

1

Σκοπός και Περιγραφή του έργου

Κατανόηση των τρόπων ανατροπής σε πλάγιες θάλασσες.

Ανάπτυξη μιας διαδικασίας εκτίμησης της δυναμικής ευστάθειας ενός πλοίου σε πλάγιες θάλασσες, η οποία περιλαμβάνει:

1. Κατασκευή μαθηματικού μοντέλου που περιγράφει το συζευγμένο με τις κινήσεις heave και sway διατοχισμό (roll) υπό την επίδραση απλών αρμονικών κυματισμών που διαδίδονται κάθετα στο διαμήκη άξονα του πλοίου.
2. Διερεύνηση παραγόντων που επιδρούν στο διατοχισμό. Προσδιορισμός επικίνδυνων καταστάσεων θάλασσας.
3. Χρήση αναλυτικών/ γεωμετρικών μεθόδων και της θεωρίας ευστάθειας δυναμικών συστημάτων για την μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς του πλοίου.
4. Συνδυασμός των παραπάνω υστερησιαστικών προσεγγίσεων με την χρήση της σταochαστικής μοντελοποίησης των θαλάσσιων κυματισμών και ιδιαίτερα των ομάδων κύματος (wave groups) για την εύρεση της πιθανότητας ανατροπής και την γενικότερη αντιμετώπιση του προβλήματος στο πλαίσιο μεθοδολογίας εκτίμησης διακινδύνευσης (risk assessment).

Οι κίνδυνοι ανατροπής σε πλάγιες θάλασσες

- Έντονος διατοχισμός αν η συχνότητα των κυμάτων βρίσκεται κοντά στην ιδιοσυχνότητα διατοχισμού του πλοίου.
- Αυξημένος κίνδυνος μετατόπισης φορτίου λόγω μεγάλων γωνιακών επιταχύνσεων.
- Μεγάλα κύματα που σπάνε στην πλευρά του πλοίου.
- Δυσμενής επίδραση λόγω ύπαρξης νερού στο κατάστρωμα ή βύθιση της άκρης του καταστρώματος.

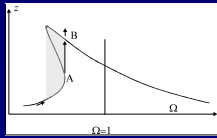
Συμπέρασμα: Ανάγκη κατανόησης των περιπλοκών δυναμικών φαινομένων αλλά και σύνθετης λεπτομερούς μοντελοποίησης.

Μη Γραμμικά Δυναμικά Συστήματα

Η μη γραμμική δυναμική του διατοχισμού έχει μελετηθεί διεξοδικά στο παρελθόν χρησιμοποιώντας σχετικά απλά συστήματα ενός βαθμού ελευθερίας. Τα πιο ενδιαφέροντα φαινόμενα που συνδέονται και με την ανατροπή ενός πλοίου είναι:

- Υπαρξη περισσότερων των μίας απόκρισης για τις ίδιες παραμέτρους του συστήματος.
- Απότομα άλματα στο πλάτος τις απόκρισης λόγω μικρών μεταβολών σε παραμέτρους του συστήματος.
- Ξαφνική απόλεια της ευστάθειας για μικρή αύξηση της διέγερσης.
- Ευαίσθητη εξάρτηση από τις αρχικές συνθήκες.

Ωστόσο το μοντέλο ενός βαθμού ελευθερίας υποθέτει ότι το πλοίο ακολουθεί την κυκλική τροχιά των μορίων του νερού (long wave assumption), το οποίο δεν ισχύει όταν η κλίση του κύματος γίνει αρκετά απότομη και όταν τα κύματα είναι πιο «κοντά» σε σχέση με το πλάτος του πλοίου κάτι που οδηγεί στην ανάγκη του συζευγμένου μοντέλου διατοχισμού.

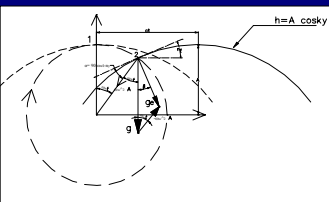


2

Εξέταση της δράσης επιτάχυνσης της βαρύτητας και περιορισμοί

Γενικά

Η υπόθεση ότι ένα σώμα ακολουθεί την κυκλική τροχιά των μορίων του νερού σημαίνει ότι στο σώμα δρα μια μεταβαλλόμενη χρονικά επιτάχυνση της βαρύτητας $g_e(t)$, η οποία είναι πάντα κάθετη στην κλίση του κύματος. Στην συνέχεια θα εξετάσουμε την ισχύ της υπόθεσης όταν μεταβάλλονται η κλίση του κύματος και το μήκος του.



Ανάλυση

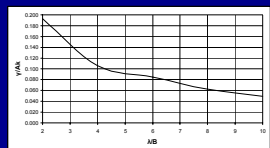
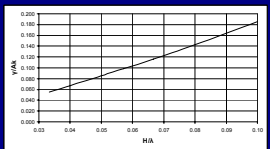
Σύμφωνα με το διπλανό σχήμα για να ισχύει η καθετότητα μεταξύ της κλίσης του κύματος η και της δράσης επιτάχυνσης της βαρύτητας $g_e(t)$, πρέπει:

$$\gamma = \beta - \eta_\gamma = 0$$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{\omega^2 A \sin(\omega_e t)}{\sqrt{g^2 + A^2 \omega^4 - 2gA\omega^2 \cos(\omega_e t)}}\right)$$

$$\eta_\gamma = A \frac{\omega^2}{g} \sin(\omega_e t)$$

$$g_e = g - A\omega^2 \cos(\omega_e t)$$



Η γωνία γ χαρακτηρίζει το σφάλμα της υπόθεσης της καθετότητας. Στις επόμενες γραφικές παραστάσεις φαίνεται η μεταβολή της γωνίας γ (ως ποσοστό της κλίσης του κύματος Ak) με την μεταβολή του H/λ και του λ/B .

Συμπέρασμα

Για μεγάλες σχετικά τιμές του H/λ και μικρές του λ/B το σφάλμα όσον αφορά την καθετότητα δεν είναι αμελητέο (έως και 20% του Ak).

3

Ανάπτυξη συζευγμένου μαθηματικού μοντέλου

Σκοπός

Η προσομοίωση του συζευγμένου διατοχισμού υπό την επίδραση αρμονικών κυματισμών.

Σύστημα εξισώσεων

Sway: $m(\ddot{v} - \dot{\phi}w) = \sum F_y$

Heave: $m(\ddot{w} + \dot{\phi}v) = \sum F_z$

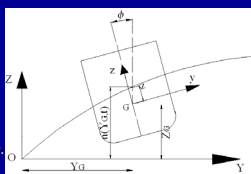
Roll: $I_G \ddot{\phi} = \sum M_G$

$$\begin{pmatrix} \ddot{Y}_G \\ \ddot{Z}_G \\ \ddot{\phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\phi & -\sin\phi & 0 \\ \sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ w \\ \phi \end{pmatrix}$$

OYZ και Gyz: Ακίνητο και κεντροβαρικό σύστημα αξόνων αντίστοιχα.

V, W και ϕ : εγκάρσια, κάθετη και περιστροφική ταχύτητα ως προς το Gyz σύστημα αξόνων.

$\sum F_y, \sum F_z$ και $\sum M_G$ είναι οι συνολικές δυνάμεις και η ροπή ως προς το κ. Βάρους G του πλοίου.



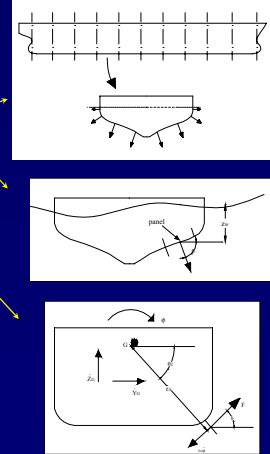
Δυνάμεις

$$\sum F = F_{Hy} + F_W^{FK} + F_W^D + F_R + F_V$$

F_W^D : Δυνάμεις Περιθλάσης (Diffraction forces).
 F_R : Δυνάμεις Ακτινοβολίας (Radiation forces).
 F_V^{FK} : Δυνάμεις Froude - Krylov. F_V : Δυνάμεις συνεκτικότητας (viscous forces).

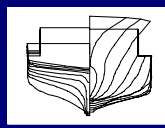
Περιγραφή του κώδικα για τον υπολογισμό των δυνάμεων και την επίλυση του συστήματος

- Ο κώδικας έχει γραφτεί σε περιβάλλον Mathematica.
- Τα δεδομένα του κώδικα είναι η γεωμετρία της γάστρας, τα χαρακτηριστικά του κύματος, η μάζα του πλοίου και η κατανομή της.
- Δημιουργία panels, όπου υπολογίζονται στο μέσο τους για κάθε χρονική στιγμή οι στατικές και οι δυναμικές πιέσεις από την στιγμή ανύψωση του κύματος καθώς και η γωνία που σχηματίζει το κάθετο δίνοντας προς το panel με το οριζόντιο επίπεδο (βλ. σχήματα).
- Με ολοκλήρωση στην στιγμή μιας βρεγμένη επιφάνεια υπολογίζονται οι μη γραμμικές υδροστατικές δυνάμεις και οι μη γραμμικές δυνάμεις Froude-Krylov.
- Ο υπολογισμός των δυνάμεων συνεκτικότητας (δυνάμεις τριβής, δυνάμεις λόγω παρατροπιδίων και δυνάμεις λόγω δημιουργίας δινών) βασίζεται στον υπολογισμό των σχετικών ταχυτήτων σε διάφορα σημεία της γάστρας, δηλαδή λαμβάνεται υπόψη η λεπτομερής γεωμετρία της γάστρας.
- Οι δυνάμεις ακτινοβολίας, αν και έχουν μοντελοποιηθεί με συνελκτικά ολοκληρώματα λόγω «φαινομένων μήλης», υπολογίζονται μέσω των σταθερών συνελεστών υδροδυναμικής απόσβεσης και πρόσθετης μάζας. Στο επόμενο στάδιο θα υπολογίζονται επίσης και οι δυνάμεις περιθλάσης.
- Η επίλυση γίνεται με σύστημα αριθμικό συνήθων διαφορικών εξισώσεων, μορφή η οποία διευκολύνει περαιτέρω ανάλυση με αλγόριθμους μη γραμμικών δυναμικών συστημάτων (continuation methods).

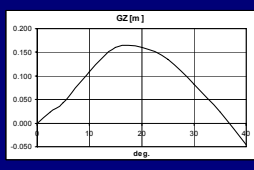


4 Εφαρμογή/ Αποτελέσματα

Για εφαρμογή χρησιμοποιήσαμε ένα αλιευτικό σκάφος (purse-seiner) με τα εξής χαρακτηριστικά



L_{pp} (μήκος)	34.5 m
B (πλάτος)	7.60 m
D (κούβλα)	3.07 m
T (μήκος μίσυ)	2.65 m
C_b	0.597
KG (κάθετη θέση του κέντρου βάρους)	3.36 m
GM (μετακέντρο μετρήσιμ)	0.75 m
T_p (διάρκεια διατοχισμού)	9.7 s
Πλάτος παρατροπιδίων	0.35 m
Μήκος παρατροπιδίων	14.82 m

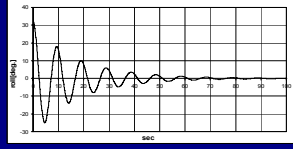


Πλάτος των γραμμών του σκάφους.

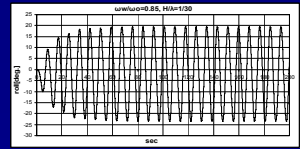
Βασικές διαστάσεις και χαρακτηριστικά.

Η καμπύλη του μαχλοβραχίονα επαφώρας σε ήρεμο νερό υπολογισμένη με τον αριθμητικό κώδικα.

Εξέταση της δυναμικής ευστάθειας



Αριθμητική προσομοίωση ελεύθερου διατοχισμού από «μεγάλη» γωνία.



Αριθμητική προσομοίωση διατοχισμού κοντά στην ιδιοσυχνότητα.

Επίδραση της «εξύψισης» H/λ του κύματος στην απόκριση του διατοχισμού.

Επίδραση της «εξύψισης» H/λ του κύματος στη μόνιμη κλίση του διατοχισμού.

Παράδειγμα αξιολόγησης της δυναμικής συμπεριφοράς

1. Ορισμός ανεπιθύμητων καταστάσεων
Η γωνία διατοχισμού να είναι μεγαλύτερη από 20° στην μόνιμη κατάσταση.
2. Εύρεση χαρακτηριστικών του κρίσιμου ύψους κύματος.
Με χρήση του αριθμητικού κώδικα χρειάζονται εφτά κορυφές κύματος με ύψος $H_w = 3.973$ m και περίοδο κύματος $T_w = 8.7$ sec (βλ. χρονική ιστορία με $H/\lambda = 1/30$ και $\omega_w/\omega_s = 0.85$).
3. Υπολογισμός της πιθανότητας συνάντησης μιας ομάδας κύματος με το προδιαγραμμένα χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα υποθέτουμε ότι το διαδοχικό ύψος κύματος ακολουθούν την κατανομή Rayleigh, τότε η πιθανότητα συνάντησης μιας ομάδας κύματος με διαδοχικό ύψος κύματος μεγαλύτερο από H_w , θα υπολογίζεται σύμφωνα με τους επόμενους τύπους, όπου p_{RH} και p_{H2} οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας Rayleigh από κοινού δύο και μιας μεταβλητής αντίστοιχα.

$$P[H_1 \geq H_w, H_2 \geq H_w] = \frac{\int_{H_w}^{\infty} \int_{H_w}^{\infty} p_{RH}(H_1, H_2) dH_1 dH_2}{\int_{H_w}^{\infty} p_{RH}(H) dH}$$

$$p_{RH}(H_1, H_2) = \frac{4H_1 H_2}{(1 - k^2)^2 H_{rms}^2} e^{-\frac{(H_1^2 + H_2^2)}{(1 - k^2)^2 H_{rms}^2}} \int_0^{\infty} \frac{2kH_1 H_2}{(1 - k^2)^2 H_{rms}^2} e^{-\frac{H^2}{(1 - k^2)^2 H_{rms}^2}} dH$$

$$p_{RH}(H) = \frac{2H}{H_{rms}^2} e^{-\frac{H^2}{H_{rms}^2}}$$

Με χρήση, για παράδειγμα, του φάσματος της I.T.T.C για $H_s = 3$ m, προκύπτει:
 $P[H_1 \geq H_w, H_2 \geq H_w] = 0.103$ και με υπόθεση του Markov chain
 $P[H_1 \geq H_w, H_2 \geq H_w, \dots, H_7 \geq H_w] = 1.06 \cdot 10^{-6}$

5

Συμπεράσματα

- Απότομη αύξηση του διατοχισμού μετά από κάποια τιμή του H/λ .
- Υπαρξη σχετικά μεγάλης μη μόνιμης κλίσης προς την πλευρά του κύματος. Επίδραση των μη γραμμικών δυνάμεων Froude - Krylov.
- Η αύξηση του αριθμού των απαιτούμενων κορυφών μειώνει σημαντικά την πιθανότητα συνάντησης της ομάδας κύματος.

Προτάσεις

- Βελτίωση του αριθμητικού κώδικα ώστε να περιλαμβάνει και άλλα φαινόμενα (δυνάμεις περιθλάσης, κυματισμούς θραύσης).
- Χρήση αναλυτικών/ γεωμετρικών μεθόδων για την συμπληρωματική μελέτη της δυναμικής ευστάθειας παράλληλα με την χρήση του αριθμητικού κώδικα.
- Χρήση κατάλληλων συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας που να λαμβάνουν υπόψη και την περίοδο των συνεχόμενων κορυφών.

Δημοσιεύσεις / παρουσιάσεις σε συνέδρια

To be presented at the 16th International Conference on Hydrodynamics in Ship Design, Poland, September 2005.

Themelis, N. & Spyrou, K., "A coupled heave-sway-roll model for the analysis of large amplitude ship rolling and capsizing of ships in beam seas on the basis of a nonlinear dynamics approach".