παραγράφους είναι 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 αποτελέ-

σματα να μεταφερθούν σωστά σε φυσική κλίμακα. Η ομοιότητα υπό αυτήν την έννοια απαιτεί το μοντέλο και το πλοίο να έχουν γεωμετρικά όμοιες μορφές (τουλάχιστον στο τμήμα που υπάρχει ροή), 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, ρ
- η επιφανειακή τάση, σ
- η συνεκτικότητα, μ
- η πίεση ατμοποίησης, p_v
- η πίεση περιβάλλοντος στο άπειρο, p_∞
- η ταχύτητα του ήχου στο νερό, a

Οι ποσοτικές τιμές ορισμένων από αυτές τις ιδιότητες αναφέρονται στο Κεφάλαιο 9. Άλλοι παράγοντες που επιδρούν είναι:

ένα τυπικό μήκος, το οποίο είναι συνήθως το βρεχόμενο μήκος L για τους υπολογισμούς της αντίστασης και η διάμετρος της έλικας D για το σχεδιασμό της έλικας:

- ταχύτητα, V
- στροφές της έλικας, n
- αντίσταση, R
- ώση, T
- ροπή, Q
- επιτάχυνση της βαρύτητας, g .

Η *διαστατική ανάλυση* παρέχει έναν οδηγό της μορφής με την οποία οι παραπάνω παράγοντες είναι σημαντικοί. Το θεώρημα Πι δηλώνει ότι η φυσική σχέση μεταξύ των παραπάνω μεγεθών μπορεί να αναπαρασταθεί ως μια σχέση μεταξύ ενός συνόλου αδιάστατων γινομένων 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 τη διαστατική ανάλυση στο πρόβλημα της πρόωσης του πλοίου, μπορεί να δείχτεί ότι

$$\frac{R}{\rho V^2 L^2} = F \left\{ \frac{VL\rho}{\mu}, \frac{V}{\sqrt{(gL)}}, \frac{V}{a}, \frac{\sigma}{\rho L^2}, \frac{p_\infty - p_v}{\rho V^2} \right\}$$

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

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 τιμές των δεδομένων αυτών θα προκύψουν από πειράματα σε διαφορετική κλίμακα, αν οι παράμετροι παραμένουν 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 κάθε μία έχει δοθεί ένα όνομα ως εξής:

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

$\frac{VD\rho}{\mu}$ ή $\frac{VL\rho}{\mu}$ ονομάζεται ο αριθμός Reynolds (ο λόγος μ/ρ ονομάζεται κινηματική συνεκτικότητα και αναπαριστάται με το ν)

$\frac{V}{\sqrt{(gD)}}$ ή $\frac{V}{\sqrt{(gL)}}$ είναι ο αριθμός Froude

$\frac{V}{a}$ είναι ο αριθμός Mach*

$\frac{\sigma}{g\rho L^2}$ είναι ο αριθμός Weber*

$\frac{P_\infty - P_v}{\rho V^2}$ είναι ο αριθμός σπηλαίωσης

$\frac{T}{\rho n^2 D^4} = K_T =$ συντελεστής ώσης

$\frac{Q}{\rho n^2 D^5} = K_Q =$ συντελεστής ροπής

$\frac{V}{nD} = J =$ συντελεστής προχώρησης

Δυστυχώς, δεν είναι δυνατόν να γίνουν πειράματα με μοντέλα στα οποία όλες οι παραπάνω παράμετροι να έχουν τιμές ίδιες με αυτές της φυσικής κλίμακας. Αυτό φαίνεται εύκολα αν μελετήσουμε τους αριθμούς Froude και Reynolds. Καθώς τα ρ , μ , και g είναι σχεδόν ίδια για το μοντέλο και το πλοίο, θα ήταν απαραίτητο τόσο το VL όσο και το $V/\sqrt{L}$ να είναι σταθερά. Αυτό είναι φυσικά αδύνατο. Εφόσον χρησι-

*Οι δύο παραπάνω ποσότητες δεν είναι σημαντικές στο πλαίσιο του βιβλίου αυτού και δε θα μελετηθούν περαιτέρω.

μποποιούσαμε ειδικά υγρά αντί για νερό για δοκιμές σε μοντέλα, θα μπορούσαν να ικανοποιηθούν δύο παράμετροι αλλά όχι όλες.

Ευτυχώς, μπορούν να ληφθούν ορισμένα έγκυρα αποτελέσματα διατηρώντας μία 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 φυσικής ομοιότητας, οι πρώτοι πειραματιστές δε θα είχαν τόσες δυσκολίες στην πρόβλεψη της αντίστασης του πλοίου.

Συνιστώσες αντίστασης και πρόωσης

Είναι απαραίτητο να παρέχεται 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 επι μέρους 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 δε 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 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 (ιπποδύναμη) που είναι γνωστή ως *ισχύς ρυμούλκησης* (effective horsepower, e.h.p.). Η e.h.p. μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί στο ωφέλιμο έργο που παράγεται για την πρόωση του πλοίου.

Η ισχύς που μεταφέρεται στους άξονες για την πρόωση του πλοίου είναι η *ισχύς άξονα* (shaft horsepower, s.h.p.). Ο λόγος μεταξύ της s.h.p. και της e.h.p. είναι μέτρο της ολικής απόδοσης της προωστήριας εγκατάστασης που επιτυγχάνεται και ονομάζεται *συντελεστής πρόωσης* (propulsive coefficient, PC). Ο συντελεστής πρόωσης προκύπτει κατά 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:

- (α) η ισχύς ρυμούλκησης (e.h.p.), ή η αντίσταση της γάστρας
- (β) η έλικα
- (γ) η αλληλεπίδραση έλικας/γάστρας
- (δ) η συσχέτιση μοντέλου/πλοίου

ΙΣΧΥΣ ΡΥΜΟΥΛΚΗΣΗΣ - EFFECTIVE HORSEPOWER (E.H.P.)

Ένας ίππος, (HP) αντιστοιχεί σε ρυθμό παραγωγής 33,000 ft lbf έργου ανά λεπτό ή 550 ft lbf έργου ανά δευτερόλεπτο. Σε μετρικές μονάδες, 1 HP είναι ίσο με 745.7 W (J/s). Όσον αφορά στην πρόωση του πλοίου στο νερό, το «ωφέλιμο» ή «δρων» (effective) έργο είναι αυτό που απαιτείται για την υπερνίκηση της αντίστασης του πλοίου από την ταχύτητα προχώρησης. Η αντίσταση που αναφέρεται θεωρείται κατά σύμβαση ότι είναι αυτή της «γυμνής» γάστρας, δηλ. χωρίς παρελκόμενα. Αυτό μας οδηγεί στον ακόλουθο ορισμό:

Η ισχύς ρυμούλκησης (*effective horsepower*) ενός πλοίου είναι το γινόμενο της (ολικής) αντίστασης της γυμνής γάστρας επί την ταχύτητά της. Δηλώνεται συνήθως, ακόμα και σε μαθηματικές εξισώσεις, με τα αρχικά e.h.p. Οπότε,

$$e.h.p. = R_T \times V$$

Ένας 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' προς την e.h.p. είναι γνωστός ως *Συντελεστής Παρελκομένων*, δηλ.

$$\text{Συντελεστής παρελκομένων} = \frac{e.h.p'}{e.h.p.}$$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1. Στα 825 ft/min η δύναμη έλξης μιας γυμνής γάστρας είναι 8000 lbf. Βρείτε την ισχύ ρυμούλκησης της γάστρας στην ταχύτητα αυτή.

Λύση:

$$e.h.p. = 825 \text{ ft/min} \times 8000 \text{ lbf} \times \frac{1 \text{ h.p.}}{33,000 \text{ ft lbf/min}} = 200$$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2. Ένα αντιτορπιλικό 6000 tonnef αναπτύσσει συνολική ιπποδύναμη 60,000 στους 30 κόμβους. Υποθέτοντας ότι το e.h.p. είναι το 50 τοις εκατό αυτής της συνολικής ισχύος, υπολογίστε την αντίσταση της γυμνής γάστρας.

Λύση:

$$e.h.p. = \frac{1}{2} \times 60,000 = 30,000 \text{ h.p.} = 22.37 \times 10^6 \text{ W}$$

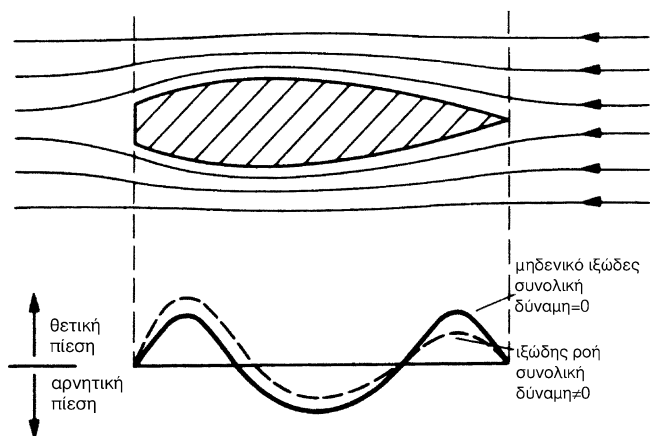
$$\text{Οπότε } 22.37 \times 10^6 \text{ W} = (\text{Αντίσταση}) \text{ Newtons} \times \left(\frac{30 \times 1852}{3600} \right) \text{ m/s}$$

δηλ.

$$\text{Αντίσταση} = 1.449 \times 10^6 \text{ Newtons}$$

ΤΥΠΟΙ-ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Η κλασική υδροδυναμική θεωρία έχει δείξει ότι ένα σώμα βαθιά βυθισμένο σε νερό μηδενικού ιξώδους δεν έχει αντίσταση. Ανεξάρτητα από το πώς εκτρέπονται οι γραμμές ροής καθώς περνούν το σώμα, επιστρέφουν στην αδιατάρακτη κατάσταση πολύ μακριά από αυτό (βλ. Σχ. 10.1) και η συνισταμένη δύναμη που ασκείται στο σώμα είναι μηδέν. Η πίεση στο ρευστό, μεταβάλλεται καθώς εκτρέπονται οι γραμμές ροής και αλλάζουν οι ταχύτητες των σωματιδίων. Σε αυτήν την περίπτωση ισχύει το θεώρημα του Bernoulli, δηλ. ότι αυξημένες ταχύτητες σχετίζονται με ελάττωση της πίεσης. Έτσι, ενώ το σώμα μπορεί να δέχεται δυνάμεις μεγάλου μέτρου, αυτές δρουν έτσι ώστε να αλληλοαναιρούνται.



Σχ. 10.1

Στην πράξη το ρευστό είναι συνεκτικό και ένα βαθιά βυθισμένο σώμα θα παρουσιάζει αντίσταση 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. Το μέτρο της δύναμης αυτής σχετίζεται με την ενέργεια του συστήματος κυμάτων που δημιουργείται.

Η συνολική αντίσταση ενός πλοίου που κινείται σε ήρεμο νερό έχει αρκετές συνιστώσες. Αυτές είναι: η αντίσταση κυματισμού (wave-making resistance), η αντίσταση τριβής (skin frictional resistance), η αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας (viscous pressure resistance), η αντίσταση του αέρα (air resistance), η αντίσταση παρελκομένων (appendage resistance).

Κάθε συνιστώσα θα μελετηθεί ξεχωριστά υπό την προϋπόθεση να θυμόμαστε ότι η κάθε μία αλληλεπιδρά με τις άλλες.

ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ (WAVE-MAKING RESISTANCE)

Είναι γνωστό ότι ένα σώμα που κινείται σε μία κατά τα άλλα αδιατάρακτη 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. Όσον αφορά στο σώμα, η μεταφορά ενέργειας θα εμφανιστεί ως μια δύναμη που αντιτίθεται στην πρόσω κίνηση. Αυτή η δύναμη ονομάζεται *αντίσταση κυματισμού*.

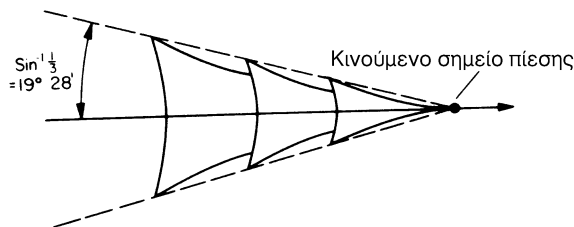
Ένα βυθισμένο σώμα δέχεται επίσης μια αντίσταση λόγω της δημιουργίας κυμάτων στην ελεύθερη επιφάνεια, με το μέτρο της αντίστασης αυτής να ελαττώνεται με την αύξηση του βάθους στο οποίο βρίσκεται το σώμα και γίνεται αμελητέα σε μεγάλο βάθος. Αυτό συνήθως συμβαίνει σε βάθη ίσα περίπου με το ήμισυ του μήκους του σώματος. Μια εξαίρεση σε αυτόν τον γενικό κανόνα ισχύει για υποβρύχια που κινούνται κοντά στη διεπιφάνεια μεταξύ δύο στρωμάτων νερού με διαφορετική πυκνότητα. Σε αυτήν την περίπτωση, δημιουργείται ένα σύστημα κυματισμού στη διεπιφάνεια, με αποτέλεσμα την εμφάνιση μίας δύναμης αντίστασης στο υποβρύχιο.

Ένα κύμα βαρύτητας, μήκους λ , σε βαθύ νερό κινείται με ταχύτητα C , που ορίζεται ως

$$C^2 = \frac{g\lambda}{2\pi}$$

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

Έτσι, μπορούμε να δούμε ότι από τις αδιάστατες παραμέτρους, που μελετήσαμε προηγουμένως, είναι το V^2/gL ή το $V/\sqrt{gL}$ που είναι σημαντικά για τη μελέτη της αντίστασης κυματισμού. Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα της δυναμικής ρευστών, η ποσότητα $V/\sqrt{gL}$ συνήθως ονομάζεται *αριθμός Froude*. Σε πολλές περιπτώσεις, η απλούστερη παράμετρος $V/\sqrt{L}$ χρησιμοποιείται για την γραφική αναπαράσταση αποτελεσμάτων, αλλά αυτή η παράμετρος δεν είναι πλέον αδιάστατη.



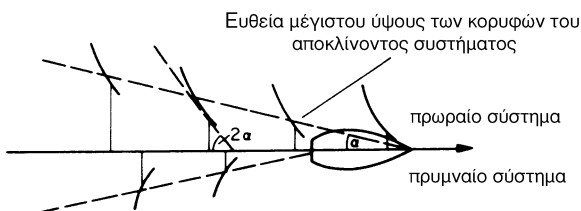
Σχ. 10.2 Σύστημα κυματισμού που δημιουργείται από κινούμενο σημείο πίεσης

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 κύμα αποτελείται από δύο συστήματα. Το ένα σύστημα είναι ένα αποκλίνον σύστημα κυματισμού και το άλλο είναι ένα σύστημα κυμάτων με κορυφές περίπου κάθετες στην πορεία του σημείου πίεσης. Και τα δύο συστήματα κινούνται προς τα εμπρός με την ταχύτητα του σημείου πίεσης. (Σχ. 10.2)

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 προκαλεί κυματισμό παρόμοιο με αυτόν που προκαλεί ένα σημείο πίεσης Kelvin με κορυφή στην πλώρη. Η πρύμνη, από την άλλη, προκαλεί σύστημα κυματισμού με κοιλάδα στην πρύμνη.

Αν η ευθεία του μέγιστου ύψους των κορυφών του αποκλίνοντος συστήματος είναι στο α , τότε οι κορυφές στις θέσεις αυτές περικλείουν γωνία περίπου ίση με 2α ως προς το διαμήκη άξονα συμμετρίας του πλοίου όπως στο Σχ. 10.3.



Σχ. 10.3 Κυματισμοί πλοίου

Τα δύο εγκάρσια συστήματα κυμάτων, δηλ. της πλώρης και της πρύμνης, έχουν μήκος κύματος $2\pi V^2/g$. Τα εγκάρσια κύματα αυξάνονται σε πλάτος, καθώς απλώνονται 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 αποκλίνοντα συστήματα μπορούν να ανιχνευτούν, αν και αυτό της πρύμνης είναι συνήθως πολύ ασθενέστερο από αυτό της πλώρης. Συνήθως το πρυμναίο εγκάρσιο σύστημα δε διακρίνεται, καθώς πίσω από το πλοίο εμφανίζεται μόνο η σύνθεση των δύο συστημάτων.

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

Καθώς στις περισσότερες ταχύτητες εμφανίζονται πίσω από το πλοίο τόσο το πρωραίο όσο και το πρυμναίο σύστημα, υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο ανωτέρω εγκάρσιων συστημάτων κυματισμού. Εάν τα συστήματα έχουν διαφορετά φάσης, τέτοια ώστε να συμπίπτουν οι κορυφές των κυμάτων, το δημιουργούμενο σύστημα θα έχει μεγαλύτερο ύψος και κατά συνέπεια θα περιέχει μεγαλύτερη ενέργεια.

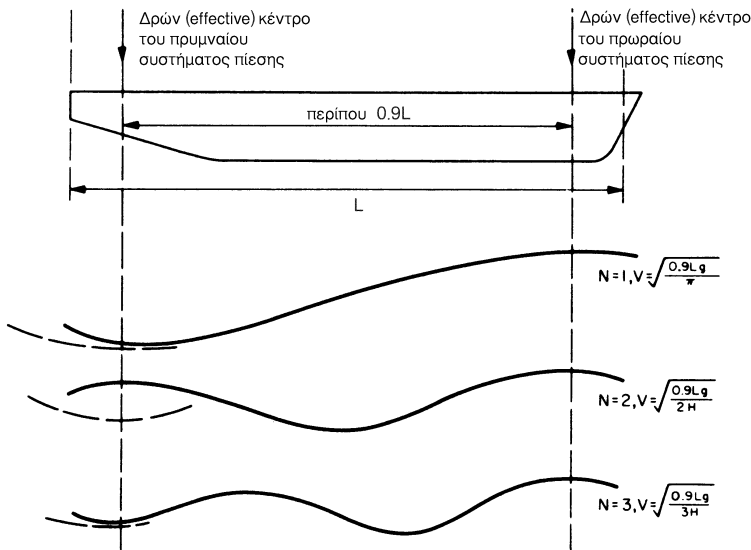
γεια. Εάν η κορυφή του ενός συστήματος συμπίπτει με την κοιλάδα του άλλου, το δημιουργούμενο σύστημα θα έχει μικρότερο ύψος και ενέργεια. Η αντίσταση κυματισμού, η οποία εξαρτάται από την ενέργεια του συνολικού συστήματος κυματισμού, μεταβάλλεται λοιπόν με την ταχύτητα και το ενεργό μήκος (effective length) μεταξύ των συστημάτων πίεσης στην πλώρη και την πρύμνη. Πάλι, οι παράμετροι V και L είναι σημαντικές.

Στη βιβλ. αναφ. 2 μελετάται η επίδραση στην αντίσταση του μήκους του πλοίου, με τη ρυμούλκηση 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 τυπικά $0.9L$. Η συνθήκη ότι οι κορυφές ή οι κοιλάδες του συστήματος της πλώρης συμπίπτουν με την πρώτη κοιλάδα του συστήματος της πρύμνης είναι λοιπόν

$$\frac{V^2}{0.9L} = \frac{g}{N\pi}$$

Για $N = 1, 3, 5, 7$ κ.λπ., οι κοιλάδες θα συμπίπτουν και για $N = 2, 4, 6$ κ.λπ., οι κορυφές του προωραίου συστήματος θα συμπίπτουν με την κοιλάδα του πρυμναίου συστήματος όπως στο Σχ. 10.4.



Σχ. 10.4 Αλληλεπίδραση του προωραίου και πρυμναίου συστήματος κυματισμού

Εάν δεν υπήρχε αλληλεπίδραση μεταξύ του προωραίου και πρυμναίου συστήματος κυματισμών, η αντίσταση θα αυξανόταν σταθερά με την ταχύτητα, όπως φαίνεται στο Σχ. 10.5 (καμπύλη «χωρίς αλληλεπίδραση»). Επειδή όμως η αλληλεπίδραση

