

6. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΗ-ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΣΚΑΦΩΝ

6.1. Αναλυτικοί υπολογισμοί των δυναμικών αποκρίσεων

Η σχεδίαση ενός ταχυπλόου σκάφους με αποκλειστικό στόχο την επίτευξη μεγάλων ταχυτήτων σε ήρεμο νερό, μπορεί να οδηγήσει σε ένα σκάφος που έχει μη αποδεκτή συμπεριφορά ακόμα και σε μέτρια κυματισμένες θάλασσες λόγω ακατάλληλου συνδυασμού φόρτισης και μορφής γάστρας. Επομένως, ο σχεδιαστής πρέπει να βελτιστοποιεί το ταχύπλοο σκάφος ώστε να ικανοποιεί προσδιορισμένες απαιτήσεις λειτουργίας τόσο σε ήρεμο νερό όσο και σε κυματισμούς (Gonzalez, 1989).

Η πολύ γνωστή θεωρία λωρίδων αποτελεί τη βάση των περισσότερων μεθόδων για τον αναλυτικό υπολογισμό της υδροδυναμικής συμπεριφοράς των συμβατικών πλοίων σε κυματισμούς. Η θεωρία αυτή όμως πρέπει να εφαρμόζεται με προσοχή στα ταχύπλοα σκάφη για τους παρακάτω λόγους (βλ. Heather et al, 1978):

1. Στα μικρά ταχύπλοα η μορφή των νομέων μεταβάλλεται γρήγορα κατά μήκος του σκάφους, ενώ η θεωρία λωρίδων θεωρεί ότι κάθε τμήμα του πλοίου συμπεριφέρεται σαν τμήμα ενός πρίσματος απείρου μήκους (διδιάστατο πρόβλημα).
2. Οι επιδράσεις του καθρέφτη της πρύμνης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για τη διόρθωση των αποτελεσμάτων της θεωρίας λωρίδων, αν και στα συμβατικά πλοία, τα αποτελέσματα χωρίς τους όρους που αναφέρονται στη πρύμνη καθρέφτη συγκρίνονται καλύτερα με τα πειράματα.
3. Οι μορφές Lewis προσφέρουν ικανοποιητική αναπαράσταση των νομέων γαστρών με στρογγυλό πυθμένα αλλά δεν μπορούν να καλύψουν μορφές με ακμή.
4. Η αρχή της γραμμικής υπέρθεσης εφαρμόζεται με δυσκολία, ιδιαίτερα, σε μεγάλου πλάτους κινήσεις οπότε βγαίνει η πλώρα από το νερό.
5. Κατά τον υπολογισμό των σχετικών κινήσεων ως προς το κύμα, το σκάφος θεωρείται ότι δεν επηρεάζει το κύμα και έτσι, τα αποτελέσματα είναι αναξιόπιστα πρύμνηθεν του πρωαίου 20% του μήκους του ταχύπλοου σκάφους.
6. Η δυναμική άνωση δεν λαμβάνεται υπόψη στη θεωρία λωρίδων, αλλά παίζει ένα πολύ σημαντικό ρόλο στις υψηλές ταχύτητες.

Σε κάθε περίπτωση, παρά τα παραπάνω προβλήματα, λογικά αποτελέσματα μπορούν να ληφθούν με τη βοήθεια επαρκών διορθώσεων για τους τύπους των

σκαφών και τις καταστάσεις θάλασσας. Οι διορθώσεις αυτές φαίνεται να επεκτείνουν τις υποθέσεις της θεωρίας λωρίδων πέραν των τεθέντων ορίων.

Οπωσδήποτε, η θεωρία λωρίδων χωρίς μετατροπές, μπορεί να εφαρμοστεί με ικανοποιητική ακρίβεια στα σκάφη ημι-εκτοπίσματος που πλησιάζουν πιο πολύ τα συμβατικά. Όσον αφορά τις ολισθακάτους, η εμπειρία των συγγραφέων και η σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με αντίστοιχα πειραματικά, συγκλίνει προς την άποψη ότι:

- για μεν τις ταχύτητες πριν την έναρξη οποιασδήποτε ολίσθησης τα αποτελέσματα της θεωρίας λωρίδων χωρίς μετατροπές είναι ικανοποιητικά.
- για τις μεγαλύτερες ταχύτητες, όπου υπάρχει ολίσθηση, η αριθμητική πρόβλεψη είναι πολύ συντηρητική (περίπου διπλάσια από την αντίστοιχη πειραματική).

6.2. Πειραματικά αποτελέσματα και ημι-εμπειρικές σχέσεις

Το 1966 ο Savitsky παρουσίασε μια ανάλυση πειραματικών αποτελεσμάτων για τη δυναμική συμπεριφορά ταχυπλόων σκαφών σε κυματισμούς. Ο Savitsky κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η συμπεριφορά των ολισθακάτων εμφανίζει δύο όψεις, μία για ταχύτητες με $V \text{ [kn]} / \sqrt{L \text{ [ft]}} < 2.5$ όπου τα σκάφη αυτά συμπεριφέρονται περίπου όπως τα συμβατικά σκάφη εκτοπίσματος και μία για τις υψηλότερες ταχύτητες όπου, τόσο οι κινήσεις τους όσο και η πρόσθετη αντίστασή τους είναι περίπου ανεξάρτητες από την ταχύτητα και από το εάν οι κυματισμοί είναι μετωπικοί ή ακολουθούντες, αλλά εξαρτώνται από το μήκος και το ύψος των κυματισμών. Οι κρουστικές επιταχύνσεις και οι επαγόμενες δυνάμεις αποτελούν σ' αυτή την περίπτωση τον κρίσιμο υδροδυναμικό παράγοντα που αναγκάζει τα σκάφη αυτά να περιορίζουν την ταχύτητά τους σε κυματισμένες θάλασσες.

Ένα άλλο εργαλείο για τη διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς ταχυπλόων σκαφών σε κυματισμούς παρέχεται από το Fridsma (1971), ο οποίος, βασιζόμενος σε πειράματα, ανέπτυξε μια ειδική μέθοδο για την πρόβλεψη των υδροδυναμικής συμπεριφοράς ταχυπλόων σκαφών με ακμή. Οι Savitsky και Brown (1976) παρουσιάζουν μια σύνοψη των ερευνών του Fridsma μαζί με κάποιες απλοποιημένες εκφράσεις για την πρόσθετη αντίσταση και τα κρουστικά φορτία σε κυματισμούς.

Η δυναμική συμπεριφορά των ταχυπλόων σκαφών σε μετωπικούς κυματισμούς βασίζεται κυρίως στην κατακόρυφη κίνηση (heave), τον προνευτασμό (pitch), την

πρόσθετη αντίσταση σε κυματισμούς και τις επιταχύνσεις που προέρχονται από κρουστικά φορτία. Οι τελευταίες είναι και οι πιο σημαντικές αποκρίσεις αυτών των σκαφών. Στη συνέχεια εξετάζονται οι αποκρίσεις αυτές και δίνονται εμπειρικές σχέσεις για την εκτίμηση του μεγέθους των. Επίσης περιγράφεται το φαινόμενο του περιορισμού της πηδαλιουχίας στα κύματα και, τέλος, δίνονται οδηγίες σχεδίασης ταχυπλόων σκαφών για καλή συμπεριφορά σε κυματισμούς.

Κρουστικές επιταχύνσεις σε κυματισμούς

Κατά το Savitsky (1985) η μέση κρουστική επιτάχυνση στο κέντρο βάρους μιας ολισθακάτου N_{CG} , η οποία λειτουργεί σε μετωπικούς τυχαίους κυματισμούς που ακολουθούν το μονο-παραμετρικό μοντέλο των Pierson-Moskowitz, μπορούν να υπολογισθούν από την παρακάτω εμπειρική έκφραση:

$$N_{CG} = \frac{0.1175}{C_{DL}} \left(\frac{H_{1/3}}{B_X} + 0.084 \right) \frac{\tau \left(\frac{5}{3} - \beta \right)}{4} \frac{L_{WL}}{B_X} Fn^2 \quad \dots (6.1)$$

όπου :

N_{CG} = η μέση επιτάχυνση στο κ. βάρους [g]

C_{DL} = ο συντελεστής φορτίσεως, $C_{DL} = \nabla/B_X^3$

B_X = το πλάτος

τ = η γωνία δυναμικής διαγωγής

β = η γωνία ανύψωσης πυθμένα

$H_{1/3}$ = το σημαντικό ύψος κύματος

Η ακρίβεια της έκφρασης (6.1) είναι της τάξης του 0.2g. Με την ίδια ακρίβεια μπορεί να υπολογιστεί η μέση κρουστική επιτάχυνση στη πλώρα N_{BOW} από τη σχέση:

$$N_{BOW} = N_{CG} \left[1 + 1.13 \frac{\left(\frac{L_{WL}}{B_X} - 2.25 \right)}{Fn} \right] \quad \dots (6.2)$$

Με βάση τη μέση τιμή των επιταχύνσεων μπορούν να υπολογισθούν άλλα στατιστικά μεγέθη όπως:

$$N^{1/n} = N [1 + \ln(n)] \quad \dots (6.3)$$

$$P[N > N_{sp}] = \exp[-N_{sp}/N] \quad \dots (6.4)$$

όπου:

$N^{1/n}$ = η μέση τιμή του $1/n$ υψηλότερων τιμών

$P[N > N_{sp}]$ = η πιθανότητα το N να υπερβαίνει δεδομένη τιμή N_{sp} .

Από την εξέταση των παραπάνω εκφράσεων μπορούν να συναχθούν μερικά χρήσιμα συμπεράσματα :

1. Όταν μειώνεται η γωνία ανύψωσης του πυθμένα, οι κρουστικές επιταχύνσεις αυξάνονται.
2. Οι κρουστικές επιταχύνσεις αυξάνονται γραμμικά με την αύξηση της δυναμικής διαγωγής.
3. Οι κρουστικές επιταχύνσεις μειώνονται με το πλάτος του σκάφους.
4. Για σταθερό εκτόπισμα και αριθμό F_n , αύξηση του λόγου L_{WL}/B_X οδηγεί σε μείωση του πλάτους, το οποίο με τη σειρά του αυξάνει το συντελεστή C_{DL} σύμφωνα με τον κύβο του αυξανόμενου λόγου L_{WL}/B_X . Έτσι προκύπτει μείωση του κρουστικού φορτίου.
5. Οι επιταχύνσεις αυξάνονται με το τετράγωνο της ταχύτητας και είναι ανάλογες με το σημαντικό ύψος του κυματισμών $H_{1/3}$.

Το φαινόμενο της σφυρόκρουσης του πυθμένα (bottom slamming) που εμφανίζεται όταν ο πυθμένας της πλώρας του σκάφους, η οποία προηγουμένως έχει βγει από το νερό, επανεισέρχεται σ' αυτό με ικανή ταχύτητα, επηρεάζει αποφασιστικά την εκλογή των διαστάσεων των ενισχυτικών στοιχείων του πυθμένα. Οι γάστρες με στρογγυλό πυθμένα εμφανίζουν το φαινόμενο της σφυρόκρουσης του πυθμένα σε μικρότερη έκταση απ' ότι οι ολισθακάτοι. Η γωνία ανύψωσης του πυθμένα παίζει ένα πολύ σημαντικό ρόλο στην ένταση του φαινομένου. Πιέσεις μέχρι 4 Kg/cm^2 έχουν μετρηθεί στον πυθμένα ολισθακάτων. Επί πλέον, δεδομένου ότι η διαγωγή επηρεάζει ουσιαστικά την κρουστική επιτάχυνση, τα κινητά πτερύγια της πρύμνης μπορούν να είναι πολύ αποτελεσματικά στη μείωση της σφυρόκρουσης των ταχυπλόων σκαφών.

Πρόσθετη αντίσταση σε κυματισμούς

Επί πλέον των κρουστικών επιταχύνσεων, είναι ουσιαστικό προσόν των ταχυπλόων σκαφών να διατηρούν την απώλεια ταχύτητας στους κυματισμούς σε

αποδεκτά επίπεδα.

Ο Calkins (1983) δίνει την παρακάτω έκφραση για μια χονδρική εκτίμηση της πρόσθετης αντίστασης R_{AW} μιας ολισθακάτου σε τυχαίους κυματισμούς:

$$R_{AW}/\Delta = 1.3 (H_{1/3}/B_{PX})^{0.5} (L_P/V^{1/3})^{-2.5} F_V \quad \dots(6.5)$$

όπου:

B_{PX} = μέγιστο πλάτος στην ακμή

L_P = προβεβλημένο μήκος της ακμής του σκάφους.

Οι Savitsky και Brown (1976) δίνουν τις παρακάτω πιο λεπτομερείς εκφράσεις για την πρόσθετη αντίσταση ολισθακάτων σε τρεις διαφορετικές ταχύτητες (συντελεστές Taylor $V [kn] / \sqrt{L [ft]} = 2, 4$ και 6). Οι δύο πρώτες από αυτές τις σχέσεις έχουν ακρίβεια της τάξης του $\pm 20\%$ ενώ η τρίτη έχει ακρίβεια $\pm 10\%$.

1. Κατάσταση πριν το τοπικό μέγιστο της καμπύλης αντίστασης όπου κυριαρχούν οι στατικές ανωστικές δυνάμεις και υπάρχει σημαντική διαβροχή πάνω από την ακμή. Το σκάφος συμπεριφέρεται σαν σκάφος εκτοπίσματος ($F_n = 0.595$), και η γωνία ανύψωσης του πυθμένα δεν επηρεάζει την πρόσθετη αντίσταση:

$$R_{AW}/(\rho g B_{PX}^3) = 0.0043 (\tau - 4) + 66 \cdot 10^{-6} (H_{1/3}/B_{PX}) + 0.50 (L_{WL}/B_{PX})^3 / C_{DL} \quad \dots(8.4)$$

2. Κατάσταση μετά το τοπικό μέγιστο της καμπύλης αντίστασης όπου οι στατικές και οι δυναμικές ανωστικές δυνάμεις είναι αντιστοίχου μεγέθους ($F_n = 1.190$), ενώ ο λόγος μήκους προς πλάτος δεν επηρεάζει την πρόσθετη αντίσταση:

$$R_{AW}/\Delta = 0.3 (1.76 - \tau/6 - 2 \tan^3 \beta) (H_{1/3}/B_{PX}) / [1 + 2 (H_{1/3}/B_{PX})] \quad \dots(8.5)$$

3. Κατάσταση ολίσθησης όπου κυριαρχούν οι δυναμικές ανωστικές δυνάμεις ($F_n = 1.785$), και η δυναμική διαγωγή δεν επηρεάζει την πρόσθετη αντίσταση:

$$\frac{R_{AW}}{\rho g B_{PX}^3} = \frac{0.158 \left(\frac{H_{1/3}}{B_{PX}} \right)}{1 + \left(\frac{H_{1/3}}{B_{PX}} \right) \left[0.12\beta - 21C_{DL} \left(5.6 - \frac{L_{WL}}{B_{PX}} \right) + 7.5 \left(6 - \frac{L_{WL}}{B_{PX}} \right) \right]} \quad \dots(8.6)$$

Ας σημειωθεί ότι η βάση δεδομένων για την εξαγωγή των παραπάνω σχέσεων περιελάμβανε τις παρακάτω περιοχές τιμών (παρεκβολή στις παραμέτρους της βάσης δεδομένων πρέπει, γενικά, να αποφεύγεται) :

$$L_{WL}/\nabla^{1/3} = 4.8 \div 6.6$$

$$L_{WL}/B_{PX} = 3.0 \div 5.0$$

$$\tau = 3.0^\circ \div 7.0^\circ$$

$$\beta = 10^\circ \div 30^\circ$$

$$H_{1/3}/B_{PX} = 0.2 \div 0.7$$

Σοβαρό μειονέκτημα των παραπάνω ημι-εμπειρικών τύπων είναι ότι βασίζονται σε πειραματικά αποτελέσματα με πρισματικές γάστρες. Σήμερα, όμως, οι περισσότερες γάστρες που κατασκευάζονται εμφανίζουν αυξανόμενη γωνία ανύψωσης του πυθμένα από την πρύμνη προς την πρόρα. Επομένως, τίθεται το ερώτημα επιλογής της γωνίας ανύψωσης πυθμένα και του πλάτους στην ακμή με τα οποία θα κάνουμε τους υπολογισμούς. Συνήθως χρησιμοποιείται η μέση γωνία ανύψωσης και το μέσο πλάτος στην ακμή στο 70% του μήκους του σκάφους από την πρύμνη.

6.3. Κινήσεις ταχυπλόων σκαφών

Οι κινήσεις των ταχυπλόων σκαφών στα κύματα πρέπει να κρατηθούν σε χαμηλά επίπεδα, έτσι ώστε να είναι αποδεκτές οι συνθήκες διαβίωσης των επιβατών (habitability), και τα σκάφη αυτά να αποτελούν μια ευσταθή πλατφόρμα για τα οπλικά συστήματα.

Οι κινήσεις διατοιχισμού (roll) μπορούν να μειωθούν, στην περιοχή ταχυτήτων πριν την ολίσθηση και πάνω από τους 10 kn, με την αύξηση της υδροδυναμικής απόσβεσης διατοιχισμού που είναι εγγενώς μικρή ακόμη και για γάστρες με ακμή, με τη βοήθεια ενεργών αντιδιατοιχιστικών πτερυγίων. Η απώλεια ταχύτητας λόγω της πρόσθετης αντίστασης των πτερυγίων είναι εύκολα αποδεκτή υπό το φως της άνεσης που προσφέρουν. Επίσης, στις ταχύτητες ολίσθησης, τα πτερύγια αυτά μπορούν να αποσύρονται ώστε να απαλείφεται η συνιστώσα αντίστασης που δημιουργούν.

Η κατακόρυφη κίνηση και ο προνευτασμός ολισθακάτων παίρνουν τις μεγαλύτερες τιμές τους στις ταχύτητες όπου συμπεριφέρονται σαν γάστρες εκτοπίσματος και η περίοδος συνάντησης του κύματος συμπίπτει με τη φυσική περίοδο σε κατακόρυφη κίνηση και/ή προνευτασμό, οπότε το σκάφος τείνει να

ακολουθήσει το περίγραμμα του κύματος. Στις ταχύτητες ολίσθησης, όταν το σκάφος κινείται πάνω στις κορυφές του κύματος, οι κινήσεις είναι κατά προσέγγιση σταθερές με την ταχύτητα και, κατά το μάλλον ή ήττον, οι μισές σε μέγεθος από τις αντίστοιχες όταν το σκάφος πλέει σε ταχύτητες όπου κυριαρχεί το εκτόπισμα. Σ' αυτή την περίπτωση, οι κινήσεις φαίνεται ότι γίνονται μέγιστες όταν τα μήκη κύματος είναι διπλάσια ή τριπλάσια του μήκους του σκάφους, ενώ είναι σημαντικά μειωμένες για μήκη κύματος μικρότερα από το μισό του μήκους του σκάφους.

Εκτός από τα μονόγαστρα ταχύπλοα με τα οποία ασχοληθήκαμε κυρίως στο κεφάλαιο αυτό, σημαντικό μερίδιο στην αγορά ταχυπλόων έχουν καταλάβει τα δίγαστρα και διάφορες καινοτόμες παραλλαγές τους (waverpiercer, SES, Semi-SWATH) καθώς και υδροπτέρυγα είναι σε λειτουργία στις Ευρωπαϊκές θαλάσσιες οδούς. Για την αναλυτική εκτίμηση της δυναμικής συμπεριφοράς των σκαφών αυτών χρησιμοποιούνται συνήθως μέθοδοι βασισμένη στη θεωρία λωρίδων που παρέχουν τους υδροδυναμικούς συντελεστές για επίλυση στο πεδίο του χρόνου. Στη διατύπωση των εξισώσεων αυτών μοντελοποιούνται, έστω και με εμπειρικές μεθόδους, όλα τα φαινόμενα που επηρεάζουν ουσιαστικά τη συμπεριφορά των σκαφών αυτών, όπως π.χ. η άνωση από τα πτερύγια των υδροπτερυγών.

6.4. Περιορισμός της πηδαλιουχίας (broaching)

Τα συμβατικά σκάφη όταν πλέουν σε ακολουθούσες θάλασσες (following seas) είναι πιθανό να εμφανίσουν προβλήματα στην πηδαλιουχία. Σε δύσκολες καταστάσεις θάλασσας το πλοίο τείνει να περιστραφεί κατά μεγάλες γωνίες (yaw), από την ακολουθούμενη πορεία του, και έτσι να αναπτύξει μεγάλες γωνίες διατοιχισμού.

Τα παραπάνω φαινόμενα γίνονται πιο σοβαρά όταν το πλοίο βρεθεί πάνω σε κύμα και παρασυρθεί με την ταχύτητα περίπου του κύματος. Αυτό συμβαίνει διότι στη φάση της καθόδου του πλοίου, από την κορυφή του κύματος στην κοιλάδα, μέρος του πηδαλίου είναι έξω από το νερό και η αποτελεσματικότητά του είναι περιορισμένη. Επί πλέον, όταν το μέσον ενός σκάφους βρεθεί στην κορυφή του κύματος η εγκάρσια ευστάθειά του είναι μειωμένη κατά ένα ποσοστό.

Το πρόβλημα του περιορισμού της πηδαλιουχίας είναι εντονότερο στα ταχύπλοα σκάφη. Όταν κλίνουν, κατά την κάθοδό τους από την κορυφή του κύματος, επιταχύνουν και πέφτουν στο επόμενο κύμα όπου εισχωρούν. Εκείνη τη στιγμή το κύμα που ακολουθεί προσβάλλει την πρύμνη του σκάφους. Δεδομένου ότι το πρυμναίο τμήμα του σκάφους είναι συνήθως πολύ πλατύτερο από το πρωαίο, η

πρύμνη ανασηκώνεται στη κορυφή του ακολουθούντος κύματος, ενώ η πρόρα εισχωρεί ακόμη περισσότερο στο προπορευόμενο κύμα.

Οι διαφορετικές κατευθύνσεις των τροχιακών ταχυτήτων των μορίων του νερού, στις κορυφές και στις κοιλάδες του κύματος, και η διαφορά πίεσης που προέρχεται από το διαφορετικό ύψος του κύματος στις δύο πλευρές του σκάφους, στις πλευρικές ακολουθούσες θάλασσες (quartering seas), περιορίζουν ακόμη περισσότερο την πηδαλιουχία.

Τα ταχύπλοα σκάφη με στρογγυλό πυθμένα πρέπει να έχουν λεπτές γραμμές στο προωαίο τμήμα, για μείωση της αντίστασης, της διαβροχής του καταστρώματος και των κρουστικών επιταχύνσεων, καθώς επίσης γεμάτους και επίπεδους νομείς στο πρυμναίο τμήμα για να αποφεύγει τη βύθιση της πρύμνης (squat). Επομένως, αυτός ο τύπος σκαφών έχει αξιοσημείωτη τάση να χάνει μέρος της ικανότητας πηδαλιούχησης σε ακολουθούσες θάλασσες. Αυτή η τάση μπορεί να περιοριστεί με την προσθήκη μιας ακμής στο προωαίο τμήμα και πάνω από την ίσαλο και με την αύξηση της αδράνειας ως προς την περιστροφή του σκάφους, περί κατακόρυφο άξονα με την επίτευξη και διατήρηση της βέλτιστης γωνίας δυναμικής διαγωγής. Σε κάθε περίπτωση, η μείωση της ταχύτητας είναι ο απλούστερος τρόπος για την αποφυγή του φαινομένου αυτού.

Οι γάστρες με ακμή, με γεμάτη πρόρα, έντονη κλίση των πλευρών του σκάφους, πάνω από την ακμή προς τα έξω (flare), και κάπως στενούς πρυμναίους νομείς έχουν μικρότερη τάση περιορισμού της πηδαλιουχίας τους από τις γάστρες με στρογγυλό πυθμένα.