

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Σταθεροποίηση του διατοιχισμού

3.1 Μείωση των κινήσεων

Εφόσον οι ταλαντωτικές κινήσεις είναι ανεπιθύμητο χαρακτηριστικό για ένα πλοίο που βρίσκεται σε κυματισμούς, είναι φυσικό να αναζητούμε τρόπους για τη μείωση τους. Ο όρος ‘σταθεροποίηση’ (stabilization), υποδηλώνει μια αύξηση των συντελεστών ακαμψίας όπως του C_{44} , αλλά σχεδόν κάθε πρακτικό τέχνασμα σταθεροποίησης των κινήσεων οφείλει την επίδραση του στην αύξηση της απόσβεσης των κινήσεων (συντελεστής B_{44}). Έτσι τα συστήματα αυτά θα έπρεπε πιο σωστά να καλούνται αποσβεστήρες κινήσεων. Πάντως ο όρος ‘σταθεροποίηση’ χρησιμοποιείται ευρέως. Επιπλέον εάν η απόσβεση είναι πολύ μικρή το πλάτος της απόκρισης του συστήματος είναι πολύ υψηλό για συχνότητες πολύ κοντά στη φυσική συχνότητα. Σε τυχαίες διεγέρσεις (όπως στην περίπτωση ενός πλοίου στην θάλασσα), οι περισσότερες από τις επαγόμενες κινήσεις θα είναι εμπειρικά σε συχνότητες κοντά στη φυσική συχνότητα.

Η σταθεροποίηση των κινήσεων είναι πιθανότατα αποτελεσματική εάν η υπάρχουσα απόσβεση του ασταθούς συστήματος είναι μικρή. Πρακτικές θεωρήσεις επίσης απαιτούν ότι η δύναμη απόσβεσης ή η ροπή που απαιτείται για τη σταθεροποίηση του συστήματος πρέπει να είναι σχετικά μικρή έτσι ώστε ένας σημαντικός βαθμός σταθεροποίησης να μπορεί να επιτευχθεί χωρίς τη χρήση ογκώδους μηχανισμού.

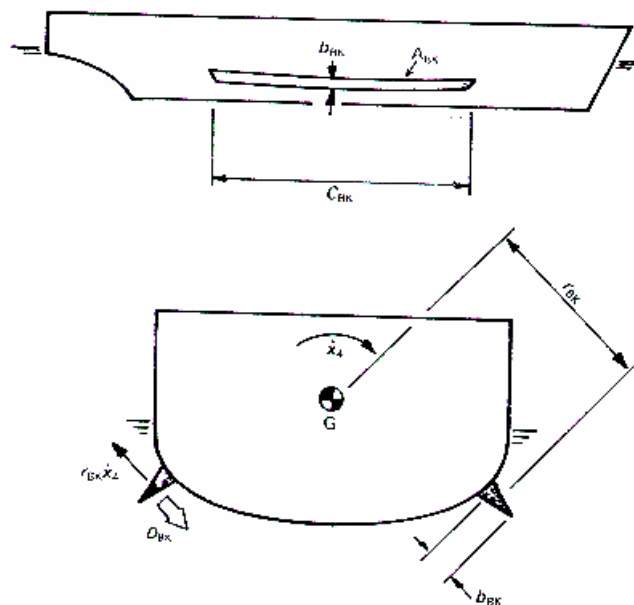
Ο διατοιχισμός είναι η μόνη κίνηση η οποία ικανοποιεί τις δύο αυτές απαιτήσεις, της χαμηλής υπάρχουσας απόσβεσης και της σχετικά μικρής απαιτούμενης ροπής σταθεροποίησης. Έτσι η σταθεροποίηση του διατοιχισμού τράβηξε την ιδιαίτερη προσοχή των μηχανικών και αρκετά επιτυχημένα συστήματα έχουν εγκατασταθεί σε πλοία που βρίσκονται σε λειτουργία.

Η σταθεροποίηση του προνευτασμού και της κατακόρυφης κίνησης χρειάζεται πολύ προσοχή και ορισμένα συστήματα έχουν τοποθετηθεί σε μικρά σκάφη, με επιτυχία. Πάντως, η υπάρχουσα απόσβεση είναι συνήθως τόσο υψηλή και οι απαιτούμενες δυνάμεις

και ροπές είναι αρκετά μεγάλες, έτσι ώστε η ανάπτυξη συστημάτων απόσβεσης για τα πλοία παραμένει εξωπραγματικός στόχος.

3.2 Παρατροπίδια

Τα παρατροπίδια είναι οι πιο απλές διατάξεις για τη σταθεροποίηση του διατοιχισμού. Αυτά είναι μακριές λεπτές τρόπιδες που τοποθετούνται στο κυρτό της γάστρας, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.1). Εάν τα ενεργά σταθεροποιητικά πτερύγια είναι απαραίτητα, τα παρατροπίδια πρέπει να είναι κυκλικά για να μπορούν τα πρώτα να λειτουργήσουν.



Σχήμα 3.1

Τα παρατροπίδια είναι πολύ αποτελεσματικές διατάξεις για τη σταθεροποίηση του διατοιχισμού και δουλεύουν ικανοποιητικά σε όλες τις ταχύτητες. Έχουν το σημαντικό πλεονέκτημα ότι δεν έχουν κινούμενα μέρη και απαιτούν επιπλέον υποστήριξη από ότι δίνεται συνήθως στην επιφάνεια του σκάφους. Το μοναδικό μειονέκτημα τους είναι ότι αυξάνουν την αντίσταση του πλοίου, αλλά η επίδραση τους μπορεί να μειωθεί με προσεκτική ευθυγράμμιση των τροπιδίων, με τις γραμμές ροής γύρω από τα ύφαλα. Αυτό συνήθως γίνεται χρησιμοποιώντας κάποιο είδος τεχνικής οπτικοποίησης της ροής σε ένα

μοντέλο κατά τη διάρκεια του σταδίου της σχεδιασμού. Σωστή ευθυγράμμιση μπορεί να επιτευχθεί σε μια μόνο ταχύτητα (συνήθως επιλέγεται η ταχύτητα πλεύσης), αλλά η απώλεια λόγω αντίστασης σε άλλες ταχύτητες είναι συνήθως μικρή.

Τα παρατροπίδια δουλεύουν αναπτύσσοντας δυνάμεις αντίστασης οι οποίες αντιτίθενται στο διατοιχισμό του πλοίου. Ο μηχανισμός είναι ίδιος με αυτόν για προσαρτήματα σε μηδενική ταχύτητα. Η ροπή απόσβεσης διατοιχισμού δίνεται από την

σχέση : $F_4 = C_D \frac{\rho}{2} (r_A \dot{x}_A)^2 A_A$, και ο ισοδύναμος γραμμικός συντελεστής απόσβεσης από

την σχέση : $b_{44AD} = \frac{4C_D}{3\pi} \rho x_{40} \omega_{A4} \sum A_A r_A^3$. Αυτό που απομένει είναι να καθοριστούν

κατάλληλες τιμές για τον συντελεστή αντίστασης των παρατροπιδίων, C_D . Οι Cox και Lloyd (1977) ανέφεραν πειραματικά αποτελέσματα τα οποία είχαν δημοσιευθεί από τον Martin (1958) και από τον Ridjanovic (1962). Αυτό παρουσιάζεται (σε μια ελαφρώς διαφορετική μορφή) στο σχήμα 3.2. Ο κανονικός συντελεστής δύναμης δίνεται σαν συνάρτηση του παρακάτω ισοδύναμου λόγου,

$$a_{BK} = 2 c_{BK}/b_{BK} \quad (3.1)$$

και η αδιάστατη ακτίνα των παρατροπιδίων υπολογίζεται ως εξής

$$r' = \frac{r_{BK} \bar{x}_{40}}{\sqrt{A_{BK}}} \quad (3.2)$$

Τα αποτελέσματα μπορούν να εκφραστούν με την παρακάτω παράσταση

$$C_D = 0.849 \left(\frac{I}{r} (1 - \exp(-Kr')) + J \right) \quad (3.3)$$

όπου,

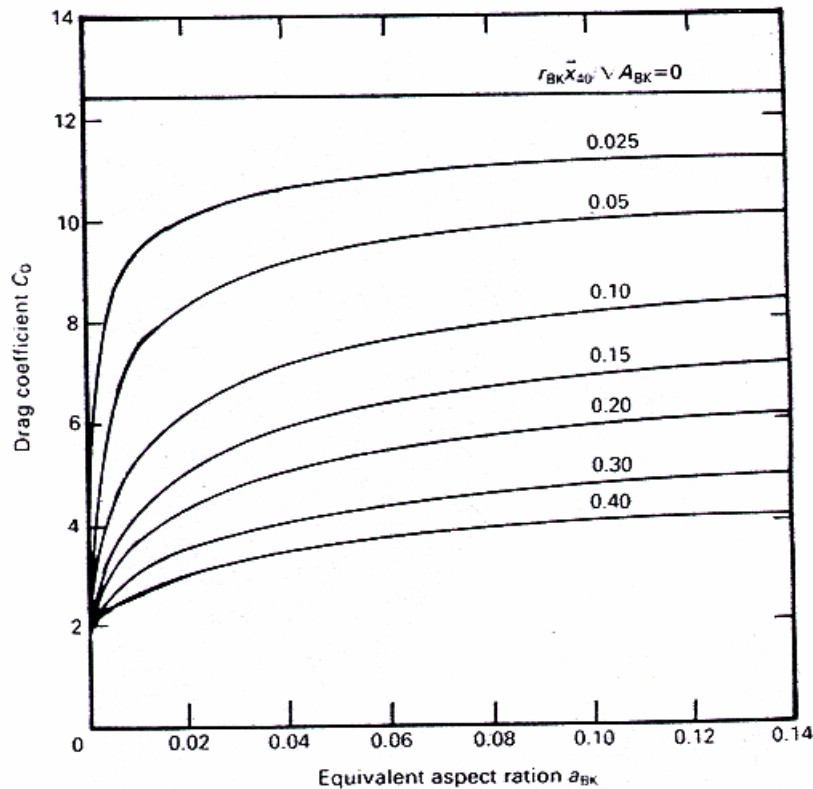
$$I = \left(\frac{14.66 - J}{K} \right) \sqrt{\frac{2}{a_{BK}}} \quad (3.4)$$

$$J = 2.37 - 5.33 a_{BK} + 10.35 a_{BK}^2 \quad (3.5)$$

$$K = \frac{\sqrt{2a_{BK}}}{(14.66 - J)(0.109 - 0.208a_{BK})} \quad (3.6)$$

Το σχήμα 3.2 δείχνει το κέρδος που έχουμε με την αύξηση του λόγου επιμήκους των παρατροπιδίων για μια δεδομένη επιφάνεια τροπιδίων. Η αύξηση του λόγου αυτού

βελτιώνει την αποτελεσματικότητα των παρατροπιδίων, δηλαδή ένα κοντό και πλατύ παρατροπίδιο είναι πιο αποδοτικό από ένα μακρύτερο και λεπτό. Τέλος η αποτελεσματικότητα τους είναι μεγαλύτερη στις μικρότερες ταχύτητες.



Σχήμα 3.2

3.3 Ενεργά πτερύγια σταθεροποίησης του διατοιχισμού

Γενικά χαρακτηριστικά

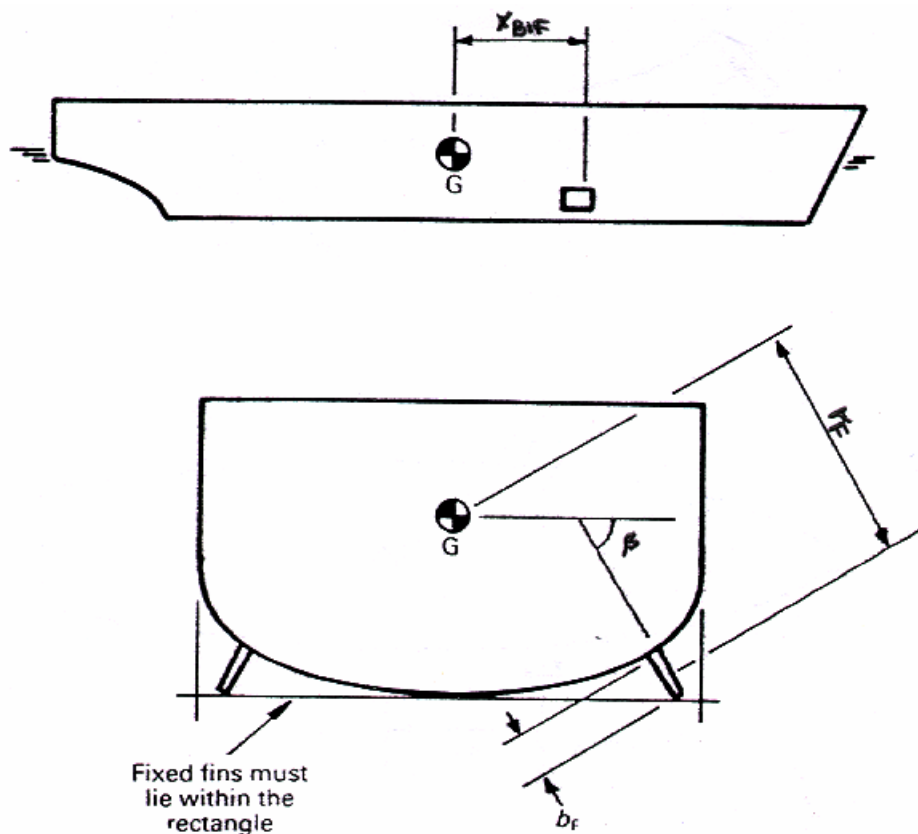
Τα ενεργά πτερύγια σταθεροποίησης του διατοιχισμού συνήθως τοποθετούνται σε περιστρεφόμενα στελέχη στην κλίση των υφάλων κοντά στο μέσο του πλοίου. Η γωνία πρόσπτωσης των πτερυγίων ρυθμίζεται συνεχώς από ένα σύστημα ελέγχου, το οποίο είναι ευαίσθητο στο διατοιχισμό του πλοίου. Τα πτερύγια αναπτύσσουν ανωστικές δυνάμεις οι οποίες ασκούν ροπές διατοιχισμού στο κέντρο βάρους του πλοίου. Αυτές οι ροπές

ρυθμίζονται έτσι ώστε να αντιτίθενται στις ροπές που αναπτύσσονται από τα κύματα και έτσι η κίνηση του διατοιχισμού μειώνεται.

Σε ταχύτητες μεγαλύτερες από 10-15 κόμβους, τα ενεργά πτερύγια είναι πιθανόν η πιο αποτελεσματική μέθοδος για την σταθεροποίηση ενός πλοίου. Μειώσεις της μέσης τετραγωνικής τιμής του διατοιχισμού της τάξης 50% είναι συνήθως δυνατές, σε μέτρια κύματα και με ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα σταθεροποίησης. Τα πτερύγια γίνονται προοδευτικά λιγότερο αποδοτικά καθώς η ταχύτητα μειώνεται και δεν σχεδιάζονται συνήθως για πλοία τα οποία λειτουργούν σε χαμηλές ταχύτητες. Πρέπει ωστόσο, να κατανοήσουμε ότι τα πτερύγια έχουν μια περιορισμένη δυνατότητα και η ικανότητα τους μειώνεται σε πολύ σοβαρές καταστάσεις θάλασσας. Είναι σχετικά πολύπλοκα και αρκετά ακριβά τεμάχια εξοπλισμού και απαιτούν αξιοσημείωτη προσπάθεια. Τελικά η ικανότητα των πτερυγίων να λειτουργούν καλά σε μια ευρεία περιοχή καταστάσεων τα έχει καταστήσει γενικά αποδεκτά και μέχρι σήμερα έχουν εφαρμοστεί σε αρκετά πλοία.

Πτυσσόμενα πτερύγια τοποθετούνται συχνά σε εμπορικά πλοία. Τα πτερύγια μπορούν να απομακρυνθούν από τη γάστρα όταν το πλοίο λειτουργεί σε ήρεμο καιρό και έτσι να εξαλειφθεί το μειονέκτημα που παρουσιάζουν σχετικά με την αντίσταση. Αυτό το χαρακτηριστικό χρησιμοποιείται επίσης για να αποφευχθεί η τυχόν προσάραξη του πλοίου όταν αυτό βρίσκεται σε ρηχά νερά. Τα πτυσσόμενα πτερύγια χρησιμοποιούνται επίσης και με υψηλό λόγο επιμήκους, οπότε είναι υδροδυναμικά πολύ αποτελεσματικά, δίνοντας μια σχετικά μεγάλη άνωση για δεδομένη επιφάνεια πτερυγίου.

Στα πολεμικά πλοία χρησιμοποιούνται συνήθως όχι εισελκόμενα πτερύγια καθώς αυτά τα πλοία έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να καταστραφούν από δονήσεις και εκρήξεις. Είναι απαραίτητο να περιορίσουμε τα πτερύγια στο εσώκλειστο τετράγωνο που καθορίζεται από το μέγιστο πλάτος και βύθισμα του πλοίου, σχήμα 3.3. Αυτό ορίζει έναν δραστικό περιορισμό στην επιφάνεια και στο λόγο επιμήκους, που μπορούμε να επιτύχουμε, επομένως αυτά τα πτερύγια είναι λιγότερο αποδοτικά από ότι τα ισοδύναμα τετράγωνα.



Σχήμα 3.3

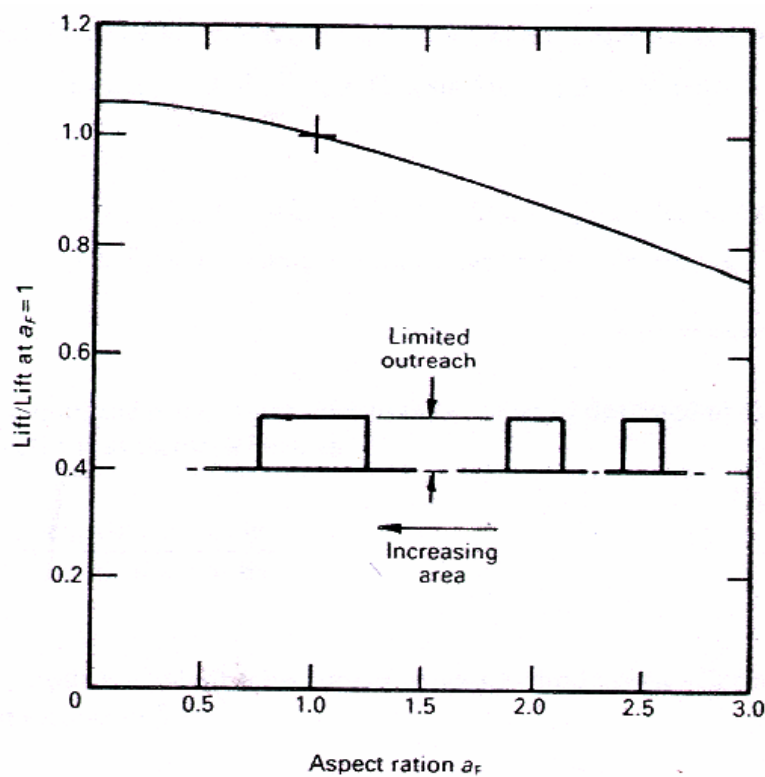
Περιορισμοί στη σχεδίαση των σταθεροποιητικών πτερυγίων

Η απαίτηση να κρατάμε τα άκρα των εισελκόμενων πτερυγίων μέσα σε ορισμένα τετράγωνα, περιορίζει το μέγεθος τους. Σύμφωνα με αυτό ο μοναδικός τρόπος για να αυξήσουμε την άνωση, είναι η αύξηση της χορδής, δυστυχώς όμως με αυτόν τον τρόπο μειώνεται ο λόγος επιμήκους και η κλήση της καμπύλης της άνωσης.

Θεωρώντας ένα ορθογώνιο πτερύγιο με μοναδιαίο λόγο επιμήκους και περιορισμένη έκταση από αυτή την απαίτηση, η άνωση που αναπτύσσεται σε κάποια γωνία πρόσπτωσης είναι $L_{av}=1$ kN. Αν η άνωση που αναπτύσσεται από ένα άλλο πτερύγιο με τον ίδιο περιορισμό στο πλάτος (limited outreach) αλλά διαφορετικό λόγο επιμήκους, χορδή και επιφάνεια, θεωρείται L kN. Μπορεί να αποδειχθεί ότι ο λόγος των ανώσεων που αναπτύσσονται από τα δύο πτερύγια είναι,

$$\frac{L}{L_{av=1}} = \frac{4.04}{1.8 + \sqrt{4 + a_F^2}} \quad (3.7)$$

Η σχέση (3.7) παριστάνεται γραφικά στο σχήμα 3.4, από το οποίο προκύπτει το κέρδος που έχουμε με την αύξηση της χορδής, εάν το πλάτος του είναι περιορισμένο εφόσον ο λόγος επιμήκους μειωθεί κάτω από περίπου 1.0. Έτσι τα μη αναδιπλούμενα πτερύγια περιορίζονται από ένα όριο του, σε λόγο επιμήκους περίπου 1.0, ενώ για να αποκτήσουμε περισσότερη άνωση πρέπει να εγκαταστήσουμε περισσότερα ζευγάρια πτερυγίων.



Σχήμα 3.4

Εξισώσεις κίνησης

Στο σχήμα 3.5 φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές που εφαρμόζονται σε ένα πλοίο από ένα ζευγάρι πτερυγίων σε κάποια γωνία πρόσπτωσης της ροής. Το κάθε πτερύγιο αναπτύσσει μια δύναμη,

$$L = C_L \frac{1}{2} \rho U^2 A_F = \frac{dC_L}{da} \frac{1}{2} \rho U^2 A_F a, \text{ kN} \quad (3.8)$$

η οποία δημιουργεί μια ροπή $2 L r_F$ kN m περί το κέντρο βάρους.

Οι δύο ανωστικές δυνάμεις έχουν κάθετες συνιστώσες οι οποίες αλληλοαναιρούνται με αποτέλεσμα να μην αναπτύσσεται κάθετη δύναμη στο πλοίο. Αντίθετα οι οριζόντιες συνιστώσες προστίθενται και αποφέρουν μια ταλαντωτική δύναμη ($2 L \sin\beta$ kN) προς τα δεξιά. Εάν τα πτερύγια τοποθετηθούν x_{BIF} μέτρα πλώραθεν του κέντρου βάρους, αυτή η οριζόντια δύναμη θα ασκήσει μια ροπή κατά το διάμηκες ($2 L x_{BIF} \sin\beta$ kN m).

Τα αποτελέσματα των σταθεροποιητικών πτερυγίων στις κινήσεις του πλοίου σε κυματισμούς, μπορούν να υπολογισθούν συμπεριλαμβάνοντας τους παρακάτω επιπρόσθετους όρους στις εξισώσεις κίνησης. Μόνο οι εγκάρσιες κινήσεις επηρεάζονται και γίνονται :

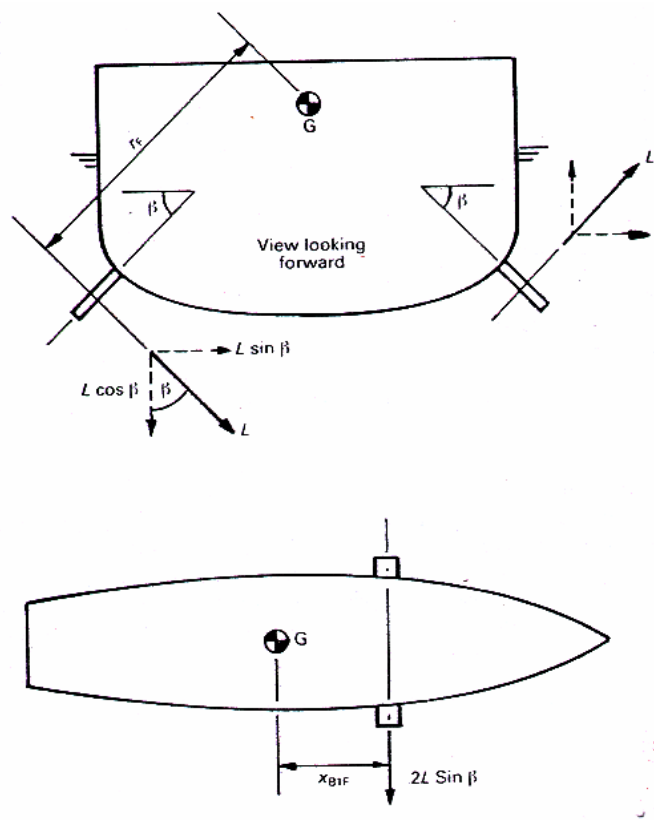
$$\text{sway} : (m+a_{22}) \ddot{x}_2 + b_{22} \dot{x}_2 + a_{24} \ddot{x}_4 + b_{24} \dot{x}_4 + a_{26} \ddot{x}_6 + b_{26} \dot{x}_6 + c_{26} x_6 + \Sigma E_F L \sin\beta = F_{w20} \sin(\omega_e t + \gamma_2) \text{ kN} \quad (3.9)$$

$$\text{roll} : a_{42} \ddot{x}_2 + b_{42} \dot{x}_2 + (I_{44} + a_{44}) \ddot{x}_4 + b_{44} \dot{x}_4 + c_{44} x_4 + a_{46} \ddot{x}_6 + b_{46} \dot{x}_6 + c_{46} x_6 - \Sigma E_F L r_F = F_{w40} \sin(\omega_e t + \gamma_4) \text{ kN m} \quad (3.10)$$

$$\text{yaw} : a_{62} \ddot{x}_2 + b_{62} \dot{x}_2 + a_{64} \ddot{x}_4 + b_{64} \dot{x}_4 + (I_{66} + a_{66}) \ddot{x}_6 + b_{66} \dot{x}_6 + c_{66} x_6 + \Sigma E_F L x_{BIF} \sin\beta = F_{w60} \sin(\omega_e t + \gamma_6) \text{ kN m} \quad (3.11)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις οι αθροίσεις αναφέρονται στον αριθμό των πτερυγίων που τοποθετούνται στο πλοίο και ο όρος E_F είναι ένας συντελεστής αποτελεσματικότητας που προσδιορίζεται ως εξής :

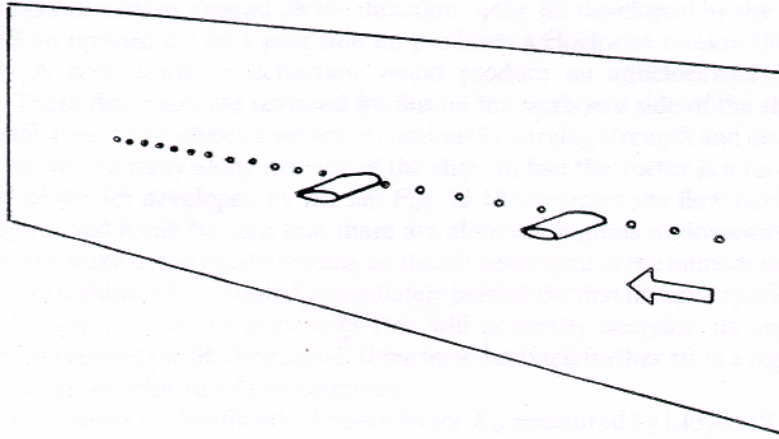
$E_F = (\text{αποτελεσματική άνωση του πτερυγίου} / \text{ονομαστική άνωση του πτερυγίου})$
ο συντελεστής αυτός είναι γενικά μικρότερος της μονάδας εξ αιτίας ποικίλων υδροδυναμικών επιδράσεων οι οποίες συζητούνται παρακάτω.



Σχήμα 3.5

Υδροδυναμικές απώλειες

Ο Lloyd (1975 , 1977) διερεύνησε την αποτελεσματικότητα των σταθεροποιητικών πτερυγίων διατοιχισμού, μετρώντας την άνωση που αναπτύσσεται σε πρότυπο πτερυγίων και παρατροπιδίων σε ποικιλία διατάξεων πάνω σε σταθερό πέτασμα. Τα πειράματα του πραγματοποιήθηκαν στο κανάλι-ανάκυκλοφορίας νερού του Admiralty Research Laboratory στο Haslar της Μ. Βρετανίας, φαίνονται στο Σχ.3.6. Ο Lloyd προσδιόρισε τρεις κύριες αιτίες απωλειών στην απόδοση των πτερυγίων : (α) το οριακό στρώμα της γάστρας, (β) την αλληλεπίδραση μεταξύ πτερυγίων, και (γ) την αλληλεπίδραση μεταξύ πτερυγίου και παρατροπιδίων. Ο μηχανισμός που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων φαίνεται στο σκαρίφημα του σχήματος 3.6.



Σχήμα 3.6. Πείραμα με ενεργά πτερύγια του Lloyd (1975,1977)

Απώλειες λόγω οριακού στρώματος της γάστρας

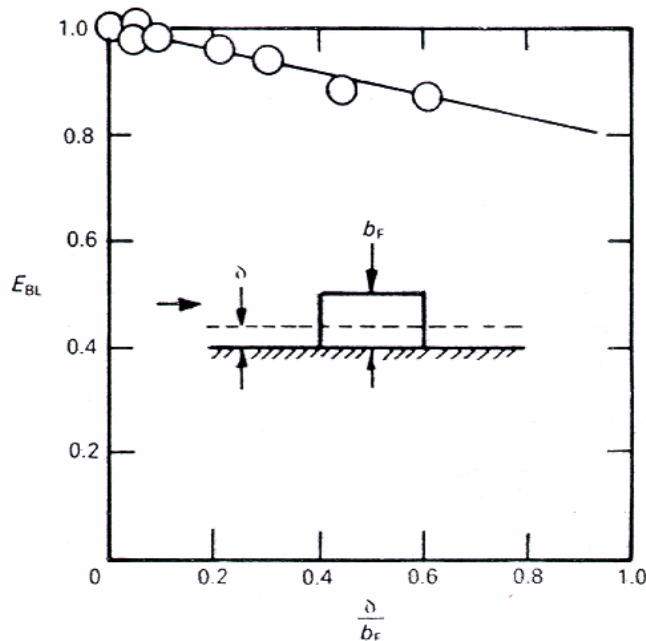
Τα πτερύγια βυθίζονται μερικώς στην αργή κίνηση του οριακού στρώματος πάνω στη γάστρα του πλοίου. Η ταχύτητα της ροής κοντά στην αρχή του πτερυγίου και η άνωση που αναπτύσσεται σε αυτό το πεδίο, μειώνονται. Ο Lloyd (1975) μέτρησε το πάχος του οριακού στρώματος (προσδιορίζοντάς το με βάση το σημείο που η ταχύτητα έχει ανακτήσει το 99% της τιμής στην ελεύθερη ροή) και την άνωση που αναπτύσσεται από ένα απομονωμένο πτερύγιο σε διάφορες θέσεις πάνω στο σταθερό πέτασμα του σχήματος 3.6. Στο παρακάτω σχήμα 3.7 φαίνεται η απόδοση των πτερυγίων ως συνάρτηση του πάχους του οριακού στρώματος. Τα αποτελέσματα μπορούν να προσεγγιστούν από την εξής εμπειρική σχέση, που εκφράζει το λόγο της άνωσης που αναπτύσσεται στο οριακό στρώμα προς την ονομαστική άνωση (χωρίς οριακό στρώμα) :

$$E_{BL} = 1.0 - 0.21 \delta/b_F \quad (3.12)$$

Το πάχος του οριακού στρώματος της γάστρας μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση :

$$\delta = 0.377 x_{FP} (R_N)^{-0.2} \quad (3.13)$$

όπου R_N είναι ο τοπικός αριθμός Reynolds, $R_N = \frac{\rho U x_{FP}}{\mu_w}$ και x_{FP} η απόσταση του πτερυγίου από την πωραία κάθετο.



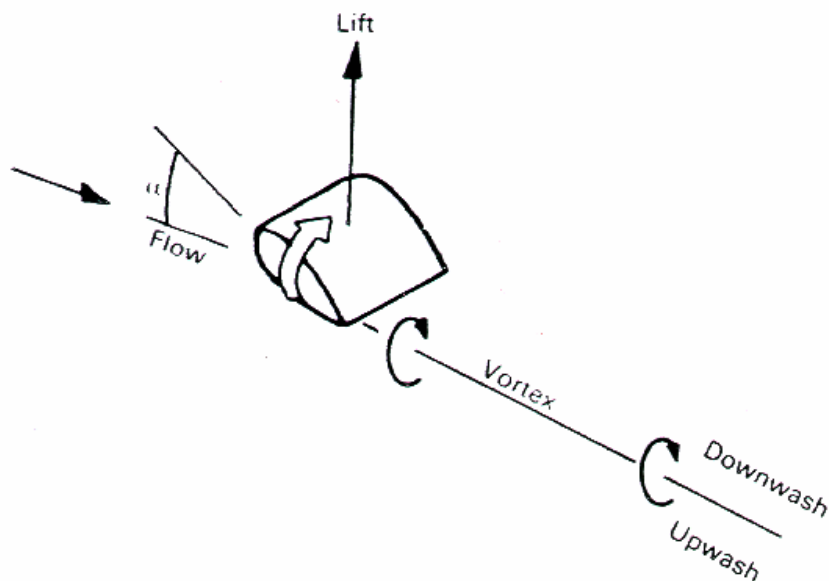
Σχήμα 3.7. Επίδραση του οριακού στρώματος στην άνοση του πτερυγίου.

Αλληλεπίδραση μεταξύ πτερυγίων

Τα σταθεροποιητικά πτερύγια διατοιχισμού, όπως όλες οι ανωστικές επιφάνειες, δουλεύουν μέσω της διαφοράς πίεσης που αναπτύσσεται μεταξύ της πάνω και της κάτω πλευράς. Το νερό τείνει να περιστραφεί γύρω από το άκρο του πτερυγίου λόγω της διαφοράς πίεσης και έτσι σχηματίζεται μια δίνη. Στο σχήμα 3.8 φαίνεται η δίνη που αναπτύσσεται πίσω από το πτερύγιο για κάποια γωνία πρόσπτωσης. Η δίνη αυτή αποβάλλεται κοντά στο άκρο του πτερυγίου και μετακινείται κατά μήκος της πλευράς του πλοίου μεταδίδοντας στροβιλισμούς στην κίνηση του νερού κοντά στην γάστρα.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ροή να στρέφεται προς τα κάτω σε μια περιοχή μεταξύ της επιφάνειας της γάστρας και της δίνης, ενώ στην περιοχή έξω από τη δίνη η ροή έχει

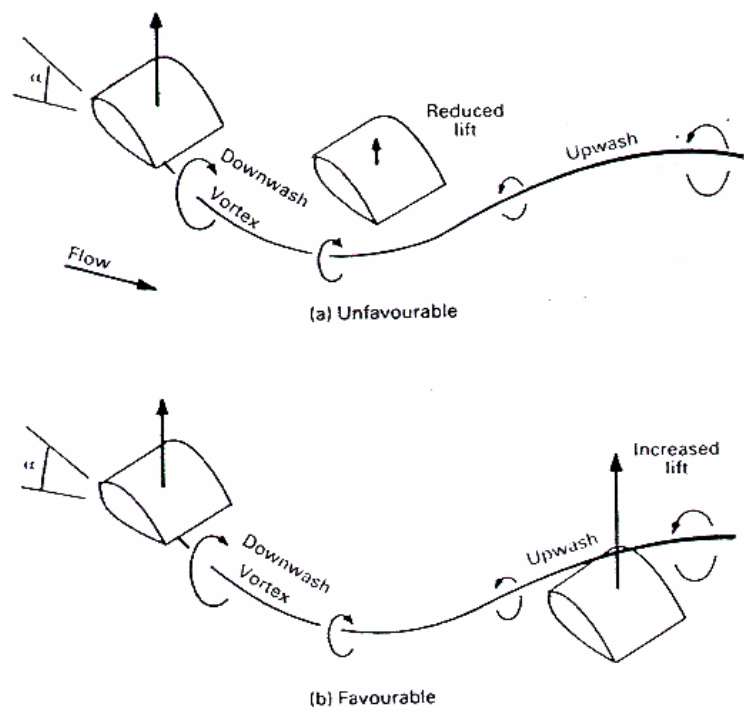
φορά προς τα πάνω. Τελικά η αίσθηση της τυρβώδους κίνησης και των αποτελεσμάτων της στη διεύθυνση της ροής εξαρτάται από τη διεύθυνση της άνωσης που αναπτύσσεται από το πτερύγιο. Στο σχήμα 3.8 μια άνωση προς τα πάνω παράγει μια κίνηση σύμφωνα με τους δείκτες του ρολογιού (κοιτώντας προς πλώρα). Μια απότομη απόκλιση του πτερυγίου προς τα κάτωθα παρήγαγε μια περιστροφή της δίνης αντίθετα με τους δείκτες του ρολογιού. Οι διευθύνσεις αυτές αναστρέφονται για πτερύγια που βρίσκονται στη δεξιά πλευρά του πλοίου.



Σχήμα 3.8 Ακολουθούσα δίνη που δημιουργείται από μια ανωστική επιφάνεια.

Ένα ταλαντευόμενο πτερύγιο παράγει μια δίνη με συνεχώς μεταβαλλόμενη δύναμη και διεύθυνση που μεταφέρεται μακριά κατά μήκος της πλευράς του πλοίου. Στην πραγματικότητα η δίνη είναι μια καταγραφή ή η μνήμη της άνωσης που αναπτύσσεται από το πτερύγιο. Στο σχήμα 3.9 φαίνεται η ροή πίσω από ένα ταλαντευόμενο πτερύγιο και όπως παρατηρείται, υπάρχουν εναλλακτικές περιοχές με τη ροή να κινείται προς τα πάνω ή προς τα κάτω στον ομόρρου του πτερυγίου, ενώ εξαρτάται από την άνωση που αναπτύσσεται στο .

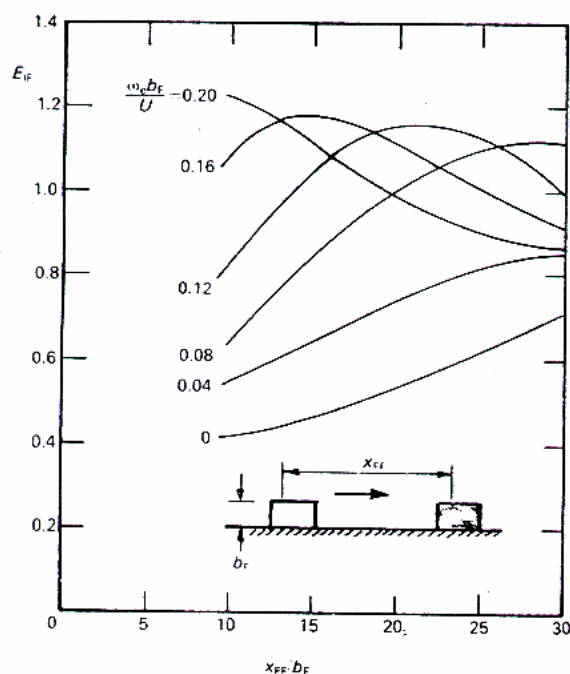
Ένα δεύτερο σταθεροποιητικό πτερύγιο που προσαρμόζεται κατευθείαν πίσω από πρώτο θα αντιμετωπίσει ένα κατώρρευμα στο μεγαλύτερο μέρος του πλάτους. Αυτό γενικά μειώνει την γωνία πρόσπτωσης και την αναπτυσσόμενη άνωση. Εάν το πτερύγιο προσαρμοστεί μακρύτερα προς τα πίσω σε μια περιοχή που η ροή κατευθύνεται προς τα πάνω, η άνωση που αναπτύσσεται θα αυξηθεί.



Σχήμα 3.9. Αλληλεπίδραση ταλαντευομένων πτερυγίων

Στο σχήμα 3.10 φαίνεται ο συντελεστής αλληλεπίδρασης E_{IF} επάλληλων πτερυγίων όπως μετρήθηκε από τον Lloyd (1977) για ένα ζεύγος ταλαντευομένων πτερυγίων. Τα αποτελέσματα παριστάνονται σαν συνάρτηση μιας αδιάστατης παραμέτρου συχνότητας και της διαμήκουσ απόστασης μεταξύ των πτερυγίων. Σε μηδενική συχνότητα η αλληλεπίδραση είναι αρκετά έντονη ακόμα και για αρκετά απομακρυσμένα πτερύγια. Για παράδειγμα, ένα πτερύγιο που βρίσκεται 20 πλάτη πίσω από το πρώτο μπορεί να αναπτύξει μόνο 50% της ονομαστικής άνωσης. Τα αποτελέσματα της παρεμβολής γίνονται λιγότερο σημαντικά καθώς η συχνότητα και η απόσταση μεταξύ των πτερυγίων

αυξάνονται, μέχρι όταν σε κάποιες υψηλές συχνότητες και αποστάσεις το δεύτερο πτερύγιο είναι σε μια περιοχή όπου η ροή κατευθύνεται προς τα πάνω και η αλληλεπίδραση γίνεται επωφελής.



Σχήμα 3.10 : Συντελεστής αλληλεπίδρασης πτερυγίων

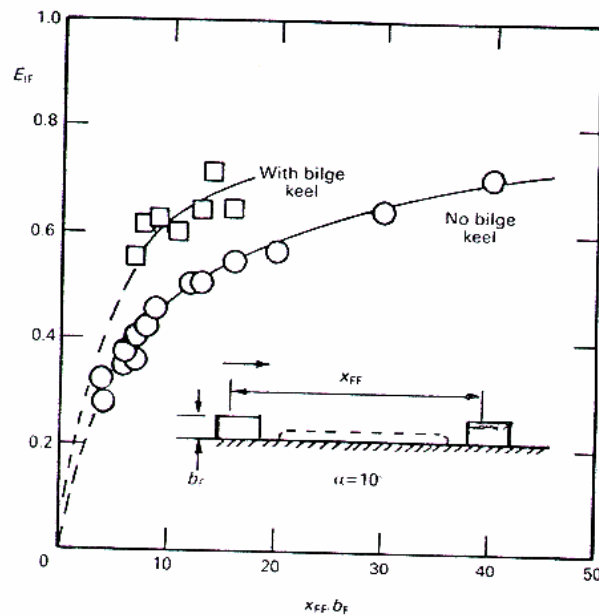
Αλληλεπίδραση πτερυγίου και παρατροπιδίου

Ένα παρατροπίδιο προσαρμοσμένο πίσω από ένα σταθεροποιητικό πτερύγιο συναντά επίσης ροή προς τα κάτω, οπότε αναπτύσσει άνωση η οποία αντιτίθεται στην άνωση του πτερυγίου. Ο Lloyd (1975) μέτρησε αυτή την αντίθετη άνωση για την περίπτωση της μηδενικής συχνότητας και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με τη μορφή ενός συντελεστή αποτελεσματικότητας:

$$E_{IBK} = 1.0 - (\text{άνωση παρατροπιδίου} / \text{άνωση πτερυγίου}) \approx 0.84.$$

Τα ανεπιθύμητα αποτελέσματα της προσαρμογής ενός παρατροπιδίου πίσω από ένα πτερύγιο μειώνονται εάν το παρατροπίδιο ακολουθείται από ένα δεύτερο σταθεροποιητικό πτερύγιο. Το παρατροπίδιο έχει μια άμεση επίδραση ευθυγράμμισης της ροής και απομακρύνει ένα μέρος του κατωρέυματος, που οφείλεται στη δίνη που

σχηματίζεται περί το πτερύγιο. Αυτό αυξάνει την άνωση που δημιουργείται από το δεύτερο πτερύγιο, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.11. Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να προσεγγιστεί θέτοντας $E_{IBK}=1.0$, για την περίπτωση ενός παρατροπιδίου μεταξύ των δύο πτερυγίων.



Σχήμα 3.11 : Συντελεστής αλληλεπίδρασης πτερυγίων.

Επίδραση των παρατροπιδίων σε μηδενική συχνότητα

Συνολική απόδοση

Οι υδροδυναμικές απώλειες που περιγράφονται παραπάνω αθροίζονται και η συνολική απόδοση του κάθε πτερυγίου σε συνδυασμό με τα παρατροπίδια δίνεται από τον πολλαπλασιασμό της επιμέρους απόδοσης του καθενός :

$$E = E_{BL} E_{IF} E_{IBK} \quad (3.14)$$

Σχεδιαστικές υποδείξεις

Σίγουρα ένα ζεύγος πτερυγίων χωρίς ακολουθούντα παρατροπίδια είναι ο πιο αποδοτικός μηχανισμός σταθεροποίησης. Στην περίπτωση αυτή δεν έχουμε φαινόμενα αλληλεπίδρασης, οπότε :

$$E_{IF} = E_{IBK} = 1.0.$$

Μια τέτοια διαμόρφωση έχει αρνητικές επιδράσεις μόνο από τις σχετικά ασήμαντες απώλειες από το οριακό στρώμα. Είναι πιθανόν να μην αξίζει τον κόπο να τοποθετηθεί ένα πτερύγιο όσο το δυνατόν μπροστά έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες, καθώς δυσχεραίνεται η προσθήκη ενός παρατροπίδιου με ικανοποιητικό μέγεθος μπροστά από το πτερύγιο αυτό.

Εάν με την προσθήκη ενός ζεύγους πτερυγίων δεν επιτυγχάνεται επαρκής σταθεροποίηση, κρίνεται απαραίτητη η τοποθέτηση πολλαπλών διατάξεων πτερυγίων. Στην περίπτωση αυτή η απόσταση τους πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε να εκμεταλλευόμαστε τα πλεονεκτήματα της αλληλεπίδρασης, που παρουσιάζονται στο σχήμα 3.10. Η διαμόρφωση του πτερυγίου θα πρέπει να βελτιστοποιείται για την επίτευξη της καλύτερης απόδοσης στη φυσική συχνότητα διατοιχισμού (όπου συμβαίνει κυρίως η κίνηση του διατοιχισμού) και στην ταχύτητα υπηρεσίας του πλοίου. Κατά κανόνα απαιτείται το δεύτερο πτερύγιο να βρίσκεται σε μια απόσταση x_{FF} μέτρα πίσω από το πρώτο, έτσι ώστε ο χρόνος που χρειάζεται η δίνη από το πρώτο πτερύγιο να μετακινηθεί κατά το ρεύμα, να είναι ίσος με την μισή περίοδο του διατοιχισμού :

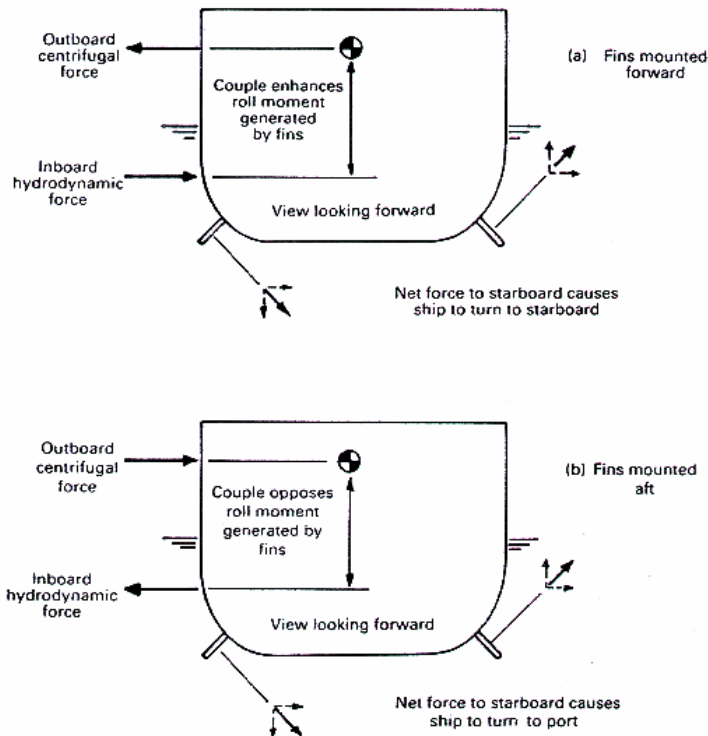
$$\frac{x_{FF}}{U} = \frac{T_{*4}}{2} = \frac{\pi}{\omega_{*4}} \text{ sec},$$

έτσι ώστε

$$x_{FF} = \frac{\pi U}{\omega_{*4}} \text{ m} \quad (3.15)$$

Δυστυχώς τα αποτελέσματα που παίρνουμε για τον διαχωρισμό των πτερυγίων είναι συνήθως μη-πρακτικά. Για παράδειγμα, έχοντας ως ταχύτητα υπηρεσίας 10.3 m/sec (20 kn) και φυσική συχνότητα διατοιχισμού 0.5 rad/sec βρίσκουμε μια βέλτιστη απόσταση x_{FF}

= 63 m, η οποία είναι δύσκολο να επιτευχθεί σε όλα τα πλοία παρά μόνο στα μεγάλα. Τα παρατροπίδια δεν θα πρέπει να τοποθετούνται πίσω από το τελευταίο πτερύγιο.



Σχήμα 3.12 : Επωφελείς και επιζήμιες επιδράσεις στις αποκρίσεις του sway και yaw

Με στόχο να πετύχουμε την μέγιστη δυνατή ροπή διατοιχισμού, τα πτερύγια διατοιχισμού θα πρέπει να προσαρμόζονται στο κυρτό της γάστρας έτσι ώστε ο μοχλοβραχίονας του διατοιχισμού r_F να μεγιστοποιείται, σχήμα 3.12. Έχουμε επίσης πλεονέκτημα αν τοποθετηθούν τα πτερύγια κανονικά πάνω στην γάστρα. Αυτό απλοποιεί τις μηχανικές διατάξεις και ελαχιστοποιεί το άνοιγμα μεταξύ της επιφάνειας της γάστρας και του σημείου προσαρμογής του πτερυγίου, όταν αυτό βρίσκεται υπό γωνία πρόσπτωσης. Αυτά τα ανοίγματα είναι δυναμικές πηγές διαρροής μεταξύ των πλευρών χαμηλής και υψηλής πίεσης του πτερυγίου με αποτέλεσμα σε μια σημαντική απώλεια της αποτελεσματικότητας του. Τα προσαρμοζόμενα πτερύγια πρέπει επίσης να είναι ευθυγραμμισμένα έτσι ώστε να μεγιστοποιείται το άνοιγμα τους χωρίς να περιορίζεται από περίγραμμα του πλοίου.

Αυτές οι απαιτήσεις οδηγούν συχνά σε μεγάλες τιμές της γωνίας του πτερυγίου ως προς το οριζόντιο επίπεδο 45 μοίρες ή και περισσότερο). Μια αναφορά στις τροποποιημένες εξισώσεις (3.9 –3.10) δείχνει ότι τα παραπάνω οδηγούν σε εγκάρσια κίνηση (sway) και σε στροφική οριζόντια ταλάντωση (yaw), κάθε φορά που τα πτερύγια κινούνται με σκοπό να ισορροπήσουν την κίνηση του διατοιχισμού.

Αν υποθεθεί ότι τα πτερύγια τοποθετούνται σε κάποια γωνία πρόσπτωσης για να δίνουν σταθερή δύναμη άνωσης L kN και ροπή σταθεροποίησης του διατοιχισμού προς τα αριστερά, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.12. Όπως είδαμε και προηγουμένως, αυτό οδηγεί σε μια οριζόντια στροφική ροπή και σε μια εγκάρσια οριζόντια δύναμη προς τα δεξιά του πλοίου. Το πλοίο θα ανταποκριθεί κατά τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως ανταποκρίνεται στις κινήσεις των πηδαλίων και θα αρχίσει να στρίβει προς τα δεξιά. Μια φυγόκεντρη δύναμη δρα προς τα αριστερά με σημείο εφαρμογής το κέντρο βάρους, αντιτιθέμενη στις προς τα μέσα υδροδυναμικές δυνάμεις που δρουν προς τα δεξιά κάτω από την ίσαλο. Αυτές οι δυνάμεις αποτελούν ένα ζεύγος το οποίο οδηγεί το σκάφος σε εγκάρσια κλίση προς τα δεξιά, ενισχύοντας έτσι τη ροπή προς τα δεξιά που αναπτύσσεται από τα πτερύγια. Η συνολική ροπή διατοιχισμού που αναπτύσσεται από τα πτερύγια που έχουν προσαρμοστεί στο εμπρός μέρος, αυξάνεται από την συνδυαζόμενη επίδραση του διατοιχισμού και της εγκάρσιας οριζόντιας ταλάντωσης.

Αν τα πτερύγια τοποθετηθούν αρκετά πίσω, τότε η απόσταση του κέντρου βάρους, x_{BIF} γίνεται αρνητική. Το πλοίο τότε στρίβει στην αντίθετη κατεύθυνση ανταποκρινόμενο στην κίνηση των πτερυγίων. Η ροπή διατοιχισμού που προκαλείται λόγω στροφής αντιτίθεται στην ροπή που αναπτύσσεται απευθείας από τα πτερύγια και έτσι η αποτελεσματικότητά τους ελαττώνεται. Σε ακραίες καταστάσεις με σχεδόν κάθετα πτερύγια προσαρμοσμένα αρκετά πρύμνηθεν, η ροπή διατοιχισμού που οφείλεται στη στροφή του πλοίου μπορεί στην πράξη να υπερβεί τη ροπή διατοιχισμού που παράγεται κατ' ευθείαν από τα πτερύγια και έτσι η συνολική ροπή να έχει 'λάθος' κατεύθυνση.

Οι παραπάνω επιδράσεις μειώνονται όταν τα πτερύγια ταλαντώνονται σε υψηλότερες συχνότητες και δεν είναι συνήθως πολύ σημαντικές στη φυσική συχνότητα όπου συμβαίνουν οι περισσότερες κινήσεις διατοιχισμού. Παρατηρείται, πάντως, ότι

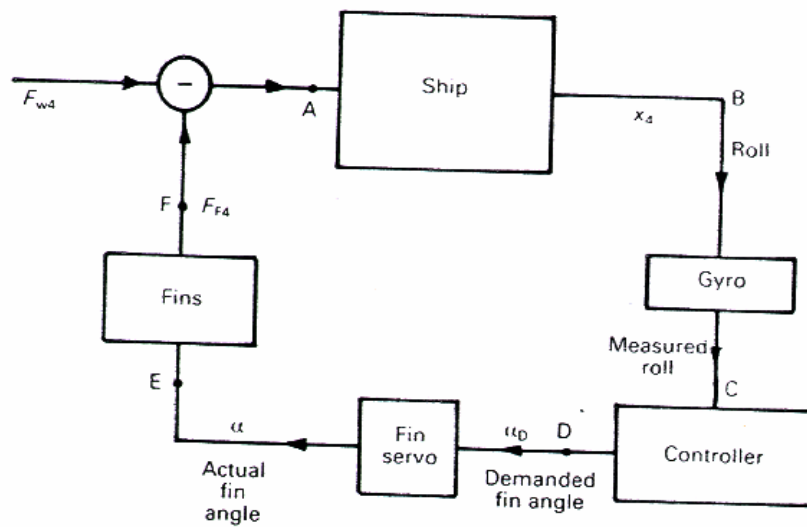
πτερύγια τοποθετημένα αρκετά προς την πρύμνη με μεγάλες γωνίες κλίσεως ως προς το οριζόντιο επίπεδο μπορούν να οδηγήσουν σε ενίσχυση των κινήσεων σε πολύ χαμηλές συχνότητες. Για το λόγο αυτό πρέπει να αποφεύγονται αυτές οι θέσεις προσαρμογής.

Οι ευνοϊκές επιδράσεις της στροφικής και της εγκάρσιας οριζόντιας ταλάντωσης, μπορούν να μεγιστοποιηθούν αν τα πτερύγια με μεγάλη γωνία κλίσεως ως προς το οριζόντιο επίπεδο, τοποθετηθούν αρκετά μπροστά. Αυτό, όμως, δημιουργεί δυσκολίες στην προσθήκη ενός παρατροπιδίου μπροστά από τα πτερύγια και σπάνια επιχειρείται.

Στην πράξη τα πτερύγια συνήθως προσαρμόζονται κάπου κοντά στο μέσο του πλοίου και οι επιδράσεις της στροφικής και της εγκάρσιας οριζόντιας ταλάντωσης μειώνουν την απόδοση τους στις χαμηλές συχνότητες. Η μείωση αυτή μπορεί να ελαχιστοποιηθεί κρατώντας τη γωνία (β) κλίσεως ως προς το οριζόντιο επίπεδο, όσο το δυνατόν μικρότερη, αλλά αυτό τείνει να μειώσει το μοχλοβραχίονα του διατοιχισμού r_F .

Συστήματα ενεργών πτερυγίων

Στο σχηματικό διάγραμμα του σχήματος 3.13 παρουσιάζεται η σταθεροποίηση ενός πλοίου με ενεργά πτερύγια. Η κάθε συνιστώσα ή το κάθε κουτί του διαγράμματος μπορεί να θεωρηθεί σαν ‘μαύρο κουτί’ έχοντας μια είσοδο και μια έξοδο που σχετίζονται μεταξύ τους με γνωστές συναρτήσεις μεταφοράς. Για παράδειγμα το πλοίο – κουτί δέχεται σαν είσοδο μια ροπή διατοιχισμού F_{w4} από τα κύματα και παράγει στην έξοδο μια κίνηση διατοιχισμού x_4 . Παρομοίως το σύστημα ελέγχου των πτερυγίων παράγει την απαιτούμενη γωνία α_D για αντίδραση στην κίνηση διατοιχισμού του πλοίου. Ο σερβομηχανισμός των πτερυγίων ανταποκρίνεται και οδηγεί το πτερύγιο σε μια κατάλληλη γωνία και έτσι το πτερύγιο μετατρέπει αυτή την κλίση σε σταθεροποιητική ροπή διατοιχισμού F_{F4} . Αυτή η ροπή αφαιρείται από την εγκάρσια ροπή που παράγεται λόγω κυματισμών και έτσι μειώνεται η κίνηση διατοιχισμού του πλοίου.



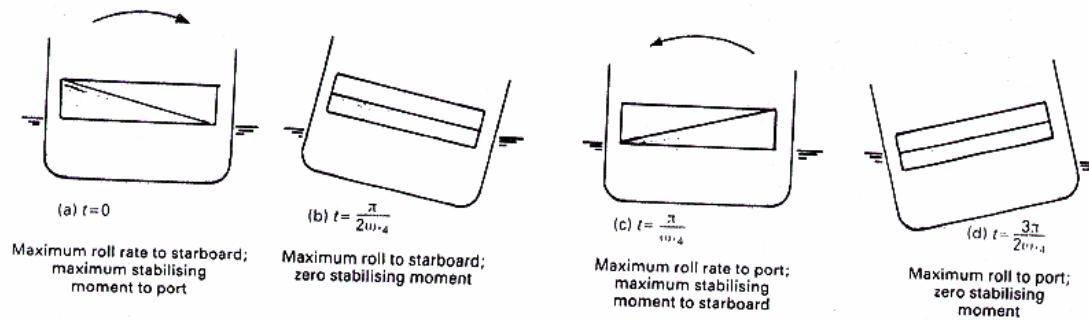
Σχήμα 3.13 : Σχηματικό διάγραμμα ενός πλοίου με σταθεροποιητικά πτερύγια

Οι συναρτήσεις μεταφοράς του πλοίου, ο σερβομηχανισμός των πτερυγίων και τα ίδια τα πτερύγια προσδιορίζονται ουσιαστικά για ένα δεδομένο σχέδιο. Η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος ελέγχου των πτερυγίων είναι ρυθμιζόμενη και πρέπει να ρυθμίζεται έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ότι, η ροπή που παράγεται από τα πτερύγια να αντιτίθεται γενικά, στην ροπή που δημιουργείται από τα κύματα.

3.3 Παθητικές δεξαμενές

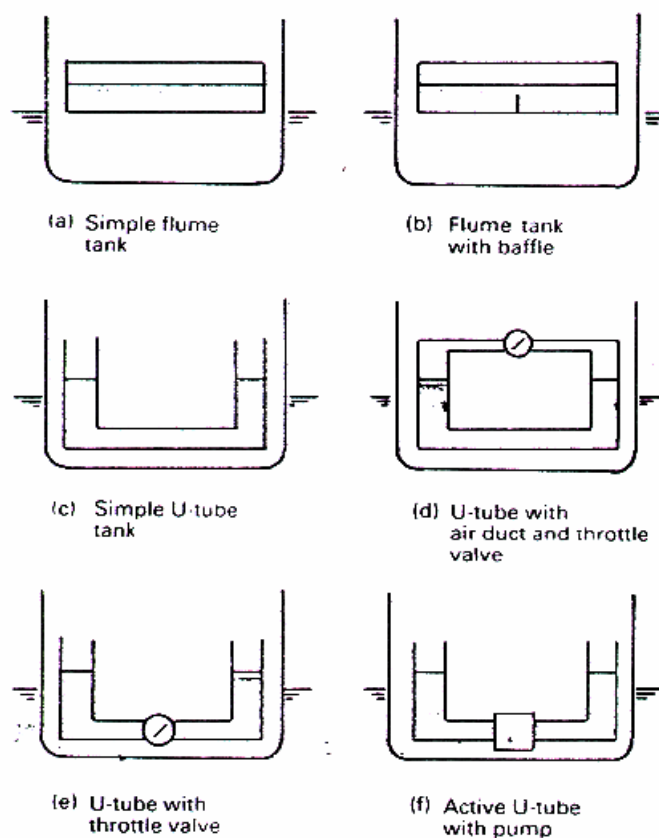
Γενικές αρχές και τύποι παθητικών δεξαμενών

Το υγρό σε μια μερικώς γεμάτη δεξαμενή, μετακινείται προς τα πίσω και προς τα εμπρός κατά μήκος της δεξαμενής, καθώς το πλοίο βρίσκεται σε διατοιχισμό. Το βάρος του κινούμενου υγρού μπορεί να ασκήσει μια ροπή διατοιχισμού στο πλοίο, και με κατάλληλη σχεδίαση να προκαλέσει απόσβεση του διατοιχισμού. Στο σχήμα 3.14 φαίνεται η επιθυμητή ροπή του νερού σε σχέση με την κίνηση διατοιχισμού του πλοίου και μπορεί ναδειχθεί ότι απαιτούμε η κίνηση του υγρού να προηγείται της γωνίας διατοιχισμού κατά 90° έτσι ώστε να είναι σε φάση με την ταχύτητα διατοιχισμού.



Σχήμα 3.14

Στο σχήμα 3.15 παρουσιάζονται μερικοί τύποι παθητικών δεξαμενών που χρησιμοποιούνται σήμερα. Ο πιο απλός τύπος είναι οι δεξαμενές με ελεύθερη επιφάνεια, οι οποίες είναι ορθογώνιες και εκτείνονται κατά το μήκος του πλοίου. Μερικές φορές ασκείται περιορισμένος έλεγχος στην κίνηση του υγρού εγκαθιστώντας μια ρυθμιστική βαλβίδα στο κέντρο της δεξαμενής.



Σχήμα 3.15 : Τύποι παθητικών δεξαμενών

Δεξαμενές τύπου U έχουν επίσης τοποθετηθεί σε αρκετά πλοία. Στην περίπτωση αυτή η ελεύθερη επιφάνεια περιορίζεται στις δύο στήλες της δεξαμενής που συνδέονται με έναν οριζόντιο αγωγό. Οι κορυφές των κατακόρυφων στηλών πρέπει να είναι ανοιχτές στην ατμόσφαιρα ή θα πρέπει να είναι συνδεδεμένες με έναν οριζόντιο αγωγό αέρα. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να τοποθετηθεί μια βαλβίδα ρύθμισης της ροής για τον έλεγχο των κινήσεων του υγρού. Κάποιες σχεδιάσεις συμπεριλαμβάνουν βαλβίδα ρύθμισης της ροής ή αντλία (throttle valve) στον πυθμένα του αγωγού.

Οι παθητικές δεξαμενές λειτουργούν ικανοποιητικά στις μικρές ταχύτητες αλλά δεν είναι συνήθως τόσο αποτελεσματικές όσο τα καλά σχεδιασμένα ενεργά πτερύγια στις υψηλές ταχύτητες. Για το λόγο αυτό συχνά τοποθετούνται σε σκάφη όπως τα ερευνητικά τα οποία τον περισσότερο καιρό βρίσκονται σε άσχημες καιρικές συνθήκες.

Το πλεονέκτημα των δεξαμενών είναι ότι δεν έχουν κινούμενα μέρη (εκτός από την αντλία ή την βαλβίδα ελέγχου της ροής) και απαιτούν λίγη συντήρηση. Επίσης έτσι αποφεύγεται και το κόστος της αύξησης της πρόσθετης αντίστασης λόγω των πτερυγίων και των παρατροπιδίων. Το μειονέκτημά τους είναι ότι καταλαμβάνουν υπολογίσιμο όγκο του πλοίου, αλλά υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί πόσιμο νερό ή καύσιμο σαν το ενεργό υγρό της δεξαμενής οπότε η απώλεια όγκου να μην είναι σημαντική. Η βέλτιστη τοποθέτηση τους ψηλά στο πλοίο συχνά δυσχεραίνει την πρόσβαση κατά μήκος του πλοίου.

Σημαντικό μειονέκτημα των παθητικών δεξαμενών είναι ότι οι ελεύθερες επιφάνειες μειώνουν το μετακεντρικό ύψος όποτε η ευστάθεια σε διατοιχισμό μειώνεται. Σαν συμπέρασμα μπορούμε να πούμε ότι όλες οι δεξαμενές ενισχύουν το διατοιχισμό στις μικρές συχνότητες. Σε μερικές περιπτώσεις αυτή η ενίσχυση μπορεί να αποτελέσει σοβαρό πρόβλημα, οπότε και είναι απαραίτητο να απενεργοποιήσουμε τη δεξαμενή αδειάζοντάς την ή γεμίζοντας τη πλήρως. Αυτό χρειάζεται αρκετό χρόνο και έτσι οι παθητικές δεξαμενές δεν είναι κατάλληλες για πλοία που απαιτείται να αλλάζουν πορεία συχνά (πολεμικά πλοία).

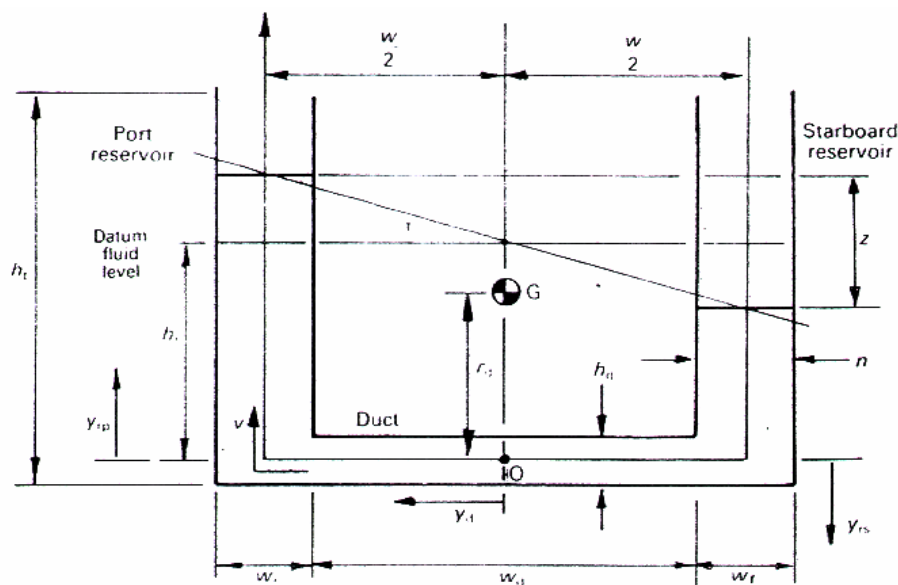
Θεωρία για τις δεξαμενές τύπου U

Παρά τη προφανή απλότητα των δεξαμενών ελεύθερης επιφάνειας δεν υπάρχει επαρκής θεωρία για την πρόβλεψη της απόδοσης τους. Ο Stigter (1966) ανέπτυξε μια θεωρία για τις παθητικές δεξαμενές τύπου U και μια τροποποιημένη έκδοση αυτής παραθέτεται στην συνέχεια.

1. Εξίσωση κίνησης του ρευστού στη δεξαμενή

Στο σχήμα 3.16 φαίνεται μια σχηματική παράσταση παθητικής δεξαμενής τύπου U. Η δεξαμενή αποτελείται από δύο δοχεία - αποθήκες που συνδέονται με αγωγό σταθερής ορθογωνικής διατομής. Το μήκος της δεξαμενής είναι x_i μέτρα. Απαιτούμε να προσδιορίσουμε τις κινήσεις του υγρού μέσα στη δεξαμενή κάτω από την επίδραση των κινήσεων του πλοίου. Αυτό θα αναλυθεί κάνοντας χρήση του συστήματος που φαίνονται

στο σχήμα 3.16. Το σημείο αναφοράς O βρίσκεται στο μέσο του αγωγού σύνδεσης, ενώ ο άξονας Y είναι κατά μήκος του αγωγού και κατά το ύψος των δοχείων. Η ταχύτητα της ροής κατά μήκος της θετικής κατεύθυνσης Y είναι v (m/sec). Τρεις επιπλέον άξονες χρησιμοποιούνται : y_d με αρχή το σημείο O και είναι παράλληλος στον αγωγό, με θετική φορά προς τα αριστερά, y_{tp} και y_{rs} με αρχή στο διαμήκη άξονα του αγωγού και παράλληλοι στα δοχεία, όπως φαίνεται στο σχήμα. Με n συμβολίζεται το πλάτος της δεξαμενής κάθετα στον άξονα Y . Πρέπει να σημειωθεί ότι η μεταβλητή n έχει διαφορετικές τιμές h_d πάνω στον αγωγό και w_r πάνω στα δοχεία.



Σχήμα 3.16 : Σύστημα αξόνων και διαστάσεις δεξαμενής

Υποθέτουμε ότι δεν υπάρχει ροή στη διεύθυνση n και οι κινήσεις μιας μοναδιαίας μάζας (ενός τόνου) υγρού στην δεξαμενή, μπορούν να περιγραφούν από την απλοποιημένη εξίσωση του Euler :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial y} = Y - \frac{1}{\rho_t} \frac{\partial P}{\partial y} \quad (3.16)$$

όπου Y η εξωτερική δύναμη ανά μονάδα μάζας και ρ_t η πυκνότητα του ρευστού στην δεξαμενή.

Τώρα υποθέτουμε ότι ο αγωγός και τα δοχεία είναι σταθερής διατομής οπότε μπορούμε να γράψουμε : $\frac{\partial u}{\partial y} = 0$, η οποία ισχύει παντού εκτός από τα σημεία διασταύρωσης του αγωγού και των δοχείων. Αμελώντας τις επιδράσεις των ενώσεων αυτών η εξίσωση 3.16 μετασχηματίζεται :

$$\frac{\partial v}{\partial t} = Y - \frac{1}{\rho_l} \frac{\partial P}{\partial y} \quad (3.18)$$

και επειδή έχουμε δύο μεταβλητές οι παράγωγοι γίνονται διαφορικά :

$$\frac{dv}{dt} = Y - \frac{1}{\rho_l} \frac{dP}{dy} \quad (3.19)$$

Αν η υψομετρική διαφορά του υγρού στα δύο δοχεία είναι z μέτρα η ταχύτητα σε κάθε δοχείο δίνεται ως εξής :

$$v_r = \frac{d}{dt} \left(\frac{z}{2} \right) = \frac{w\dot{\tau}}{2} \text{ m/sec} \quad (3.20)$$

όπου τ , είναι η γωνία της δεξαμενής, η οποία υποτίθεται ότι είναι μικρή, και

$$w = w_d + w_r \text{ m}$$

οπότε η ταχύτητα σε οποιοδήποτε σημείο της δεξαμενής είναι :

$$v = \frac{w_r v_r}{n} = \frac{w_r w \dot{\tau}}{2n} \text{ m/sec} \quad (3.21)$$

Η εξωτερική δύναμη Y ανά μονάδα μάζας αντισταθμίζεται από τις συμβολές των επιταχύνσεων που αναπτύσσονται στη δεξαμενή και από τις δυνάμεις τριβής που προέρχονται από τις απώλειες λόγω της βαλβίδας ρυθμίσεως της ροής. Οι συμβολές αυτές περιγράφονται και είναι οι εξής :

α) Ο παράγοντας της επιτάχυνσης της βαρύτητας κατά μήκος της y κατεύθυνσης

$$-g \cos \varphi_1 \text{ m/sec}^2 \quad (3.22)$$

β) Η επιτάχυνση που οφείλεται στην επιτάχυνση διατοιχισμού

$$-r\ddot{x}_4 \cos(\varphi_2 - \frac{\pi}{2}) = -r\ddot{x}_4 \sin \varphi_2 \text{ m/sec}^2 \quad (3.23)$$

γ) Ο συντελεστής της τοπικής εγκάρσιας επιτάχυνσης κατά την y κατεύθυνση

- στον αγωγό $Y_{LA} = \ddot{s}_2 \cos x_4 \cong \ddot{s}_2 \text{ m/sec}^2 \quad (3.24)$

- στα δοχεία $Y_{LA} = \ddot{s}_2 \sin x_4 \cong 0 \text{ m/sec}^2 \quad (3.25)$

με την υπόθεση ότι $\ddot{s}_2$ και x_4 έχουν μικρές τιμές.

δ) Οι δυνάμεις τριβής ή δυνάμεις απόσβεσης. Αν και αυτές αναμένεται να είναι ανάλογες με το τετράγωνο της τοπικής ταχύτητας είναι βολικό να υποθέσουμε ότι η απόσβεση είναι γραμμική και ανάλογη με την ταχύτητα v . Εάν το μήκος της δεξαμενής x_t είναι αρκετά μεγαλύτερο από την κάθετη διάσταση n μπορεί ναδειχθεί ότι η δύναμη τριβής ανά μονάδα μάζας είναι προσεγγιστικά :

$$-\frac{qu}{n} \text{ kN/ton,}$$

όπου q είναι ένας συντελεστής αντίστασης που εκτιμάται ή προσδιορίζεται πειραματικά.

Η εξίσωση 3.19 τότε γίνεται :

$$\frac{w_r w \ddot{t}}{2n} + \frac{q w_r w \dot{t}}{2n^2} + g \cos \varphi_1 + r \ddot{x}_4 \sin \varphi_2 - Y_{LA} = -\frac{1}{\rho_t} \frac{dP}{dy} \text{ m/sec}^2 \quad (3.26)$$

Στην συνέχεια ολοκληρώνουμε την παραπάνω εξίσωση λαμβάνοντας ως προς y που αποκτάται από μια εξίσωση που δίνει την κίνηση του υγρού στη δεξαμενή(μέσω της γωνίας τ) σαν συνάρτηση της διαφοράς πίεσης στην επιφάνεια των δύο δοχείων. Η ολοκλήρωση πρέπει να γίνει αυστηρά από την επιφάνεια του δεξιού δοχείου (αρνητικό y) έως την επιφάνεια του αριστερού (θετικό y). Πάντως, τα συνεχώς μεταβαλλόμενα επίπεδα του υγρού εισάγουν περιπλοκές και έτσι παίρνουμε μια προσεγγιστική λύση ολοκληρώνοντας μεταξύ των επιπέδων σε κάθε δοχείο. Επίσης υποθέτουμε ότι η οριζόντια επιτάχυνση $\ddot{s}_2$ δεν μεταβάλλεται σημαντικά κατά μήκος της διεύθυνσης y . Έτσι έχουμε :

$$\frac{\rho_t w_r w I_1 \ddot{t}}{2} + \frac{\rho_t q w_r w I_2 \dot{t}}{2} + \rho_t g I_3 + \rho_t I_4 \ddot{x}_4 + \rho_t \ddot{s}_2 I_5 = P_s - P_p \text{ kN/m}^2 \quad (3.27)$$

όπου,

$$I_1 = \int_{\tan k} \frac{dy}{n} = \int_{-w/2}^{w/2} \frac{dy_d}{h_d} + \int_{-h_r}^0 \frac{dy_{rs}}{w_r} + \int_0^{h_r} \frac{dy_{rp}}{w_r} = \frac{w}{h_d} + \frac{2h_r}{w_r} \quad (3.28)$$

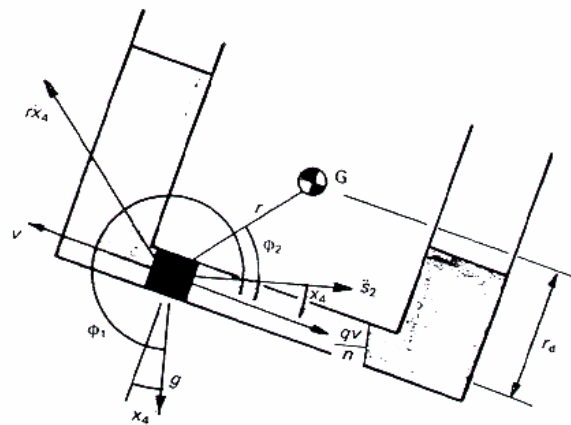
$$I_2 = \int_{\tan k} \frac{dy}{n^2} = \int_{-w/2}^{w/2} \frac{dy_d}{h_d^2} + \int_{-h_r}^0 \frac{dy_{rs}}{w_r^2} + \int_0^{h_r} \frac{dy_{rp}}{w_r^2} = \frac{w}{h_d^2} + \frac{2h_r}{w_r^2} \quad (3.29)$$

$$I_3 = \int_{\tan k} \cos \varphi_1 dy = x_4 \int_{-w/2}^{w/2} dy_d - \int_{-h_r}^0 dy_{rs} + \int_0^{h_r} dy_{rp} = w x_4 \text{ m} \quad (3.30)$$

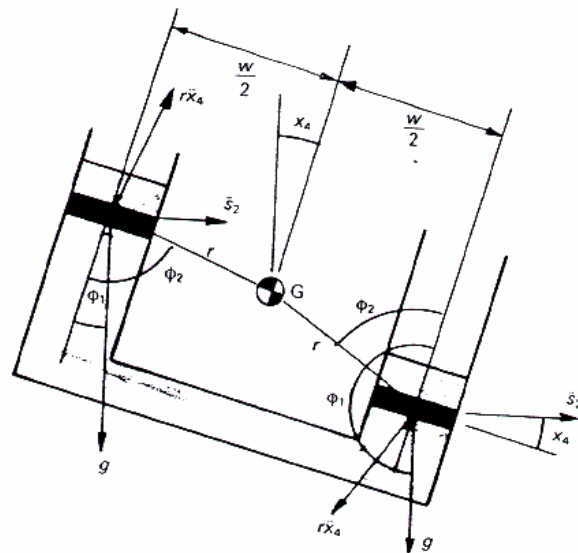
$$I_4 = \int_{\tan k} r \sin \varphi_2 dy = \int_{-w/2}^{w/2} r_d dy_d + \int_{-h_r}^0 \frac{w}{2} dy_{rs} + \int_0^{h_r} \frac{w}{2} dy_{rp} = w(r_d + h_r) \text{ m} \quad (3.31)$$

$$I_5 = - \int_{\text{duct}} dy = - \int_{\text{duct}} dy_d = \int_{-w/2}^{w/2} dy_d = -w \quad (3.32)$$

όπου $\int_{\tan k}$ είναι το ολοκλήρωμα κατά μήκος του άξονα y για κάθε επίπεδο από το δεξιό δοχείο έως το επίπεδο του αριστερού, και το ολοκλήρωμα $\int_{\text{duct}}$ αναφέρεται στον αγωγό. Οι γωνίες ϕ_1 και ϕ_2 προσδιορίζονται για τον αγωγό και τα δοχεία από το σχήμα 3.17.



(a)



Σχήμα 3.17: Εξωτερικές δυνάμεις εξασκούμενες σε μοναδιαία μάζα

α) στον αγωγό και β) στις δεξαμενές

Οι υδροστατικές πιέσεις σε κάθε επίπεδο στα δοχεία δίνονται από την σχέση :

$$P_s = -P_p = -\rho_t g \frac{w}{2} \tau \text{ kN/m}^2 \quad (3.33)$$

ως προς την ατμοσφαιρική πίεση.

Η εξίσωση (3.27), μπορεί να διατυπωθεί σαν μια σχέση που δίνει την κίνηση του ρευστού στη δεξαμενή σαν συνάρτηση της ροπής που παράγεται από το ίδιο το υγρό, εάν πολλαπλασιαστεί με τη ροπή της επιφάνειας των δοχείων : $\frac{w w_r x_t}{2} \text{ m}^3$.

Με τη χρήση της σχέσης :

$$S_2 = x_2 - x_{B3} x_4 + x_{B1} x_6 \text{ (θετικά προς τα δεξιά)}$$

,οποία δίνει την εγκάρσια μετακίνηση ενός σημείου ($x_{B1} x_{B2} x_{B3}$), υπολογίζεται η οριζόντια επιτάχυνση που παράγεται από τη δεξαμενή που βρίσκεται σε απόσταση x_{B1} μέτρα μπροστά από το κέντρο βάρους και έτσι έχουμε την εξίσωση :

$$a_{\tau 2} \ddot{x}_2 + a_{\tau 4} \ddot{x}_4 + c_{\tau 4} \dot{x}_4 + a_{\tau 6} \ddot{x}_6 + a_{\tau \tau} \ddot{\tau} + b_{\tau \tau} \dot{\tau} + c_{\tau \tau} \tau = 0 \quad (3.34)$$

όπου οι συντελεστές προσδιορίζονται ακολούθως :

$$a_{\tau 2} = -Q_t \text{ kN m / (rad/sec}^2) \quad (3.35)$$

$$a_{\tau 4} = Q_t (r_d + h_r) \text{ kN m / (rad/sec}^2) \quad (3.36)$$

$$c_{\tau 4} = Q_t g \text{ kN / rad} \quad (3.37)$$

$$a_{\tau 6} = -Q_t x_{B1} \text{ kN m / (rad/sec}^2) \quad (3.38)$$

$$a_{\tau \tau} = Q_t w_r \left(\frac{w}{2h_d} + \frac{h_r}{w_r} \right) \text{ kN m / (rad/sec}^2) \quad (3.39)$$

$$b_{\tau \tau} = Q_t q w_r \left(\frac{w}{2h_d^2} + \frac{h_r}{w_r^2} \right) \text{ kN m / (rad/sec)} \quad (3.40)$$

$$c_{\tau \tau} = Q_t g = c_{\tau 4} \text{ kN m / rad} \quad (3.41)$$

$$\text{όπου } Q_t = \frac{\rho_t w_r w^2 x_t}{2} \text{ ton m} \quad (3.42)$$

1. Εξισώσεις κίνησης ενός πλοίου με παθητική αντιδιατοιχιστική δεξαμενή

Η γωνία της δεξαμενής τ μπορεί να θεωρηθεί σαν ένας πρόσθετος βαθμός ελευθερίας στις εξισώσεις κίνησης του πλοίου. Οι επιδράσεις της λαμβάνονται υπόψη εισάγοντας πρόσθετους όρους της μορφής : $a_{i\tau}\ddot{\tau}$, $b_{i\tau}\dot{\tau}$, $c_{i\tau}\tau$ ($i = 1,6$), στις εξισώσεις κίνησης.

Πολλοί από αυτούς τους συντελεστές είναι μηδέν. Ειδικότερα η δεξαμενή δεν έχει επίδραση στη διαμήκη οριζόντια ταλάντωση (surge), στην κατακόρυφη ταλάντωση (heave) και στον προνευτασμό (pitch), έτσι ώστε $a_{i\tau} = b_{i\tau} = c_{i\tau} = 0$ ($i = 1,3,5$).

Με απλή φυσική αιτιολόγηση, προκύπτει ότι μια σταθερή γωνία της δεξαμενής δεν μπορεί να προκαλέσει εγκάρσια δύναμη ή στροφική οριζόντια ροπή και ότι ο ρυθμός της μεταβολής της γωνίας της δεξαμενής, μπορεί να έχει μικρή ουσιαστική επίδραση.

Έτσι $b_{i\tau} = c_{i\tau} = 0$ ($i=2,6$).

Επιπλέον, τίθεται ότι ο ρυθμός αλλαγής της γωνίας της δεξαμενής έχει αμελητέα επίδραση στη ροπή του διατοιχισμού έτσι ώστε $b_{4\tau} = 0$. Οι εξισώσεις των οριζοντίων κινήσεων για ένα πλοίο που έχει παθητική δεξαμενή διαμορφώνονται ως εξής :

$$\text{sway (kN)} : \quad (3.43)$$

$$(m + a_{22})\ddot{x}_2 + b_{22}\dot{x}_2 + a_{24}\ddot{x}_4 + b_{24}\dot{x}_4 + a_{26}\ddot{x}_6 + b_{26}\dot{x}_6 + c_{26}x_6 + a_{2\tau}\ddot{\tau} = F_{w20} \sin(\omega_e t + \gamma_2)$$

$$\text{roll (kN m)} : \quad (3.44)$$

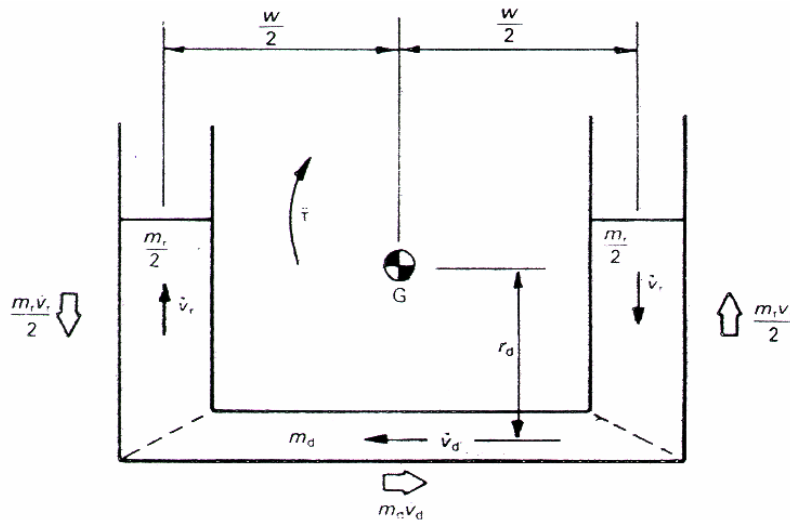
$$a_{42}\ddot{x}_2 + b_{42}\dot{x}_2 + (I_{44} + a_{44})\ddot{x}_4 + b_{44}\dot{x}_4 + c_{44}x_4 + a_{46}\ddot{x}_6 + b_{46}\dot{x}_6 + c_{46}x_6 - [a_{4\tau}\ddot{\tau} + c_{4\tau}\tau] = F_{w40} \sin(\omega_e t + \gamma_4)$$

$$\text{yaw (kN m)} : \quad (3.45)$$

$$a_{62}\ddot{x}_2 + b_{62}\dot{x}_2 + a_{64}\ddot{x}_4 + b_{64}\dot{x}_4 + (I_{66} + a_{66})\ddot{x}_6 + b_{66}\dot{x}_6 + c_{66}x_6 + a_{6\tau}\ddot{\tau} = F_{w60} \sin(\omega_e t + \gamma_6)$$

Η έκφραση μέσα στην αγκύλη [], είναι η σταθεροποιητική ροπή της δεξαμενής. Επίσης οι εξισώσεις στο κάθετο επίπεδο παραμένουν αμετάβλητες.

Στη συνέχεια προσδιορίζουμε τους συντελεστές $a_{2\tau}$, $a_{4\tau}$ και $a_{6\tau}$. Αυτοί μπορούν να θεωρηθούν σαν οι δυνάμεις εγκάρσιας ταλάντωσης και οι ροπές διατοιχισμού και στροφικής οριζόντιας ταλάντωσης, αντίστοιχα που απαιτούνται για τη διατήρηση της γωνιακής επιτάχυνσης της δεξαμενής σε επίπεδο $\ddot{\tau} = 1 \text{ rad/sec}^2$.



Σχήμα 3.18 : Επιταχύνσεις και αντιδράσεις του ρευστού σε παθητική αντιδιατοιχιστική δεξαμενή

Ας θεωρήσουμε τη δεξαμενή του σχήματος 3.18. Εάν η γωνιακή επιτάχυνση της δεξαμενής $\ddot{\epsilon}$ είναι σε rad/sec^2 , η επιτάχυνση του υγρού στα δοχεία και στον αγωγό δίνονται από τις σχέσεις :

$$\dot{v}_r = \frac{w\ddot{r}}{2}, \quad \dot{u}_d = \frac{w_r w\ddot{r}}{2h_d} \text{ m/sec}^2 \quad (3.46)$$

και η μάζα του ρευστού στα δοχεία και στον αγωγό είναι αντίστοιχα :

$$m_r = 2 \rho_t h_r w_r x_t \text{ και } m_d = \rho_t h_d w x_t \text{ tonnes} \quad (3.47)$$

Η οριζόντια δύναμη που πρέπει να ασκηθεί στη δεξαμενή για να αντισταθμίσει αυτές τις θετικές επιταχύνσεις κατά την φορά των δεικτών του ρολογιού δίνονται από την σχέση :

$$a_{2\tau}\ddot{\tau} = m_d \dot{v}_d = \frac{\rho_t w_r w_t^2 x_t \ddot{\tau}}{2} \text{ kN} \quad (3.48)$$

$$\text{έτσι ώστε } a_{2\tau} = Q_{\tau} = -a_{\tau 2} \text{ kN / (rad/sec}^2\text{)} \quad (3.49)$$

Εάν η δεξαμενή είναι τοποθετημένη x_{B1} μέτρα πλώραθεν του κέντρου βάρους η ροπή της οριζόντιας στροφικής ταλάντωσης είναι :

$$a_{6\tau} \ddot{\tau} = x_{B1} a_{2\tau} \ddot{\tau} \text{ kN m} \quad (3.50)$$

$$\text{έτσι ώστε } a_{6\tau} = Q_t x_{B1} = - a_{\tau 6} \text{ kN m / (rad/sec}^2\text{)} \quad (3.51)$$

Η ροπή διατοιχισμού που απαιτείται για να συντηρήσει την επιτάχυνση του υγρού στα δοχεία είναι :

$$\frac{m_r \dot{v}_r w}{2} = \frac{\rho_t h_r w_r w^2 x_t \ddot{\tau}}{2} \text{ kN m, προς τα αριστερά} \quad (3.52)$$

και η ροπή διατοιχισμού που απαιτείται για να συντηρήσει την επιτάχυνση του ρευστού στον αγωγό δίνεται :

$$m_d \dot{v}_d r_t = \frac{\rho_t r_d w_r w^2 x_t \ddot{\tau}}{2} \text{ kN m, προς τα αριστερά} \quad (3.53)$$

επομένως η συνολική ροπή υπολογίζεται :

$$a_{4\tau} \ddot{\tau} = \frac{\rho_t w_r w^2 x_t (h_r + r_d) \ddot{\tau}}{2} \text{ kN m, προς τα αριστερά} \quad (3.54)$$

και έτσι έχουμε :

$$a_{4\tau} = Q_t (h_r + r_d) = a_{\tau 4} \text{ kN m / (rad/sec}^2\text{)} \quad (3.55)$$

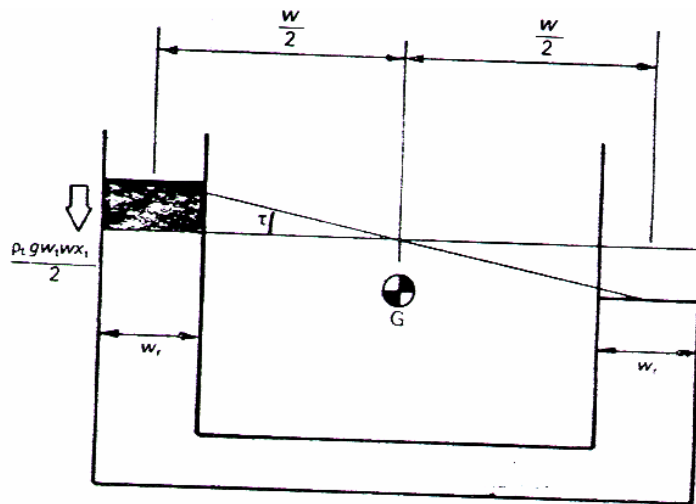
Τελικά υπολογίζουμε τον συντελεστή $c_{4\tau}$ θεωρώντας την ροπή που απαιτείται για να διατηρηθεί η δεξαμενή σε μια σταθερή θετική γωνία τ . Το βάρος του υγρού πάνω από το αρχικό επίπεδο του αριστερού δοχείου, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.19, είναι :

$$\frac{\rho_t g w_r w x_t \tau}{2} \text{ kN} \quad (3.56)$$

και ένα παρόμοιο βάρος εκτοπίζεται από το δοχείο στα δεξιά. Έτσι η απαιτούμενη ροπή είναι :

$$c_{4\tau} \tau = \frac{\rho_t g w_r w^2 x_t \tau}{2} \text{ kN m} \quad (3.57)$$

$$\text{και } c_{4\tau} = Q_t g = c_{\tau\tau} = c_{\tau 4} \quad (3.58)$$



Σχήμα 3.19 : Ροπή διατοχισμού λόγω της γωνίας της δεξαμενής

1. Φυσική συχνότητα της δεξαμενής και απόσβεση

Η κίνηση του ρευστού στην δεξαμενή περιγράφεται από την εξίσωση 3.34, η οποία μπορεί να ξαναγραφτεί :

$$-(a_{\tau 2} \ddot{x}_2 + a_{\tau 4} \ddot{x}_4 + c_{\tau 4} \dot{x}_4 + a_{\tau 6} \ddot{x}_6) = a_{\tau \tau} \ddot{\tau} + b_{\tau \tau} \dot{\tau} + c_{\tau \tau} \tau \text{ kN m} \quad (3.59)$$

Η εξίσωση αυτή έχει την ίδια μορφή με την εξίσωση που περιγράφει την κίνηση ενός δευτεροτάξιου συστήματος μάζας – ελατηρίου με απόσβεση:

$$a\ddot{x} + b\dot{x} + cx = F \text{ kN}$$

με την δεξιά πλευρά να παρέχει τη διέγερση στην δεξαμενή από το πλοίο. Η ιδιοσυχνότητα της δεξαμενής προκύπτει από την σχέση :

$\omega_* = \sqrt{\frac{c}{a}}$ η οποία με βάση τις εξισώσεις (3.39) και (3.40) γίνεται :

$$\omega_{*t} = \sqrt{\frac{c_{\tau\tau}}{a_{\tau\tau}}} = \sqrt{\frac{2gh_d}{ww_r + 2h_r h_d}} \text{ rad/sec} \quad (3.60)$$

Η αδιάστατη απόσβεση της δεξαμενής ή ο συντελεστής απόσβεσης δίνεται από την σχέση:

$$\eta = \frac{b}{2\sqrt{ca}} \quad \text{η οποία διαμορφώνεται ως εξής :}$$

$$\eta_t = \frac{b_{\tau\tau}}{2\sqrt{c_{\tau\tau}a_{\tau\tau}}} \quad (3.61)$$

Ο συντελεστής απόσβεσης της δεξαμενής μπορεί να καθοριστεί με ένα απλό πείραμα αποσβενύμενου διατοιχισμού σε ένα σταθερό μοντέλο της δεξαμενής. Το πρότυπο θα πρέπει να είναι σε σαφώς μεγάλη κλίμακα έτσι ώστε οι ταλαντώσεις του ρευστού να μπορούν να παρατηρηθούν εύκολα. Το υγρό της δεξαμενής θα πρέπει να εκτοπίζεται αμέσως στη μια πλευρά της δεξαμενής και να ελευθερώνεται. Η απόσβεση στη συνέχεια των γωνιακών ταλαντώσεων της δεξαμενής πρέπει να καταγράφεται, οπότε ο συντελεστής απόσβεσης εκτιμάται από την σχέση :

$$\eta = \frac{1}{\pi} \log_e \frac{x_{0\zeta}}{x_{0(\zeta+1)}},$$

όπου $x_{0\zeta}$ και $x_{0(\zeta+1)}$ τα πλάτη της ταλάντωσης (κορυφή ακολουθούμενη από κοιλάδα ή αντίστροφα).

Ο διαστατός συντελεστής απόσβεσης της δεξαμενής δίνεται από την σχέση :

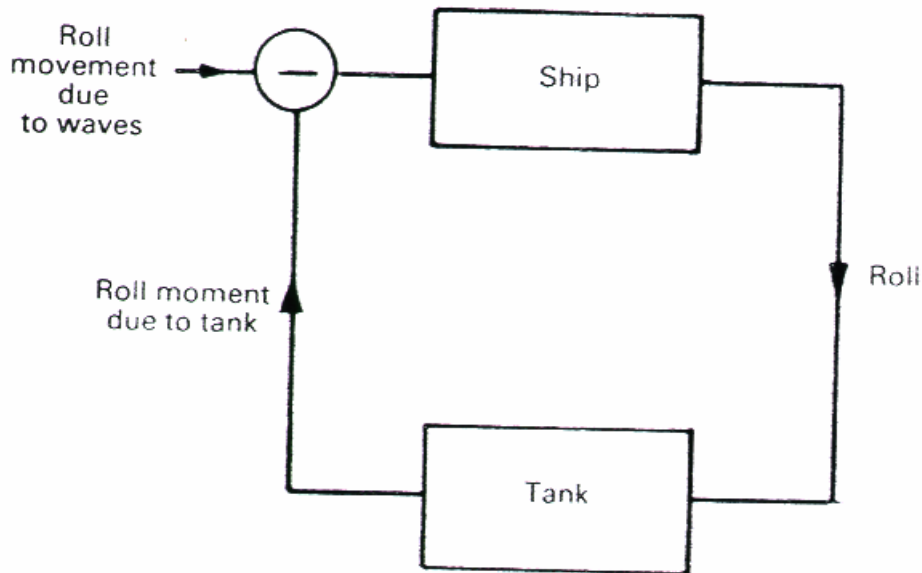
$$b_{\tau\tau} = \eta_t Q_t \sqrt{\left[g w_r \left(\frac{w}{h_d} + \frac{2h_r}{w_r} \right) \right]} = \frac{2\eta_t Q_t g}{\omega_{*t}} \text{ kN m / (rad /sec)} \quad (3.62)$$

1. Σχεδιασμός παθητικών σταθεροποιητικών δεξαμενών

A) Βασικές απαιτήσεις

Στο σχήμα 3.20 φαίνεται μια παράσταση ενός πλοίου με παθητική δεξαμενή. Οι βασικές απαιτήσεις για την βέλτιστη απόδοση της δεξαμενής είναι ακριβώς ίδιες με αυτές των ενεργών περυγίων. Απαιτείται και εδώ η φάση ανοιχτού βρόγχου να είναι μηδενική έτσι ώστε η ροπή σταθεροποίησης που παράγεται από τη δεξαμενή να είναι ακριβώς αντίθετη με την ροπή διατοιχισμού που παράγεται από τα κύματα. Όπως και προηγουμένως είναι δύσκολο να επιτευχθεί η επιθυμητή κατάσταση σε όλες τις συχνότητες ταυτόχρονα και έτσι επιλέγεται να βελτιστοποιηθεί η απόδοση στη φυσική συχνότητα διατοιχισμού. Η κίνηση του διατοιχισμού υστερεί της διέγερσης του κυματισμού κατά 90° στη φυσική συχνότητα, οπότε απαιτείται μια ροπή εξισορρόπησης που θα ισορροπήσει την κίνηση. Θα ήταν πιο επιθυμητό να ρυθμιζόταν η ροπή εξισορρόπησης έτσι ώστε να μεγιστοποιείται στην ιδιοσυχνότητα του διατοιχισμού.

Η ροπή διατοιχισμού που παράγεται από τη δεξαμενή μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση των εξισώσεων (3.34) και (3.44). Οι πράξεις απλοποιούνται αν αμελήσουμε τις επιδράσεις των επιταχύνσεων του διατοιχισμού και της εγκάρσιας στρωφικής ταλάντωσης.



Σχήμα 3.20 : Διάγραμμα ροής για πλοίο με παθητική σταθεροποιητική δεξαμενή

Υποθέτουμε ότι το πλοίο διεγείρεται σε διατοιχισμό από κανονικά κύματα, οπότε η κίνηση του διατοιχισμού δίνεται :

$$x_4 = x_{40} \sin(\omega_e t) \text{ rad}$$

και η επαγόμενη κίνηση της δεξαμενής :

$$\tau = \tau_0 \sin(\omega_e t + \varepsilon_{t1}) \text{ rad.}$$

Η ροπή σταθεροποίησης που ασκείται στο πλοίο είναι τότε :

$$F_{\tau 4} = F_{\tau 40} \sin(\omega_e t + \varepsilon_{t2}) \text{ kN m.}$$

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω εκφράσεις στις εξισώσεις 3.34 και 3.44 παίρνουμε την ροπή της δεξαμενής που αντιστοιχεί στην κίνηση του διατοιχισμού :

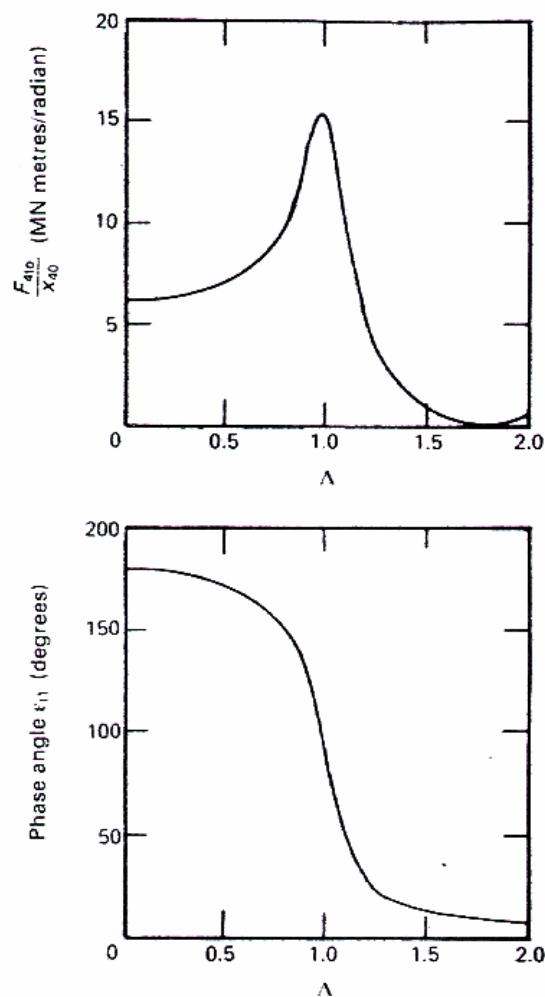
$$\frac{F_{\tau 40}}{x_{40}} = \frac{(c_{\tau 4} - \omega_e^2 a_{\tau 4})^2}{\sqrt{[(c_{\tau\tau} - \omega_e^2 a_{\tau\tau})^2 + b_{\tau\tau}^2 \omega_e^2]}} = \frac{Q_t g (1 - 2a_{\tau 4} / Q_t g)^2}{\sqrt{[(1 - \Lambda^2)^2 + 4\eta_t^2 \Lambda^2]}} \text{ kN m/rad} \quad (3.63)$$

και η φάση δίνεται από :

$$\tan \varepsilon_{t2} = \tan \varepsilon_{t1} = \frac{-b_{\tau\tau}\omega_e}{c_{\tau\tau} - \omega_e^2 a_{\tau\tau}} = \frac{-2\eta_t}{1 - \Lambda^2} \quad (3.64)$$

από όπου προκύπτει ότι η ροπή της δεξαμενής είναι συνέχεια σε φάση με την κίνηση.

Στο σχήμα 3.21 φαίνεται το πλάτος και η φάση της ροπής σταθεροποίησης και την φάση, όπως υπολογίζονται από τις παραπάνω εξισώσεις για μια δεξαμενή με τα εξής χαρακτηριστικά $w=20$ m, $w_r=3$ m, $h_r=5$ m, $h_d=1$ m, $h_t=10$ m και $\eta_t=0.1$, με συχνότητα συντονισμού $\omega_{*t}=0.529$ rad/sec.

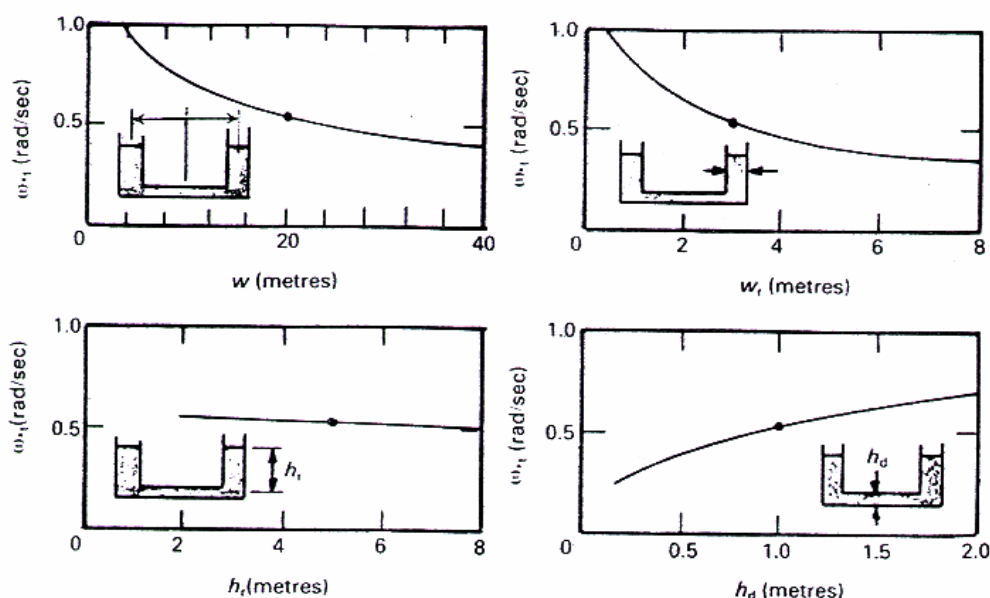


Σχήμα 3.21 : Χαρακτηριστική της ροπής σταθεροποίησης παθητικής δεξαμενής

Αυτό δείχνει ότι η ροπή σταθεροποίησης παίρνει σχεδόν πάντα τη μέγιστη τιμή στη φυσική συχνότητα της δεξαμενής και ότι η φάση σε αυτή τη συχνότητα είναι $\varepsilon_{il}=90^\circ$. Τελικά η βέλτιστη απόδοση της δεξαμενής μπορεί να εξασφαλιστεί αν κανονίσουμε τις φυσικές συχνότητες του πλοίου και της δεξαμενής έτσι ώστε να είναι ίδιες. Αυτό εξασφαλίζει ότι η ροπή σταθεροποίησης γίνεται μέγιστη και προηγείται της κίνησης διατοιχισμού κατά 90° στη συχνότητα συντονισμού.

Επίδραση των διαστάσεων της δεξαμενής στην ιδιοσυχνότητα

Η εξίσωση (3.60) δίνει την ιδιοσυχνότητα της δεξαμενής σαν συνάρτηση των διαστάσεων h_d , w , w_r και του βάθους του υγρού στη δεξαμενή h_r . Σαν εφαρμογή χρήσης της εξίσωσης φαίνεται στο σχήμα 3.22, η επίδραση της αλλαγής των διαστάσεων της δεξαμενής και του βάθους του υγρού στη δεξαμενή, στην φυσική συχνότητα. Τα γραφήματα αυτά αναφέρονται σε μια δεξαμενή με τα χαρακτηριστικά που δίνονται παραπάνω. Η φυσική συχνότητα μειώνεται με τα πλάτη w και w_r και αυξάνεται με το βάθος του αγωγού h_d . Πάντως, η ιδιοσυχνότητα είναι αρκετά αναισθητή με το βάθος του υγρού της δεξαμενής h_r . Επομένως έχει μικρή σημασία η ρύθμιση της φυσικής συχνότητας της δεξαμενής μετά την κατασκευή και τοποθέτηση στο πλοίο.



Σχήμα 3.22

Βάθος υγρού και μέγιστη γωνία διατοιγισμού δεξαμενής

Πρακτικά το βάθος h_r θα πρέπει να επιλεγεί έτσι ώστε να δίνει ένα επίπεδο αναφοράς του υγρού μέχρι το μέσο του κάθε δοχείου. Αυτό δίνει το μέγιστο πλάτος της κίνησης του ρευστού και μεγιστοποιεί την παραγόμενη ροπή σταθεροποίησης. Η μέγιστη δυνατή γωνία δεξαμενής δίνεται από την σχέση :

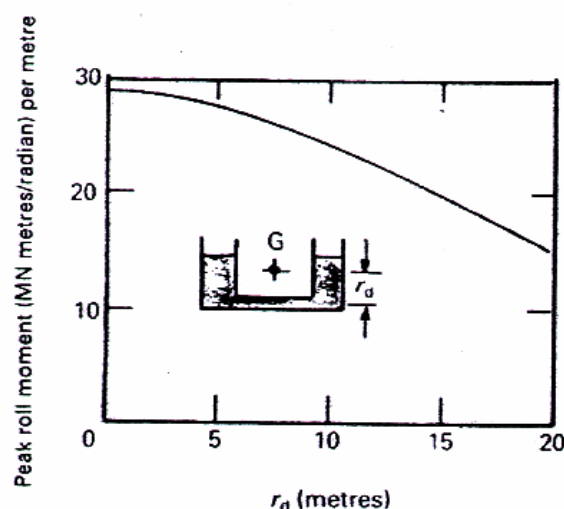
$$\tan \tau_{\max} = \frac{h_r - h_d}{w} \quad (3.65)$$

Μέγιστη ροπή σταθεροποίησης

Η ροπή σταθεροποίησης που παράγεται στη φυσική συχνότητα διατοιγισμού δίνεται από την σχέση (3.63) θέτοντας $\Lambda=1$ οπότε :

$$\frac{F_{\tau 40}}{x_{40}} = \frac{Q_t g (1 - 2a_{\tau 4} / Q_t g)^2}{2\eta_t} \text{ kN m/rad} \quad (3.66)$$

Όπως έχουμε δείξει μέχρι τώρα η φυσική συχνότητα προσδιορίζεται από τις κύριες διαστάσεις της δεξαμενής h_d , w , w_r . Έτσι η απαιτούμενη μέγιστη ροπή σταθεροποίησης επιτυγχάνεται κυρίως επιλέγοντας κατάλληλες τιμές για τις υπόλοιπες παραμέτρους ρ_t , x_t , η_t και r_d . Η ροπή σταθεροποίησης αυξάνεται με την πυκνότητα του υγρού ρ_t και το μήκος της δεξαμενής x_t .



Σχήμα 3.23 : Επίδραση της θέσης της δεξαμενής στη μέγιστη ροπή σταθεροποίησης

Στο σχήμα (3.23) φαίνονται οι διακυμάνσεις της μέγιστης ροπής ανά μονάδα μήκους της δεξαμενής με την κατακόρυφη θέση του αγωγού ως προς το κέντρο βάρους του πλοίου, για μια δεξαμενή με ενδεικτικές διαστάσεις που έχουν αναφερθεί προηγουμένως. Από το σχήμα αυτό προκύπτει ότι η δεξαμενή είναι περισσότερο αποτελεσματική εάν τοποθετηθεί ψηλά στο πλοίο.

Απώλεια μετακεντρικού ύψους

Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως ένα μειονέκτημα των παθητικών δεξαμενών είναι η εγγενής απώλεια ευστάθειας σε διατοιχισμό, λόγω της επίδρασης των ελευθέρων επιφανειών. Εάν θεωρήσουμε τη συμπεριφορά ενός πλοίου σε διατοιχισμό σε μηδενική συχνότητα τότε με βάση την σχέση 18.59, έχουμε :

$$c_{44} x_4 - c_{4\tau} \tau = F_4 \text{ kN m ,}$$

όπου F_4 είναι μια σταθερή εφαρμοζόμενη ροπή διατοιχισμού. Δεδομένου ότι η γωνία είναι από την $\tau = -x_4$ και με χρήση των εξισώσεων :

$$C_{44} = mg\overline{GM}_s \text{ kN m /rad και } 18.64?? \text{ υπολογίζουμε :}$$

$$mg\overline{GM}_s (1 - \mu_t) x_4 = F_4 \text{ kN m} \quad (3.67)$$

όπου μ_t είναι η κλασματική απώλεια του μετακεντρικού ύψους :

$$\mu_t = \frac{Q_t}{m\overline{GM}_s} \quad (3.68)$$

Η απώλεια αυτή είναι σαφώς ανεπιθύμητη και συνήθως ο συντελεστής μ_t περιορίζεται στην τιμή 0.25.

Μάζα συνεργαζόμενου υγρού

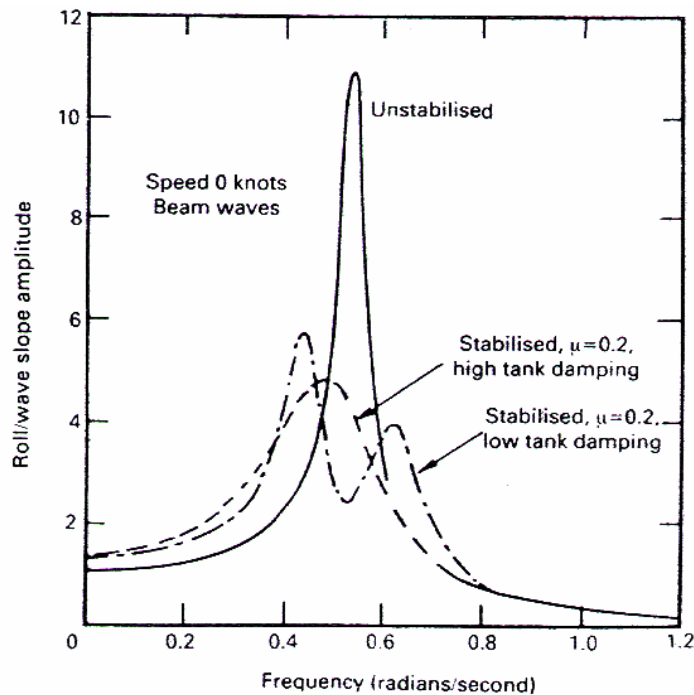
Η μάζα του υγρού στην δεξαμενή δίνεται από τη σχέση :

$$m_t = \rho_t x_t (w h_d + 2 h_r w_r) \text{ tn} \quad (3.69)$$

και βρίσκεται συνήθως ένα ικανοποιητικό επίπεδο σταθεροποίησης, εάν η μάζα m_t είναι 1-5% της μάζας του πλοίου.

Απόσβεση δεξαμενής

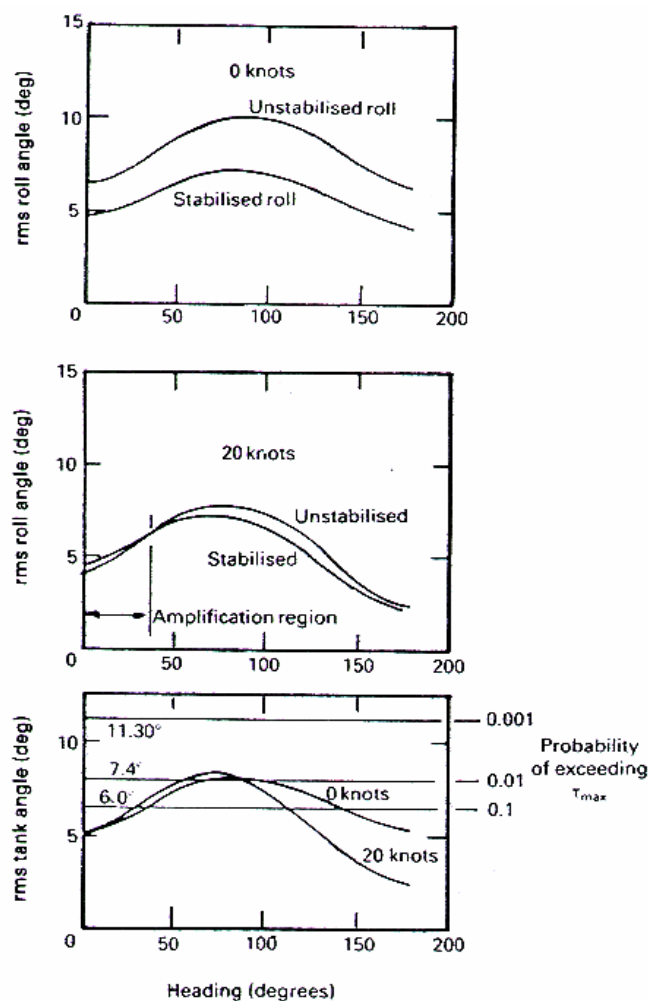
Η απόσβεση της δεξαμενής μπορεί να ρυθμιστεί με ένα διάφραγμα ή μια βαλβίδα ρυθμίσεως της παροχής που τοποθετείται στον αγωγό. Στο σχήμα 3.24 παρουσιάζεται η επίδραση της αύξησης της απόσβεσης στην συνάρτηση μεταφοράς του διατοιχισμού, για ένα πλοίο σε καθαρά πλευρικούς κυματισμούς με μηδενική ταχύτητα. Έχοντας χαμηλή απόσβεση διατοιχισμού η κορυφή της συνάρτησης απόκρισης στη φυσική συχνότητα περιορίζεται σημαντικά, αλλά αυτό έχει ως συνέπεια της εμφάνισης κορυφών συντονισμού σε ψηλότερες και χαμηλότερες συχνότητες. Αυτό δηλώνει ότι η δεξαμενή θα ενισχύει τις κινήσεις στις παραπάνω συχνότητες και πιθανόν να οδηγήσει σε συνολική αύξηση του διατοιχισμού, ανάλογα βέβαια και με το σχήμα του φάσματος του κυματισμού. Οι κινήσεις πρέπει να εξαλείφονται ή τουλάχιστον να ελαττώνονται με την αύξηση της απόσβεσης της δεξαμενής. Οι συντονισμοί στις συχνότητες αυτές πρέπει να εξαλείφονται ή και περιορίζονται με αύξηση της απόσβεσης των δεξαμενών. Η κίνηση στις χαμηλές συχνότητες εξακολουθεί να ενισχύεται, αλλά αυτό είναι κοινό χαρακτηριστικό όλων των παθητικών δεξαμενών, καθώς η απώλεια μετακεντρικού ύψους εξασφαλίζει ότι η σταθεροποιημένη κίνηση διατοιχισμού σε μηδενικές συχνότητες, πάντα ξεπερνά την μη σταθεροποιημένη κίνηση διατοιχισμού.



Σχήμα 3.24 : Τυπική συνάρτηση μεταφοράς διατοιχισμού, όπου φαίνεται και η επίδραση της απόσβεσης διατοιχισμού από παθητικές δεξαμενές

Απόδοση των παθητικών δεξαμενών

Στο σχήμα 3.25 περιγράφεται η απόδοση μιας δεξαμενής που περιγράφηκε σε προηγούμενο εδάφιο, σε ένα πλοίο 4000 tn. Οι υπολογισμοί έγιναν για απώλεια ευστάθειας $\mu_t = 0.2$ και για μάζα δεξαμενής ίση με το 1.87% της μάζας του πλοίου. Σε μηδενική ταχύτητα η δεξαμενή δίνει μια χρήσιμη μείωση του διατοιχισμού σε όλες τις γωνίες συνάντησης. Αυτό συμβαίνει γιατί η ενυπάρχουσα απόσβεση του διατοιχισμού που οφείλεται στη γάστρα, στα παρατροπίδια και στα άλλα προσαρτήματα, είναι μικρή για χαμηλές ταχύτητες, και η απόσβεση που παράγεται από τη δεξαμενή δημιουργεί μια μεγάλη πρόσθετη συνεισφορά. Σε ταχύτητα 20 kn η υδροδυναμική απόσβεση είναι πολύ μεγαλύτερη και η συνεισφορά της δεξαμενής είναι σχετικά ασήμαντη. Έτσι είναι αδύνατο μέσω της δεξαμενής να επιτευχθεί αξιοσημείωτη μείωση στην κίνηση του διατοιχισμού.



Σχήμα 3.25 : Απόδοση παθητικών αντιδιατοιχιστικών δεξαμενών

Στο σχήμα 3.25 φαίνεται επίσης το κόστος της απώλειας σε ευστάθεια στις υψηλές ταχύτητες σε ακολουθούσες θάλασσες. Οι συχνότητες συνάντησης είναι τότε αρκετά μικρές και η δεξαμενή ενισχύει το διατοιχισμό. Ακόμη στο ίδιο σχήμα παριστάνεται γραφικά και η ρίζα της μέσης τετραγωνικής τιμής (rms) της κίνησης της δεξαμενής σε κάθε ταχύτητα. Η εξίσωση (3.65) δίνει την μέγιστη επιτρεπόμενη γωνία $\tau_{\max} = 24.2^\circ$. Οι rms τιμές των γωνιών της δεξαμενής που αντιστοιχούν σε διάφορες πιθανότητες υπερβαίνουν αυτό το επίπεδο, μπορεί να εκτιμηθούν από τον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 3.1) και έχουν σχεδιαστεί στο σχήμα 3.25.

Πιθανότητα υπέρβασης των 24.2°	rms της γωνίας δεξαμενής (deg)
0.1	11.3
0.01	7.4
0.001	6.0

Πίνακας 3.1

Τελικά η κίνηση της δεξαμενής είναι επαρκής να φτάσει στην κορυφή των δοχείων και του αγωγού μια φορά κάθε 100 ταλαντώσεις στη χειρότερη κατάσταση θάλασσας. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως ικανοποιητικό στην πράξη. Ένας πιο συχνός ρυθμός υπέρβασης θα μπορούσε να αχρηστεύσει τους υπολογισμούς που δεν λαμβάνουν υπόψη τέτοιους περιορισμούς στις σταθεροποιημένες δυνατότητες της δεξαμενής. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με την αύξηση του ύψους των δοχείων και το βάθος του εργαζόμενου υγρού.